

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DE ALGUNS ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A
ADERÊNCIA ENTRE GEOSSINTÉTICOS E DIFERENTES
MATERIAIS

NELSON PADRÓN SÁNCHEZ

ORIENTADOR: GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc
COORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-144/18

BRASÍLIA/DF: JULHO/2018

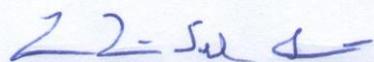
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACES
COM GEOSSINTÉTICOS

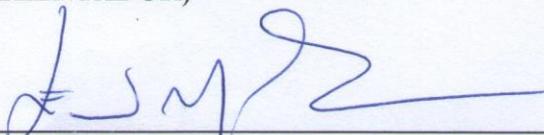
NELSON PADRÓN SÁNCHEZ

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:



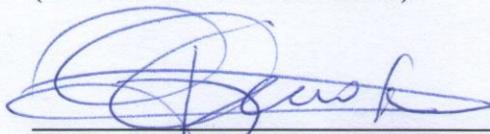
GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)



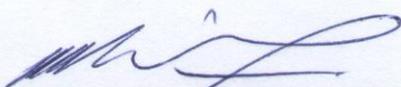
ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (ENC/UnB)
(COORIENTADOR)



LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



EDER CARLOS GUEDES DOS SANTOS, D.Sc. (EECA/UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)



ORÊNCIO MONJE VILAR, D.Sc. (EESC/USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 19 DE JULHO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

SÁNCHEZ, N.P.

Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais, 2018. xxii, 168p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2018).

Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. Geossintéticos | 2. Resistência de interface |
| 3. Ensaio de plano inclinado | 4. Ensaio de cisalhamento direto convencional |
| 5. Interação solo-geossintéticos | 6. Aterros sanitários |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SÁNCHEZ, N.P. (2018). Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais, Publicação G.TD-144/18, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Nelson Padrón Sánchez

TÍTULO DA TESE: Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais

GRAU / ANO: Doutor/2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Nelson Padrón Sánchez

Nazareno 354A altos entre Virtudes e San Pedro, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CEP: 50100. E-mail: nelsonunbpgg@gmail.com

Dedico o esforço deste trabalho à minha família e deixo ao leitor estas regras simples, desejando que auxiliem nas suas pesquisas.

1 - Questione a autoridade.

Nenhuma ideia é verdadeira só porque alguém disse, inclusive eu.

2 – Pense por si mesmo, questione-se.

3 - Não acredite em nada só porque você quer.

Acreditar em algo não faz com que seja verdade. Teste ideias pela prova obtida após a observação e experiências. Se uma ideia não passar por um teste bem elaborado, está errada! Esqueça.

4 - Siga a prova, aonde quer que ela o leve.

Se não houver prova, não julgue.

E talvez a regra mais importante de todas.

5 - Lembre-se, você pode estar errado.

Até os maiores cientistas já erraram em algumas coisas, Newton, Einstein e todos os outros grandes cientistas da História, todos cometeram erros. Mas é claro! Eles eram humanos. A Ciência é um jeito de não enganarmos a nós mesmos e aos outros...

Neil de Grasse Tyson (2014).

Série Cosmos: A Spacetime Odyssey. Capítulo 13. Minuto 38 em diante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, Paula, Aínda, Isaias e Juan, princípio de tudo. Em especial aos meus pais Lucrecia e Nelson Severino, e ao meu querido irmão Jelson, por me incentivarem a estudar desde pequeno e me ensinarem a fazer sempre meu melhor. À minha segunda família, que a cada dia cresce mais, por todo o apoio, amor e carinho. Em especial, Maria e Yordania.

À minha querida esposa Yanet, pelo amor, pela paciência infinita e pela ajuda incondicional sempre, mãe da minha maior incentivadora, Gabriela Luz.

Aos amigos e suas famílias de tantos anos, que ainda com a distância me acompanharam nesta aventura. Aos amigos que se tornaram minha família no Brasil, por tudo, em especial pelas palavras de ânimo nos momentos de escuridão, quando saíamos por um café, nos e-mails e, melhor ainda, nos bons churrascos. Erich, Carmen, Mundi, JJ Casamayor, Miriam, Mildey, Raydel - Elizabeth, Liosber, Yasletty, Yadian, Oisy – Elier, Noel-Yari, Carlos (Reca), Irvin, Renato, Ligier, Janny, Hans, Mauricio – Ailín, Lilian, Raimundo, Jaime, Ivonne, Raúl, Yadira, Yademis, Luciana – Juliano, Lidia, Viviane e Mahammed.

Aos professores Gregório, Hernán, Marcio, Luís Fernando e Juan Felix, pelos conselhos e, principalmente, pela amizade. Graças a pessoas como vocês levei melhor o fato de ser estrangeiro no Brasil.

Aos companheiros e professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, pela solidariedade e disponibilidade em ajudar sempre que necessário. Vocês têm sido ótimos companheiros e professores.

Aos companheiros de estudos que moraram no laboratório estes anos: J Burgos, Javier, Jaime, Heidy, Cristina, Jader, Nima, Rodrigo, Ana Carolina, Andrea, Chan, Andressa, Jeanet, Jawar e Michael (CR), pelas incontáveis ajudas no dia a dia.

Ao pessoal do laboratório de geotecnia, da portaria e de apoio, Alfredo Saimo, Jonas, Thiago, João, Gabriela, David e Dona Zelma.

Ao pessoal da Pós-Graduação de Engenharia Mecânica. Ao Mauricio, José e Gustavo. Aos professores Palloma Vieira Muterlle e Antônio Piratelli Filho, pela ajuda com a familiarização no estudo da rugosidade por meio de microscopia.

Ao meu orientador, professor Gregório, pela confiança, apoio e disponibilidade sempre, não só com os assuntos acadêmicos. Foi um grande aprendizado trabalhar com ele e desejo que essa parceria continue nos próximos anos.

Ao meu coorientador, professor Ennio, pela atenção e prestatividade, mesmo com a seta vermelha fora da primeira linha.

Aos professores que participaram da qualificação, pelos conselhos e revisões para melhorar a pesquisa (Eder, Newton, Luís Fernando, Ennio e Gregório).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro, e as empresas TDM, BIDIM, Nortene – Engepol, pelo fornecimento dos materiais geossintéticos e assistência técnica.

RESUMO

Tendo em vista uma necessidade cada vez maior de redução de impactos ambientais envolvendo a construção de obras geotécnicas, torna-se relevante o emprego de materiais geossintéticos. Especificamente na execução de aterros sanitários, o aumento da inclinação dos taludes e da profundidade das células contribuem para o incremento da instabilidade das massas de solo e dificultam a realização de soluções de impermeabilização das células. Nesse contexto, os geossintéticos são considerados uma boa solução para redução desses tipos de problemas. Neste trabalho é apresentado um estudo sobre alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais. Para isso, estudaram-se várias interfaces entre geotêxtil não tecido/geomembrana, solo/geomembrana, solo/geotêxtil não tecido, concreto fresco/geotêxtil não tecido e concreto fresco/geomembrana. Como materiais utilizados, foram empregados: (i) areia, (ii) dois geotêxteis não tecidos agulhados de diferente massa por área (300 g/m² e 800 g/m²), (iii) cinco geomembranas de 2 mm de espessura (4 de PEAD e 1 PEBDL), sendo uma lisa, três texturizadas de matriz balão e uma texturizada de matriz plana e (iv) concreto fresco com três abatimentos (40 mm, 60 mm e 80 mm). As interfaces foram testadas com ensaios de cisalhamento direto para áreas de contato quadradas (de lado 100 mm e de lado 300 mm); já a maior área, com dimensões 1920 mm x 470 mm (comprimento x largura), foi estudada por meio de ensaio de plano inclinado sobre base rígida. Nos ensaios foram empregados valores de tensões normais baixos (≤ 6 kPa) e altos (25, 50 e 100 kPa). Para as análises, foram definidas as características geométricas da microtopografia das geomembranas – por meio de microscópio digital –, quantificando a altura das asperezas e outros parâmetros de rugosidade para cada tipo de geomembrana. Como resultados, foram obtidas variações no comportamento resistente das interfaces, alcançando-se valores menores para a maior área de contato ensaiada. A resistência ao cisalhamento das interfaces foi maior com o aumento da altura das texturas e maior concentração (geomembranas de PEAD com matriz balão). Foi obtida uma aderência menor com o aumento do abatimento do concreto fresco. Nas interfaces com geotêxtil, a gramatura não influenciou significativamente nos valores do ângulo de atrito. Por outro lado, a caracterização microtopográfica mostrou diferenças significativas entre as geomembranas empregadas.

ABSTRACT

Considering an increasing need to reduce environmental impacts involving the construction of geotechnical works, the use of geosynthetic materials becomes relevant. Specifically, in the execution of landfills, increasing slope and cell depth contribute to increase the instability of soil masses and waterproofing solutions of cells. In this context, geosynthetics are considered a good solution to reduce these types of problems. This work presents a study of some aspects that influence the adhesion between geosynthetics and different materials. For this, several interfaces among non-woven geotextile/geomembrane, soil/geomembrane, soil/non-woven geotextile, fresh concrete/non-woven geotextile and fresh concrete/geomembrane were studied. The following materials were used: (i) sand, (ii) two needled nonwoven geotextiles of different mass per area (300 g/m² and 800 g/m²), (iii) five geomembranes with 2 mm of thick each (4 of HDPE and 1 of LLDPE), being one smooth, three textured by blown film and one textured by flat die matrix, and (iv) fresh concrete in three consistencies (40 mm, 60 mm and 80 mm). The interfaces were tested using direct shear tests for square contact areas of 100 mm side and 300 mm side, while the largest area with dimensions 1920 mm x 470 mm (length x width) was studied using inclined plane test on rigid base. In the tests, low values (≤ 6 kPa) and high values (25, 50 and 100 kPa) of confining stresses were employed. For the analysis, the geometric characteristics of the geomembrane microtopographies were defined using a digital microscope, quantifying the height of the asperities and other parameters of roughness for each type of geomembrane. As results were obtained variations in the resistant behavior of the interfaces, smaller for greater area of contact tested. The shear strength of the interfaces was higher with increasing height of the textures of higher concentration (HDPE geomembranes with blown film matrix). A minor adherence was obtained with the reduction of the consistency of fresh concrete. In the geotextile interfaces, the mass per area did not significantly influence the friction angle values. While the microtopographic characterization showed significant differences between the geomembranes employed.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	2
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.4. ESTRUTURA DA TESE	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. GEOSSINTÉTICOS E MATÉRIAS-PRIMAS.....	5
2.2. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS MAIS USADOS EM ATERROS SANITÁRIOS E CANAIS	6
2.2.1. GEOTÊXTIL	6
2.2.2. GEOMEMBRANA.....	7
2.3. GEOSSINTÉTICOS E SUA INTERAÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS E CANAIS	9
2.4. FORMAS DE INTERAÇÃO E RUPTURA IDEALIZADAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS INTERFACES	10
2.5. COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DAS INTERFACES	16
2.5.1. INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA.....	20
2.5.2. INTERFACES DOS GEOTÊXTEIS E GEOMEMBRANAS COM SOLO.....	23
2.5.3. RESISTÊNCIAS DE INTERFACE DE GEOTÊXTEIS E GEOMEMBRANAS COM CONCRETO	31
2.6. ANÁLISE DA ESCALA DOS ENSAIOS.....	34
2.7. CARACTERIZAÇÃO MICROTOPOGRÁFICA DA ASPEREZA EM GEOSSINTÉTICOS.....	38
2.7.1. TERMOS, DEFINIÇÕES E PARÂMETROS DA RUGOSIDADE.....	39
2.7.2. APLICAÇÕES DA MICROTOPOGRÁFICA DE SUPERFÍCIES AO ESTUDO DE INTERFACES COM GEOSSINTÉTICOS	46
3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS	50
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	50
3.1.1. SOLO.....	51
3.1.2. GEOMEMBRANAS	53
3.1.3. GEOTÊXTEIS	55
3.1.4. CONCRETO.....	56
3.2. EQUIPAMENTOS DE ENSAIO.....	57
3.2.1. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL	59

3.2.2. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO MÉDIO	60
3.2.3. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DE PLANO INCLINADO.....	61
3.2.4. EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DE GEOMEMBRANAS	63
3.3. METODOLOGIAS EMPREGADAS NOS ENSAIOS	64
3.3.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL	64
3.3.1.1. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDC EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO	65
3.3.1.2. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDC EM INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA	65
3.3.2. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	66
3.3.2.1. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDM EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO	66
3.3.2.2. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDM EM INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA	68
3.3.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO EM PLANO INCLINADO	70
3.3.3.1. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CPI EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO	70
3.3.3.2. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CPI EM INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA	71
3.3.3.3. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CPI EM INTERFACES CONCRETO/GEOSSINTÉTICO	73
3.3.4. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DE GEOMEMBRANAS.....	74
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE REPETIBILIDADE NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	80
4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM INTERFACES GEOTÊXTIL NÃO TECIDO /GEOMEMBRANA	81
4.2.1. ENSAIOS PARA BAIXAS TENSÕES NORMAIS	83
4.2.2. ENSAIOS PARA ALTAS TENSÕES NORMAIS	89
4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO	95
4.3.1. ENSAIOS PARA ALTAS TENSÕES NORMAIS	99
4.3.2. ENSAIOS PARA BAIXAS TENSÕES NORMAIS	105
4.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM INTERFACES CONCRETO EM ESTADO FRESCO/GEOSSINTÉTICO	107

4.5. INFLUÊNCIA DA MICROTOPOGRAFIA DAS GEOMEMBRANAS NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS INTERFACES..	111
4.5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MICROTOPOGRÁFICA 2D	112
4.5.2. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MICROTOPOGRÁFICA 3D	116
4.5.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS COM MÉTODOS 2D E 3D	121
4.5.4. INFLUÊNCIA DA TEXTURA DAS GEOMEMBRANAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS INTERFACES.....	124
4.5.4.1. INFLUÊNCIA DA R_c PARA AS INTERFACES GEOTÊXTIL E GEOMEMBRANA	126
4.5.4.2. INFLUÊNCIA DO V_{mc} NAS INTERFACES SOLO E GEOMEMBRANA	130
4.6. INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ÁREA DE CONTATO DAS INTERFACES NOS ENSAIOS	133
4.6.1. ITAC EM INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA.....	133
4.6.2. ITAC EM INTERFACES SOLO/SOLO.....	137
4.6.3. ITAC EM INTERFACES SOLO/GEOTÊXTIL NÃO TECIDO.....	137
4.6.4. ITAC EM INTERFACES SOLO/GEOMEMBRANA TEXTURIZADA	139
4.6.5. ITAC EM INTERFACES SOLO/GEOMEMBRANA LISA.....	140
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	142
5.1. CONCLUSÕES.....	142
5.1.1. ESTUDO DE INTERFACES DE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO/GEOMEMBRANA.....	142
5.1.2. ESTUDO DE INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO	143
5.1.3. ESTUDO DE INTERFACES CONCRETO EM ESTADO FRESCO/GEOSSINTÉTICO.....	144
5.1.4. CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MICROTOPOGRAFIA DAS GEOMEMBRANAS NO ÂNGULO DE ATRITO DE INTERFACES	145
5.1.5. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ÁREA DE CONTATO NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACES	145
5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
APÊNDICE: ENVOLTÓRIAS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO.....	155
A-1: ENVOLTÓRIAS PARA BAIXAS TENSÕES NORMAIS	155
A-2: ENVOLTÓRIAS PARA ALTAS TENSÕES NORMAIS	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Problemas de execução em canal de transposição de água (Bresciani, 2011).	2
Figura 2.1 Tipos de Geotêxteis: (a) Tecido; (b) Não tecido, agulhado e (c) Não tecido, termo soldado (Modificado - Martínez, 2010).	6
Figura 2.2. Tipos de Geomembranas – Ampliação de 10x: (a) lisa; (b) texturizada – matriz plana e (c) texturizada – matriz balão.....	7
Figura 2.3. Múltiplas aplicações de geossintéticos em projetos de aterros sanitários (Bouazza & Zornberg, 2014).	9
Figura 2.4. Canais para transporte de líquidos. (a) cobertura simples - impermeabilização com uma camada de geomembrana; (b) cobertura composta - impermeabilização utilizando um sanduíche de geomembrana, geotêxtil e concreto (Modificado - Koerner, 2000).	10
Figura 2.5. Mecanismo de interação em um aterro sanitário impermeabilizado (Modificado - Palmeira, 1987)	11
Figura 2.6. Categorias ou tipo de resultados que podem se obter durante o ensaio de plano inclinado (Modificado - Gourc et al. (1996): (a) Categoria 1; (b) Categoria 2 e (c) Categoria 3.....	17
Figura 2.7. Três formas para obtenção do melhor ajuste a uma linha reta (Modificado - Gourc et al. (1996). (a) Método 1, (b) Método 2 e (c) Método 3.	18
Figura 2.8. Diferentes fases do movimento da caixa superior, com o aumento da inclinação do plano inclinado (Modificado - Pitanga et al., 2009). (a) Fase 1, (b) Fase 2 e (c) Fase 3.	18
Figura 2.9. Mecanismo de interação da interface geotêxtil não tecido – geomembrana texturizada para baixo e alto valor de tensão normal (Modificado - Hebel et al., 2005).	21
Figura 2.10. Curvas típicas de cisalhamento para as interfaces geotêxtil/geomembrana lisa (Modificado - Kim, 2006).	22
Figura 2.11. Curvas típicas de cisalhamento para as interfaces geotêxtil/geomembrana texturizada. (Modificado - Kim, 2006).	23
Figura 2.12. Conceitualização de envoltória de interface de solo e geomembrana. (Modificado - Fleming et al., 2006)	27
Figura 2.13. Aspecto das geomembranas antes e depois do ensaio de cisalhamento (Modificado - Vangla & Gali, 2016a).	30
Figura 2.14. Aspecto geral das geomembranas após a colocação do concreto (da esquerda para a direita: baixa aspereza, lisa e de alta aspereza) (Abramento et al., 2010).	32

Figura 2.15. Envoltórias de ruptura para geomembrana de alta aspereza (laboratório e canal).	33
Figura 2.16. Aumento do ângulo de atrito de interface com o aumento da área de contato nos ensaios de plano inclinado (Modificado - Izgin & Wasti, 1998).	36
Figura 2.17. Resultado de ângulo de atrito de interface com o aumento da tensão normal (Modificado - Wasti & Özdüzgün, 2001).	36
Figura 2.18. Aumento do ângulo de atrito de pico e residual de interface com o aumento da área de contato nos ensaios de cisalhamento direto (Elaborado de - Hsieh & Hsieh, 2003).	37
Figura 2.19. Faixas aproximadas de operação dos equipamentos para medir topografia de superfícies (Modificado - Dove et al., 1996).	39
Figura 2.20. Composição da superfície (Modificado - Piratelli, 2011).	41
Figura 2.21. Comprimentos para a avaliação da rugosidade (Modificado – Marinho, 2000).	41
Figura 2.22. Altura dos elementos do perfil, exemplo de um perfil de rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002).	42
Figura 3.1. Curva da análise granulometria do solo utilizada nesta pesquisa e comparada com as curvas dos solos de pesquisas anteriores.	52
Figura 3.2. Ajuste linear do cisalhamento direto: (a) amostra menor e (b) amostra maior.	53
Figura 3.3. Geomembranas: (a) GMT1, (b) GMT2, (c) GMT3, (d) GMT4 e (e) GML1.	54
Figura 3.4. Geotêxteis não tecidos agulhados: (a) GNT1, (b) GNT2.	55
Figura 3.5. Equipamento dos ensaios de CDC.	59
Figura 3.6. Equipamento para os ensaios CDM.	61
Figura 3.7. Equipamento para os ensaios de PI: a) Visão geral e b) instrumentação empregada.	62
Figura 3.8. Blocos de concreto.	62
Figura 3.9. Microscópio confocal (Modificado - OLYMPUS, 2018).	64
Figura 3.10. Detalhe da fixação da geomembrana.	65
Figura 3.11. Detalhe da fixação do geotêxtil e a geomembrana.	66
Figura 3.12. Sistema de lubrificação da parede vertical de aço da caixa superior de cisalhamento.	67
Figura 3.13. Esquema de análise para determinação da correção pelo atrito da areia com a parede vertical da caixa superior (sem escala).	68

Figura 3.14. Fixação dos geossintéticos (sem escala). (a) Geossintéticos fixados, prontos para ensaio; (b) Geomembrana fixada; (c) Esquema de fixação dos geossintéticos no equipamento; (d) Face inferior da placa azul de aço com lixa colada.....	69
Figura 3.15. Realização dos ensaios de PI com base rígida em interface de solo/geotêxtil não tecido. (a) Fixação do geossintético; (b) Colocação de manta para evitar a queda de solo; (c) Colocação dos blocos de concreto; (d) Inclinação da rampa e cisalhamento. .	71
Figura 3.16. Fixação das amostras e colocação da tensão normal. (a) Esquema com secção da rampa mostrando a ancoragem do geotêxtil; (b) Foto da ancoragem do geotêxtil; (c) Transporte dos blocos; (d) Colocação dos blocos na sua posição na caixa.	72
Figura 3.17. Ensaio de CPI em interfaces com concreto. (a) Realização do Slump Test; (b) Medição do Abatimento; (c) Concreto na caixa; (d) Interface com geotêxtil após a ruptura; e (e) Interface com geomembrana lisa após a ruptura.	74
Figura 3.18. Esquema das direções assumidas com relação ao rolo das geomembranas.	75
Figura 3.19. Obtenção de perfis de rugosidade com microscópio: (a) Microtopografia 3D da GMT3 face inferior; (b) Geração dos perfis na GMT2 face superior, na direção da largura do rolo - direção X; (c) Perfil de rugosidade para o maior R_t dos dez perfis na direção X da GMT2 face superior; (d) Geração dos perfis na GMT2 face superior, na direção do comprimento do rolo – direção Y.	77
Figura 3.20. Determinação de parâmetros de rugosidade 2D. (Modificado - OLYMPUS, 2018): (a) Desvio aritmético médio do perfil, (b) Altura média dos elementos do perfil, (c) Altura máxima do perfil, (d) Altura total do perfil, (e) Fator de assimetria no perfil avaliado e (f) Fator de achatamento do perfil avaliado.	78
Figura 3.21. Determinação dos parâmetros de rugosidade 3D. (Modificado - OLYMPUS, 2018): (a) Altura do maior pico da superfície, (b) Profundidade do maior vale da superfície, (c) Altura máxima da superfície, (d) Desvio aritmético médio da superfície, (e) Fator de assimetria na superfície, (f) Fator de achatamento da superfície e (g) Determinação dos volumes de vazio (V_{cv} e V_{vv}) e de material (V_{mp} e V_{mc}).	79
Figura 4.1. Resultados de repetibilidade nos equipamentos: (a) CDC, (b) CDM e (c) CPI.	81
Figura 4.2. Envoltórias dos ensaios sob baixas tensões para as interfaces 1-10: (a) Envoltórias do ensaio de CDM pico, (b) Envoltórias do ensaio de CDM pós-pico e (c) Envoltórias do ensaio de CPI pico e pós-pico.	87
Figura 4.3. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob baixas tensões.	88
Figura 4.4. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob baixas tensões.....	89
Figura 4.5. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CPI em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana.	89

Figura 4.6. Envoltórias das interfaces da 1 – 10 sob altas tensões: (a) Envoltórias do ensaio de CDC pico, (b) Envoltórias do ensaio de CDC pós-pico, (c) Envoltórias do ensaio de CDM pico e (d) Envoltórias do ensaio de CDM pós-pico.	92
Figura 4.7. Ângulos de atrito pico dos ensaios de CDC em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana.	93
Figura 4.8. Ângulos de atrito pós-pico dos ensaios de CDC em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana.	93
Figura 4.9. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob altas tensões.	94
Figura 4.10. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob altas tensões.....	94
Figura 4.11. Evolução dos deslocamentos para interfaces areia/geotêxtil não tecido: (a) Interface 11 (Areia/GNT1) e (b) Interface 12 (Areia/GNT2).....	98
Figura 4.12. Evolução dos deslocamentos em geotêxtil Travado e Livre.	99
Figura 4.13. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM sob altas tensões para interfaces da 11 – 17: (a) Envoltórias do ensaio de CDC pico, (b) Envoltórias do ensaio de CDC pós-pico, (c) Envoltórias do ensaio de CDM pico e (d) Envoltórias do ensaio de CDM pós-pico.	102
Figura 4.14. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDC em interfaces de solo e geossintético.	104
Figura 4.15. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDC em interfaces de solo e geossintético.	104
Figura 4.16. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDM em interfaces de solo e geossintético.	105
Figura 4.17. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDM em interfaces de solo e geossintético.	105
Figura 4.18. Envoltórias dos ensaios CPI sob baixas tensões para interfaces 11–17...	106
Figura 4.19. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CPI em interfaces de solo e geossintético.	106
Figura 4.20. Ensaios de CPI em interfaces de concreto em estado fresco e geossintético.	109
Figura 4.21. Ângulos de atrito pico dos ensaios de CPI em interfaces de concreto em estado fresco e geossintético para cada abatimento.....	110
Figura 4.22. Geossintéticos após ruptura para os ensaios com abatimento de 80 mm.	110
Figura 4.23. Conceitualização da envoltória de interface de concreto e geotêxtil não tecido agulhado.	111

Figura 4.24. Comparativa dos parâmetros de rugosidade (2D) para as cinco geomembranas: (a) Desvio aritmético médio do perfil, (b) Altura média dos elementos do perfil, (c) Altura máxima do perfil, (d) Altura total do perfil, (e) Fator de assimetria no perfil avaliado e (f) Fator de achatamento do perfil avaliado.....	114
Figura 4.25. Distribuição da amplitude das alturas com referência do tamanho dos grãos de areia e o R_c	115
Figura 4.26. Imagem das superfícies das geomembranas.	118
Figura 4.27. Comparação entre parâmetros de rugosidade (3D) de altura para as cinco geomembranas: (a) Altura máxima da superfície, (b) Desvio aritmético médio das alturas da superfície, (c) Fator de assimetria da curva de densidade de probabilidade das alturas da superfície e (d) Fator de achatamento da curva de densidade de probabilidade das alturas da superfície.	119
Figura 4.28. Comparação entre parâmetros de rugosidade (3D) de volume para as cinco geomembranas: (a) Volume de vazio da seção do núcleo, (b) Volume do material na seção do núcleo, (c) Volume de vazio na seção do vale e (d) Volume do material na seção de pico.	120
Figura 4.29. Comparação entre parâmetros de rugosidade (3D) laterais para as cinco geomembranas: (a) Comprimento de autocorrelação mais curto e (b) Relação de aspecto físico da textura.	121
Figura 4.30. Comparativa dos parâmetros determinados por meio do perfil de rugosidade (2D) e por meio da superfície (3D): (a) Desvio médio aritmético do perfil de rugosidade, (b) Altura máxima da superfície, (c) Assimetria da distribuição de probabilidade e (d) Achatamento da distribuição de probabilidade.	123
Figura 4.31. Perfil de rugosidade sem ondulação da face superior no sentido Y para o maior R_t dos 10 avaliados para cada geomembrana.....	125
Figura 4.32. Perfil de rugosidade sem ondulação da face inferior no sentido Y para o maior R_t dos 10 avaliados para cada geomembrana.....	126
Figura 4.33. Influência da altura de aspereza nos ângulos de atrito das envoltórias nos ensaios com baixas tensões em equipamento de CDM e de CPI: (a) para valores dos ângulos de atrito de pico das envoltórias e (b) para valores dos ângulos de atrito de pós-pico das envoltórias.	128
Figura 4.34. Influência da altura de aspereza nos ângulos de atrito das envoltórias nos ensaios com altas tensões em equipamento de CDC e de CDM: (a) para valores dos ângulos de atrito de pico das envoltórias e (b) para valores dos ângulos de atrito de pós-pico das envoltórias.	129
Figura 4.35. Influência da altura de aspereza e da densidade do material da geomembrana no ângulo de atrito da envoltória para ensaios com altas tensões em equipamento de CDC e de CDM.	130

Figura 4.36. Influência do V_{mc} nos resultados de ângulo de atrito da envoltória em equipamentos CDC, CDM e CPI.....	131
Figura 4.37. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces geotêxtil/geomembrana: (a) 1. GNT1/GMT1, (b) 2. GNT2/GMT1, (c) 3. GNT1/GMT2, (d) 4. GNT2/GMT2, (e) 5. GNT1/GMT3, (f) 6. GNT2/GMT3, (g) 7. GNT1/GMT4, (h) 8. GNT2/GMT4, (i) 9. GNT1/GML1 e (j) 10. GNT2/GML1.	135
Figura 4.38. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces solo/geotêxtil: (a) 11. areia/GNT1 e (b) 12. areia/GNT2.....	138
Figura 4.39. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces solo/geomembrana texturizada: (a) 13. areia/GMT1, (b) 14. areia/GMT2, (c) 15. areia/GMT3 e (d) 16. areia/GMT4.	139
Figura 4.40. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces solo/geomembrana lisa (17. Areia/GML1).	141

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais vantagens e desvantagens dos ensaios para caracterizar as resistências de interfaces.	13
Tabela 2.2. Algumas pesquisas desenvolvidas com o ensaio de plano inclinado.	19
Tabela 2.3. Tipos de perfil (Modificado - Marinho, 2000).	40
Tabela 2.4. Parâmetros básicos de rugosidade 2D.	43
Tabela 3.1. Propriedades da areia utilizada neste trabalho.....	51
Tabela 3.2. Propriedades das geomembranas.....	55
Tabela 3.3. Propriedades dos geotêxteis fornecidas pelo fabricante.	56
Tabela 3.4. Resultados de ensaios de gramatura em g/cm ²	56
Tabela 3.5. Traço utilizado na dosagem do concreto fresco.	57
Tabela 3.6. Tensões normais aplicadas.	57
Tabela 3.7. Interfaces ensaiadas.	58
Tabela 3.8. Resultados da análise estatística das amostras de geomembrana.	76
Tabela 4.1. Resultados da análise estatística da repetibilidade.	80
Tabela 4.2. Etapas dos ensaios de cisalhamento em interfaces de geotêxtil não tecido/geomembrana.....	82
Tabela 4.3. Resultados de ângulos de atrito (°) para interfaces da 1 até 10, sob baixas tensões normais.	85
Tabela 4.4. Resultados de ângulos de atrito (°) para interfaces da 1 até 10, sob altas tensões normais.	91
Tabela 4.5. Geotêxteis empregados nas interfaces em comparação.....	97
Tabela 4.6. Resultados de ângulos de atrito (°) para interfaces da 11 até 17.....	101
Tabela 4.7. Ângulos de atrito secante e eficiência das interfaces 11-17.	103
Tabela 4.8. Resultados de ângulos de atrito secante (°) para interfaces da 18 até 38...	108
Tabela 4.9. Parâmetros de amplitude de rugosidade a partir de perfis de rugosidade..	113
Tabela 4.10. Parâmetros de rugosidade a partir da superfície.	117
Tabela 4.11. Diferença entre os ângulos de atrito de pico e residual das envoltórias segundo a escala.	138
Tabela 4.12. Diferença entre os ângulos de atrito secante de pico e residual, segundo a escala.	140

LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

A	Tensão cisalhante variável menor nos ensaios de CPI
B	Tensão cisalhante variável intermediária nos ensaios de CPI
B ₅₀	Tensão Cisalhante para o deslocamento relativo da caixa de 50 mm em ensaios de CPI
C	Tensão cisalhante variável maior nos ensaios de CPI
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CDC	Cisalhamento Direto Convencional
CDM	Cisalhamento Direto Médio
CPI	Cisalhamento de Plano Inclinado
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PVC	Polivinil Clorido
PA	Porcentagem de Acréscimo da tensão cisalhante
H	Horizontal
V	Vertical
AG	Areia Grossa
AM	Areia Média
AF	Areia Fina
DEM	Método dos Elementos Discretos
I _D	Índice de densidade
D ₁₀	Diâmetro das partículas de solo para 10% que passa
D ₃₀	Diâmetro das partículas de solo para 30% que passa
D ₆₀	Diâmetro das partículas de solo para 60% que passa
D ₅₀	Diâmetro das partículas de solo para 50% que passa
GMT	Geomembrana Texturizada
GML	Geomembrana Lisa
GNT	Geotêxtil não Tecido
GMT1	Geomembrana de PEAD com menor altura de textura nas duas faces usando o processo de matriz balão

GMT1i	Face inferior da amostra de GMT1
GMT1s	Face superior da amostra de GMT1
GMT2	Geomembrana de PEAD com maior altura de textura nas duas faces usando o processo de matriz balão
GMT2i	Face inferior da amostra de GMT2
GMT2s	Face superior da amostra de GMT2
GMT3	Geomembrana de PEAD texturizada nas duas faces usando o processo de matriz plana com textura composta por dois tipos de rugosidade: uma saliência pontiaguda e uma textura de fundo entre saliências
GMT3i	Face inferior da amostra de GMT3
GMT3s	Face superior da amostra de GMT3
GMT4	Geomembrana de PEBDL texturizada nas duas faces usando o processo de matriz balão
GMT4i	Face inferior da amostra de GMT4
GMT4s	Face superior da amostra de GMT4
GML1	Geomembrana de PEAD lisa
GML1i	Face inferior da amostra de GML1
GML1s	Face superior da amostra de GML1
GNT1	Geotêxtil não tecido agulhado de polipropileno com gramatura de 300 g/m ²
GNT2	Geotêxtil não tecido agulhado de polipropileno com gramatura de 800 g/m ²
Fa	Força que se origina como resultado do atrito do solo com a parede vertical da caixa devido à rotação do solo durante o cisalhamento
N	Força Normal
Q	Força cisalhante medida
<i>Slump</i>	Abatimento do concreto
l_t	Distância percorrida pelo apalpador sobre a superfície
l_v	Distância para o apalpador atingir a velocidade de medição
l l_e l_r ou “cut off”	Comprimento de amostragem
l_m l_n	Comprimento de avaliação
l_y	Distância para a parada do apalpador
Z_{ti}	Altura dos elementos do perfil

Ra	Desvio aritmético médio do perfil avaliado no comprimento de amostragem
Rc	Altura média dos elementos do perfil no comprimento de amostragem
Rz	Altura máxima do perfil no comprimento de amostragem
Rt	Altura total do perfil ou rugosidade máxima no comprimento de avaliação
Rsk	Fator de assimetria do perfil avaliado para o comprimento de amostragem
Rku	Fator de achatamento do perfil avaliado para o comprimento de amostragem
Sa	Altura média aritmética
Sq	Desvio médio quadrático
Ssk	Fator de assimetria da curva de densidade de probabilidades
Sku	Fator de achatamento da curva de densidade de probabilidades
Sp	Altura máxima do pico
Sv	Profundidade máxima do vale
Sz	Altura máxima
Vvv	Volume vazio na região do vale
Vvc	Volume vazio em uma parte do núcleo
Vmp	Volume real em uma região de pico
Vmc	Volume real em uma parte do núcleo
Sal	Comprimento de autocorrelação mais curto
Str	Relação de aspecto da textura
R _n	Rugosidade normalizada
R _{max}	Rugosidade máxima
V _{pv}	Volume de picos e vales para Vangla & Gali, (2016a)
σ_i	Tensão normal específica
τ_i	Tensão Tangencial específica
τ	Tensão Cisalhante
τ_{pico}	Tensão Cisalhante Pico
$\tau_{\text{pós-pico}}$	Tensão Cisalhante Pós-pico
τ_A	Tensão Cisalhante Menor das três de um ensaio
τ_B	Tensão Cisalhante Intermediária das três de um ensaio
τ_C	Tensão Cisalhante Maior das três de um ensaio
δ	Deslocamento relativo da caixa em ensaio de CPI para Pitanga <i>et al.</i> (2009)

β	Ângulo de inclinação da rampa em ensaio de CPI
β_o	Ângulo de inclinação da rampa em ensaio de CPI para o qual inicia o deslocamento relativo da caixa em ensaio de CPI
β_{lim}	Ângulo de inclinação da rampa limite em ensaio de CPI para o qual acontece o deslizamento não estabilizado
ϕ'	Ângulo de atrito da interface para Fleming <i>et al.</i> (2006)
δ_{sw}	Ângulo de atrito empregando o sistema de lubrificação
ϕ_{sp}	Ângulo de atrito secante pico da interface
ϕ_{spp}	Ângulo de atrito secante pós-pico da interface
ϕ_{ep}	Ângulo de atrito pico da interface para a envoltória
ϕ_{epp}	Ângulo de atrito pós-pico da interface para a envoltória
ϕ_c	Ângulo de atrito secante da interface com concreto
ϕ_{er}	Ângulo de atrito residual da interface para a envoltória
$\gamma_{médio}$	Peso específico médio do concreto
λ_c	Filtro de perfil, define a separação entre os componentes da rugosidade e da ondulação

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

Nas últimas duas décadas, o Brasil investiu na construção e recuperação de obras de infraestrutura, como rodovias, portos, pontes, viadutos, canais, dentre outros. Tal investimento justificou-se pela necessidade de melhoria dessas infraestruturas e pela viabilização do crescimento econômico do país.

No entanto, a quantidade de materiais não renováveis empregados nessas obras têm gerado impactos ambientais, o que faz com que o emprego de materiais geossintéticos nas obras seja uma alternativa viável ao consumo dos materiais granulares. A introdução desses materiais geossintéticos na massa de solo pode reduzir o impacto ambiental por necessitar uma quantidade menor de material retirado de jazidas e, ao mesmo tempo, propiciar uma melhoria da segurança dos projetos. Os geossintéticos são reconhecidos por desempenhar diversas funções nas obras geotécnicas e, no caso deste estudo, vale destacar a função de impermeabilização dos canais e aterros sanitários.

Em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários, a configuração utilizada é a combinação entre geossintéticos e solos mediante múltiplas possibilidades de disposição. Entretanto, a interação entre o solo e os geossintéticos nesse tipo de obra pode levar ao colapso da estrutura em alguns casos. Normalmente, esse colapso ocorre pelo deslizamento do solo sobre a face da geomembrana ou geotêxtil, dependendo, assim, da relação entre mecanismos de interação e inclinação.

Uma revisão em artigos e outras produções disponíveis na literatura permitem comprovar que houve um considerável aumento no estudo das interfaces entre os diversos tipos de geossintéticos e solos, empregando ensaios de resistência ao cisalhamento de interface de diferentes tipos. Nesse contexto, observa-se que mais estudos se fazem necessários, sobretudo pela grande variabilidade dos materiais empregados e pelo rápido desenvolvimento de novos tipos de materiais.

Diante do exposto, neste trabalho estudou-se a resistência ao cisalhamento com diferentes interfaces: i) geossintético-areia, ii) geossintético-geossintético e iii) geossintético-concreto

fresco, focando-se na rugosidade dos materiais mediante a caracterização microtopográfica de parte dos materiais geossintéticos. Posteriormente, tais materiais foram empregados na realização de ensaios de cisalhamentos, variando-se o tamanho da caixa de ensaio (10 x 10 mm, 300 x 300 mm e 1942 x 470 mm) para diferentes valores de tensões normais e tipo de ensaio. Foram executadas campanhas de ensaios de cisalhamento com caixa convencional, de cisalhamento com grandes dimensões e de plano inclinado.

Com o propósito de definir qual dos ensaios utilizados consegue reproduzir melhor as condições reais das obras e o que ocorre no momento da ruptura, foram avaliados: (i) o mecanismo de deslizamento de solo ou concreto sobre dois geotêxteis – de massas por unidade de área distintas – ou cinco geomembranas – com diferentes rugosidades; (ii) a influência da variabilidade das dimensões da área de contato entre materiais; (iii) os tipos de materiais em contato, as cargas atuantes e as condições de trabalho das interfaces; e (iv) os resultados de mobilização da resistência, deslocamentos e ângulos de atrito secante, que permitiram caracterizar a resistência ao cisalhamento das interfaces envolvidas nas diferentes condições de trabalho consideradas.

1.2. MOTIVAÇÃO

A motivação desta pesquisa está relacionada ao crescente cenário de rupturas de obras geotécnicas, cujo comportamento assemelha-se às rupturas observadas em canais com utilização de materiais geossintéticos. Um exemplo recente consiste na obra conhecida como Projeto Formoso A, situada na porção oeste do estado da Bahia, na construção de canais de irrigação com uso de geotêxtil, geomembrana de PVC e concreto (Departamento Técnico - Atividade Bidim, 2011). Outro exemplo que pode ser citado é a canalização do Rio São Francisco (Bresciani, 2011), onde observou-se a ocorrência de deslizamentos, como os da Figura 1.1.



Figura 1.1. Problemas de execução em canal de transposição de água (Bresciani, 2011).

A variação do carregamento, os gradientes de temperatura, as características dos materiais empregados, os erros construtivos e outras causas podem levar à ruptura do compósito nas interfaces entre os geossintéticos e os materiais em contato direto com eles, tornando o estudo dos mecanismos de interação alvo dos pesquisadores. Tal fato tem propiciado estudos de diversas interfaces por meio de ensaios no laboratório e ensaios nas obras, assim como as análises com estudos numéricos, as quais avaliam a viabilidade técnica e financeira de obras com geossintéticos. Com efeito, faz-se necessário continuar estudando os aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais, aprofundando no entendimento do comportamento das interfaces.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral desta pesquisa consiste em estudar a resistência ao cisalhamento de interfaces entre geossintéticos e entre geossintéticos e outros materiais, avaliando a influência no resultado de ângulo de atrito, da microtopografia de geomembranas e do tamanho da área de contato entre esses materiais no ensaio.

Para alcançar o objetivo geral, foram designados os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a resistência ao cisalhamento de interfaces: i) entre geossintéticos (geotêxtil não tecido com diferentes gramaturas e geomembrana com diferentes texturas, matriz e tipo de material), ii) entre solo granular e esses geossintéticos e iii) entre concreto e esses geossintéticos.
- Determinar a influência da microtopografia das geomembranas nos resultados de ângulo de atrito das interfaces com geomembrana; e
- Avaliar a influência do tamanho da área de contato nos ensaios para a determinação da resistência ao cisalhamento das interfaces.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em cinco capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se a introdução e a justificativa que fazem referência ao presente trabalho, assim como seus objetivos e a estruturação da tese. O Capítulo 2 destina-se a uma revisão bibliográfica sobre o assunto abordado, onde são fornecidos alguns fundamentos e comentadas algumas pesquisas constantes

na literatura técnica. No Capítulo 3 apresenta-se uma descrição detalhada sobre os tipos de materiais utilizados na pesquisa. Nesse capítulo também são descritos os equipamentos utilizados no programa experimental e as diversas modalidades de ensaios empregadas na pesquisa, assim como a metodologia utilizada em cada uma delas. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios e as suas análises. No Capítulo 5 são delineadas as principais conclusões desta tese e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GEOSSINTÉTICOS E MATÉRIAS-PRIMAS

Segundo a NBR ISO 10318 (2013), ‘Geossintético’ é um “[...] termo genérico designando um produto no qual ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, que apresenta-se na forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações de engenharia geotécnica e civil”.

De acordo com Koerner *et al.* (2005) e Lotti *et al.* (2015), os polímeros mais comumente utilizados na fabricação dos plásticos são: polietileno (PE), poliestireno expandido (EPS), polipropileno (PP), polivinil clorado (PVC), poliéster (PET), poliestireno (PS), poliamida (PA), etileno-propileno monômetro diênico (EPDM), polivinil álcool (PVA), polietileno clorado (CPE) e poliaramida (PPTA).

Os geossintéticos interagem com o meio e desempenham diferentes funções. Segundo a norma brasileira NBR ISO 10318 (2013), as principais funções que os geossintéticos podem exercer são:

Controle de erosão superficial – Uso de um geotêxtil ou produto correlato para evitar e limitar os movimentos do solo ou de outras partículas na superfície, por exemplo de um talude.

Drenagem – Coleta e condução de águas pluviais, águas subterrâneas e outros fluidos no plano de um geotêxtil ou produto correlato.

Filtração – Retenção de um solo ou de outras partículas submetidas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem do fluido em movimento, através ou no interior de um geotêxtil ou produto correlato.

Barreira – Uso de geossintético para prevenir ou limitar a migração de fluidos.

Proteção – Limitação ou prevenção de danos localizados em um elemento ou material pelo uso de um geotêxtil ou produto correlato.

Reforço – Uso do comportamento tensão-deformação de um geotêxtil ou produto correlato para melhorar o comportamento mecânico do solo ou de outros materiais de construção.

Separação – Prevenção da mistura de dois materiais adjacentes de naturezas diferentes, solos ou material de aterro pelo uso de um geotêxtil ou produto correlato.

Vale ressaltar que, em certos casos, os geossintéticos apresentam mais de uma função simultaneamente, dependendo da sua disposição nas obras. Os aterros sanitários, os canais e obras geotécnicas estão propensas a apresentar rupturas em planos inclinados das interfaces entre as multicamadas de geossintéticos e outros materiais.

2.2. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS MAIS USADOS EM ATERROS SANITÁRIOS E CANAIS

Conforme mencionado anteriormente, os geossintéticos apresentam um conjunto de aplicações em soluções de engenharia geotécnica e sanitária. Dentre os diferentes tipos de geossintéticos, os geotêxteis não tecidos e as geomembranas são os materiais mais empregados em projetos de aterros sanitários e canais. Portanto, esses materiais serão apresentados de forma sucinta a seguir:

2.2.1. GEOTÊXTIL

Produto têxtil plano, permeável e com base de polímero (natural ou sintético), podendo ser não tecido ou tricotado, utilizado em contato com solo ou outros materiais em aplicações da engenharia geotécnica ou civil (NBR ISO 10318, 2013). Na Figura 2.1 apresentam-se espécimes de geotêxtil tecido e dois tipos de não tecido.

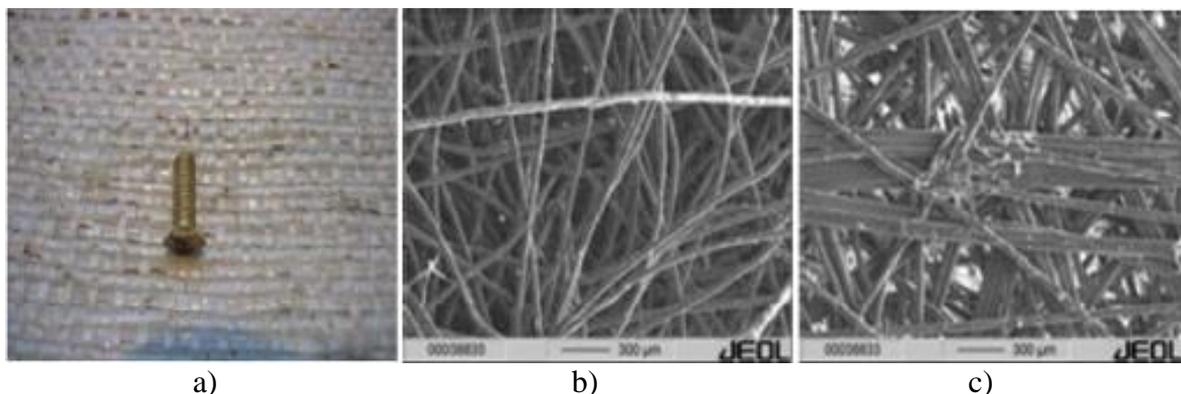


Figura 2.1 Tipos de Geotêxteis: (a) Tecido; (b) Não tecido, agulhado e (c) Não tecido, termo soldado (Modificado - Martínez, 2010).

As propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que os geotêxteis desempenhem várias funções em uma obra geotécnica. As principais aplicações dos geotêxteis são em filtros, em drenos e como elementos de proteção de geomembranas. Os geotêxteis podem trabalhar diretamente com o solo ou em camadas. Sua utilização é muito comum na construção de aterros sanitários e canais.

2.2.2. GEOMEMBRANA

Geomembranas são produtos de estruturas constituídas por materiais sintéticos, produzidas industrialmente em forma de lâmina e que atuam como uma barreira. A função de barreira é essencialmente assegurada pelos polímeros. É usada em contato com o solo e/ou outros materiais em aplicações da engenharia geotécnica e civil (NBR ISO 10318, 2013). O acabamento superficial das geomembranas pode ser liso ou texturizado em uma face (SST, do inglês *single side textured*) ou nas duas faces (DST, do inglês *double side textured*). A texturização é realizada durante o processo de fabricação, existindo três processos para criar a rugosidade: i) coextrusão, ii) intrusão e iii) laminado. A textura é gerada sobre a matriz da lâmina (geomembrana), podendo apresentar uma matriz plana ou circular (balão), como as representadas na Figura 2.2.

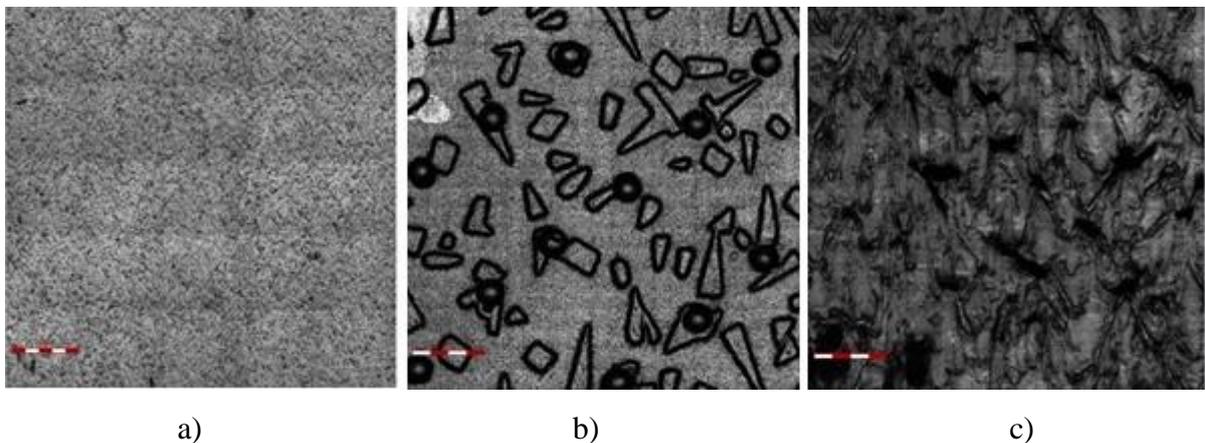


Figura 2.2. Tipos de Geomembranas – Ampliação de 10x: (a) lisa; (b) texturizada – matriz plana e (c) texturizada – matriz balão.

As geomembranas apresentam excelente desempenho quando utilizadas como elementos de controle de fluxo e elemento de impermeabilização, impedindo a migração de fluidos para o meio ambiente. Os tipos mais encontrados são as de polietileno de alta densidade (PEAD) ou de baixa densidade (PEBD) e as de policloreto de vinila (PVC). Elas são muito utilizadas para

variadas aplicações em termos de impermeabilização, como em canais, barragens, aterros sanitários, reservatórios de rejeito, lagoas de rejeito de mineração, entre outras.

As aplicações em barragens foram detalhadamente estudadas por Colmanetti (2006), comprovando que é viável a utilização de geomembranas e geotêxteis como elemento de impermeabilização e proteção em barragens, respectivamente. Nesses casos, as geomembranas são usadas (no interior do maciço) para reduzir a permeabilidade do barramento na face de montante em barragens de terra e de enrocamento.

Já em canais, podem ser empregadas como cobertura composta, sem utilização do geotêxtil. Segundo Giroud & Ah-Line (1984) e Bidim (2014), isso pode levar ao acréscimo de trincas no concreto. Morgado (2008) expõe problemas de retração por perda de elasticidade da geomembrana entre 8 e 10 anos, sobretudo após a sua instalação em canais de irrigação revestidos com geomembranas de PVC e concreto. No trabalho de Luna (2013) foi aprofundado o estudo das principais patologias decorrentes do emprego dessas soluções de impermeabilização em canais.

Experiências no emprego de geomembranas e concreto na impermeabilização de canais foram comentadas por especialistas da ROMA (2010), durante exposição no Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos em 2014, que mostraram vários casos de obra, um deles o Canal da Transposição do Rio São Francisco. Nessa obra empregaram geomembranas lisas de PEAD devido às altas temperaturas (50°) que atingiam durante a colocação e endurecimento do concreto. Os especialistas explicaram que o motivo da escolha da geomembrana lisa foi devido à dilatação do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido, que é menor que a da geomembrana.

Inicialmente, ao empregar geomembranas texturizadas, impossibilitou-se que o concreto acompanhasse a geomembrana durante a dilatação pelo acréscimo de temperatura, produzindo esforços de tração e trincas, e trazendo dificuldade na hora da concretagem, com ocorrência de escorregamentos recorrentes.

2.3. GEOSSINTÉTICOS E SUA INTERAÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS E CANAIS

Os aterros sanitários são obras complexas, com diferentes tipos de geossintéticos trabalhando em conjunto para garantir as funcionalidades previstas, conforme pode-se observar na Figura 2.3. A função principal dos aterros sanitários é confinar os resíduos sólidos de forma segura, bem como coletar gases e fluidos provenientes desses, de modo que requer cuidados especiais na elaboração do projeto (NBR 15849, 2010).

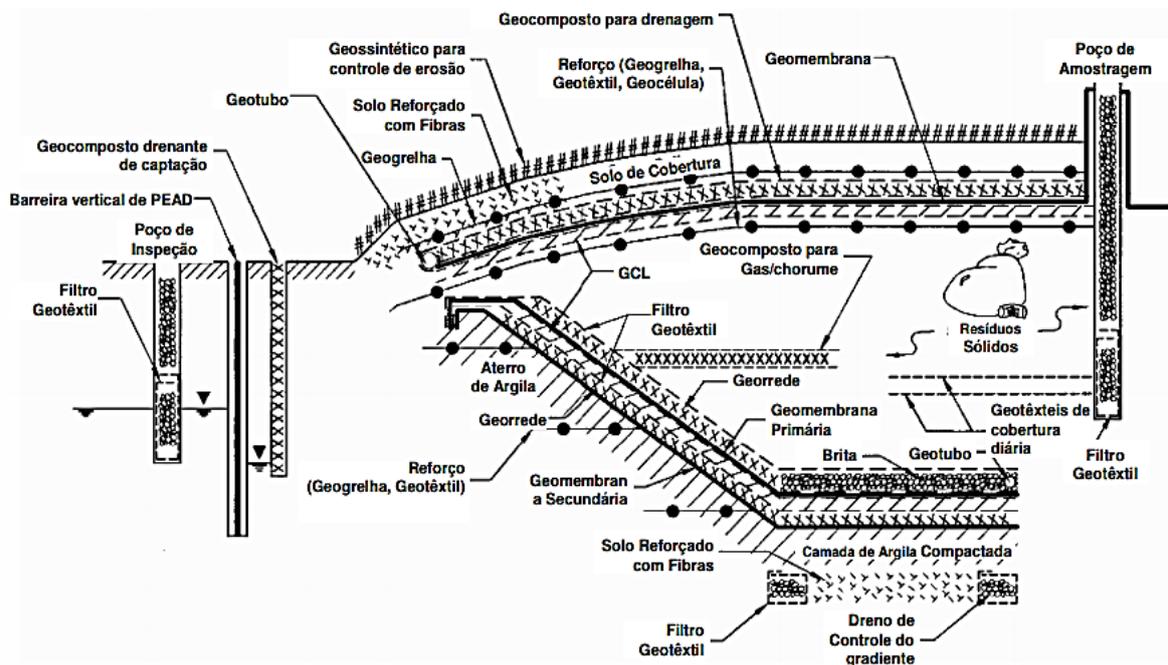


Figura 2.3. Múltiplas aplicações de geossintéticos em projetos de aterros sanitários (Bouazza & Zornberg, 2014).

Na construção de aterros, o aumento da inclinação dos taludes, assim como o aumento da profundidade das células, contribui para o incremento da instabilidade das massas de solo e das soluções de impermeabilização das células, tornando os geossintéticos ótimos materiais para o último caso. A natureza sintética dos geossintéticos torna-os adequados para uso em canais e obras de terra, onde um alto nível de durabilidade é exigido para as barreiras impermeáveis. A Figura 2.4 apresenta as aplicações desses materiais como sistemas de cobertura simples ou compostos.

O uso dessas barreiras requer uma grande atenção pela possibilidade de, eventualmente, apresentar baixa resistência na interface entre o geossintético e o material adjacente, e atuar como uma possível superfície de ruptura. Suas características e propriedades serão detalhadas a seguir.

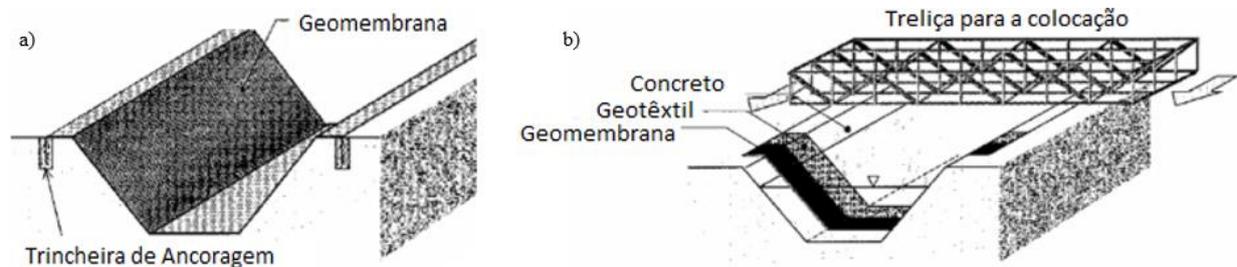


Figura 2.4. Canais para transporte de líquidos. (a) cobertura simples - impermeabilização com uma camada de geomembrana; (b) cobertura composta - impermeabilização utilizando um sanduíche de geomembrana, geotêxtil e concreto (Modificado - Koerner, 2000).

2.4. FORMAS DE INTERAÇÃO E RUPTURA IDEALIZADAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS INTERFACES

A interação dos geossintéticos com outros materiais pode ser complexa, pois origina solicitações de contato que dependem das condições de trabalho e das características e propriedades dos materiais envolvidos. Palmeira (2009) apresenta e discute alguns métodos experimentais, teóricos e numéricos para o estudo e avaliação da interação entre solos e geossintéticos – com especial referência às aplicações desses materiais no reforço do solo –, assim como as principais vantagens e limitações de alguns métodos experimentais e teóricos, tradicionalmente usados para o estudo da interação solo-geossintéticos.

Nos canais, aterros, taludes e em qualquer obra geotécnica onde o geossintético permanece solidário com parte do material envolvente, a resistência na interface mobilizada pelo deslizamento relativo entre o restante da massa de solo (ou material que seja) e o geossintético pode ser estudada mediante ensaios de cisalhamento, como apresentado na Figura 2.5.

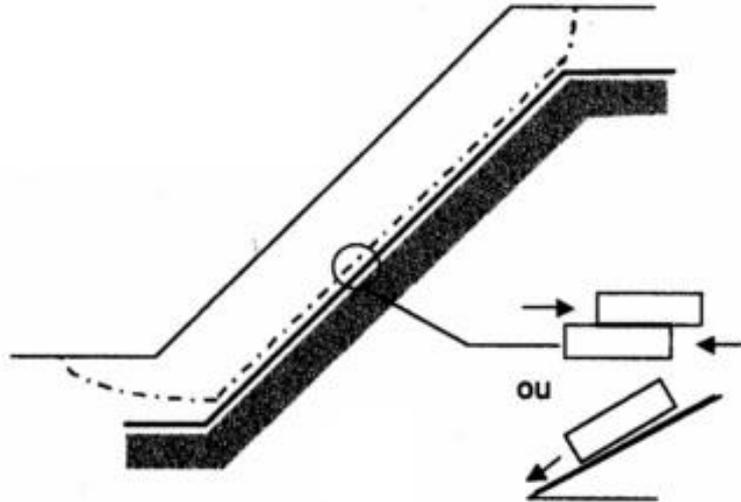


Figura 2.5. Mecanismo de interação em um aterro sanitário impermeabilizado (Modificado - Palmeira, 1987)

Para a obtenção dos parâmetros de resistência das interfaces entre geossintéticos, solo-geossintético ou concreto-geossintético, podem ser empregados diferentes ensaios com o intuito de melhorar a compreensão da interação, como os realizados por Mitchell *et al.* (1990); Palmeira & Milligan (1991); Giroud *et al.* (1993); Palmeira (1987); Izgin & Wasti (1998); Lalarakotoson *et al.* (1999); Mello *et al.* (2003); Dove *et al.* (2006); Viana (2007); Wu, Wick, *et al.* (2008); Wu, Wang, *et al.* (2008); Pitanga (2008); Palmeira (2009); Abramento *et al.* (2010); Martínez (2010); Monteiro *et al.* (2014); Sánchez *et al.* (2016); Vangla & Gali (2016a, 2016b); e Punetha *et al.* (2017). As interfaces foram caracterizadas pelos vários autores a partir de diferentes ensaios. Abaixo são indicados os tipos de ensaios empregados por alguns deles.

- **cisalhamento direto convencional:** caixa 10 mm x 10 mm x 40 mm, por Monteiro *et al.* (2014);
- **cisalhamento direto de grande escala:** caixa 300 mm x 300 mm x 300 mm, por Martínez *et al.* (2011);
- **rampa/plano inclinado e mesa basculante:** caixa 1942 mm x 470 mm x 50 mm, por Mello *et al.* (2003);
- **ring shear:** por Dove *et al.* (2006);
- **centrifuga geotécnica com plano inclinado acoplado:** caixa 193 mm x 174 mm x 80 mm, por Wu *et al.* (2008c);
- **ensaio de campo:** reproduzindo as condições de laboratório na obra, por Abramento *et al.* (2010).

Os ensaios de cisalhamento direto são os mais empregados na obtenção de parâmetros de interface para obras, tais como em sistemas de controle de erosão e sistemas de impermeabilização. Entretanto, têm-se verificado diferenças nos valores obtidos de ângulo de atrito e coesão, em especial quando comparados com resultados de diferentes tipos de ensaios. Nesse contexto, a maioria das análises apresenta resultados de comparações com ensaios de plano inclinado, que serão comentados nos próximos itens.

Na Tabela 2.1 é mostrado um resumo das principais vantagens e desvantagens que os autores compilaram para cada um dos ensaios realizados, tendo em vista as próprias experiências na execução das campanhas de ensaio e das experiências reportadas pelos autores referenciados.

Tabela 2.1. Principais vantagens e desvantagens dos ensaios para caracterizar as resistências de interfaces.

Ensaio	Vantagens	Desvantagens
<p>Cisalhamento direto convencional. Caixa circular ou quadrada de lado 60 ou 100 mm</p>	<p>Amostras pequenas, adequadas para avaliação de amostras exumadas;</p> <p>Rapidez na execução;</p> <p>Realizado em equipamento padronizado, o que conduz a uma melhor precisão e acurácia;</p> <p>Fácil aplicação das tensões normais;</p>	<p>Amostra pequena, quando ensaiadas amostras texturizadas pode não representar o comportamento real;</p> <p>O deslocamento horizontal é limitado e, às vezes, o valor da tensão residual não é atingido;</p> <p>Dificuldade em manter a fixação dos geossintéticos durante o ensaio;</p> <p>Não fornece resultados precisos para tensões normais menores do que 25 kPa;</p> <p>Os solos finos tendem a escorrer no espaço entre caixas de cisalhamento;</p> <p>O contato entre a caixa superior e inferior pode causar superestimação da resistência.</p>
<p>Cisalhamento direto de grande escala. Caixa quadrada de lado 300 mm</p>	<p>Permite ensaiar amostras de maior tamanho, tendo melhorias na representatividade do comportamento;</p> <p>Podem alcançar deslocamentos horizontais maiores;</p> <p>Melhora a fixação do geossintético durante o ensaio ao ter mais espaço para a introdução de garras dentadas;</p> <p>Pode fornecer resultados precisos para tensões normais menores do que 25 kPa;</p>	<p>Aplicação de tensões normais mais trabalhosas;</p> <p>Pode ser complicado conseguir aplicar tensões normais superiores a 400 kPa;</p> <p>Precisa de correções devido aos atritos próprios dos rolamentos entre as caixas;</p> <p>Correção das tensões pelo atrito na parede vertical da caixa devido à rotação anti-horária do solo durante o ensaio.</p>

<p>Rampa ou plano inclinado com caixa de tamanhos diversos</p>	<p>Permite avaliar baixas tensões normais;</p> <p>Possibilita reproduzir mais realisticamente determinadas condições de trabalho em obra, como aterros sanitários, taludes e canais;</p> <p>Podem ser empregadas amostras de grandes dimensões, podendo considerar a variabilidade de texturas do mesmo rolo de geossintético;</p> <p>Permite avaliar o comportamento do ângulo de inclinação com o deslocamento relativo da caixa;</p> <p>Podem caracterizar, em função do aumento da inclinação, as interfaces em três fases;</p> <ul style="list-style-type: none"> i) <i>estática</i>, quando a caixa permanece praticamente imóvel sobre o plano inclinado; ii) <i>transitória</i>, quando a caixa se move gradualmente para baixo; e iii) <i>deslizamento</i>, quando a caixa sofre um deslizamento não estabilizado a uma velocidade crescente, ainda que a inclinação do plano seja mantida constante. 	<p>Precisa de correções devido aos atritos próprios dos sistemas de rolamento;</p> <p>Para amostras com grandes dimensões pode ser muito trabalhoso aplicar as tensões normais, mesmo sendo inferiores a 10 kPa;</p> <p>A ruptura da interface acontece muito rápido para um determinado ângulo de inclinação, podendo dificultar a leitura nesse momento, caso não se utilize um aquisitor de dados;</p> <p>Devem ser considerados vários cuidados durante a montagem do ensaio para não romper a interface antecipadamente;</p> <p>Deve-se ter muito cuidado para que, durante o ensaio, o cisalhamento aconteça na interface e não acima desta, ou seja, dentro da camada de solo;</p> <p>Normalmente, não se consegue medir as mudanças volumétricas das amostras durante o ensaio;</p> <p>Dificultam-se os ensaios em condições submersas;</p> <p>Só fornece resistência de pico.</p>
<p><i>Ring Shear</i></p>	<p>Permite deslocamento horizontal maior e alcance da tensão de cisalhamento residual.</p>	<p>Tamanho de amostra pequeno;</p> <p>A direção do cisalhamento muda constantemente e a maioria dos geomembranas tem texturas diferentes em sentido transversal e longitudinal, independentemente do processo empregado para gerar as texturas.</p>

<p>Centrífuga geotécnica com plano inclinado acoplado</p>	<p>Permite alcançar semelhanças mecânicas em modelos de pequeno porte, replicando o estado de tensões da obra mediante acréscimos da gravidade da terra.</p>	<p>Tamanho de amostra pequeno; Dificultam-se os ensaios em condições submersas.</p>
<p>Ensaio de campo</p>	<p>Permite determinar os fatores de conversão dos resultados de laboratório para os resultados em obra; Possibilitam avaliar interfaces em condições reais de carregamento e interação; Podem ser consideradas variáveis a sazonalidade do clima, gradientes de temperatura, retração e dilatação dos materiais, entre outras.</p>	<p>Só permitem avaliar um plano de ruptura por vez; Maiores quantidades de material e amostras envolvidas, implicando um custo considerável; Mais tempo e dificuldade de montagem dos ensaios; Podem interferir no ensaio variáveis não consideradas no laboratório, dificultando os resultados quanto à acurácia e precisão.</p>

2.5. COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DAS INTERFACES

Girard *et al.* (1990) observaram como a utilização de baixos níveis de tensão em ensaios de cisalhamento direto podiam gerar erros grosseiros e fornecer resultados desfavoráveis à segurança. Desse modo, os autores recomendaram considerar que a caixa de cisalhamento direto era mais adequada para tensões normais maiores ou iguais a 25 kPa. Já para o caso de tensões menores, o ensaio de plano inclinado é mais apropriado.

