

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE ENTRE
GEOMEMBRANAS E OUTROS MATERIAIS POR MEIO DE
ESTATÍSTICA**

RAÍSLA MARTINS DA SILVA GOMES

ORIENTADOR: GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, PhD.

CO-ORIENTADOR: FRANCISCO EVANGELISTA JÚNIOR, PhD.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.MD-408/2024

BRASÍLIA-DF: 10/06/2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE ENTRE
GEOMEMBRANAS E OUTROS MATERIAIS POR MEIO DE
ESTATÍSTICA**

RAÍSLA MARTINS DA SILVA GOMES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRA.**

APROVADO POR:

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

**FRANCISCO EVANGELISTA JÚNIOR, D.Sc. (ENC/UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANÇA, D.Sc. (ENC/UFRN)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, D.Sc. (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA-DF, 10 de junho de 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

GOMES, R. M. S.

Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e outros materiais por meio de estatística, 2024. xvi, 183 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestra, Geotecnia, 2024).

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

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Geossintéticos | 2. Geomembranas |
| 3. Resistência de interface | 4. Análises estatísticas |
| 5. Interação solo-geossintético | 6. Matriz de Pearson |
| I. ENC/FT/UnB II. Mestre | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Raísla Martins Da Silva Gomes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e outros materiais por meio de estatística.

GRAU/ANO: Mestra/2024

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Raísla Martins Da Silva Gomes

Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900.

E-mail: raislagogmess@gmail.com

“Não é o mais forte que sobrevive.

Nem o mais inteligente.

Sobrevive aquele que mais

se adapta às mudanças.”

Charles Darwin

DEDICATÓRIA

A Deus, minha fonte infinita de confiança.

À minha mãe Heldení, sinônimo de força e resiliência.

Ao meu pai Lusmar (in memoriam), sinônimo de caráter e retidão.

Aos meus irmãos Isleide e Lusmar Júnior, sinônimos de resistência.

Aos meus sobrinhos João Guilherme, Valentina e Luiz Guilherme, sinônimos de minha alegria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as oportunidades que Ele sempre criou nos caminhos pelos quais passei e ainda passarei.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, que nunca deixou de acreditar em mim. Agradeço aos meus irmãos, Isleide e Lusmar Júnior pelo apoio, os quais também me deram minhas maiores fonte de inspiração, meus sobrinhos João Guilherme, Valentina e Luiz Guilherme. Também deixo um agradecimento especial para Célia Morales (*in memorian*), sem a qual certamente a caminhada teria sido extremamente mais difícil.

Agradeço aos amigos que conquistei no mestrado, em especial a Alexia, Gabriel, Caio, Gabriella, Juan, Nara, Michael e Ana Carolina, os quais tornaram a caminhada um pouco mais leve e gratificante.

Agradeço minha professora da graduação (e amiga), Maria Tereza, meu orientador da graduação (e amigo), Antover Panazzolo, e ao técnico de laboratório da Universidade Federal de Goiás (e amigo) João Júnior, por me guiarem para o caminho da geotecnia muitos antes de sonhar com o mestrado. Carrego um pouco de cada um de vocês comigo, por onde quer que eu vá.

Deixo um agradecimento especial para o meu orientador, Gregório Luís Silva Araújo, e meu coorientador, Francisco Evangelista Júnior, pela paciência e por todos os ensinamentos que me foram passados no decorrer da caminhada da dissertação. Sem vocês a caminhada teria sido muito mais difícil.

Minha eterna gratidão a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, que me ensinaram muito mais do que Geotecnia. Com vocês, melhores cabeças, pude aprender o que é geotecnia de verdade, sem esquecer que a ética precede todos os nossos passos. Além disso, carrego comigo um dos maiores aprendizados: geotecnia se faz com cinto e suspensório (sempre). Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram durante essa caminhada, em especial ao Professor Rafael Cerqueira Silva que me apoiou quando mais precisei.

RESUMO

É notório que nas últimas décadas o uso de geossintéticos em obras geotécnicas tem crescido. Portanto, é de suma importância compreender o comportamento destes materiais sintéticos quando estão em contato com outros materiais, situação comum em barragens, aterros sanitários e canais. Para evitar acidentes causados por deslizamentos na interface solo-geossintético é essencial ter conhecimento do comportamento desta região, e isto inclui, além do ângulo de atrito da interface, a configuração da rugosidade das geomembranas, o tipo de solo que será colocado em contato com o material sintético, as tensões utilizadas durante os ensaios, dentre outros fatores. O uso de estatísticas para avaliar tais parâmetros é aplicável e relevante, uma vez que a capacidade desta técnica de correlacionar variáveis contribui para aumentar a assertividade da avaliação dos dados dos ensaios de resistência da interface, como cisalhamento direto convencional (CDC) e plano inclinado (PI), ensaios que foram analisados nesta dissertação. Para isso, foi montado um banco de dados focado nas variáveis que influenciam a resistência de interface com base na literatura. Nesta pesquisa foram estudados dois tipos de interfaces principais, a saber interface areia-geomembrana (SG) e geotêxtil-geomembrana (GG). Para as interfaces com areia foram avaliadas 12 variáveis numéricas e uma categórica relacionada ao tipo de fabricação das geomembranas. Por outro lado, para as interfaces com geotêxteis foram avaliadas 07 variáveis numéricas e também uma categórica relacionada ao material de fabricação da geomembrana. Com a estatística utilizada nesta pesquisa foi possível obter respostas relacionadas ao comportamento das médias, desvios padrão, coeficientes de variação, medianas, assimetrias, curtoses, intervalos interquartílicos e outliers do banco de dados elaborado neste estudo. Essas análises estatísticas foram realizadas com base numa rotina elaborada com a linguagem Python, aplicando principalmente as bibliotecas Panda, Numpy e Matplotlib. Também foi utilizado o Excel para análises mais simples. Com a presente pesquisa foi possível contribuir para a expansão do assunto sobre a análise estatística aplicada ao estudo da resistência da interface areia-geomembrana e geotêxtil-geomembrana, e compreender estatisticamente, por meio da matriz de Pearson, a qual também foi obtida por meio de rotinas Python, quais parâmetros mais influenciaram o ângulo de atrito da interface (ϕ_{int}), considerando o banco de dados utilizado neste estudo. Observou-se que para a interface CDC-SG e CDC-GG, as variáveis que apresentaram as maiores correlações foram o ângulo de atrito do solo (ϕ_s) e a altura da rugosidade da geomembrana (h_G), respectivamente. Por outro lado, para a interface PI-SG e PI-GG, as correlações mais altas foram obtidas para as variáveis a altura da rugosidade da geomembrana (h_G) e área de contato (A_C), respectivamente.

ABSTRACT

It's notorious that in recent decades the use of geosynthetics in geotechnical works has grown. Therefore, it is of utmost importance to understand the behavior of these synthetic materials when they are in contact with other materials, a common situation in dams, landfills and canals. To avoid accidents caused by sliding at the soil-geosynthetic interface it is essential to have knowledge of the behavior of this region, and this includes, in addition to the angle of friction of the interface, the configuration of the roughness of the geomembranes, the type of soil that will be placed in contact with the synthetic material, the stresses used during testing, among other factors. The use of statistics to evaluate such parameters is applicable and relevant, since the ability of this technique to correlate variables contributes to increase the assertiveness of the evaluation of interface strength test data, such as conventional direct shear (CDC) and inclined plane (PI), which were analyzed in this dissertation. For this purpose, a database focused on the variables that influence interface resistance was assembled based on the literature. Two main interface types were studied in this research, namely sand-geomembrane (SG) and geotextile-geomembrane (GG) interfaces. For the interfaces with sand, 12 numerical variables and one categorical variable related to the type of manufacturing of the geomembranes were evaluated. On the other hand, for the interfaces with geotextiles, 07 numerical variables and also a categorical variable related to the manufacturing material of the geomembrane were evaluated. With the statistics used in this research it was possible to obtain answers related to the behavior of the means, standard deviations, coefficients of variation, medians, asymmetries, kurtosis, interquartile ranges and outliers of the database prepared in this study. These statistical analyses were performed based on a routine developed with the Python language, applying mainly the libraries Panda, Numpy and Matplotlib. Excel was also used for simpler analyses. With the present research it was possible to contribute to the expansion of the subject about the statistical analysis applied to the study of the sand-geomembrane and geotextile-geomembrane interface resistance, and to statistically understand, through Pearson's matrix, which was also obtained through Python routines, which parameters most influenced the interface friction angle (α), considering the database used in this study. It was observed that for the CDC-SG and CDC-GG interface, the variables that presented the highest positive correlations were the soil friction angle (ϕ_s) and the geomembrane roughness height (h_G), respectively. On the other hand, for the PI-SG and PI-GG interface, the highest and most positive correlations were obtained for the variables the geomembrane roughness height (h_G) and contact area (A_c), respectively.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. GERAL.....	4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	6
2. GEOSSINTÉTICOS NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA	6
2.1. GEOMEMBRANAS.....	7
2.2. GEOTÊXTEIS	11
2.3. ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE.....	13
2.4. ESTUDOS GEOTÉCNICOS SOBRE RESISTÊNCIA DE INTERFACE E OS FATORES QUE A INFLUENCIAM	18
2.5. ESTATÍSTICA E SEUS FUNDAMENTOS	28
2.5.1. Estatística Descritiva (ED)	29
2.5.1.1. Medidas de tendência central.....	29
2.6. ESTATÍSTICA APLICADA À ENGENHARIA GEOTÉCNICA E ÁREAS CORRELATAS.....	30
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	41
3. METODOLOGIA APLICADA NA PESQUISA E ROTINA DE TRATAMENTO DE DADOS	41
3.1. ESTATÍSTICA APLICADA NA PESQUISA	41
3.1.1. Média Aritmética.....	41
3.1.2. Mediana.....	41
3.1.3. Moda.....	42
3.1.4. Variância e desvio padrão	42
3.1.5. Desvio Médio Absoluto (DMA).....	43

3.1.6. Coeficiente de Variação (CV)	43
3.1.7. Amplitude interquartil (IQR).....	44
3.1.8. Outliers e boxplot	45
3.1.9. Medidas de forma e histogramas	46
3.1.10. Curtose.....	48
3.1.11. Assimetria.....	49
3.1.12. Máximo e Mínimo	51
3.1.13. Percentil 5° e 95°	52
3.1.14. Range (Intervalo).....	52
3.1.15. Correlações, Regressões e Matrizes de correlação	52
3.2. LINGUAGEM PYTHON PARA ESTUDOS ESTATÍSTICOS	54
3.3. DISCRETIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS	56
3.4. APLICAÇÃO DA ROTINA DE PROCESSAMENTO DOS DADOS	43
3.5. DISCRETIZAÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS.....	44
3.5.1. Cisalhamento Direto Convencional (CDC).....	44
3.5.2. Plano Inclinado (PI).....	45
3.6. OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	46
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL (CDC).....	64
4.1.1. Interface Areia-Geomembrana – SG-CDC	64
4.1.2. Interface Geotêxtil-Geomembrana – GG-CDC.....	87
4.2. ENSAIOS DE PLANO INCLINADO (PI).....	103
4.2.1. Interface Areia-Geomembrana – SG-PI	103
4.2.2. Interface Geotêxtil-Geomembrana – GG-PI	127
4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS	137
4.3.1. Correlações obtidas para a interface Areia-Geomembrana – Ensaios CDC e PI.....	137
4.3.2. Correlações obtidas para a interface Geotêxtil-Geomembrana – Ensaios CDC e PI.	144