Após realizarem vários ensaios em equipamentos de plano inclinado, Girard *et al.* (1990) definiram que a inclinação para a qual ocorreu o escorregamento fornece apenas o ângulo de atrito aparente (igual ao ângulo de atrito da interface). Logo, a relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal é uma linha reta passando pela origem dos eixos (se não houver adesão na interface).

Gourc *et al.* (1996) propuseram dois procedimentos ao Comitê Técnico 189 “Geotêxteis” para o desenvolvimento da Norma Europeia, quando estabeleceram os procedimentos para medir o atrito em interfaces entre solos granulares e vários tipos de geossintéticos. Posteriormente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adotou esses procedimentos, com algumas modificações, na elaboração das normas (ABNT NBR ISO 12957.1, 2013) e (ABNT NBR ISO 12957.2, 2013).

Segundo os autores, o primeiro procedimento foi a partir de ensaios de plano inclinado com tensões normais até 5 kPa, empregando-se duas alternativas de caixa quadrada (500 mm ou 1000 mm) sobre base rígida ou flexível. Foram ensaiados dois tipos de solos (areia e brita). A altura da amostra do material de preenchimento nas caixas foi de 50 mm para a areia, enquanto para a brita a altura da amostra foi de 50 mm para uma caixa de 500 mm de lado e de 40 mm para uma caixa de 1000 mm de lado. Os autores estabeleceram três categorias ou tipo de resultados que podem se obter durante o ensaio, conforme ilustrado na Figura 2.6: i) Categoria 1 nomeada ‘Ruptura abrupta’, onde a ruptura acontece de forma brusca para 1 a 2 mm de deslocamento (Figura 2.6a); ii) Categoria 2 nomeada de ‘Lento movimento’, onde pode acontecer deslocamento até 7 mm antes da ruptura (Figura 2.6b) e iii) Categoria 3, com diferente atrito inicial e final durante a ruptura; apresenta patamares no gráfico de ângulo de inclinação *versus* deslocamento relativo da caixa, pois, durante a elevação da rampa, a caixa

pode permanecer sem se deslocar em breves períodos de inclinação até acontecer a ruptura abrupta (Figura 2.6c).

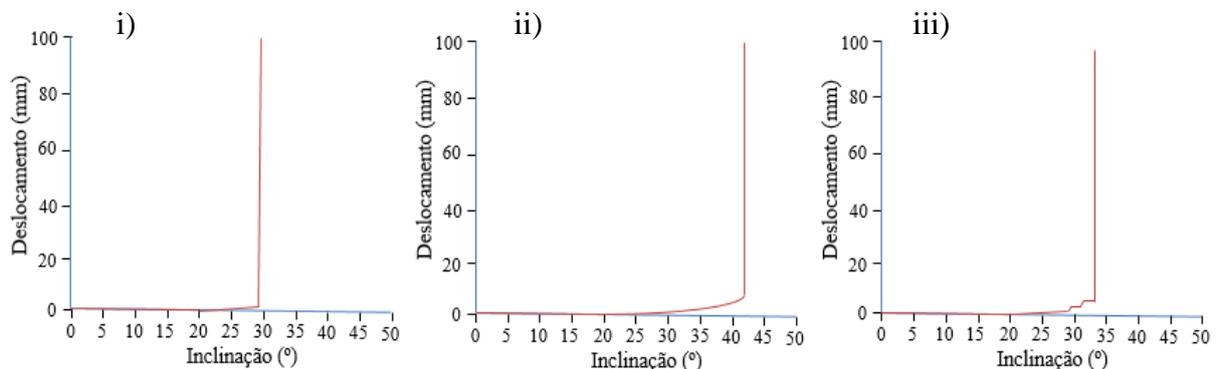


Figura 2.6. Categorias ou tipo de resultados que podem se obter durante o ensaio de plano inclinado (Modificado - Gourc *et al.* (1996): (a) Categoria 1; (b) Categoria 2 e (c) Categoria 3.

O segundo procedimento foi realizado a partir de ensaios de cisalhamento direto em caixa de 300 mm x 300 mm x 50 mm, quando avaliou-se a influência da forma de aplicação da tensão normal. Quando a tensão normal foi aplicada com um sistema de aplicação de carga flexível (através de uma interface de ar comprimido-água e uma membrana de borracha sobre toda a amostra, onde o ar comprimido empuxa a água para dentro da membrana de borracha, que aplica a carga na amostra), os resultados foram similares aos obtidos quando a tensão normal era aplicada por meio de uma placa rígida sobre a amostra.

Com os resultados, encontrou-se uma perda de acurácia no valor de ângulo de atrito para tensões normais menores de 25 kPa e foram definidas três formas de ajustar a envoltória de ruptura mostradas na Figura 2.7. A Figura 2.7a mostra o ajuste aos três pontos com coordenadas $(\sigma_i; \tau_i)$, considerando a coesão ou adesão como o valor do intercepto da envoltória de ruptura com o eixo vertical da tensão tangencial (Método 1); a Figura 2.7b mostra o ajuste que considera um ponto adicional na origem e que diminui o valor de adesão ao aumentar o ângulo de atrito com o aumento da inclinação da envoltória (Método 2) e a Figura 2.7c mostra o ajuste que fixa a reta (envoltória de ruptura) para que passe na origem, desconsiderando a coesão ou adesão e fornecendo a maior inclinação possível da envoltória (Método 3). Gourc *et al.* (1996) conservadoramente selecionaram a primeira delas para determinar o ângulo de atrito e adesão por fornecer o resultado de ângulo de atrito menor, contrário à escolha de Giroud *et al.* (1990).

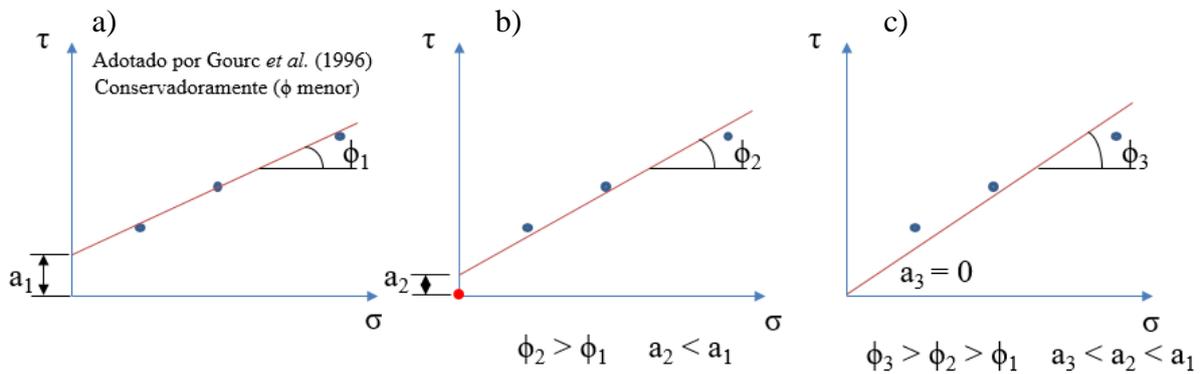


Figura 2.7. Três formas para obtenção do melhor ajuste a uma linha reta (Modificado - Gourc *et al.* (1996). (a) Método 1, (b) Método 2 e (c) Método 3.

O comportamento de interface no ensaio de plano inclinado é detalhado por Pitanga *et al.* (2009), e estabelece que este pode ser geralmente separado em três fases, como representado na Figura 2.8. Mostrando a Figura 2.8a, a Fase 1, que se denomina *fase estática* e o elemento superior da interface (geossintético superior ou a caixa superior contendo o solo) permanece praticamente imóvel ($\delta = 0$) sobre o plano inclinado até alcançar um ângulo $\beta = \beta_0$; a Figura 2.8b, a Fase 2, denominada *fase transitória*, onde para um incremento no valor da inclinação β (para $\beta > \beta_0$), o elemento superior da interface move-se gradualmente para baixo e a Figura 2.8c, a Fase 3, denominada *fase de deslizamento não estabilizado*, onde o elemento superior da interface sofre um deslizamento não estabilizado a uma velocidade crescente, ainda que a inclinação do plano seja mantida constante ($\beta = \beta_{lim}$).

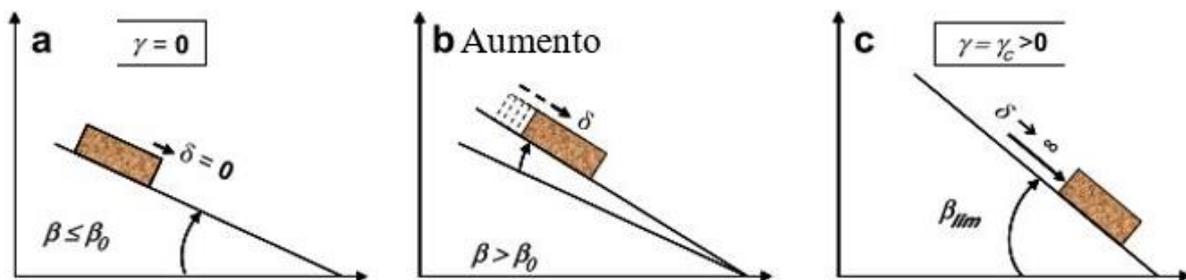


Figura 2.8. Diferentes fases do movimento da caixa superior, com o aumento da inclinação do plano inclinado (Modificado - Pitanga *et al.*, 2009). (a) Fase 1, (b) Fase 2 e (c) Fase 3.

Indistintamente, antes e depois de Pitanga *et al.* (2009), vários estudos (Girard *et al.*, 1990; Mello, 2001; Gourc & Reyes Ramirez, 2003; Wu *et al.*, 2008c; Briançon *et al.*, 2011; Carbone *et al.*, 2013) têm demonstrado um consenso quanto à apropriação do plano inclinado para a caracterização do atrito em interfaces com geossintéticos e tensões normais baixas. No que diz

respeito às dimensões da caixa de ensaio, essas especificações diferem de um autor para outro em função do equipamento que eles utilizaram. Na Tabela 2.2 estão listadas as principais características das condições dos ensaios de algumas pesquisas estudadas.

Tabela 2.2. Algumas pesquisas desenvolvidas com o ensaio de plano inclinado.

Pesquisador	Tensão (kPa)	Velocidade de inclinação (°/min)	Dimensões da caixa (m)	
			Comprimento	Largura
Girard <i>et al.</i> (1990)	-	-	1,00	1,00
Mitchell <i>et al.</i> (1990)	5	3,0±0,5	0,30	0,80
Gourc <i>et al.</i> (1996)		2 - 20	0,50	0,50
Lalarakotoson <i>et al.</i> (1999)	-	2 - 30	1,00	0,70
Lima Júnior (2000)	< 7	-	1,92	0,47
Lopes (2000)	5 - 25	0,5 - 20	0,3	0,3
Mello (2001)	< 7	-	1,92	0,47
Briançon <i>et al.</i> (2002)	5	0,5-3,2	1,00	1,00
Gourc e Reyes Ramirez (2003)	< 10	3	0,80	0,18
Aguiar (2003)	< 9	-	1,00	1,00
Gourc e Reyes Ramírez (2004)	5	3,0±0,5	0,80	0,18
Viana (2003) e Viana (2007)	< 7	-	1,92	0,47
Pitanga <i>et al.</i> (2009)	5	3	0,80	0,70
Briançon <i>et al.</i> (2011)	5	0,5-3,2	1,00	1,00
Pitanga <i>et al.</i> (2011)	5	3,0±0,5	0,30	0,80
Stoltz <i>et al.</i> (2012)	4	2	1,00	1,00
Monteiro (2012)	< 7	-	0,50	0,50
Carbone <i>et al.</i> (2013)	5	-	1,30	0,80
Miuzzi (2013)	5	-	0,30	0,30
Sánchez <i>et al.</i> (2016)	< 7	3,0±0,5	1,92	0,47

Segundo os trabalhos apresentados na Tabela 2.2 e os referenciados anteriormente, podem-se listar os principais fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento das interfaces, sendo os seguintes:

- rugosidade do material;
- temperatura e umidade;
- cargas normais diferentes;
- orientação da amostra e danos;
- velocidade e condições cinemáticas;
- extensão da área de contato da superfície;
- densidade e tamanho das partículas de solo;
- tipo de ensaio e condições de fronteira;

- espessura das amostras, rigidez e massa por unidade de área;
- abatimento do concreto, no caso de interfaces concreto-geossintéticos;
- tempo de resposta (período de tempo em que as superfícies se mantiveram em contato).

2.5.1. INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA

A interação dos principais tipos de geossintéticos utilizados em canais no Brasil foi estudada por Tupa (1994) e Tupa & Palmeira (1995), os quais utilizaram ensaios de tração confinada e de cisalhamento direto (caixa quadrada de 60 mm de lado). Os autores concluíram que a presença de água nas interfaces não influenciou o valor do ângulo de atrito e que a utilização de geotêxtil como proteção da geomembrana pode gerar tensões cisalhantes maiores do que sem a sua utilização. Para tanto, foram realizados ensaios de cisalhamento com amostras empoeiradas, reproduzindo as condições das obras. O resultado foi uma queda do valor do ângulo de atrito de 5° em relação às amostras limpas, demonstrando que os parâmetros de resistência entre geossintéticos podem ser afetados por aspectos construtivos, o que era considerado sem relevância na fase de projeto.

Também na década de 90, vários pesquisadores trabalharam com ensaios de “*Ring Shear*”. Muitos exemplos dessas pesquisas são encontrados e descritos por Martínez (2010), juntamente com outras pesquisas desenvolvidas até o ano de 2010. A autora reuniu vários resultados de ensaios “*Ring Shear*”, cisalhamento direto e plano inclinado para interfaces geotêxteis não tecidos/geomembranas texturizadas, observando valores do ângulo de atrito entre 15° e 40° para tensões tangenciais de pico, e entre 10° e 25° para tensões tangenciais pós-pico.

Nas análises dos ensaios de cisalhamento direto, a autora considerou tensões normais baixas (menores que 100 kPa) e altas (maiores que 100 kPa e menores que 500 kPa), amostras de dimensões pequenas (próximos e de 60 mm x 60 mm) e grandes (300 mm x 300 mm). Martínez (2010) considerou o fato de que muitos dos ensaios de cisalhamento direto da sua pesquisa, com amostras de 300 mm x 300 mm proporcionaram resultados de tensão tangencial pós-pico, com deslocamentos horizontais de 4-8 mm. Também obteve nos seus ensaios valores de tensão tangencial de pico menores aos obtidos por outros autores, os quais ensaiaram amostras de 60 mm x 60 mm. Uma proposta de equação de um modelo não linear para determinar empiricamente a máxima resistência cisalhante nas interfaces de geomembranas texturizadas e geotêxteis não tecidos foi validada por meio dos ensaios e análises numéricas.

Hebeler *et al.* (2005) estudaram, através de uma combinação de vários ensaios em laboratório e observações ópticas, o comportamento da interface de geomembranas texturizadas em contato com os geotêxteis não tecidos. Seus resultados sugerem que a interação de ‘gancho e laço’ (do inglês, *hook and loop*) desempenha um papel significativo no comportamento de cisalhamento da interface de sistemas de geomembranas com textura e geotêxteis não tecidos.

Conforme ilustrado pela Figura 2.9, quanto maior a tensão normal, maior é a imbricação até um valor de tensão normal em que a imbricação chega ao seu limite. Uma parte da tensão cisalhante se deve à imbricação entre o geotêxtil não tecido e a geomembrana. Essa parte aumenta com a tensão normal até a máxima imbricação.

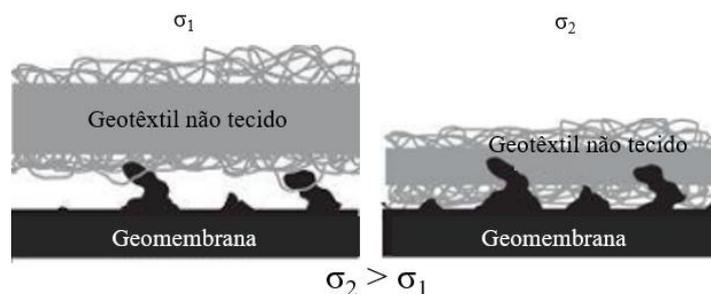


Figura 2.9. Mecanismo de interação da interface geotêxtil não tecido – geomembrana texturizada para baixo e alto valor de tensão normal (Modificado - Hebeler *et al.*, 2005).

Em outra análise, Kim (2006) ensaiou num equipamento de cisalhamento direto, com caixas de dimensões de, aproximadamente, 100 mm x 100 mm e interfaces de geotêxteis não tecidos de várias gramaturas e geomembranas lisas e texturizadas, para avaliar: i) a relação tensão-deformação de cisalhamento; ii) o efeito da textura da superfície na resistência da interface; iii) o efeito da tensão do geotêxtil na resistência da interface; iv) a relação entre tensão normal e o ângulo de atrito; v) o efeito velcro na avaliação da resistência; vi) a determinação da estabilidade da inclinação do geotêxtil-geomembrana instalada; e vii) o impacto da tensão do geotêxtil na degradação da superfície da geomembrana induzida por cisalhamento.

Os resultados obtidos por Kim (2006) mostraram que o cisalhamento de interfaces geotêxtil/geomembrana lisa acontece em quatro etapas, como mostrado na Figura 2.10: (1) assento inicial; (2) mobilização de tensão tangencial ou fricção deslizante, podendo acontecer um grande deslocamento vertical inicial sob baixo estresse normal; (3) pico e pós-pico, com

queda acentuada da resistência cisalhante e do deslocamento vertical; e (4) estado residual estável.

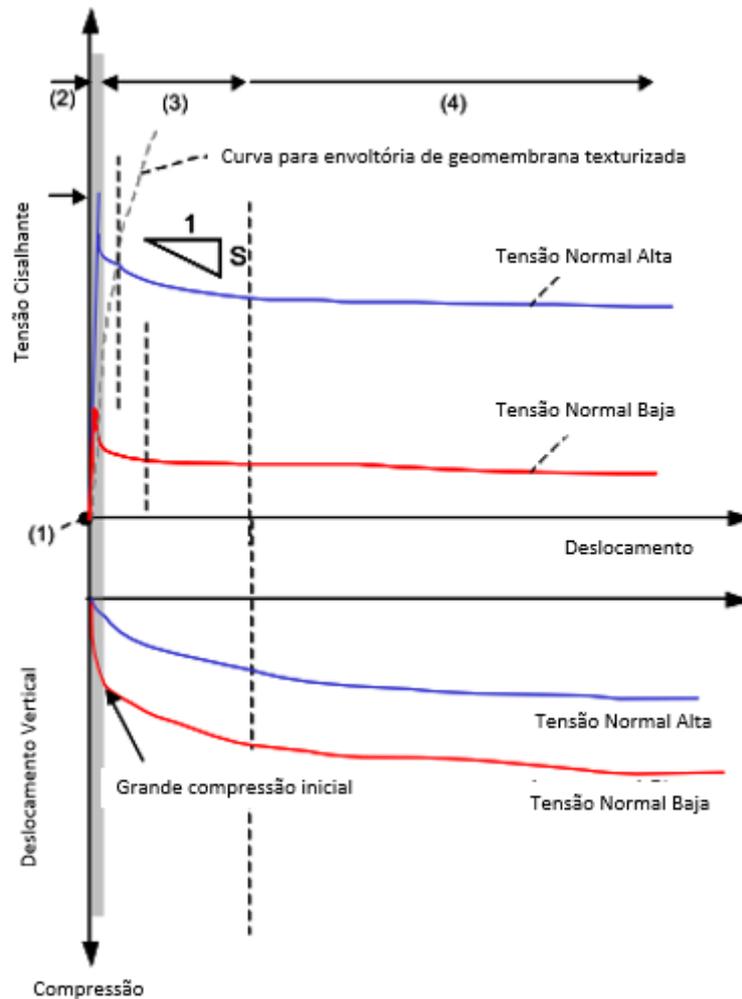


Figura 2.10. Curvas típicas de cisalhamento para as interfaces geotêxtil/geomembrana lisa (Modificado - Kim, 2006).

Por outro lado, o autor verificou que o cisalhamento de interfaces geotêxtil/geomembranas texturizadas mostrou cinco etapas, como indicado na Figura 2.11: (1) no assento inicial surge um acréscimo da densidade do geotêxtil ao redor das texturas da geomembrana, com conseqüentes dobras nas texturas; (2) reordenamento das deformações das texturas da geomembrana e das fibras geotêxteis; (3) acréscimo de resistência devido ao intertravamento das texturas da geomembrana na superfície do geotêxtil; (4) após o pico, a superfície geotêxtil é deteriorada pela perda gradual do intertravamento; e (5) uma tensão normal elevada pode limitar a dilatação do geotêxtil e produzir uma degradação residual, dobrando as texturas e resultando em um grande deslocamento no pico pelo intertravamento profundo entre as texturas da geomembrana e o geotêxtil, bem como pela alta resistência antes da liberação do

intertravamento. Durante todo o ensaio, o autor registrou uma flutuação da tensão cisalhante devido aos elementos de textura da geomembrana.

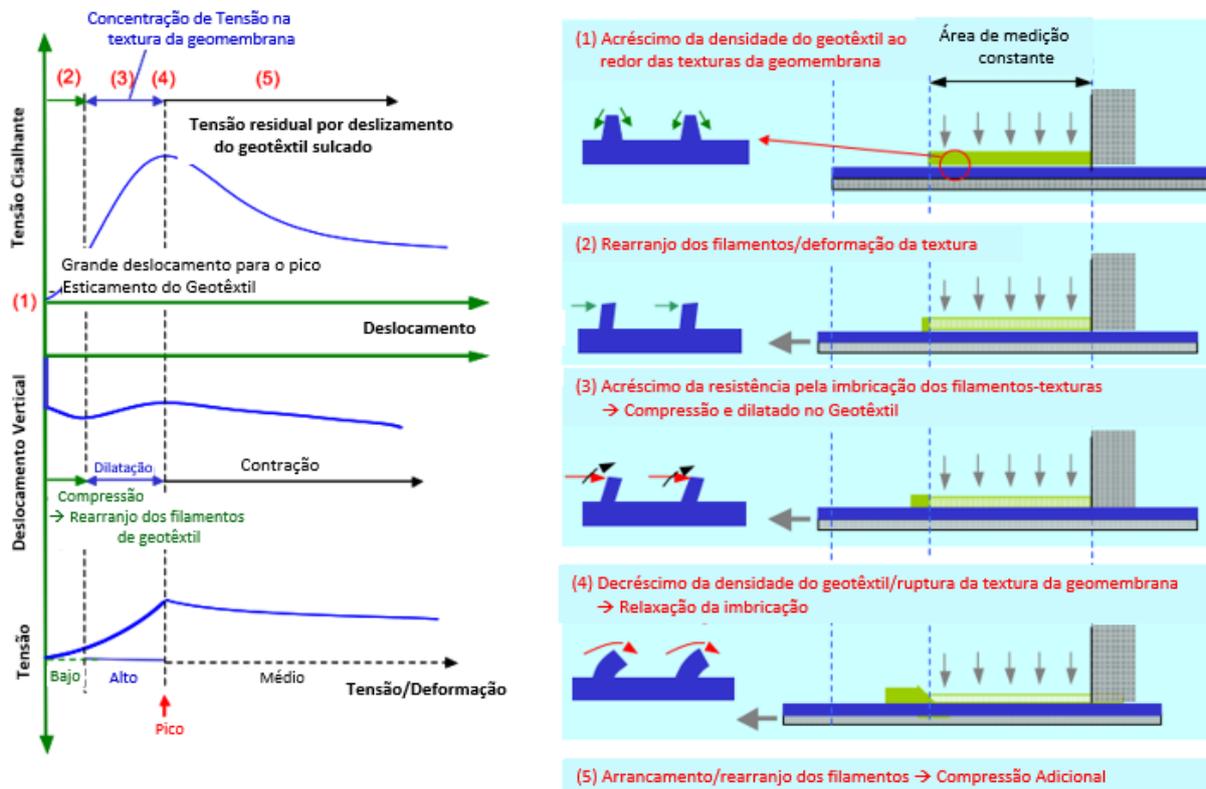


Figura 2.11. Curvas típicas de cisalhamento para as interfaces geotêxtil/geomembrana texturizada. (Modificado - Kim, 2006)

2.5.2. INTERFACES DOS GEOTÊXTEIS E GEOMEMBRANAS COM SOLO

Mitchell *et al.* (1990) realizaram ensaios de resistência ao cisalhamento em interfaces de geossintéticos mediante ensaio de cisalhamento direto com área inicial de contato da interface de 50,41 cm², com possibilidade de deslocamento até 7,5 mm, e ensaio de arrancamento com área inicial de contato da interface de 214 cm², com possibilidade de deslocamento até 80 mm. Os autores concluíram que as tensões normais são variáveis durante o cisalhamento, e que a caixa apresentou um pequeno deslizamento para alcançar a tensão cisalhante máxima.

Koutsourais *et al.* (1991), por sua vez, fizeram ensaios de cisalhamento direto e de plano inclinado para compreender melhor as características dos parâmetros da interface. Para o primeiro tipo de ensaio, foram aplicadas tensões de 20 kPa a 62 kPa e, para o segundo tipo, as tensões empregadas foram próximas de 2,7 kPa. Concluiu-se que, para tensões normais de

menor valor, a dilatância do solo melhora o atrito entre as interfaces, ocorrendo uma envoltória de ruptura curva para a interface geossintético/solo granular denso.

Segundo Tupa (1994) e Tupa & Palmeira (1995), os resultados de cisalhamento podem ser influenciados pela distorção do geotêxtil. Já em interfaces com geomembranas, a ruptura é alcançada para pequenos deslocamentos cisalhantes, enquanto que o aumento da plasticidade dos solos conduz a deslocamentos cisalhantes na ruptura maiores e resistências menores.

Jewell (1996) indicou que a eficiência do reforço é maior quando este orienta-se ao longo da direção das deformações de tração. Izgin & Wasti (1998) verificaram que o ângulo de atrito da interface de areia com partículas arredondadas é mais sensível para o grau de rugosidade da geomembrana, sobretudo quando comparadas com a areia de grãos angulares.

Lima Júnior (2000) avaliou a interface de areia grossa/geossintético mediante utilização do equipamento de plano inclinado. O autor encontrou resultados que mostraram deslocamentos baixos e influenciados pela rugosidade e pela rigidez à tração do geossintético, enquanto o ângulo de atrito de interface foi pouco influenciado pelas interfaces estudadas. Nas interfaces entre areia grossa/geomembrana (de 1 mm e 2 mm de espessura), o autor observou que as duas interfaces com as geomembranas têm a mesma resistência ao cisalhamento, independentemente da espessura da geomembrana e com deslocamentos menores dependentes da rigidez à tração. Além disso, na interface solo/geomembrana lisa, o ângulo de atrito foi menor pela pouca rugosidade, sendo observado um ângulo de atrito maior para a interface solo/geotêxtil não tecido. Quanto às soluções analíticas empregadas para a previsão de cargas à tração, o resultado foi considerado satisfatório. Por fim, concluiu que a resistência da interface depende da rigidez do geossintético e da densidade do solo confinante.

Sobre as quatro interfaces analisadas no ensaio de plano inclinado por Lima Júnior (2000), para areia grossa/geotêxtil não tecido (OP-20, OP-30, OP-60, VP-100) foram apresentadas curvas de evolução da tensão cisalhante *versus* deslocamento, mostrando que os geotêxteis não tecidos não diferem seu comportamento em função da gramatura. A partir da inclinação do plano de 21°, verificou-se que os deslocamentos começam a crescer ininterruptamente até a ruptura. Resultados similares foram encontrados posteriormente por Viana (2003). Cabe destacar que para esses ensaios foi lubrificada a base rígida para minimizar seu atrito.

Mello (2001), dando continuidade ao estudo realizado por Lima Júnior (2000), trabalhou na mesma aparelhagem com areia fina e argila, e apontou que a envoltória de ruptura tende a ser curva, ou seja, o ângulo de atrito secante diminui com o aumento da tensão normal. Na interface areia fina/geotêxtil não tecido, as curvas de deslocamento e carga apresentam o mesmo comportamento apresentado no trabalho de Lima Júnior (2000). Ademais, até a inclinação do plano de 27° (onde a tensão cisalhante começa realmente a ser absorvida pelo geossintético) não ocorreram grandes diferenças nos valores obtidos para os três níveis de tensão.

Mello (2001) ainda obteve uma envoltória de resistência para interface geotêxtil não tecido OP-30 com areia fina e ângulo de atrito de 32°, praticamente igual ao ângulo de atrito da interface com areia grossa de 31°, conforme definido por Lima Júnior (2000). Ele considerou essa diferença como decorrente da dispersão de resultados do ensaio. O autor ressaltou que manteve a mesma interface na parte inferior do geossintético, diretamente em contato com a madeira da base.

Os resultados de ensaios de plano inclinado realizados por Lima Júnior (2000) e envolvendo uma caixa maior (1942 mm de comprimento e 470 mm de largura), ao serem comparados com soluções analíticas permitiram estudar como ocorre a transferência de carga em determinadas configurações de interfaces. Constatou-se que a rugosidade da interface, a rigidez e a geometria dos geossintéticos contribuem diretamente para a magnitude de transferências de cargas entre as camadas de diferentes interfaces. Segundo observações do estudo de Mello (2001), valores diferentes de rigidez à tração das geomembranas tendem a gerar níveis diferentes de deslocamentos da interface.

Lopes (2000) estudou a interação mediante ensaios de cisalhamento em plano inclinado com um único equipamento desse tipo em Portugal naquele momento. A pesquisa objetivou estudar a influência da estrutura do geossintético, da granulometria do solo, da tensão de confinamento e do método de ensaio na resistência da interface solo-geossintético. Os resultados mostraram um acréscimo de resistência para: i) as estruturas mais abertas ou ásperas, ii) as granulometrias mais extensas (partículas de dimensões que variam entre 0,074 mm e 9,54 mm) e iii) o material de maior diâmetro médio e tensões de confinamento menores.

Lopes (2000) verificou um aumento da resistência de interface quando os solos granulares adjacentes aos geossintéticos (geogrelha biaxial, geotêxtil não tecido agulhado, geomembrana

rugosa, geotêxtil tecido, geomembrana lisa, geotêxtil não tecido termo soldado e geogrelha uniaxial) apresentaram granulometria não uniforme. Comparando os resultados dos ensaios nas interfaces de solo 2 (partículas de dimensões que variam entre 0,074 mm e 9,54 mm) com relação aos resultados dos ensaios das interfaces do solo 1 (partículas de dimensões que variam entre 0,074 mm e 2,00 mm), obteve-se um aumento do ângulo de atrito da interface na ordem de 2,1% para geotêxtil não tecido, de 10,2% para geotêxtil tecido, de 14,6% para geomembrana lisa, e de 5,5% para geomembrana rugosa.

A influência do material da geomembrana foi analisado por O'Rourke *et al.* (1990), que observaram que para geomembranas PEAD o ângulo de atrito da interface tende a ser menor do que para geomembranas PVC, pois os mecanismos de deslocamentos dos grãos são diferentes. Para superfícies mais rígidas, os grãos tendem a deslizar, enquanto que para superfícies mais compressíveis há a tendência de rolamento dos grãos, provocando um acréscimo da resistência ao cisalhante da interface (Mello, 2001).

Outro aspecto estudado por O'Rourke *et al.* (1990) foi a influência da densidade do solo na interação solo-geossintético. O estudo foi feito por meio de ensaios de atrito de interfaces areia-geomembrana e constatou-se que a resistência de interface é diretamente proporcional à densidade do solo.

A influência da textura e do tipo de geossintético (geomembrana, geotêxtil, georrede) na mobilização da resistência de interfaces entre solo e geossintéticos foi avaliada por Narejo (2003), reportando que para os materiais empregados as mudanças nas características da superfície resultaram em uma alteração no ângulo de atrito.

Fleming *et al.* (2006) estudam interfaces entre geomembrana lisa (PEAD) e três solos (areia de Ottawa, uma mistura de areia-bentonita e uma areia siltosa) por meio de ensaios de cisalhamento (caixa quadrada de 100 mm de lado). Ao estudar o dano na geomembrana após a ruptura, os autores identificaram que a rugosidade da superfície da geomembrana mudou. Isso sugere que, em tensões normais mais altas, o mecanismo de falha muda de deslizamento puro para uma combinação de deslizamento e arado. Os autores argumentaram, portanto, que assumir um mecanismo de fricção de falha deslizante para a interface geomembrana-solo em tensões normais mais altas pode ser conservador. O efeito da mudança no mecanismo de falha

de cisalhamento da interface de deslizar para arar é mostrado, conceitualmente, na Figura 2.12, sendo δ o ângulo de atrito do solo e ϕ' o ângulo de atrito da interface.

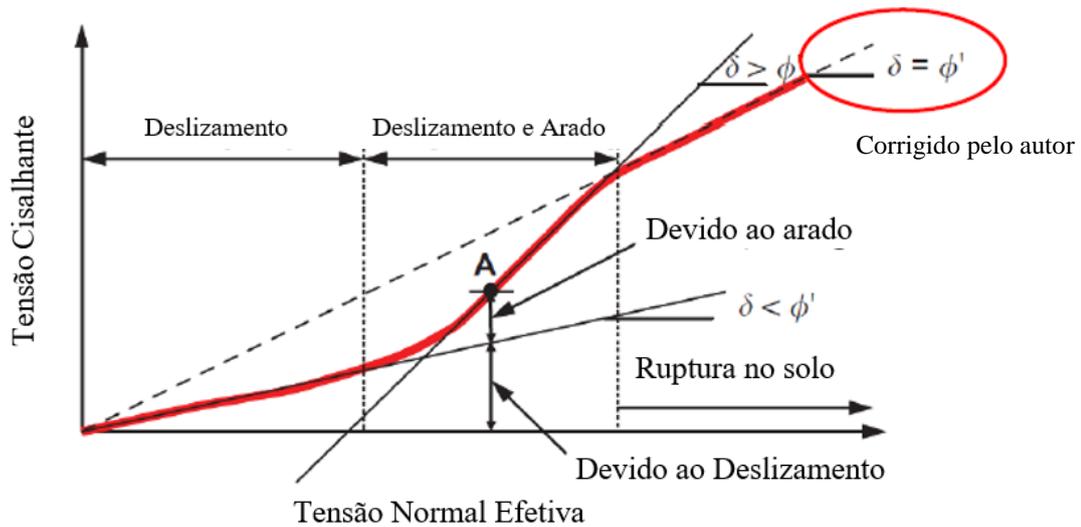


Figura 2.12. Conceitualização de envoltória de interface de solo e geomembrana. (Modificado - Fleming *et al.*, 2006)

Para a tensão normal baixa, os grãos deslizam até a ruptura de interface, então o ângulo de atrito da interface é menor do que o do solo sozinho, eficiência > 1 ($\delta < \phi'$). Quando a tensão normal aumenta, os grãos deslizam e penetram, fazendo sulcos na geomembrana, até a ruptura de interface; a força necessária para arar deve ser igual à força de atrito de partícula a partícula ($\delta = \phi'$). Quando a tensão normal aumenta mais, os grãos deslizam entre si e acontece a ruptura no solo acima da interface, fazendo com que o ângulo de atrito da interface seja menor do que o do solo sozinho, eficiência < 1 ($\delta > \phi'$).

Wu *et al.* (2008b) apresentam uma abordagem da influência da carga de neve, que pode ter grande impacto sobre a deformação do geotêxtil. Tal fato deve-se à baixa rigidez do geotêxtil e à baixa tensão “*in situ*” extrema sobre o material, em algumas obras, antes da neve ocorrer. Depois de uma queda de neve pesada, a inclinação do aterro exposto foi coberta de neve até uma altura de 1 m. Foram observados grandes deslocamentos para baixa inclinação do geotêxtil.

Aguiar (2008) apresenta resultados de ensaio e evidencia como o desgaste excessivo por manipulação durante a instalação da geomembrana altera significativamente os resultados de resistência de interfaces solo/geossintético. Para os ensaios de plano inclinado, determinou-se

que a influência do aumento de densidade da areia na interface de areia/geomembrana não resultou para o ângulo de atrito da interface. Com o acréscimo do valor da tensão normal, a tensão de cisalhamento de ruptura aumenta de uma maneira diferente do que a relação linear estabelecida pelo modelo de Mohr-Coulomb. O ajuste linear dos resultados de ensaios de cisalhamento para determinados valores de tensões normais pode acrescentar ou minorar a tensão de cisalhamento, ou, ainda, fornecer valores negativos do parâmetro intercepto com o eixo das ordenadas (chamado de ‘adesão’ para o caso de geossintéticos). O valor de adesão negativo não tem qualquer significado físico e é apenas o resultado da aplicação do modelo de Mohr-Coulomb a um comportamento mais complexo.

Em outra pesquisa, Afonso (2009) definiu alguns fatores que influenciam a interação solo-geossintético, como: i) a dimensão das partículas de solo, ii) a tensão de confinamento, iii) a compactidade do solo e iv) a estrutura do geossintético. Foram ainda realizados ensaios com variação cíclica da tensão vertical, o que diminui a resistência da interface. Os resultados mostraram que, para ensaios cíclicos, quanto menor a frequência de aplicação da carga vertical, maior será a amplitude de variação da resistência ao cisalhamento, considerando um valor médio.

Martínez (2010) realizou uma grande campanha laboratorial com 233 ensaios e avaliou diferentes interfaces de geossintéticos, com diferentes arranjos num equipamento de cisalhamento direto de caixa quadrada de 300 mm de lado. A pesquisa mostrou que os mecanismos de interação desenvolvidos durante o cisalhamento, tendo em vista a maioria das interfaces, foram diferentes para baixas e altas tensões normais. Para tensões normais baixas, a imbricação entre os materiais é menor, o que sugere que os mecanismos de engrenagem, enrolado, atrito e travação se produzem em nível superficial, originando contatos pontuais. Já para tensões normais altas, devido ao aumento da compressão de imbricação, as interações se produzem em nível interno, proporcionando interações mais globais e contínuas. A autora observou que a mobilização, em maior ou menor medida, com um ou outro mecanismo de interação, depende do tipo de rugosidades, fibras e rigidez dos materiais que constituem a interface.

No caso dos ensaios de plano inclinado, a condição de fronteira tem uma influência significativa. Para ensaios em plano inclinado, a NBR 12957.2 (ABNT, 2013c) estabelece dois possíveis métodos: i) equipamento com base rígida e uso de lixa de esmeril abrasiva P100 para

ensaios com geotêxteis e ii) equipamento com base preenchida com solo. Esses métodos foram propostos por Gourc *et al.* (1996), os quais recomendaram a colagem de um material rugoso, previamente definido, para buscar uma rugosidade semelhante à do solo.

Com o intuito de quantificar a influência do uso de um método ou outro, Lopes (2000) realizou ensaios com a caixa inferior preenchida com solo e ensaios sem caixa inferior (geossintético sobre a base rígida). Nos ensaios realizados com a base flexível, obteve-se um aumento do ângulo de atrito de apenas 3% em interfaces de geotêxtil não tecido agulhado (considerando dois tipos de areia). Foi também registrado um decréscimo no valor do ângulo de atrito quando se aumentou a tensão de confinamento (normal) de 5 para 25 kPa. Além dos dois métodos, a discussão sobre se a interface do geossintético com a base rígida nos ensaios deve ser fixa ou livre (para o geossintético se deformar ou não durante o ensaio) está relacionada diretamente ao comportamento do geossintético nas situações da obra.

Monteiro (2012) e Monteiro *et al.* (2014) estudaram interfaces de areia fina com geomembranas de PVC (lisa) e PEAD (lisa e texturizada), com variação de saturação do solo de 5% a 90%. O ângulo de atrito menor foi obtido nas interfaces de solo/geomembrana lisa (PVC e PEAD) e com menores valores de saturação. Para os maiores valores de saturação dos solos componentes de interfaces, o maior ângulo de atrito foi obtido para a interface solo/geomembrana texturizada de PEAD, conforme esperado. De modo geral, os ângulos de atrito obtidos mediante ensaio de cisalhamento direto foram maiores do que os obtidos pelo ensaio de plano inclinado.

Frost *et al.* (2012) investigaram, em microescala, o efeito da rugosidade da superfície da geomembrana nos mecanismos de cisalhamento da interface entre materiais granulares e geomembranas. Os autores avaliaram a extensão da espessura da zona de cisalhamento em interfaces de partículas redondas/angulares e superfícies de geomembranas lisas/texturizadas. Os resultados permitiram definir como é gerada a resistência ao cisalhamento para cada tipo de interface. Segundo o estudo, para as geomembranas lisas, a resistência ao cisalhamento da interface é desenvolvida através do deslizamento das partículas, enquanto que para as geomembranas com textura, a resistência resulta do travamento e da dilatação das partículas de areia.

Quanto ao estudo sobre o efeito da angularidade de partículas, observou-se que partículas de areia mais angulares resultaram em maiores danos superficiais por risco às geomembranas lisas (sulcos). Estas, por sua vez, produziram maiores ângulos de fricção residual do que com areia

arredondada. A tensão normal mais elevada produziu um maior dano superficial por risco das partículas de areia na geomembrana lisa e reduziu a dilatância nos cisalhamentos da areia com geomembranas texturizadas. Os autores conseguiram quantificar a altura de amostra de areia, que foi cisalhada a partir da relação de vazios na amostra de solo, antes e depois do cisalhamento.

A influência na resistência ao cisalhamento das propriedades morfológicas das areias (redondeza, esfericidade e regularidade) foi avaliada por Vangla & Gali (2016a), com análises de imagens microtopográficas de superfícies de geomembranas, antes e depois do ensaio de cisalhamento, com areias de quartzo grossa, média e fina, e uso de caixa com dimensões de 300 mm x 300 mm x 80,5 mm. A Figura 2.13 mostra o efeito do arado ou sulcado que produz o solo na superfície da geomembrana lisa.

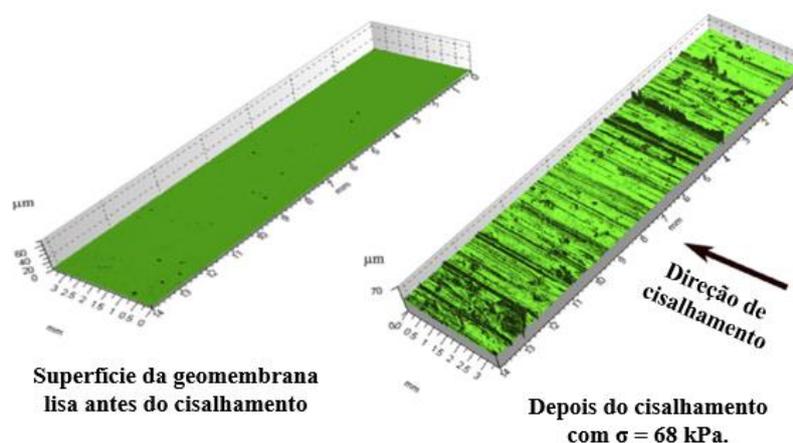


Figura 2.13. Aspecto das geomembranas antes e depois do ensaio de cisalhamento (Modificado - Vangla & Gali, 2016a).

Os resultados dos ensaios de cisalhamento da interface e os estudos de rugosidade superficial revelaram que o ângulo de atrito da interface depende dos contatos efetivos formados na superfície da geomembrana. Foi verificado que a morfologia das areias tem grande influência na tensão de cisalhamento da interface. Nesse caso, o aumento da angularidade das partículas causou sulcos mais profundos na superfície da geomembrana, resultando em maior resistência ao cisalhamento na interface. O esforço de cisalhamento de pico da interface foi sustentado até grandes deslocamentos de cisalhamento para areias grossas e médias, já que o deslizamento e o sulcado foram contínuos. Já no caso de areia fina, uma vez que as partículas não conseguiram

penetrar mais profundamente na superfície da geomembrana, o esforço máximo de cisalhamento foi menor, havendo ocorrência apenas de deslizamento de grãos.

Posteriormente, Vangla & Gali (2016b) avaliaram o travamento das partículas de areia em interfaces com geotêxteis tecidos, encontrando maior tensão cisalhante quando o tamanho médio da partícula (D_{50}) de areia coincidiu com o tamanho da aspereza do material de interface, ou com o tamanho do espaço entre fios. Tal fato ocorreu por conta do melhor bloqueio alcançado pelas partículas de areia, as quais se encaixaram perfeitamente nas asperezas.

Punetha *et al.* (2017) estudaram interfaces entre areias e geotêxtil não tecido ou geomembrana e verificaram que a força de cisalhamento da interface entre o solo e os geossintéticos depende principalmente das propriedades mecânicas e naturais do solo, dos geossintéticos empregados e da tensão normal que atua na interface. O estudo foi realizado por meio de investigação microestrutural de amostras deformadas através do Microscópio Eletrônico e revelou que o mecanismo de cisalhamento inclui o entrelaçamento e o estiramento dos fios do geotêxtil, enquanto a areia desliza entre eles, e de sulcado na geomembrana pelas partículas de areia. O mecanismo de cisalhamento da areia-geomembrana é altamente dependente da tensão normal e do grau de saturação da areia.

2.5.3. RESISTÊNCIAS DE INTERFACE DE GEOTÊXTEIS E GEOMEMBRANAS COM CONCRETO

O concreto também pode ser empregado como proteção mecânica de geomembranas em canais, lagoas e barragens, entre outras obras de engenharia. As aplicações na construção de lagoas são reportadas por Vidal (2006), cujo objetivo é evitar danos durante a limpeza e manutenção da lagoa durante a operação, permitindo a construção dos detalhes necessários para o tratamento do efluente. O concreto pode ser pré-moldado (estado endurecido) ou em estado fresco, sendo esse último armado ou não.

O estudo realizado por Viana (2007) considerou as interfaces de concreto/geossintético, destacando as interfaces com concreto curado e com concreto fresco de três consistências (40, 60 e 80 mm). Os resultados dos ensaios realizados com concreto fresco mostraram que o uso da geomembrana texturizada pode aumentar significativamente o ângulo de inclinação da rampa na ruptura.

A resistência de cisalhamento nos ensaios com interfaces concreto/geomembrana foi governada preponderantemente pela adesão, de modo que um abatimento de 60 mm se apresentou de forma mais eficiente no incremento do ângulo de inclinação da rampa na ruptura. Entretanto, a resistência da interface nos ensaios de concreto/geotêxtil foi governada predominantemente pelo atrito. Nesse caso, o abatimento mais eficiente foi de 40 mm. Quanto aos ensaios com concreto curado, estes forneceram resultados desfavoráveis em termos de inclinação da rampa na ruptura, sobretudo quando comparados com os resultados dos ensaios com concreto fresco. Nos ensaios com o concreto curado, o mecanismo por atrito foi significativo na mobilização da resistência de interface.

Os ensaios de plano inclinado no laboratório e em obra foram realizados por Abramento *et al.* (2010) para interfaces de concreto fresco e geomembranas (geomembranas lisas, de baixa rugosidade e de alta rugosidade). O objetivo era simular no laboratório as mesmas condições prevalentes no local de construção. O concreto fresco usado convencionalmente para a proteção de revestimento, com abatimento de 50 mm, foi empregado em todos os ensaios e na obra. As geomembranas usadas nos ensaios de laboratório foram colocadas num canal em construção com taludes de inclinação 2H:1V a 1,7H:1V. Os resultados mostram diferenças de comportamento devido à rugosidade das geomembranas utilizadas na interface (Figura 2.14).



Figura 2.14. Aspecto geral das geomembranas após a colocação do concreto (da esquerda para a direita: baixa aspereza, lisa e de alta aspereza) (Abramento *et al.*, 2010).

Como pode ser observado na Figura 2.15, a partir dos resultados reportados por Abramento *et al.* (2010) sobre o ensaio de rampa com a geomembrana de maior aspereza e do emprego do método desenvolvido por Gourc *et al.* (1996), foi possível determinar as tensões normais e cisalhantes na ruptura e, em consequência, comparar o resultado do laboratório e da obra. Pode-se observar que, apesar de todos os cuidados considerados, não foi possível reproduzir a envoltória linear da interface da obra no laboratório. Os principais fatores que podem ter influenciado esses resultados estão relacionados a um apoio irregular da geomembrana no solo ou a uma variabilidade do concreto, como, por exemplo, a variação climatológica, que propicia temperaturas diferentes na geomembrana: umidade, tempo de pega, efeito do levantamento da rampa, não confinamento do concreto numa caixa no canal, tensão normal diferente, abatimento, entre outros fatores.

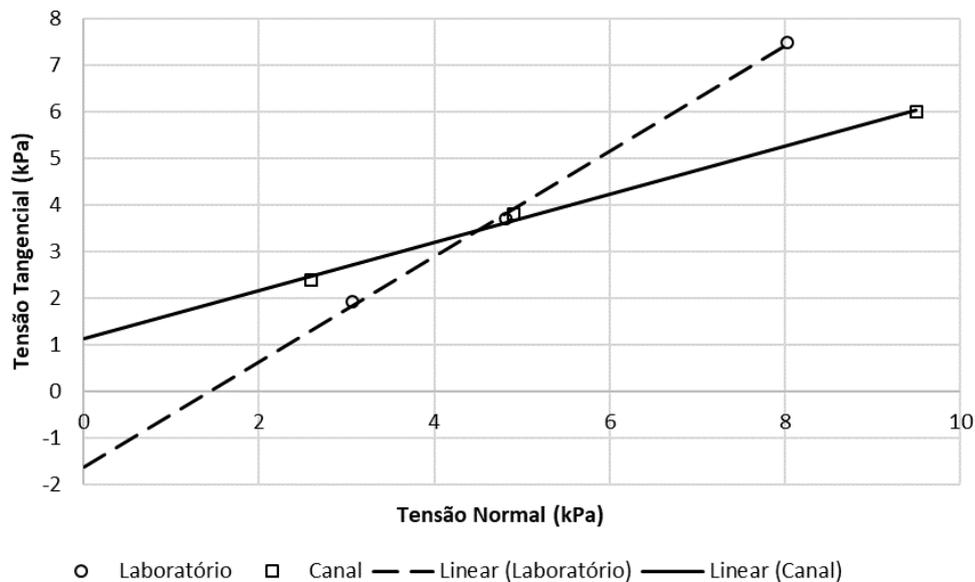


Figura 2.15. Envoltórias de ruptura para geomembrana de alta aspereza (laboratório e canal).

Uma possível explicação sobre a divergência dos resultados obtidos por Abramento *et al.* (2010) pode estar relacionada ao processo de compactação do concreto sobre a geomembrana. Para tanto, considera-se como analogia para esse caso o estudo de Fleming *et al.* (2006), mostrado na Figura 2.12.

Quanto ao ensaio de laboratório sobre a base rígida, o efeito de adesão aumenta devido à compactação pela cravação das partículas de agregado graúdo na geomembrana. Ao considerar que o ângulo de atrito do concreto fresco compactado é superior ao da interface, as forças de

arado dos grãos (agregado graúdo) na geomembrana serão cada vez maiores e proporcionais à densidade do concreto, descartando uma ruptura unicamente por deslizamento. Tal fato induz valores de adesão negativa na envoltória de ruptura, os quais não conseguem representar esse comportamento mais complexo.

2.6. ANÁLISE DA ESCALA DOS ENSAIOS

Conhecendo os resultados das pesquisas comentadas anteriormente, chama-se atenção para a influência que se pode ter na resposta cisalhante de interfaces em que o tamanho da amostra é ensaiado. Sabe-se que experimentos de laboratório na engenharia civil são ferramentas essenciais para estudar o comportamento de estruturas, assim como dos materiais de que estas são compostas. As dimensões reais da estrutura em geral são várias vezes maiores do que as dos modelos que podem ser ensaiados em laboratório. Por esse motivo, tais ensaios são usualmente efetuados em escala reduzida. Quando essa escala é conhecida, induz-se uma dependência dos resultados com a escala escolhida, surgindo a necessidade de um correto entendimento desse efeito de escala para poder levar os resultados experimentais para a escala real.

Diversos pesquisadores, tais como Lalarakotoson *et al.* (1999); Gourc & Reyes Ramirez, (2003); Gourc & Villard (2004); Gourc & Reyes Ramírez, (2004); Pitanga *et al.* (2009, 2011); Brianchon *et al.* (2011) e Carbone *et al.* (2012, 2013) apresentam estudos sobre as interfaces com ensaios de plano inclinado e ensaios de cisalhamento convencional, destacando análises de escala e tipo de ensaios e a sua influência nos ângulos de atrito das interfaces. É válido ressaltar que esses pesquisadores consideram as diferenças entre tamanhos de caixas de cisalhamento como escalas diferentes, isto é, o tamanho da área de contato a ser cisalhada.

Alguns estudos, como os de Aguiar (2003, 2008); Koutsourais *et al.* (1991); Lalarakotoson *et al.* (1999); Mitchell *et al.* (1990) e Monteiro *et al.* (2014), determinaram os parâmetros de interface mediante a realização de ensaios que variam os tamanhos de caixa de cisalhamento, embora tenham seguido procedimentos similares de ensaio. As tensões normais utilizadas nos estudos anteriormente citados foram iguais ou superiores a 20 kPa para os ensaios de cisalhamento – exceto o de Aguiar (2008), que usou tensões entre 1,8 a 8,4 kPa –, com tamanhos e formas de caixa diferentes. Para os ensaios de plano inclinado (PI), as tensões normais

variaram em função do ângulo de inclinação durante o experimento. Cada autor, em função das limitações dos equipamentos de PI, trabalhou com tensões normais diferentes e, geralmente, abaixo de 10 kPa. Na Tabela 2.2 são apresentados exemplos de valores iniciais das tensões normais empregadas por alguns autores, ressaltando que nos ensaios de PI, executados por Lima Júnior, (2000); Mello, (2001); Viana, (2007); Monteiro, (2012); Monteiro *et al.* (2014) e Sánchez *et al.* (2015), cujo equipamento foi o mesmo utilizado neste trabalho, utilizaram-se tensões normais iniciais inferiores a 8 kPa devido às limitações do equipamento.

Foram consultados alguns trabalhos para facilitar o entendimento das envoltórias de ruptura sob distintas escalas (Mitchell *et al.*, 1990; Koutsourais *et al.*, 1991; Lalarakotoson *et al.*, 1999; Aguiar, 2008 e Monteiro, 2012) e comparar os ensaios de cisalhamento direto e de plano inclinado. Nas interfaces areia-geomembrana, a ruptura foi atingida para valores reduzidos de deslocamento. Considerando todos os ensaios executados, notou-se que não há um comportamento geral definido dos deslocamentos quando há o aumento da tensão confinante para todos os ensaios. Para os ensaios de rampa, por sua vez, existe uma tendência de diminuição dos deslocamentos com o aumento da tensão normal.

Izgin & Wasti (1998) usaram nos seus ensaios de rampa em interfaces areia/brita-geomembrana lisa/texturizada caixas quadradas com dimensões iguais a 60 mm x 60 mm (também fez cisalhamento direto convencional), 200 mm x 200 mm e 300 mm x 300 mm, com tensões normais variando de 5 a 50 kPa. Os autores observaram que: i) as envoltórias de ruptura para os ensaios de cisalhamento direto são curvas com adesão e ângulo de atrito de interface maior, em particular quando comparadas às envoltórias dos ensaios de rampa, que são linhas retas que passam pela origem (sem adesão) e ii) o aumento da área de contato nos ensaios de plano inclinado provocou um aumento do ângulo de interface médio de, aproximadamente, três graus, da menor para a maior área (Figura 2.16). Os autores não avaliaram se essa pequena diferença pode estar relacionada à dispersão dos resultados.

Wasti & Özdüzgün (2001) avaliaram a influência no ângulo de atrito pelo aumento da tensão normal para ensaios de cisalhamento direto, e de rampa com diferentes áreas de contato para interfaces de geotêxtil e geomembrana (lisa e texturizada). Os autores obtiveram valores maiores do ângulo de atrito com o aumento da tensão normal (Figura 2.17), sendo maiores os valores do ângulo de atrito nos ensaios com maior área de contato (300 mm x 300 mm). Por outro lado, os valores dos ângulos de atrito para os três tipos de ensaios sob baixas tensões

normais foram mais próximas nas interfaces com geomembrana lisa do que nas interfaces texturizadas.

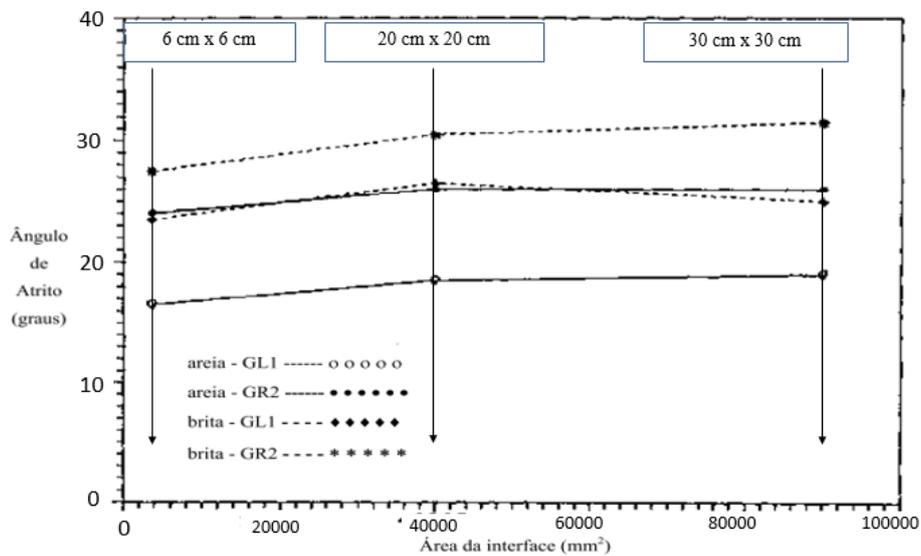


Figura 2.16. Aumento do ângulo de atrito de interface com o aumento da área de contato nos ensaios de plano inclinado (Modificado - Izgin & Wasti, 1998).

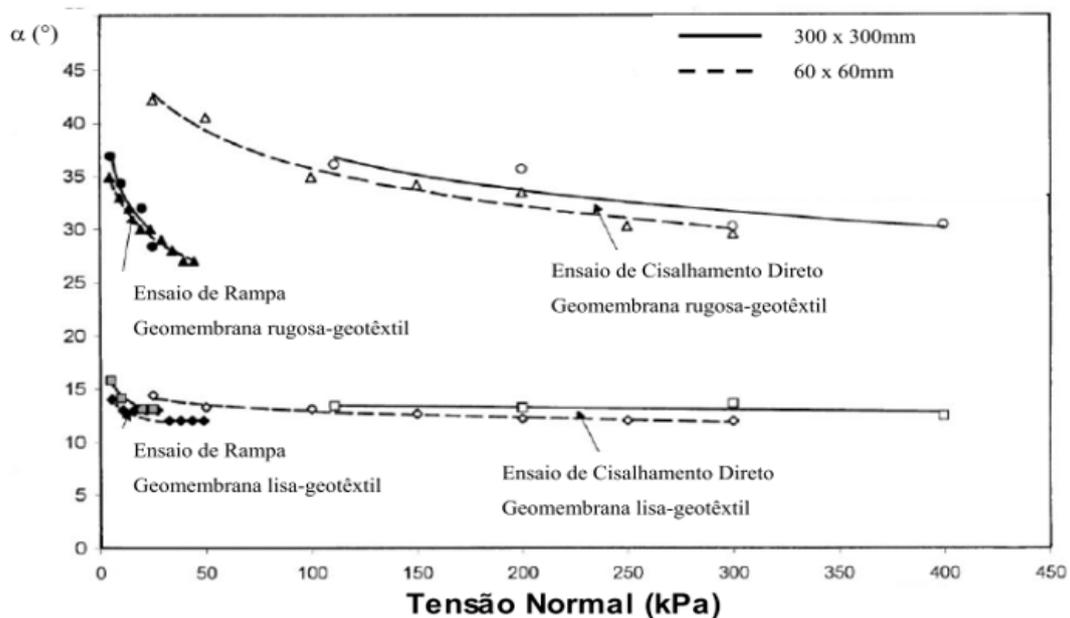


Figura 2.17. Resultado de ângulo de atrito de interface com o aumento da tensão normal (Modificado - Wasti & Özdüzgün, 2001).

Hsieh & Hsieh (2003) realizaram ensaios de cisalhamento direto com caixas de dimensões de 100 mm x 100 mm, 200 mm x 200 mm, 300 mm x 300 mm e 400 mm x 400 mm, em interfaces

de geomembranas de diferentes rugosidades e duas areias. Os valores dos ângulos de atrito de pico obtidos em ensaios com caixas pequenas foram menores do que os obtidos em caixas maiores (Figura 2.18). Além disso, os valores de atrito de pico foram maiores e semelhantes a partir das caixas de dimensões 300 mm x 300 mm e 400 mm x 400 mm, o que atribui a eliminação do efeito de borda pelas maiores dimensões. Portanto, os autores recomendaram o uso da caixa de 300 mm x 300 mm.

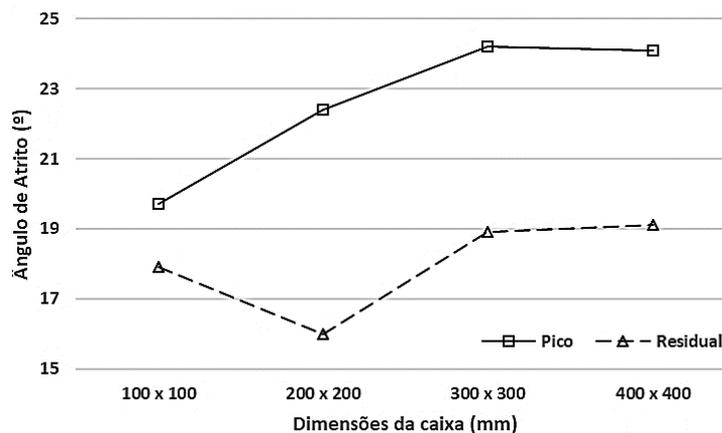


Figura 2.18. Aumento do ângulo de atrito de pico e residual de interface com o aumento da área de contato nos ensaios de cisalhamento direto (Elaborado de - Hsieh & Hsieh, 2003).

Aguiar (2008) apresentou o desenvolvimento de um novo equipamento capaz de executar três tipos de ensaios (cisalhamento direto convencional, cisalhamento direto com reforço inclinado e ensaio de rampa). O equipamento permite combinar diferentes caixas de ensaio e acessórios. Além do projeto e construção, o trabalho também apresenta os resultados de uma série de ensaios de cisalhamento, empregando-se um solo (areia) e três geossintéticos (uma geogrelha e duas geomembranas).

Como resultados, notou-se que as análises da influência das dimensões das caixas de ensaio demonstraram que a relação comprimento/altura interfere significativamente nos resultados. Do mesmo modo, as variações da forma e tamanho das caixas de ensaios pouco afetam os resultados, desde que respeitados os limites de utilização do equipamento. As análises da influência da metodologia de ensaio indicaram que os ensaios de rampa com face da caixa inclinada não forneceram bons resultados, especialmente quando comparados aos ensaios com as faces verticais, já que a distribuição de tensões inicialmente não uniforme atingiu uma ótima condição de distribuição uniforme, com uma inclinação de 30°.

Já a análise da influência do desgaste excessivo e do dano da geomembrana (uma vez que alteram a rugosidade da superfície do geossintético) mostrou que eles alteram significativamente os resultados. Nos ensaios de cisalhamento não há variação significativa do ângulo de atrito secante na ruptura para cada tensão normal. O contrário é observado nos ensaios de rampa, em que o aumento da tensão normal resulta em uma redução do ângulo de atrito secante.

2.7. CARACTERIZAÇÃO MICROTOPOGRÁFICA DA ASPEREZA EM GEOSSINTÉTICOS

Para realizar um estudo significativo dos mecanismos fundamentais da resistência ao cisalhamento de interfaces, faz-se necessário caracterizar os materiais envolvidos. Para meios particulados, tais como o solo, a caracterização pode ser realizada por meio de uma série de ensaios com padrões laboratoriais. Da mesma forma, os geossintéticos podem ter suas propriedades determinadas por uma série de ensaios.

Os pioneiros na caracterização da aspereza das superfícies de geomembranas foram Dove *et al.* (1996), que apresentaram uma revisão da terminologia da rugosidade superficial e dos parâmetros de rugosidade superficial utilizados em outros campos de pesquisa, ressaltando que não existia uma normativa específica e recorrendo a conceitos aceitos e adotados por outras áreas da engenharia. Os autores apresentam os métodos para a determinação da microtopografia na engenharia mecânica (Figura 2.19) e utilizam a Microscopia de Força Atômica (AFM) como uma nova ferramenta para quantificar a microtopografia de geomembranas lisas.

Naquele momento não existiam métodos para quantificar a rugosidade de superfícies texturizadas, em particular pelas limitações do equipamento de perfil mecânico disponível. No entanto, percebeu-se que essa metodologia poderia beneficiar a indústria de geossintéticos em estudos forenses de micro deformação pós-falha ou degradação de amostras de geossintéticos. A partir de uma análise dos seus resultados, pode-se ver como as geomembranas lisas tinham maior aspereza do que as fabricadas atualmente, sobretudo pela tecnologia de fabricação. Obteve-se, também, uma pequena diferença nos resultados para os dois tipos de geomembrana avaliadas, sendo maior a aspereza nas amostras de polietileno de muito baixa densidade em relação àquela observada para o PEAD.

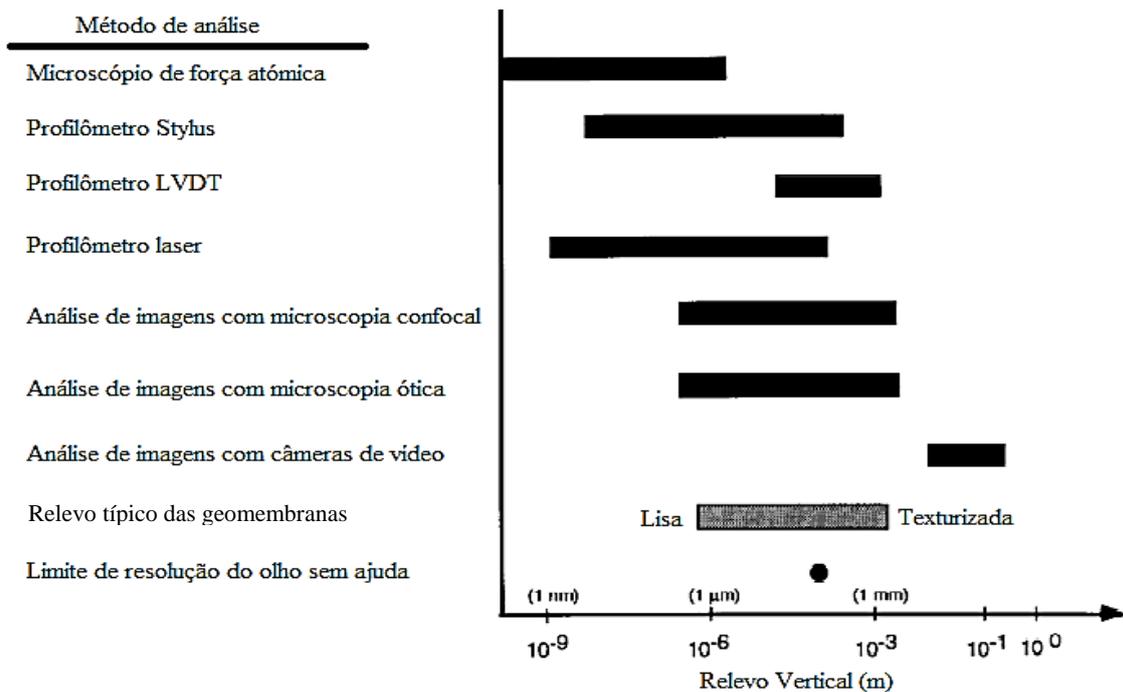


Figura 2.19. Faixas aproximadas de operação dos equipamentos para medir topografia de superfícies (Modificado - Dove *et al.*, 1996)

Com base no trabalho de Dove *et al.* (1996), outras pesquisas focaram no estudo da relação entre a resistência ao cisalhamento de interfaces (solo/geossintético) e os parâmetros de rugosidade dos geossintéticos, fundamentalmente com areias de diferentes morfologias e em menor medida argilas (Janoo, 1998; ABNT NBR ISO 4287, 2002; Frost *et al.*, 2002; Duhwan & J. David, 2005; Kim, 2006; Vangla & Gali, 2016b, 2016a; Afzali-Nejad *et al.*, 2017; Feng *et al.*, 2017; Punetha *et al.*, 2017).

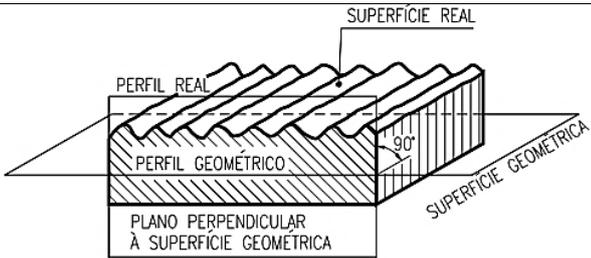
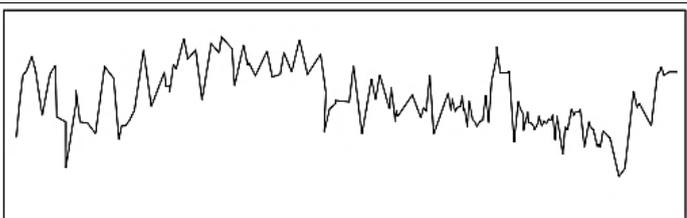
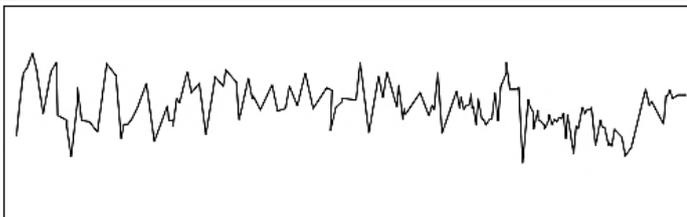
2.7.1. TERMOS, DEFINIÇÕES E PARÂMETROS DA RUGOSIDADE

Os parâmetros de caracterização da rugosidade originaram-se em aplicações para a engenharia mecânica, como forma de quantificação dos diversos acabamentos das superfícies resultantes dos processos de fabricação. Depois de alguns anos estudando esses parâmetros, foi possível estabelecer normas para determinar as especificações geométricas dos produtos, as quais, posteriormente, foram adotadas por alguns países. Para o caso do Brasil, a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) é a que está em vigor. Mundialmente, a nomenclatura e significado dos parâmetros têm algumas diferenças devido às normativas canceladas e em vigor, consideradas em distintos países. Uma análise comparativa e resumo das principais diferenças, segundo as normativas antigas e em vigor (Japão – *JIS*; U.S.A – *ANSI e ASME*; França – *NF*; antiga ISO;

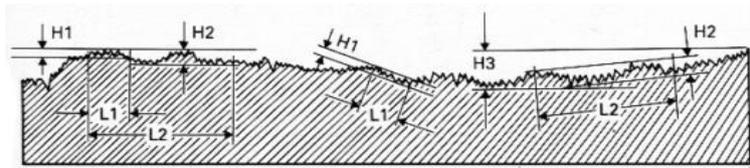
U.K. – BS; Alemanha – DIN; E.U, U.K. e Japão - *ISO*), são encontradas no *site* da empresa “Inspection Engineering”, disponível em ACCRETECH TOKYO SEIMITSU (2017).

A definição inicial dos tipos de perfis pode ser encontrada na Tabela 2.3, a qual está baseada na composição da superfície rugosa apresentada na Figura 2.20. Para a obtenção dos perfis é necessário empregar algum tipo de apalpador de superfície e estabelecer o comprimento que precisa ser medido para obter bons resultados. Define-se esse comprimento por meio da distância percorrida pelo apalpador sobre a superfície (l_t), que resulta da soma da distância para o apalpador atingir a velocidade de medição (l_v), cinco vezes o comprimento da amostragem ($l_e = l_r$ ou “*cut off*”) ou o também conhecido comprimento de avaliação ($l_m = l_n$) e a distância para a parada do apalpador (l_y). Para um melhor entendimento, são apresentadas as Figuras Figura 2.21 e 2.22. Nesse exemplo, cabe salientar o caso de microscópios óticos $l_t = l_y = 0$.

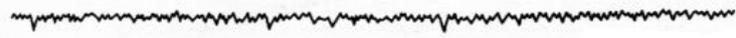
Tabela 2.3. Tipos de perfil (Modificado - Marinho, 2000).

Perfil	Representação
<p>PERFIL REAL: Intersecção da superfície real com um plano perpendicular. Nesse caso, o plano perpendicular (imaginário) cortará a superfície, que resultou do método de fabricação, e originará uma linha irregular.</p>	 <p>Perfil real, cortado por um plano perpendicular.</p>
<p>PERFIL EFETIVO: Imagem aproximada do perfil real, obtido por meio de avaliação ou medição. Por exemplo: o perfil apresentado por um registro gráfico não tem qualquer filtragem e possui as limitações atuais da eletrônica.</p>	 <p>Perfil efetivo, obtido com impressora de rugosímetro (sem filtrar ondulações).</p>
<p>PERFIL DE RUGOSIDADE: Obtido a partir do perfil efetivo por um instrumento de avaliação, após filtragem. É o perfil apresentado por um registro gráfico, depois de uma filtragem para eliminar a ondulação, a qual se sobrepõe geralmente à rugosidade.</p>	 <p>Perfil de rugosidade (após filtragem da ondulação).</p>

Perfil efetivo,
obtido por medição



Textura primária (rugosidade)



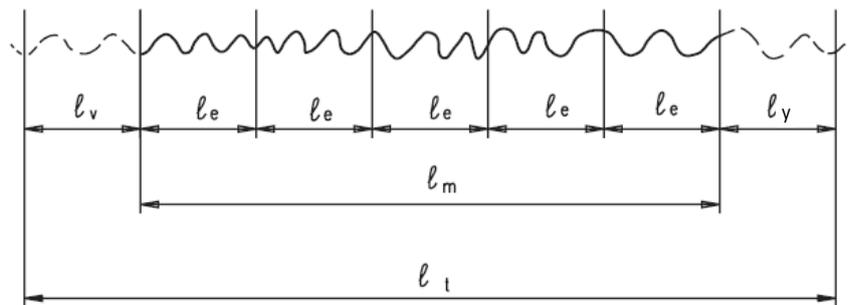
Textura secundária (ondulação)



Desvio o erro de forma



Figura 2.20. Composição da superfície (Modificado - Piratelli, 2011).



Onde:

l_v distância para o apalpador atingir a velocidade de medição

l ou l_e ou l_r comprimento de amostragem (*Sampling length*)

l_y distância para a parada do apalpador

l_m ou l_n comprimento de avaliação (*Evaluation length*)

l_t distância percorrida pelo apalpador sobre a superfície

Figura 2.21. Comprimentos para a avaliação da rugosidade (Modificado – Marinho, 2000).

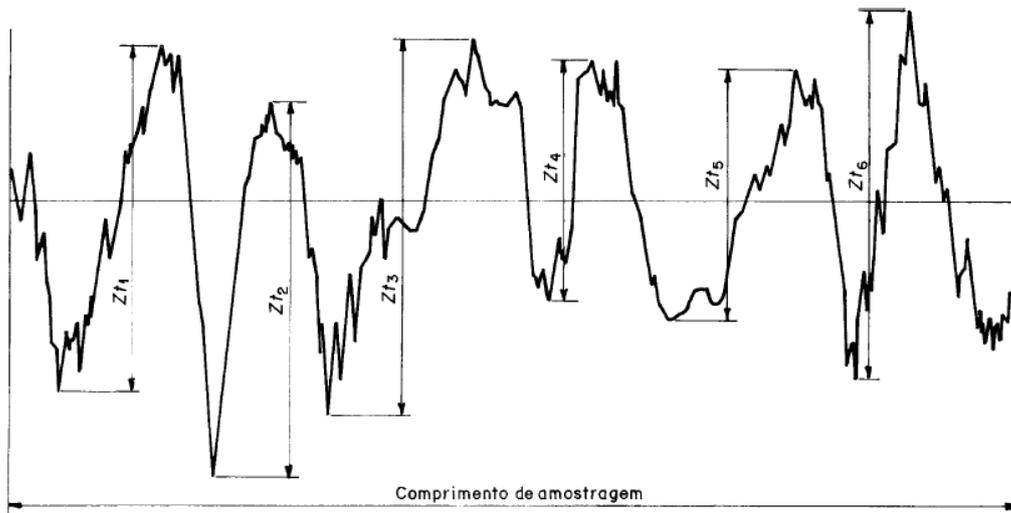


Figura 2.22. Altura dos elementos do perfil, exemplo de um perfil de rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

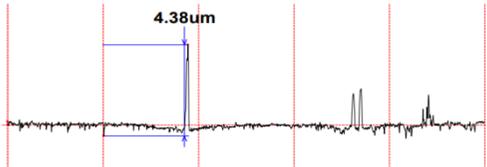
A avaliação da rugosidade é feita para o “*cut-off*” e podem ser usados dois sistemas básicos para a medição da rugosidade: i) o da linha média M e ii) o da envolvente E. No Brasil, é adotado o sistema M (Marinho, 2000). No sistema da linha M, todas as grandezas de medição da rugosidade são definidas a partir do conceito de linha média, sendo essa linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem. Nesse sistema, a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, deve ser igual à soma das áreas inferiores, no “*cut-off*”.

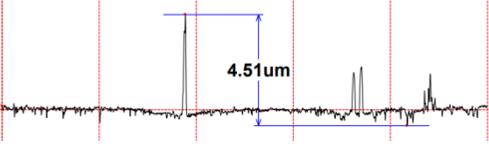
Segundo a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), o filtro de perfil λ_c define a separação entre os componentes da rugosidade e da ondulação, ou seja, basta aplicar o filtro ao perfil efetivo para eliminar a ondulação possível da amostra observada e obter o perfil de rugosidade (Figura 2.22). Vale ressaltar que esse último é tomado como base para a determinação dos parâmetros de rugosidade.

Na Tabela 2.4 são definidos os principais parâmetros 2D com a nomenclatura que será usada neste trabalho, assim como as vantagens e desvantagens do emprego de cada uma. As vantagens e desvantagens resultaram de estudos referenciados e da própria experiência do autor na aplicação desta metodologia no estudo da rugosidade em geossintéticos. Para maiores detalhes, é recomendado consultar a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

Tabela 2.4. Parâmetros básicos de rugosidade 2D.

Parâmetro/ Definição	Uso	Vantagens	Desvantagens
<p>Ra</p> <p>– Conhecido como rugosidade média, é o desvio aritmético médio do perfil avaliado, dos valores absolutos das ordenadas de afastamento e dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição. Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, para o comprimento de amostragem ($l_c = l_r$ ou “cut off”)</p>	<p>Quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção.</p> <p>Não deve ser usado como principal parâmetro para quantificar a rugosidade em geossintéticos envolvidos em interfaces, pois não define a forma das irregularidades do perfil, como representado na imagem abaixo.</p> <p>(MITUTOYO, 2014)</p>	<p>É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo. É aplicável à maioria dos processos de fabricação.</p> <p>Devido à sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica).</p> <p>Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.</p>	<p>O valor de Ra em um comprimento de amostragem indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito. O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, pode-se ter um valor de Ra para superfícies originadas de processos diferentes de fabricação. Nenhuma distinção é feita entre picos e vales.</p>
<p>Rc</p> <p>– Altura média dos elementos do perfil no comprimento de amostragem ($l_c = l_r$ ou “cut off”).</p>	<p>Recomendada para a determinação da altura média da textura em geomembranas de textura com perfil periódico.</p> <p>Não recomendada para geomembranas com macro textura muito maior à microtextura.</p>	<p>Mais sensível para a determinação da rugosidade por considerar mais informações sobre os picos e vales no comprimento de amostragem.</p> <p>Informa a distribuição média da superfície vertical.</p> <p>É de fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos.</p> <p>Em perfis periódicos, define muito bem a superfície.</p> <p>Riscos isolados serão considerados apenas parcialmente, de acordo com o número de pontos isolados.</p>	<p>Em algumas aplicações, não é aconselhável a consideração parcial dos pontos isolados, pois um ponto isolado acentuado será considerado somente em 20%, mediante a divisão de 1/5.</p> <p>Assim como o Ry, não possibilita nenhuma informação sobre a forma do perfil, bem como da distância entre as ranhuras. Nem todos os equipamentos fornecem esse parâmetro.</p>

<p>Rz ($Rz = Ry$ da ISO 4287'84 e JIS'84 e 94. Diferente do Rz das antigas ISO, ANSI e JIS)</p> <p>– Altura máxima do perfil. Está definida como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no comprimento de amostragem ($l_c = l_r$ ou “cut off”). Veja um exemplo na imagem para o segundo l_r. Substitui o parâmetro Rmax da JIS'82. Pode ser obtido pela soma da altura do maior vale e profundidade do maior vale no comprimento de amostragem</p>  <p>(MITUTOYO, 2014)</p>	<p>Para determinar a altura máxima das asperezas quando as geomembranas forem fabricadas com macro textura e sempre que o perfil efetivo seja periódico.</p> <p>Recomendada para avaliar danos nas geomembranas por risco ou por arado dos graus de solo durante o cisalhamento de interfaces solo/geomembrana.</p>	<p>Informa sobre a máxima profundidade da superfície vertical da aspereza criada sobre o geossintético.</p> <p>É de fácil obtenção quando o equipamento de medição fornece o gráfico da superfície.</p> <p>Fornecer informações complementares ao parâmetro Ra (que dilui o valor dos picos e vales).</p>	<p>Nem todos os equipamentos fornecem o parâmetro. Para avaliá-lo por meio de um gráfico, é preciso ter certeza de que o perfil registrado é um perfil de rugosidade. Caso seja o perfil efetivo (sem filtragem), deve ser feita uma filtragem gráfica.</p> <p>Pode dar uma imagem errada da superfície, pois avalia erros que, muitas vezes, não representam a superfície como um todo. Por exemplo: um risco causado após a fabricação e que não caracteriza o processo.</p> <p>Individualmente, não apresenta informação suficiente a respeito da superfície, isto é, não informa o formato da superfície. A imagem a seguir ilustra essa ideia: diversas formas de rugosidade podem ter o mesmo valor para Rz.</p>  <p>(Marinho, 2000)</p>
---	---	---	---

<p>Rt (antigo Ry)</p> <p>– Altura total do perfil ou rugosidade máxima. Está definido como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no comprimento de avaliação ($l_m = l_n$)</p>  <p>(MITUTOYO, 2014)</p>	<p>Não se recomenda para quantificar a altura da textura, já que um pico não representativo do perfil ou um dano no geossintético pode favorecer resultados que não descrevam o perfil.</p> <p>Recomendado para quantificar a altura da textura quando se tem a certeza de que o perfil efetivo é periódico.</p>	<p>Informa sobre a máxima deterioração na superfície vertical da peça no comprimento de avaliação. É de fácil obtenção quando o equipamento de medição fornece o gráfico da superfície.</p> <p>Fornecer informações complementares ao parâmetro Ra (que dilui o valor dos picos e vales).</p>	<p>Nem todos os equipamentos fornecem o parâmetro. Para avaliá-lo por meio de um gráfico, é preciso ter certeza de que o perfil registrado é um perfil de rugosidade. Caso seja o perfil efetivo (sem filtragem), deve ser feita uma filtragem gráfica.</p> <p>Pode dar uma imagem errada da superfície, pois avalia erros que, muitas vezes, não representam a superfície como um todo. Por exemplo: um risco causado após a fabricação e que não caracteriza o processo.</p> <p>Individualmente, não apresenta informação suficiente a respeito da superfície, isto é, não informa o formato da superfície.</p>
--	--	---	---

Outros parâmetros de rugosidade para caracterizar a distribuição de alturas no perfil e que são fortemente influenciados por picos e vales isolados:

Rsk - Fator de assimetria do perfil avaliado para o comprimento de amostragem; e

Rku - Fator de achatamento do perfil avaliado para o comprimento de amostragem.

Segundo Leach (2013), os parâmetros comumente empregados para a caracterização da rugosidade por meio de análises de superfícies 3D são:

Sa - Altura média aritmética;

Sq – Desvio médio quadrático, raiz quadrada da média dos valores das ordenadas;

Ssk – Fator de assimetria da curva de densidade de probabilidades, expandido a partir de Rsk;

Sku – Fator de achatamento da curva de densidade de probabilidades expandido a partir de Rku;

Sp - Altura máxima do pico;

Sv - Profundidade máxima do vale;

Sz - Altura máxima (Sp + Sv);

Vvv - Volume vazio na região do vale;

Vvc - Volume vazio em uma parte do núcleo;

Vmp - Volume real em uma região de pico;

Vmc - Volume real em uma parte do núcleo;

Sal - Comprimento de autocorrelação mais curto, determina a distância onde a autocorrelação diminui mais rapidamente. Ela pode ser usada para julgar se há um ponto em que a altura da superfície muda abruptamente;

Str - Relação de aspecto da textura, determina a proporção de distâncias em que a autocorrelação diminui mais rápido ou mais lento. Podendo ser usada para o julgamento da presença de leigos (pontos fora da tendência).

Para a determinação dos volumes antes referidos (Vvv, Vvc, Vmp e Vmc), emprega-se a curva de Abbott & Firestone (1933). Essa curva pode ser interpretada como uma amostra acumulativa da função de probabilidade do valor das Z_{t_i} no comprimento de avaliação.

2.7.2. APLICAÇÕES DA MICROTOPOGRÁFICA DE SUPERFÍCIES AO ESTUDO DE INTERFACES COM GEOSSINTÉTICOS

Anteriormente foram definidos os parâmetros (Ra, Rc, Rz e Rt) mais empregados para medir a rugosidade de superfícies pelo método do perfil. Durante a análise dos trabalhos encontrados, foi preciso muito cuidado com as definições dos parâmetros considerados pelos autores dos trabalhos estudados. Inicialmente, estabeleceu-se a normativa empregada por cada autor e, com isso, procurou-se evitar confusões com as nomenclaturas dos parâmetros e os seus significados.

Estudos mais antigos avaliaram interfaces entre solos e aço, e serviram como base para realizar as analogias que permitiram elaborar a conceitualização descrita anteriormente. O primeiro estudo foi o de Potyondy (1961), que analisou interfaces de solos em condição saturada e seca (areia, silte, argila, mistura areia/argila), com três tipos de materiais (madeira, aço e concreto) de terminação superficial de dois tipos (rugosa e quase lisa). Seu estudo limitou-se a estabelecer coeficientes de atrito para ajustar a interação desses materiais com problemas de engenharia. Posteriormente, outros autores (Uesugi & Kismda, 1986; Kishida & Uesugi, 1987; Dove & Frost, 1996; Janoo, 1998; Frost *et al.*, 2002) foram contribuindo para o entendimento da influência da rugosidade superficial na resposta de interfaces entre solos e outros materiais, concluindo que para maior rugosidade superficial, maior resistência ao cisalhamento será obtida.

Lings & Dietz (2005) fizeram um estudo de interfaces de aço e três tipos de areia (fina, média e grossa). O objetivo era realizar correlações entre o ângulo de atrito e a rugosidade normalizada (R_n), obtida como (R_{max}/D_{50}), mediante uma modificação à normalização da rugosidade máxima, proposta por Uesugi & Kismda (1986) e Kishida & Uesugi (1987), os quais consideraram um R_{max} e não vários. Da mesma forma, correlacionaram o ângulo de atrito com a rugosidade relativa (R), segundo Subba Rao *et al.* (1998), obtida como (Ra/D_{50}), e determinaram que ambos os parâmetros normalizados permitem enxergar melhor os resultados.

Os autores concluíram que os ângulos de atrito e a dilatância das interfaces devem ser normalizados, dividindo os valores obtidos para a mesma densidade no cisalhamento direto de cada areia. Assim, os efeitos da densidade aparentemente desaparecem e as únicas relações encontradas são entre a fricção normalizada, dilatância e rugosidade relativa. Com isso, conseguiram dividir o desempenho de interfaces em dois tipos (com dilatância e sem dilatância), estabelecendo, a partir das correlações, quando a ruptura acontece por deslizamento ou por rolamento.

Frost *et al.* (2012) investigaram a microescala sobre o efeito da rugosidade na superfície da geomembrana nos mecanismos de cisalhamento da interface, com materiais granulares. Os autores reportaram que para interfaces de areia com geomembrana lisa e 100 kPa de tensão normal, obteve-se o pico de tensão cisalhante aos 0,2 – 0,3 mm de deslocamento horizontal, e para geomembranas de grande textura, em mesma condição de tensão normal, o pico foi

atingido para 1,4 a 1,5 mm de deslocamento horizontal. Também foi possível determinar a altura na amostra de solo e a influência das texturas do geossintético, após cisalhada a interface. Vangla & Gali (2016a), mediante ensaios de cisalhamento com caixa quadrada de 300 mm de lado e 80,5 mm de altura, estudaram a influência da morfologia dos graus de areia na resposta cisalhante de interfaces com uma geomembrana lisa. Os autores mediram o dano na geomembrana por meio de parâmetros de rugosidade Ra, Rt, Rz e volume de picos e vales (Vpv) para cada tensão normal aplicada durante os ensaios. Com isso, verificaram que a morfologia das areias tem grande influência na força de cisalhamento da interface, tendo em vista todos os parâmetros investigados. Com os resultados obtidos, comprovaram que quanto maior a angularidade das partículas de solo, mais profundos podem ser os sulcos originados na geomembrana, o que resulta em uma resistência de interface maior. Outrossim, o mecanismo de cisalhamento muda de deslizamento a deslizamento mais sulcado, sendo mais sulcado quanto maior for a tensão normal aplicada e angulosos sejam os grãos de solo.

Vangla & Gali (2016b) realizaram um estudo da interface de três tipos de areia (AG-grossa, AM-média e AF-fina), com um geotêxtil tecido, a partir de ensaios de cisalhamento com a mesma caixa quadrada de 300 mm de lado e 80,5 mm de altura. Primeiramente, determinaram o ângulo de atrito para cada areia, obtendo valores muito próximos (AG-40,76°, AM-40,62° e AF-40,23), o que se justificou como típico para a densidade relativa empregada (70%). Em seguida, determinaram os ângulos de atrito nas interfaces com geotêxtil (AG-32,94°, AM-36,32° e AF-36,44), que resultou em um ângulo de atrito para a areia grossa menor do que o esperado.

Para tentar explicar o que aconteceu com a interface da areia grossa, foi feita uma análise com três malhas de arame, caracterizando sua textura mediante o parâmetro de rugosidade da superfície (Sq), determinado pela raiz quadrada da rugosidade na área de amostragem. Normalizando a espessura das malhas, dividindo-se pelo D_{50} e correlacionando os resultados com Sq, os autores perceberam que é possível que o efeito da rugosidade superficial do material na espessura da banda de cisalhamento seja mascarado pelo efeito do tamanho de partícula em relação ao espaçamento e alturas de aspereza. Tal conclusão deve-se à banda de cisalhamento normalizada, que aumentou com o aumento do Sq.

Diante do modelo numérico empregado (Método dos Elementos Discretos - DEM), Feng *et al.* (2017) estudaram interfaces de uma areia com geomembranas de diferentes texturas virtuais,

gerando um modelo de geomembrana e sua rugosidade a partir da rugosidade normalizada (R_n). Dispondo de algumas simulações, os autores concluíram que a rugosidade da superfície é um fator importante e que influencia o comportamento do cisalhamento da interação. Além disso, avaliaram que com o aumento da rugosidade normalizada (R_n), a interação entre geomembrana e areia também aumenta, assim como a proporção da força de cisalhamento da interface.

A influência da forma das partículas no comportamento mecânico de interfaces de areia e geotêxtil tecido foram estudadas por Afzali-Nejad *et al.* (2017). Os ensaios de cisalhamento foram realizados em caixa de 100 mm de lado e 22 mm de altura, com dois tipos de solos, variando o formato das partículas, porém mantendo a mesma granulometria. O primeiro tipo de solo trata-se de uma areia fina angular, uniformemente graduada, e o outro é uma mistura de esferas de vidro bem arredondadas, com curvas de distribuição granulométrica semelhantes. Obteve-se uma menor resistência ao cisalhamento para o ensaio com as esferas. Os autores determinaram o valor de R_n para o geotêxtil tecido, embora não o tenham considerado apropriado para as análises, pois a rugosidade normalizada é muito variável para superfícies como as do geotêxtil. Desse modo, postularam uma lei que relaciona as tensões – dilatância em interfaces de areia e geotêxtil tecido e de areia com aço com rugosidade.

Para Blond & Elie (2006), a maior altura de asperezas aumenta a resistência ao cisalhamento de interfaces com geomembranas até uma altura de 0,5 mm (20 mils). A partir desse valor, o aumento da altura das asperezas não gera um ganho significativo de força cisalhante. Já para Fowmes *et al.* (2017), além do efeito da altura das asperezas, o estudo da contribuição da resistência ao cisalhamento no espaçamento das asperezas visa compreender a influência da densidade de concentração de asperezas.

Fowmes *et al.* (2017) imprimiram as amostras de geomembrana utilizadas no estudo, gerando asperezas cônicas individuais, com espaçamento e altura fixos para cada amostra. Os autores variaram as alturas das asperezas e o seu espaçamento. A contribuição das asperezas foi avaliada de duas formas: i) por meio das alturas de aspereza e ii) por meio do seu espaçamento. O espaçamento mais próximo de asperezas resultou em maiores tensões cisalhantes de pico, registradas para as interfaces geomembrana-geotêxtil, uma vez que o maior número de asperezas permitiu a distribuição da tensão de cisalhamento através de um maior número de fibras dentro do geotêxtil. Quanto às alturas de asperezas superiores a 0,4 mm e até 1,6 mm, estas não contribuíram significativamente para o ganho de resistência ao cisalhamento.

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS

Diante do contexto apresentado, o estudo da resistência ao cisalhamento de interfaces nesta pesquisa tem como foco a determinação do tipo de ensaio que pode melhor caracterizar a realidade em obra, considerando a análise da rugosidade dos materiais envolvidos, por meio de diferentes tipos de ensaios, cada um com sua própria forma e área de contato. Para cumprir esse objetivo, foram realizados ensaios em equipamento de cisalhamento convencional, equipamento de cisalhamento de dimensões maiores do que as convencionais (tamanho médio), equipamento de ensaio de rampa e um microscópio laser confocal. Segundo as pesquisas revisadas, existem diferenças nos comportamentos de interfaces. Nota-se que há uma tendência ao uso de ensaios de cisalhamento direto (300 mm x 300 mm) para determinar a resposta do cisalhamento de interfaces em tensões normais (a partir de 25 kPa). No caso de tensões normais menores, observa-se o uso de ensaios de rampa ou plano inclinado.

Até o momento, a variabilidade de dimensões nas caixas usadas nos ensaios de rampa não tem sido padronizada, pois as normativas atuais não fixam esse quesito. Contudo, nota-se que o estudo de resistência de interface entre solos ou concreto e geossintéticos em diferentes escalas necessita de mais pesquisas, as quais devem estar focadas na análise do efeito da escala dos ensaios e da rugosidade dos geossintéticos usados frequentemente. O efeito da escala neste trabalho foi avaliado a partir da comparação de três ensaios com diferentes extensões de área de contato da superfície de interface.

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, foi elaborada uma metodologia de trabalho dividida em três itens principais: i) descrição dos materiais utilizados, ii) descrição dos equipamentos usados para estudo das interfaces e iii) metodologia empregada na execução de cada um dos ensaios.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Durante a concepção da pesquisa, optou-se por trabalhar com um solo que facilitasse a realização dos ensaios, devido à variedade de interfaces a serem avaliadas e que são empregadas em casos reais de obra. Procurou-se ainda utilizar um solo que permitisse estabelecer comparações com pesquisas realizadas anteriormente (Lima Júnior, 2000 e Mello, 2001), sobretudo por terem sido desenvolvidas com dois dos equipamentos utilizados nesta pesquisa.

No que diz respeito aos geossintéticos, foram selecionados dois tipos: i) geomembranas e ii) geotêxteis não tecidos. Tal escolha justifica-se pelo fato de esses materiais serem utilizados geralmente em canais e aterros sanitários. Com efeito, selecionaram-se geomembranas de 2 mm, frequentemente aplicadas na constituição de sistemas impermeabilizantes. Como material de proteção, optou-se por dois tipos de geotêxteis não tecidos agulhados, cada um com valor diferente de massa unitária por área ou gramatura.

Ainda como material de impermeabilização e proteção, adotou-se o concreto em estado fresco, considerando três tipos de abatimento, visando à simulação de interfaces que ocorrem na construção de canais de transposição de águas. Neste trabalho, para a produção do concreto, foram realizados traços que permitiram obter um concreto similar ao utilizado por Viana (2007).

3.1.1. SOLO

O solo empregado foi a areia média, com índice de densidade (I_D) de 57 %, mesma densidade da areia utilizada nos ensaios dos autores Lima Júnior (2000); Mello (2001) e Viana (2007). Foram realizados ensaios para a caracterização do solo, cujos resultados são mencionados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades da areia utilizada neste trabalho.

CARACTERÍSTICAS	Valor	Método de ensaio
Massa específica dos sólidos	2,71	NBR 6508 (ABNT, 1984a)
Massa específica máxima (g/cm^3)	1,707	NBR 12051 MB-3388 (ABNT, 1991)
Índice de vazios mínimo (e_{\min})	0,588	
Índice de vazios (e) para $I_D = 57\%$	0,705	
Massa específica mínima (g/cm^3)	1,457	NBR 12004 MB-3324 (ABNT, 1990)
Massa específica (g/cm^3) para $I_D = 57\%$	1,590	
Índice de vazios máximo (e_{\max})	0,86	
Análise granulométrica	-	NBR 7181 (ABNT, 1984b)
Coeficiente de curvatura (C_c)	0,80	
Coeficiente de Uniformidade (C_u)	3,44	
D_{10} (mm)	0,16	
D_{30} (mm)	0,27	
D_{60} (mm)	0,56	
D_{50} (mm)	0,43	

A escolha do índice de densidade da areia de 57 %, foi motivada pelo interesse em avaliar a influência das condições de fronteira (entre o geossintético e a base rígida) nos resultados dos ensaios. Sendo que, 57 % foi o índice de densidade utilizado por Lima Júnior (2000) e Mello (2001), os autores apoiaram o geossintético sobre um sistema de lubrificação (multicamadas de filme PVC e óleo) aplicado sobre a base rígida. Enquanto, nesta pesquisa, o geossintético se apoiou sobre uma superfície abrasiva (lixa) colada à base rígida em toda sua área.

Na Figura 3.1 apresentam-se as curvas dos ensaios de granulometria da areia empregada nos ensaios de Lima Júnior (2000) e de Mello (2001), assim como a curva granulométrica média (de 8 ensaios) do solo, empregada neste trabalho.

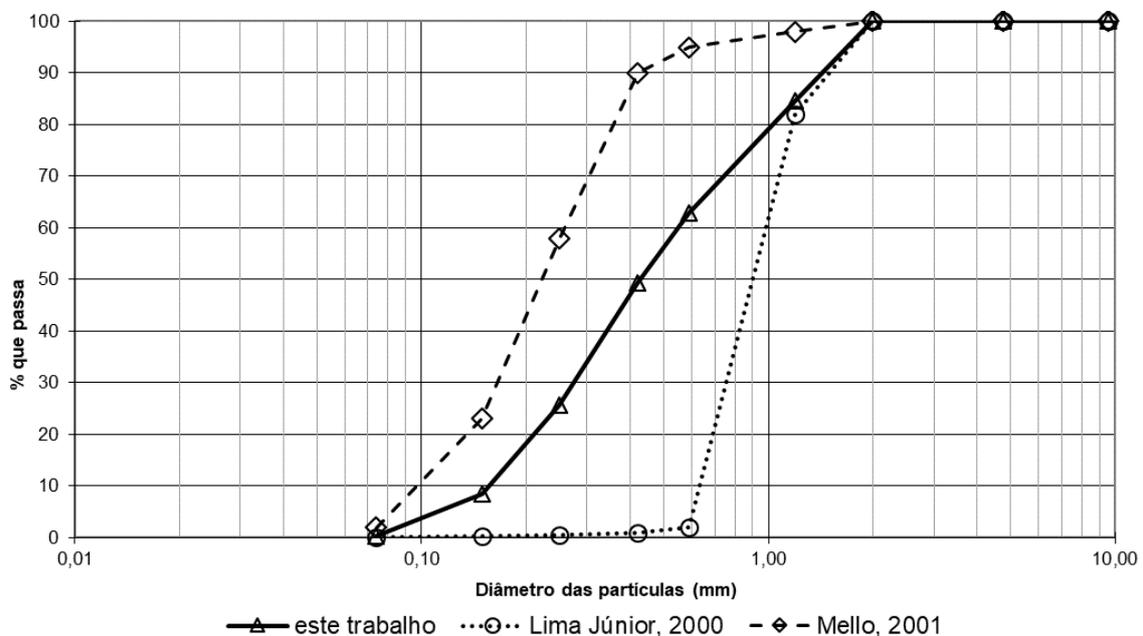
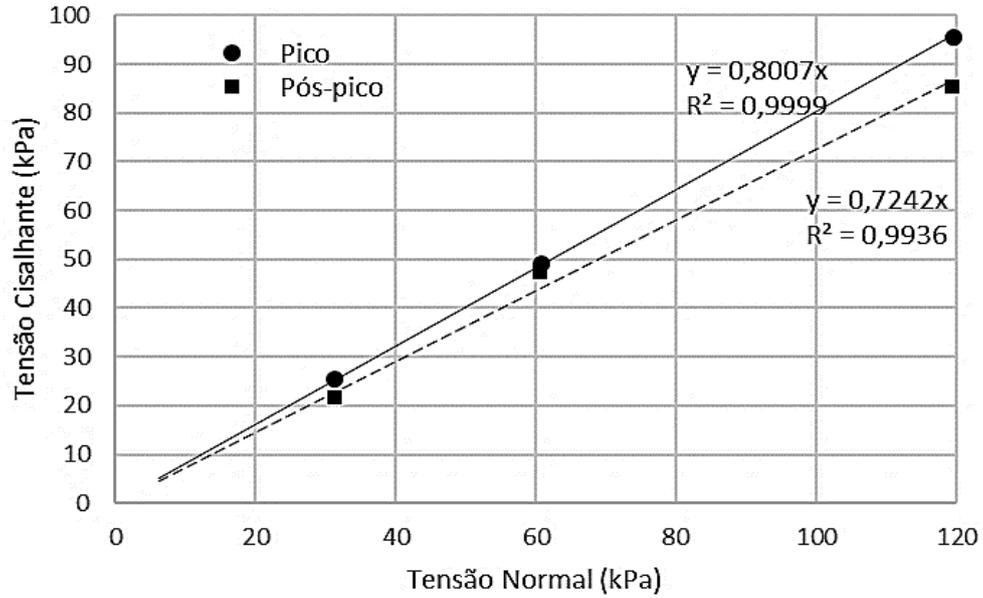
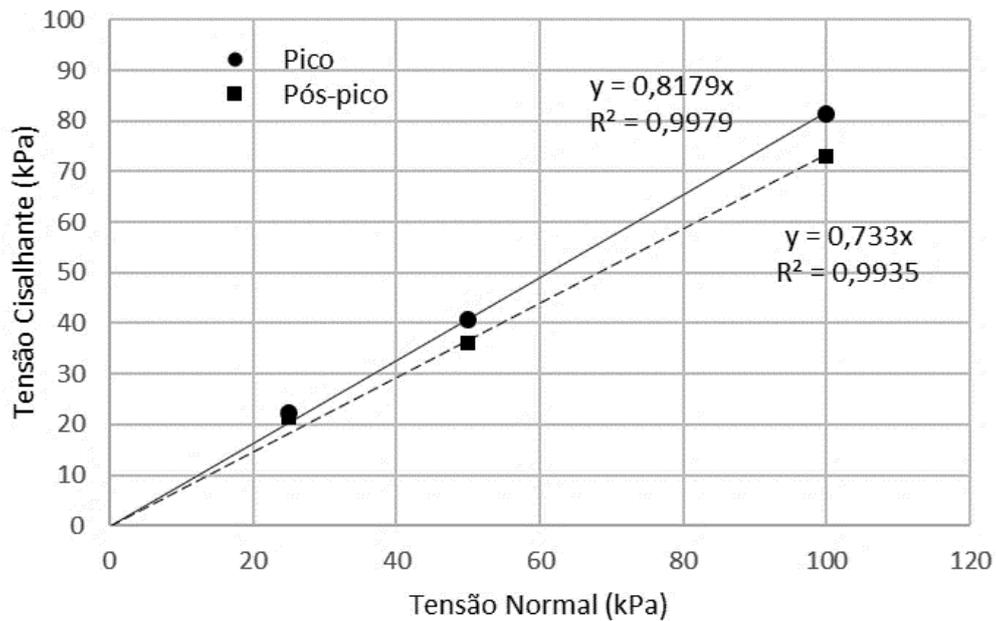


Figura 3.1. Curva da análise granulometria do solo utilizada nesta pesquisa e comparada com as curvas dos solos de pesquisas anteriores.

Para a determinação do ângulo de atrito da areia foram realizados ensaios de cisalhamento direto em duas escalas, ou seja, com amostras de diferentes dimensões (comprimento x largura x altura): i) amostra menor de 100 mm x 100 mm x 18 mm e ii) amostra maior de 300 mm x 300 mm x 50 mm. Para as duas dimensões, o valor do ângulo de atrito de pico foi de 39° e do ângulo de atrito de pós-pico de 36°, determinados por meio do ajuste da linha que passa pela origem do gráfico, como mostrado na Figura 3.2.



(a)



(b)

Figura 3.2. Ajuste linear do cisalhamento direto: (a) amostra menor e (b) amostra maior.

3.1.2. GEOMEMBRANAS

Na Figura 3.3 apresentam-se as geomembranas utilizadas. Na Tabela 3.2 são destacadas algumas características retiradas dos catálogos dos fabricantes (ENGEPOL, 2016; TDM Brasil, 2016). De forma simplificada, as geomembranas foram nomeadas como:

GMT1 - Geomembrana de PEAD com menor altura de textura nas duas faces, usando o processo de matriz balão;

GMT2 - Geomembrana de PEAD com maior altura de textura nas duas faces, usando o processo de matriz balão;

GMT3 - Geomembrana de PEAD texturizada nas duas faces, usando o processo de matriz plana, com textura composta por dois tipos de rugosidade: uma saliência pontiaguda e uma textura de fundo entre saliências;

GMT4 - Geomembrana de PEBDL texturizada nas duas faces, usando o processo de matriz balão e;

GML1 - Geomembrana de PEAD lisa.

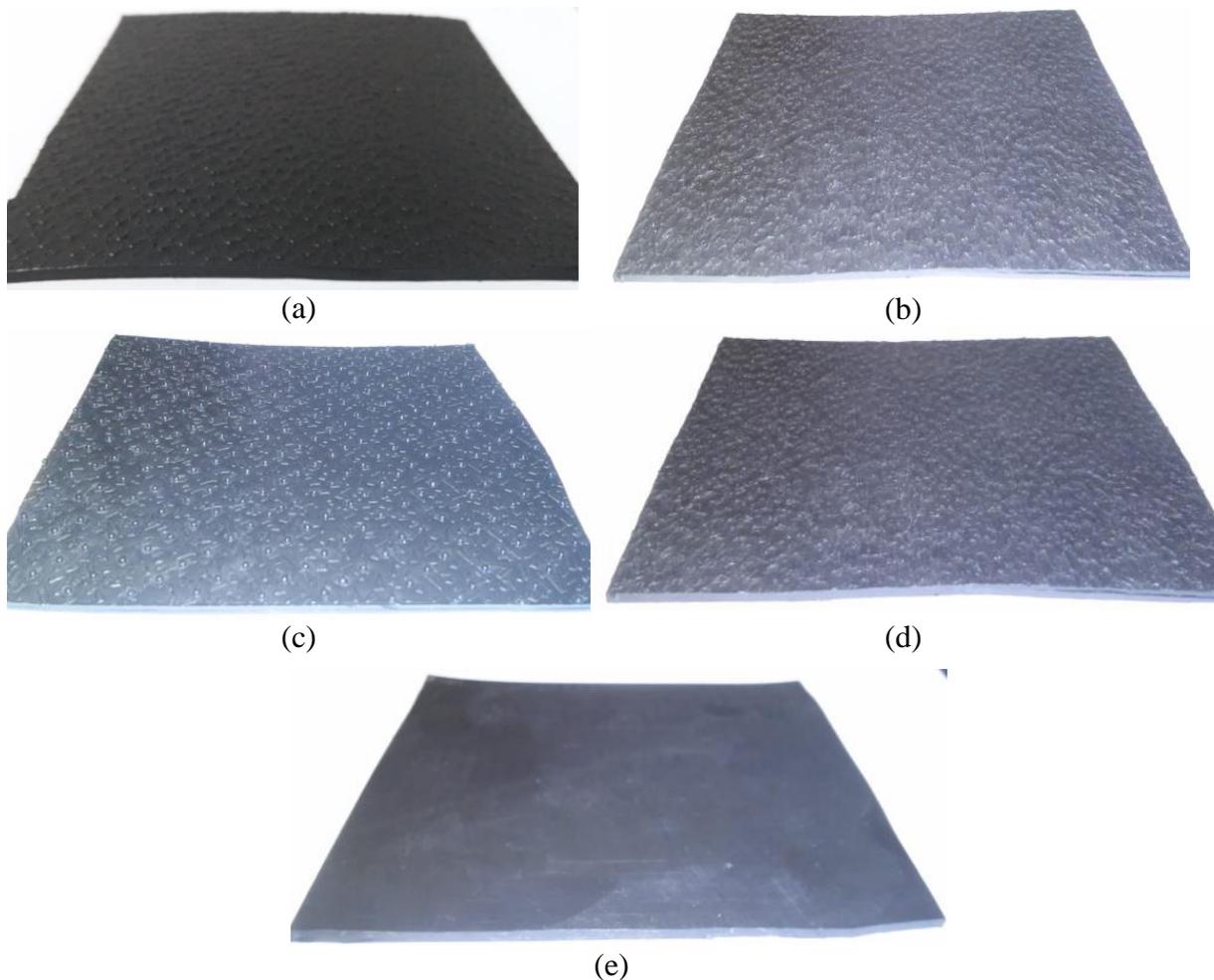


Figura 3.3. Geomembranas: (a) GMT1, (b) GMT2, (c) GMT3, (d) GMT4 e (e) GML1.

Tabela 3.2. Propriedades das geomembranas.

Características	Método de ensaio	Valores especificados				
		GMT1	GMT2	GMT3	GMT4	GML1
Espessura média (mm)	D5994 e1 (ASTM, 2015)	2,00	2,007	2,20	2,006	1,989
Densidade (g/cm ³)	D792 (ASTM, 2013)	0,946	0,943	0,984	0,937	0,944
Altura da aspereza (mm)	D7466 e1 (ASTM, 2015)	0,32/0,32	0,67/0,52	0,78/0,63	0,52/0,52	-
Propriedades de Tração						
RR (kN/m)	D6693 e1 (ASTM, 2015) (Tipo IV)	47,9	46,95	51,5	54,0	55,35
Alongamento na Ruptura (%)		544,70	556,44	546,00	595,00	729,23
Resistência ao Rasgo (N)	D1004 (ASTM, 2013)	334,52	329,64	342,00	308,00	274,8
RP (N)	D4833 e1 (ASTM, 2013)	736,90	762,00	852,00	635,80	693,00

Nota: (RR) Resistência na Ruptura e (RP) Resistência ao Puncionamento. Normas ASTM são referenciadas nos catálogos dos fabricantes.

3.1.3. GEOTÊXTEIS

Na Figura 3.4 apresentam-se os geotêxteis utilizados. Na

Tabela 3.3 são mencionadas algumas das propriedades mecânicas e físicas dos geotêxteis, obtidas do catálogo do fornecedor (BIDIM, 2016) na direção do comprimento do rolo. Resumidamente, os geotêxteis foram nomeados como:

GNT1 - Geotêxtil não tecido agulhado de polipropileno, com gramatura de 300 g/m² e

GNT2 - Geotêxtil não tecido agulhado de polipropileno, com gramatura de 800 g/m²



Figura 3.4. Geotêxteis não tecidos agulhados: (a) GNT1, (b) GNT2.

Tabela 3.3. Propriedades dos geotêxteis fornecidas pelo fabricante.

Propriedades			Normas	Unidades	Valores	
					GNT1	GNT2
Mecânicas	Resistência à tração faixa larga.	Tração à ruptura	NBR 12824 (ABNT, 1993)	kN/m	13	28
		Alongamento		%	>50	>50
	Resistência ao puncionamento		NBR13359 (ABNT, 1995)	kN	2,4	5,2
Físicas	Gramatura		NBR 12568 (ABNT, 2003)	g/m ²	300	600

Nota: Normas são referenciadas nos catálogos do fabricante.

Segundo o fabricante, esses valores correspondem aos ensaios realizados em diversos laboratórios. O material é fabricado com 100% de polipropileno virgem, o que mantém as propriedades de resistência química e biológica, características do polipropileno.

A massa por unidade de área ou gramatura das amostras foi determinada em laboratório, seguindo as recomendações da norma NBR ISO 9864 (ABNT, 2013d). Os resultados estão apresentados na Tabela 3.4. Por conta dos valores de gramatura para PP600 obtidos terem sido maiores do que o esperado, nomeou-se de PP800.

Tabela 3.4. Resultados de ensaios de gramatura em g/cm².

Geotêxtil não tecido	Valor médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
GNT1 - PP300	304	9	2,95
GNT2 - PP600 (PP800)	793	27	3,44

3.1.4. CONCRETO

No preparo do concreto utilizado para os ensaios de interface concreto-geossintético, utilizou-se o cimento CII (cimento Portland de uso geral). Dependendo do abatimento desejado, foram utilizadas diferentes dosagens. Os traços adotados na produção do concreto estão indicados na Tabela 3.5, com abatimentos de 40 mm, 60 mm e 80 mm. No processo de preparação dos ensaios com concreto fresco foi utilizada uma betoneira de 120 litros. Durante a elaboração do concreto foi corrigido o conteúdo de água a adicionar, considerando a umidade dos materiais graúdo e miúdo. O agregado miúdo empregado foi uma areia média e o agregado graúdo uma brita 1.

Tabela 3.5. Traço utilizado na dosagem do concreto fresco.

Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (litros)	Abatimento (mm)	$\gamma_{\text{médio}}$ (kN/m ³)
18,56	38,26	54,6	3,7	40	26,2
			4,2	60	25,0
			4,7	80	24,2

3.2. EQUIPAMENTOS DE ENSAIO

Para a determinação dos ângulos de atrito nas interfaces, empregaram-se três tipos de ensaios sob diferentes tensões normais: i) ensaio de cisalhamento direto convencional (CDC); ii) ensaio de cisalhamento direto médio (CDM); iii) ensaio de cisalhamento de plano inclinado (CPI). Na Tabela 3.6 são apontadas as tensões normais por tipo de ensaio e para cada tipo de interface. Os 38 tipos de interfaces em estudo são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.6. Tensões normais aplicadas.

Tipo de ensaio	Tensões normais (kPa)	Interfaces				
		Geotêxtil	Solo	Solo	Concreto	Concreto
		Geomembrana	Geotêxtil	Geomembrana	Geotêxtil	Geomembrana
CDC	25,00	X	X	X		
	50,00	X	X	X		
	100,00	X	X	X		
CDM	1,50	X				
	3,00	X				
	6,00	X				
	25,00	X	X	X		
	50,00	X	X	X		
	100,00	X	X	X		
CPI	1,26	X			X	X
	3,24	X				
	5,39	X				
	1,96		X	X		
	3,94		X	X		
	6,09		X	X		

Tabela 3.7. Interfaces ensaiadas.

Interface		Geomembranas					Geotêxteis		Solo	Concreto fresco		
		GMT				GML	GNT			“Slump” 40 mm	“Slump” 60 mm	“Slump” 60 mm
Materiais	Nº.	1	2	3	4	1	1	2				
Geotêxtil/ Geomembrana	1	X					X					
	2	X						X				
	3		X				X					
	4		X					X				
	5			X			X					
	6			X				X				
	7				X		X					
	8				X			X				
	9					X	X					
	10					X		X				
Solo/Geotêxtil	11						X		X			
	12							X	X			
Solo/ Geomembrana	13	X							X			
	14		X						X			
	15			X					X			
	16				X				X			
	17					X			X			
Concreto/ Geotêxtil	18						X			X		
	19						X			X		
	20						X				X	
	21							X		X		
	22							X		X		
	23							X			X	
Concreto/ Geomembrana	24	X								X		
	25		X							X		
	26			X						X		
	27				X					X		
	28					X				X		
	29	X									X	
	30		X							X		
	31			X						X		
	32				X					X		
	33					X				X		
	34	X									X	
	35		X								X	
	36			X							X	
	37				X						X	
	38					X					X	

3.2.1. EQUIPAMENTO DE CISLHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL

O equipamento empregado foi fabricado pela “*ELE International*”, disponível no laboratório da Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB). A Figura 3.5 ilustra o equipamento utilizado. A instrumentação do equipamento consistiu em:

- Aquisitor de dados: para realização das leituras da instrumentação empregada nos ensaios, foi utilizado um aquisitor de dados ELE, com capacidade para gravar as informações em cada 0,05 mm de deslocamento horizontal e software DS7;
- Anel dinamométrico: capacidade de 4,5 kN, com medidor de deslocamento acoplado para registrar os incrementos de força de cisalhamento e resolução de medida de 0,001 kN; e
- Medidor de deslocamento linear: com capacidade de medir deslocamentos de até 12 mm, sendo um para medir o deslocamento horizontal e outro para medir o deslocamento vertical do topo da caixa, onde aplica-se a força normal. Sua resolução de medida é de 0,001 mm.

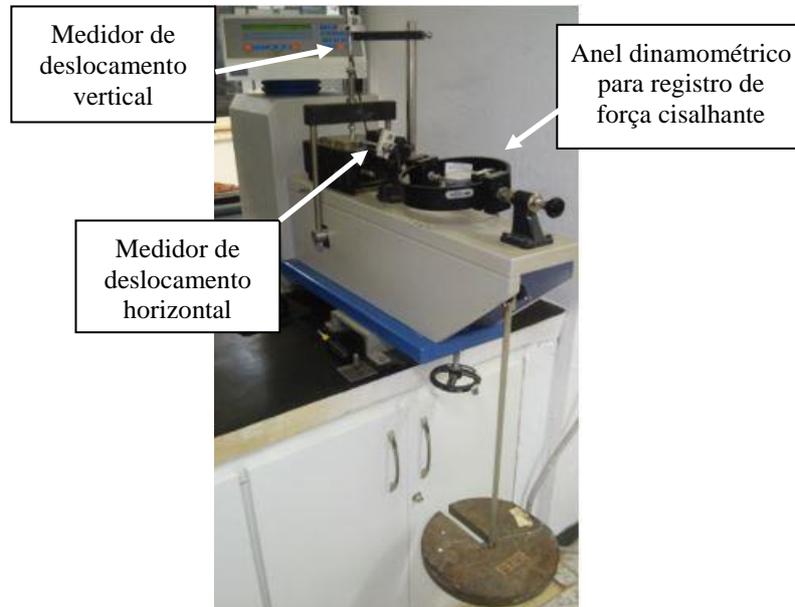


Figura 3.5. Equipamento dos ensaios de CDC.

Antes do início dos ensaios, toda a instrumentação foi calibrada, empregando-se um micrômetro de 0-50 mm para a calibração dos medidores de deslocamento e uma prensa

universal -2 a 2 toneladas (disponível no prédio SG-09 UnB) para a calibração do anel dinamométrico.

3.2.2. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO MÉDIO

O equipamento utilizado para a realização desses ensaios foi desenvolvido pelo Professor Ennio M. Palmeira (UnB), a partir de modificações no equipamento de tração controlada, utilizado por Tupa (1994). Foram realizadas sucessivas modificações feitas sob a supervisão do referido professor, incluindo uma modificação realizada pelo autor para a realização deste trabalho. Basicamente, consiste em um equipamento para realização de ensaios de cisalhamento direto de médias dimensões. O sistema é composto por um circuito hidráulico, equipado por dois cilindros, um reservatório e mangueiras.

O funcionamento ocorre da seguinte forma: i) um dos cilindros hidráulicos é posicionado na prensa com o curso aberto. Este, ao ser ligado, faz com que esse curso seja fechado; ii) à medida que ele é comprimido, injeta óleo para o outro cilindro hidráulico por meio de ligação de mangueiras hidráulicas; iii) a transferência de carga se efetiva por meio de velocidades constantes e preestabelecidas, acionando o deslocamento horizontal da caixa de cisalhamento inferior de tamanho maior do que o convencional. A caixa do ensaio é bipartida, de formato quadrada, com 300 mm de lado, sendo a parte inferior com 100 mm de altura e a superior com 120 mm de altura.

A última modificação foi realizada para eliminar o registro de atritos não desejáveis durante o ensaio, mudando a posição da célula de carga horizontal e adicionando um rolamento que transmite a força tangencial à célula de carga horizontal. Tal ação permite o livre movimento vertical da caixa superior. A aplicação da tensão normal manteve-se por um sistema constituído de uma bomba e cilindro hidráulico, com curso de 100 mm e capacidade de carga de 100 kN. Pode registrar força cisalhante até 100 kN, mas, devido ao limite de carga admissível do rolamento, é recomendado não ultrapassar os 10 kN de força cisalhante. O deslocamento cisalhante máximo deve ser de 540 mm.

Na Figura 3.6 apresentam-se o equipamento e a instrumentação, que consiste em:

- Aquisitor de dados: para realização das leituras da instrumentação empregada nos ensaios, foi utilizado um aquisitor de dados SPIDER 8, com frequência de aquisição de 1 Hz e *software* Catman v 2.0®;
- Células de carga: capacidade de 100 kN, sendo uma para medir a força de cisalhamento e a outra para medir a força normal, com resolução de medida de 0,001 kN; e
- Medidor de deslocamento linear: um para medir o deslocamento horizontal (de até 100 mm) e outros para medirem o deslocamento vertical (de até 50 mm) no topo da caixa, durante a aplicação da força normal.

Assim como no ensaio de cisalhamento convencional, antes do início dos ensaios toda a instrumentação foi calibrada, empregando-se um micrômetro de 0 - 50 mm para a calibração dos medidores de deslocamento e uma prensa universal (com capacidade de -20 a 20 toneladas), disponível no prédio SG-09 UnB para a calibração das células de carga.

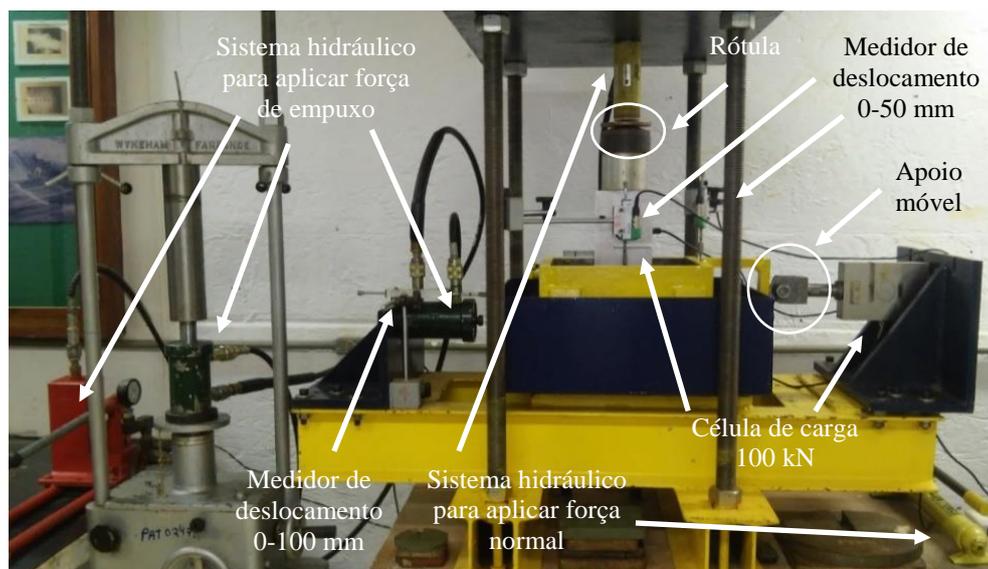


Figura 3.6. Equipamento para os ensaios CDM.

3.2.3. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DE PLANO INCLINADO

O equipamento de cisalhamento de plano inclinado consiste, basicamente, em um sistema com uma rampa, a qual pode ser inclinada até promover a ruptura ao longo da interface entre a camada de solo confinada numa caixa rígida e a camada de geossintético posicionada sobre a superfície da rampa (Figura 3.7). O ensaio permite a execução de uma ampla variedade de configurações e aplicação de tensões normais sobre o solo de cobertura, por meio de blocos de

concreto que correspondem às tensões normais (sem considerar o peso do solo) nos valores de 1,25, 3,50 e 5,75 kPa (Figura 3.8).

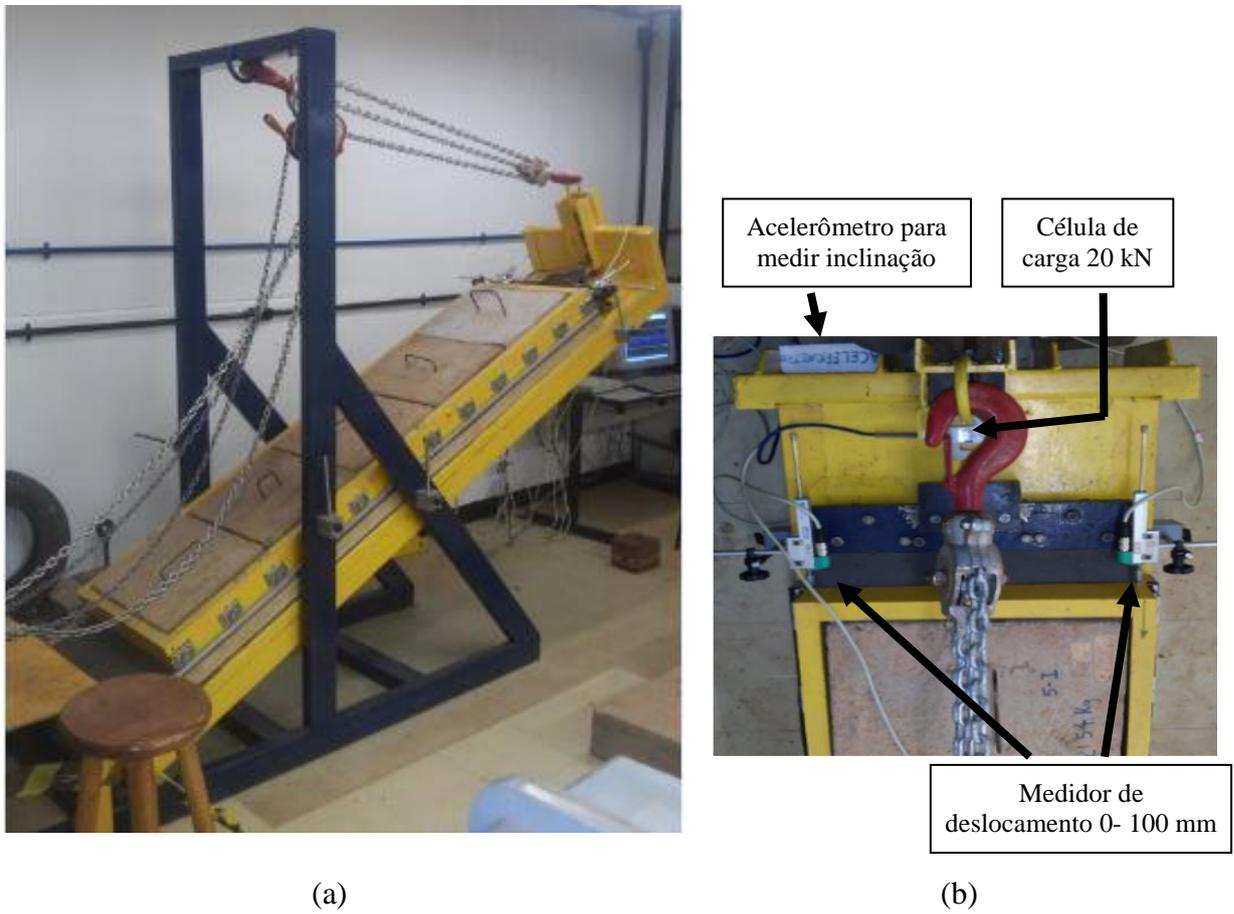


Figura 3.7. Equipamento para os ensaios de PI: a) Visão geral e b) instrumentação empregada.



Figura 3.8. Blocos de concreto.

Segundo a norma NBR ISSO 12957.1 (ABNT 2013b), o plano deve ser elevado suavemente a uma razão de $3 \pm 0,5$ %/minuto, instrumentado para medições do ângulo de inclinação com uma precisão de $0,5$ %/minuto. A tensão normal deve ser medida com acurácia de ± 2 %. Esse equipamento se encontra disponível no Laboratório da Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. A instrumentação do equipamento consistiu em:

- Aquisitor de dados: para realização das leituras da instrumentação empregada nos ensaios, foi utilizado um aquisitor de dados LYNX, com aquisição de dados para uma frequência de amostragem de 10 Hz, devido à rapidez em que acontece a ruptura da interface quando o ângulo de inclinação limite é atingido;
- Célula de carga: capacidade de 2 kN para medir a força de tração no geossintético;
- Medidor de deslocamento linear: permite medir deslocamentos de até 100 mm, sendo dois para medir o deslocamento da caixa com relação à rampa quando inclinada;
- Acelerômetro: para medir o ângulo de inclinação da rampa quando inclinada, com uma precisão de $0,5$ graus.

Toda a instrumentação foi devidamente calibrada, empregando-se um micrômetro de 0-50 mm para a calibração dos medidores de deslocamento e uma prensa universal (com capacidade de - 10 a 10 toneladas), disponível no prédio SG-09 UnB para a calibração das células de carga. O acelerômetro foi calibrado por meio de um medidor angular magnético, a partir de sete sucessivas subidas e descidas da rampa.

3.2.4. EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DE GEOMEMBRANAS

A microtopografia das superfícies geomembranas foi determinada com o microscópio digital Olympus LEXT OLS4100, com microscópio digital sem contato 3D (Figura 3.9). O microscópio emprega um sistema confocal duplo, incorporando dois caminhos de luz óptica confocal. Em combinação com um detector de alta sensibilidade para imagens precisas de microscópio 3D de uma amostra constituída por materiais com diferentes características de refletância. Assim, pôde-se identificar corretamente uma posição de medição e realizar uma medição precisa da rugosidade superficial de uma área, independentemente das condições de textura da superfície. Possui parâmetros de rugosidade e filtros necessários, segundo a ABNT

NBR ISO 4287 (2002). Esse equipamento se encontra disponível no curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

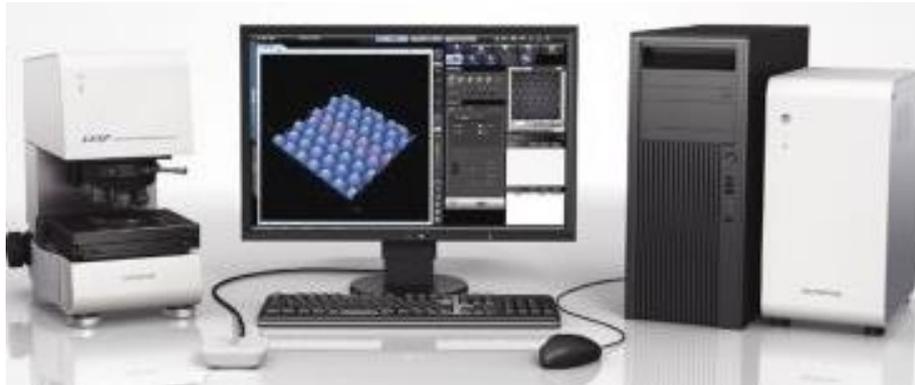


Figura 3.9. Microscópio confocal (Modificado - OLYMPUS, 2018)

3.3. METODOLOGIAS EMPREGADAS NOS ENSAIOS

Embora fosse possível utilizar envoltórias curvas, todos os resultados dos ensaios de cisalhamento apresentaram bons ajustes a uma envoltória linear, forçando sua passagem pela origem nos ensaios com solo. Quando a adesão, devido ao ajuste, resultou em um valor menor que zero, foi adotado 0 KPa de adesão.