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	150
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	150
5.1. CONCLUSÕES.....	150
5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
APÊNDICE A – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL (CDC).....	165
APÊNDICE B – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE PLANO INCLINADO (PI).....	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ruptura do aterro de Kettleman Hill – EUA (<i>National Research Council et al., 2007</i>).....	3
Figura 2.1 – Efeito da cristalinidade dos polímeros (Adaptado de Pedroso, 2017).....	8
Figura 2.2 – Processos de produção de geomembranas – (a) Esquema de texturização - Matriz plana e (b) Esquema de texturização - Matriz balão (Adaptado de Palomino, 2018).....	11
Figura 2.3 – Diferentes estruturas dos geotêxteis (A) tecido multifilamento, (B) tecido monofilamento, (C) não-tecido agulhado e (D) não tecido termoligado (Koerner, 1998).....	12
Figura 2.4 – Esquematisação das forças que agem numa interface solo-geomembrana numa situação de plano inclinado (Adaptado de Igzin, 1997).	15
Figura 2.5 – Equipamentos para realização de ensaio de resistência de interface – (a) CDC, (b) CDM e (c) PI (Adaptado de Sánchez, 2018).....	16
Figura 2.6 – Aumento gradual na tensão de cisalhamento máxima conforme o aumento do peso específico da areia, comparando geomembranas de HDPE (a e b) e PVC (c e d) - (Adaptado de O'Rourke, 1989).....	20
Figura 2.7 – Comportamento mecânico de geomembranas – (a) tipo HDPE e (b) PVC (Adaptado de O'Rourke et al., 1991).	21
Figura 2.8 – Efeito gancho e laço (Adaptado de Hebel et al., 2005).	23
Figura 2.9 – Materiais utilizados – (a) Geotêxtil tecido 1, (b) Geotêxtil tecido 2, (c) Geotêxtil tecido 3, (d) Geotêxtil não tecido (Adaptado de Rizwan et al., 2022).....	25
Figura 2.10 – Mecanismo de ruptura de muro estabilizados mecanicamente devido ao aumento de poropressões (Adaptado de Koerner & Koerner, 2013).	32
Figura 2.11 – Histogramas de distribuição e probabilidade de excedência da coesão e do ângulo de atrito (Fonte: Adaptado de Díaz-Beltrán et al., 2016).	34
Figura 2.12 – Variância dos fatores de segurança em função dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito, peso específico e parâmetro de poropressão R_u (Fonte: Adaptado de Jahanfar et al., 2017).....	35
Figura 2.13 – Previsão do recalque em função do tempo para as estações CS-7, CS-8 e CS-9 (barragem de Kárahnjúkar) desde o final do primeiro enchimento, juntamente com um gráfico	

das leituras do levantamento disponíveis até setembro de 2017. (Adaptado de Sigtryggisdottir et al., 2018).....	36
Figura 2.14 – Simulação do deslizamento de camada de solo – (a) Modelo com $v=0,50$ e (b) Modelo com $v = \infty$ (Adaptado de Ching & Phoon, 2019).....	37
Figura 2.15 – Diversos valores do parâmetro de lisura v (Adaptado de Ching & Phoon, 2019).	37
Figura 2.16 – Gráficos de Pareto dos efeitos normalizados das variáveis analisadas – (a) solos puramente coesivos; (b) solos puramente friccionais; e (c) solos mistos (Adaptado Gonzalez et al., 2020).....	38
Figura 3.1 – Representação gráfica da amplitude interquartil (Adaptado de Paiva, 2009).....	44
Figura 3.2 – Esquema representativo das partes que compõem um boxplot (Adaptado de Siqueira, 2021).	46
Figura 3.3 – Possíveis formatos para as curvas de distribuições de dados (Adaptado de Larson & Farber, 2010).	47
Figura 3.4 – Partes componentes de um histograma (Adaptado de Assis et al., 2018).	48
Figura 3.5 – Categorização das distribuições de frequências com relação à curtose (Naghattini & Pinto, 2007).	48
Figura 3.6 – Comportamento simétrico, assimétrico à direita e assimétrico à esquerda (Medri, 2011).....	51
Figura 3.7 – Quantidade de variáveis numéricas levantadas nesta pesquisa considerando ensaios CDC com as interfaces SG e GG.	41
Figura 3.8 – Quantidade de variáveis numéricas levantadas nesta pesquisa considerando ensaios PI com as interfaces SG e GG.	42
Figura 3.9 – Soma total de ensaios de interface CDC e PI levantados nesta pesquisa separados por países.....	42
Figura 3.10 – Relação da quantidade total de variáveis numéricas levantadas nesta pesquisa separados por tipo de ensaio.....	43
Figura 3.11 – Quantidade total de ϕ_{int} para o ensaio CDC, separado por países.....	45
Figura 3.12 – Quantidade total de ϕ_{int} levantados para o ensaio PI, separado por países.	45
Figura 3.13 – Fluxograma da metodologia aplicada nesta pesquisa.	47

Figura 4.1 – Histogramas das variáveis estudadas na interface SG-CDC.	64
Figura 4.2 – Gráficos <i>boxplot</i> para avaliação de dados <i>outliers</i> para a interface SG-CDC, considerando as variáveis velocidade do ensaio de resistência de interface, espessura da geomembrana e o diâmetro médio dos grãos (D_{50}).....	76
Figura 4.3 – Avaliação estatística dos dados da interface SG-CDC – (a) Coeficientes de variação dos dados tratados conjuntamente e separadamente, (b) Normalização do IQR pelo range para os dados tratados conjuntamente e separadamente (c) Porcentagem de <i>Outliers</i> para os dados tratados conjuntamente e separadamente.	77
Figura 4.4 – Matriz de correlação de Pearson para a interface SG-CDC.....	82
Figura 4.5 – Histogramas das variáveis estudadas na interface GG-CDC.....	87
Figura 4.6 – Avaliação estatística dos dados da interface GG-CDC, considerando os dados tratados conjuntamente e separadamente – (a) Coeficiente de variação (CV) e (b) Normalização do IQR pelo Range.	95
Figura 4.7 – Gráfico <i>Boxplot</i> para avaliação de dados <i>outliers</i> na interface CDC-GG (a): velocidade do ensaio, altura da rugosidade e espessura da geomembrana (b) – tensões (kPa), ângulos de atrito de interface ($^{\circ}$) e Área de contato (cm^2) e (c) Gramatura.	97
Figura 4.8 – Matriz de correlação de Pearson para a interface GG-CDC.....	99
Figura 4.9 – Histograma de distribuição do banco de dados para o ensaio SG-PI.	103
Figura 4.10 – Gráficos <i>boxplot</i> para avaliação de dados <i>outliers</i> para a interface SG-PI – (a) variáveis t_{GM} , h_G e ρ_s (b) variáveis σ_n e ϕ_s e I_D	115
Figura 4.11 – Avaliação estatística dos dados da interface SG-PI – (a) Coeficientes de variação dos dados tratados conjuntamente e separadamente, (b) Normalização do IQR pelo range para os dados tratados conjuntamente e separadamente (c) Porcentagem de <i>Outliers</i> para os dados tratados conjuntamente e separadamente.	117
Figura 4.12 – Matriz de correlação de Pearson para a interface SG – PI.....	119
Figura 4.13 – Histograma de distribuição do banco de dados para o ensaio GG-PI.....	128
Figura 4.14 – Avaliação estatística dos dados da interface GG-PI para geomembranas de HDPE lisas – (a) Coeficiente de variação (CV) e (b) Normalização do IQR pelo Range.	132
Figura 4.15 – Matriz de correlação de Pearson para a interface GG-PI.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais funções dos geossintéticos (Adaptado de Bouazza et al. 2002).	6
Tabela 2.2 – Características das geomembranas considerando o polímero utilizado na fabricação (Adaptado de Scheirs, 2009).	9
Tabela 3.1 – Valores interpretativos do coeficiente de correlação de Pearson (Adaptado de Pant & Ramana, 2021).	54
Tabela 3.2 – Principais trabalhos utilizados no levantamento de dados desta pesquisa.	57
Tabela 4.1 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC com todos os dados analisados conjuntamente.....	67
Tabela 4.2 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC considerando somente o material HDPE.	68
Tabela 4.3 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC considerando somente o material PVC.....	69
Tabela 4.4 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC considerando somente o material LDPE.	70
Tabela 4.5 – Classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces SG-CDC em relação ao ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}).	83
Tabela 4.6 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – CDC analisados conjuntamente.	90
Tabela 4.7 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – CDC considerando somente o material HDPE.	90
Tabela 4.8 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – CDC considerando somente o material LDPE.	91
Tabela 4.9 – Classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces GG-CDC.	100
Tabela 4.10 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI com todos os dados analisados conjuntamente.....	107
Tabela 4.11 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI considerando somente o material HDPE.	108

Tabela 4.12 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI considerando somente o material PVC.....	109
Tabela 4.13 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI considerando somente o material LDPE.....	110
Tabela 4.14 – Resumo da classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces SG-PI em relação ao ângulo de atrito de interface.	123
Tabela 4.15 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – PI para geomembranas de HDPE.....	130
Tabela 4.16 – Classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces GG-PI.	135
Tabela 4.17 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa.	137
Tabela 4.18 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa	144

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS

A_c – ÁREA DE CONTATO

C_c – COEFICIENTE DE CURVATURA

C_u – COEFICIENTE DE NÃO UNIFORMIDADE

CDC – CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL

CDM – CISALHAMENTO DIRETO MODIFICADO

CV – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

D_{50} – DIÂMETRO MÉDIO DOS GRÃOS

ED – ESTATÍSTICA DESCRITIVA

GRI – GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE

HDPE ou PEAD – POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

h_G – ALTURA DA RUGOSIDADE

IQR – AMPLITUDE INTERQUARTIL

IC – INTERVALO DE CONFIANÇA

I_D – ÍNDICE DE DENSIDADE

M_A – GRAMATURA

PI – PLANO INCLINADO

Q_1 – QUARTIL SUPERIOR

Q_3 – QUARTIL INFERIOR

RI – RESISTÊNCIA DE INTERFACE

PVC – POLICLORETO DE VINILA

SD – DESVIO PADRÃO

t_{GM} – ESPESSURA DA GEOMEMBRANA

v – VELOCIDADE OU TAXA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO

σ_n – TENSÃO NORMAL

ρ_s – MASSA ESPECÍFICA DO SOLO

ϕ_s – ÂNGULO DE ATRITO DO SOLO

ϕ_{int} – ÂNGULO DE ATRITO DE INTERFACE

1. INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de construção com materiais como areia e brita ainda são amplamente utilizados na engenharia geotécnica, mas o uso contínuo desses recursos não renováveis pode comprometer construções futuras. Isso tem levado ao desenvolvimento de novas técnicas e materiais, como os geossintéticos, que podem desempenhar o mesmo papel ou até superar os materiais naturais em desempenho. A inserção de materiais para melhorar a capacidade do solo é uma técnica antiga. De acordo com Aguiar (2003), babilônios, romanos e construtores da Muralha da China utilizaram materiais fibrosos e troncos para reforçar estruturas daquela época, demonstrando a eficácia histórica desses métodos.