3.3.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL

O método empregado foi embasado pelos procedimentos convencionais para a obtenção de parâmetros de resistência das interfaces referentes à adesão (α') e ângulo de atrito de interface (ϕ'), adotando-se a configuração com base rígida rugosa (lixa colada à placa de aço tipo 1020).

Os ensaios de cisalhamento direto para o estudo de interfaces seguem os mesmos procedimentos de preparo, ensaio e análise do ensaio de cisalhamento direto convencional aplicado em solos. A velocidade durante o ensaio foi de 0,5 mm/min e as tensões normais empregadas foram de 25, 50 e 100 kPa, segundo recomendações da NBR ISSO 12957.1 (ABNT, 2013b). O critério de finalização dos ensaios adotado foi o deslocamento horizontal de 8 mm, devido às limitações do equipamento e à observação das tensões cisalhantes pós-pico.

3.3.1.1. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDC EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO

A realização dos ensaios com interfaces solo/geossintético seguiu os seguintes passos:

- 1 – Colagem com resina epóxi (Araldite 10 minutos) do geossintético na borda superior da caixa inferior, representado pela cor vermelha na Figura 3.10, deixando o geossintético apoiado na lixa (a lixa foi colada à base rígida, com Cascola Tradicional). Colocação da caixa superior e dos parafusos;
- 2 – Colocação das caixas no equipamento;
- 3 – Colocação da amostra de solo (188,9 g) até a densidade requerida, por meio de uma marca na caixa com a altura da amostra. Em seguida, procedeu-se à aplicação da tensão normal mediante colocação de massas com relação de braço 1:10;
- 4 – Início do ensaio; e
- 5 – Observação da interface cisalhada, retirada das amostras e limpeza do equipamento e das caixas.

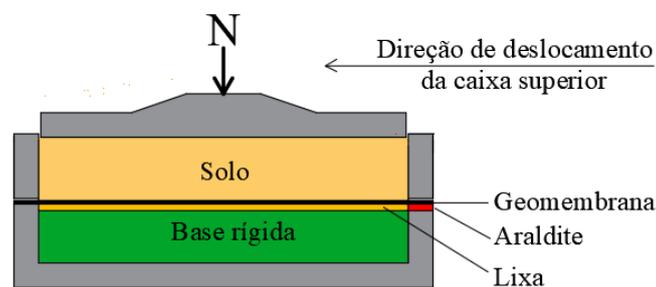


Figura 3.10. Detalhe da fixação da geomembrana.

3.3.1.2. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDC EM INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA

Para a realização dos ensaios em interfaces geotêxtil/geomembrana foram assumidos os seguintes procedimentos:

- 1 – Colagem da geomembrana com resina epóxi (Araldite 10 minutos) na borda superior da caixa inferior, deixando o geossintético apoiado na lixa (também colada em toda a sua área com

Casca Tradicional à base rígida); da mesma forma, colagem do geotêxtil na caixa superior (Figura 3.11);

2 - Colocação da caixa superior e dos parafusos;

3 - Aplicação da tensão normal mediante colocação de massas com relação de braço 1:10, sobre placa rígida com lixa, colada na face em contato com o geotêxtil;

4 – Início do ensaio;

5 – Observação da interface cisalhada, retirada das amostras e limpeza do equipamento e das caixas.

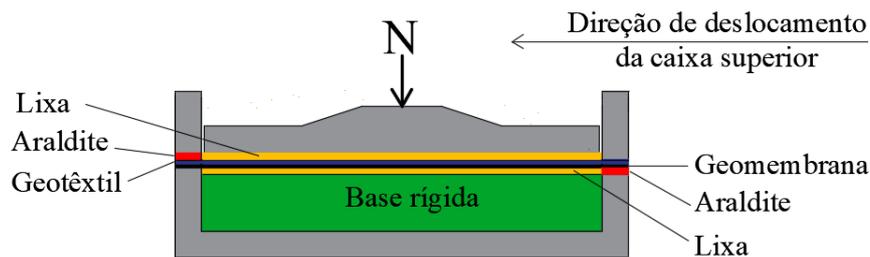


Figura 3.11. Detalhe da fixação do geotêxtil e a geomembrana.

3.3.2. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

A velocidade do ensaio foi definida entre 0,5 mm/min e a pressão normal aplicada foi de 1, 5, 3, 6, 25, 50 e 100 kPa, conforme norma NBR ISSO 12957.1 (ABNT, 2013b); o critério de finalização dos ensaios foi o deslocamento horizontal de 50 mm, segundo o item 8 da norma.

3.3.2.1. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDM EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO

A realização dos ensaios para as interfaces solo/geossintético seguiu os seguintes passos:

1 – Fixação mediante garras dentadas e parafusadas do geossintético, deixando o geossintético apoiado na lixa sobre a placa rígida e colocação da caixa superior;

2 – Colocação do sistema de lubrificação nas paredes da caixa superior (Figura 3.12). No final deste passo a passo, explica-se em detalhe o uso desse sistema;

3 - Colocação da amostra de solo (7,5 kg) até a densidade requerida (até marca na caixa), em uma camada de 50 mm de altura e aplicação da tensão normal a partir do sistema hidráulico;

4 – Início do ensaio;

5 – Finalização do ensaio, retorno do curso no equipamento mediante o sistema hidráulico; e

6 – Observação da interface cisalhada, retirada das amostras e limpeza do equipamento e das caixas.

Durante o ensaio, a elevação da caixa pelo solo (se o atrito for suficiente) foi permitida, mas o peso desta foi maior do que a força que tentava elevá-la. Essa situação foi observada por meio do medidor de deslocamentos, que estava acima da borda superior da caixa. Com isso, gerou-se uma força de atrito na parede vertical que modificou a tensão normal, acrescentando-a um valor menor do que sem o sistema de lubrificação.

O propósito de empregar o sistema de lubrificação apresentado na Figura 3.12 (mediante camadas de lubrificante mineral LUBRAX SL 25W-50 e filme de PVC) foi para diminuir o atrito entre o solo e o metal na superfície vertical da caixa superior. A influência desse atrito, segundo Palmeira (1987, 2009), pode ser significativa, devido à rotação do solo durante o cisalhamento, aumentando a força normal.

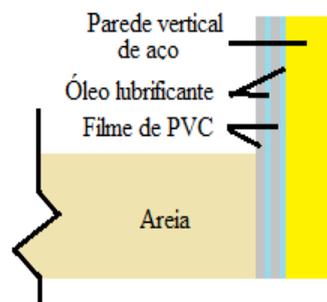


Figura 3.12. Sistema de lubrificação da parede vertical de aço da caixa superior de cisalhamento.

Para quantificar o efeito do sistema de lubrificação foram feitos dois ensaios de cisalhamento direto no equipamento mostrado na Figura 3.5: i) entre a areia e uma placa de aço com características mais próximas possíveis às da caixa real (resultando em ângulo de atrito de 13°) e ii) entre a areia e uma placa de aço com o sistema de lubrificação entre eles (resultando em ângulo de atrito de 5°).

Uma vez demonstrada a efetividade do sistema de lubrificação, definiu-se a Equação 3.1. Onde δ_{sw} é o ângulo de atrito empregando o sistema de lubrificação ($\delta_{sw} = 5^\circ$), Q é a força de cisalhamento medida e F_a é a força que se origina como resultado do atrito do solo com a parede vertical da caixa devido à rotação do solo durante o cisalhamento. Na Figura 3.13 estão

ilustradas essas forças, onde a seta horizontal vermelha representa o movimento da caixa inferior e a seta curva vermelha dentro da areia representa a rotação que acontece no solo durante o ensaio. A linha vermelha vertical paralela a F_a representa o local onde acontece o atrito que origina F_a .

$$F_a = Q * \tan \delta_{sw} \quad (3.1)$$

Considerando a elevada rigidez das caixas no esquema simplificado (Figura 3.13), empregou-se a terceira lei de Newton ($\Sigma F = 0$) ou princípio da ação e reação, originando a Equação 3.2 para determinar a força normal corrigida (N_{corr}). Depois, ao substituir a Equação 3.1 na Equação 3.2, obtém-se a Equação 3.3 para facilitar o cálculo.

$$N_{corr} = N + F_a \quad (3.2)$$

$$N_{corr} = N + Q * \tan \delta_{sw} \quad (3.3)$$

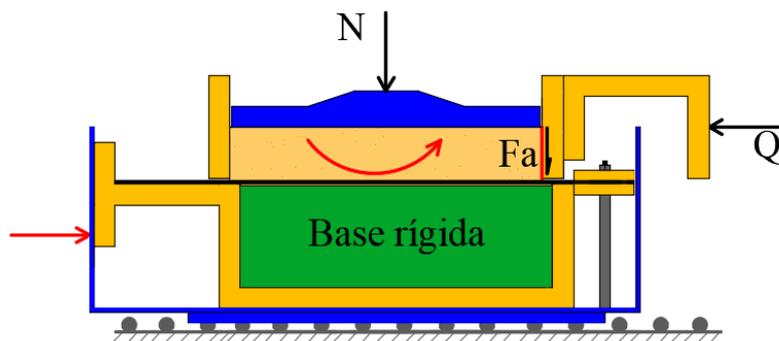


Figura 3.13. Esquema de análise para determinação da correção pelo atrito da areia com a parede vertical da caixa superior (sem escala).

3.3.2.2. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CDM EM INTERFACES GEOTÊXTEL/GEOMEMBRANA

As seguintes etapas foram empregadas para a realização dos ensaios em interfaces geotêxtil/geomembrana:

- 1 - Fixação da geomembrana mediante garras dentadas e parafusadas à caixa inferior, deixando a geomembrana apoiada na lixa (a lixa foi colada em toda a sua área à base rígida, com Cascola Tradicional) sob a placa rígida (Figura 3.14b);
- 2 - Colocação do geotêxtil sobre a geomembrana;
- 3 - Colocação da caixa superior;
- 4 - Fixação do geotêxtil mediante garras dentadas e parafusadas à caixa superior (Figura 3.14a e Figura 3.14c) e lixa colada na placa para distribuição da carga (Figura 3.14d);
- 5 – Aplicação das tensões normais mediante colocação de massas ou a partir do sistema hidráulico;
- 4 – Início do ensaio;
- 5 – Finalização do ensaio, retorno do curso no equipamento mediante o sistema hidráulico;
- 6 – Observação da interface cisalhada, retirada das amostras e limpeza do equipamento e das caixas.

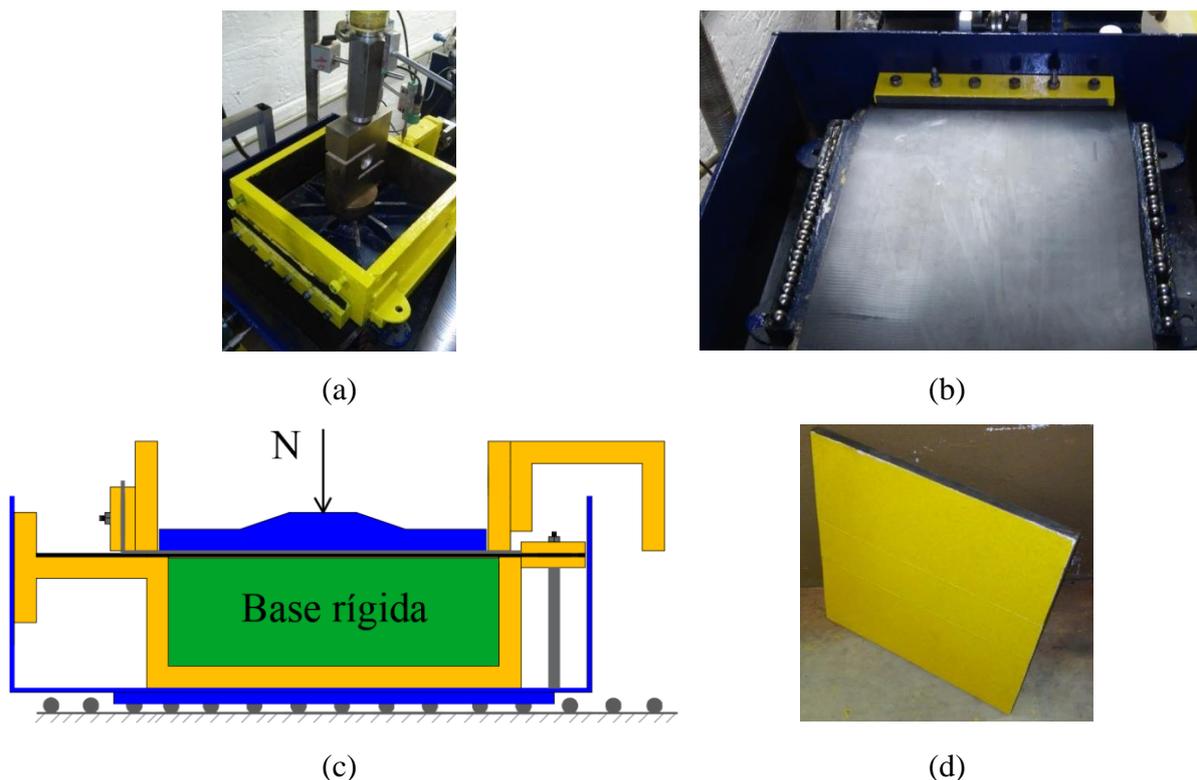


Figura 3.14. Fixação dos geossintéticos (sem escala). (a) Geossintéticos fixados, prontos para ensaio; (b) Geomembrana fixada; (c) Esquema de fixação dos geossintéticos no equipamento; (d) Face inferior da placa azul de aço com lixa colada.

3.3.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO EM PLANO INCLINADO

A velocidade do ensaio adotada para levantar a rampa foi entre $3 \pm 0,5^\circ$ /minuto, conforme norma NBR ISO 12957.2 (ABNT, 2013c). Como critério de finalização dos ensaios, adotou-se deslocamento horizontal de 500 mm, conforme estabelecido na norma. A força de tração medida durante todo o ensaio deve ser nula, caso o sistema de ancoragem funcione devidamente, confirmando que durante a ruptura na interface não ocorrem deformações no geossintético por trações neste e que a ruptura é resultado do cisalhamento da interface.

3.3.3.1. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CPI EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO

A realização dos ensaios em interfaces solo/geossintético seguiu os seguintes passos:

- 1 – Fixação mediante garras dentadas e parafusadas do geossintético, deixando o geossintético apoiado na lixa sobre a base rígida e fixando as garras apoiadas em roletes mediante parafuso à célula de carga (Figura 3.15a);
- 2 - Colocação da caixa superior com sistema de rolamento sobre os trilhos e aplicação dos freios com bases magnéticas;
- 3 - Colocação da amostra de solo até a densidade requerida em uma camada de 50 mm de espessura de areia, com massa de 71 kg, confinada no mesmo volume, estabelecendo a massa específica de $1,59 \text{ g/cm}^3$ para um índice de densidade de 57% nas amostras ensaiadas. Colocação de manta flexível de PVC acima da areia para evitar vazamentos ao levantar a rampa (Figura 3.15b);
- 4 - Aplicação da tensão normal mediante os blocos de concreto, colocados com a ajuda de um guincho modificado (girafa). Os valores da tensão normal inicial do ensaio para inclinação 0° foram de 1,96, 3,94 ou 6,09 kPa, considerando a soma da massa do solo e da massa dos blocos de concreto (Figura 3.15c);
- 5 - Colocação da talha (capacidade de três toneladas), dos medidores de deslocamento e do nivelamento das garras metálicas;
- 6 - Retirada das bases magnéticas que atuam como freios e início do ensaio com levantamento da rampa mediante uso da talha até a ruptura (Figura 3.15d), ou até o limite da elevação de 45° ;
- 7 - Finalização do ensaio, retorno da inclinação da rampa para inclinação 0° ; e

8 - Observação da interface cisalhada, retirada das amostras e limpeza do equipamento e da caixa.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.15. Realização dos ensaios de PI com base rígida em interface de solo/geotêxtil não tecido. (a) Fixação do geossintético; (b) Colocação de manta para evitar a queda de solo; (c) Colocação dos blocos de concreto; (d) Inclinação da rampa e cisalhamento.

3.3.3.2. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CPI EM INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA

Os ensaios das interfaces geotêxtil/geomembrana seguiram as etapas descritas abaixo:

- 1 - Fixação mediante garras dentadas e parafusadas da geomembrana, deixando a geomembrana apoiada na lixa (lixa previamente colada à base rígida em toda a sua área, com Cascola Tradicional) sob a base rígida, com fixação das garras apoiadas em roletes à célula de carga de tração por meio de um parafuso;
- 2 - Colocação da caixa superior com sistema de rolamento sobre os trilhos e aplicação de freios com bases magnéticas;
- 3 - Colocação da amostra de geotêxtil dentro da caixa e apoiada sobre a geomembrana, empregando para sua fixação uma madeira com lixa colada em toda a superfície e em contato com geotêxtil (Figura 3.16a e Figura 3.16b);

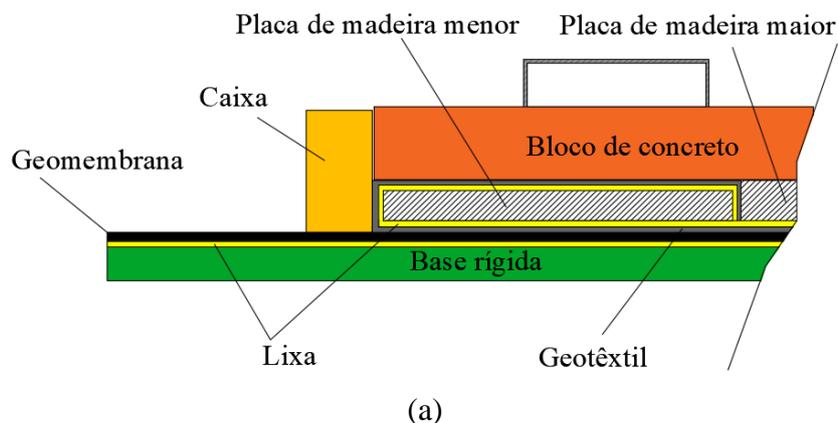


Figura 3.16. Fixação das amostras e colocação da tensão normal. (a) Esquema com secção da rampa mostrando a ancoragem do geotêxtil; (b) Foto da ancoragem do geotêxtil; (c) Transporte dos blocos; (d) Colocação dos blocos na sua posição na caixa.

- 4 - Aplicação da tensão normal mediante posicionamento dos blocos de concreto, colocados com ajuda de um guincho modificado (girafa), como ilustra as Figura 3.16c e Figura 3.16d, sendo a tensão normal inicial do ensaio para inclinação 0° de 1,26, 3,24 ou 5,39 kPa, considerando a massa da madeira somada à massa dos blocos de concreto;

- 5 – Colocação da talha (capacidade de três toneladas), dos medidores de deslocamento e do nivelamento das garras metálicas;
- 6 – Retirada das bases magnéticas que atuam como freios e início do ensaio com levantamento da rampa mediante uso da talha até a ruptura, ou até o limite de elevação de 45°;
- 7 – Finalização do ensaio, retorno da inclinação da rampa para inclinação 0°; e
- 8 – Observação da interface cisalhada, retirada das amostras e limpeza do equipamento e da caixa.

3.3.3.3. METODOLOGIA SEGUIDA PARA ENSAIO DE CPI EM INTERFACES CONCRETO/GEOSSINTÉTICO

Os procedimentos para a realização dos ensaios das interfaces concreto/geossintético estão descritos abaixo:

- 1 - Fixação do geossintético mediante garras dentadas e parafusadas, deixando o geossintético apoiado na lixa (a lixa foi previamente colada em toda sua área à base rígida, com Cascola Tradicional) sob a placa rígida, fixando as garras apoiadas em roletes mediante parafuso à célula de carga de tração;
- 2 – Verificação da limpeza dos trilhos;
- 3 - Colocação da caixa superior e verificação da altura dos roletes da caixa;
- 4 – Aplicação dos freios por meio de quatro bases magnéticas, de forma a evitar a ruptura da interface na colocação do concreto;
- 5 - Aplicação de vaselina sólida no interior da caixa para redução do atrito entre o concreto e a caixa e facilidade de limpeza da caixa;
- 6 – Elaboração e colocação do concreto nos abatimentos desejados na caixa, em uma camada de 50 mm de altura (Figura 3.17a, Figura 3.17b e Figura 3.17c);
- 7 – Colocação dos medidores de deslocamento;
- 8 - Colocação de talha de 0,5 tonelada de capacidade para poder alcançar uma maior elevação da rampa;
- 9 - Início do ensaio, levantando o plano de forma contínua para evitar vibrações indesejáveis na interface;
- 10 – Finalização do ensaio com a ruptura;
- 11 – Descida do plano;
- 12 - Observação da interface cisalhada (Figura 3.17d e Figura 3.17e);

13 - Retirada das amostras; e

14 – Limpeza de todo o equipamento e da caixa.



(a)



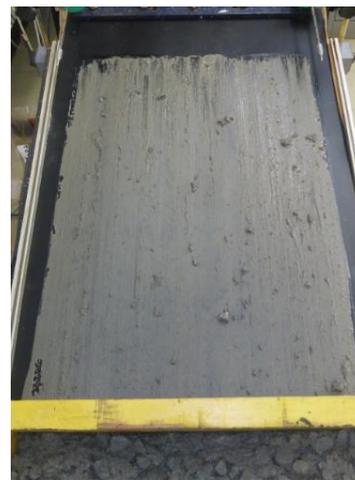
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.17. Ensaio de CPI em interfaces com concreto. (a) Realização do *Slump Test*; (b) Medição do Abatimento; (c) Concreto na caixa; (d) Interface com geotêxtil após a ruptura; e (e) Interface com geomembrana lisa após a ruptura.

3.3.4. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DE GEOMEMBRANAS

O LEXT OLS4000 tem dois métodos de medição: “medição de rugosidade linear” e “medição de rugosidade de área ou superfície”. Ele usa as características de um microscópio laser para medir a amostra sem contato e sem perder o desempenho da observação, análise de rugosidade linear e rugosidade de área. Comparado a um instrumento do tipo de contato, é mais fácil alinhar

a posição para medir a rugosidade de uma área alvo muito pequena. O tempo necessário para a medição é curta, de modo que também é apropriado para a medição da rugosidade da área. Para obter as características geométricas da rugosidade dos perfis, de acordo com NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), foram obtidas duas imagens microtopográficas para cada geomembrana (Figura 3.18): i) imagem para a face superior (lado externo no rolo) em interfaces com areia e concreto; ii) imagem para a face inferior (lado interno no rolo) em interfaces com geotêxtil não tecido. Para as duas faces foram seguidos os seguintes passos:

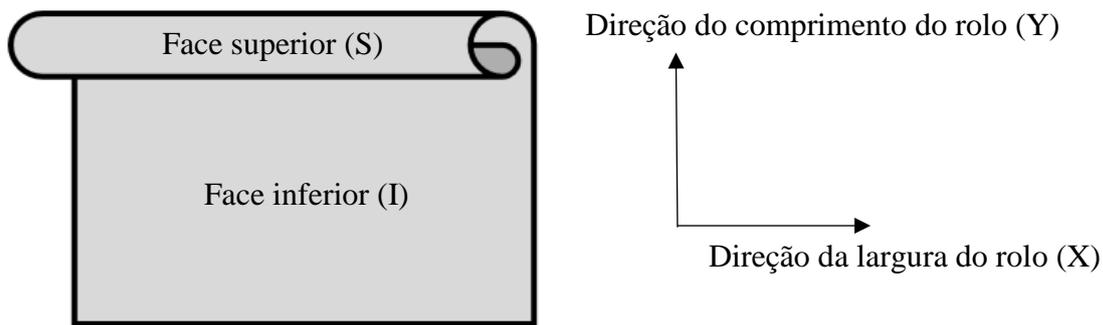


Figura 3.18. Esquema das direções assumidas com relação ao rolo das geomembranas.

1 – Preparação de amostras, quando foi selecionada para cada tipo de geomembrana uma amostra quadrada de 30 mm de lado;

A obtenção das imagens microscópicas de cada amostra demandou um período de 6 a 8 horas para gerar as microtopográficas das mesmas. A procura por esse tipo de análise é grande, pois não houve muita disponibilidade desse equipamento para uso. Para cada tipo de geomembrana foram selecionadas nove amostras quadradas de 30 mm de lado por cada geomembrana e com um paquímetro de resolução de medição de 0,01 mm foram medidas suas espessuras totais. Para todos os tipos de geomembranas, o coeficiente de variação das leituras foi menor do que 5%. Escolheu-se uma amostra por tipo de geomembrana para medições no microscópio, optando-se pela amostra com valor de espessura total mais próxima ao valor médio calculado para as nove amostras. Essa amostra se apresenta com letra em negrito na Tabela 3.8.

2 – Posicionamento no microscópio da amostra, colocando-a perpendicularmente em relação ao laser ótico. Para isso, apoiou-se a amostra sobre a massa de modelar facilmente deformável e adaptável, o que permitiu conseguir a horizontalidade da amostra;

- 3 – Fixação do limite inferior e superior de avaliação, por meio do ajuste do foco, com ajuda da visualização laser no microscópio;
 - 4 – Realização de um perfil de rugosidade inicial para determinar um Ra inicial e que permita selecionar um valor de “*cut off*”, com aumento da imagem em 10x;
 - 5 – Com a identificação dos valores de Ra iniciais, procedeu-se à leitura da microtopografia da amostra com valor “*cut off*” = 8,0 mm para as geomembranas rugosas e “*cut off*” = 2,5 mm para a geomembrana lisa, baseando-se na Tabela 19.3 do trabalho de Marinho (2000).
- Empregou-se a lente com aumento da imagem em 10x, porque na definição do Ra inicial esse valor é suficiente para o interesse do estudo. Devido aos “*cut off*” empregados, cada perfil teve um número máximo de dois comprimentos de amostragem no comprimento da avaliação (n=2).
- 6 – Desenho na imagem das dez linhas onde se quer conhecer o perfil. Para cada imagem obtida (Figura 3.19a), foram gerados dez perfis com espaçamento aproximado de 1,5 mm entre eles (Figura 3.19b e Figura 3.19d), tendo em vista as duas direções perpendiculares da amostra;
 - 7 – Filtragem da ondulação com filtro $\lambda_c = \textit{cut off}$ para eliminar a ondulação e determinação dos parâmetros de rugosidade pelo método do perfil para os dez perfis (Figura 3.19c);
 - 8 – Cálculo dos parâmetros de rugosidade pelo método do perfil por meio de análise estatística com dez perfis.
- 5a – Determinação dos parâmetros de rugosidade de superfície a partir da superfície microtopográfica, diretamente da imagem 3D.

Tabela 3.8. Resultados da análise estatística das amostras de geomembrana.

No.	GML1	GMT1	GMT2	GMT3	GMT4
1	2,09	3,1	3,28	4,27	2,81
2	2,11	3,14	3,29	4,28	2,80
3	2,07	3,16	3,31	4,25	2,83
4	2,07	3,12	3,32	4,25	2,81
5	2,08	3,15	3,29	4,26	3,05
6	2,08	3,16	3,31	4,25	2,99
7	2,08	3,13	3,28	4,29	2,90
8	2,07	3,16	3,28	4,28	3,05
9	2,11	3,15	3,3	4,27	2,90
Média	2,08	3,14	3,30	4,27	2,90
Desvio Padrão	0,02	0,02	0,02	0,02	0,10
CV (%)	0,76	0,66	0,46	0,35	3,53

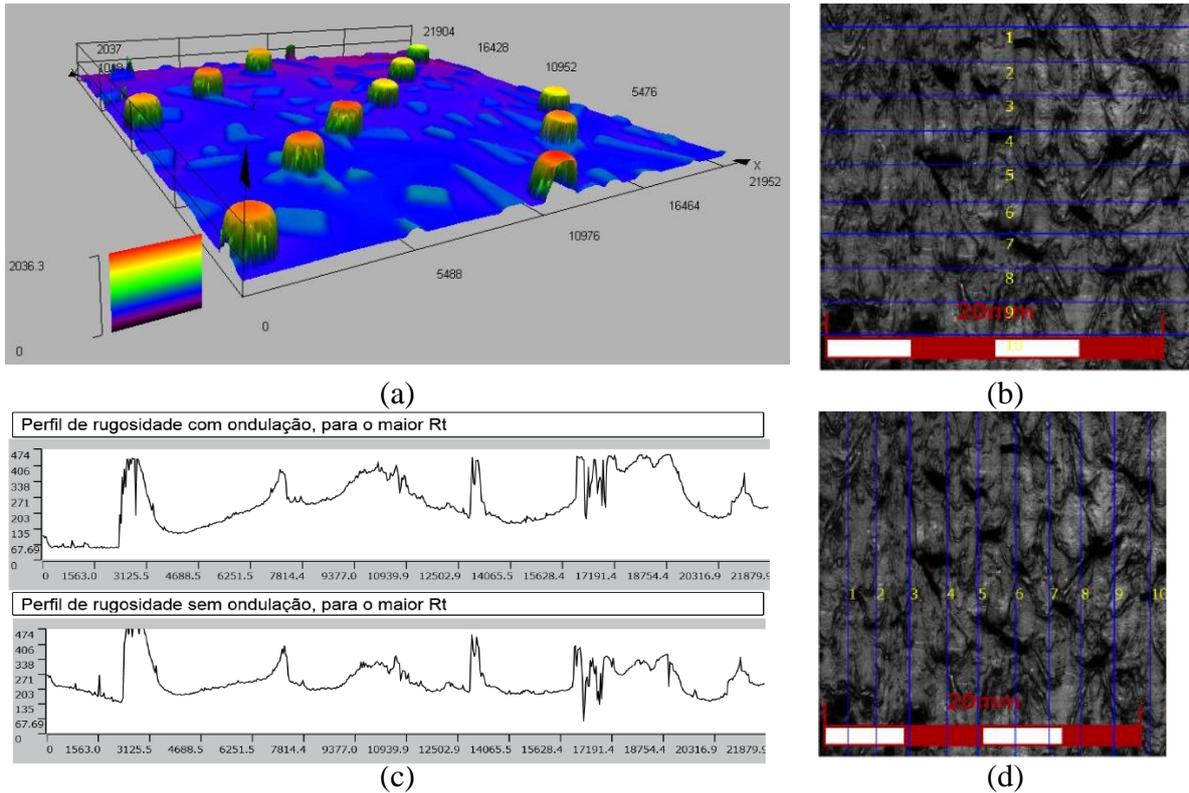


Figura 3.19. Obtenção de perfis de rugosidade com microscópio: (a) Microtopografia 3D da GMT3 face inferior; (b) Geração dos perfis na GMT2 face superior, na direção da largura do rolo - direção X; (c) Perfil de rugosidade para o maior Rt dos dez perfis na direção X da GMT2 face superior; (d) Geração dos perfis na GMT2 face superior, na direção do comprimento do rolo – direção Y.

Com o intuito de facilitar o entendimento sobre a determinação de cada um dos parâmetros obtidos, a forma de determinação foi descrita graficamente na

Figura 3.20 para o método do perfil (2D) de rugosidade e na Figura 3.21 para o método da superfície (3D). A forma de determinação foi elaborada a partir do *site* oficial do fabricante do microscópio, quando também foram definidas as medições para cada parâmetro. Considerou-se importante trazer essa informação pela diversidade de normas que descrevem as formas de medição dos parâmetros. A comparação dos parâmetros para cada geomembrana foi feita através da observação e análise.

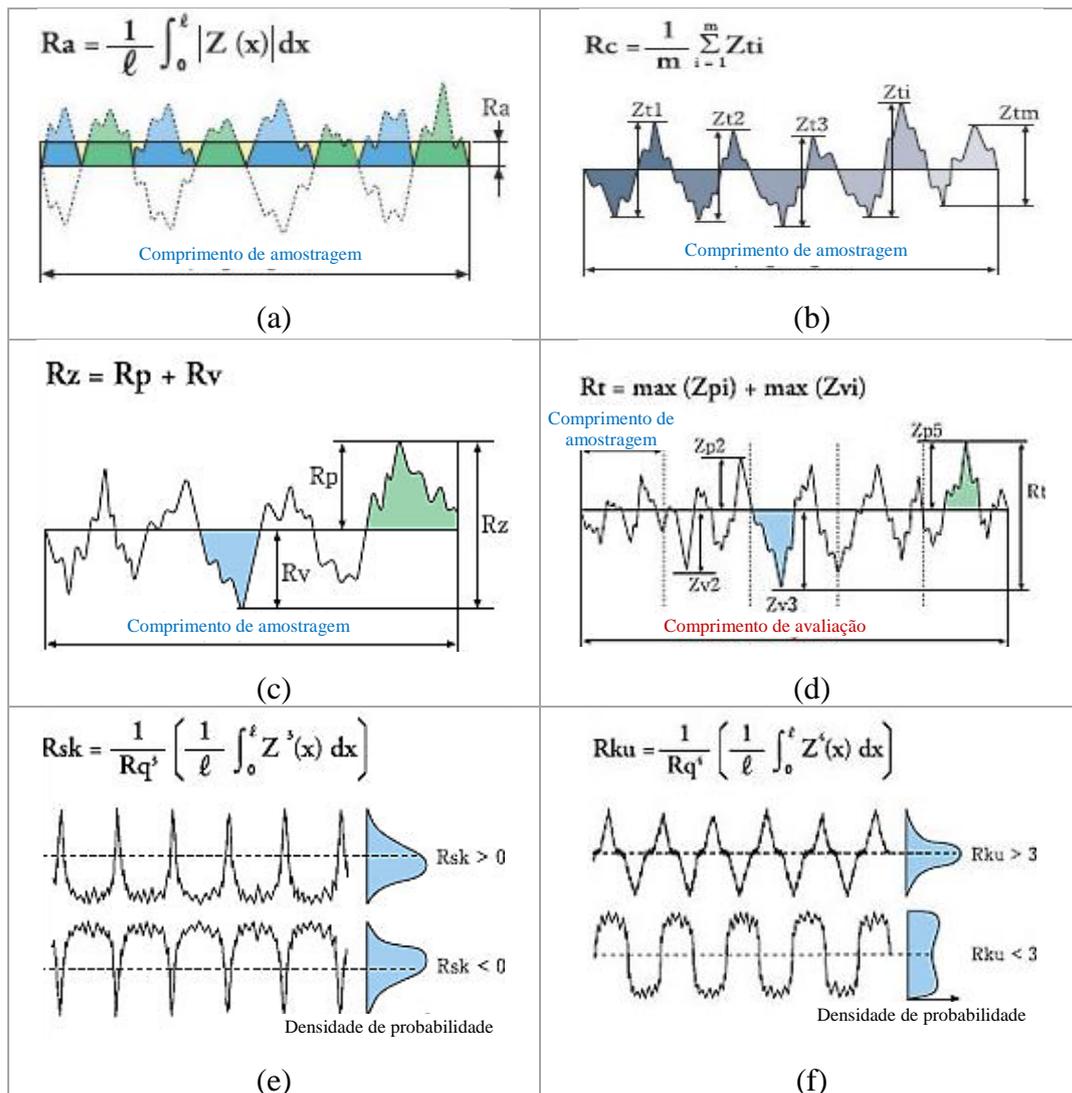


Figura 3.20. Determinação de parâmetros de rugosidade 2D. (Modificado - OLYMPUS, 2018): (a) Desvio aritmético médio do perfil, (b) Altura média dos elementos do perfil, (c) Altura máxima do perfil, (d) Altura total do perfil, (e) Fator de assimetria no perfil avaliado e (f) Fator de achatamento do perfil avaliado.

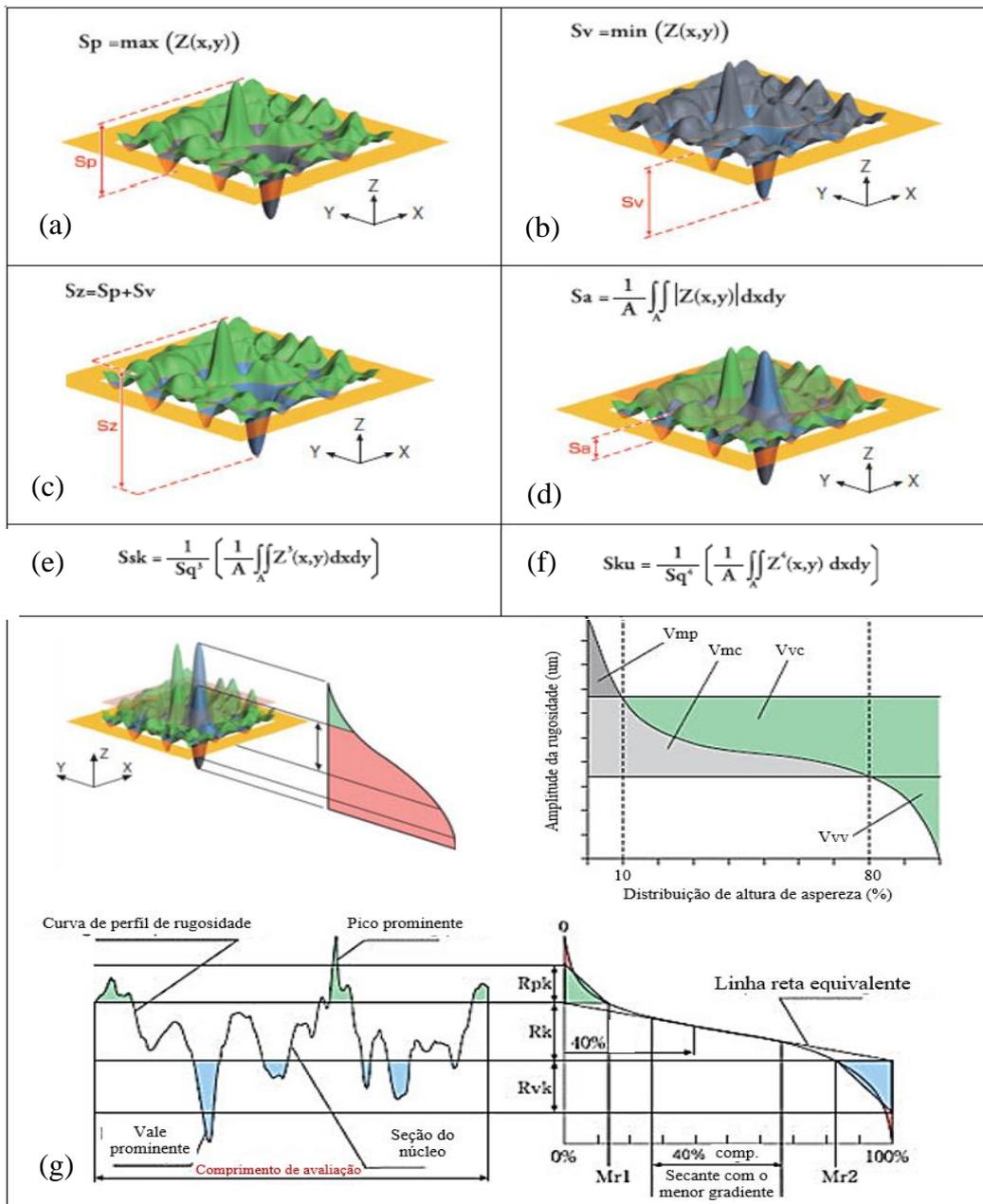


Figura 3.21. Determinação dos parâmetros de rugosidade 3D. (Modificado - OLYMPUS, 2018): (a) Altura do maior pico da superfície, (b) Profundidade do maior vale da superfície, (c) Altura máxima da superfície, (d) Desvio aritmético médio da superfície, (e) Fator de assimetria na superfície, (f) Fator de achatamento da superfície e (g) Determinação dos volumes de vazio (V_{cv} e V_{vv}) e de material (V_{mp} e V_{mc}).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios descritos na metodologia. Inicialmente é feita uma abordagem específica por grupos de interfaces para os três tipos de ensaios de cisalhamento. Posteriormente, é caracterizada e estudada a influência das asperezas nos resultados dos ângulos de atrito das interfaces. Finalmente, a influência do tamanho da área da superfície em cisalhamento é também avaliada. Foi denominado como ‘ângulo de atrito de pico’ o resultado da tensão cisalhante de pico e como ‘ângulo de atrito pós-pico’ o resultado da tensão cisalhante ao final do ensaio.

4.1. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE REPETIBILIDADE NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Antes do início dos ensaios das interfaces, foi calibrada toda a instrumentação empregada, como comentado na metodologia. Foram também realizados ensaios de treinamento do operador, cujo objetivo era conseguir a repetibilidade nos resultados obtidos. Para cada um dos três tipos de equipamentos de cisalhamento foram realizados seis testes de repetibilidade para a interface 13 (areia/GMT1), sem reuso dos materiais. Nessa tal análise, foram empregadas tensões normais de 25 kPa nos ensaios CDC e CDM, e tensão normal inicial de 6,09 kPa para o ensaio de CPI. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1 e Figura 4.1, onde β_{lim} é o ângulo de inclinação limite da rampa em ensaio de CPI, para o qual acontece o deslizamento não estabilizado.

Tabela 4.1. Resultados da análise estatística da repetibilidade.

No.	τ para CDC		τ para CDM		β_{lim} para CPI
	Pico	Pós-pico	Pico	Pós-pico	Pico
1	15,92	13,39	14,83	13,87	30,30
2	15,60	13,25	14,40	13,45	30,12
3	16,00	13,70	15,02	13,98	30,42
4	16,08	13,60	14,56	13,59	29,95
5	16,23	13,60	14,74	13,73	30,05
6	15,75	13,40	14,57	13,65	30,22
Média	15,93	13,49	14,69	13,71	30,18
Desvio Padrão	0,23	0,17	0,22	0,19	0,17
CV (%)	2,14	1,71	1,51	1,40	0,57

As variações obtidas podem ser atribuídas à repetibilidade da disposição espacial da rugosidade na fabricação do geossintético, ao controle na colocação das amostras e à variabilidade própria do solo e do operador. A repetibilidade obtida é considerada aceitável para os três equipamentos, com coeficiente de variação obtido inferior a 6%, comparável ao valor encontrado por Fowmes *et al.* (2017) para um único operador nas mesmas condições dos testes realizados.

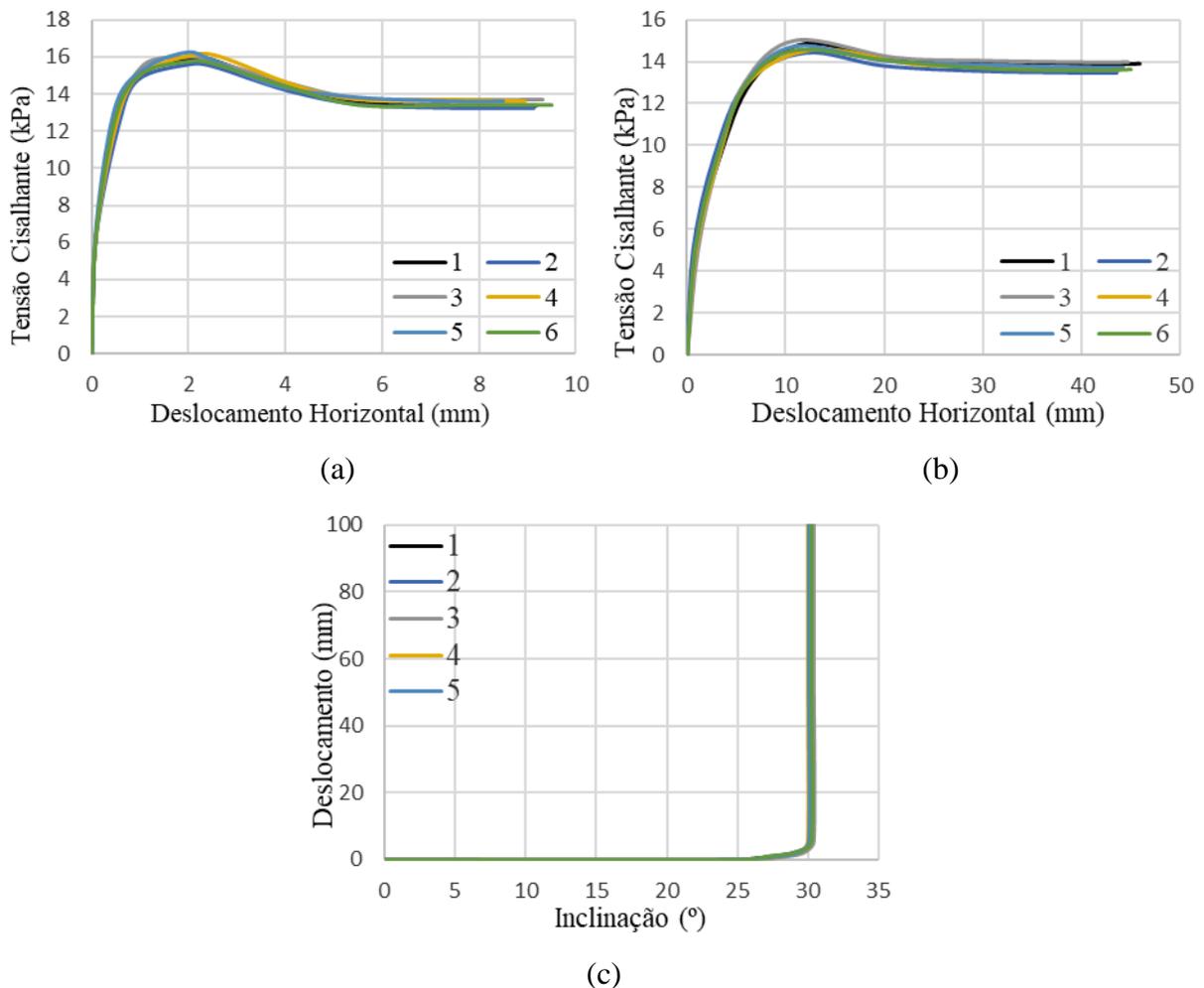


Figura 4.1. Resultados de repetibilidade nos equipamentos: (a) CDC, (b) CDM e (c) CPI.

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM INTERFACES GEOTÊXTIL NÃO TECIDO /GEOMEMBRANA

Observou-se durante os ensaios um comportamento similar ao descrito por Kim (2006), que demonstra que o cisalhamento de interfaces ocorre conforme descrito nas etapas apresentadas na Tabela 4.2, segundo o tipo de ensaio:

Tabela 4.2. Etapas dos ensaios de cisalhamento em interfaces de geotêxtil não tecido/geomembrana.

Etapas	CDC	CDM	CPI
1	Assento inicial com aplicação da carga e aumento da densidade no geotêxtil não tecido, com deformação nas texturas das geomembranas, seja apenas por sua compressão em interfaces com geomembrana lisa ou por sua compressão com penetração das texturas em interfaces com geomembrana texturizada, o que produz um aumento da densidade ainda maior ao redor das texturas.		
2	Com o início do deslocamento horizontal, inicia-se a mobilização da tensão tangencial com reordenamento das deformações das texturas da geomembrana e das fibras geotêxteis.		Com o início do levantamento da rampa, inicia-se a mobilização de tensão tangencial com as mesmas consequências dos ensaios CDC e CDM. Fase estática (Pitanga <i>et al.</i> , 2009).
3	Antes do início da fricção deslizante, com ou sem intertravamento, o geotêxtil apresenta uma maior distorção para geotêxteis com maiores espessuras e geomembranas com pouca altura de textura.		
4	Atingindo o limite da distorção do geotêxtil, inicia-se a mobilização da tensão tangencial ou fricção deslizante, com acréscimo de resistência devido ao intertravamento das texturas da geomembrana na superfície do geotêxtil.		
5	Em interfaces com geomembranas de maior altura de textura, após atingir o τ_{pico} , acontece uma queda pouco acentuada até a $\tau_{pós-pico}$ da resistência cisalhante e do deslocamento vertical. A τ_{pico} é obtida para maior deslocamento horizontal em interfaces com geomembranas texturizadas, sobretudo devido ao intertravamento profundo entre as texturas da geomembrana e o geotêxtil. Pela alta resistência antes da liberação do intertravamento, o deslocamento é maior para maior altura de textura, gramatura do geotêxtil e tensão normal. Em interfaces com geomembrana lisa $\tau_{pico} \approx \tau_{pós-pico}$, o deslocamento horizontal é maior para maior gramatura do geotêxtil e tensão normal. Para todas as interfaces, o deslocamento vertical denotou uma compressão com maior valor no pico, sendo maior em ensaio CDM do que em ensaio CDC.		Fase de deslizamento não estabilizado (Pitanga <i>et al.</i> , 2009). O deslocamento relativo da caixa em relação à base na ruptura é maior para maior gramatura de geotêxtil. $\tau_{pico} = \tau_{pós-pico}$.

Na avaliação do comportamento de cada uma das interfaces, considerou-se possível estabelecer comparações entre os resultados de ângulos de atrito obtidos. Duas abordagens foram consideradas: i) ângulo de atrito da envoltória, obtido por meio das envoltórias, sendo que a

envoltória foi obtida pelo ajuste de uma reta nos três ensaios com diferentes tensões de ruptura, - nesse caso, a envoltória não passa obrigatoriamente pela origem para considerar o efeito velcro relatado por Hebeler *et al.* (2005); e ii) ângulo de atrito secante, obtido para cada ensaio ou par de tensões de ruptura.

Cabe salientar que, devido à variabilidade das tensões normal e cisalhante, com elevação da rampa no ensaio de CPI, foram usadas letras maiúsculas para identificar as tensões normais de ruptura, sendo que: (A) corresponde à tensão normal menor, (B) à tensão normal intermediária e (C) à tensão normal maior. Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados para as duas abordagens.

4.2.1. ENSAIOS PARA BAIXAS TENSÕES NORMAIS

Devido aos relatos de Girard *et al.* (1990) sobre os erros grosseiros em ensaios de cisalhamento para baixas tensões, atentou-se para a realização dos ensaios com baixas tensões, de forma a manter a melhor repetibilidade possível. As tensões cisalhantes de pico nos ensaios de CDM são atingidas para deslocamentos horizontais pequenos 0,1 - 19 mm, crescentes proporcionalmente às maiores alturas das texturas das geomembranas, sendo a faixa de deslocamentos na ruptura mais ampla do que a descrita por Martinez (2010), de 4 - 8 mm. Esse valor é atribuído pela autora a partir de ensaios com tensões acima de 25 kPa e com outros tipos de geotêxteis e geomembranas. No entanto, as curvas de mobilização de resistência dos ensaios foram similares, com tensões cisalhantes de pico e pós-pico tanto maior quanto mais elevado o valor da tensão normal aplicada, associadas à ruptura do intertravamento, acarretando sulcos no geotêxtil.

Nos ensaios de CPI, conforme descrito por Girard *et al.* (1990), obteve-se uma relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal na forma de uma linha reta, passando próximo da origem dos eixos. Algumas interfaces mostradas na Tabela 4.3 não chegaram à ruptura para o máximo de inclinação possível da rampa (45°). Esse comportamento está de acordo com os relatos de Hebeler *et al.* (2005) quanto ao papel significativo da interação de gancho e laço (“*hook and loop*”). Essa interação também foi descrita por Kim (2006) como intertravamento profundo entre as texturas da geomembrana e do geotêxtil. Vale salientar a não ocorrência de tombamento da carga normal durante os ensaios, fato relatado por Aguiar (2008).

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros de interfaces obtidos para os ensaios de CDM e de CPI sob baixas tensões normais. Assim como as envoltórias curvas relatadas por Martinez (2010), decidiu-se mostrar resultados para ângulos de atrito secantes e ângulos de atrito das envoltórias, e determinar os interceptos de adesão definidos pelas linhas de melhor ajuste das três tensões de cada ensaio.

É importante notar na Tabela 4.3 que um valor de 45° foi adotado para os ensaios de CPI, o qual, mesmo sem ter atingido a ruptura, serve apenas para efeitos de comparação com os resultados dos ensaios de CDM. São apresentados os resultados para valores de pico e de pós-pico, chamando-se a atenção, em particular, para o fato de que, nos ensaios de CDM, esses valores de pós-pico são também os residuais.

Tabela 4.3. Resultados de ângulos de atrito (°) para interfaces da 1 até 10, sob baixas tensões normais.

Interface		Referencia	CDM					CPI				
Materiais	Nº.		1,5 kPa	3,0 kPa	6,0 kPa	Envoltória		A < 1,26 (kPa)	B < 3,24 (kPa)	C < 5,39 (kPa)	Envoltória	
						Ângulo de atrito (°)	Adesão (kPa)				Ângulo de atrito (°)	Adesão (kPa)
Geotêxtil/ Geomembrana	1	Pico	31	28	21	17	0,6	21	21	21	21	0,0
	GNT1/GMT1	Pós-pico	31	22	19	15	0,5	21	21	21	21	0,0
	2	Pico	31	27	23	20	0,4	20	21	21	21	0,1
	GNT2/GMT1	Pós-pico	31	27	23	20	0,4	20	21	21	21	0,1
	3	Pico	42	32	29	25	0,6	45	45	45	45*	0,0
	GNT1/GMT2	Pós-pico	38	32	29	26	0,5	45	45	45	45*	0,0
	4	Pico	61	48	36	21	2,2	45	45	45	45*	0,0
	GNT2/GMT2	Pós-pico	54	46	35	24	1,6	45	45	45	45*	0,0
	5	Pico	39	32	29	25	0,5	32	33	32	33	0,1
	GNT1/GMT3	Pós-pico	39	32	29	25	0,5	32	33	32	33	0,1
	6	Pico	54	41	34	24	1,3	25	25	25	25	0,0
	GNT2/GMT3	Pós-pico	52	39	33	23	1,2	25	25	25	25	0,0
	7	Pico	64	51	42	28	2,3	45	45	45	45*	0,0
	GNT1/GMT4	Pós-pico	58	45	35	22	1,9	45	45	45	45*	0,0
	8	Pico	58	49	41	33	1,5	45	45	45	45*	0,0
	GNT2/GMT4	Pós-pico	53	46	40	33	1,1	45	45	45	45*	0,0
	9	Pico	5	9	9	10	0,0	12	12	12	12	0,0
	GNT1/GML1	Pós-pico	5	9	9	9	0,0	12	12	12	12	0,0
	10	Pico	7	9	10	11	0,0	11	12	13	13	0,0
	GNT2/GML1	Pós-pico	7	9	10	11	0,0	11	12	13	13	0,0

*Ensaio que não atingiram a ruptura para a máxima inclinação possível da rampa. A seguir, identificam-se os geotêxteis pela gramatura e as geomembranas pela altura de aspereza fornecida pelo fabricante: GNT1 (300), GNT2 (800), GMT1(0,32), GMT2(0,67), GMT3(0,78), GMT4(0,52), GML1(0,00).

Pode ser observado na Tabela 4.3 que os valores de adesão foram praticamente nulos para todas as interfaces. São também inferiores nos ensaios de CPI do que nos de CDM, comportamento similar ao obtido por Aguiar (2008). Os ângulos de atrito secantes, por sua vez, apresentaram uma variabilidade insignificante para as três tensões nos ensaios de CPI, ou seja, envoltória reta, como também aconteceu nos ensaios de areia/geomembrana de Aguiar (2008).

Quanto aos ângulos de atrito secantes, a sua variabilidade foi insignificante para as três tensões nos ensaios de CPI, ou seja, envoltória reta. Para os ensaios de CDM, uma grande variabilidade entre esses três ângulos de atrito foi notada. Logo, foram obtidos os maiores valores do ângulo de atrito secante nos ensaios de CDM para as quatro interfaces que não atingiram a ruptura nos ensaios CPI (3, 4, 7 e 8). As envoltórias dos ensaios são mostradas na Figura 4.2, com linhas descontínuas para identificar as interfaces com GNT1 e com linhas contínuas para as interfaces com GNT2.

Ao observar as envoltórias pós-pico levemente mais inclinadas do que as envoltórias pico para ensaios de CDM nas interfaces 3 e 4, percebe-se que essa inclinação está relacionada às características da textura. O efeito do intertravamento é mais nítido nas envoltórias dos ensaios de CPI, mostradas na Figura 4.2c. Quanto maior a textura e a tensão normal, maior resistência de interface é obtida, mostrando-se que a matriz balão é mais eficiente do que a matriz plana. As asperezas em forma de saliências cônicas da GMT3 conseguem maior penetração e intertravamento na interface com o geotêxtil de menor gramatura, levando a uma maior resistência.

As diferenças quanto à mobilização da resistência e forma de aplicação da carga, dentre outros fatores, permitem chegar a uma ruptura de interfaces nos ensaios de CDM não atingida para os ensaios de CPI. Uma comparação mais detalhada das envoltórias é evidenciada no Apêndice deste trabalho. As envoltórias dos ensaios de CDM na Figura 4.2a e na Figura 4.2b complementam as informações resultantes dos ensaios de CPI e permitem visualizar a mudança da resposta resistente em dependência da gramatura do geotêxtil e das tensões normais.

As resistências de interface são menores para uma estrutura mais fechada e densa do geotêxtil. A GMT4 apresenta um comportamento mais complexo devido à sua densidade ser menor em relação às outras geomembranas. Adicionalmente, pode-se notar que a resistência de interface apresentou pouca variação, especialmente quando comparada ao tamanho das escalas dos

ensaios de CDM e CPI. Com exceção da interface 1 (GNT1/GMT1), as variações máximas foram de três graus, o que é considerado dentro da margem de erro do equipamento.

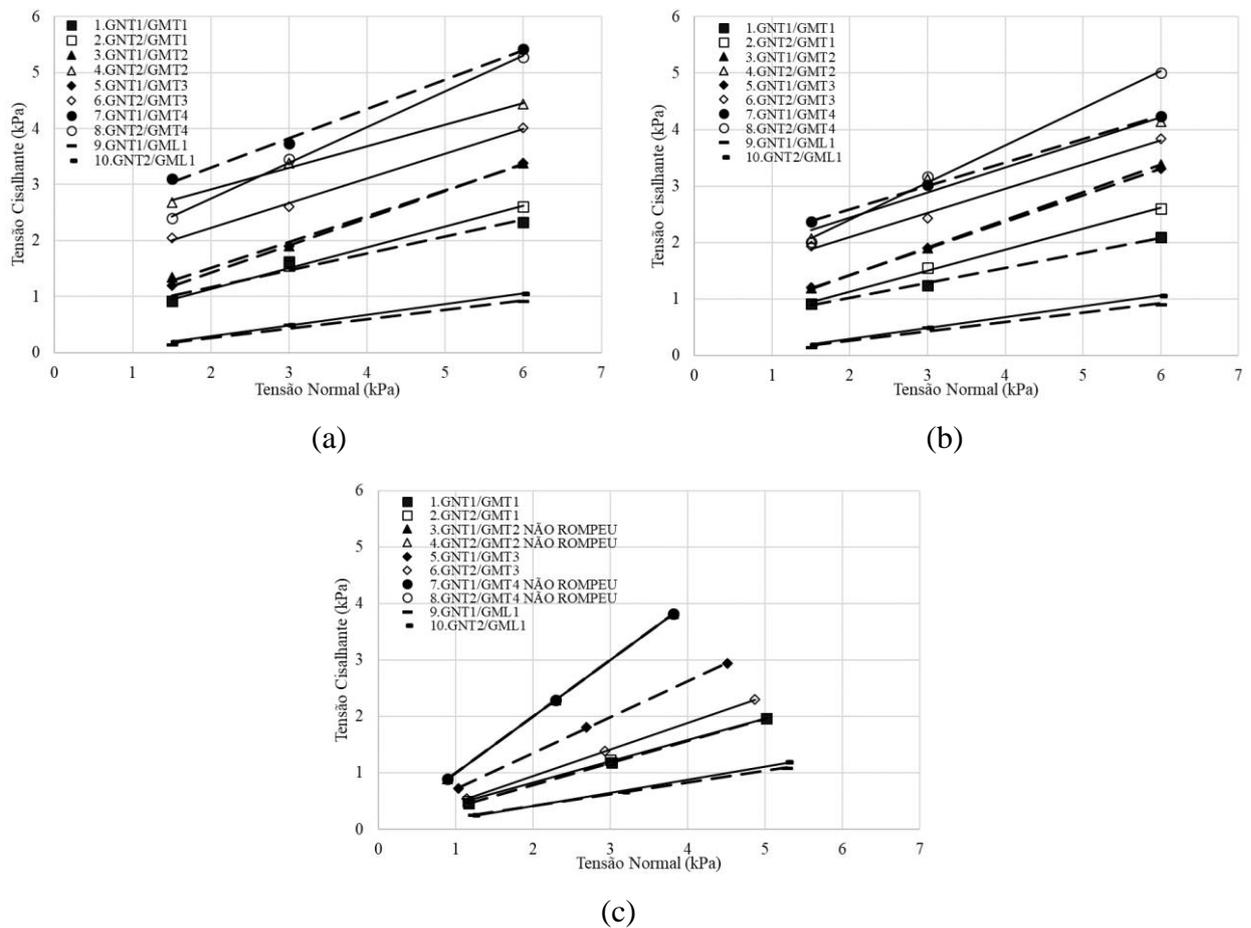


Figura 4.2. Envoltórias dos ensaios sob baixas tensões para as interfaces 1-10: (a) Envoltórias do ensaio de CDM pico, (b) Envoltórias do ensaio de CDM pós-pico e (c) Envoltórias do ensaio de CPI pico e pós-pico.

Os resultados dos ângulos de atrito secantes e das envoltórias para as interfaces 1-10 podem ser comparados na Figura 4.3 para valores de pico do ensaio de CDM; na Figura 4.4, para os valores de pós-pico do ensaio de CDM; e, na Figura 4.5, para os valores de pico do ensaio de CPI. Observam-se diferenças significativas entre os ângulos de atrito secantes para distintas tensões normais nas interfaces com geomembrana texturizada. Essas diferenças foram maiores em geomembranas com asperezas de maior altura e concentração. No entanto, para a geomembrana lisa, os ângulos de atrito das envoltórias superam os secantes.

Na Figura 4.3, observa-se graficamente que as interfaces com GMT4 atingiram os maiores ângulos de atrito pico dentre todas as interfaces. Esse dado demonstra que uma aspereza mais rígida rompe e deforma mais facilmente os fios dos geotêxteis não tecidos, considerando que a GMT4 apresenta visualmente uma textura similar à GMT2, a qual é feita de um polietileno de menor densidade, o que torna a aspereza mais flexível e precisa de um deslocamento maior quanto maior for a altura da aspereza para atingir a ruptura.

Quando comparados os ângulos de atrito pico das envoltórias, na Figura 4.3, e os pós-pico, na Figura 4.4, observa-se uma diferença maior entre os resultados de pico e de pós-pico das interfaces com geotêxteis menos densos (interfaces com GNT1), o que acontece também com todos os resultados de pós-pico de atrito secante.

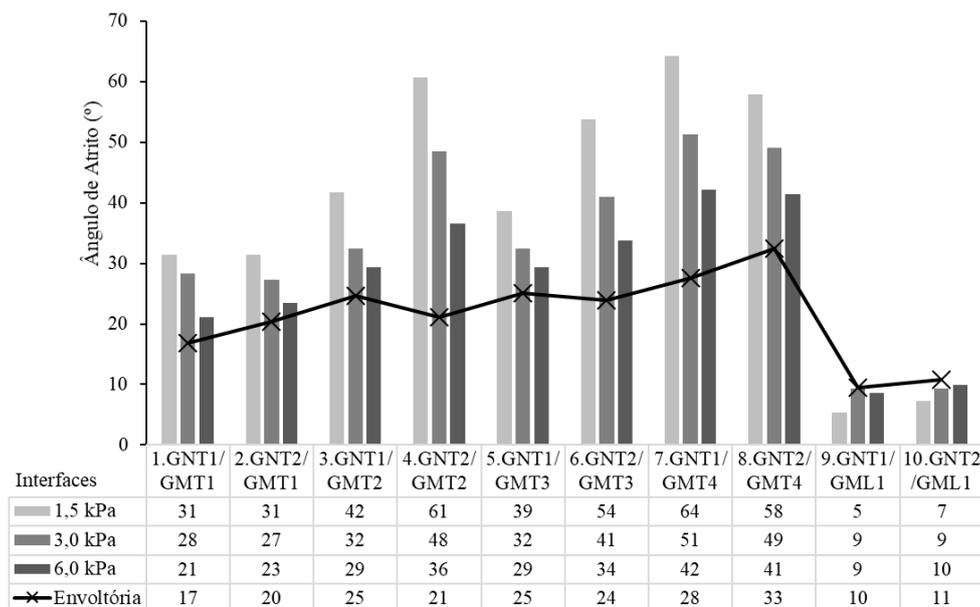


Figura 4.3. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob baixas tensões.

Uma diferença insignificante foi percebida ao comparar os resultados de atrito secante e das envoltórias dos ensaios de CPI, diferente ao observado anteriormente para os ensaios de CDM. Conforme pode ser observado na Figura 4.5, para as interfaces que romperam (1-2, 5-6 e 9-10), o aumento da textura conduz a uma maior resistência cisalhante em geomembranas de matriz balão, chamando-se a atenção para as interfaces com maior altura de textura (5-6), que atingiram a ruptura devido às asperezas da GMT3 serem mais espaçadas do que as das GMT1, GMT2 e GMT4, e a da matriz plana, que diminui o efeito velcro pela diminuição do entrelaçamento dos fios do geotêxtil nas saliências cônicas de forma arredondada.

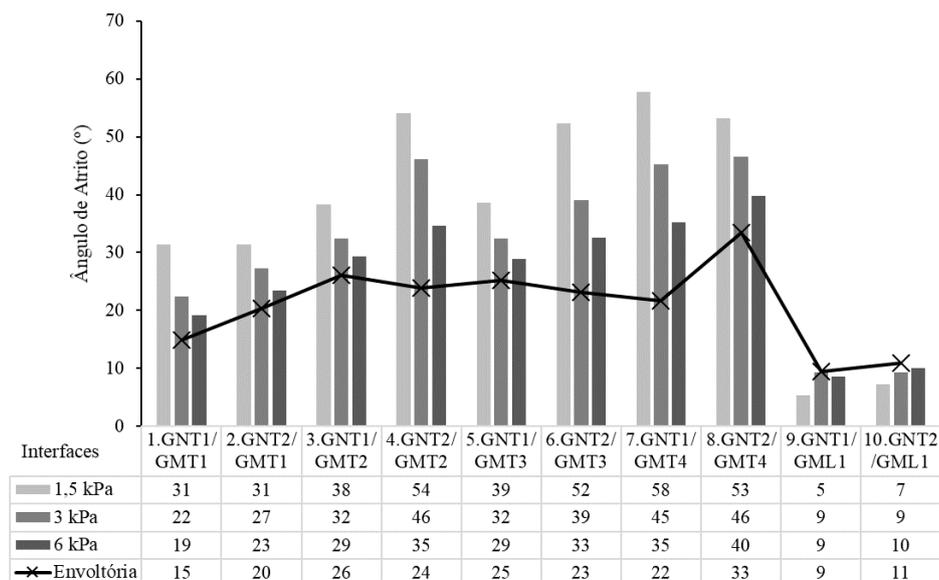


Figura 4.4. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob baixas tensões.