É notório que nas últimas décadas o emprego dos geossintéticos em obras geotécnicas tem expandido. Segundo Shukla et al. (2009), o conceito de usar tiras, grades e chapas para reforçar as massas do solo foi introduzido por Henry Vidal na década de 1960. Desde então, de acordo com Harikumar et al. (2015), uma grande variedade de materiais, como barras de aço, retalhos de pneus e outros materiais poliméricos, começaram a ser amplamente adicionados à massa do solo aleatoriamente, ou de maneira regular e orientada, com o intuito de propor melhorias no comportamento do mesmo.

Pode-se definir os geossintéticos como produtos de base polimérica para aplicação em obras geotécnicas e de cunho ambiental. Para Fleming et al. (2006), um dos tipos de geossintéticos mais utilizados são as geomembranas, as quais possuem função de barreira de proteção contra líquidos, gases e materiais afins, e também podem ser utilizadas como material de separação. De acordo com Palmeira (2018), as geomembranas são produtos bidimensionais com baixíssimo coeficiente de permeabilidade (cerca de 10^{-11} a 10^{-13} cm/s), e podem ser produzidas por processos de extrusão, coextrusão e calandragem, com superfícies lisas ou rugosas e diferentes cores.

Tendo em vista o conhecimento sobre as geomembranas e sua aplicação no campo, é de suma importância entender o comportamento desses materiais sintéticos quando estão em contato com outros materiais, situação muito comum em obras de barragens, aterros sanitários e canais. Dessa forma, surge uma interação importante para ser estudada, a qual é chamada de

resistência de interface. Esse assunto é relevante devido aos deslizamentos que podem ocorrer na interface entre solo-geossintético.

Para evitar tais acidentes, os quais provocam perdas irreparáveis, é importante ter conhecimento do comportamento da região de interação entre solo-geossintético, e isso inclui, além do ângulo de atrito de interface, entender a configuração da rugosidade das geomembranas que são aplicadas nestes tipos de obras, bem como o tipo de solo que será posto em contato com o material sintético. De acordo com Mello (2001), o ângulo de atrito da interface está diretamente ligado à rugosidade do geossintético. Além desse parâmetro, existem outros que podem afetar a resistência de interface, como é o caso do formato do grão, o nível de tensão aplicado no campo, etc.

Alguns estudos na área de resíduos sólidos urbanos (RSU) têm sido realizados com a utilização da estatística como ferramenta de análise dos parâmetros de resistência de projeto, como coesão e ângulo de atrito (Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017; Daciolo, 2021). Observa-se, portanto, que essas ferramentas têm se mostrado promissoras para avaliação de banco de dados na área de geotecnia, principalmente quando elas são associadas à linguagem de programação, como é o caso da Python.

Diante do exposto, a utilização da estatística, bem como de linguagens de programação, para avaliar os parâmetros que mais influenciam a resistência de interface se mostra aplicável. Para a realização desta pesquisa foi elaborado um banco de dados de ensaios de Cisalhamento Direto Convencional (CDC) e Plano Inclinado (PI), considerando variáveis numéricas e categóricas. Os ensaios foram subdivididos em duas categorias, a saber, interfaces com solo (SG-CDC) e interfaces com outros geossintéticos (GG-CDC).

1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A aplicação de geomembranas em obras geotécnicas tem crescido cada vez mais, tendo em vista os benefícios que tal material pode fornecer. Quando se deseja aumentar a resistência de interface em aterros sanitários, pode-se aplicar, por exemplo, as geomembranas texturizadas. Caso a obra seja mal dimensionada e com isso ocorram deslizamentos, a zona de preferência para o movimento acontecer será a interface entre solo-geossintético, fato que provocará

danos ambientais, econômicos e humanos. Por isso, a região de interface merece atenção e estudo.

De acordo com a *National Research Council et al.* (2007), uma das falhas de aterro mais conhecidas no meio geotécnico é a do aterro de Kettleman Hill, que ocorreu em 1988, e que totalizou, segundo Koutsourais et al. (1991) uma falha com extensão de 6,1 hectares. A Figura 1.1 apresenta tal falha. Ele foi o primeiro aterro sanitário de dupla camada construído no oeste dos Estados Unidos, e os procedimentos para análises de estabilidade do aterro sanitário ainda não estavam bem desenvolvidos na época. Retroanálises realizadas por Mitchell et al. (1990) indicaram que um fator crítico que contribuiu para a falha foi a baixa resistência ao cisalhamento da interface entre o revestimento da base das geomembranas, e o solo argiloso compactado subjacente.

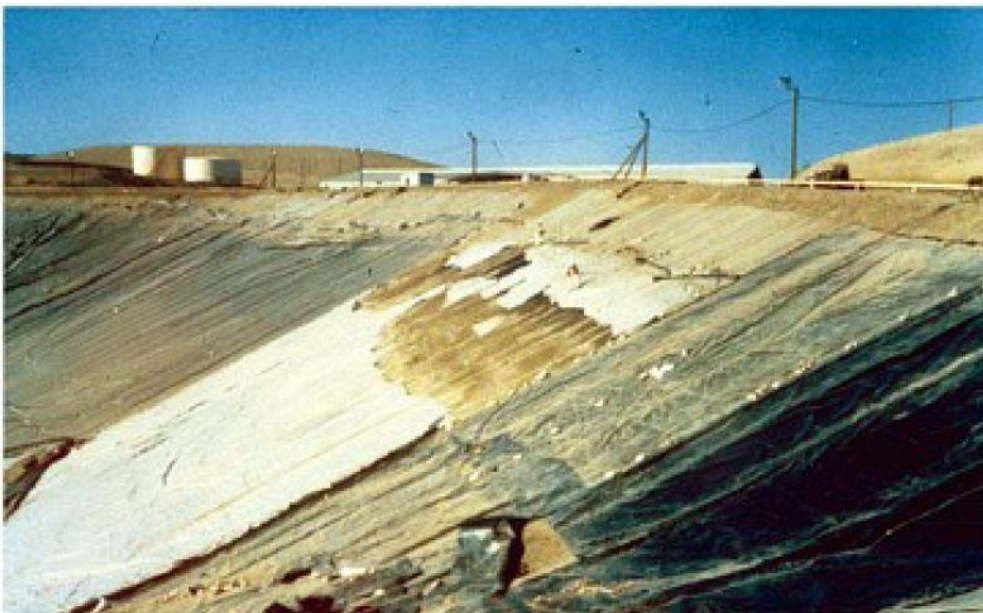


Figura 1.1 – Ruptura do aterro de Kettleman Hill – EUA (*National Research Council et al.*, 2007).

Ainda pode-se citar outros exemplos de outros deslizamentos de interface, como o do aterro sanitário French, o qual é relatado por Rowe (1998), bem como os que ocorreram na barragem de Aubrac, no canal de Greenley e no aterro da barragem de Nielisz, retratados por Chang (2005), Stark et al. (2008) e Lechowicz & Wrzesinski (2015), respectivamente. Diante disso, é importante entender os mecanismos que caracterizam a resistência de interface, bem como os fatores que fazem influência na mesma.

Sendo assim, a utilização da estatística para avaliar os parâmetros que mais influenciam a resistência de interface se mostra aplicável, tendo em vista que por meio de estudos estatísticos foi possível avaliar o comportamento dos ensaios de Cisalhamento Direito Convencional (CDC) e Plano Inclinado (PI), considerando interfaces com areia-geomembrana e geomembrana-geotêxteis. Para a realização desta pesquisa foi elaborado um banco de dados dos ensaios supracitados, considerando variáveis numéricas, a exemplo, ângulo de atrito do solo, altura da rugosidade da geomembrana e etc., e variáveis categóricas, como é o caso do material de fabricação das geomembranas.

Com a presente pesquisa foi possível contribuir para a expansão do assunto sobre análise estatística aplicada ao estudo da resistência de interface solo-geossintético, e compreender, estatisticamente, quais parâmetros mais influenciaram o ângulo de atrito de interface entre areia-geomembrana e interfaces correlatas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GERAL

O objetivo desta dissertação é avaliar estatisticamente o comportamento do ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) em relação à outras variáveis, a saber, tensões normais (σ_n), área de contato (A_c), altura da rugosidade da geomembrana (h_G), espessura da geomembrana (t_{GM}), coeficientes de curvatura (C_c) e de não uniforme (C_u) do solo, diâmetro médio dos grãos (D_{50}), ângulo de atrito do solo (ϕ_s), gramatura (M_A), dentre outras.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa estão elencados nos itens que seguem:

- i. Identificar estatisticamente as principais variáveis que influenciam o ângulo de atrito de interface;
- ii. Obter as matrizes de correlação de Pearson para as interfaces avaliadas;
- iii. Classificar o nível das correlações obtidas pelas matrizes de correlação de Pearson.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos:

- O capítulo 1 introduz o assunto, apresenta a motivação do estudo, bem como os objetivos e a estruturação desse trabalho;
- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho discretizando, por exemplo, tópicos relacionados à aplicação dos geossintéticos na engenharia, métodos de medição da resistência de interface, estatística aplicada à geotecnia e áreas correlatas, dentre outros;
- No capítulo 3 estão expostas as metodologias utilizadas nesta pesquisa;
- O capítulo 4 aborda os resultados e as discussões, bem como traz uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho;
- O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2. GEOSINTÉTICOS NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA

De acordo com a NBR ISO 10318-1 (ABNT, 2021), os geossintéticos (GSY) são produtos em que ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob a forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações da engenharia geotécnica e civil. Existem vários tipos de geossintéticos, os quais foram criados para várias funções específicas, e dentre os mais aplicados em obras geotécnicas, podem-se citar os geotêxteis, geomembranas, geocomposto, geocélulas, geogrelhas, dentre outros. A Tabela 2.1 mostra as funções dos principais geossintéticos disponíveis no mercado.