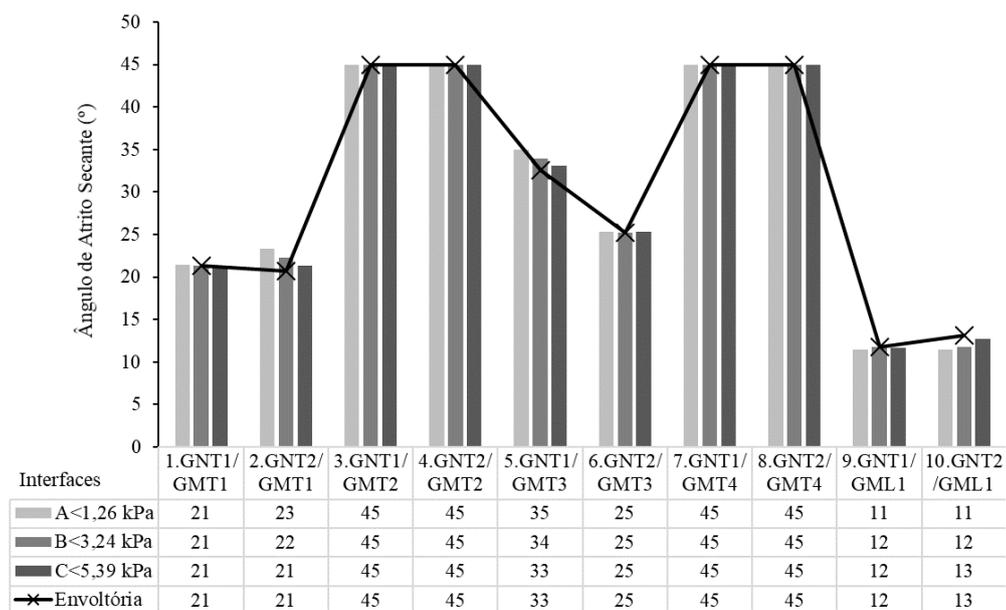


Figura 4.5. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CPI em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana.

4.2.2. ENSAIOS PARA ALTAS TENSÕES NORMAIS

Neste item, manteve-se a mesma sequência do anterior, mostrando na Tabela 4.4 os parâmetros de interfaces obtidos para ambos os ensaios de CDC e de CDM sob altas tensões normais. São mostrados também os resultados de ângulos de atrito secantes, ângulos de atrito das envoltórias

e os interceptos de adesão definidos pelas linhas de melhor ajuste aos três pares de tensões de cada ensaio. As envoltórias para as interfaces podem ser consultadas no Apêndice deste trabalho.

Na Figura 4.6 podem ser observadas as envoltórias dos ensaios de CDC e CDM sob altas tensões. Nota-se que as diferenças entre as envoltórias obtidas por meio dos dois tipos de ensaios aumentam para as geomembranas com maior textura. Esses resultados seguem o comportamento de interfaces relatado por Martínez (2010) quanto ao efeito de gancho e laço (*“hook and loop”*), também chamado de efeito velcro. Os resultados da maioria dos ensaios têm ângulo de atrito de pico da envoltória (ϕ_{ep}) de 5-9 ° e ângulo de atrito tangente de pós-pico (ϕ_{epp}) de 5-8° para a GML1. Para geomembranas texturizadas, a maioria dos resultados tem ϕ_{ep} de 13-31° e ϕ_{epp} de 13-25°. Esses valores estão de acordo com os trabalhos de outros pesquisadores, segundo Martínez (2010).

Tabela 4.4. Resultados de ângulos de atrito (°) para interfaces da 1 até 10, sob altas tensões normais.

Interfaces		Referencia	CDC					CDM				
Materiais	Nº.		25 kPa	50 kPa	100 kPa	Envoltória		25 kPa	50 kPa	100 kPa	Envoltória	
						Ângulo de atrito (°)	Adesão (kPa)				Ângulo de atrito (°)	Adesão (kPa)
Geotêxtil/ Geomembrana	1 GNT1/GMT1	Pico	15	15	15	16	0,0	20	16	15	14	2,7
		Pós-pico	15	15	16	16	0,0	16	14	14	14	0,7
	2 GNT2/GMT1	Pico	14	14	16	17	0,0	17	17	14	13	2,6
		Pós-pico	14	14	15	16	0,0	16	16	14	13	2,0
	3 GNT1/GMT2	Pico	29	23	27	27	0,0	23	22	26	28	0,0
		Pós-pico	29	23	25	24	1,6	20	18	17	17	1,2
	4 GNT2/GMT2	Pico	21	24	24	25	0,0	27	25	30	31	0,0
		Pós-pico	21	24	24	25	0,0	24	22	21	21	2,1
	5 GNT1/GMT3	Pico	25	21	22	21	1,1	23	22	26	28	0,0
		Pós-pico	25	21	22	21	1,1	20	18	17	17	1,3
	6 GNT2/GMT3	Pico	23	22	20	18	2,7	30	25	23	21	4,6
		Pós-pico	23	22	20	18	2,7	30	24	23	21	4,2
	7 GNT1/GMT4	Pico	17	21	21	22	0,0	34	24	24	21	5,8
		Pós-pico	17	21	19	19	0,3	24	18	19	17	2,5
	8 GNT2/GMT4	Pico	19	17	18	18	0,3	23	24	21	20	2,2
		Pós-pico	19	17	18	18	0,3	19	20	17	16	2,2
	9 GNT1/GML1	Pico	5	6	6	6	0,0	11	9	9	9	0,5
		Pós-pico	5	6	6	6	0,0	11	9	9	8	1,1
	10 GNT2/GML1	Pico	6	6	5	5	0,3	10	9	8	8	1,1
		Pós-pico	6	6	5	5	0,0	10	9	8	7	1,5

A seguir, identificam-se os geotêxteis pela gramatura e as geomembranas pela altura de aspereza fornecida pelo fabricante: GNT1 (300), GNT2 (800), GMT1(0,32), GMT2(0,67), GMT3(0,78), GMT4(0,52), GML1(0,00).

Da mesma forma que no item anterior, os resultados de ângulos de atrito secante e das envoltórias para as interfaces (1-10) em ensaios de CDC e CDM sob altas tensões podem ser comparados graficamente no Apêndice. A comparação numérica desses resultados também pode ser feita através da Figura 4.7, para os valores de pico do ensaio de CDC; na Figura 4.8, para os valores de pós-pico do ensaio de CDC; na Figura 4.9, para valores de pico do ensaio de CDM; e na Figura 4.10, para os valores de pós-pico do ensaio de CDM. Observam-se diferenças não tão significativas entre os ângulos de atrito secante para uma mesma interface com geomembrana texturizada.

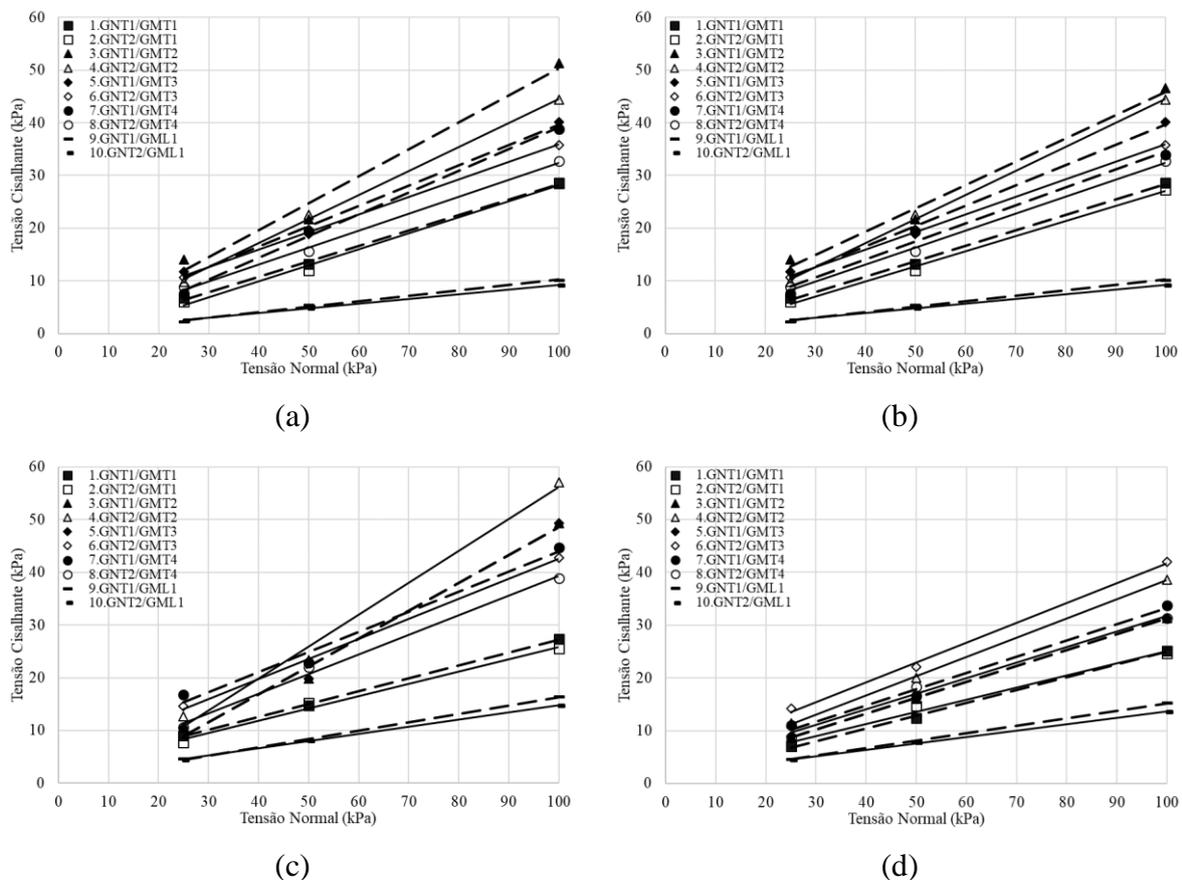


Figura 4.6. Envoltórias das interfaces da 1 – 10 sob altas tensões: (a) Envoltórias do ensaio de CDC pico, (b) Envoltórias do ensaio de CDC pós-pico, (c) Envoltórias do ensaio de CDM pico e (d) Envoltórias do ensaio de CDM pós-pico.

Como mostrado nas Figuras 4.3 a 4.10, um maior ângulo de atrito para a tensão de 100 kPa gera ângulos de atrito das envoltórias superiores aos secantes, isto é, tal resultado aumenta a inclinação da envoltória (admitida como linear) significativamente. De forma inversa, os ângulos de atrito secante maiores do que 25 kPa podem conduzir a um ajuste de curva com

resultados muito conservadores. Assim, recomenda-se uma avaliação das tensões mais prováveis da obra para a realização dos ensaios.

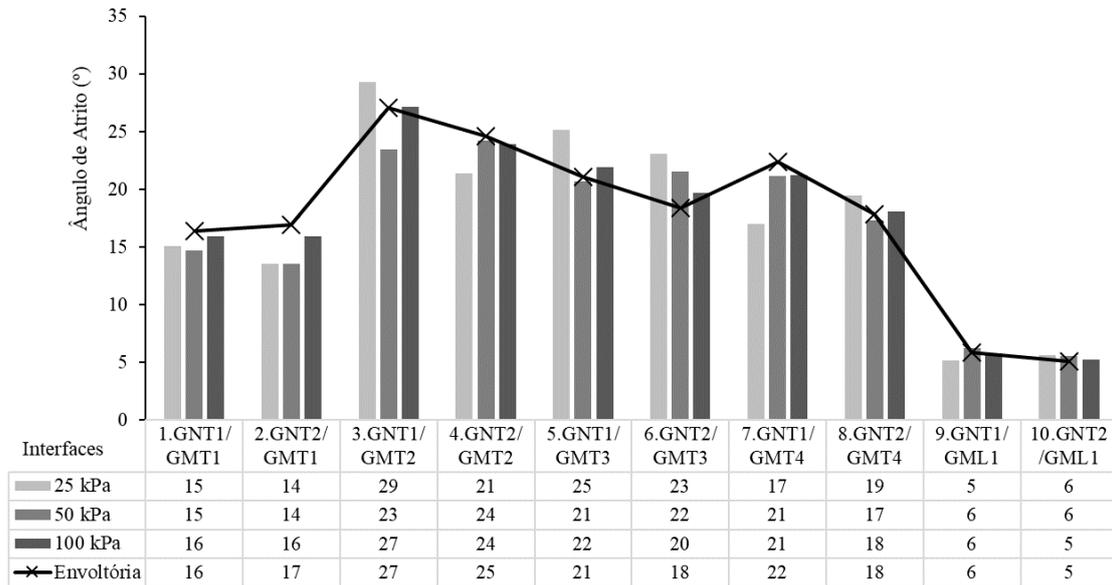


Figura 4.7. Ângulos de atrito pico dos ensaios de CDC em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana.

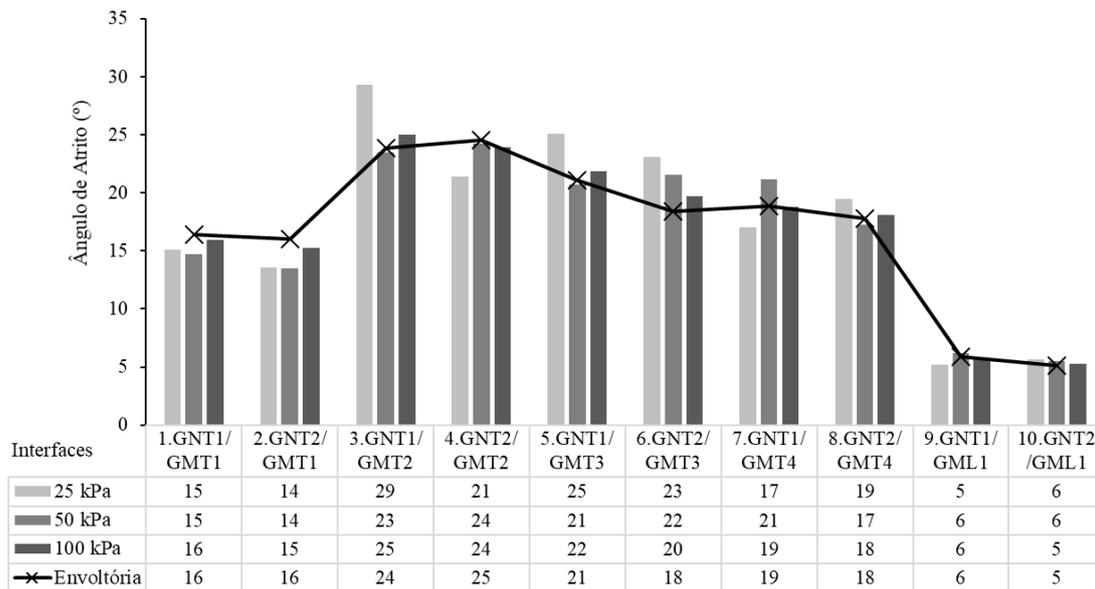


Figura 4.8. Ângulos de atrito pós-pico dos ensaios de CDC em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana.

Nos ensaios de CDC sempre foram observados valores do ângulo de atrito secante de pico (ϕ_{sp}) maior ou igual ao ângulo de atrito secante de pós-pico (ϕ_{spp}), com maior diferença para as

interfaces 3 e 7, de apenas 3°. Tal fato indica que, para geomembranas com alta concentração de asperezas, um geotêxtil menos denso pode levar a resistências menores pós-pico. Para todas as interfaces dos ensaios de CDM, observou-se $\phi_{sp} > \phi_{spp}$ e com diferenças menores para geomembrana lisa e texturizada de pequena altura de aspereza. De forma geral, há diferenças maiores do que nos resultados dos ensaios de CDC.

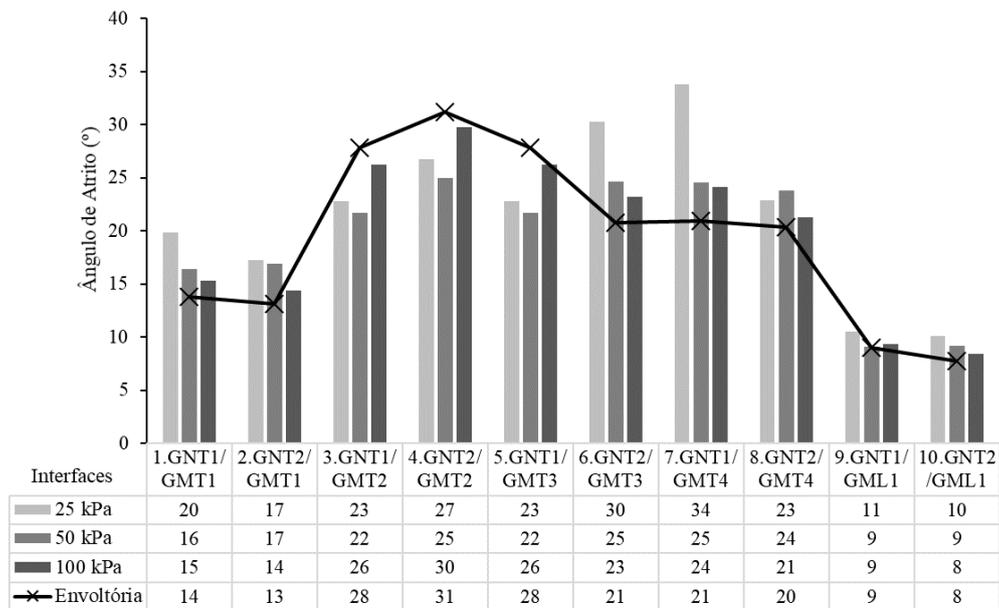


Figura 4.9. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob altas tensões.

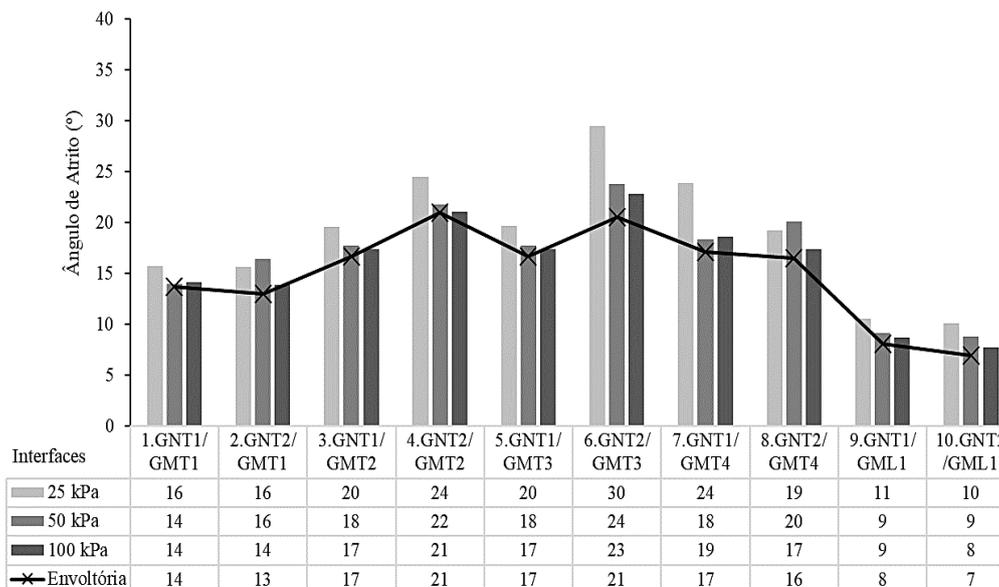


Figura 4.10. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDM em interfaces de geotêxtil não tecido e geomembrana, sob altas tensões.

4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO

Neste item são apresentados resultados dos ensaios de CDC e CDM para altas tensões normais, e de CPI para baixas tensões normais em interfaces de areia média com geomembranas. As quatro geomembranas texturizadas apresentam uma altura de aspereza próxima e densidade de concentração consideravelmente diferentes. Também são mostrados resultados da interação da areia com os dois geotêxteis não tecidos e a geomembrana lisa.

Para a avaliação do comportamento de cada uma das interfaces, comparou-se os resultados de ângulos de atrito obtidos e considerou-se as mesmas duas abordagens do item anterior. Durante os ensaios, constatou-se um comportamento similar ao descrito por Fleming *et al.* (2006), indicando que o cisalhamento de interfaces acontece para uma combinação de deslizamento e arado, segundo o tipo de ensaio. Esse processo é descrito nas etapas a seguir.

Etapa 1:

- Em ensaios de CDC e CDM ocorre a compressão inicial pela aplicação da carga, entrada dos grãos entre os fios superficiais do geotêxtil, travamento dos grãos nas asperezas das geomembranas texturizadas e cravação dos grãos na geomembrana lisa (em ensaios de CDC, CDM).
- No ensaio de CPI, com o início do levantamento da rampa, inicia-se a mobilização de tensão tangencial com as mesmas consequências dos ensaios de CDC e CDM. Fase estática (Pitanga *et al.*, 2009).

Etapa 2:

- Em ensaios de CDC e CDM, com início do deslocamento horizontal, inicia-se a mobilização de tensão tangencial com deformações das fibras superficiais dos geotêxteis, das texturas das geomembranas texturizadas e o começo do deslizamento e arado em geomembranas lisas.
- No ensaio de CPI, as mesmas consequências dos ensaios de CDC e CDM descrevem a fase transitória (Pitanga *et al.*, 2009).

Etapa 3:

- Em ensaios de CDC e CDM, ocorre a compressão vertical em virtude do reordenamento dos grãos, o qual é maior para densidades relativas da areia e menor para distorção e compressão do geotêxtil.

- No ensaio de CPI, as mesmas consequências dos ensaios de CDC e CDM descrevem a fase transitória (Pitanga *et al.*, 2009).

Etapa 4:

- Em ensaios de CDC e CDM, atingindo o limite da distorção do geotêxtil começa a expansão, aumenta a mobilização da tensão tangencial ou fricção deslizante e arado, com acréscimo de resistência devido ao intertravamento do solo na superfície do geotêxtil até o pico para deslocamentos entre 5,5 - 7,5 mm, para CDC, e 13 e 44 mm, para CDM, rasgando a superfície do geotêxtil.
- Nas geomembranas texturizadas, os grãos se travam nas asperezas mais altas quando estas são mais espaçadas acontecendo a expansão com o limite de travamento e arado para deslocamento horizontal entre 1,9 - 3,5 mm, para CDC, e 11 - 34 mm, para CDM; para um espaçamento das asperezas muito pequeno, acontece o cisalhamento acima das asperezas acontecendo apenas fricção deslizante.
- Nas geomembranas lisas, os grãos aumentam a penetração nas geomembranas criando sulcos até onde não conseguem penetrar mais e a ruptura acontece no solo com a consequente expansão para deslocamentos horizontais ente 0,8 - 1 mm, para CDC, e 8 - 46 mm, para CDM, maiores para maior tensão normal.
- No ensaio CPI as mesmas consequências dos ensaios CDC e CDM descrevendo até finalização da fase transitória (Pitanga *et al.*, 2009) para deslocamento horizontal entre 2,4 – 16,7 mm (com geotêxtil), entre 5,3 – 20 mm (com geomembranas texturizadas) e entre 2 – 2.5 mm (com geomembrana lisa).

Etapa 5:

- Para todas as interfaces o deslocamento vertical denotou uma expansão com maior valor no pico, sendo maior em ensaio CDM que em ensaio CDC. Em ensaios de CDC, para interfaces com geotêxteis, a maior gramatura atinge-se o τ_{pico} para maior deslocamento horizontal e compressão vertical que para o de menor gramatura. Para os dois geotêxteis, após o τ_{pico} acontece uma queda na resistência cisalhante pouco acentuada até a $\tau_{\text{pós-pico}}$ estabilizada da resistência cisalhante e do deslocamento vertical, maior para o geotêxtil de maior gramatura. Em ensaios CDM $\tau_{\text{pico}} \approx \tau_{\text{pós-pico}}$ com pequena queda da resistência cisalhante para maior gramatura, contrário ao que aconteceu no ensaio CDC. Cabe salientar que, para estas interfaces, o deslocamento máximo atingido foi insuficiente para ter certeza de que se atingiu a ruptura na interface 2. Em ensaios de CPI a fase de deslizamento não estabilizado (Pitanga *et al.*, 2009) aconteceu para um deslocamento relativo da caixa menor na maior tensão.

- Para interfaces com geomembranas, nos ensaios de CDC após atingir o τ_{pico} aconteceu uma queda menos acentuada até a $\tau_{\text{pós-pico}}$ da resistência cisalhante e do deslocamento vertical quando a textura é mais espaçada, sendo esta queda ainda menor no ensaio CDM. A τ_{pico} foi obtida para maior deslocamento horizontal em geomembranas texturizadas de maior altura, devido ao maior intertravamento do solo entre as texturas da geomembrana, bem como pela alta resistência antes da liberação do intertravamento. Em interfaces com geomembrana lisa para ensaios CDC e CDM, observou-se $\tau_{\text{pico}} \approx \tau_{\text{pós-pico}}$ e o deslocamento horizontal na ruptura foi maior para ensaio CDM, sendo maiores para maior tensão normal. Em ensaios de CPI a fase de deslizamento não estabilizado (Pitanga *et al.*, 2009) com $\tau_{\text{pico}} = \tau_{\text{pós-pico}}$ aconteceu para deslocamento relativo da caixa variando com a textura, sendo em alguns casos menor e as vezes maior para maior tensão. Em geomembrana lisa, o deslocamento na ruptura foi muito próximo a 2 mm para as três tensões normais e nas interfaces com geotêxtil uma análise mais aprofundada foi feita.

Já descritas as etapas e suas particularidades para cada ensaio, um estudo das interfaces com geotêxtil foi realizado, comparando os resultados deste trabalho com os resultados dos ensaios de Lima Júnior (2000) e Mello (2001) realizados com materiais mostrados na Tabela 4.5, para estabelecer a influência do tamanho do grão de areia e do efeito da tração no geotêxtil durante a realização do ensaio.

Tabela 4.5. Geotêxteis empregados nas interfaces em comparação.

Referências	Areia	D ₅₀ (mm)	Geotêxtil não tecido	Massa/Área. (g/cm ²).
Lima Júnior (2000)	Grossa	0,92	PP	300
Presente Trabalho	Media	0,43	PP	300, 800
Mello (2001)	Fina	0,23	PP	300

Os autores empregaram o mesmo equipamento de ensaio de CPI com a diferença de que o geossintético utilizado nesses trabalhos foi apoiado sobre uma estrutura multicamada de lubrificação, igual à empregada neste trabalho na parede vertical dos ensaios CDM. Isto permitiu a transferência de cargas ao geossintético, gerando tração nele, o que não acontece neste trabalho pois os geossintéticos se apoiaram sobre a lixa, propiciando tração nula, que foi avaliada nos ensaios por meio de uma célula de carga solidarizada à garra metálica de

ancoragem dos geossintéticos. Considerou-se o geotêxtil neste trabalho como “Travado” e nos outros como “Livre”. O índice de densidade para a areia nos três casos foi de 57%. Primeiramente, são apresentadas, na Figura 4.11, as curvas de inclinação-deslocamento relativo desta pesquisa.

Pode-se observar que, independentemente da tensão normal e a gramatura do geotêxtil, a evolução dos deslocamentos relativos da caixa foi praticamente a mesma, com incertezas aceitáveis para este tipo de ensaio. Os deslocamentos iniciam-se a partir dos 10 graus de inclinação, mas a ruptura acontece rapidamente, com valores de deslocamentos baixíssimos (aproximadamente 2 a 3 mm de deslocamento relativo caixa-rampa).

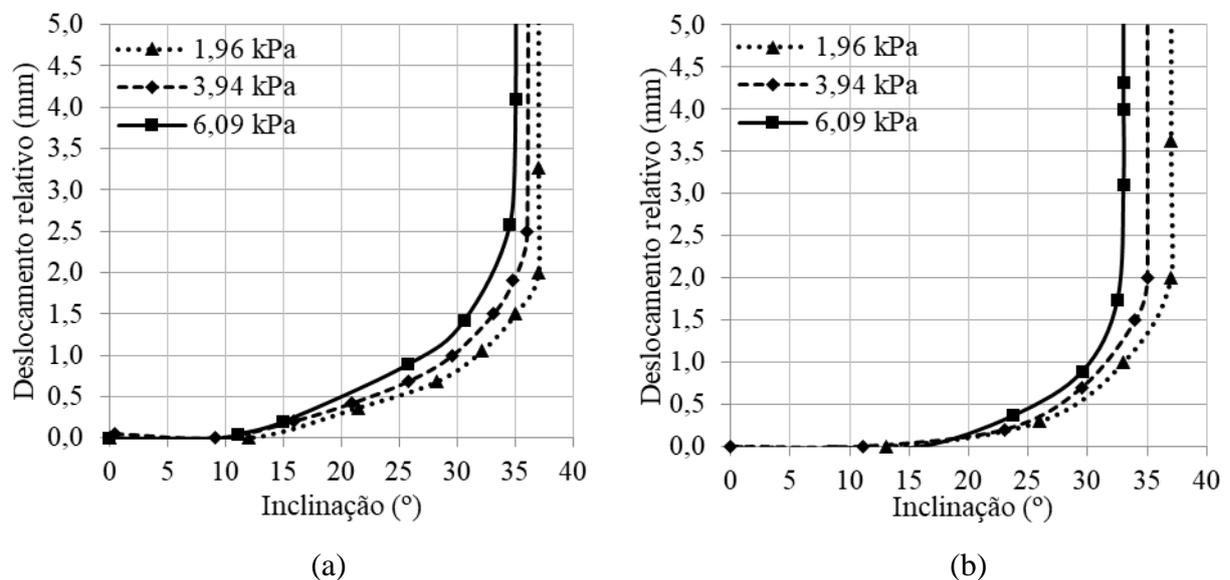


Figura 4.11. Evolução dos deslocamentos para interfaces areia/geotêxtil não tecido: (a) Interface 11 (Areia/GNT1) e (b) Interface 12 (Areia/GNT2)

Posteriormente, na Figura 4.12, foi feita a comparação com resultados de pesquisas anteriores, apenas para as curvas com maior tensão normal inicial, já que esta proporciona a maior tração no geotêxtil. Nas duas curvas à esquerda (pesquisas anteriores) observa-se a influência da lubrificação na base rígida no qual se apoia o geotêxtil, onde as leituras dos medidores de deslocamento incluem o deslocamento adicional gerado pela deformação do geotêxtil devido à tração durante a inclinação da rampa, com curvas mais suavizadas e com ângulos de inclinação inferiores na ruptura, o que se atribui ao efeito da deformação do geotêxtil.

Enquanto que, para as curvas deste trabalho, independentemente da gramatura do geotêxtil e das condições ensaiadas, os deslocamentos na ruptura foram muito pequenos, gerando uma curva com tendência bi-linear para a escala da Figura 4.12, com ruptura rápida ao longo da interface e para inclinação menor no GNT2. Cabe salientar que não foi possível determinar a influência do tamanho do grão de solo na resistência da interface para os resultados de Lima Júnior (2000) e Mello (2001) com os resultados desta pesquisa, devido às diferenças encontradas na análise anterior.

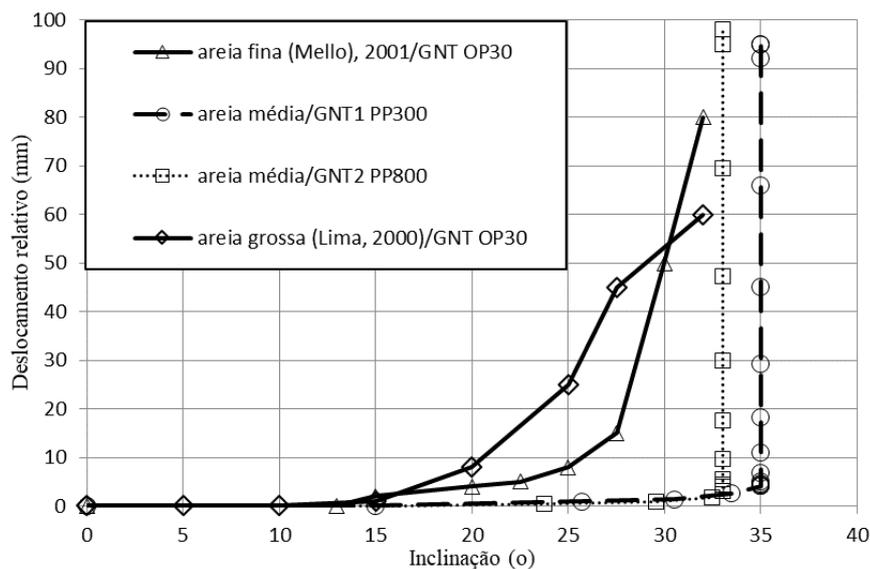


Figura 4.12. Evolução dos deslocamentos em geotêxtil Travado e Livre.

Na norma brasileira NBR ISO 12957.2 (ABNT, 2013c) e Gourc *et al.* (1996) recomendam uso da lixa. Sem embargo, nas obras não se apresentam com frequência estas fronteiras avaliadas (Travado e Livre), por isso, esta análise constitui uma evidência experimental da variabilidade dos resultados quando se adota no laboratório uma fronteira ou outra. Deve-se estar ciente destas diferenças ao se adotar com segurança o ângulo de atrito da interface, especialmente quando os valores adotados provierem de pesquisas com condições de fronteiras específicas ou de bancos de dados internacionais.

4.3.1. ENSAIOS PARA ALTAS TENSÕES NORMAIS

Todos os resultados dos ensaios de CDC e CDM são apresentados na Tabela 4.6, com envoltórias mostradas na Figura 4.13. Nesses ensaios, as envoltórias foram forçadas a passar

pela origem, obtendo-se resultados de ângulo de atrito secante e das envoltórias mais próximos quando comparados com epígrafes anteriores.

Na Figura 4.13 observam-se as interfaces areia/geotêxtil com resistência ao cisalhamento maior do que as geomembranas, conforme os resultados de Lima Júnior (2000). Os ensaios desta pesquisa mostraram bom ajuste da envoltória com uma reta para altas tensões, embora alguns ângulos secantes sejam maiores ou menores aos das envoltórias, devendo-se manter precaução no emprego desses resultados. As interfaces apresentaram ângulos de atrito muito próximos, com maior diferença ($\phi_{ep} - \phi_{epP}$) igual a 5° para a interface do geotêxtil e com maior gramatura (12 Areia/GNT2) no ensaio de CDC, mostrando $\phi_{ep} = \phi_{epP}$ para essa mesma interface em ensaio de CDM.

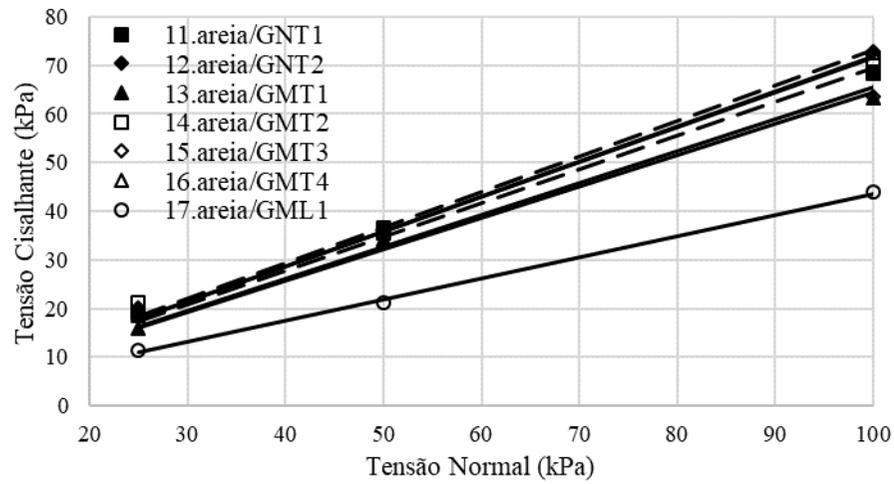
Na Figura 4.13 também são mostradas as envoltórias das interfaces areia/geomembrana texturizada, que apresentam bom ajuste à reta, sendo o melhor resultado apresentado para os ensaios de CDM. Os ângulos de atrito para todas as geomembranas texturizadas ficaram entre 28° e 36° . A diferença entre os ângulos de atrito da GML1 e GMT1 foi menor para os ensaios de CDM, embora as diferenças dos $\phi_{ep} - \phi_{epP}$ para todas as interfaces sejam menores, sob altas tensões, para os ensaios de CMD.

A interface areia/geomembrana lisa teve só 1° (um grau) de diferença no ângulo de atrito secante de pico e de pós-pico nos dois tipos de ensaio, podendo considerar essa diferença ao ser superior ao desvio padrão admissível, segundo a Tabela 4.1. Ao ter mais solo interagindo com a geomembrana no ensaio de CDM, são obtidos ângulos de atrito de pico e de pós-pico maiores (aproximadamente em 4°), mostrando sulcos na geomembrana quando finalizado o ensaio.

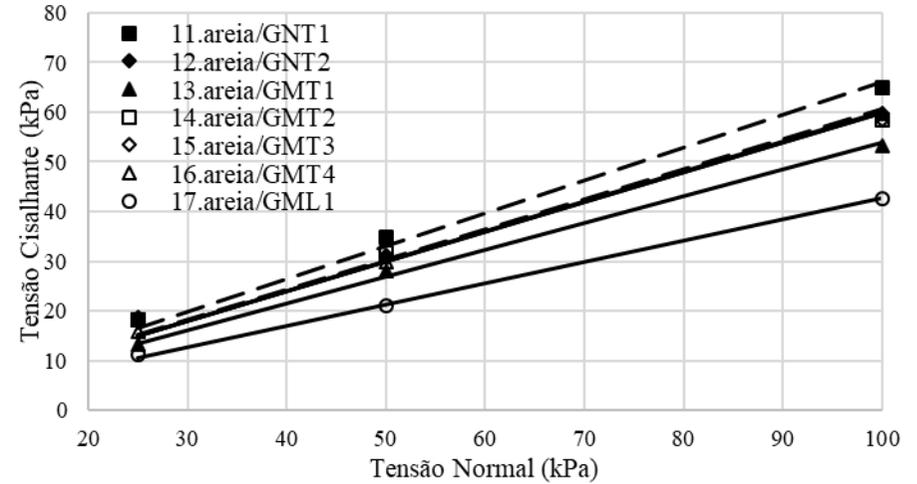
Tabela 4.6. Resultados de ângulos de atrito (°) para interfaces da 11 até 17.

Interfaces		Referencia	CDC				CDM				CPI			
Materiais	Nº.		25 kPa	50 kPa	100 kPa	Envoltória	25 kPa	50 kPa	100 kPa	Envoltória	A < 1,96 (kPa)	B < 3,94 (kPa)	C < 6,09 (kPa)	Envoltória
Solo/Geotêxtil	11 areia/GNT1	Pico	37	36	34	35	35	33	34	34	37	36	35	36
		Pós-pico	36	35	33	33	34	32	33	33	37	36	35	36
	12 areia/GNT2	Pico	39	36	36	36	36	33	34	34	37	35	33	34
		Pós-pico	37	31	31	31	36	32	34	34	37	35	33	34
Solo/ Geomembrana	13 areia/GMT1	Pico	33	34	32	33	31	30	31	31	32	31	30	31
		Pós-pico	28	29	28	28	29	28	30	30	32	31	30	31
	14 areia/GMT2	Pico	40	35	35	36	32	32	33	33	31	31	31	31
		Pós-pico	36	32	30	33	31	31	33	32	31	31	31	31
	15 areia/GMT3	Pico	38	35	32	33	34	30	33	33	32	32	32	31
		Pós-pico	36	32	30	31	30	30	33	32	32	32	32	31
	16 areia/GMT4	Pico	36	34	36	35	34	33	32	33	32	31	31	31
		Pós-pico	32	31	31	31	30	30	32	31	32	31	31	31
17 areia/GML1	Pico	24	23	24	24	27	27	28	28	24	24	24	24	
	Pós-pico	24	23	23	23	25	26	28	27	24	24	24	24	

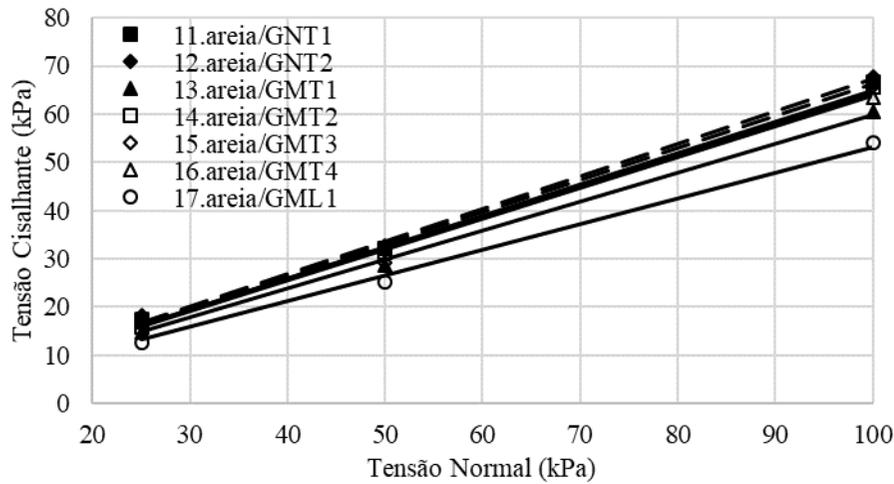
A seguir, identificam-se os geotêxteis pela gramatura e as geomembranas pela altura de aspereza fornecida pelo fabricante: GNT1 (300), GNT2 (800), GMT1(0,32), GMT2(0,52), GMT3(0,63), GMT4(0,52), GML1(0,00).



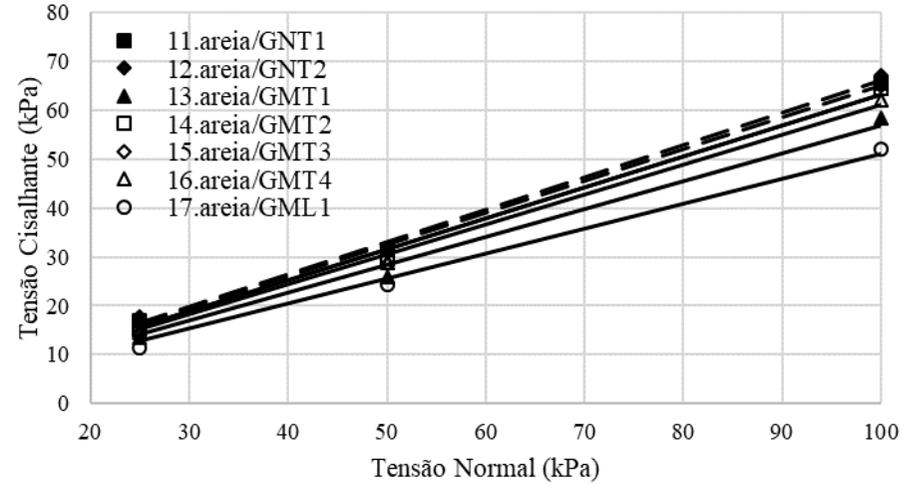
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.13. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM sob altas tensões para interfaces da 11 – 17: (a) Envoltórias do ensaio de CDC pico, (b) Envoltórias do ensaio de CDC pós-pico, (c) Envoltórias do ensaio de CDM pico e (d) Envoltórias do ensaio de CDM pós-pico.

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores limites dos ângulos de atrito secantes das interfaces e as eficiências. Nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 mostra-se com linha tracejada o ângulo de atrito da envoltória da areia para análises de eficiência das interfaces solo/geossintético em relação à areia (100%). As envoltórias dos ensaios de CDC e CDM da areia foram muito próximas, com ângulos de atrito das envoltórias muito próximos para os dois tipos de ensaios (CDC e CDM) e iguais quando arredondados, o que também foi relatado por Viana (2007) para um solo similar.

Tabela 4.7. Ângulos de atrito secante e eficiência das interfaces 11-17.

Interfaces	Ângulo de atrito secante (°)				Eficiência (%)			
	Pico		Pós-pico		Pico		Pós-pico	
	CDC	CDM	CDC	CDM	CDC	CDM	CDC	CDM
Areia	39	39	36	36	100	100	100	100
<u>Areia</u> Geotêxtil	35-36	34	31-33	33-34	90-92	87	86-92	92-94
<u>Areia</u> Geomembrana Texturizada	33-36	31-33	28-33	30-32	85-92	79-85	78-92	83-89
<u>Areia</u> Geomembrana Lisa	24	28	23	27	62	72	64	75

Em interfaces com materiais geossintéticos rugosos (geotêxtil e geomembrana), os valores do ângulo de atrito das envoltórias pico foram maiores para os ensaios de CDC do que para os ensaios de CDM. Para resultados de pós-pico ocorreu o contrário: ângulos de atrito das envoltórias de pós-pico por meio de ensaios de CDM maiores ou iguais aos obtidos com ensaios de CDC. Junto ao menor ângulo de referência da areia resulta em maiores eficiências para essas interfaces com resultados pós-pico, e ainda maiores em interfaces com geotêxtil do que com geomembranas texturizadas. No entanto, a interface com geomembrana lisa mostrou ângulos de atrito e eficiências maiores para o ensaio de CDM.

Quanto aos ângulos de atrito secante, para os ensaios de CDC, estes foram mais eficientes do que os obtidos para menores tensões normais, como observado nas Figuras 4.14 e 4.15, com exceção da GMT1, o que está relacionado com a forma das asperezas e será estudado em próximos itens.

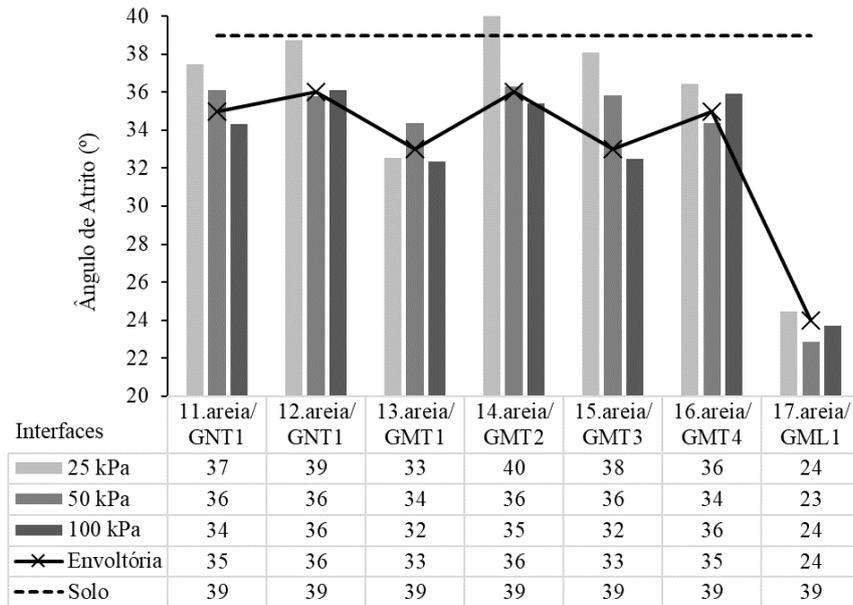


Figura 4.14. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDC em interfaces de solo e geossintético.

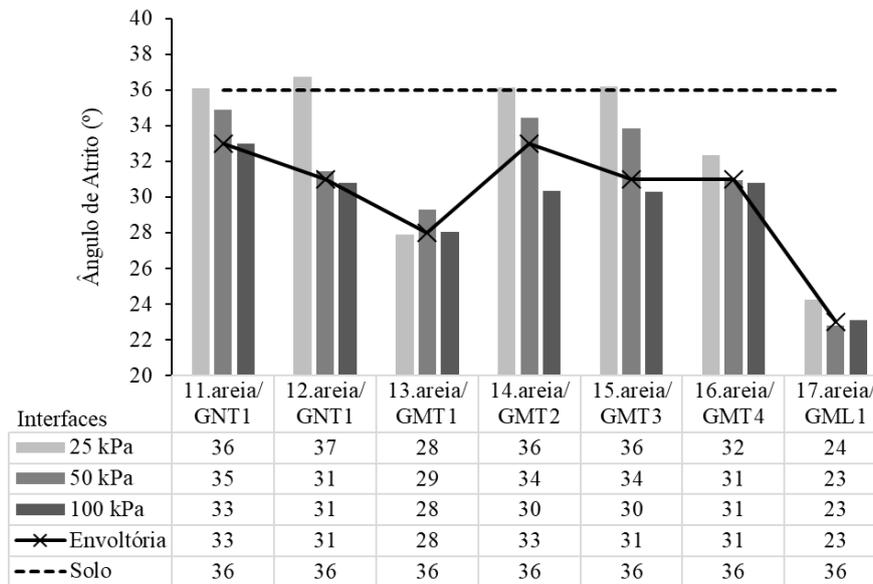


Figura 4.15. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDC em interfaces de solo e geossintético.

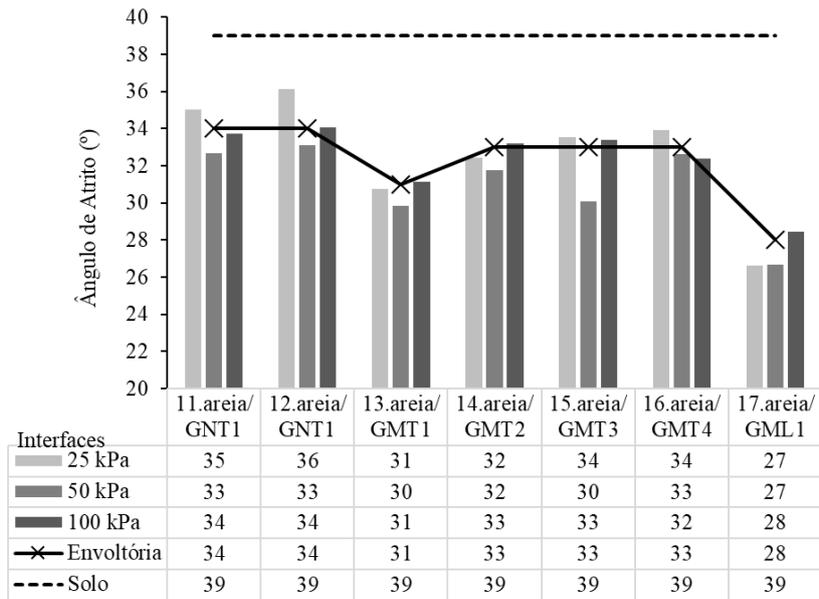


Figura 4.16. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CDM em interfaces de solo e geossintético.

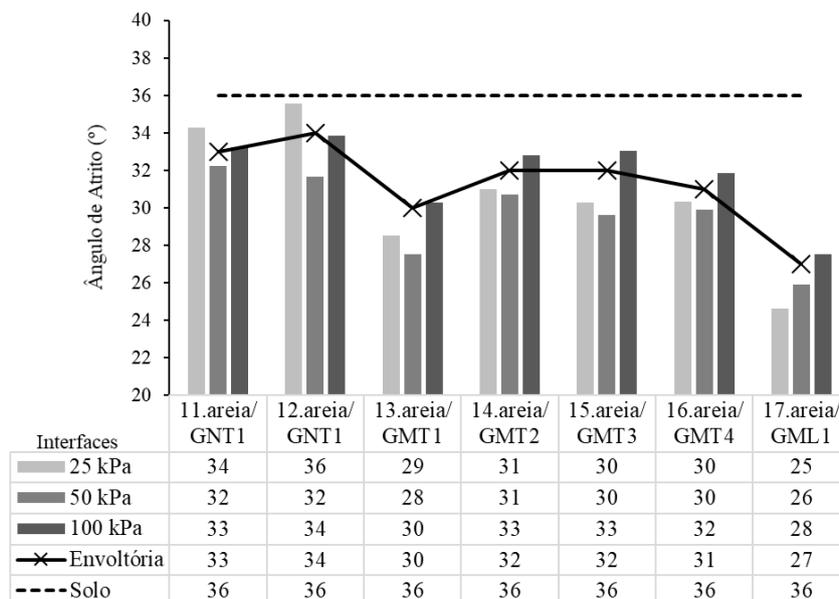


Figura 4.17. Ângulos de atrito de pós-pico dos ensaios de CDM em interfaces de solo e geossintético.

4.3.2. ENSAIOS PARA BAIXAS TENSÕES NORMAIS

A Tabela 4.6 mostra todos os resultados dos ensaios CPI, com envoltórias mostradas na Figura 4.18 para baixas tensões. Nesses ensaios, as envoltórias foram forçadas a passar pela origem. Pode também ser observado nitidamente como as interfaces com geotêxtil, representadas com

linhas descontínuas, apresentam envoltórias com inclinação maior em relação às geomembranas. A envoltória com geomembrana lisa mostra uma inclinação mais notavelmente menor neste ensaio. Todos os ensaios apresentaram valores pico e pós-pico iguais.

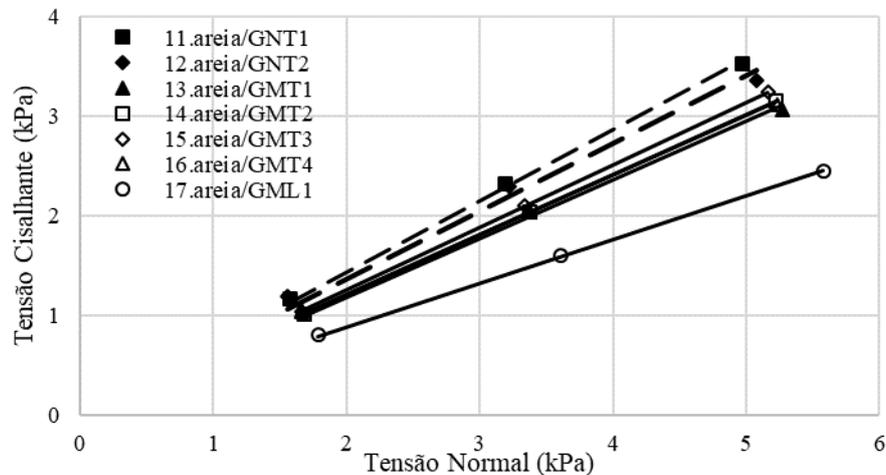


Figura 4.18. Envoltórias dos ensaios CPI sob baixas tensões para interfaces 11–17.

Os valores dos ângulos de atrito secante nos ensaios CPI em relação aos ensaios CDC e CDM nas interfaces com geotêxtil foram próximos, com valores menores para as interfaces com geomembranas texturizadas e para a geomembrana lisa – semelhantes ao de CDC. Na Figura 4.19 os geotêxteis mostraram serem mais eficientes que as geomembranas, com maior eficiência para menor tensão normal. Todas as geomembranas texturizadas mostraram a mesma eficiência, enquanto a eficiência para a geomembrana lisa foi semelhante à obtida para altas tensões com igual valor, independentemente da tensão normal.

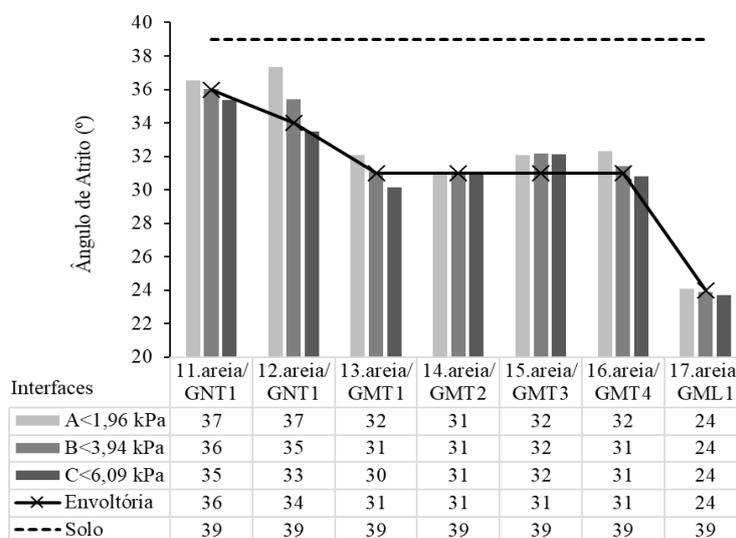


Figura 4.19. Ângulos de atrito de pico dos ensaios de CPI em interfaces de solo e geossintético.

4.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM INTERFACES CONCRETO EM ESTADO FRESCO/GEOSSINTÉTICO

Como apresentado no Capítulo 3, foram ensaiadas as cinco geomembranas (GMT1, GMT2, GMT3, GMT4 e GML1) e os dois tipos de geotêxteis (GNT1 e GNT2) com concreto em estado fresco, para cada uma das três consistências. Foram adotados valores de abatimento (“*Slump*”) de 40 mm, 60 mm e 80 mm, preparando as amostras de concreto com betoneira de 45 L. Após avaliação da melhor maneira de preparar, decidiu-se pela opção de preparar com antecedência todo o volume para o preenchimento da caixa até uma altura de 50 mm de uma vez, isto para evitar realizar o ensaio após o início do tempo de pega. Após a preparação da amostra, era então verificada a consistência por meio de ensaios de cone, considerando a amostra aceitável para um desvio máximo da consistência requerida de ± 10 mm. Posteriormente o concreto foi colocado na caixa sem compactação, apenas nivelamento até altura pré-fixada.

Cabe salientar que inicialmente tentou-se reproduzir o mesmo processo de compactação realizado por Viana (2007), isto gerou uma cravação das britas do agregado graúdo nas amostras de geossintético, o que levou à não ruptura das interfaces para a máxima inclinação possível da rampa (55°, o fato de não empregar os blocos de concreto como tensão normal permitiu empregar outra talha de menor capacidade, que possibilitou elevar a rampa 10° a mais em relação aos ensaios de itens anteriores). O fato de os geossintéticos terem sido apoiados sobre a lixa (lixa colada à base rígida com Cascola Tradicional em toda sua área) e não sobre um sistema lubrificado, eliminou a deformação por tração dos geossintéticos encontrada por Viana (2007).

Estes ensaios iniciais que foram descartados permitiram entender melhor o que pode ter acontecido nos ensaios de Viana (2007) quanto ao atrito. O autor obteve um acréscimo na inclinação para a ruptura com o aumento do abatimento a 60 mm, o que resultou no aumento da cravação da brita na geomembrana, ao estar envolvida em uma argamassa menos densa com o aumento do abatimento. Para 80 mm de abatimento, obteve-se a ruptura para uma inclinação intermediária em relação às anteriores, associada a uma argamassa menos densa ainda (concreto mais trabalhável), que propicia o início da segregação do material graúdo na argamassa com o levantamento da rampa.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados de ângulos de atrito para todas as interfaces avaliadas, com tensão normal para inclinação zero graus conforme Tabela 3.6. Por limitações do equipamento, só foi possível levantar a rampa até 55°, limite que foi estabelecido para considerar que a interface não rompeu e que seu ângulo de atrito de interface não conseguiu ser determinado. Encontrou-se a ruptura apenas para as interfaces com geotêxtil e com geomembrana lisa, embora todas as possibilidades de interface da

Tabela 3.7 tenham sido ensaiadas.

Tabela 4.8. Resultados de ângulos de atrito secante (°) para interfaces da 18 até 38.

Interface		Referencia	CPI
Materiais	Nº. descrição (<i>Slump</i>)		Tensão variável A < 1.26 kPa
Concreto/ Geotêxtil	18. concreto/GNT1 (40 mm)	Pico	49
	19. concreto/GNT1 (60 mm)	Pico	48
	20. concreto/GNT1 (80 mm)	Pico	47
	21. concreto/GNT2 (40 mm)	Pico	44
	22. concreto/GNT1 (60 mm)	Pico	43
	23. concreto/GNT2 (80 mm)	Pico	42
Concreto/ Geomembrana	28. concreto/GML1 (40 mm)	Pico	27
	33. concreto/GML1 (60 mm)	Pico	20
	38. concreto/GML1 (80 mm)	Pico	17
	24-27 29-32 34-37 (Ver Tabela 3.7)	Pico	Indeterminado e superior a 55°

A seguir, identificam-se os geotêxteis pela gramatura e as geomembranas pela altura de aspereza fornecida pelo fabricante: GNT1 (300), GNT2 (800) e GML1(0,00).

A Figura 4.20 mostra os deslocamentos da caixa de confinamento *versus* a inclinação da rampa para as três consistências, onde o eixo do deslocamento foi ajustado para mostrar 20 mm como máximo, almejando-se facilitar a visualização, uma vez que, a partir de 20 mm, o valor do ângulo de inclinação já permanecia constante até o limite de deslocamento medido (100 mm).

Pode ser visto que, para cada tipo de interface, o aumento da consistência não influenciou significativamente no valor do deslocamento no momento antes da ruptura, nem no ângulo de

atrito para cada interface com geotêxtil. Já com a geomembrana uma influência no valor de ângulo de atrito pode ser notada na Figura 4.20 e na Figura 4.21, atingindo a ruptura para um valor de deslocamento de caixa pequeno, mostrando-se ainda menor com a perda da consistência ao tornar a ruptura menos dúctil. Ademais, observa-se que o deslocamento da caixa de confinamento para todas as interfaces que romperam teve início a partir dos 5° de inclinação da rampa e para 15° as interfaces que não romperam (geomembranas texturizadas).

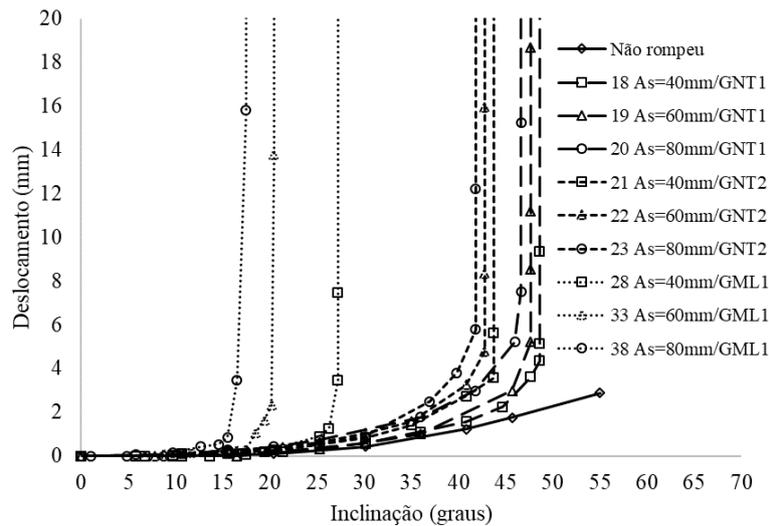


Figura 4.20. Ensaios de CPI em interfaces de concreto em estado fresco e geossintético.

A perda de atrito com o acréscimo do abatimento não é proporcionalmente linear para a interface com geomembrana lisa, assim como para as interfaces com geotêxtil. Na Tabela 4.8 e na Figura 4.21 observa-se como, para o primeiro acréscimo de 20 mm de abatimento, o ângulo de atrito caiu 7°. Para o mesmo incremento posterior, caiu apenas 3°. Esses resultados diferem dos obtidos por Viana (2007), que obteve um ganho em atrito de 60 mm.

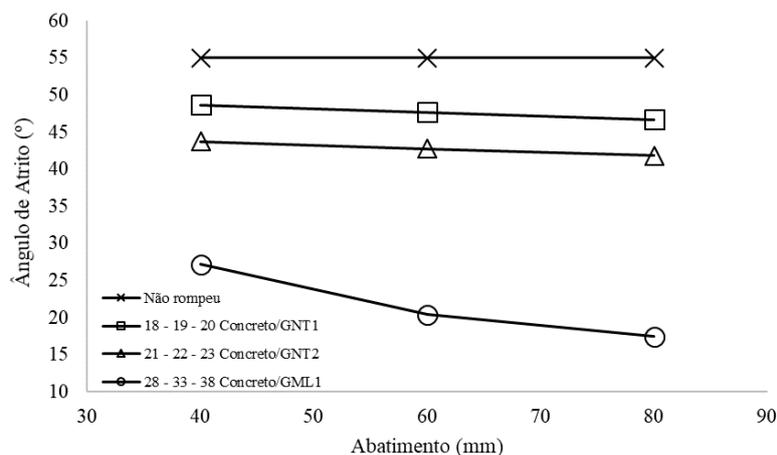


Figura 4.21. Ângulos de atrito pico dos ensaios de CPI em interfaces de concreto em estado fresco e geossintético para cada abatimento.

A gramatura do geotêxtil influenciou no resultado do ângulo de atrito com uma diferença de 5° para os três abatimentos, sendo mais resistente o geotêxtil com menor gramatura, pois sua estrutura mais aberta permitiu uma melhor penetração e interação da argamassa nos fios, como se observa na Figura 4.22.

As interfaces com geotêxtil mostraram-se mais propensas a atingir ângulos de inclinação maiores, sobretudo quando comparadas com a inclinação de ruptura encontrada para a geomembrana lisa, considerando os três abatimentos. Observa-se também na Figura 4.22 que o concreto esteve em contato com a geomembrana em toda a área da amostra, o que não aconteceu com os geotêxteis não tecidos, como no GNT2, com a estrutura mais fechada dos fios.



Figura 4.22. Geossintéticos após ruptura para os ensaios com abatimento de 80 mm.

Contudo e segundo os estudos de Fleming *et al.* (2006); Viana (2007); Abramento *et al.* (2010) e o presente trabalho, pode ser generalizada a conceitualização de Fleming *et al.* (2006) sobre as interfaces de concreto fresco e geotêxtil não tecido, como apresentado na Figura 4.23, onde δ_c é o ângulo de atrito do concreto em estado fresco e ϕ_c é o ângulo de atrito da interface.

Observou-se durante os ensaios que o mecanismo de falha, no momento da colocação do concreto, muda de deslizamento com sulcado e reorientação superficial dos fios com tensões normais menores para deslizamento com sulcado até o núcleo do geotêxtil, com aumento da tensão. O tipo de compactação empregada influenciou significativamente; uma compactação mediante impactos pode levar a resistências de interfaces elevadas, além do aumento da

penetração e travamento no geotêxtil dos agregados antes do início da pega. Assim, quanto maior o número de camadas de colocação do concreto, maior será a penetração e travamento.