Tabela 2.1 – Principais funções dos geossintéticos (Adaptado de Bouazza et al. 2002).

Função Tipo	Drenagem	Reforço	Separação	Barreira	Proteção	Filtração
Geotêxteis	x	x	x	x	x	x
Geomembranas			x	x		
Geogrelhas		x				
Georredes	x					
Geoespaçadores	x					
GCL				x	x	
Geocompostos	x	x		x	x	
Geoformas					x	
Geocélulas		x	x		x	

As principais vantagens de se trabalhar com os geossintéticos estão baseadas nos seguintes aspectos: aumento da resistência do solo, facilidade de aplicação dos materiais sintéticos, otimização das obras nas quais eles são aplicados, garantia de desempenho tendo em vista que os materiais passam por um controle rigoroso de qualidade durante a produção, aumento de vida útil da obra, dentre outros (BOUAZZA et al., 2002).

De acordo com Palmeira (2018), os geossintéticos precisam atender a várias propriedades para serem eficazes. Entre essas propriedades estão as físicas (gramatura, espessura,

densidade relativa), hidráulicas (distribuição e dimensão das aberturas, permissividade, transmissividade) e mecânicas (comportamento à tração, resistência ao puncionamento, resistência ao rasgamento, atrito nas interfaces).

2.1. GEOMEMBRANAS

Neste trabalho, o foco descritivo em termos de aplicação e função será dado às geomembranas e aos geotêxteis, tendo em vista que esses são os materiais base para o desenvolvimento dessa pesquisa. Todavia, informações a respeito das características específicas de cada geossintético podem ser encontradas em Vertematti et al. (2015) e Palmeira (2018).

Segundo Palmeira (2018), geomembranas, um dos materiais a serem estudados nesta pesquisa, são produtos bidimensionais com baixíssimo coeficiente de permeabilidade (cerca de 10^{-11} a 10^{-13} cm/s), podendo ser utilizadas para controlar a percolação e o fluxo de líquidos e, em casos específicos, de gases. Esses materiais possuem diferentes composições, podendo ser de polietileno de alta densidade (HDPE), polietileno de baixa densidade (LDPE), Policloreto de Vinila (PVC), dentre outros.

De acordo com Scheirs (2009), as propriedades das geomembranas são determinadas principalmente por sua estrutura polimérica, peso molecular e a cristalinidade. A cristalinidade do polímero, a qual está relacionada com o grau de ordenação (quanto maior, mais cristalino) das moléculas que o formam, é uma das propriedades mais importantes. O grau da cristalinidade explica o comportamento das geomembranas poliméricas, especialmente com relação à sua resistência mecânica e química. A cristalinidade variando entre 55 e 90% para HDPE, por exemplo, cria uma região densa com alta coesão intermolecular, atribuindo alta resistência química. Em contraste, a região amorfa ou com pouca cristalinidade, variando de 0 a 30% para PVC, faz com que tenham menor resistência química (PEDROSO, 2017).

A Figura 2.1, adaptada de Pedroso (2017), mostra o efeito do aumento e da diminuição do grau de cristalinidade dos polímeros. O polietileno de alta densidade (HDPE) por apresentar cadeias menos ramificadas que o polietileno de média densidade (MDPE) e o polietileno de baixa densidade (LDPE) contém grande proporção de cristais, que resulta em um polímero com elevada densidade e resistência à tração, porém, com susceptibilidade ao fenômeno *stress*

cracking, ou seja, fissuramento sob tensão (LAVOIE, 2006).

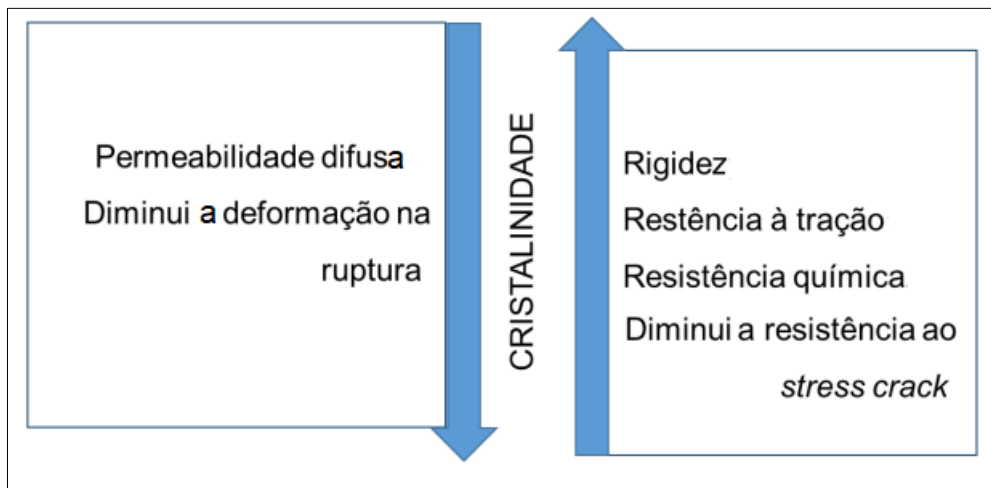


Figura 2.1 – Efeito da cristalinidade dos polímeros (Adaptado de Pedroso, 2017).

Os resultados de cristalinidade apresentados por Pedroso (2017) sugeriram que uma geomembrana mais fina é mais suscetível à degradação do que uma mais espessa. No entanto, os resultados de Rowe et al. (2010) mostraram que as propriedades de ruptura por tração diminuíram mais para a geomembrana mais espessa, o que se deve principalmente ao comportamento de delaminação, fato que não reflete necessariamente na vida útil da geomembrana. O comportamento de delaminação dos corpos de prova de geomembrana ao longo do ensaio de tração é mais severo para as geomembranas de maior espessura em função do maior gradiente de resfriamento sofrido durante o processo de extrusão (Rowe et al., 2010).

De acordo com Scheirs (2009) as geomembranas comuns podem ser classificadas em duas grandes categorias de fabricação: as termoplásticas, isto é, podem ser remodeladas, ou termorrígidas, as quais não podem ser transformadas novamente sem degradação. A Tabela 2.2 mostra as vantagens e desvantagens dos alguns de algumas geomembranas que são comumente aplicadas em obras geotécnicas.

Tabela 2.2 – Características das geomembranas considerando o polímero utilizado na fabricação (Adaptado de Scheirs, 2009).

Geomembrana	Vantagens	Desvantagens
Polietileno de alta densidade (HDPE)	Ampla resistência química	Potencial de craqueamento por estresse
	Boa força de solda	Alto grau de expansão térmica
	Boas propriedades de baixa temperatura	Má resistência à perfuração
	Relativamente barato	Fracas propriedades de deformação multiaxial
Polietileno de baixa densidade (LLDPE)	Melhor flexibilidade que o HDPE	Resistência UV inferior ao HDPE
	Melhor comportamento planar do que o HDPE	Resistência química inferior ao HDPE
	Boas propriedades de deformação multiaxial	
Policloreto de Vinila (PVC)	Boa trabalhabilidade e comportamento liso	Fraca resistência aos raios UV e ao ozônio, a menos que seja especialmente formulado
	Fácil de soldar	Fraca resistência às intempéries
	Pode ser dobrado	Baixo desempenho em alta e baixa temperatura
Polipropileno (PP)	Pode ser fabricado e dobrado na fábrica, fator que evitar soldagens no campo	Resistência limitada a hidrocarbonetos e água clorada
	Excelentes propriedades multiaxiais	
	Boa conformabilidade	
Elastômero de Dieno-Propileno-Etileno (EPDM)	Boa resistência frente aos raios UV e Ozônio	Baixa resistência ao óleo, hidrocarbonetos e solventes
	Bom desempenho para baixas temperaturas	Baixa resistência nas regiões de costura/soldagem
	excelente comportamento plano	

Tabela 2.2 – Características das geomembranas considerando o polímero utilizado na fabricação (Adaptado de Scheirs, 2009 – Cont.).

Geomembrana	Vantagens	Desvantagens
Polietileno Cloro-Sulfonado (CSPE)	Excelente resistência aos raios UV e ozônio	Não pode ser soldado termicamente após envelhecimento
	Bom desempenho em baixa temperaturas	
	Boa resistência a produtos químicos, ácidos e óleos	
Borracha Butílica	Boa resistência aos raios UV e intemperismo	Propriedades mecânicas relativamente baixas
	Boa resistência ao ozônio	
Borracha Nitrílica	boa resistência a óleos e combustíveis com exceção do biodiesel	Baixa resistência ao ozônio, a menos que adequadamente preparado
		Fraca resistência ao rasgo

No processo de produção das geomembranas é possível obter geomembranas com faces lisas ou texturizadas. As texturizadas podem ser produzidas em duas matrizes de fabricação distintas: a balão e a plana. A geomembrana texturizada de matriz plana possui superfícies rugosas mais lineares, pois as texturas primeiramente são printadas num tubo metálico de grande escala e posteriormente, são aplicadas na massa plástica, conforme ocorre num processo de impressão comum (Figura 2.2a). Em contrapartida, na produção de geomembranas texturizadas (Figura 2.2b), o nitrogênio é aplicado na massa do polímero, e então formam-se superfícies rugosas, desorganizadas e bastante próximas umas das outras.

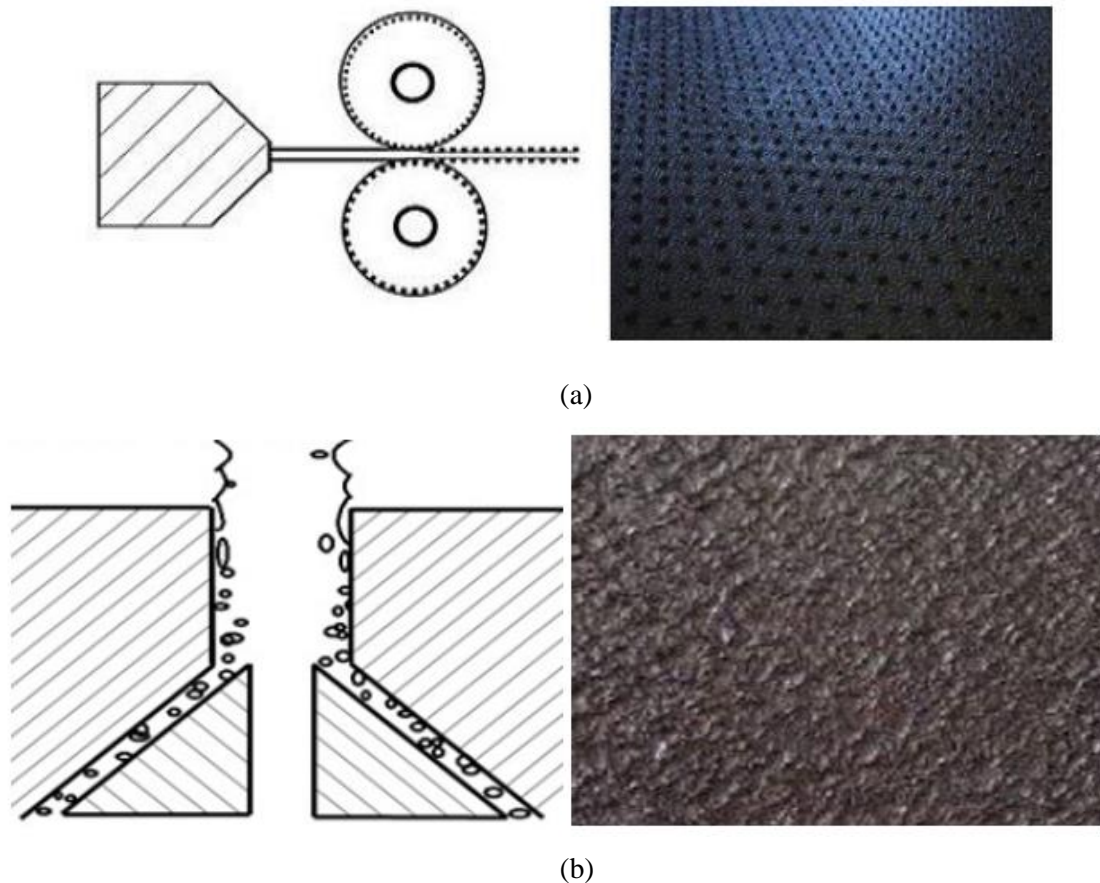


Figura 2.2 – Processos de produção de geomembranas – (a) Esquema de texturização - Matriz plana e (b) Esquema de texturização - Matriz balão (Adaptado de Palomino, 2018).

2.2. GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis foram provavelmente o primeiro tipo de geossintético a ser utilizado em obras geotécnicas no Brasil, há cerca de 40 anos, principalmente em aplicações ligadas à drenagem e filtração (Palmeira, 2018).

Silva (2017) afirma que os geotêxteis são materiais planos, permeáveis, podendo ser não tecido ou tecido, manufaturados de diferentes polímeros, sendo o polietileno, a poliamida (nylon), o poliéster (polietileno tereftalato) e o polipropileno os mais utilizados.

Os geotêxteis tecidos são fabricados por meio de processos convencionais de tecelagem. Os polímeros básicos são derretidos e forçados a passar por um extrusor que lhes dá a forma de filamentos, os quais adquirem a forma dos furos do extrusor, podendo apresentar formato cilíndrico ou de laminetes. Por outro lado, os geotêxteis não tecidos são fabricados com os

mesmos tipos de filamentos descritos anteriormente, cortados em pedaços ou contínuos. Porém, em vez do processo de tecelagem, os filamentos são lançados de forma aleatória numa esteira rolante, uns sobre os outros (Ehrlich & Becker, 2009).

A Figura 2.3 mostra diferentes estruturas que os geotêxteis podem possuir, sendo que a resistência de interface entre tais materiais e outros que estejam em contato com ele, pode ser influenciada a depender dessas configurações.

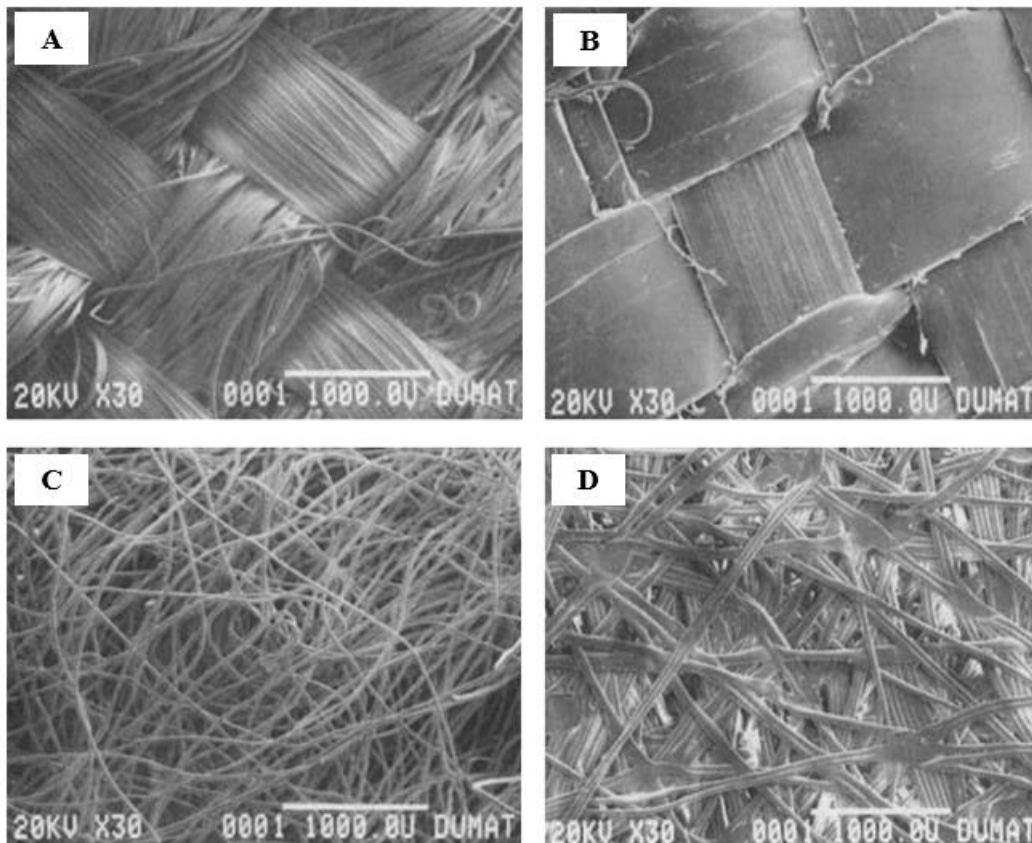


Figura 2.3 – Diferentes estruturas dos geotêxteis (A) tecido multifilamento, (B) tecido monofilamento, (C) não-tecido agulhado e (D) não tecido termoligado (Adaptado de Koerner, 2005).

Uma propriedade muito importante dos geotêxteis é a gramatura. De acordo com Palmeira (2018), essa propriedade pode ser definida como a massa dividida pela área em planta, a qual é representada normalmente por M_A .

2.3. ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE

Em projetos geotécnicos, é essencial considerar o comportamento de atrito de interface. Effedi (2011) alerta que ignorar esse aspecto pode levar a falhas em construções, como o deslizamento do aterro sanitário em Kettleman Hills, Califórnia. Engenheiros frequentemente aplicam fatores de segurança para compensar o desconhecimento desse parâmetro. No entanto, é fundamental intensificar estudos sobre a resistência de interface solo-geossintético, pois fatores de segurança inadequados podem causar problemas futuros na obra.

Samanta et al. (2017) afirmam que a resistência ao atrito na interface entre solo e outros materiais de construção é um parâmetro fundamental para o desenvolvimento de projetos de uma gama de estruturas geotécnicas. A estimativa de uma força de atrito confiável da interface é inevitável para prever com precisão a capacidade de carga vertical das estacas, estimar a capacidade de reforços do solo, projetar paredes de contenção, e etc.

O principal parâmetro que se obtém por meio do estudo de resistência de interface é o ângulo de atrito de interface, o qual segundo a NBR ISO 10318-1 (ABNT, 2018), pode ser entendido como o ângulo cuja tangente é igual a razão entre a força de cisalhamento por unidade de área e a tensão normal ao longo da interface entre duas partes do mesmo material ou entre dois materiais distintos (Equação 2.1). Outra propriedade importante que pode ser usada para o estudo da resistência de interface é o chamado coeficiente de interação por atrito (eficiência), o qual é dado pela relação entre a tangente do ângulo de atrito entre o solo e o geossintético, e a tangente do ângulo de atrito do solo (Koutsourais & Sprague, 1991), conforme mostra a Equação 2.2.

$$\tan(\phi_{int}) = \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Em que:

ϕ_{int} : ângulo de atrito de interface;

τ : tensão de cisalhamento;

σ_n : tensão normal.

$$f_{int} = \left(\frac{\phi_{int}}{\phi_s} \right) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Em que:

f_{int} : eficiência;

ϕ_{int} : ângulo de atrito de interface;

ϕ_s : ângulo de atrito do solo;

Segundo Rebelo (2003), em geomembranas relativamente rígidas, ocorre o mecanismo de deslizamento ao passo que em geomembranas mais flexíveis ocorre o mecanismo de rolamento dos grãos. Frost et al. (2012) retratam que para geomembranas lisas, a resistência de interface se dá por meio do deslizamento das partículas, conclusão que converge com Rebelo (2003), e para geomembranas texturizadas, a resistência ao cisalhamento de interface provém do mecanismo de travamento e dilatância das partículas de areia, fenômeno muito conhecido na geotecnia como imbricamento.

De acordo com Sánchez (2018), para tensões normais baixas, os grãos deslizam até a ruptura de interface, e isso faz com que o ângulo de atrito da interface seja menor do que o do solo. Quando a tensão normal aumenta, os grãos deslizam e penetram no material, fazendo sulcos na geomembrana até que ocorra a ruptura de interface, e então pode-se dizer que $\delta_{(interface)} \cong \phi'_{(solo)}$. Por fim, quando a tensão normal sofre mais um incremento, os grãos deslizam entre si e acontece a ruptura no solo acima da interface, fazendo com que o ângulo de atrito da interface se iguale ao do solo. Vale salientar que os valores de eficiência apresentados pela literatura tipicamente variam de 0,60 a 1,0 (Mello, 2001; Eigenbrod & Locker, 2011; Sánchez, 2018).

Esquemáticamente, pode-se pensar na resistência de interface conforme mostra a Figura 2.4, que evidencia as forças que atuam numa interface em plano inclinado. Pitanga et al. (2009) detalham que o comportamento de interface no ensaio de plano inclinado ocorre em três fases: estática, na qual o elemento superior permanece imóvel; transitória, em que o aumento da inclinação faz o elemento começar a descer gradualmente; e deslizamento não estabilizado, na qual o elemento desliza a uma velocidade crescente, mesmo com inclinação constante.