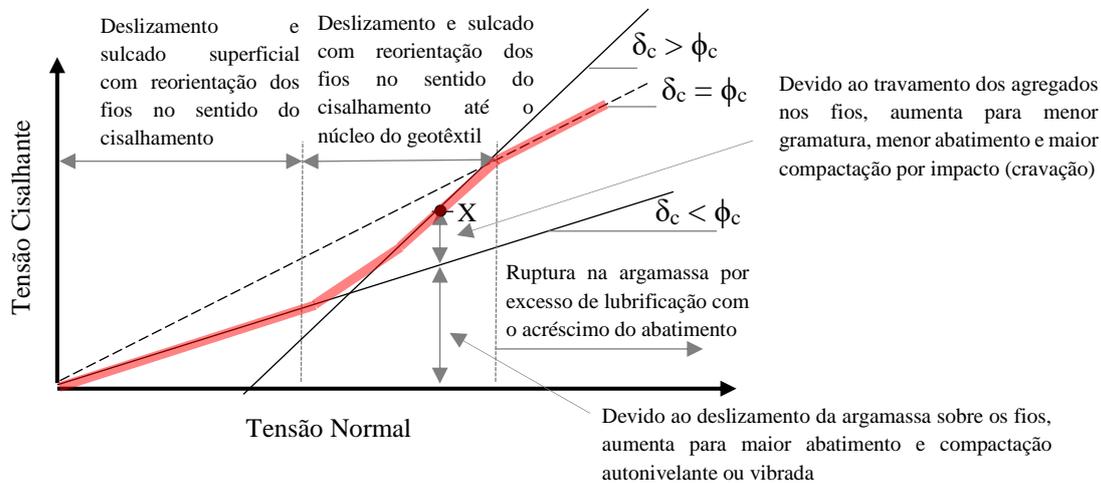


Figura 4.23. Conceitualização da envoltória de interface de concreto e geotêxtil não tecido agulhado.

Para o ponto X (Figura 4.23), a força de cisalhamento da interface mobilizada depende do aumento da tensão normal, da energia de compactação, do abatimento do concreto, da gramatura do geotêxtil, da morfologia dos agregados e de outros fatores, como temperatura, clima, etc. Esses fatores merecem um estudo detalhado, já que este trabalho não se centra nessa abordagem.

Quanto à interface com geomembrana lisa, o mecanismo de falha foi claramente por deslizamento, devido à baixa tensão empregada e à contribuição lubrificante que aumenta com a água na argamassa para maior abatimento. As geomembranas texturizadas apresentaram uma resistência superior àquela que podia ser medida pelas limitações de elevação da rampa. Tal dado induz a pensar que, quanto maior for a altura das asperezas, maior será a resistência de interface, considerando a contribuição da coesão e a densidade do concreto fresco.

4.5. INFLUÊNCIA DA MICROTOPOGRAFIA DAS GEOMEMBRANAS NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS INTERFACES

Como visto na revisão bibliográfica, os estudos mais recentes em interfaces têm aprofundado na influência da microtopografia das geomembranas na resistência. Nesta pesquisa, trabalhou-

se com um microscópio ótico confocal, segundo a metodologia definida e detalhada no capítulo 3. O fato de não ter referências ao emprego desse microscópio específico em trabalhos de geotecnia, foi necessário um aprendizado complementar, que levou ao estudo e adaptação os conceitos da engenharia mecânica quanto à rugosidade.

Para tanto, foi feita uma análise dos resultados obtidos para cada geomembrana, visando determinar possíveis divergências entre os resultados medidos pelo método do perfil de rugosidade (2D) e pelo método da superfície (3D). Por fim, foram realizadas análises para cada parâmetro obtido das cinco faces (superiores e inferiores), quando também foram determinadas as diferenças na microtopografia. Cabe salientar que os rolos enviados pelos fabricantes foram enrolados em sentido contrário aos que foram enviados para as obras, sendo considerada nesta pesquisa a face superior o que seria a face inferior na obra.

4.5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MICROTOPOGRÁFICA 2D

Os resultados mostrados na Tabela 4.9 e na Figura 4.24 apresentam os valores dos parâmetros determinados para as cinco geomembranas de forma comparativa. Na Figura 4.24 os resultados correspondem ao sentido Y ou ao longo do comprimento, que foi ressaltado na Tabela 4.9 com números em negrito, a linha contínua representa os valores para a face inferior do rolo e a linha de pontos representa os valores da face superior.

Observa-se, na Figura 4.24, que a microtopografia da face inferior e superior apresentam diferenças significativas nas GMT2 e GMT3, o que não era esperado ocorrer apenas para estas duas, pois as geomembranas texturizadas pelas duas faces são fabricadas com textura mais alta em uma das faces. As asperezas para a matriz plana foram as de maior diferença entre uma e outra face, o que foi resultado do emprego durante a fabricação de calandras de diferentes desenhos segundo o fabricante. Os valores de Ra, Rc, Rz e Rt, nas GML1, GMT1 e GMT4 são muito próximos ao comparar as duas faces, o que exclui a possibilidade de relacionar a concentração, tipo e altura de textura com a face da geomembrana. Para todas as geomembranas e nas duas faces a $R_t \approx 2 \cdot R_z$, o que implica a presença de picos com altura total do dobro da altura máxima. Por sua vez, pode ser notado um aumento da relação Rc/Ra de aproximadamente 3, para a GMT3 até aproximadamente 9 para a GML1, ou seja, esta relação resultou maior para menor altura de aspereza.

Tabela 4.9. Parâmetros de amplitude de rugosidade a partir de perfis de rugosidade.

Geomembrana		GML1i	GML1s	GMT1i	GMT1s	GMT2i	GMT2s	GMT3i	GMT3s	GMT4i	GMT4s
Parâmetro											
<i>Ra</i> (μm)	x	3,309	3,295	26,611	47,168	64,081	47,328	103,603	88,135	50,639	59,278
	y	3,431	3,256	34,193	46,132	71,664	44,62	138,368	80,854	57,323	56,944
<i>Rc</i> (μm)	x	27,068	25,335	127,301	184,627	218,879	186,114	408,037	346,565	194,881	234,188
	y	26,047	29,269	178,431	214,265	293,896	180,777	478,12	239,735	247,623	243,843
<i>Rz</i> (μm)	x	53,184	61,106	139,107	178,001	284,386	267,976	532,099	425,618	233,251	248,419
	y	46,828	55,188	137,624	144,040	274,121	232,535	549,492	340,089	236,841	235,134
<i>Rt</i> (μm)	x	83,99	89,210	231,922	349,545	550,864	376,659	1126,235	600,166	473,027	447,62
	y	69,457	89,694	267,376	339,096	643,310	382,538	1088,185	768,243	488,382	455,756
<i>Rsk</i>	x	0,762	1,182	0,942	0,608	0,832	0,579	1,344	1,438	0,726	0,691
	y	1,117	1,407	1,218	1,018	1,183	1,099	1,150	1,799	1,298	1,363
<i>Rku</i>	x	12,827	17,219	4,105	3,173	4,757	3,656	6,208	12,795	3,836	3,407
	y	10,050	17,584	4,696	3,873	4,809	4,299	4,567	10,112	5,051	5,084

A seguir, identificam-se as geomembranas pela altura de aspereza fornecida pelo fabricante em relação aos nomes adotados para a caracterização microtopográfica: GML1(0,00) – GML1i, GMT1(0,32) – GMT1i, GMT2(0,67) – GMT2i, GMT3(0,78) – GMT3i, GMT4(0,52) – GMT4i e GML1(0,00) - GML1s, GMT1(0,32) - GMT1s, GMT2(0,52) – GMT2s, GMT3(0,63) – GMT3s, GMT4(0,52) – GMT4s.

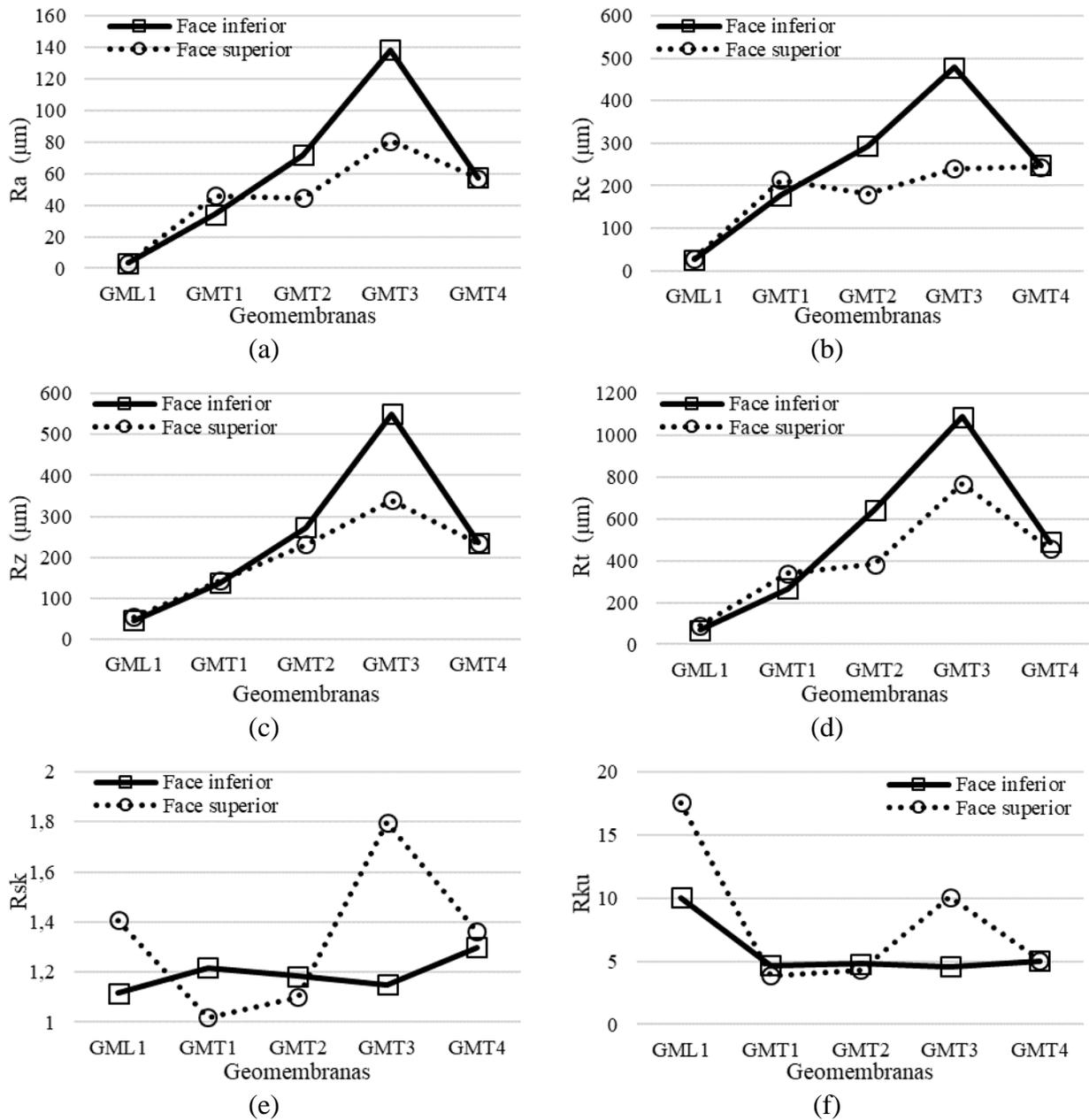


Figura 4.24. Comparativa dos parâmetros de rugosidade (2D) para as cinco geomembranas: (a) Desvio aritmético médio do perfil, (b) Altura média dos elementos do perfil, (c) Altura máxima do perfil, (d) Altura total do perfil, (e) Fator de assimetria no perfil avaliado e (f) Fator de achatamento do perfil avaliado.

Todas as geomembranas apresentam distribuição de probabilidade das Z_t (ver Figura 2.22) assimétrica, com enviesado para abaixo em relação à linha média, independentemente da face avaliada. As faces inferiores mostram resultados de R_{sk} muito próximos a 1.2.

Quanto ao valor de Rku , para a GML1 na face superior, este se associa aos danos em forma de riscos na superfície, propiciando uma curva de densidade de probabilidade das Zt_i (ver Figura 2.22) menos achatada dentre todas (pelos vales), manifestando-se útil este parâmetro em estudos de dano por abrasão na superfície de geomembranas lisas.

A maior assimetria foi obtida para a face inferior GMT3 como esperado, devido à macro rugosidade (asperezas cônicas individuais), como pode ser observado na Figura 4.25, que apresenta a forma da distribuição de alturas em comparação com o solo e com Rc para as faces superiores.

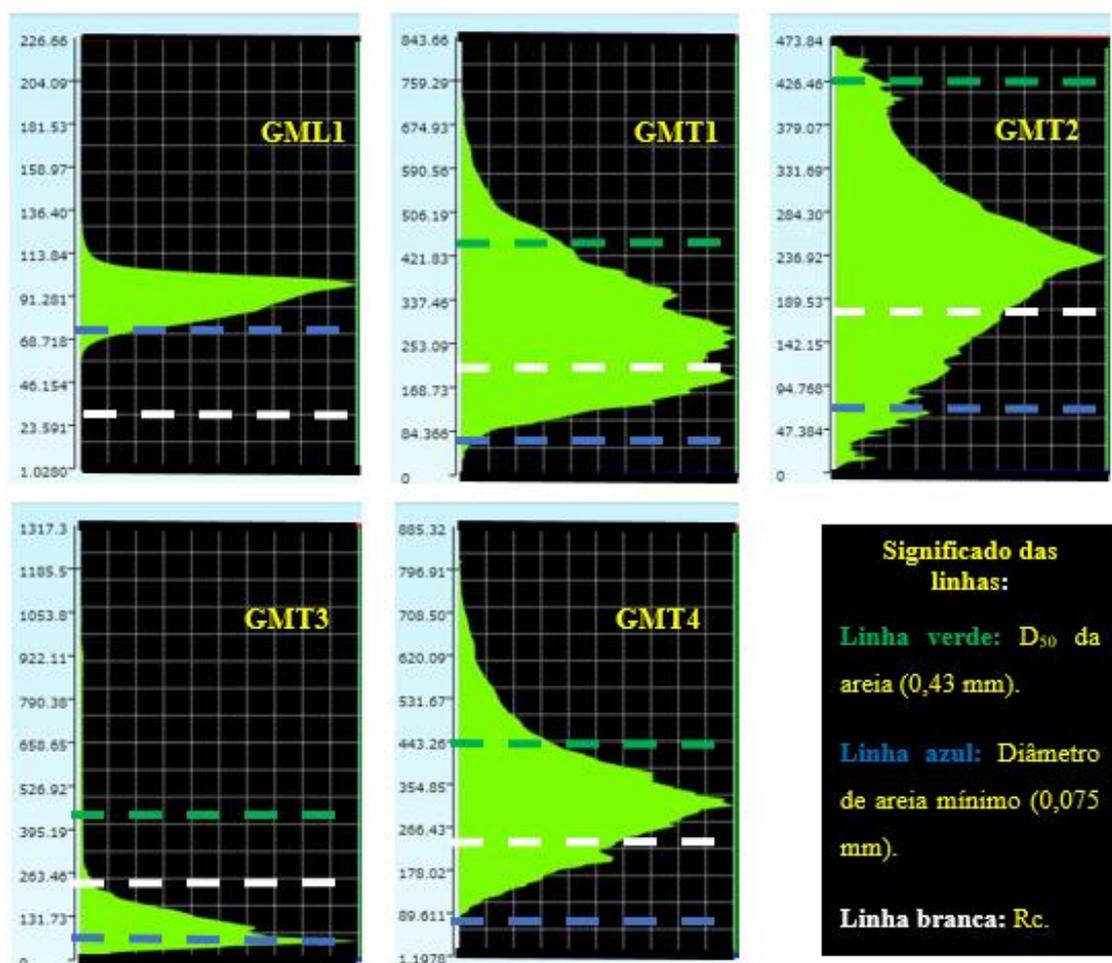


Figura 4.25. Distribuição da amplitude das alturas com referência do tamanho dos grãos de areia e o Rc .

Foi considerado o parâmetro Rc como o que melhor caracteriza a altura das asperezas, pois é resultado da média das Zt_i e permite considerar a macro e microtextura. Os parâmetros Rt e Rz sobrestimam o valor da altura ao ser um único valor para o pico de maior altura total no

comprimento de avaliação e um único valor para um pico de altura máxima no comprimento de amostragem respectivamente. O parâmetro Ra, compara as macro e micro asperezas por se tratar do desvio aritmético médio do perfil avaliado no comprimento de amostragem. Na Tabela 2.1, apresentada anteriormente, detalham-se as vantagens e desvantagens do emprego de um ou outro parâmetro.

4.5.2. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MICROTOPOGRÁFICA 3D

Segundo a mesma sequência do item anterior, apresentam-se na Tabela 4.10 os resultados de cada um dos parâmetros obtidos. A Figura 4.26 mostra as imagens laser das superfícies levantadas com lente de 10x de capacidade de ampliação, com amostras com largura e comprimento igual a aproximadamente 5 mm (GML1) ou 20 mm (GMT1, GMT2, GMT3 e GMT4). Por sua vez, a comparativa dos resultados para as cinco geomembranas é apresentada nas Figuras 4.27 a 4.29.

Tabela 4.10. Parâmetros de rugosidade a partir da superfície.

Parâmetro		Geomembrana									
		GML1i	GML1s	GMT1i	GMT1s	GMT2i	GMT2s	GMT3i	GMT3s	GMT4i	GMT4s
Altura, picos e vales	$Sz (\mu m)$	240,962	226,904	473,181	753,576	1096,150	497,834	2123,606	1292,303	868,688	864,718
	$Sp (\mu m)$	140,113	135,437	288,036	510,739	779,181	277,423	1620,721	1148,360	628,581	533,382
	$Sv (\mu m)$	100,849	91,467	185,145	242,837	316,969	220,411	502,885	143,943	240,107	331,336
Altura, amplitude média no sentido da altura	$Sa (\mu m)$	3,452	4,315	37,452	56,779	78,517	50,863	113,420	69,021	60,585	64,984
	$Sq (\mu m)$	4,985	6,257	50,419	72,825	108,645	66,111	218,006	134,685	80,982	87,936
Altura, média característica na direção da altura	Ssk	1,035	1,169	1,353	1,012	1,773	0,945	3,649	3,813	1,349	1,495
	Sku	14,28	13,163	5,225	3,924	8,377	3,915	17,765	19,219	5,542	5,825
Volume	$Vvc \left(\frac{\mu m^3}{\mu m^2}\right)$	5,267	6,158	68,449	104,766	143,897	96,654	144,025	69,594	112,507	122,992
	$Vmc \left(\frac{\mu m^3}{\mu m^2}\right)$	3,425	4,332	37,099	59,339	75,379	52,560	81,939	42,199	58,419	60,606
	$Vvv \left(\frac{\mu m^3}{\mu m^2}\right)$	0,499	0,683	2,977	4,337	6,505	4,622	9,949	6,134	5,238	4,992
	$Vmp \left(\frac{\mu m^3}{\mu m^2}\right)$	0,444	0,556	4,822	5,374	10,295	4,636	36,255	25,554	7,016	8,251
Horizontais	$Sal (\mu m)$	17,008	7,5	1021,778	1169,515	713,328	749,521	827,789	808,788	903,589	814,141
	$Str (\mu m)$	0,889	0,648	0,067	0,286	0,756	0,778	0,906	0,838	0,791	0,641
Especificações	“Cut off” (mm)	2,5	2,5	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Lente	10x	10x	10x	10x	10x	10x	10x	10x	10x	10x

A seguir, identificam-se as geomembranas pela altura de aspereza fornecida pelo fabricante em relação aos nomes adotados para a caracterização microtopográfica: GML1(0,00) – GML1i, GMT1(0,32) – GMT1i, GMT2(0,67) – GMT2i, GMT3(0,78) – GMT3i, GMT4(0,52) – GMT4i e GML1(0,00) - GML1s, GMT1(0,32) - GMT1s, GMT2(0,52) – GMT2s, GMT3(0,63) – GMT3s, GMT4(0,52) – GMT4s.

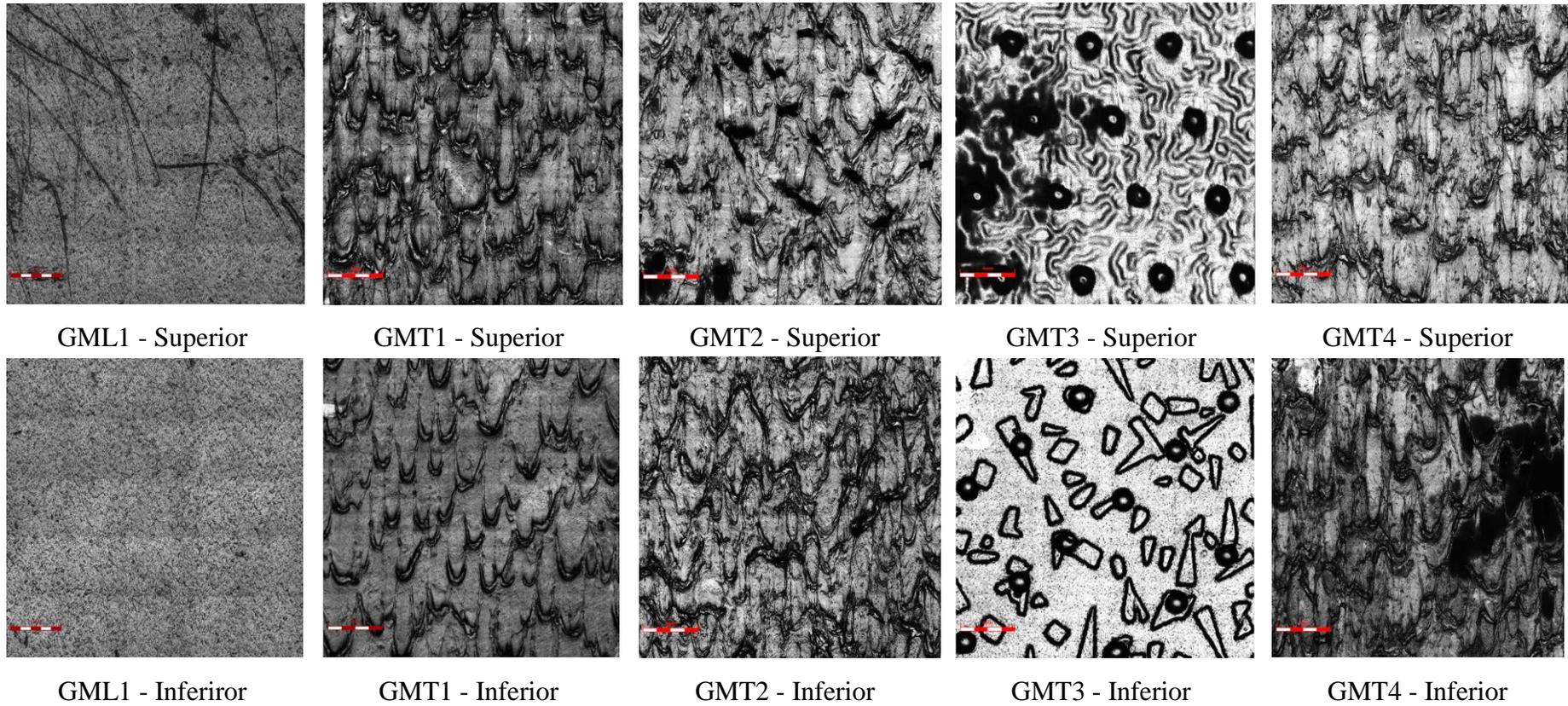


Figura 4.26. Imagem das superfícies das geomembranas.

Ao analisar os parâmetros verticais na Figura 4.27, são notáveis as diferenças entre parâmetros determinados por meio do perfil de rugosidade (2D) e por meio de análise de superfície (3D). Essas diferenças serão identificadas e discutidas no próximo item.

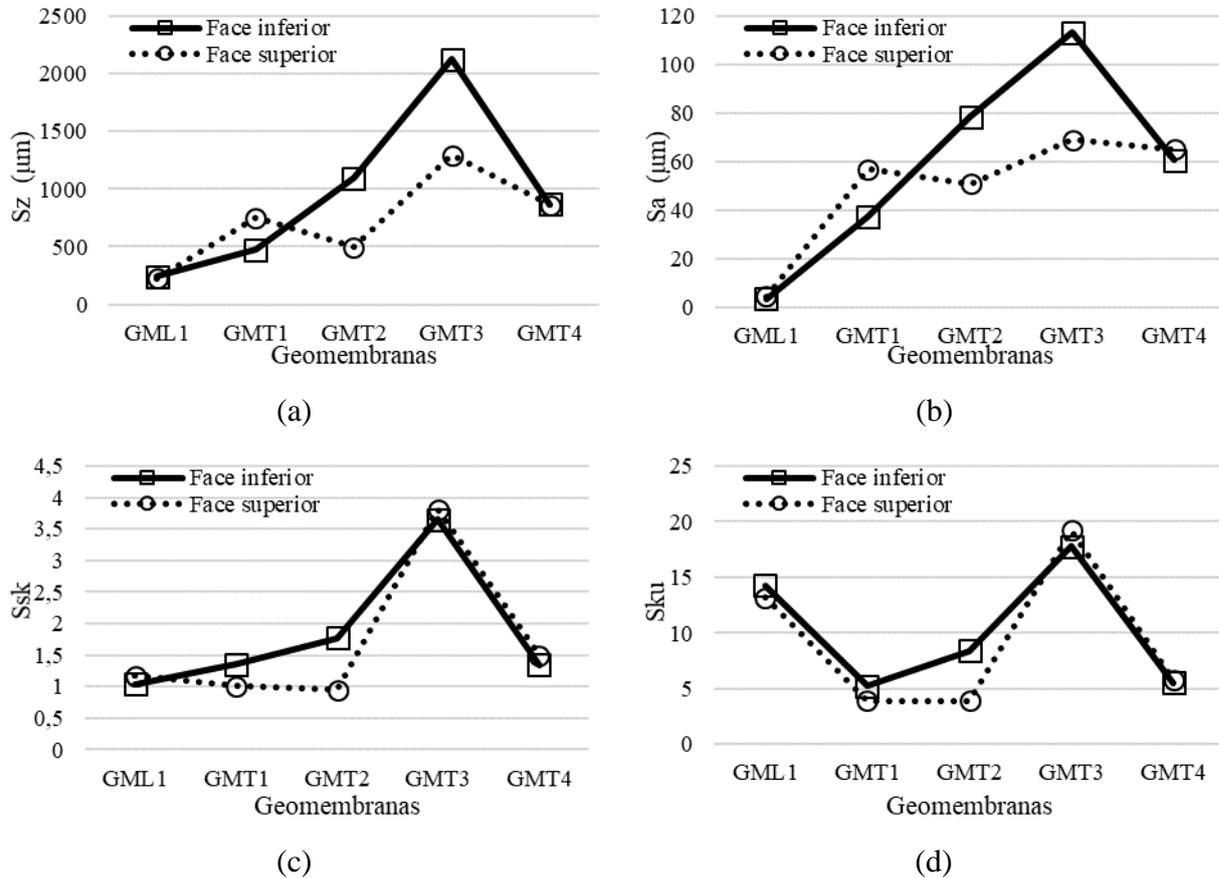


Figura 4.27. Comparação entre parâmetros de rugosidade (3D) de altura para as cinco geomembranas: (a) Altura máxima da superfície, (b) Desvio aritmético médio das alturas da superfície, (c) Fator de assimetria da curva de densidade de probabilidade das alturas da superfície e (d) Fator de achatamento da curva de densidade de probabilidade das alturas da superfície.

No entanto, observa-se na Tabela 4.10 que, para todas as geomembranas, houve maiores alturas nos picos (S_p) que nos vales (S_v) com relação à linha média. Com uma proporção aproximada para as faces inferiores de $1 \leq S_p/S_v \leq 3$ que aumenta com o aumento da R_c (2D). Enquanto para as faces superiores teve uma proporção aproximada $1 \leq S_p/S_v \leq 2$ sem relação ao aumento da R_c (2D), se desconsiderada a forte contribuição da altura das asperezas cônicas individuais da GMT3 ($S_p/S_v \approx 8$). A diferença no valor de S_p/S_v para GMT3 com relação às outras geomembranas é resultado do processo de fabricação, onde a textura foi gravada em estado de fusão com duas calandras de diferente desenho.

Os parâmetros de volume apresentados na Figura 4.28 foram obtidos por meio do ajuste da linha reta equivalente à curva de Abbott & Firestone (1933), como representado na Figura 3.21, podendo estabelecer que existe um volume maior de vazios que de asperezas, numa proporção aproximada de $1,5 \leq V_{vc}/V_{mc} \leq 2$ na região do núcleo de todas as geomembranas e para as duas faces. Pode-se observar que foram encontrados valores menores de V_{vc}/V_{mc} para a GML e a GMT3, o que está associado ao alto S_{ku} , o que implica menor densidade de concentração de asperezas da R_c nestas geomembranas.

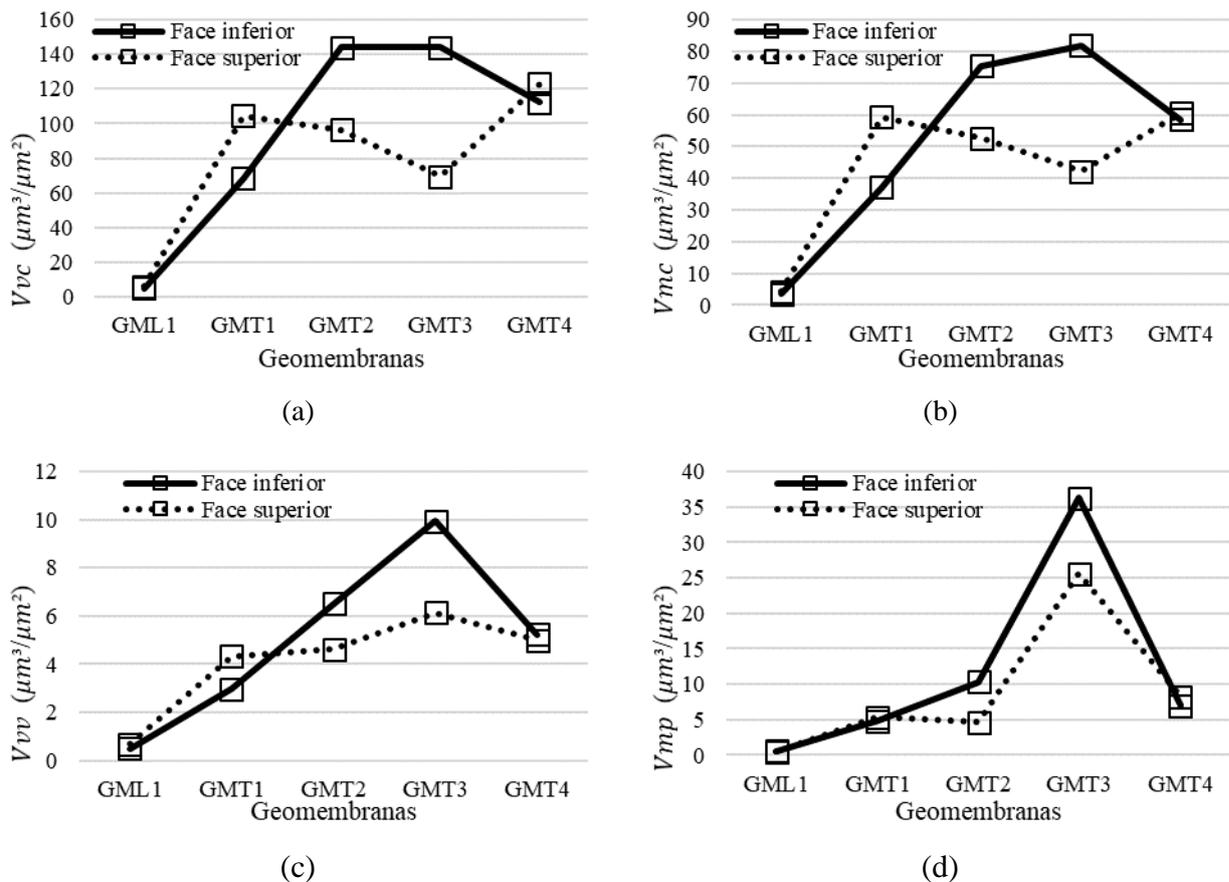


Figura 4.28. Comparação entre parâmetros de rugosidade (3D) de volume para as cinco geomembranas: (a) Volume de vazio da seção do núcleo, (b) Volume do material na seção do núcleo, (c) Volume de vazio na seção do vale e (d) Volume do material na seção de pico.

Quanto ao parâmetro horizontal ou espacial (S_{al}), na Figura 4.29 (a), estabelece a distância em que a autocorrelação diminui mais rapidamente. Essa distância pode ser usada para avaliar se há um ponto em que a altura da superfície muda abruptamente – como no caso das geomembranas texturizadas. A GMT1 apresenta o maior valor de S_{al} devido à forma de planaltos e colinas da textura, como visualizado na Figura 4.26 (GMT1 – Inferior); enquanto e como esperado, por apresentar apenas micro texturas, o menor valor de S_{al} foi para a GML1.

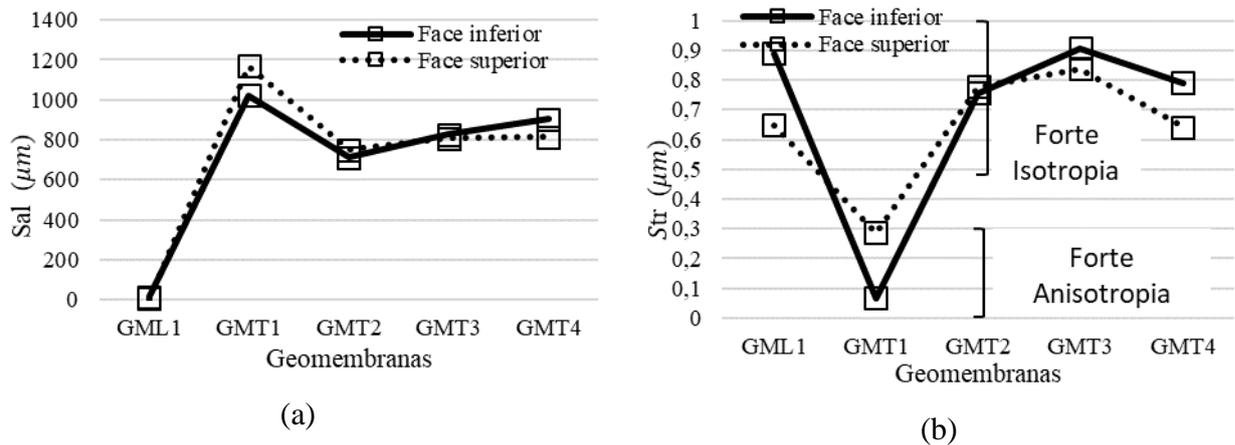


Figura 4.29. Comparação entre parâmetros de rugosidade (3D) laterais para as cinco geomembranas: (a) Comprimento de autocorrelação mais curto e (b) Relação de aspecto físico da textura.

O parâmetro espacial Str permitiu determinar se as texturas apresentavam uma orientação preferencial ou não, sendo que valores de $\text{Str} > 0,5$ indicam forte isotropia, isto é, existência de uma textura uniforme em todas as direções, e valores de $\text{Str} < 0,3$ indicam forte anisotropia, ou seja, forte direcionalidade ou orientação da textura. Pode ser observado na Figura 4.29 (b) que, com exceção da GMT1, que apresenta direcionalidade e orientação da textura (Figura 4.26), todas as geomembranas apresentam forte isotropia.

4.5.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS COM MÉTODOS 2D E 3D

Quando determinados os parâmetros de altura por meio dos dez perfis de rugosidade na mesma superfície (2D), pode ser que algum pico ou vale não tenha sido medido. Por esse motivo, uma determinação a partir da superfície microtopográfica levantada (3D) pode fornecer uma informação mais completa. Diferenças notáveis foram encontradas ao comparar os parâmetros de altura determinados pelas duas formas empregadas (2D e 3D).

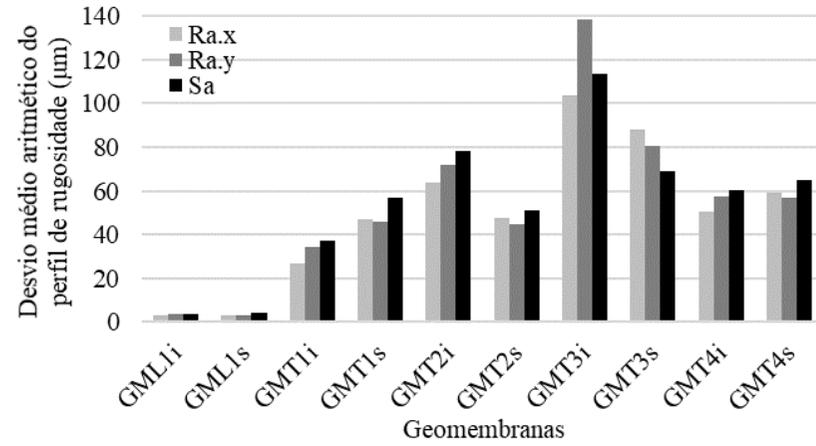
Na Figura 4.30 podem ser observadas essas diferenças entre valores medidos por meio de perfis de rugosidade nos sentidos X e Y e o medido na microtopografia. Antes da obtenção desses resultados, esperava-se que os valores obtidos da microtopografia seriam sempre superiores aos determinados pelos perfis de rugosidade. No entanto, isso não foi observado, já que é mais marcante para a altura máxima da superfície (Figura 4.30b). Podem ser observadas maiores

diferenças para os quatro parâmetros avaliados na GMT3 em relação às outras geomembranas, atribuindo-se ao fato de ter dois tipos de asperezas e de ser uma delas a de maior altura máxima dentre as geomembranas estudadas.

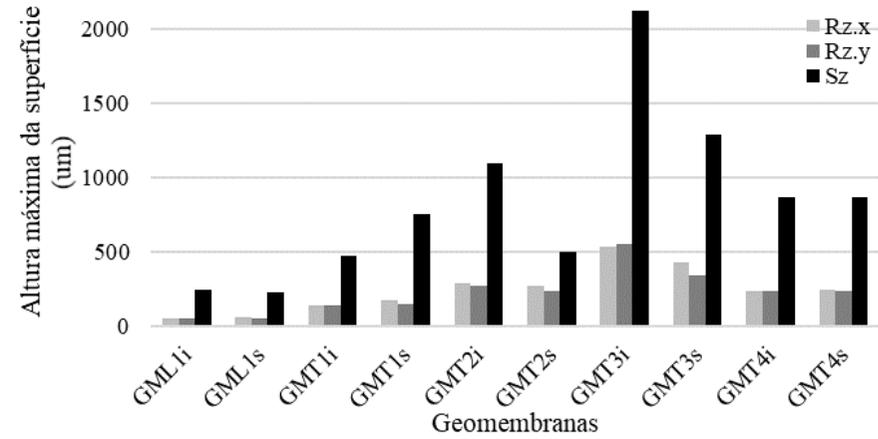
Para uma mesma superfície, os três resultados medidos de desvio médio aritmético do perfil de rugosidade (Figura 4.30a) variaram sem nenhuma tendência. Assim sendo, qualquer dos três pode ser o menor, o do meio ou o maior. Então, quanto maior for a diferença entre esses três valores, maior será a altura de aspereza apresentada pelas superfícies. A variabilidade dos resultados nos sentidos X e Y permitem prever comportamentos significativamente diferentes quanto às análises de atrito em interfaces com solos granulares finos e para altas tensões. Neste trabalho, apenas resultados no sentido Y foram utilizados, já que esse foi o sentido preferencial de cisalhamento.

A altura máxima da superfície obtida pelos perfis foi menor em relação àquela que foi obtida na microtopografia (Figura 4.30b), com diferenças não significativas entre os resultados nos sentidos X e Y. Esse dado levou a desconsiderar os parâmetros de altura máxima medidos pela microtopografia nas análises de interfaces com outros materiais.

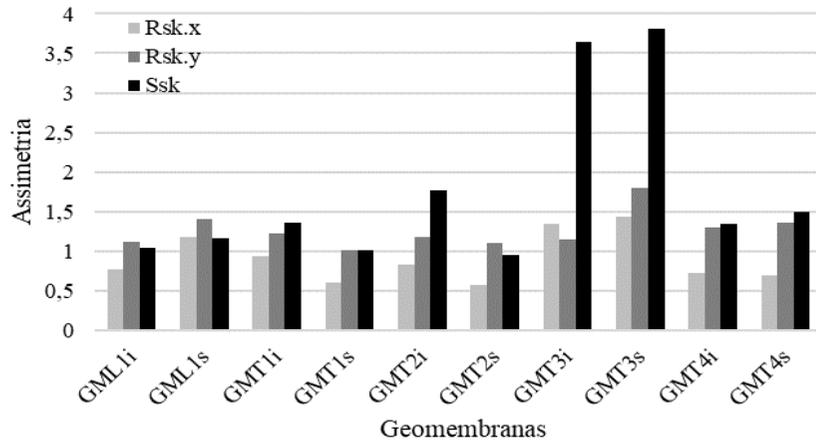
Os resultados de assimetria e curtose obtidos (Figura 4.30c e Figura 4.30d) também não mostraram uma tendência, já que variaram para uma maior altura de aspereza. Todas as superfícies, independentemente da forma de determinação do resultado, apresentaram distribuição de probabilidade não achatada e enviesada para abaixo da linha média.



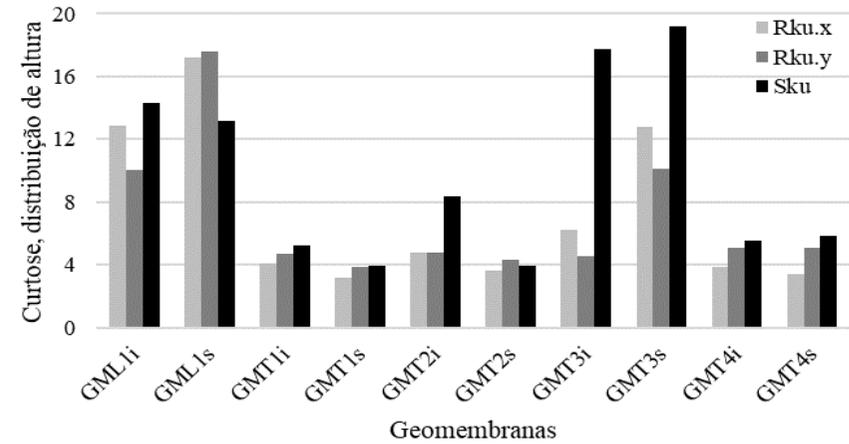
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.30. Comparativa dos parâmetros determinados por meio do perfil de rugosidade (2D) e por meio da superfície (3D): (a) Desvio médio aritmético do perfil de rugosidade, (b) Altura máxima da superfície, (c) Assimetria da distribuição de probabilidade e (d) Achatamento da distribuição de probabilidade.

4.5.4. INFLUÊNCIA DA TEXTURA DAS GEOMEMBRANAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS INTERFACES

Neste item, uma análise da influência da textura das geomembranas é realizada. Inicialmente, considera-se a influência da altura por meio do valor de R_c , parâmetro que melhor representa as alturas das asperezas. Posteriormente, a influência da densidade ou concentração de asperezas é considerada por meio do Volume real em uma região de pico (V_{mc}), valor avaliado como mais relevante devido à sua relação com o Volume vazio em uma parte do núcleo (V_{vc}) e com pequenos valores de Volume vazio na região do vale (V_{vv}) e Volume real em uma região de pico (V_{mp}).

A variabilidade de alturas na face superior é apresentada na Figura 4.31, por meio dos perfis de rugosidade sem ondulação no sentido Y (comprimento do rolo). Essas representações dos perfis são geradas pelo microscópio automaticamente, com escala vertical diferente da escala horizontal, o que melhora a sua visualização. Um desenho do perfil com escalas iguais nos dois eixos impossibilitaria mostrá-los comparativamente numa única lauda, preferindo-se, então, deformar também a representação dos grãos de solo por meio de esferas nos três diâmetros escolhidos (mínimo – 0,075 mm, médio – 0,43 mm e máximo – 2,0 mm).

A forma das asperezas para todas as geomembranas pode ser descrita como uma sucessão de picos e vales, com orientação vertical. A GML1 apresentou poucos e isolados picos altos, maiores do que os vales. Por sua vez, a GMT1 apresentou declividades médias, com colinas alongadas e vales extensos. Já a GMT2 apresentou declives acentuados entre os picos e vales, com presença de colinas e vales de curta extensão, picos mais frequentes do que vales e de maior altura. Observou-se também que a GMT3 apresentou saliências cônicas individuais e simétricas, mais pontiagudas na face inferior, com vales muito extensos e menos variáveis na face inferior, texturas arredondadas com picos pequenos isolados. Por fim, a GMT4 mostrou vales extensos, com presença de planaltos e altas saliências assimétricas, com declives variáveis por regiões.

Na Figura 4.31 e Figura 4.32 pode ser observada a diferença de forma das asperezas de uma geomembrana para outra e uma comparação visual da possível penetração e interação do solo com os picos e vales que descrevem as asperezas. Essa observação é complementada pela

Figura 4.25, que representa a R_c , o D_{50} e o diâmetro da areia mínimo por meio de linhas tracejadas sobre as distribuições de probabilidades das Z_t das geomembranas.

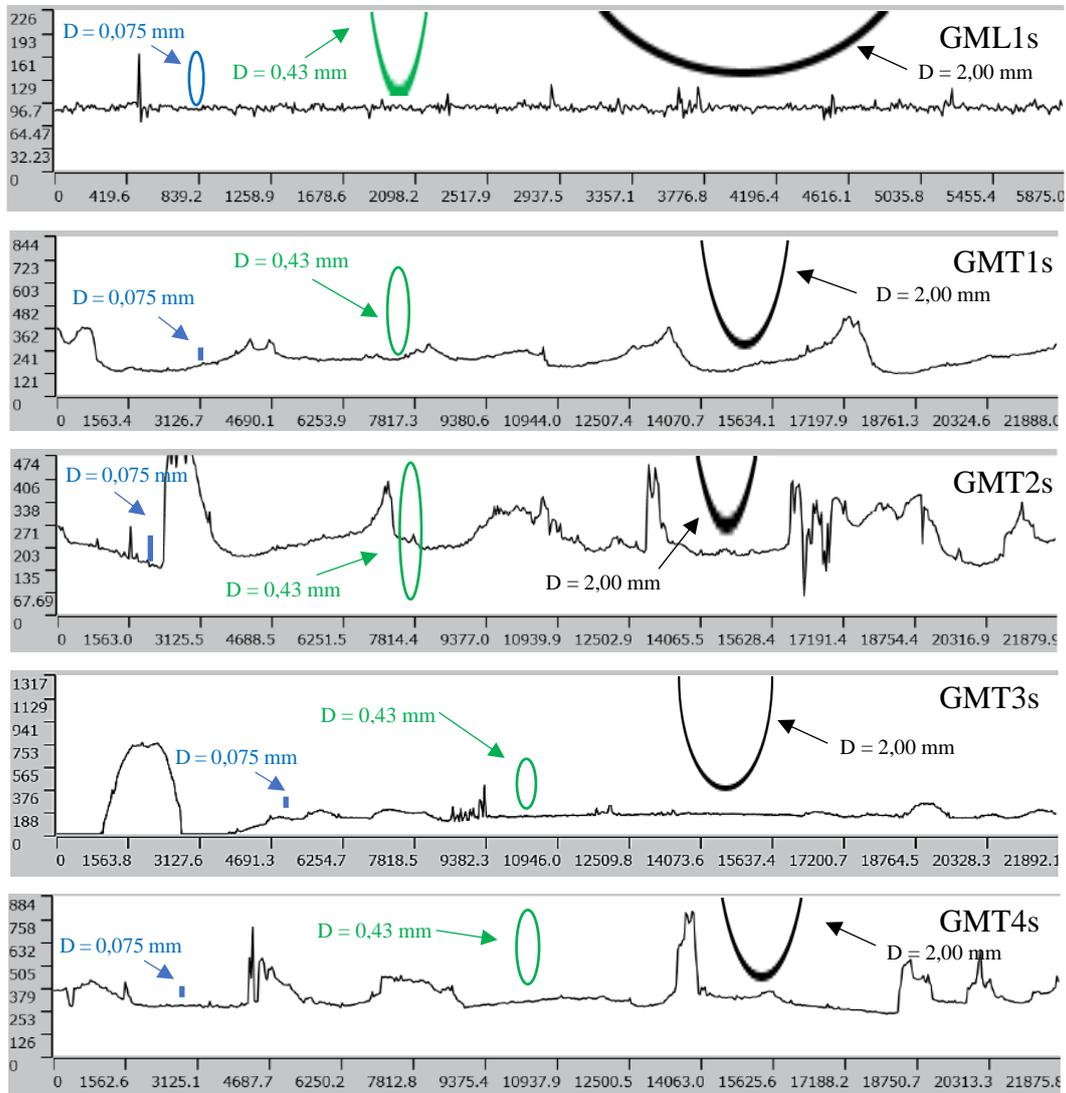


Figura 4.31. Perfil de rugosidade sem ondulação da face superior no sentido Y para o maior R_t dos 10 avaliados para cada geomembrana.

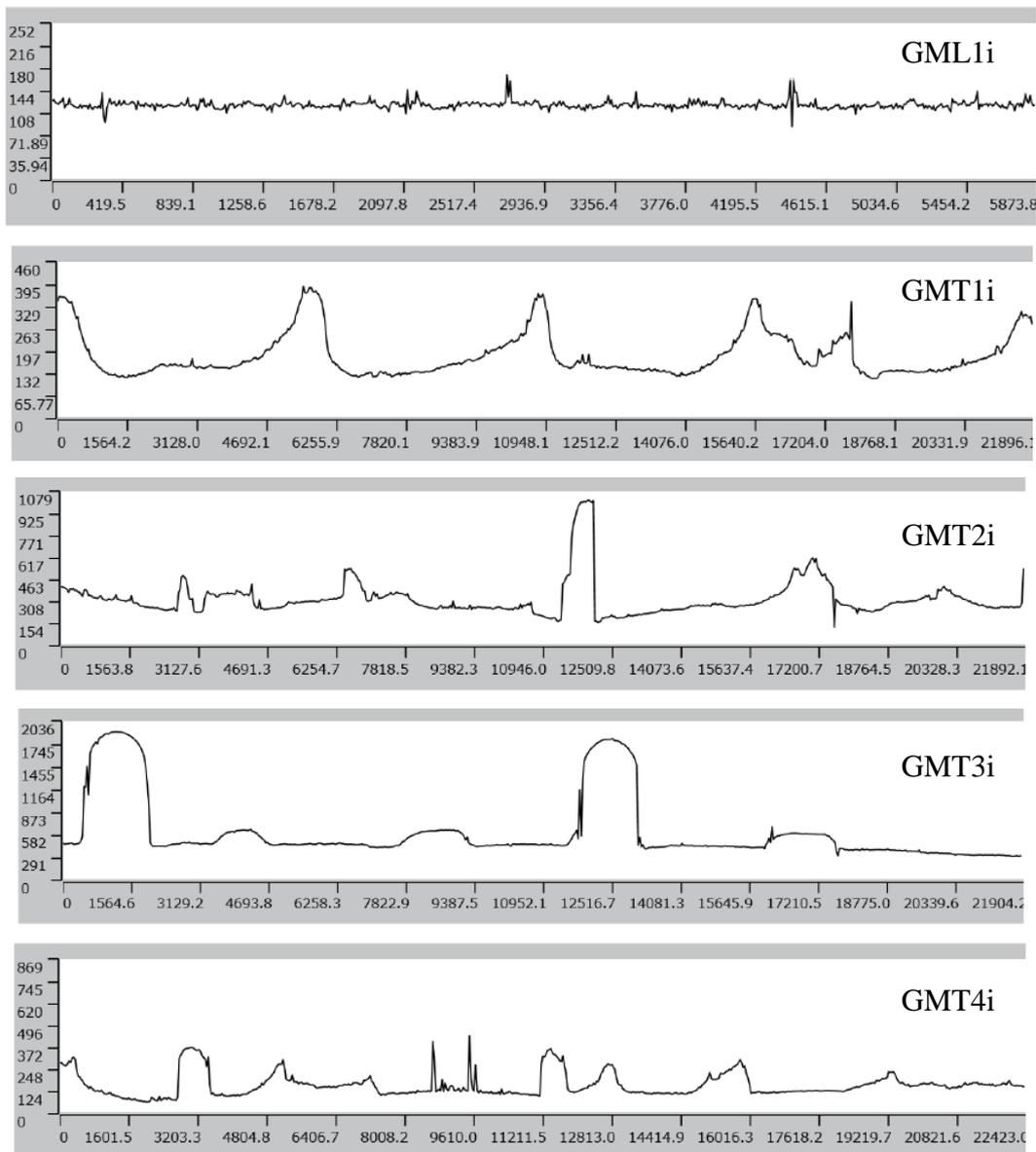


Figura 4.32. Perfil de rugosidade sem ondulação da face inferior no sentido Y para o maior R_t dos 10 avaliados para cada geomembrana.

4.5.4.1. INFLUÊNCIA DA R_c PARA AS INTERFACES GEOTÊXTIL E GEOMEMBRANA

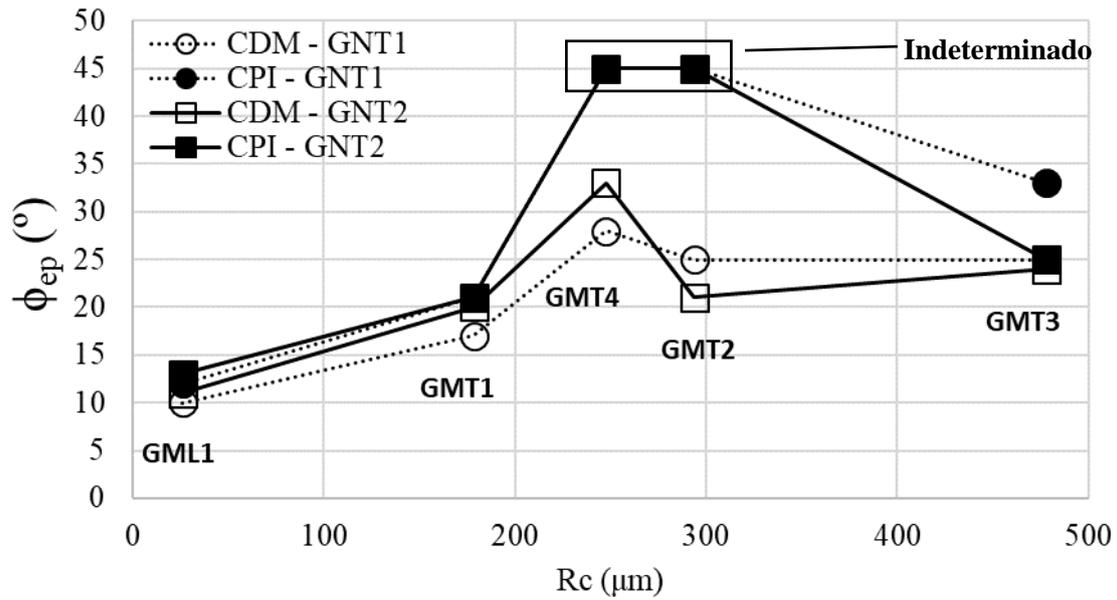
Conforme estudos de Fowmes *et al.* (2017), ao comparar os resultados do ângulo de atrito das envoltórias de pico e de pós-pico para as baixas (Figura 4.33) e altas (Figura 4.34) tensões normais consideradas, o acréscimo de altura nem sempre levou a maior tensão cisalhante. Em consequência, o maior ângulo de atrito ocorreu pela influência da concentração de asperezas.

Na Figura 4.33 é mostrada a comparação dos resultados dos ensaios realizados para as interfaces 1 a 10 para baixas tensões normais, em equipamento CDM e CPI, com valores do ângulo de atrito secante de pico e de pós-pico para as cinco Rc. Nessa primeira análise com baixas tensões, não se dispõe de todos os resultados, pois os ensaios com as geomembranas GMT2 e GMT4 não chegaram à ruptura nos ensaios de CPI. A maior distribuição da tensão de cisalhamento através de um maior número de asperezas dentro do geotêxtil foi para a GMT2 e GMT4, ao serem estas as de maior concentração de asperezas, como visto nas Figuras 4.26, 4.31 e 4.32. Essa distribuição foi suficiente para não permitir a ruptura nos ensaios de plano inclinado, principalmente quando atingido o limite de inclinação da rampa (45°), o que não aconteceu nos ensaios de CDM por se tratar de uma área de distribuição aproximadamente dez vezes menor.

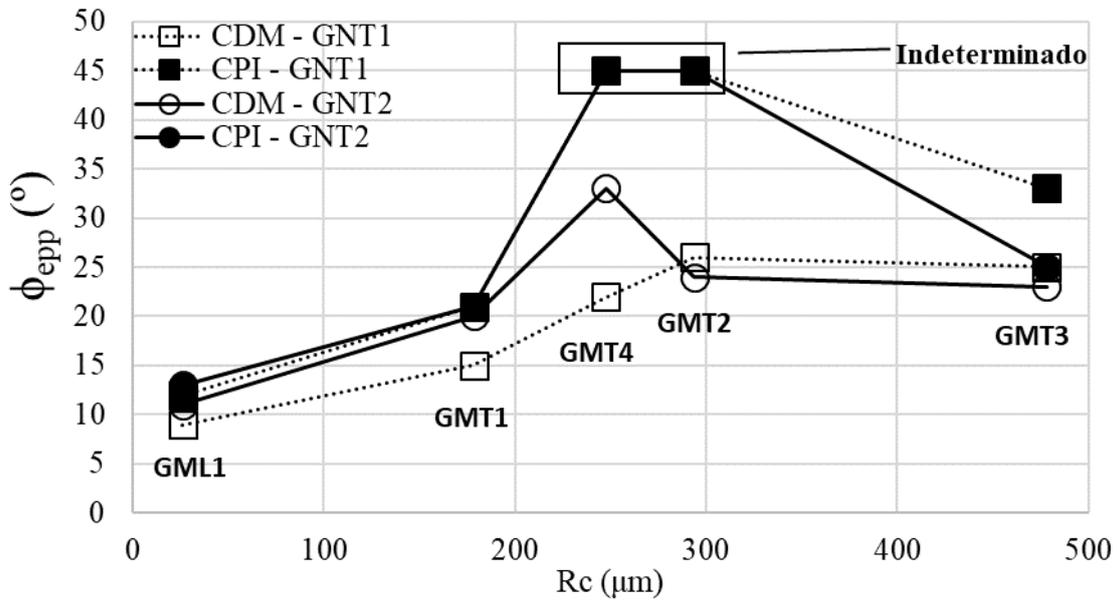
Por sua vez, os ângulos de atrito de pico e de pós-pico obtidos por meio de ensaios de CPI foram maiores do que os obtidos por meio de ensaios de CMD. A GMT4 alcançou o maior valor do ângulo de atrito de pico nos ensaios de CMD, o que pode estar relacionado à densidade do material das asperezas dessa geomembrana, que é menor para uma Rc próxima a da GMT2, e às mudanças abruptas de superfície (Sal), aproximadamente 20% maiores do que na GMT2, como mostrado na Figura 4.29a. As interfaces com a GMT3 não evidenciaram ganho significativo de ângulo de atrito, comprovando a forte influência do espaçamento da macro rugosidade.

Nos ensaios de CPI pouca importância apresentou a gramatura do geotêxtil, mostrando uma influência na resistência de pico e de pós-pico apenas nas interfaces com a GMT3, sendo maior a resistência para a gramatura menor. A estrutura mais aberta do GNT1 facilitou a entrada das asperezas de maior altura e uma melhor distribuição da tensão cisalhante. Já nos ensaios de CDM, uma área menor de interface não consegue distribuir a tensão cisalhante da mesma forma, resultando numa resistência menor da interface, embora os valores dos ângulos de atrito para maiores asperezas sejam maiores com menor gramatura.

Continuando essa análise, a Figura 4.34 apresenta os resultados para altas tensões, mostrando uma comparação entre resultados para os ensaios de CDC e CDM.

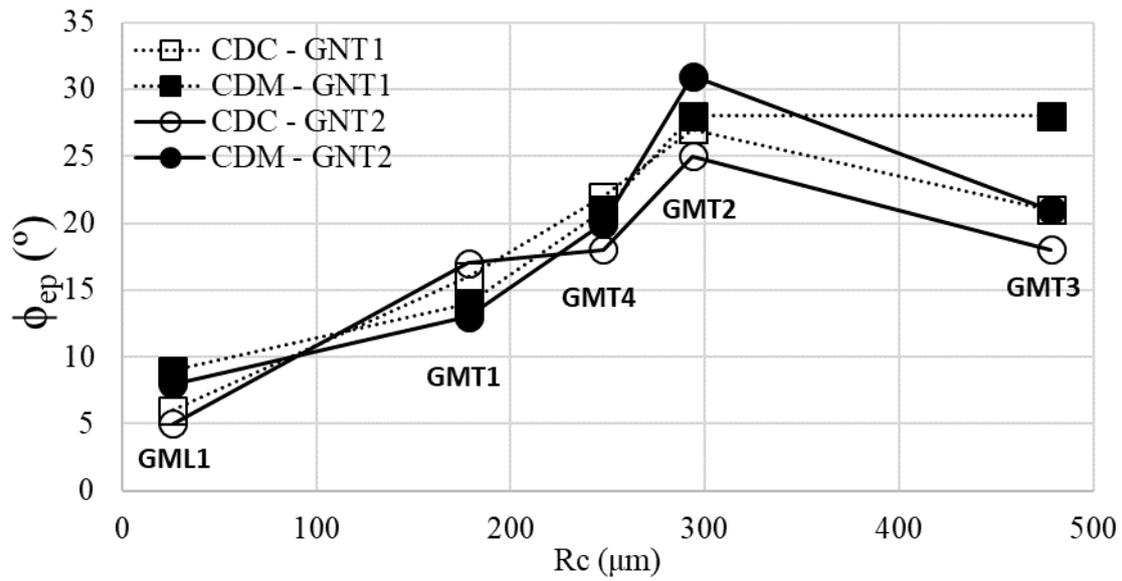


(a)

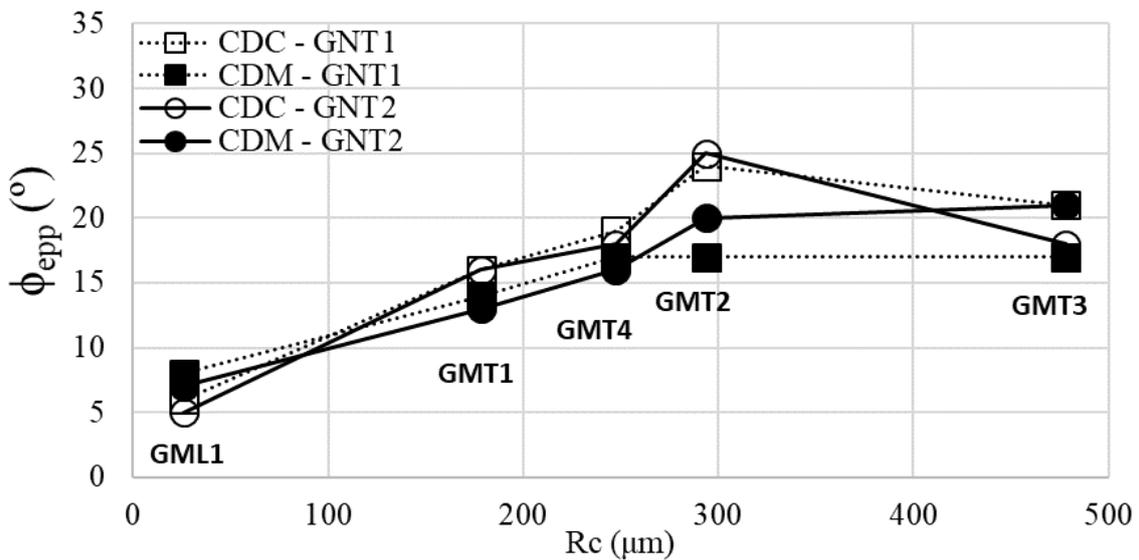


(b)

Figura 4.33. Influência da altura de aspereza nos ângulos de atrito das envoltórias nos ensaios com baixas tensões em equipamento de CDM e de CPI: (a) para valores dos ângulos de atrito de pico das envoltórias e (b) para valores dos ângulos de atrito de pós-pico das envoltórias.



(a)



(b)

Figura 4.34. Influência da altura de aspereza nos ângulos de atrito das envoltórias nos ensaios com altas tensões em equipamento de CDC e de CDM: (a) para valores dos ângulos de atrito de pico das envoltórias e (b) para valores dos ângulos de atrito de pós-pico das envoltórias.

Todas as interfaces atingiram a ruptura, com valores do ângulo de atrito próximos para as interfaces com GML1 e GMT1 de menor Rc. Os ângulos de atrito das interfaces aumentaram com o aumento de Rc até aproximadamente 0,3 mm, sem ganho significativo de resistência com uma Rc muito maior para as interfaces com GMT3, devido ao grande espaçamento entre asperezas e com um comportamento similar ao descrito para baixas tensões. Nota-se nas figuras Figura 4.33 e Figura 4.34 que as interfaces com a GMT3, sob baixas e altas tensões, mostraram ser evidentemente mais resistentes as interfaces com geotêxtil de menor gramatura.

Uma análise da influência da densidade do material da geomembrana na diferença entre ângulo de atrito de pico e de pós-pico é apresentada na Figura 4.35. Para isso, compararam-se os resultados das GMT2 e GMT4, que apresentaram R_c e forma da rugosidade próximos, ambas de matriz balão. Nos ensaios de CDC não se evidenciou diferença alguma com a variação de densidade, enquanto uma igual perda de resistência de pico até pós-pico foi registrada, independentemente da gramatura do geotêxtil. Para ensaios de CPI não houve diferenças, o que confirma para esses casos avaliados, que ensaios de cisalhamento direto podem superestimar os resultados de ângulo de atrito, com maior incidência em interfaces com geomembranas de maior densidade do material.