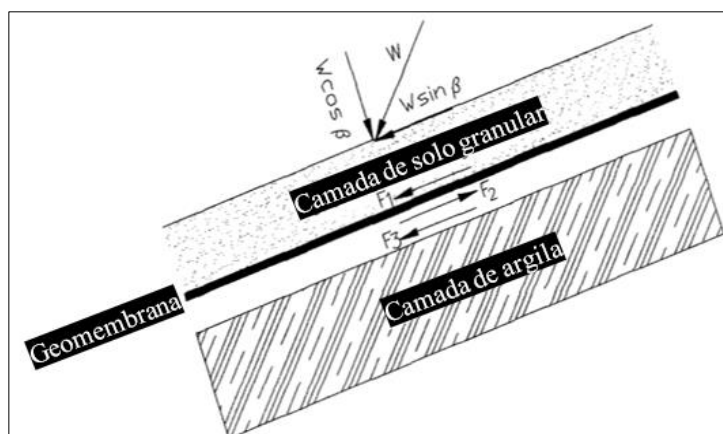


Figura 2.4 – Esquemática das forças que agem numa interface solo-geomembrana numa situação de plano inclinado (Adaptado de Igzin, 1997).

Sánchez (2018) destaca que para obtenção do ângulo de atrito podem ser utilizados diversos ensaios, destacando-se os seguintes: ensaio de cisalhamento direto convencional (CDC), ensaio de cisalhamento direto modificado (CDM) e ensaio de plano inclinado (PI). O ensaio CDC (Figura 2.5a) é regido pela NBR ISO 12957-1 (ABNT, 2022), e basicamente trata-se de duas caixas que são deslizadas uma contra a outra, sob tensão normal e velocidade de deslocamento constantes. Por sua vez, o ensaio CDM (Figura 2.5b) é um equipamento com mesmo princípio de funcionamento do CDC, porém com dimensões maiores visando a diminuição de problemas de escala para determinados estudos, como os que utilizam geossintéticos, por exemplo.

Por outro lado, o ensaio de plano inclinado (Figura 2.5c) é normatizado pela NBR ISO 12957-2 (ABNT, 2013), e tem como objetivo determinar as características de atrito de geossintéticos em contato com solos específicos de campo ou outros geossintéticos. Outras informações complementares acerca desses ensaios podem ser encontradas em Lima Júnior (2000), Mello (2001) e Sánchez (2018).

Outro ensaio que pode ser aplicado para obtenção do ângulo de atrito de interface é o cisalhamento torcional de anel (*ring shear*). No entanto, um deslocamento de cisalhamento de 40 a 60 cm é normalmente necessário antes que a resistência ao cisalhamento da interface residual possa ser mobilizada, e isso pode ser considerado como uma limitante do ensaio, pois isso pode exigir um tempo substancial para a conclusão do teste de cisalhamento (Stark et al., 1994). A respeito disso, Cen et al. (2018) afirmam que o aparelho clássico de cisalhamento direto é amplamente considerado para fornecer uma estimativa razoável da força de pico, e a

força de pico é mobilizada em um deslocamento de cisalhamento comparativamente mais marginal do que realmente necessário para o teste de cisalhamento torcional.

A Figura 2.5 mostra os principais equipamentos que podem ser aplicados para realizar os ensaios de resistência de interface. Na sequência (Figura 2.6), podem ser vistos alguns esquemas que demonstram como os materiais são posicionados em cada um dos equipamentos para medição da resistência de interface.

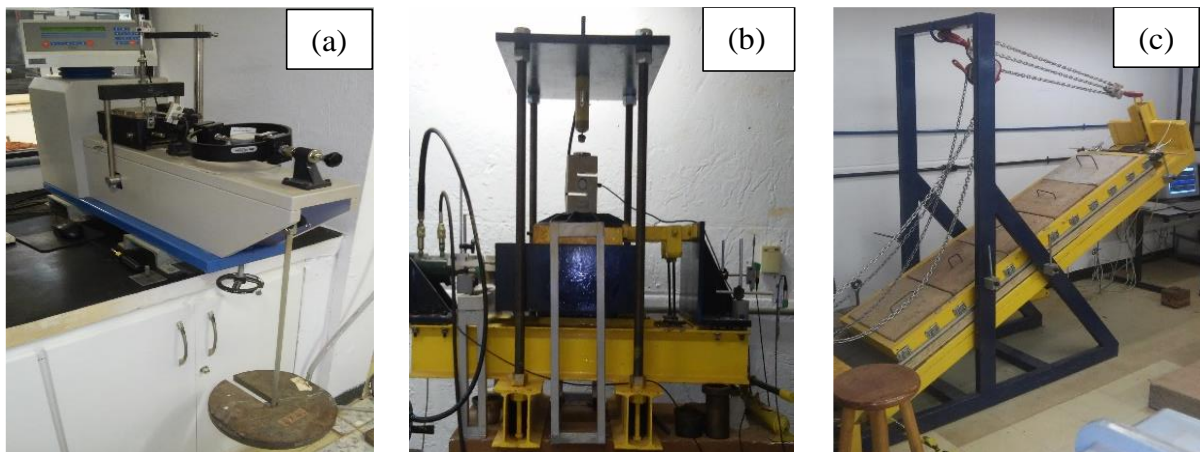


Figura 2.5 – Equipamentos para realização de ensaio de resistência de interface – (a) CDC, (b) CDM e (c) PI (Adaptado de Sánchez, 2018).

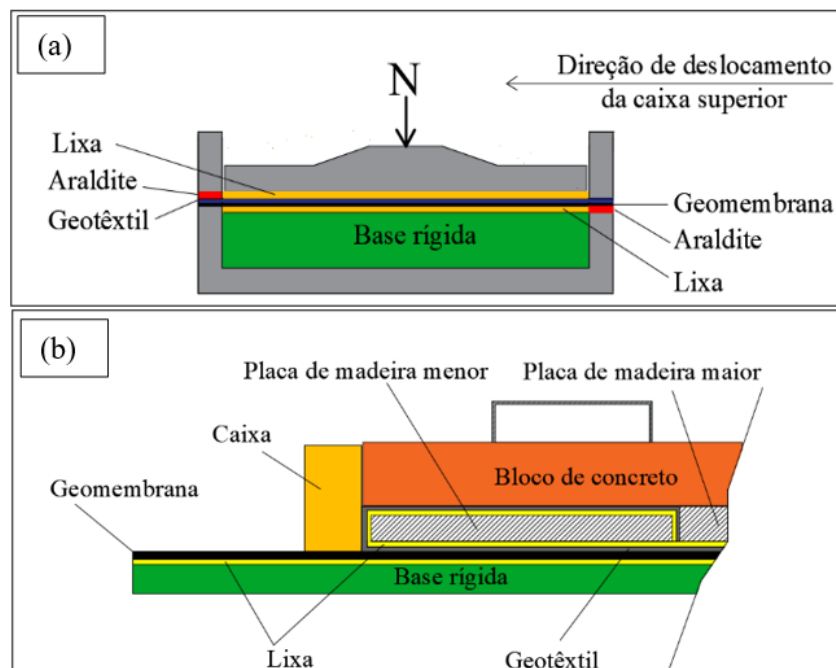


Figura 2.6 – Esquematização dos materiais nas interfaces para realização dos ensaios de cisalhamento – (a) CDC e (b) PI (Adaptado de Sánchez, 2018).

Os ensaios de cisalhamento direto são simples de se realizar, mas as condições de fronteira podem influenciar os resultados dos ensaios em amostras de solo reforçado, particularmente para pequenas caixas de cisalhamento. Por outro lado, os ensaios em rampa são fáceis de efetuar e úteis para o estudo da estabilidade dos sistemas de revestimento. Eles também podem ser utilizados para avaliar a eficácia do reforço do solo de cobertura e a influência do fluxo de água nas condições de estabilidade do sistema. Deve ser dada preferência a equipamentos de ensaio de grandes dimensões ou a caixas com faces laterais inclinadas quanto o intuito for o de minimizar os efeitos de fronteira e as distribuições não uniformes de tensões normais na interface solo-geossintético (Palmeira, 2009).

Sobre a comparação entre os ensaios CDC e CDM, Cen et al. (2018) afirmam que as diferenças entre estes aparelhos afetam a capacidade de comparar com precisão os ensaios. Dessa forma, o desenvolvimento de um aparelho de cisalhamento em grande escala pode proporcionar grande ganho para simular com precisão e consistência os comportamentos de cisalhamento de várias interfaces geossintéticas.

O ensaio de rampa em larga escala colabora para uma simulação mais realista da interação das interfaces no campo, e o estudo desse comportamento pode auxiliar na otimização dos parâmetros que são necessários para a correta elaboração de projetos geotécnicos. Ele é considerado um dos que mais representam a situação de campo, além de ser indicado para situações em que a interface solo-geossintético está submetida a carregamentos baixos, situação comum em aterros sanitários e canais no momento da construção (Sánchez, 2018).

Izgin & Wasti (1998) mediram os parâmetros de resistência ao cisalhamento da interface areia-geomembranas usando o ensaio PI, considerando o efeito do tamanho das partículas de areia nos ângulos de atrito determinados da interface. Em relação aos carregamentos utilizados, que são normalmente mais baixos, eles afirmam que tensões normais altas não são aplicadas convenientemente no ensaio PI porque seria necessária uma esquematização de equipamento muito maior do que as que existem, e isso poderia inviabilizar a realização do ensaio. O mecanismo de deslocamento do ensaio PI, quando interpretado de acordo com as normas europeias, fornece o ângulo de atrito da interface estático, ou seja, aquele que é geralmente assumido para deslocamento de 50 mm da caixa deslizando, sendo o mesmo indicado como $\phi_{50\text{stat}}$.

De acordo com Aguiar (2003), a escolha do ensaio mais adequado vai depender do tipo de geossintético ensaiado e do movimento relativo entre ele e a massa de solo, sendo esse responsável pela mobilização da resistência de interface.

2.4. ESTUDOS GEOTÉCNICOS SOBRE RESISTÊNCIA DE INTERFACE E OS FATORES QUE A INFLUENCIAM

Em obras envolvendo geossintéticos, os planos preferenciais de ruptura geralmente localizam-se nas interfaces existentes entre tais materiais e os que estão em contato. Isso se deve principalmente ao fato de que o estado de tensões desenvolvido nos componentes do sistema geossintético durante a operação ou instalação não é um fator simples de ser controlado, principalmente quando se trata de planos inclinados.

Viana (2007), em consenso com Girard et al. (1990) e Stamatopoulos & Kotzias (1996), afirma que, se as condicionantes de projeto do sistema forem avaliadas incorretamente (particularmente, os valores dos ângulos de atrito de interfaces ou poropressão), pode ocorrer instabilidade do talude durante a instalação, ou até mesmo enquanto a estrutura estiver em operação, o que é mais desfavorável, sendo imprescindível que os parâmetros de interface sejam corretamente considerados para que os problemas de estabilidade sejam evitados.

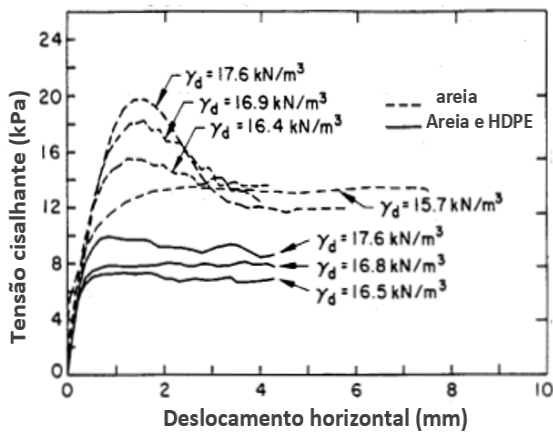
Um grande número de pesquisadores estudou o efeito de diferentes parâmetros no comportamento de cisalhamento da interface do solo com diversos materiais utilizando ensaios de cisalhamento direto convencional e modificado, a saber: Potyondy (1961); Butterfield & Andrawes (1972); Acar et al. (1982); Tsubakihara & Kishida (1993); Tejchman & Wu (1995); Reddy et al. (2000); Gireesha & Muthukkumaran (2011); Vieira et al. (2015); Cabalar (2016); Zhang et al. (2016); Punetha et al. (2016, 2017); Punetha & Samanta (2017); Toufigh et al. (2017); Sánchez (2018); Lashkari & Jamali (2021); Rizwan et al. (2022); Chiarello (2022); Guo et al. (2023); Jia et al. (2023); Stacho et al. (2023); Muluti et al. (2023); Tanga et al. (2023), dentre outros.

Quanto aos estudos sobre resistência de interface realizados por meio do ensaio de plano inclinado, cita-se os seguintes: Girard et al. (1990); Mitchell et al. (1990); Gourc et al. (1996); Lalarakotoson et al. (1999); Lima Júnior (2000); Lopes (2000); Mello (2001); Briançon et al. (2002); Gourc & Reyes Ramirez (2003); Aguiar (2003); Gourc & Reyes Ramírez (2004); Viana (2007); Pitanga et al. (2009); Briançon et al. (2011); Pitanga et al. (2011); Stoltz et al.

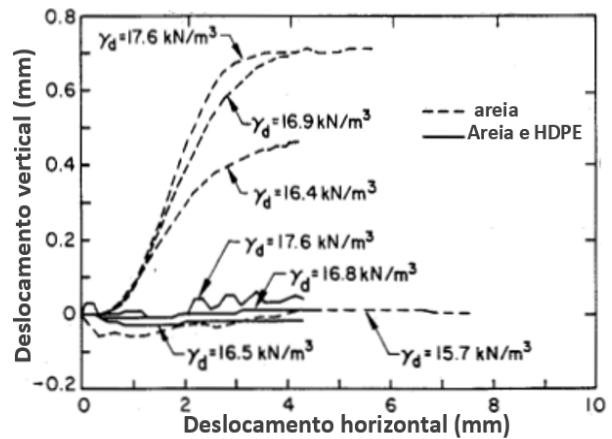
(2012); Monteiro (2012); Carbone et al. (2013); Miuzzi (2013), Sánchez et al. (2018) e Araújo et al. (2022); Veerla & Srinivas (2022); Pavanello et al. (2022); Wang & Yin (2022), Cazzuffi et al. (2022); Zhang et al. (2023); Tanga et al. (2023), dentre outros.

Na linha do tempo de estudos sobre resistência de interface, um dos mais antigos é o trabalho de Potyondy (1961), cujo objetivo foi determinar os valores de ângulo de atrito entre diferentes tipos de solos e materiais de construção, a saber, aço, madeira e concreto, em condição de superfície lisa e rugosa. Nesse trabalho, uma análise entre o ângulo de atrito de interface e a resistência dos solos, bem como entre as características da superfície de vários materiais de construção, foram averiguadas. O autor observou que quatro fatores principais influenciaram o ângulo de atrito de interface: o teor de umidade dos solos, a aspereza da superfície, a composição dos solos e a intensidade da carga normal aplicada. Por meio desses ensaios, o autor demonstrou que, no caso de solos coesos, a adesão e ângulo de atrito interno do solo devem ser levados em consideração na avaliação do ângulo de atrito de interface.

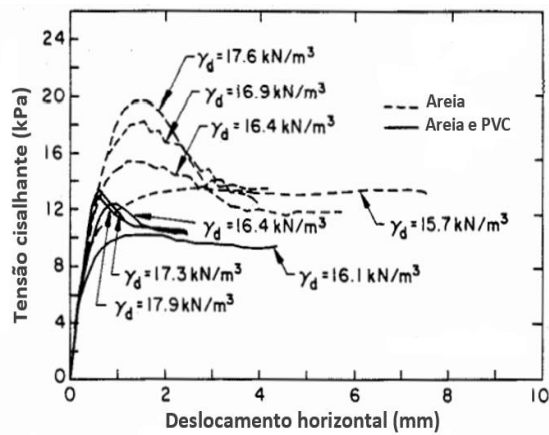
O'Rourke (1989) mostra que há um aumento gradual na tensão de cisalhamento máxima conforme o peso específico da areia aumenta para interfaces geossintéticas. Esse comportamento para geomembranas de PVC e HDPE está exposto na Figura 2.7. Por meio dessas constatações, o autor concluiu que é importante considerar as características físicas do solo, bem como o tipo de material de fabricação da geomembrana.



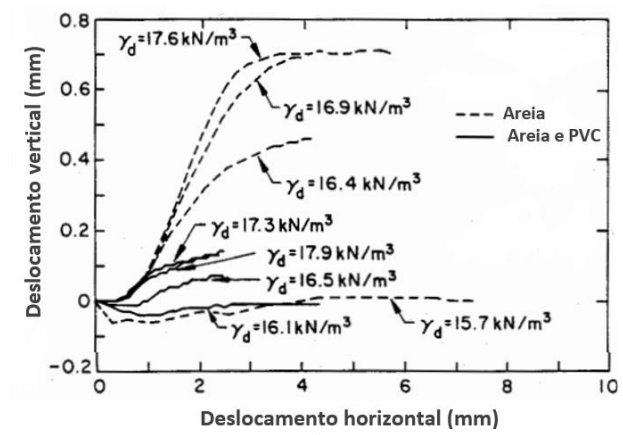
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.7 – Aumento gradual na tensão de cisalhamento máxima conforme o aumento do peso específico da areia, comparando geomembranas de HDPE (a e b) e PVC (c e d) - (Adaptado de O'Rourke, 1989).

Em relação ao comportamento mecânico das geomembranas, O'Rourke et al. (1991), em seu estudo acerca das características de interface areia-geomembranas, mostram comportamentos típicos de geomembranas HDPE e PVC, quando as mesmas são avaliadas do ponto de vista de tensão x deformação. A Figura 2.8 mostra a diferença de comportamento entre esses dois materiais de fabricação das geomembranas.

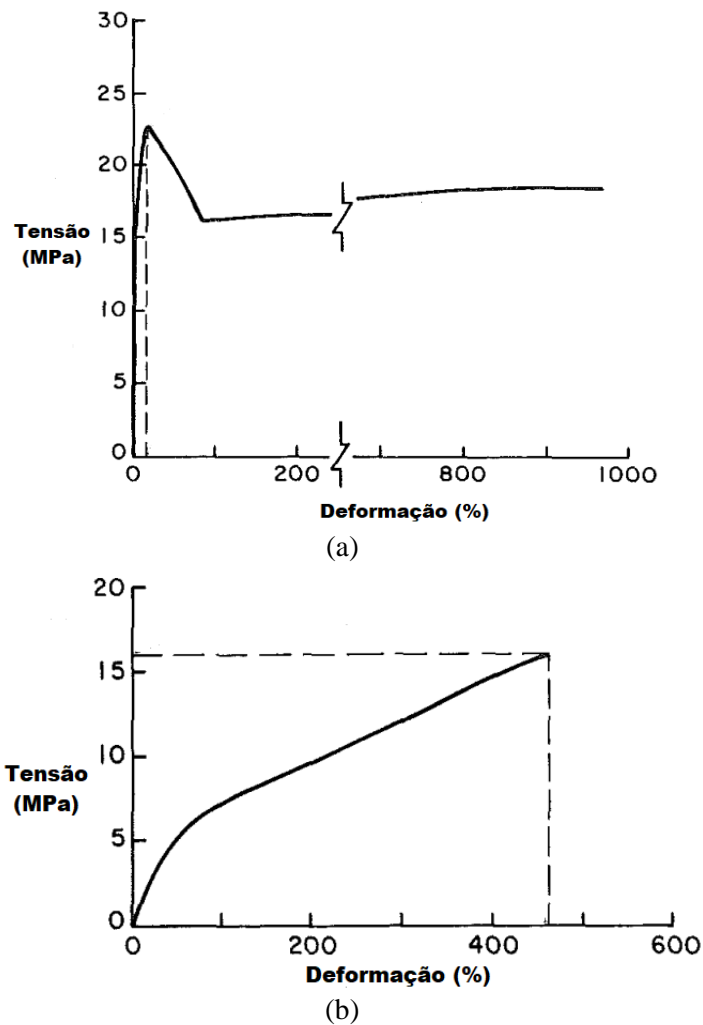


Figura 2.8 – Comportamento mecânico de geomembranas – (a) tipo HDPE e (b) PVC (Adaptado de O’Rourke et al., 1991).

Cadwallader (1991) em seu estudo acerca da aplicação de geomembranas de polietileno de baixa densidade lisas e rugosas em cobertura de aterros, verificou que o ângulo de atrito sofre um acréscimo de 9° ao se usar uma geomembrana texturizada ao invés da lisa na interface em contato com uma areia de Ottawa. Na mesma linha de raciocínio, Izgin e Wasti (1998) pesquisaram sobre resistência de interface usando os ensaios CDC e PI, também para uma areia de Ottawa, e apresentam em seus estudos envoltórias de resistência que mostram o melhoramento mecânico que as rugosidades da geomembrana texturizadas promovem. Nessas envoltórias é possível perceber que ocorre um aumento de $11,5^\circ$ no ângulo de atrito de interface em relação à geomembrana lisa.

Izgin (1997) propôs a construção de um equipamento capaz de realizar ensaios de resistência de interface com a variação da área de contato. O aparelho, cujas dimensões são 600×490

x25mm, pode realizar ensaios com áreas de contato de 60x60mm, 200x200mm e 300x300mm. No caso de amostras de pequenas dimensões, o confinamento pode chegar a 50 kPa, e para amostras maiores, esse confinamento se restringe a 25 kPa. Uma das principais conclusões do trabalho mostrou que angularidade das partículas das areias, bem como o aumento da rugosidade da superfície da geomembrana melhoraram a resistência ao cisalhamento da interface areia-geomembrana para áreas de contato semelhantes.

Estudos sobre a viabilidade de aplicação do ensaio PI na simulação de resistência de interface em taludes impermeabilizados com geomembranas lisas de 1 e 2 mm de espessura foram realizados por Lima Júnior (2000). O autor percebeu que a resposta em relação ao ângulo de atrito foi igual, resultando em 24° com uma interface de areia fina, levando a concluir que a espessura da geomembrana não influencia a resistência de interface de forma direta.