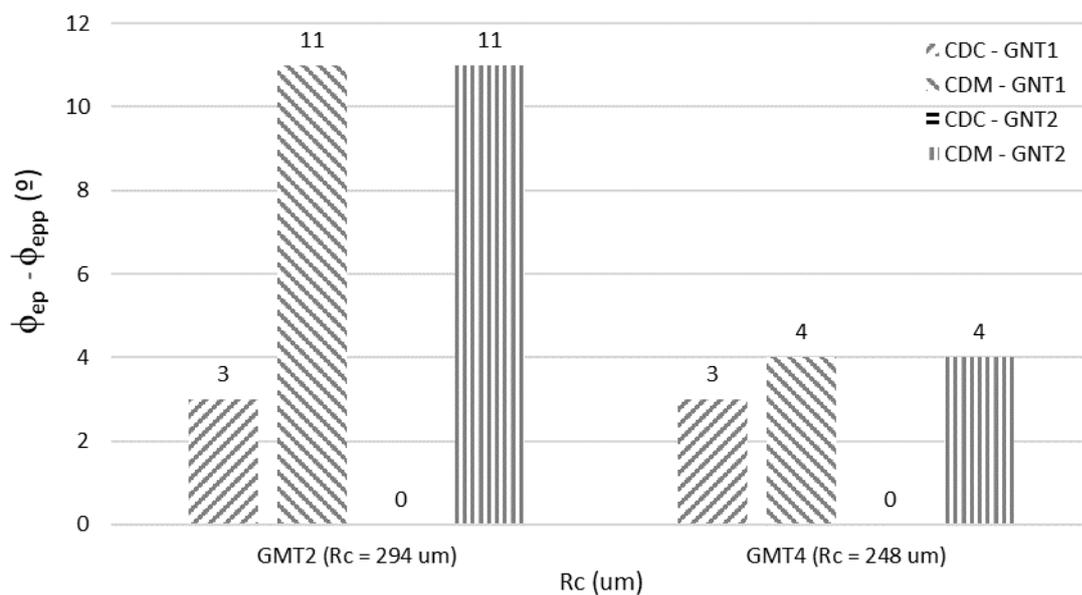


Figura 4.35. Influência da altura de aspereza e da densidade do material da geomembrana no ângulo de atrito da envoltória para ensaios com altas tensões em equipamento de CDC e de CDM.

4.5.4.2. INFLUÊNCIA DO V_{mc} NAS INTERFACES SOLO E GEOMEMBRANA

Para avaliar a influência das asperezas na resistência das interfaces solo/geomembrana tentou-se identificar as diferenças para as cinco geomembranas quanto à forma, altura e distribuição das rugosidades. Em itens anteriores foram caracterizadas a forma e altura; neste item é abordada uma forma de considerar tal distribuição. A distribuição das asperezas é também conhecida como concentração ou densidade de asperezas.

Na GMT3 pode ser definida com facilidade a distribuição das asperezas quanto ao espaçamento, pois, ao menos em termos de macro textura, apresenta um espaçamento regular e constante, mas para as outras geomembranas, com matriz balão, isso mostrou-se de forma mais complexa, levando a outra forma de considerar a distribuição. Uma forma alternativa de determiná-la foi adotada neste trabalho por meio do volume de material na parte do núcleo da geomembrana (V_{mc}), ou seja, o volume de asperezas desconsiderando o trecho final dos picos ou vales de maior amplitude (Figura 3.21). Considera-se oportuno alertar que o V_{mc} possibilita avaliar a influência da concentração de asperezas irregulares na resistência das interfaces, mas não permite avaliar a influência do espaçamento entre as texturas como no trabalho de Fowmes *et al.* (2017).

A Figura 4.36 mostra a relação entre V_{mc} e ângulo de atrito da envoltória, mostrando que o ângulo de atrito da envoltória da interface não é proporcional apenas com o volume de vazios do núcleo da geomembrana. Pode ser observado que o aumento de V_{mc} não levou ao acréscimo de ângulo de atrito. Cabe lembrar que os valores de R_c e V_{mc} para as geomembranas GMT1, GMT2, GMT3 e GMT4 são muito próximos na face superior da geomembrana.

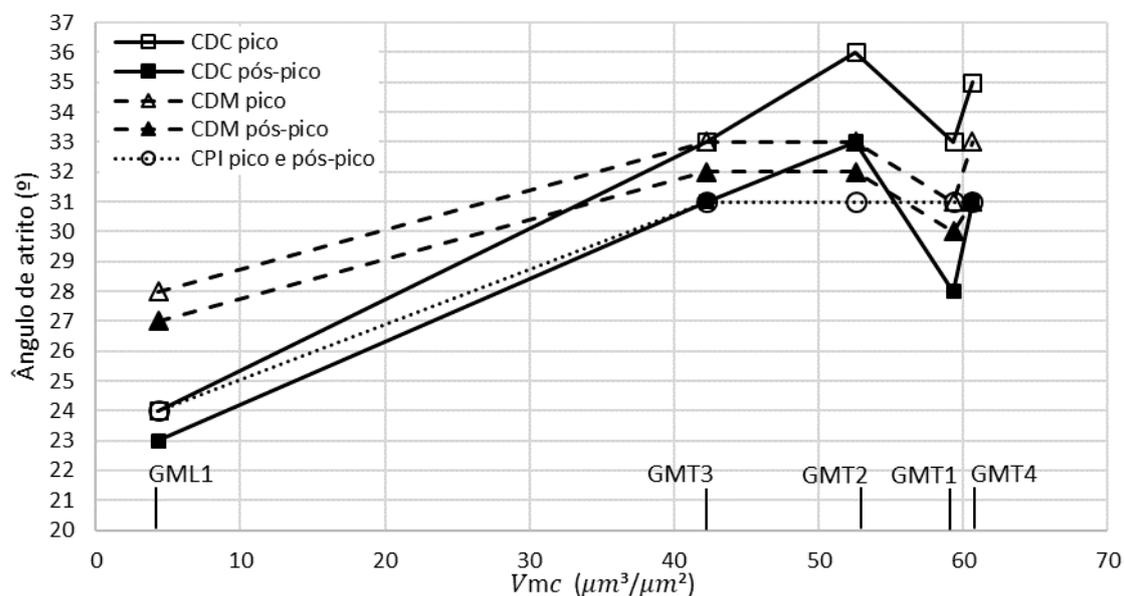


Figura 4.36. Influência do V_{mc} nos resultados de ângulo de atrito da envoltória em equipamentos CDC, CDM e CPI.

Quando comparados os resultados do ângulo de atrito dos ensaios de cisalhamento direto para GMT1 e GMT4, com valores de V_{mc} muito próximos na Figura 4.36, embora para a GMT1 são menores. Isto ocorreu pela forte anisotropia (Str) manifestada com a orientação das maiores

asperezas no sentido do cisalhamento e pelo comprimento de autocorrelação (S_{al}) maior para a GMT1, manifestado como picos arredondados. Nos ensaios de cisalhamento em plano inclinado não se registraram estas variabilidades, ao realizar ensaios para uma área maior e sob baixas tensões a microtopografia não apresentou influência alguma.

Ensaio de cisalhamento em escalas menores (CDC e CDM), além de sobrestimar os resultados de ângulo de atrito da envoltória, mostram influência do tipo de material das asperezas e a geomembrana, mostrando-se na Figura 4.36 resultados maiores para a GMT2 quando comparados com resultados para a GMT4. Isso ocorre porque: i) com o aumento da tensão cisalhante os grãos da areia flexionam as asperezas de alturas maiores até um certo limite antes de passar por cima delas (ruptura), mobilizando maior resistência cisalhante para asperezas mais rígidas (PEAD) que oferecem maior resistência à flexão, ii) logo após os grãos passar por cima das asperezas ocorre a relaxação da tensão cisalhante até a tensão cisalhante residual. Um comportamento similar ao anterior foi descrito por Kim (2006) em interfaces de geotêxtil/geomembrana avaliados por meio de ensaios de cisalhamento (20.3 mm de largura e 27.9 cm de comprimento). Para ensaios de CPI, além de um comportamento menos conservador, a densidade do material das asperezas e a geomembrana não representou nenhuma influência nos resultados de ângulos de atrito tangente.

Ao comparar resultados de interfaces com alturas (R_c) muito próximas e distribuição de asperezas diferente por meio de ensaios de CPI, observou-se que pouco importa a forma e distribuição das asperezas quando estas apresentam: i) alturas máximas (R_c) entre 0,18 mm a 0,24 mm; ii) alturas totais (R_t) entre 0,33 mm e 0,77 mm; e iii) variação de V_{mc} de aproximadamente 30% ($42.199 \leq V_{mc} \leq 60.606$), o que possibilita um maior uso de geomembranas de PEBDL que são de instalação mais fácil e se ajustam melhor à superfície. Inclusive, o tipo de matriz na forma de fabricação e a densidade do material geossintético considerados, não influenciaram nos resultados de atrito. Esse fato mostra-se interessante na escolha econômica do tipo de geomembrana a empregar em soluções geotécnicas de planos inclinados sob baixas ($\sigma < 6$ kPa) tensões normais.

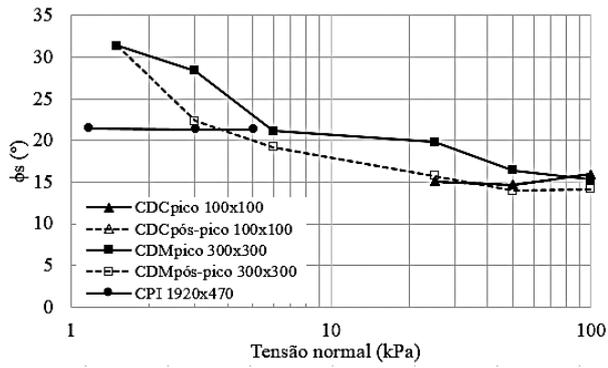
4.6. INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ÁREA DE CONTATO DAS INTERFACES NOS ENSAIOS

Nos itens anteriores foram discutidos e comparados vários resultados de ensaios em interfaces de vários tipos, discutindo os resultados alcançados e em alguns casos a Influência do Tamanho da Área de Contato (ITAC) foi evidenciada, contrário aos resultados de Aguiar (2008). Nesta parte da tese apresenta-se uma complementação a essas discussões, o que é possível uma vez que a pesquisa foi realizada empregando-se três tamanhos de área de contato. São apresentados os resultados por grupos de interfaces e, no Apêndice, em detalhe a comparação das envoltórias por interface. Note-se que em cada equipamento tem-se distribuições diferentes ao longo da interface.

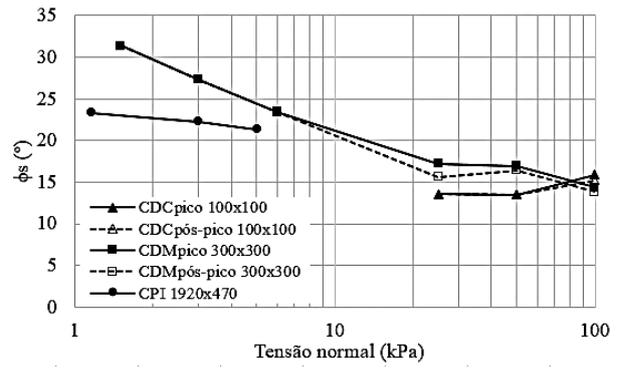
4.6.1. ITAC EM INTERFACES GEOTÊXTIL/GEOMEMBRANA

A Figura 4.37 ilustra a variação do ângulo de atrito secante com a tensão normal para cada interface baseando-se nos resultados obtidos dos três diferentes tipos de ensaios. Para todas as interfaces os resultados mostram que o tamanho da área de contato influenciou significativamente na resposta cisalhante das interfaces. Pode-se observar que os ensaios empregando plano inclinado (CPI) mostraram os resultados mais conservadores. No entanto, esse tipo de ensaio permite a simulação de condições mais reais as de campo, conforme relatado por Girard *et al.* (1990); Giroud *et al.* (1990); Gourc *et al.* (1996); Izgin & Wasti (1998) e Viana (2007).

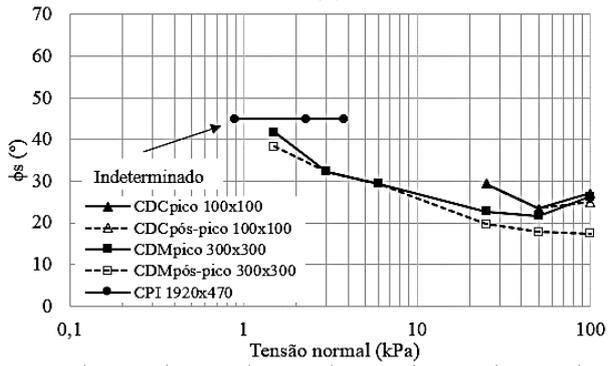
Adicionalmente, pode-se observar também que as maiores diferenças entre os casos ‘pico’ e ‘pós-pico’, para os ensaios em média e pequena escala foi maior para os casos GNT1/GMT1 e GNT1/GMT4. Isso se deu devido ao fato de: i) a GMT1 ser a única geomembranas que possui forte anisotropia com direcionalidade das asperezas no sentido do cisalhamento avaliado e ii) as asperezas com forma de colinas com crestas arredondadas dificultam o entrelaçamento dos fios do geotêxtil não tecido após a ruptura pico. Para os demais casos, a variação entre tais valores não foi considerada significativa.



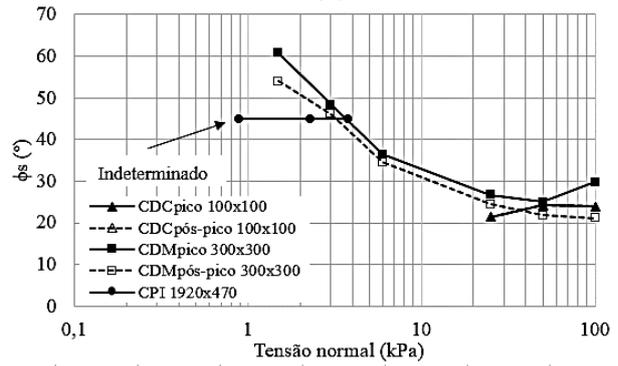
(a)



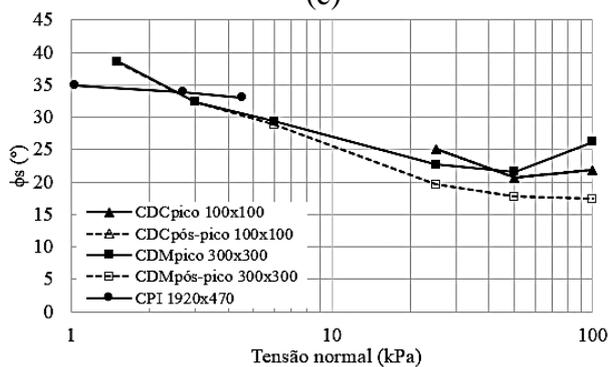
(b)



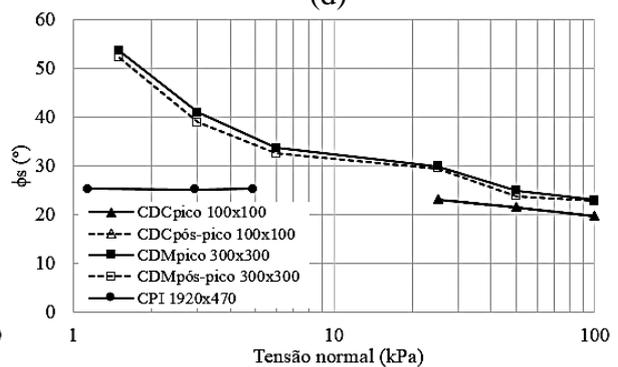
(c)



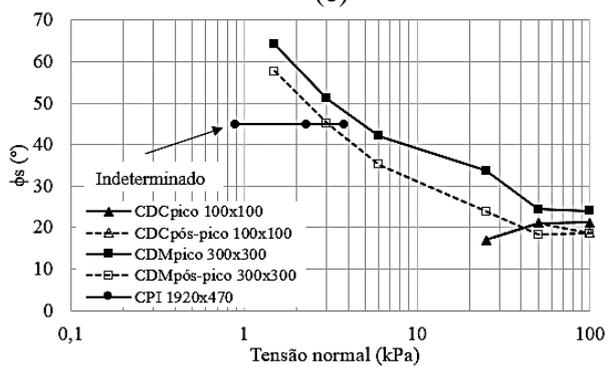
(d)



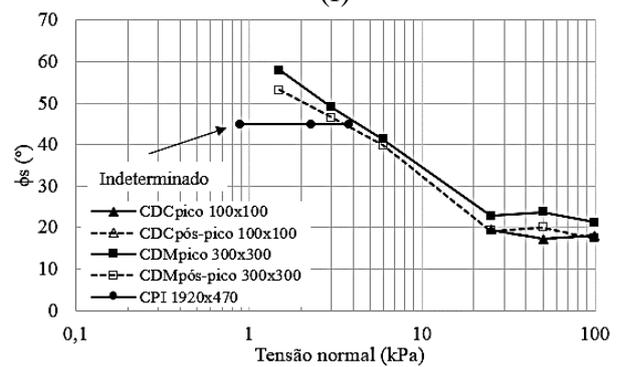
(e)



(f)



(g)



(h)

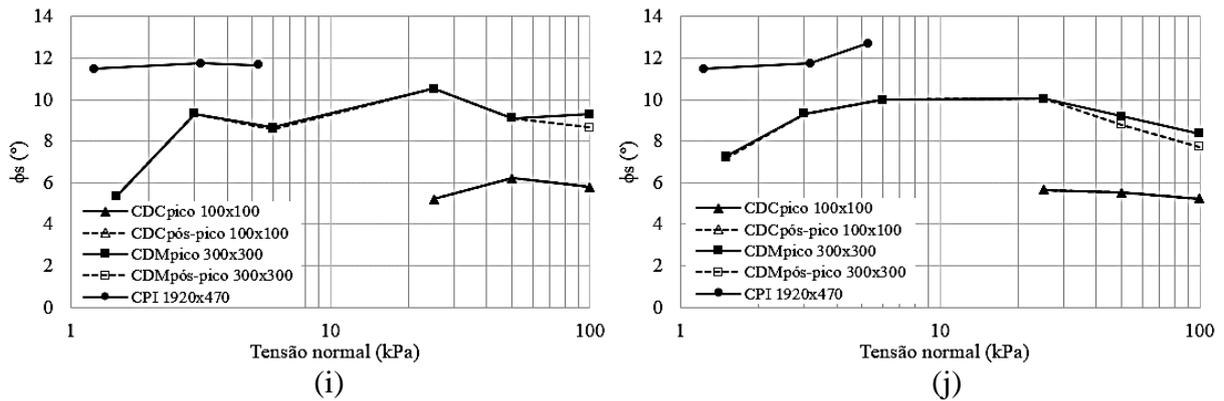


Figura 4.37. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces geotêxtil/geomembrana: (a) 1. GNT1/GMT1, (b) 2. GNT2/GMT1, (c) 3. GNT1/GMT2, (d) 4. GNT2/GMT2, (e) 5. GNT1/GMT3, (f) 6. GNT2/GMT3, (g) 7. GNT1/GMT4, (h) 8. GNT2/GMT4, (i) 9. GNT1/GML1 e (j) 10. GNT2/GML1.

Em interfaces com geomembranas texturizadas, os valores do ângulo de atrito tendem a diminuir com o aumento da tensão normal, mostrando resultados mais próximos quando comparados aos ângulos de atrito obtidos por meio das escalas menor e média. Os ensaios para a escala maior apresentam uma tendência horizontal, mostrando diferenças pouco significativas com o aumento da tensão normal, e diferenças significativas quando comparados aos resultados do ângulo de atrito obtidos com a escala média. Isso demonstra mais uma vantagem apresentada pelo ensaio de rampa, especialmente por representar melhor as condições de campo. Evidencia-se que provavelmente em obras com interfaces de maior extensão, geomembranas com maior R_c dentro da faixa estudada ($0,18 \text{ mm} \leq R_c \leq 0,24 \text{ mm}$) não proporcionarão um ganho de resistência ao cisalhamento.

Nas Figuras 4.37a e 4.37b pode ser observada uma diferença significativa entre os resultados dos ângulos de atrito secante das interfaces com GMT1, chegando até 5° nas escalas menor e média para a tensão normal mais baixa. É possível notar ainda ângulos de atrito secante menores para maior tensão normal na escala média e ângulos de atrito secante próximos a 15° na maior tensão normal, empregada nas escalas média e menor. Com o aumento da tensão, aumenta-se a densidade dos fios de geotêxtil ao redor das asperezas e diminui-se o entrelaçamento dos fios do geotêxtil nas macro e micro texturas. No geotêxtil de menor gramatura, a diferença dos valores pico e pós-pico foi maior, descrevendo curvas de mobilização de resistência com pico definido na escala média unicamente, uma vez que o geotêxtil menos denso tem menor

quantidade de fios para manter o entrelaçamento durante a relaxação da tensão cisalhante, após a ruptura, segundo Kim (2006).

Com a textura mais densa e de maior altura da GMT2, as interfaces mostram também na escala média uma diminuição do ângulo de atrito secante com o aumento da tensão normal até 50 kPa, mostrando que a partir de 100 kPa o comportamento pode ser diferente e com resultados mais resistentes na interface com geotêxtil de maior gramatura. Para a escala menor, os resultados foram mais próximos aos de escala média para as tensões normais de 50 e 10 kPa. Isso mostra como os resultados podem variar com a mudança da escala do equipamento.

Nas Figuras 4.37c e 4.37d são apresentados os máximos ângulos de atrito que se conseguiram atingir com a rampa sem acontecer a ruptura (45°). Cabe lembrar que nos ensaios de maior escala não se atingiu a ruptura, enquanto para a escala média sim. A ruptura nos ensaios de CDM (escala média), quando comparada com o limite da rampa (45°), foi atingida para um valor 3° menor, na interface com GNT1, e 16° maior, para a interface com GNT2; isso para 1,5 kPa de tensão normal aplicada. Isso confirma a necessidade de estudar a resistência ao cisalhamento de interfaces com geomembranas de matriz balão por meio de ensaios de plano inclinado de grande escala, que descrevem uma forma de trabalho como de fato acontece nas obras, devido ao fato que ensaios de cisalhamento direto podem conduzir a resultados que superestimam a resistência (Figura 4.37).

Algo similar aconteceu nas interfaces com a GMT4 (Figuras 4.37g e 4.37h), que apresentaram uma resistência maior para baixas tensões, não atingindo a ruptura para a escala maior. Com ângulos de atrito secante, na escala média, maiores de 45° para 1,5 kPa de tensão normal, sendo 19° maior para a interface com GNT1 e 13° maior para a interface com GNT2. Esses valores na ruptura para baixas tensões normais evidenciam a importância do tamanho da área de contato ensaiada e do tipo de mecanismo simulado pelo ensaio empregado.

Resultados diferentes para cada interface de geotêxtil com a GMT3 são mostrados nas Figuras 4.37e e 4.37f. Essa geomembrana, ao apresentar uma matriz plana com macro asperezas mais espaçadas e geometricamente arredondadas, mostrou maior resistência na interface com o geotêxtil mais denso, o que pode ser devido à adesão proporcionada pelos atritos significativamente menores para a escala maior, onde um efeito velcro menor se faz mais notável. Enquanto isso, em interfaces com geomembrana lisa, o comportamento é variável com

a faixa de tensões normais, com valores de atrito maiores para maior tamanho de escala. Não foi observada influência nos valores de atrito do tipo de geotêxtil, como observado nas Figuras 4.37i e 4.37j. Assim, para geomembranas de matriz plana, a determinação dos parâmetros de cisalhamento da interface, por meio de ensaios de cisalhamento direto, forneceu ângulos de atrito secante que superestimam a resistência, ainda mais para interfaces com geotêxteis mais densos. Já para geomembranas lisas, um aumento da área de contato forneceu maiores valores do ângulo de atrito secante, recomendando-se determinar os parâmetros de resistência por meio do ensaio de CPI.

4.6.2. ITAC EM INTERFACES SOLO/SOLO

As interfaces chamadas de solo-solo são apenas os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados à areia e mostrados na Tabela 4.7 e que nesta pesquisa tiveram iguais valores pico e pós-pico para as duas áreas de contato (100 mm x 100 mm e 300 mm x 300 mm). Não foi evidenciada influência significativa com a variação do tamanho das amostras e caixas de ensaio, conforme relatos de vários autores (Palmeira & Milligan, 1991; Aguiar, 2008; Wu *et al.*, 2008a; Dadkhah *et al.*, 2010; Samanta *et al.*, 2018).

4.6.3. ITAC EM INTERFACES SOLO/GEOTÊXTEL NÃO TECIDO

As interfaces solo/geotêxtil não tecido tiveram uma tendência de diminuir o ângulo de atrito secante com o acréscimo da tensão normal e valores entre 31 a 39°. A amostra de solo ensaiado apresentou baixa compactidade, o que pode explicar a proximidade de valores do ângulo de atrito secante – mostrada na Figura 4.38a e Figura 4.38b. A ITAC foi considerada junto à influência da gramatura do geotêxtil, mostrando ângulos de atrito secante mais próximos para o geotêxtil de menor gramatura na maior escala. Com o aumento da escala a ruptura está mais relacionada ao deslizamento dos grãos do que seu intertravamento na interface, devido às tensões normais menores. E isso é o que ocorre no campo de fato.

O aumento das tensões e a redução do tamanho de amostra, produziu a intensificação da criação de sulcos por arado dos grãos de areia no geotêxtil, com alienação e tração dos fios do geotêxtil danificando-os, o que leva a ruptura a ocorrer num nível de deslocamento maior. Estes danos no geotêxtil não tecido são maiores para matriz balão com asperezas maior R_c e mais concentradas, fato também relatado por Martínez (2010).

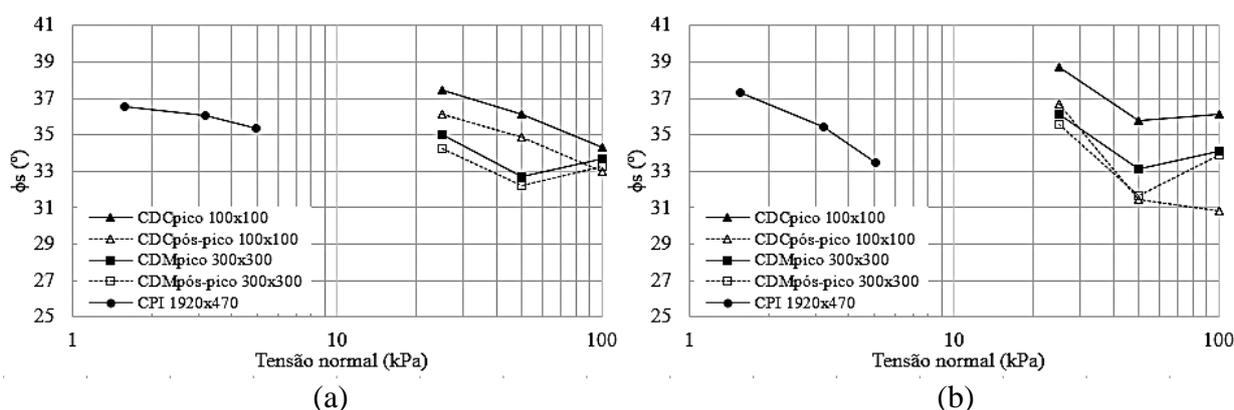


Figura 4.38. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces solo/geotêxtil: (a) 11. areia/GNT1 e (b) 12. areia/GNT2.

Por outro lado e como visto anteriormente, no estudo de Afzali-Nejad *et al.* (2017) mediante ensaios de cisalhamento direto em caixa quadrada de 100 mm de lado e 22 mm de altura de solo (Item 2.7.2) – foi postulada uma lei que relaciona a diferença entre os ângulos de atrito secante pico e residual com a dilatância máxima em interfaces de areia/geotêxtil tecido e de areia/aço rugoso. Embora essa lei seja válida para os ensaios realizados pelos autores, encontra-se limitada ao estudo feito por eles. Ao tentar reproduzir o trabalho de Afzali-Nejad *et al.* (2017), chegou-se a um resultado diferente devido ao efeito da escala para interfaces de areia e geotêxtil não tecido. Como pode ser observado na Tabela 4.11, as diferenças entre os ângulos de atrito de pico das envoltórias (ϕ_{ep}) e residual (ϕ_{er}), considerando $\phi_{er} = \phi_{ep}$, dependem da escala do ensaio empregada e, portanto, que a lei não pode ser ampliada a este tipo de interfaces que consideram diferentes tipos de escala.

Tabela 4.11. Diferença entre os ângulos de atrito de pico e residual das envoltórias segundo a escala.

Interface	Materiais	$(\phi_{ep} - \phi_{er})$ por ensaio/escala	
		CDC/menor	CDM/média
11	Areia/GNT1	2	1
12	Areia/GNT2	5	0

4.6.4. ITAC EM INTERFACES SOLO/GEOMEMBRANA TEXTURIZADA

A ITAC nas interfaces de solo/geomembrana pode ser observada na Figura 4.39, mostrando que a escala menor pode fornecer resultados que sobrestimam a resistência e que os resultados próximos para as escalas média e maior independentemente da faixa de tensões normais empregadas.

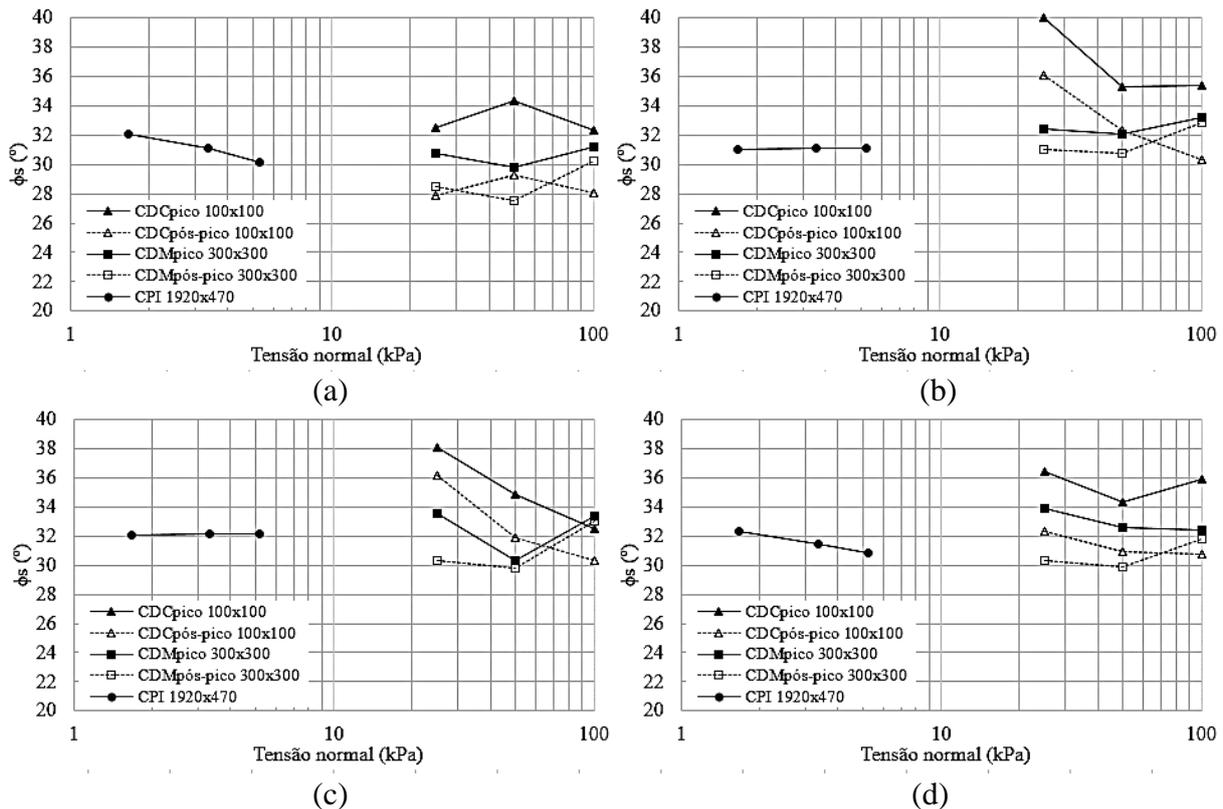


Figura 4.39. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces solo/geomembrana texturizada: (a) 13. areia/GMT1, (b) 14. areia/GMT2, (c) 15. areia/GMT3 e (d) 16. areia/GMT4.

Nos ensaios realizados não se evidenciou uma influência significativa do R_c das faces superiores nos resultados de resistência ao cisalhamento obtidos para a maior escala (CPI), isto para um aumento de 0,6 mm da R_c (0,18 mm até 0,24 mm) superior ao diâmetro médio da areia ($D_{50} = 0,43$ mm). Esta resposta difere dos relatos de Blond & Elie (2006) para interfaces com geomembranas de matriz balão ensaiadas em equipamento de ensaio de CDC, uma vez que os autores relatam um ganho de resistência até a altura de textura de 0,5 mm, valor a partir do qual os autores não observam um ganho significativo de resistência com o aumento da altura de

textura. Isso pode estar relacionado às escalas de trabalho, pois neste trabalho observou-se como aumento da área de contato influi na resposta ao cisalhamento das interfaces.

Por outro lado, foi comprovado que uma variação de V_{mc} de até 30% não foi significativa para a resistência ao cisalhamento e ainda menos na escala maior. Portanto, não se encontrou a influência na resistência ao cisalhamento com o aumento da densidade de concentração de asperezas e a diminuição de seu espaçamento comentada por Fowmes *et al.* (2017), os autores ensaiaram interfaces com amostras texturizadas por meio de impressora 3D e não amostras reais como neste trabalho, além de usar ensaios de CDC e considerar texturas com espaçamento maior ao das amostras deste trabalho.

Avaliando da aplicabilidade da lei definida por Afzali-Nejad *et al.* (2017) aos resultados desta pesquisa, foi feita uma análise similar à realizada para interfaces solo/geotêxtil. Comprovou-se que para as interfaces areia/geomembrana ensaiadas tampouco é válida a lei, com base aos resultados mostrados na Tabela 4.12 que expõem a divergência da diferença de $\phi_{ep} - \phi_{er}$ em relação à escala.

Tabela 4.12. Diferença entre os ângulos de atrito secante de pico e residual, segundo a escala.

Interface	Materiais	$(\phi_{ep} - \phi_{er})$ por ensaio/escala	
		CDC/menor	CDM/média
13	Areia/GMT1	5	1
14	Areia/GMT2	3	1
15	Areia/GMT3	2	1
16	Areia/GMT4	4	2

4.6.5. ITAC EM INTERFACES SOLO/GEOMEMBRANA LISA

Quando analisados os ângulos de atrito das envoltórias para interface solo/geomembrana lisa (Figura 4.40), observou-se que a maior diferença nos resultados de ângulo de atrito foi para a interface solo/GML1 (4°), em particular quando comparada aos ensaios de escala menor e média sob as tensões normais altas. Esse dado permite confirmar que o efeito de sulcado e de penetração dos grãos de areia na geomembrana aumentou com a área de contato em ensaios de cisalhamento direto, já que houve uma maior quantidade de grãos de solo em contato. No

entanto, nos ensaios de CDM foram obtidos resultados próximos aos ensaios de CPI, apesar de algumas divergências. Cabe salientar que as tensões normais aplicadas nos ensaios de CDM foram maiores do que as aplicadas no ensaio de CPI.

Também pode ser observado na Figura 4.40 como diminui a diferença entre ângulo de atrito de pico e de pós-pico com o aumento da área de contato, e como aumenta essa diferença para maior V_{mc} na menor área de contato (ensaio CDC). Para os ângulos de atrito secantes, observou-se um comportamento similar ao descrito para os ângulos das envoltórias, conforme os resultados na Figura 4.40. Descreve-se que os ensaios de maior escala obtiveram uma ruptura por deslizamento, com sulcos pouco profundos na geomembrana, tendo em vista as baixas tensões.

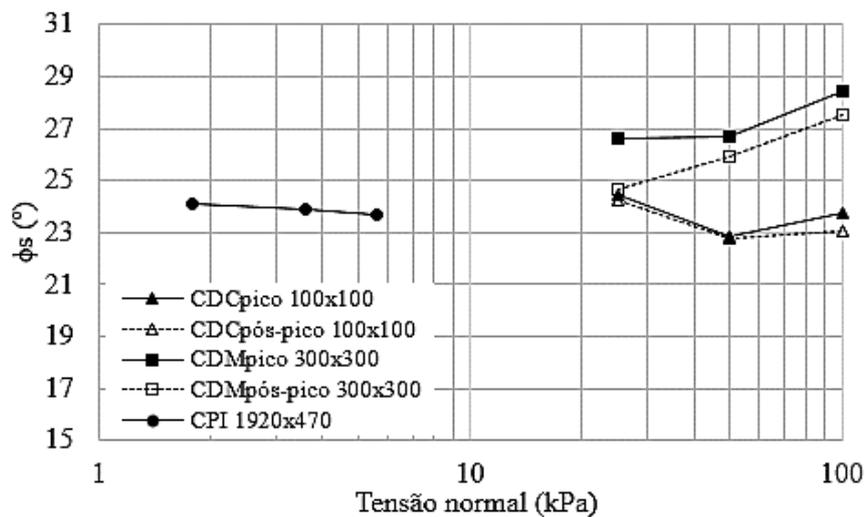


Figura 4.40. Variação do ângulo de atrito secante com as tensões normais e as áreas de contato das interfaces solo/geomembrana lisa (17. Areia/GML1).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho apresentou o estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais, visando um melhor entendimento do comportamento resistente ao cisalhamento em interfaces entre materiais presentes em obras geotécnicas. Baseando-se nos resultados obtidos, a seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas por este estudo, assim como as sugestões para pesquisas futuras.

5.1. CONCLUSÕES

5.1.1. ESTUDO DE INTERFACES DE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO/GEOMEMBRANA

Com o aumento da tensão normal, as macro asperezas das geomembranas texturizadas penetraram mais no geotêxtil e produziram uma interação no núcleo ou matriz desse último, enquanto os fios superficiais do geotêxtil interagiram com as micro asperezas, resultado similar ao apresentado por Martínez (2010). A resistência ao cisalhamento das interfaces mostrou-se influenciada, sob maiores tensões normais, pelo intertravamento entre fios dos geotêxteis nas asperezas das geomembranas, enquanto que para tensões normais menores, mostrou-se influenciada pelo efeito velcro (gancho - laço).

Os ensaios de CDC sob altas tensões mostraram valores mais próximos entre os ângulos de atrito secante para uma mesma interface. Estes, por sua vez, estavam próximos aos valores do ângulo de atrito das envoltórias.

Os resultados do ângulo de atrito dos ensaios CDM apresentaram maiores diferenças dentro da faixa de tensões normais menores, com ângulos de atrito secante e de envoltórias maiores do que as obtidas para a faixa de tensões normais maiores. Tal situação deve-se ao fato de que as interações entre os fios superficiais do geotêxtil com as geomembranas texturizadas, sob baixas tensões, são mais influenciadas pelas características das macro asperezas.

Nas interfaces com geomembrana lisa sob baixas e altas tensões normais, os ângulos de atrito das envoltórias diferem dos secantes, embora sejam próximos. Tendo em vista essas diferenças, caso a resistência de interface seja analisada por meio de envoltória ou de ângulo de atrito

secante, recomenda-se o emprego desse último para a determinação da resistência ao cisalhamento das interfaces. Justifica-se essa escolha porque tais valores são resultados diretos do ensaio e não de um ajuste matemático, o qual não consegue representar o comportamento real, embora mostre um bom ajuste matemático em relação aos resultados do ensaio.

Por fim, o efeito velcro nas interfaces com geomembranas para tamanhos de amostra maiores (ensaios de CPI) aumentou com a tensão normal e para geotêxteis mais densos. Isso ocorreu por haver uma maior quantidade de fios em contato com as asperezas da geomembrana. Esse efeito foi menor nas interfaces com geomembranas lisas de alturas de asperezas menor. Nas geomembranas lisas, obtiveram-se ângulos de atrito secantes maiores sob uma mesma tensão normal para maior área de contato ensaiada. Tal fato ocorreu pela maior quantidade de laços, o que aumentou as possibilidades de entrelaçamentos, concluindo-se que o ensaio de CPI é o que melhor caracteriza esse efeito e a resistência ao cisalhamento da interface.

5.1.2. ESTUDO DE INTERFACES SOLO/GEOSSINTÉTICO

As interfaces solo/geossintético mostraram que o cisalhamento de interfaces aconteceu para uma combinação de deslizamento e arado. Quando os grãos penetraram nas superfícies das geomembranas ou geotêxteis não tecidos, criando sulcos, pôde-se elevar a mobilização de resistência, o que conduziu a uma alta tensão cisalhante para maiores tensões normais e superfícies geossintéticas mais brandas. Esse comportamento é mais complexo do que o descrito para as interfaces de geotêxtil não tecido/geomembrana.

Ao estudar a influência da gramatura do geotêxtil nas interfaces por meio de ensaios de CPI e para dois geotêxteis de polipropileno de gramaturas 300 g/m² e 800 g/m², comprovou-se que essa variação de gramatura, embora seja grande, acarretou em apenas 2° de diferença nos ângulos de atrito das envoltórias, valor considerado dentro da margem de erro do equipamento empregado e pouco significativo.

Uma forte influência foi encontrada para diferentes condições de fronteira nos ensaios de CPI para a tensão inicial de 6,09 kPa. Embora os deslocamentos para ambas as condições (Travado e Livre) tenham começado a partir dos 10° de inclinação, a ruptura foi lenta na condição Livre (com lubrificação entre o geossintético e a rampa). Já na condição Travado (por meio do uso de

lixa), a ruptura foi rápida para um ângulo de inclinação maior. Tal fato deve-se à ocorrência de deformação do geotêxtil.

Das interfaces de solo/geossintético, as interfaces com geotêxtil mostraram eficiências superiores (87% – 94%) as das interfaces com geomembrana texturizada (78% - 92%) e as das interfaces com geomembrana lisa (62% - 75%).

O ensaio de CPI mostrou-se como o melhor para determinar a resistência das interfaces para baixas tensões, sobretudo pelos resultados com cada tipo de geossintético serem próximos. O ângulo de atrito das envoltórias para as interfaces com geotêxtis foi próximo a 35°. Para todas as interfaces com geomembranas texturizadas foram próximos a 31° e para as interfaces com geomembrana lisa foram de 24°.

5.1.3. ESTUDO DE INTERFACES CONCRETO EM ESTADO FRESCO/GEOSSINTÉTICO

Para as interfaces com concreto que atingiram a ruptura, notou-se a influência do abatimento, sendo o concreto com maior abatimento dosado, o que resultou em menor resistência. Esse resultado foi contrário ao obtido para a interface com geomembrana lisa por Viana (2007), que, por sua vez, empregou amostras compactadas, diferentemente do que foi feito nesta pesquisa.

Das interfaces ensaiadas, as menos resistentes foram as interfaces com geomembrana lisa – como esperado. Já as interfaces com geotêxtil não tecido mostraram ângulos de atrito superiores a tal caso. Por fim, as interfaces com geomembranas texturizadas foram as mais resistentes – como esperado –, com ângulos de inclinação da rampa superiores a 55°.

A partir dos ensaios realizados, notou-se que o mecanismo de ruptura das interfaces concreto/geotêxtil não tecido foi influenciado pela: i) forma de compactação do concreto, ii) gramatura do geotêxtil e iii) abatimento do concreto. Foi observado, ainda, que durante o ensaio houve uma mudança do comportamento no mecanismo de ruptura.

5.1.4. CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MICROTOPOGRAFIA DAS GEOMEMBRANAS NO ÂNGULO DE ATRITO DE INTERFACES

Foram encontradas diferenças significativas quando os parâmetros da microtopografia foram determinados pelo método do perfil de rugosidade e pelo método de análise da superfície.

Para as geomembranas empregadas nesta pesquisa, quando já foi considerado o ensaio de CPI como o que melhor caracteriza o estudo das interfaces, foram obtidas diferenças nos valores do ângulo de atrito. Essas diferenças foram significativas nas interfaces de geotêxtil não tecido/geomembrana texturizada, mostrando que as interfaces com geomembranas de matriz balão possuem uma aderência maior do que as obtidas para interfaces com geomembranas de matriz plana. Esse fato resulta pela geomembrana de matriz balão ter maior densidade de concentração de macro e micro asperezas, independentemente da densidade do material das asperezas, embora a altura das asperezas da geomembrana de matriz plana tenha sido próxima duas vezes a altura das asperezas das geomembranas de matriz balão. Para as interfaces solo/geomembrana texturizada, essas diferenças não foram significativas.

Nas interfaces de concreto fresco/geomembrana texturizada, quando comparadas com as interfaces com geomembranas lisa, evidenciou-se um aumento considerável da resistência ao cisalhamento, a qual propiciou as texturas, independentemente do tipo de matriz e microtopografia.

5.1.5. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ÁREA DE CONTATO NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACES

Ao estudar a influência do tamanho da área de contato, deve-se lembrar que os ensaios para a escala maior seguem um comportamento e mobilização de resistência diferente ao das escalas menor e média, em especial por se tratar de um ensaio de plano inclinado com variação das tensões normais. Esse dado influenciou nos resultados das interfaces de geotêxtil não tecido e geomembranas com GMT2 e GMT4 (3, 4, 8 e 9) para a maior escala, com uma diferença significativa quando comparado com a escala média para baixas tensões normais. Sob tensões maiores, essas diferenças são menos significativas, atingindo maiores valores com o aumento da R_c .

Nas interfaces “solo/geotêxtil não tecido” com o aumento da escala, a ruptura foi mais por deslizamento que por intertravamento do solo na interface, tendo em vista as tensões normais menores. Os valores do ângulo de atrito secante foram próximos para essas interfaces, o que pode ser resultado da baixa compactação da areia.

Nas interfaces “solo/geomembrana”, a diferença $\phi_{ep} - \phi_{epP}$ aumentou diretamente com o valor de V_{mc} para o caso da menor escala, permanecendo essa diferença praticamente constante para a escala média, com o aumento de V_{mc} ; para os ensaios de CPI, a diferença foi nula para todas as interfaces.

Os resultados de ângulo de atrito das envoltórias foram próximos (31°) para todas as interfaces “solo/geomembrana texturizada”, permitindo concluir que, para os ensaios e materiais empregados, quanto maior for o tamanho da área de contato considerada, menor influência tem a R_c , a densidade da concentração de asperezas, a densidade do material das geomembranas e o seu tipo de matriz.

De forma geral, recomenda-se o ensaio de plano inclinado em grande escala para a determinação em laboratório da resistência ao cisalhamento de interfaces em obras inclinadas e sob baixas tensões. Essa recomendação está relacionada ao fato de que os ensaios de menor escala (CDC e CDM) mostraram uma superestimação da resistência ao cisalhamento de interface. Do mesmo modo, verificou-se que as influências da microtopografia nas interfaces não se manifestou em áreas de contato maiores (CPI).

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados e conclusões obtidas na presente tese, foram delineadas as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Definir um coeficiente de redução ou acréscimo da resistência de interfaces para as condições de fronteira reais em obras, em especial por meio de ensaios de laboratório e de campo que mostrem o comportamento real em obras.

- Avaliar o efeito das rugas que surgem na colocação da geomembranas em obras quanto à resistência ao cisalhamento das interfaces.
- Realizar ensaios de interfaces com concreto que permitam subir a rampa até inclinações maiores àquelas citadas neste estudo, garantindo, assim, o alcance da ruptura para as interfaces com geomembranas texturizadas.
- Continuar explorando qual parâmetro de rugosidade consegue representar a densidade da concentração de asperezas, assim como utilizar outros tipos de microscópios que forneçam parâmetros de espaçamento das asperezas.
- Quantificar a contribuição da resistência ao cisalhamento de interfaces com altura máxima das asperezas e densidade de concentração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, E.J. & Firestone, F.A. (1933). Specifying surface quality: a method based on accurate measurement and comparison". *Mechanical Engineering*, (55): 569–572.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984a). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984b). NBR 7181: Solo - análise granulométrica.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1990). NBR 12004 MB - 3324: Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). NBR 12051 MB-3388: Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). NBR ISO 4287:2002 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). NBR 15849 Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013a). NBR ISO 10318 Geossintéticos — Termos e definições.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013b). NBR ISO 12957.1: Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013c). NBR ISO 12957.2: Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio de Plano Inclinado.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013d). NBR ISO 9864: Geossintéticos — Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.
- Abramento, M., Viana, P.M.F. & Palmeira, E.M. (2010). Geomembrane - fresh concrete interface friction from ramp equipment and field tests. *9th International Conference on Geosynthetics*. 657-660.
- ACCRETCH TOKYO SEIMITSU. (2017). Explanation of surface characteristics. Standards. Manual. URL: <http://www.inspectionengineering.com/Images/SurfaceFinishExplain.pdf>.
- Afonso, M.R.F.L. (2009). Ensaio de corte directo na caracterização da interface solo-geossintético : efeito da variação da tensão normal. Dissertação de Mestrado. Universidade de Porto. Portugal. 82p.
- Afzali-Nejad, A., Lashkari, A. & Shourijeh, P.T. (2017). Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(1): 54–66.

- Aguiar, V.R. de. (2003). Ensaio de rampa para estudo da resistência de interfaces solo-geossintético. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil. 121p.
- Aguiar, V.R. de. (2008). Resistência de Interfaces Solo-Geossintético - Desenvolvimento de Equipamento e Ensaio. Tese de Doutorado. PUC-Rio. Brasil. 373p.
- BIDIM. (2016). Catálogo de Produtos [WWW Document]. LINHA BIDIM PP Geotêxtil não Tecido PP. URL <http://www.bidim.com.br/produto/linha-bidim-pp/>
- Bidim [WWW Document]. (2014). Proj. Formoso A com uso geotêxtil bidim, geomembrana pvc e concreto. <http://www.bidim.com.br/casosdeobra/revestimento-de-canais-de-irrigacao-do-projeto-formoso-a-com-uso-de-geotextil-bidim-geomembrana-de-pvc-e-concreto/>
- Blond, E. & Elie, G. (2006). Interface shear-strength properties of textured polyethylene geomembranes. Solmax International, Quebec, Canada. 7p.
- Bouazza, M. & Zornberg, J. (2014). Geossintéticos em Aterros Sanitários. *International Geosynthetic Society – IGS*. [Documento WWW] <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/4.pdf>
- Bresciani, E. (2011). Obras de transposição do rio São Francisco estão abandonadas - Vídeos - TV.Estadão. <http://tv.estadao.com.br/videos,obras-de-transposicao-do-rio-sao-francisco-estao-abandonadas,154174,260,0.htm>
- Briançon, L., Girard, H. & Gourc, J.P. (2011). A new procedure for measuring geosynthetic friction with an inclined plane. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(5): 472–482.
- Briançon, L., Girard, H. & Poulain, D. (2002). Slope stability of lining systems—experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(3): 147–172.
- Carbone, L., Briançon, L., Gourc, J.P., Moraci, N. & Carrubba, P. (2012). Geosynthetic interface friction using force procedure at the tilting plane. 6p.
- Carbone, L., Gourc, J.P., Briançon, L., Moraci, N. & Carrubba, P. (2013). What Value of Interface Friction to Select for Geosynthetic Liner on Landfill Slopes. *Geosynthetics 2013*. Long Beach, California. USA. 9p.
- Colmanetti, J.P. (2006). Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. 272p.
- Lopes, C.C.P.F. (2000). Estudo da interação solo-geossintético através de ensaios de corte em plano inclinado. Dissertação de Mestrado. Universidade de Porto. Portugal. 194p.
- Dadkhah, R., Ghafouri, M., Ajalloeian, R. & Lashkaripour, G.R. (2010). The effect of scale direct shear test on the strength parameters of clayey sand in isfahan city, Iran. *Journal of Applied Sciences*: 7p.
- Departamento Técnico - Atividade Bidim. (2011). Revestimento de canais de irrigação do “projeto formoso a”; com uso de geotêxtil bidim, geomembrana de pvc e concreto. E-BIDIM, 2: 17p.

- Dove, J., Bents, D., Wang, J. & Gao, B. (2006). Particle-scale surface interactions of non-dilative interface systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(3): 156–168.
- Dove, J.E. & Frost, J.D. (1996). A method for measuring geomembrane surface roughness. *Geosynthetics International*, 3(3): 369–392.
- Dove, J.E., Frost, J.D. & Dove, P.M. (1996). Geomembrane microtopography by atomic force microscopy. *Geosynthetics International*, 3(2): 227–245.
- Duhwan, K. & J. David, F. (2005). Multi-scale assessment of geotextile-geomembrane interaction. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA USA. 12p.
- ENGEPOL. (2016). Catálogo de Productos. Geomembrana Texturizada. URL <http://engepol.com/geomembrana-texturizada/>
- Feng, S. J., Liu, X., Chen, H.X. & Zhao, T. (2017). Micro-mechanical analysis of geomembrane-sand interactions using dem. *Computers and Geotechnics*. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.08.019>
- Fleming, I.R., Sharma, J.S. & Jogi, M.B. (2006). Shear strength of geomembrane–soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(5): 274–284.
- Fowmes, G.J., Dixon, N., Fu, L. & Zaharescu, C.A. (2017). Rapid prototyping of geosynthetic interfaces: investigation of peak strength using direct shear tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6): 674–687.
- Frost, D.J., Kim, D. & Lee, S.-W. (2012). Microscale geomembrane-granular material interactions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(1): 79–92.
- Frost, J.D., Zettler, T.E., DeJong, J.T., Lee, S.W. & Kagbo, S. (2002). Strain induced changes in geomembrane surface topography. *Geosynthetics International*, 9(1): 21–40.
- Girard, H., Fischer, S. & Alonso, E. (1990). Problems of friction posed by the use of geomembranes on dam slopes - examples and measurements. *Geotextiles and Geomembranes*, 9(2): 129 -143.
- Giroud, J., Swan, R., Richter, P. & Spooner, P. (1990). Geotextiles, geomembranes, and related products. *Proceedings of the 4th international conference on geotextiles, geomembranes, and related products, the hague*, 28 may-1 june 1990.
- Giroud, J.P. & Ah-Line, C. (1984). Design of earth and concrete covers for geomembranes. *Proceedings of the International Conference on Geomembranes*, 487–492.
- Giroud, J.P., Darrasse, J. & Bachus, R.C. (1993). Hyperbolic expression for soil-geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic interface shear strength. *Geotextiles and Geomembranes*, 12(3): 275–286.
- Gourc, J., R.Reyes-Ramirez & P.Villard. (2004). Assessment of geosynthetics interface friction for slope barriers of landfill. *Proceedings of 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, 116–149.
- Gourc, J.P., Lalarakotoson, S., Müller-Rochholz, H. & Bronstein, Z. (1996). Friction measurement by direct shearing or tilting process - development of a european standard. *First European Geosynthetics Conference. EUROGEO 1*. Balkema, Rotterdam. ISBN 90

5410 836 3: 1039-1046.

- Gourc, J.P. & Reyes Ramirez, R. (2003). Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship. *Geosynthetics International*, 10(5): 165–175.
- Gourc, J.P. & Reyes Ramírez, R. (2004). Dynamics-based interpretation of the interface friction test at the inclined plane. *Geosynthetics International*, 11(6): 439–454.
- Hebeler, G., Frost, J. & Myers, A. (2005). Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane?geotextile systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(1): 77–105.
- Hsieh, C. & Hsieh, M.-W. (2003). Load plate rigidity and scale effects on the frictional behavior of sand/geomembrane interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(1): 25–47.
- Izgin, M. & Wasti, Y. (1998). Geomembrane–sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 16(4): 207–219.
- Janoo, V. (1998). Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials. *CRREL Special Report 98-1*, (January), 22 p.
- Jewell, R. (1996). Soil Reinforcement with Geotextiles. *Special Publication. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA)*.
- Kim, D. (2006). Multi-scale assessment of geotextile-geomembrane interaction. Thesis Presented to The Academic Faculty. Georgia Institute of Technology. GA USA. 276p.
- Kishida, H. & Uesugi, M. (1987). Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus. *Géotechnique*, 37(1): 45–52.
- Koerner, R.M. (2000). Emerging and future developments of selected geosynthetic applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*: 293–306.
- Koerner, R.M., Horton, M.J., Hall, P.P., Education, P., River, U.S., Kong, H., Canada, P.E. & Education-japan, P. (2005). *Designing with Geosynthetics*. Fifth Edit. New Jersey. USA.
- Koutsourais, M.M., Sprague, C.J. & Pucetas, R.C. (1991). Interfacial friction study of cap and liner components for landfill design. *Geotextiles and Geomembranes*, 10(5–6): 531–548.
- Lalarakotoson, S., Villard, P. & Gourc, J.P. (1999). Shear strength characterization of geosynthetic interfaces on inclined planes. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, No.4, 22: 284–291.
- Leach, R. (2013). Introduction to surface topography. Characterisation of Areal Surface Texture, *Springer Berlin Heidelberg*, Berlin, Heidelberg, pp. 1–13.
- Lima Júnior, N.R. (2000). Estudo da interação solo-geossintético em obras de proteção ambiental com o uso do equipamento de plano inclinado. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasil. 148p.
- Lings, M.L. & Dietz, M.S. (2005). The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation. *Soil and foundations*, 45(6): 1–14.
- Lotti, C.L., Bueno, B.S. & Vertematti, J.C. (2015). Matérias primas. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, Blucher, São Paulo: 31–46.

- Luna, H. de A. (2013). *Manutenção Em Canais De Irrigação Revestidos Em Concreto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. 136p.
- Marinho, R. (2000). Aulas metrologia. *Metrologia. Telecurso 2000. Profissionalizante*, Fundação Roberto Marinho (Ed.), São Paulo, p. 240.
- Martínez, A.B., Konietzky, H., Berini, J.C. & Sagaseta, C. (2011). A new constitutive model for textured geomembrane/geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(2): 137–148.
- Martínez, A.B.B. (2010). *Comportamiento resistente al deslizamiento de geosintéticos*. Tesis de Doctorado. Universidad de Cantabria. España. 474p.
- Mello, L.G.R. De. (2001). *Estudo da interação solo-geossintético em taludes de obras de disposição de resíduos*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasil. 137p.
- Mello, L.G.R. De, Lima Júnior, N.R. & Palmeira, E.M. (2003). Estudo da interação entre interfaces de solos e geossintéticos em taludes de áreas de disposição de resíduos. *Soils and Rocks*, 1(26): 19–35.
- Mitchell, J.K., Seed, R.B. & Seed, H.B. (1990). Stability considerations in the design and construction of lined waste depositories. *Geotechnics of Waste Fills—Theory and Practice, ASTM STP 1070, Geotechnics of Waste Fills—Theory and Practice, Landva, A. & Knowles, D.G. (Eds.), Philadelphia*, p. 209–224.
- MITUTOYO. (2014). Surface Finish Analysis. URL <https://www.gagesite.com/documents/Training/Mitu>
- Miuzzi, M. (2013). *Inclined plane tests: determination of friction on geosynthetic interfaces*. Tesi di laurea. UNIVERSITA' degli STUDI di PADOVA. Itália. 129p.
- Monteiro, C.B. (2012). *Estudo de interface solo-geomembrana como variações de níveis de saturação do solo*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasil. 131p.
- Monteiro, C.B., Araújo, G.L.S. & Palmeira, E.M. (2014). Friction measurement by direct shearing or tilting process - getinfo. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, (4) : 3053-3056.
- Morgado, M.A. (2008). *Impermeabilização de canais de rega a céu aberto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Portugal. 105p.
- Narejo, D.B. (2003). A simple tilt table device to measure index friction angle of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(1): 49–57.
- O'Rourke, T.D., Druschel, S.J. & Netravali, A.N. (1990). Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(3): 451–469.
- OLYMPUS. (2018). LEXT OLS4100 Industrial Laser Confocal Microscopes - Olympus 3D Laser Measuring Solution [WWW Document]. URL <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/ols4100/>
- Palmeira, E.M. (1987). *The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests*. Thesis. University of Oxford. 237p.

- Palmeira, E.M. (2009). Soil–geosynthetic interaction: modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5): 368–390.
- Palmeira, E.M. & Milligan, G.W.E. (1991). Scale effects in direct shear tests on sand. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 28(6): A340.
- Piratelli, A. (2011). Rugosidade superficial. 3º Seminário de Metrologia, Universidade de Brasília,: 41p.
- Pitanga, H.N. (2008). Caracterização dos comportamentos hidráulico e mecânico de geocompostos bentoníticos e de outros sistemas geossintéticos destinados às camadas de cobertura de aterros sanitários. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Brasil. 403p.
- Pitanga, H.N., GOURC, J.-P. & MONJE VILAR, O. (2011). Enhanced measurement of geosynthetic interface shear strength using a modified inclined plane device. *ASTM geotechnical testing journal*, 34(6): 643–652.
- Pitanga, H.N., Gourc, J.-P. & Vilar, O.M. (2009). Interface shear strength of geosynthetics: evaluation and analysis of inclined plane tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6): 435–446.
- Potyondy, J.G. (1961). Skin friction between various soils and construction materials. *Géotechnique*, 11(4): 339–353.
- Punetha, P., Mohanty, P. & Samanta, M. (2017). Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3): 197–210.
- ROMA. (2010). Consórcio OAS – Transposição do Rio São Francisco - Indústria ROMA - Geossintéticos, Telas e Filmes plásticos [WWW Document]. URL <http://www.roma.ind.br/2016/11/consorcio-oas-transposicao-do-rio-sao-francisco/>
- Samanta, M., Punetha, P. & Sharma, M. (2018). Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface. *Geomechanics and Engineering*, 14(4): 387–398.
- Sánchez, N.P., Araújo, G.L.S. & Palmeira, E.M. (2015). Estudo multi-escala da resistência ao cisalhamento da interface entre geotêxtil não tecido e solo. *Anais do COBRAMSEG 2016*. 7p.
- Stoltz, G., Gallo, R. & Poulain, D. (2012). Testing procedure with an inclined plane device to assess the residual friction characteristics at geosynthetics interfaces. *5th European Geosynthetics Congress*, : 1–5.
- Subba Rao, K.S., Rao, K.S.S., Allam, M.M. & Robinson, R.G. (1998). Interfacial friction between sands and solid surfaces. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 131(2): 75–82.
- TDM Brasil. (2016). Catálogo de produtos [WWW Document]. Geomembranas PEAD e PEBD,. URL <http://www.tdmbrasil.com.br/listaproductos/geomembranas/>
- Tupa, N. (1994). Estudo da aderência e interação solo-geossintético. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasil, 188p.

- Tupa, N. & Palmeira, E.M. (1995). Estudo da interação entre geossintéticos e solos finos e entre diferentes tipos de geossintéticos. *Revista Solos e Rochas*, 18(n. 2): 31–41.
- Uesugi, M. & Kismda, H. (1986). Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. *Soils and Foundations*: 139–149.
- Vangla, P. & Gali, M.L. (2016a). Shear behavior of sand-smooth geomembrane interfaces through micro-topographical analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(4): 592–603.
- Vangla, P. & Gali, M.L. (2016b). Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3): 254–268.
- Viana, H.N. de L. (2003). Estabilidade de taludes de áreas de disposição de resíduos revestidos com geossintéticos: influencia da presença de geogrelhas. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasil. 94p.
- Viana, H.N. de L. (2007). Estudos da estabilidade e condutividade hidráulica de sistemas de revestimento convencionais e alternativos para obras de disposição de resíduos. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasil. 259p.
- Vidal, I.G. (2006). Contrato turn-key de instalação de geomembranas. *Revista Engenharia*. p 96-98.
- Wasti, Y. & Özdüzgün, Z.. (2001). Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(1): 45–57.
- Wu, P.K., Matsushima, K. & Tatsuoka, F. (2008a). Effects of specimen size and some other factors on the strength and deformation of granular soil in direct shear tests. *Geotechnical Testing Journal*. 31(1):45-64
- Wu, W., Wang, X.T. & Aschauer, F. (2008b). Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(4): 363–370.
- Wu, W., Wick, H., Ferstl, F. & Aschauer, F. (2008c). A tilt table device for testing geosynthetic interfaces in centrifuge. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1): 31–38.

APÊNDICE: ENVOLTÓRIAS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO

A-1: ENVOLTÓRIAS PARA BAIXAS TENSÕES NORMAIS

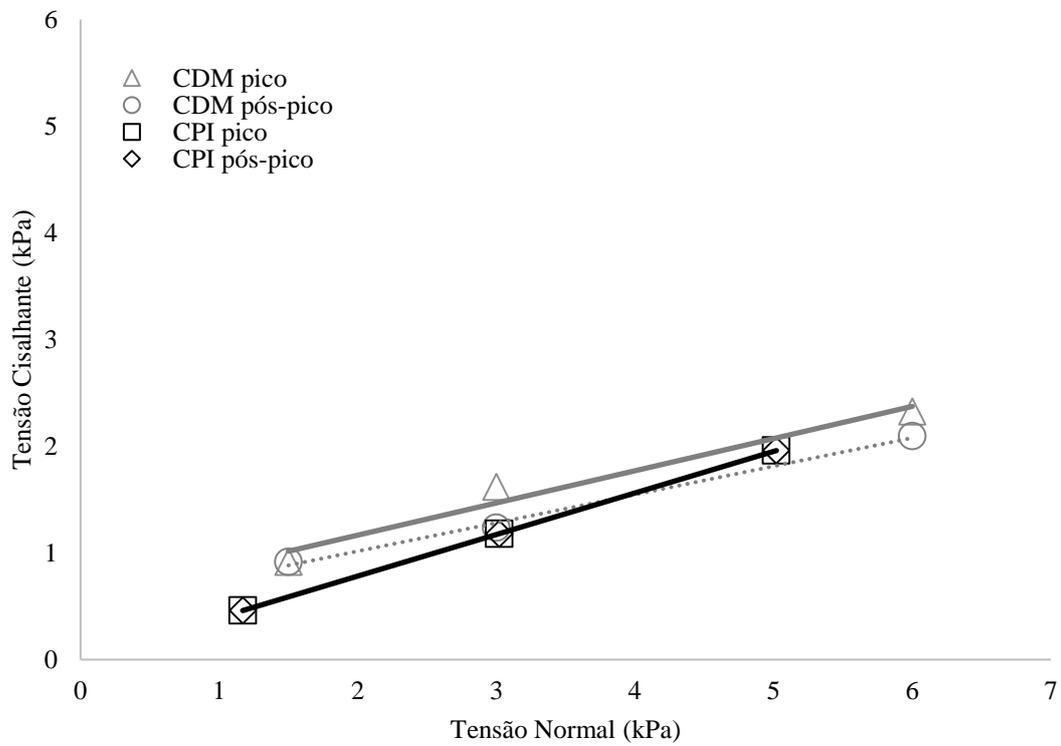


Figura A-1.1. Envoltórias para interface 1: GNT1/GMT1.

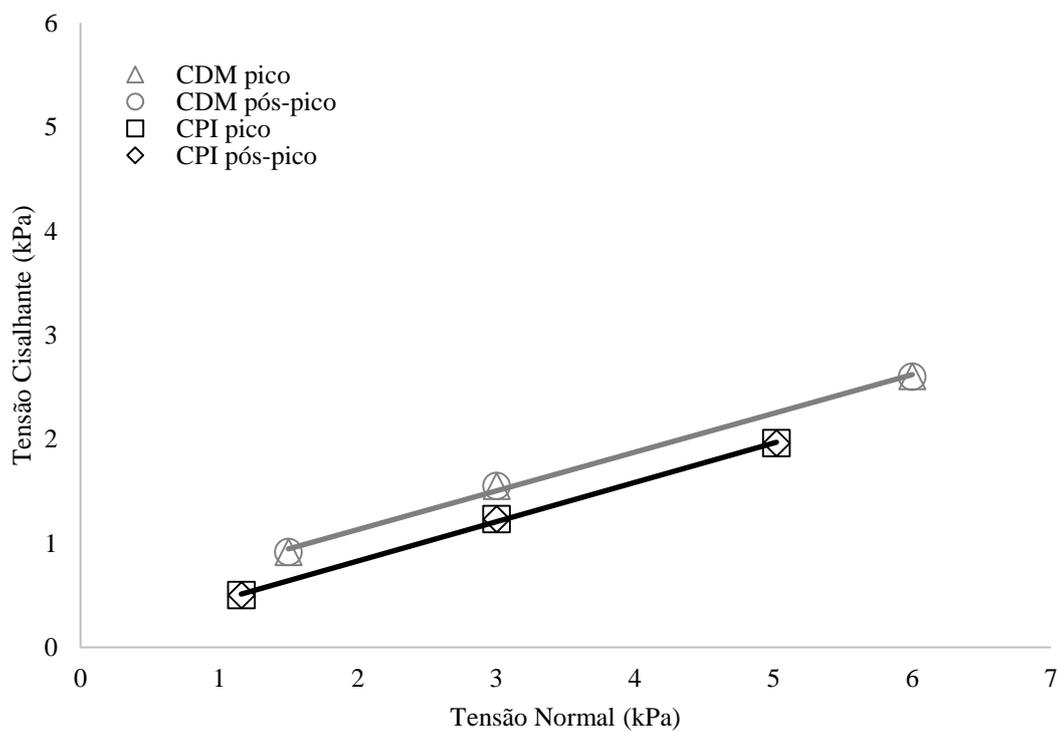


Figura A-12. Envoltórias para interface 2: GNT2/GMT1.

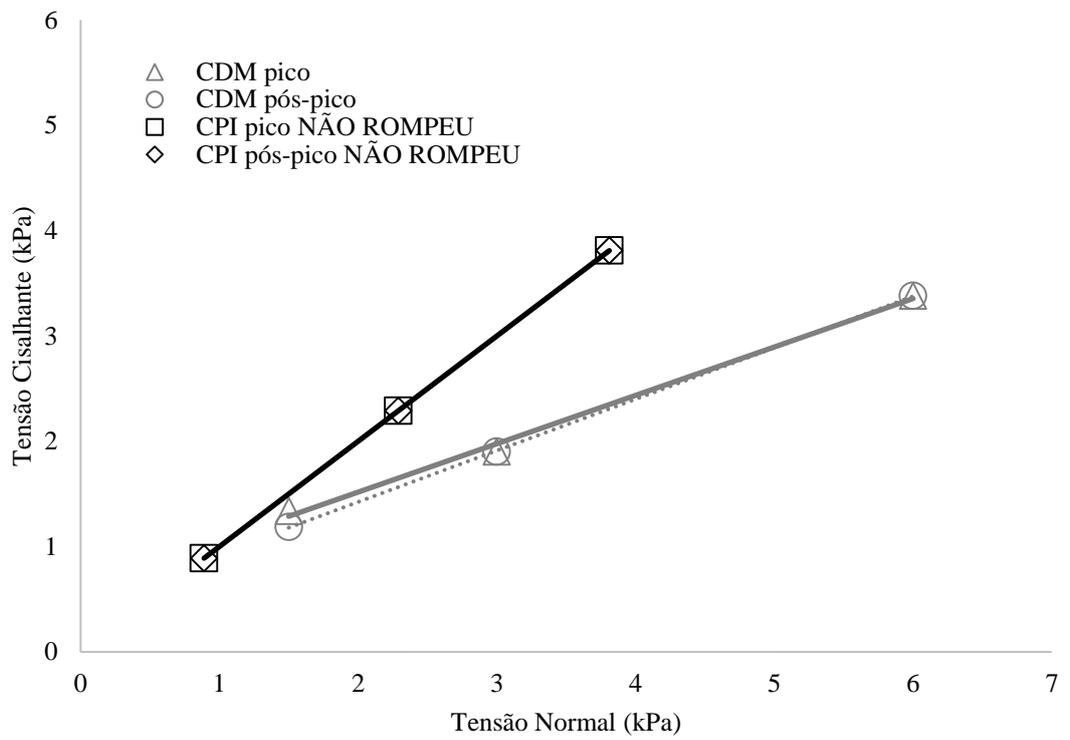


Figura A-1.3. Envoltórias para interface 3: GNT1/GMT2.

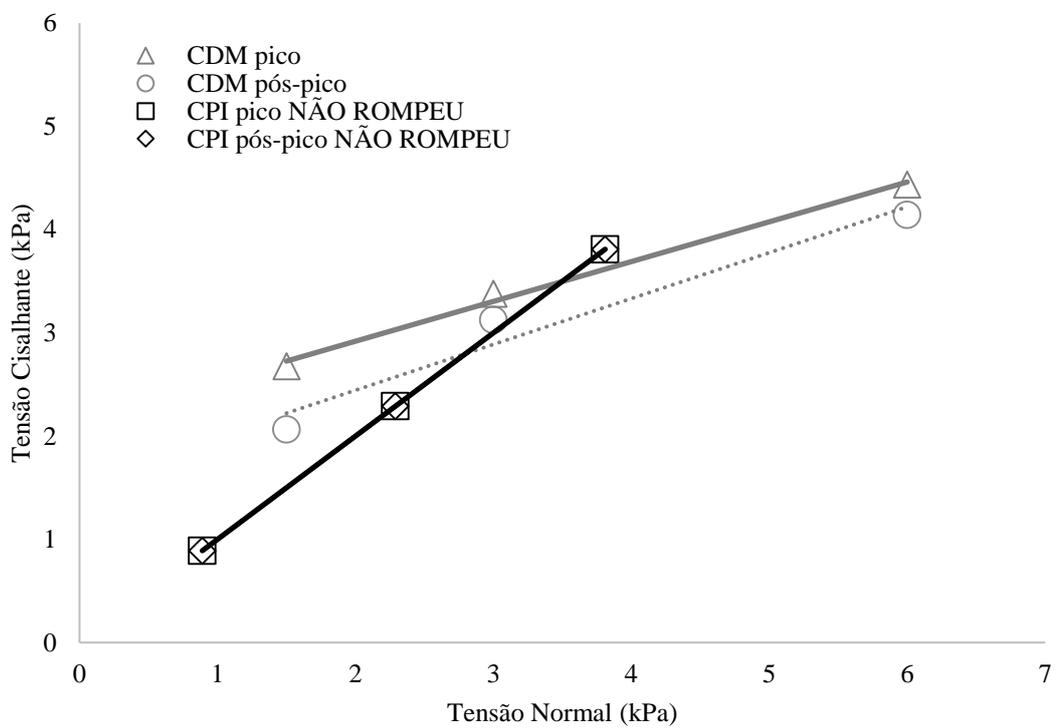


Figura A-1.4. Envoltórias para interface 4: GNT2/GMT2.

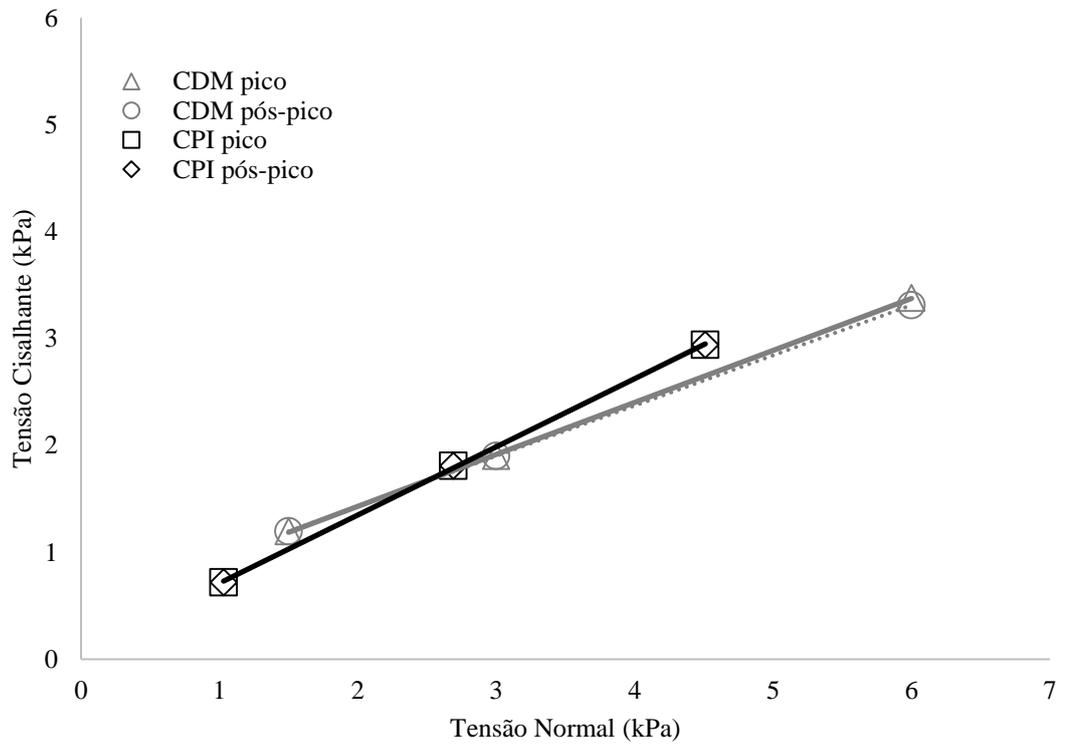


Figura A-1.5. Envoltórias para interface 5: GNT1/GMT3.

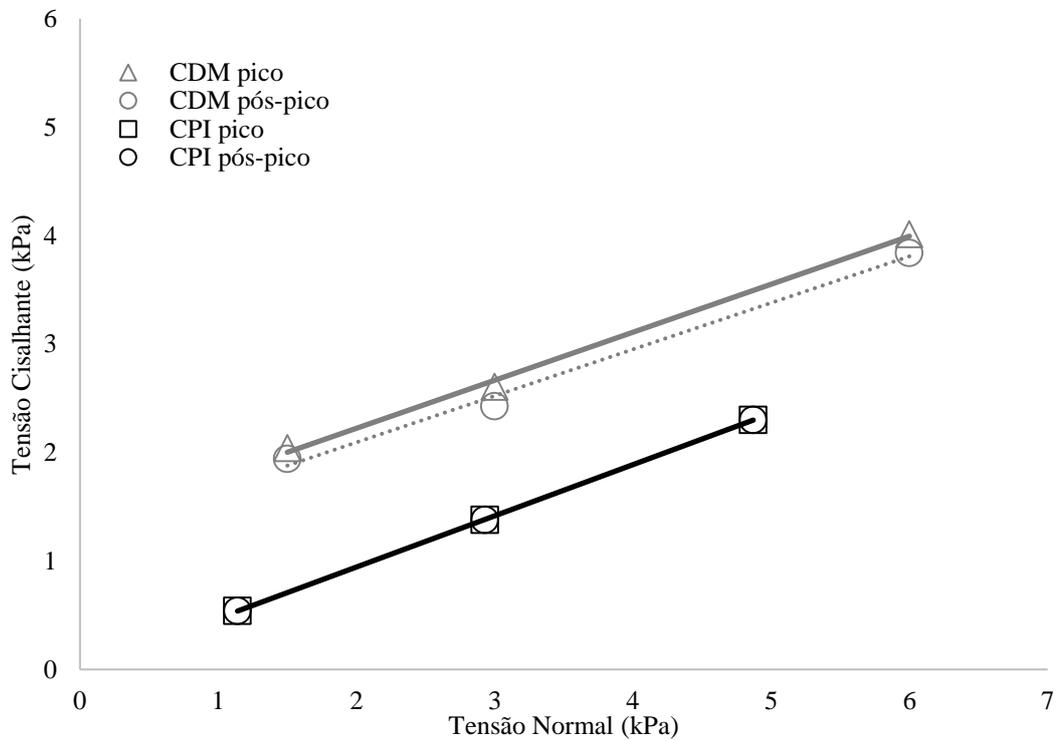


Figura A-1.6. Envoltórias para interface 6: GNT2/GMT3.

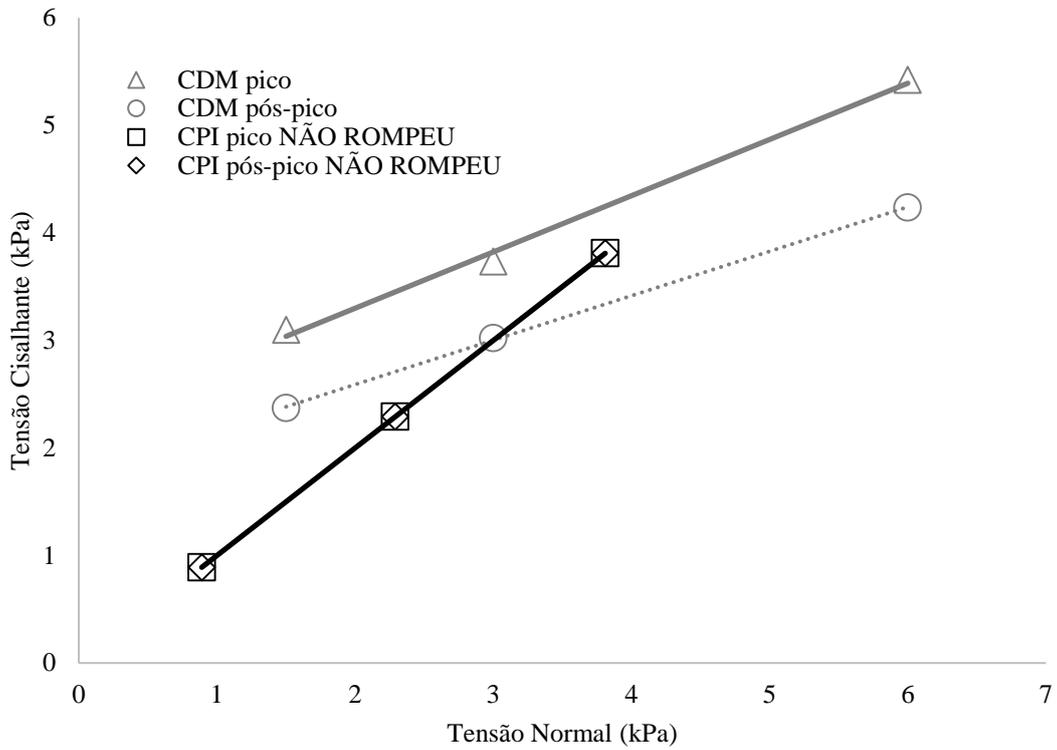


Figura A-1.7. Envoltórias para interface 7: GNT1/GMT4.

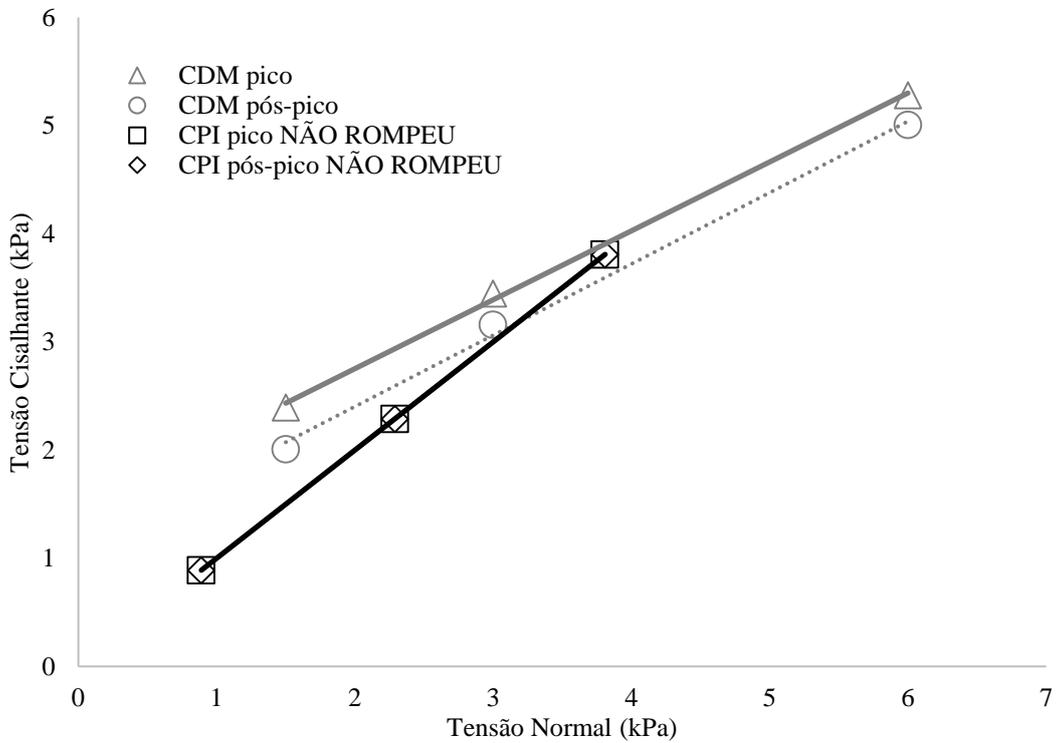


Figura A-1.8. Envoltórias para interface 8: GNT2/GMT4.

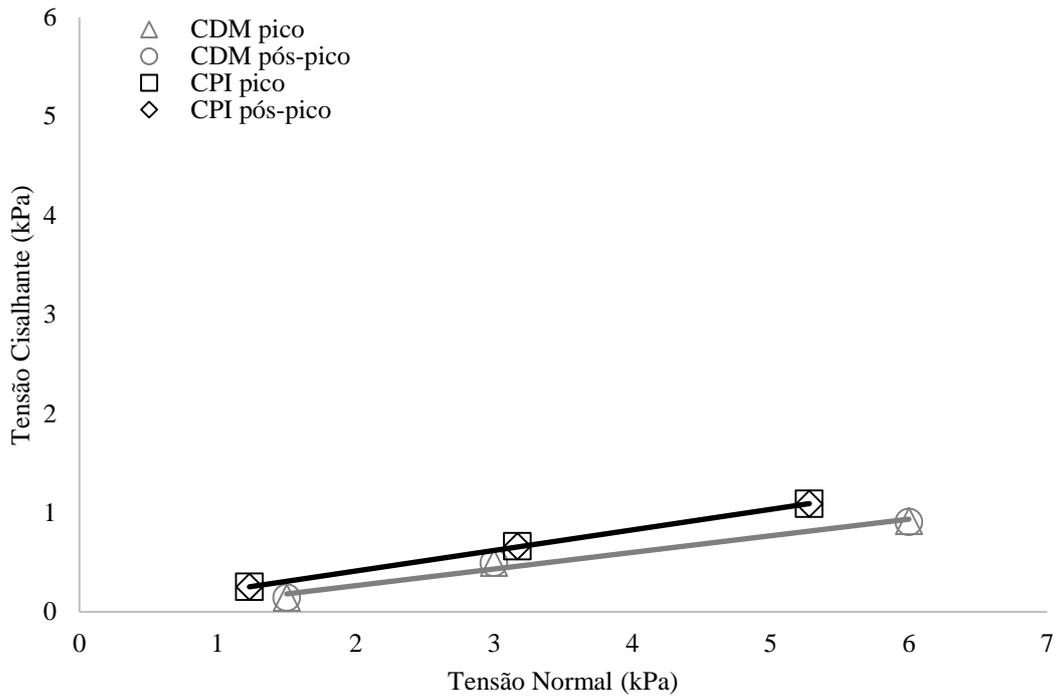


Figura A-1.9. Envoltórias para interface 9: GNT1/GML1.

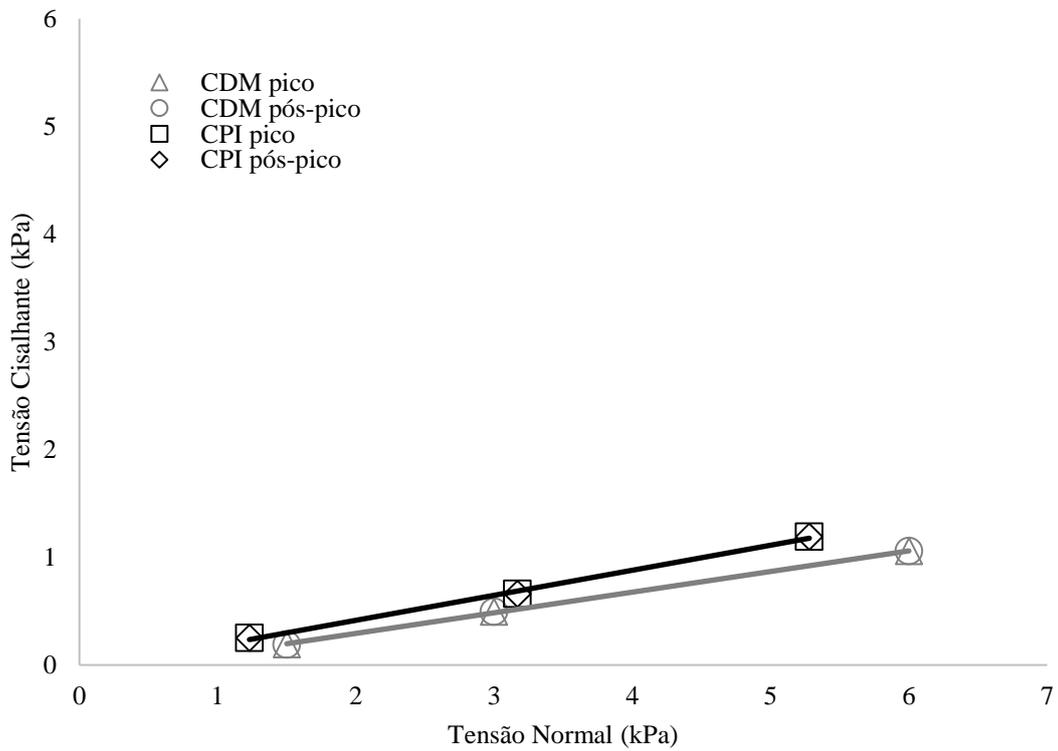


Figura A-1.10. Envoltórias para interface 10: GNT2/GML1.

A-2: ENVOLTÓRIAS PARA ALTAS TENSÕES NORMAIS

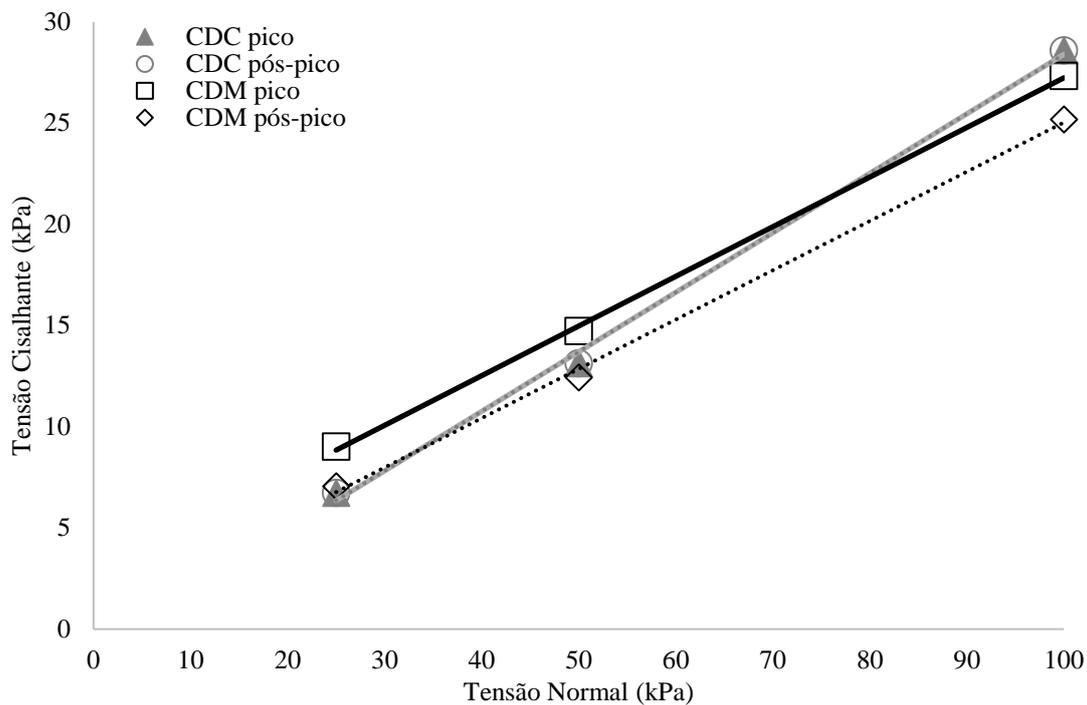


Figura A-2.1. Envoltórias para interface 1: GNT1/GMT1.

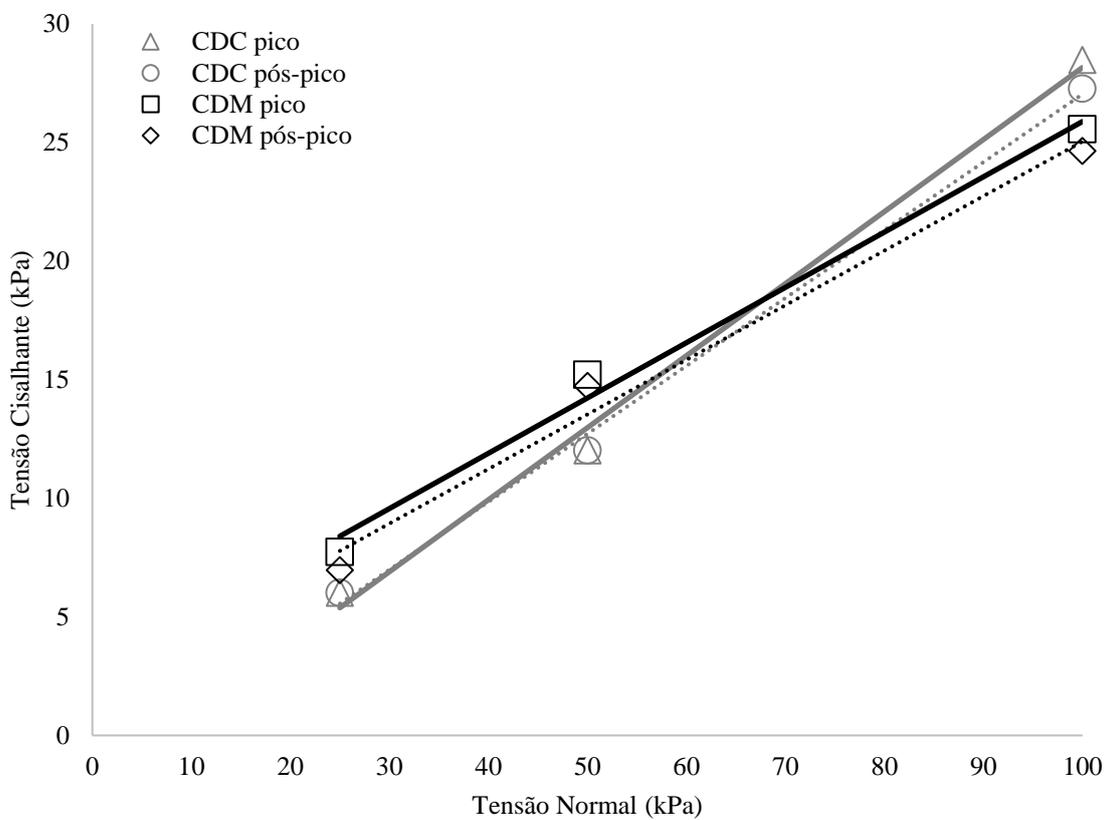


Figura A-2.2. Envoltórias para interface 2: GNT2/GMT1.

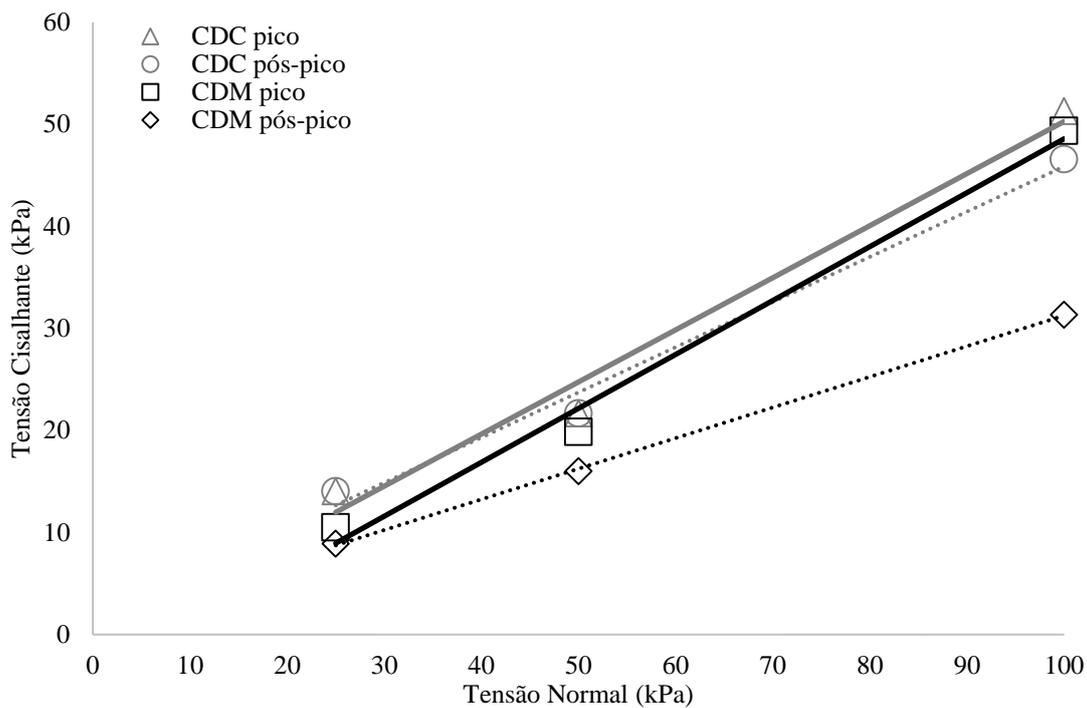


Figura A-2.3. Envoltórias para interface 3: GNT1/GMT2.

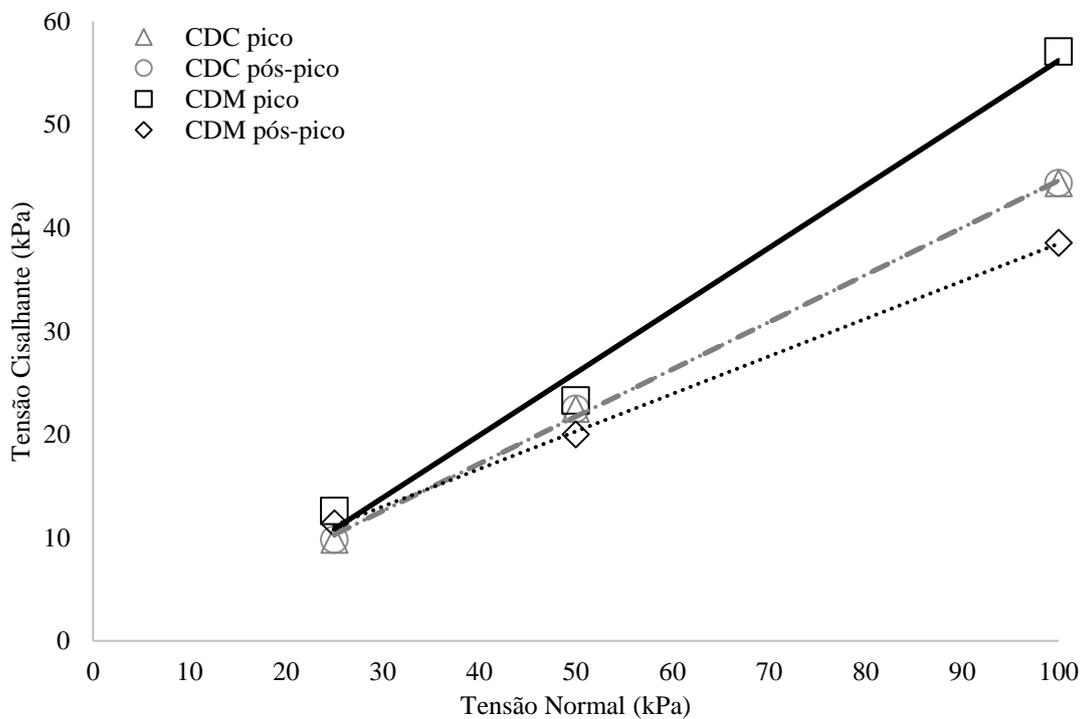


Figura A-2.4. Envoltórias para interface 4: GNT2/GMT2.

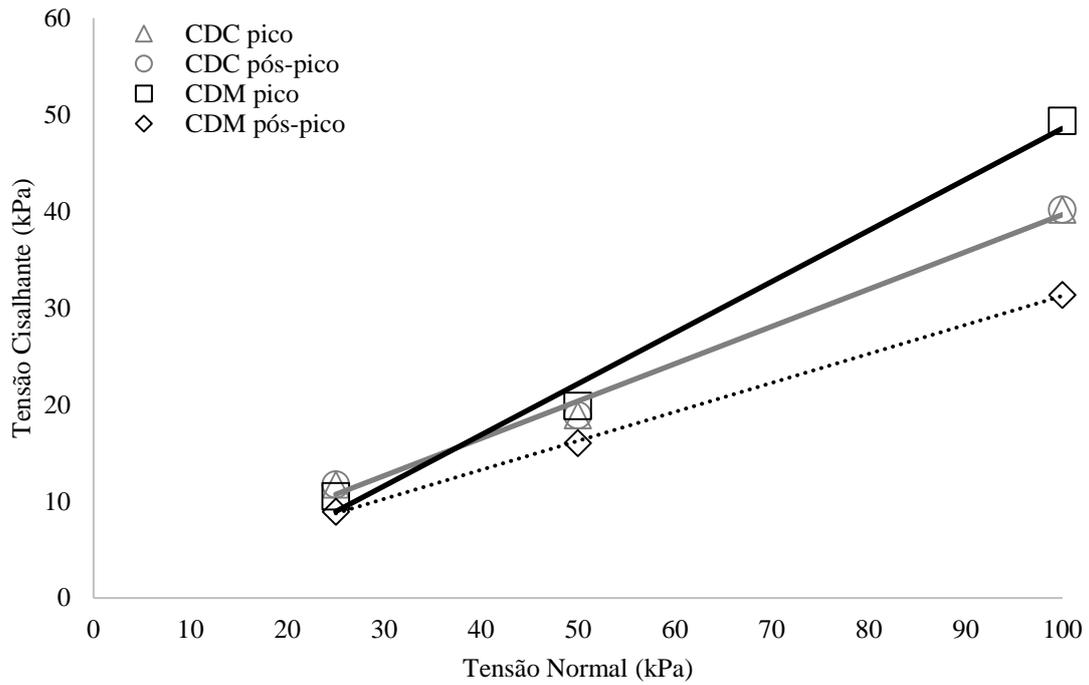


Figura A-2.5. Envolvórias para interface 5: GNT1/GMT3.

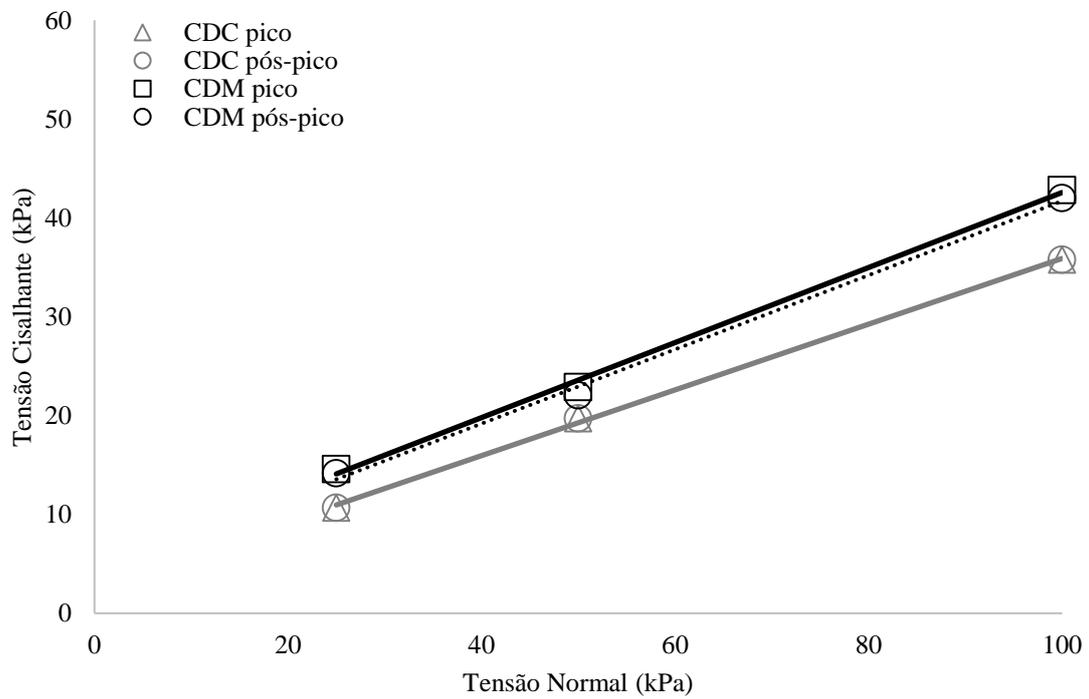


Figura A-2.6. Envolvórias para interface 6: GNT2/GMT3.

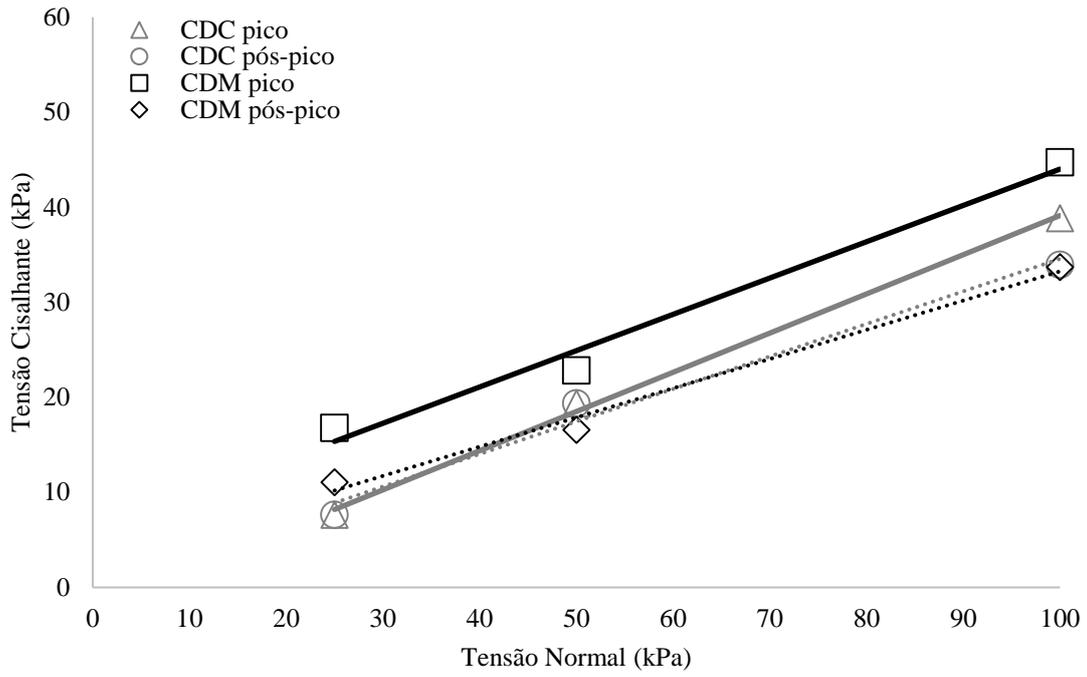


Figura A-2.7. Envoltórias para interface 7: GNT1/GMT4.

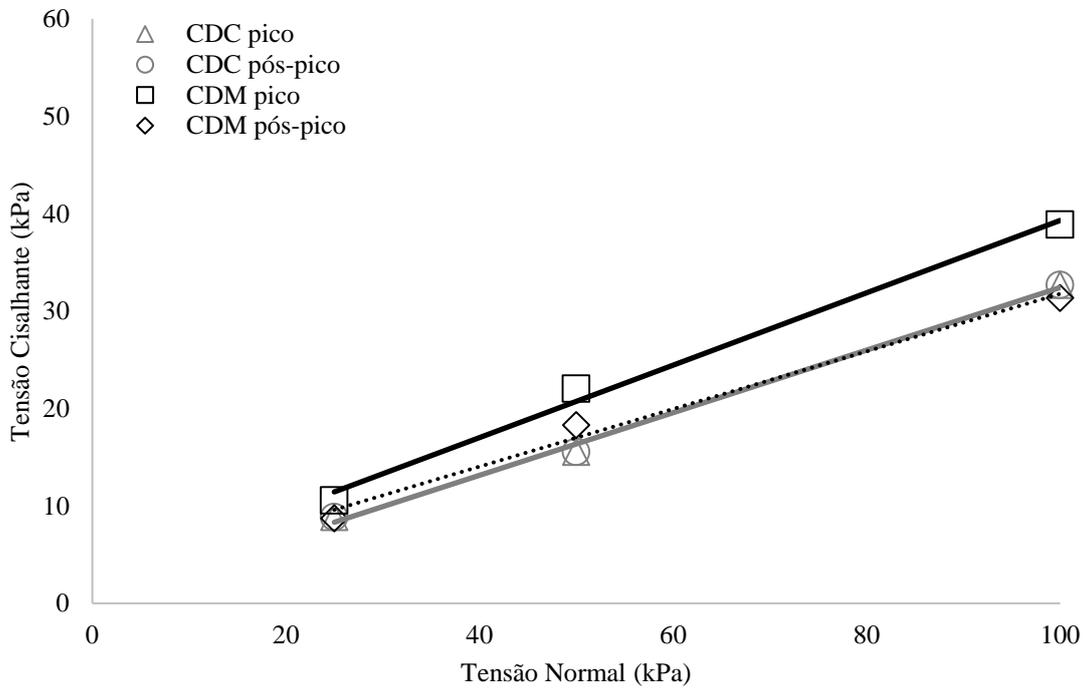


Figura A-2.8. Envoltórias para interface 8: GNT2/GMT4.

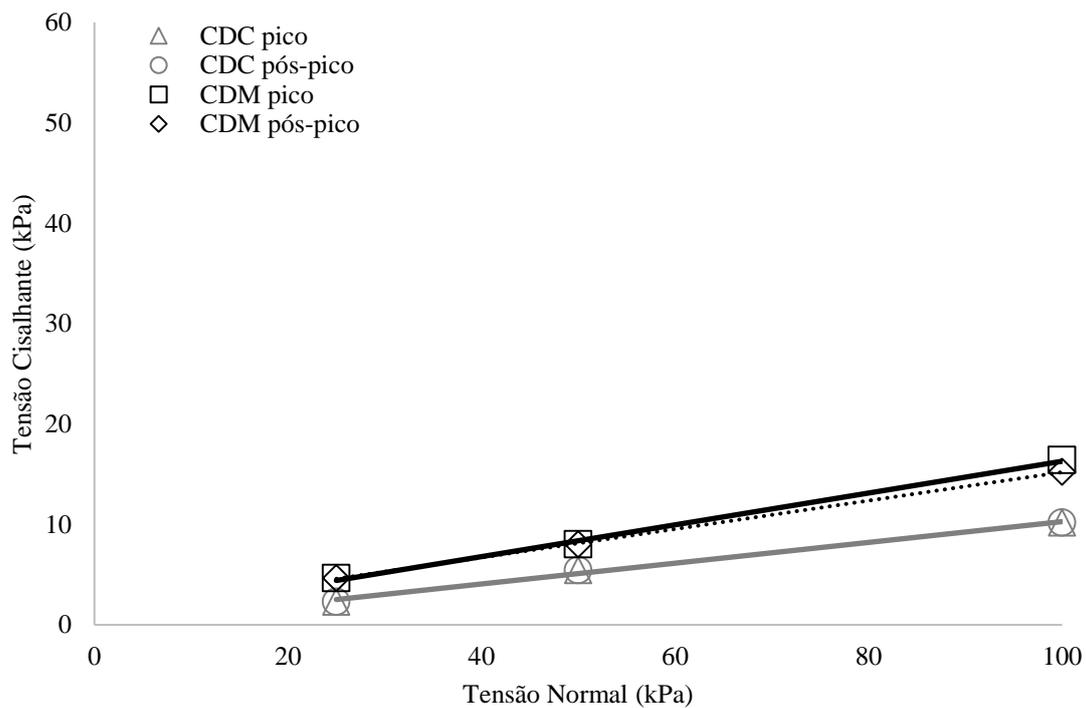


Figura A-2.9. Envolvórias para interface 9: GNT1/GML1.

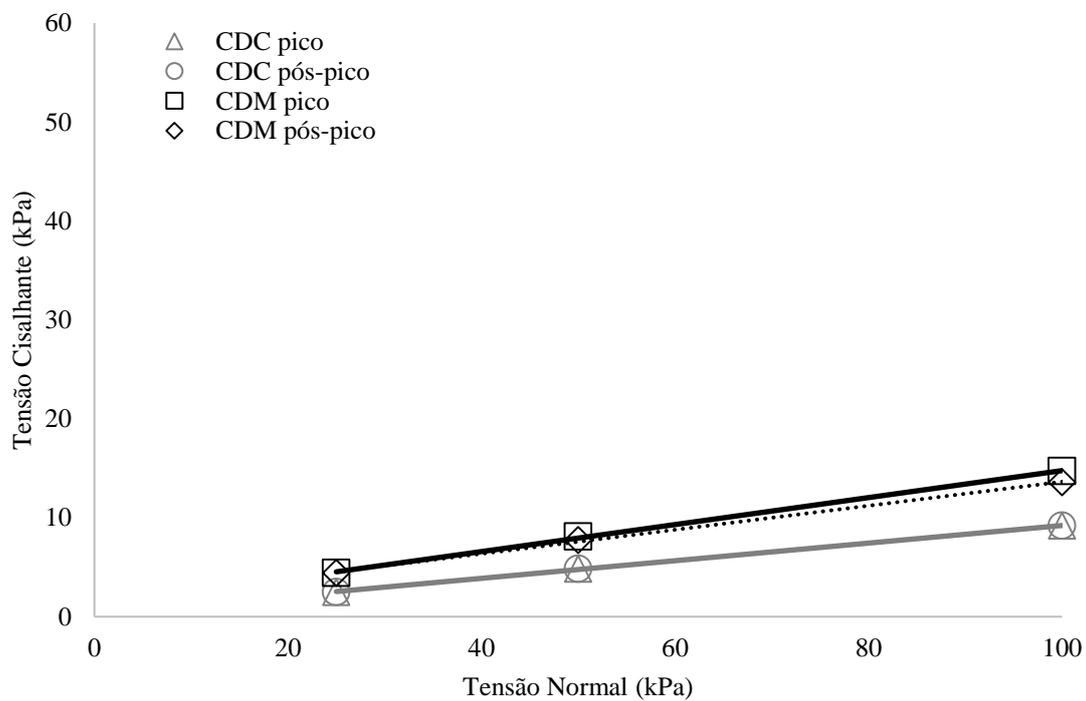


Figura A-2.10. Envolvórias para interface 10: GNT2/GML1.

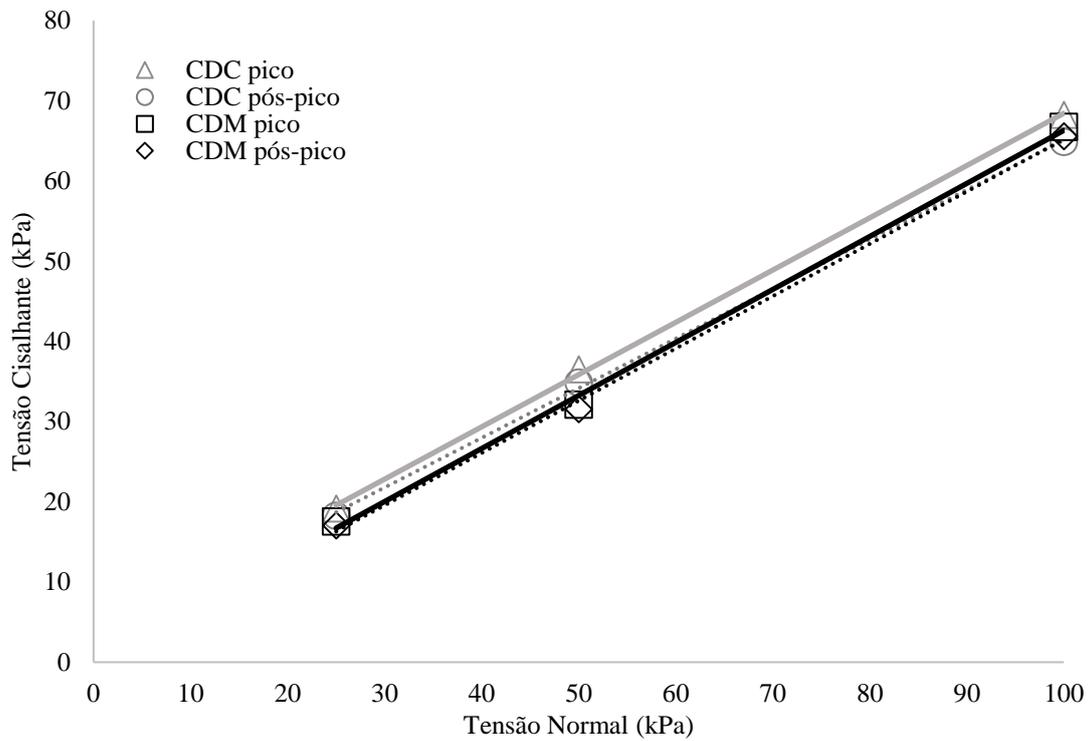


Figura A-2.11. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM para interface 11: SOLO/GNT1.

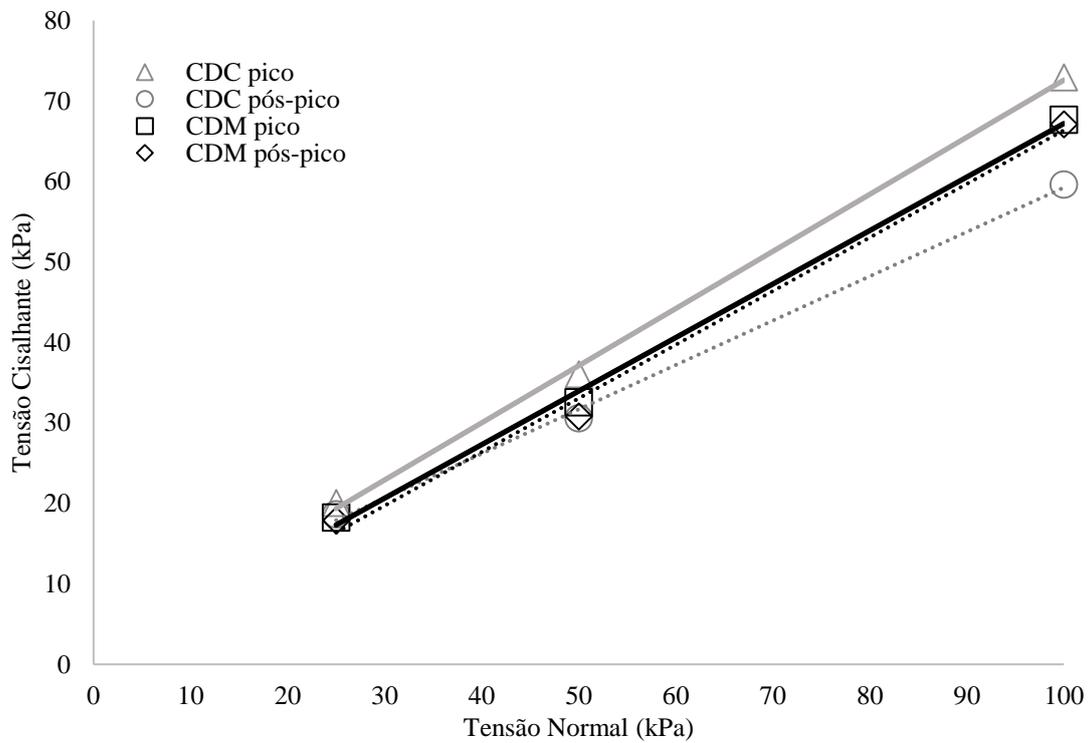


Figura A-2.12. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM para interface 12: SOLO/GNT2.

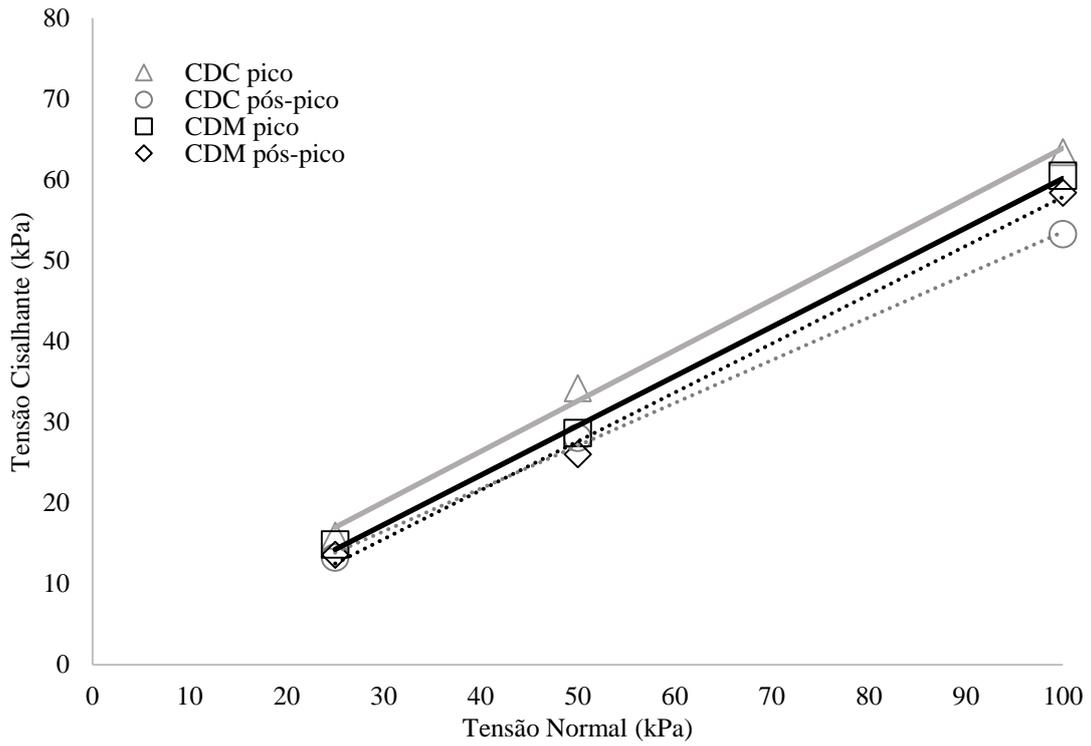


Figura A-2.13. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM para interface 13: SOLO/GMT1.

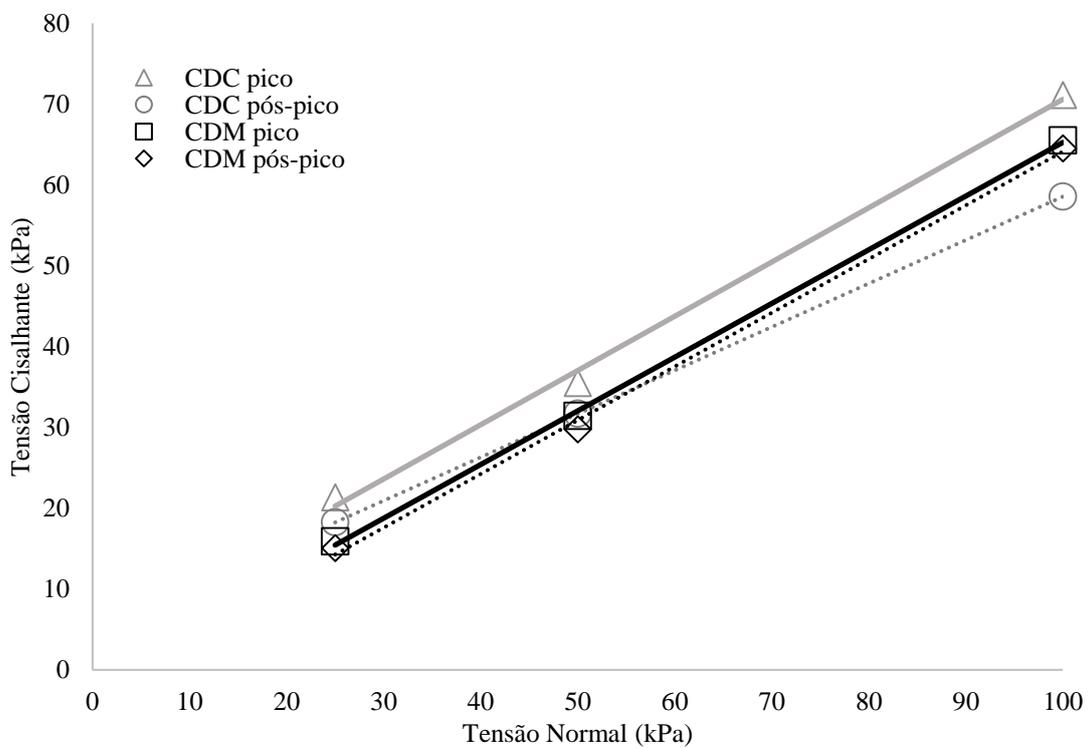


Figura A-2.14. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM para interface 14: SOLO/GMT2.

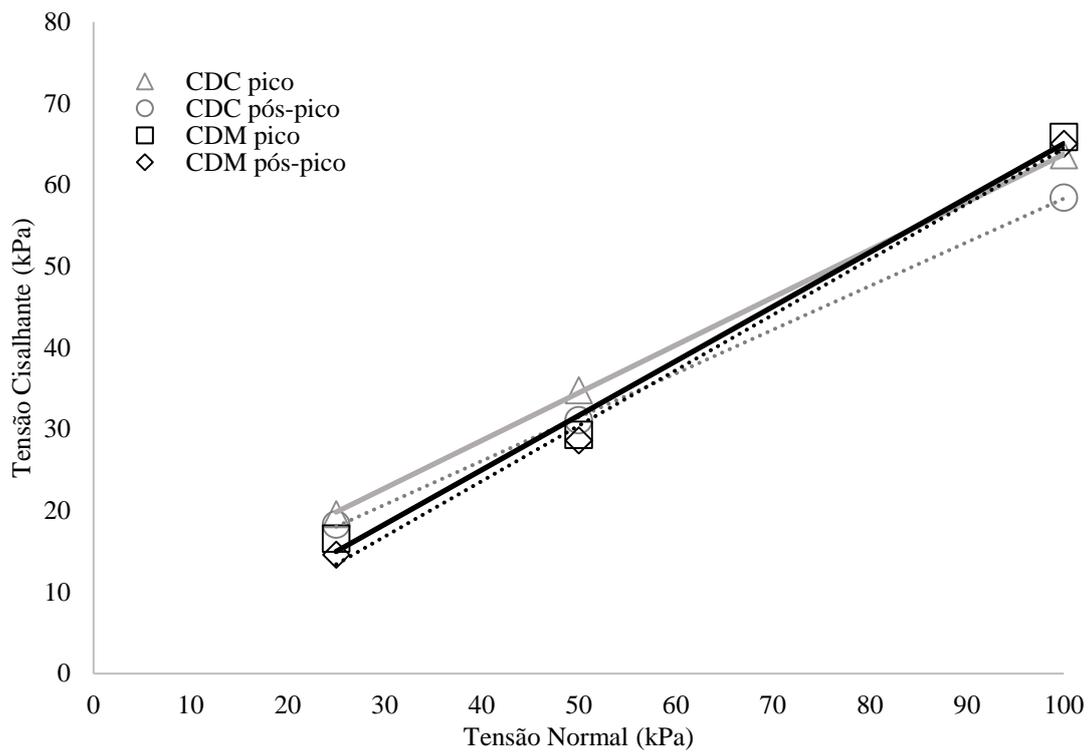


Figura A-2.15. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM para interface 15: SOLO/GMT3.

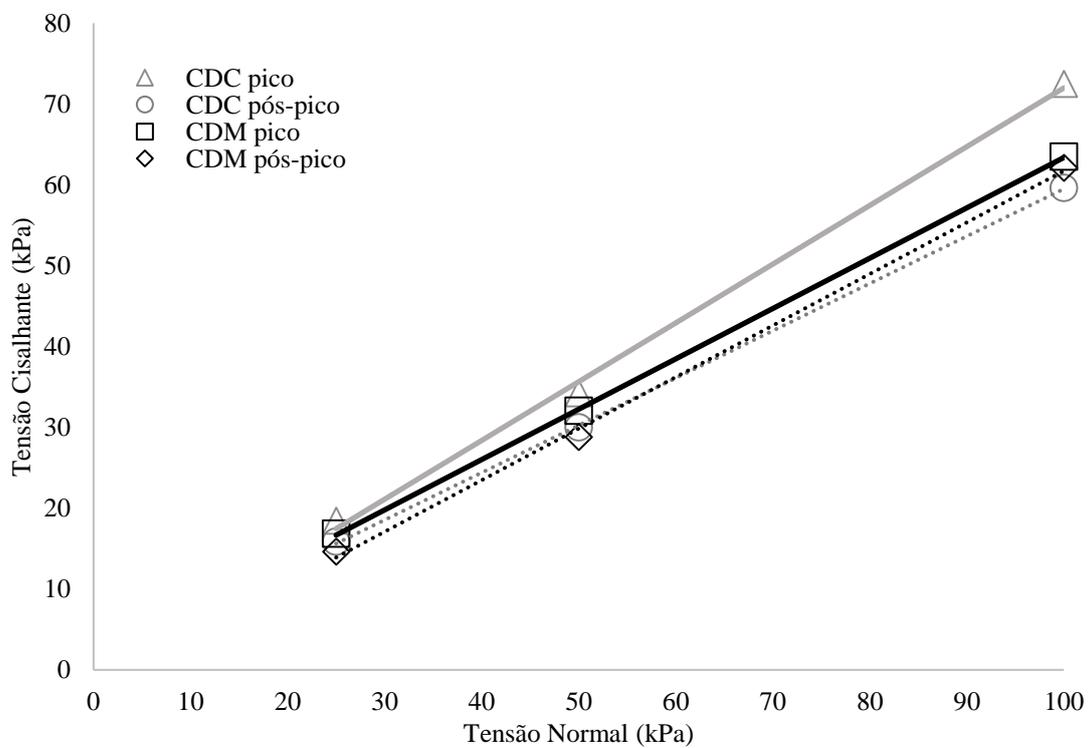


Figura A-2.16. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM para interface 16: SOLO/GMT4.

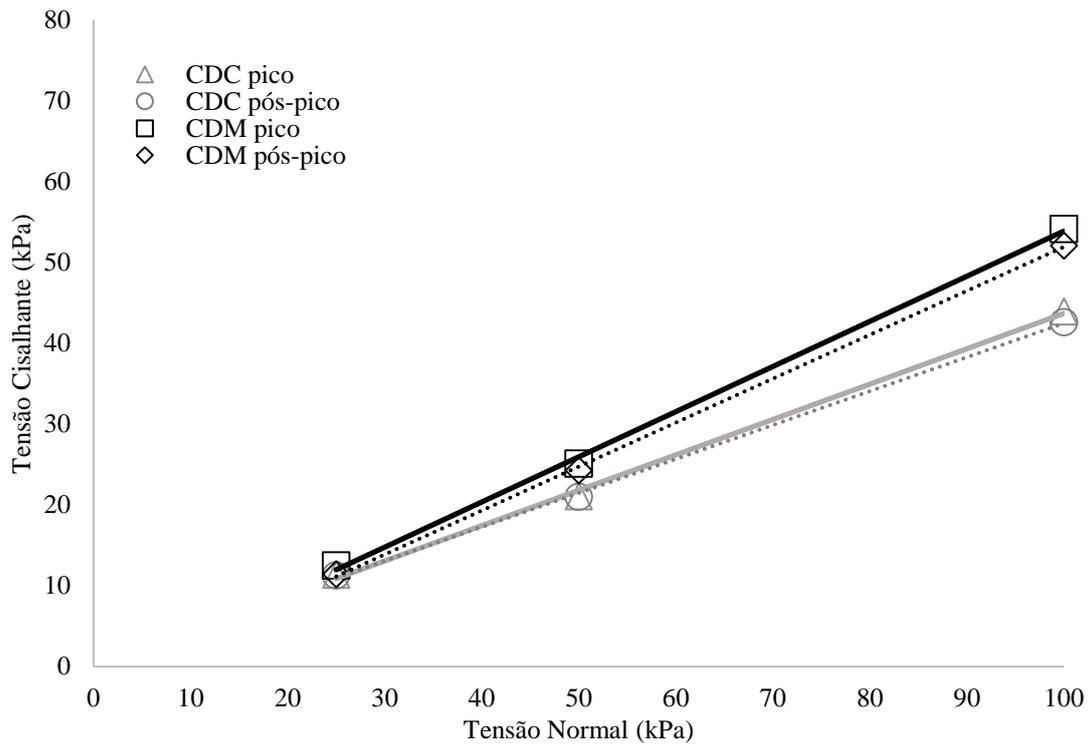


Figura A-2.17. Envoltórias dos ensaios CDC e CDM para interface 17: SOLO/GML1.