Por sua vez, Mello (2001) apresentou um estudo acerca da interação solo-geossintético em taludes de obras de disposição de resíduos, com o intuito de avaliar a influência do tipo de solo no comportamento de interface, além de simular numericamente o ensaio de PI. Esse autor trabalhou com geomembranas lisas de HDPE (Polietileno de Alta Densidade) lisa, PVC (Policloreto de Vinila) lisa e HDPE texturizada. Foi observado pelo autor que os ângulos de atrito foram 24°, 25°, 32°, respectivamente, evidenciando mais uma vez a importância da rugosidade das geomembranas nos projetos de obras geotécnicas.

O estudo de Hebler et al. (2005) investigou o papel da textura da geomembrana no desempenho da interface geomembrana-geotêxtil, concentrando-se em particular na interação de gancho (das asperezas) e laço (efeito do fio dos geotêxteis). O estudo envolveu especificamente geomembranas HDPE texturizadas e geotêxteis não tecidos agulhados. Os resultados mostram que a magnitude da interação de gancho e laço depende das características da textura da geomembrana e pode contribuir com uma porção significativa da resistência do pico da interface. Os resultados ajudaram a quantificar as diferenças comportamentais observadas entre geomembranas texturizadas utilizando diferentes processos de fabricação, fornecendo uma visão em microescala dos mecanismos de interação geomembranas-geotêxteis texturizadas ao longo de uma gama de níveis de tensão. O efeito gancho e laço está esquematizado na Figura 2.9.

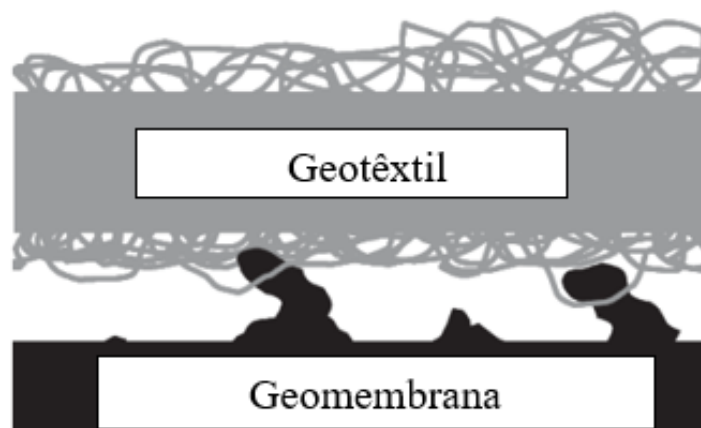


Figura 2.9 – Efeito gancho e laço (Adaptado de Hebler et al., 2005).

Bilgin et al. (2011) realizaram um estudo sobre o efeito do tempo no contato entre solo-geomembrana utilizando uma abordagem teórica. O objetivo principal dos autores foi apresentar o quanto as áreas de contato na interface podem mudar durante a vida útil de uma estrutura sob efeito de uma carga. Os resultados mostraram que após dez anos de ação da sobrecarga utilizada na obra, ocorre um aumento de cerca de 250% na área de contato na interface geossintética. Além disso, o estudo mostrou também que este aumento da área de contato resultará numa diminuição significativa das tensões de contato na interface solo-geomembrana, pois a tendência é que ela se torne constante ao longo do tempo.

No trabalho de Anubhav & Wu (2015) foi apresentado um novo modelo constitutivo que foi implementado para estudo de interfaces geossintéticas considerando o comportamento de deslocamento de diferentes interfaces areia-geotêxteis, principalmente geotêxteis do tipo monofilamentos tecidos, multifilamentos tecidos e não-tecidos. Foi observado pelos autores que as curvas simuladas usando o FLAC3D mostraram bom ajuste com os dados experimentais, que o comportamento da interface solo-geossintéticos depende de propriedades específicas do geotêxtil e do solo, e que a dependência entre os fatores de interface pode não seguir o comportamento generalizado e linear apresentado por materiais convencionais.

Resultados acerca do estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais foram apresentados por Sánchez (2018), que realizou ensaios CDC, CDM e PI, utilizando uma areia média e concreto como interfaces, geotêxteis e geomembranas (lisa e texturizada) como materiais geossintéticos. Os resultados em relação às

geomembranas mostraram que o ensaio de PI se adequa melhor para determinação da resistência de interface para baixas tensões.

Lashkari & Jamali (2021) apresentaram um estudo a respeito da influência do formato da partícula, do tamanho médio da partícula, densidade relativa inicial e tensão normal efetiva nos ensaios de cisalhamento direto realizados entre seis areias em contato com um geotêxtil não tecido (NGTX) e uma geomembrana (GMB) lisa de PVC. Esses autores concluíram que os ângulos de atrito máximos das interfaces areia-NGTX e areia-GMB diminuem com a diminuição da densidade relativa inicial, e com o aumento da tensão normal efetiva e da regularidade global (por exemplo, circularidade e esfericidade) das partículas. Por fim, concluíram também que os ângulos de atrito da interface residual não são sensíveis à densidade relativa inicial e à tensão normal efetiva aplicada.

Uma série de ensaios laboratoriais de cisalhamento direto modificado utilizando três tipos de areias e quatro tipos diferentes de geotêxteis foi realizada por Rizwan et al. (2022). Os autores utilizaram três amostras de areia pouco graduadas, três geotêxteis tecidos (GW's) e um não tecido (NW), conforme mostra a Figura 2.10. Foi possível perceber com a pesquisa desses autores que a interação da interface areia-geotêxtil pode ser descrita por uma envoltória de ruptura linear, com uma eficiência de interface que varia entre 0,67 e 0,97. Além disso, foi observado que o comportamento areia-geotêxtil depende do tipo de geotêxtil e das suas características de superfície, sendo a eficiência da interface do NW de 3 a 22% superior à dos GWs, sendo esse aumento atribuído ao arranjo dos filamentos do geotêxtil não tecido.

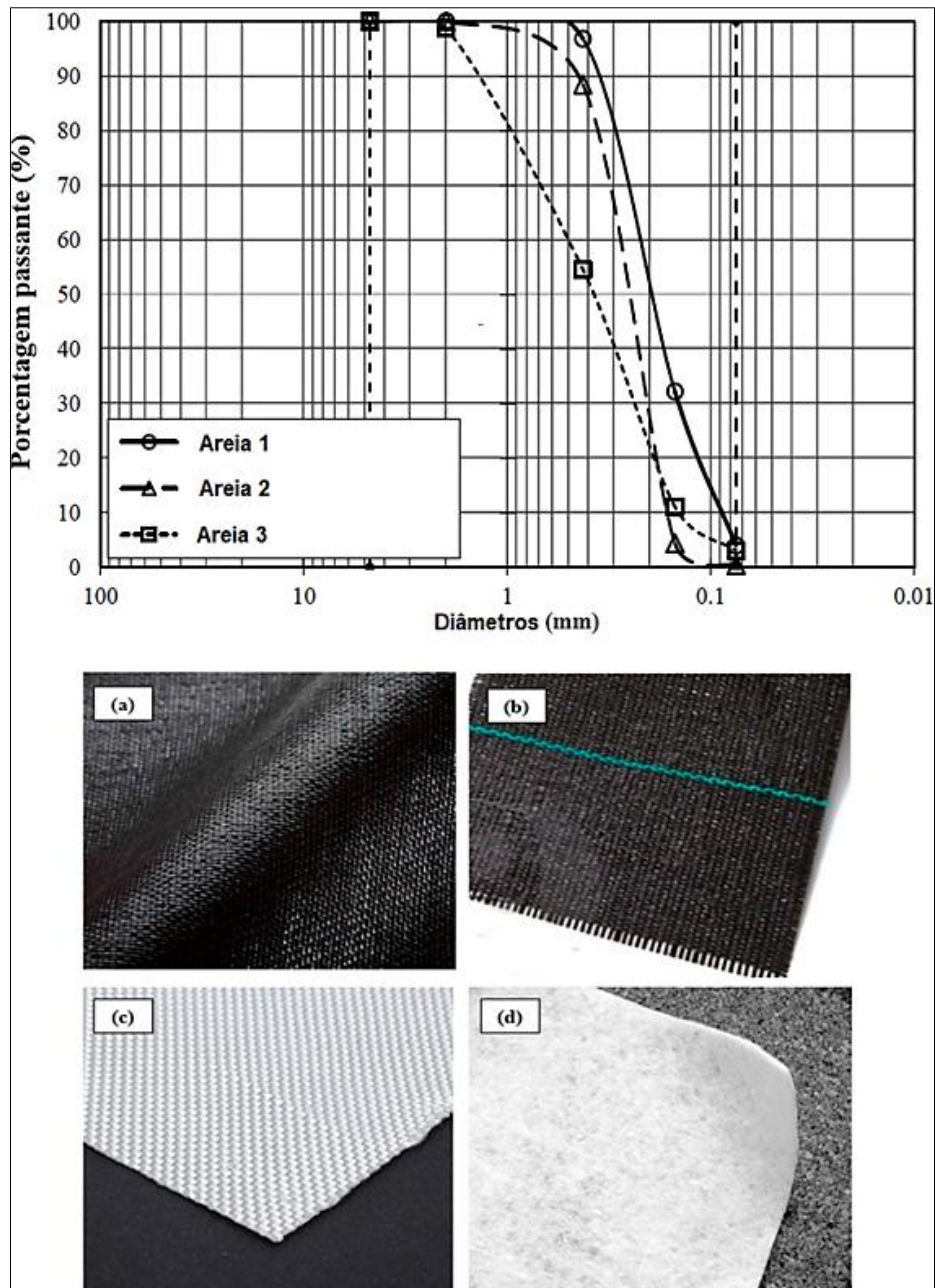


Figura 2.10 – Materiais utilizados – (a) Geotêxtil tecido 1, (b) Geotêxtil tecido 2, (c) Geotêxtil tecido 3, (d) Geotêxtil não tecido (Adaptado de Rizwan et al., 2022).

A interação de interfaces de sistema de impermeabilização foi investigada por Chiarello (2022) por meio do ensaio de cisalhamento direto convencional e modificado utilizando cinco tensões normais, a saber: 25, 50, 100, 200 e 400 kPa. O autor observou que a inserção de materiais geossintéticos reduziu o intertravamento das partículas de solo, diminuindo a resistência ao cisalhamento em relação a interface solo-solo, assim atingindo o menor resultado para interface solo-geomembrana lisa. Além disso, a resistência ao cisalhamento foi alterada devido a inserção de atrito na superfície do material geossintético, o qual foi causado

pelos danos, criando assim uma melhor interação entre camadas. Por fim, nas interfaces avaliadas em cisalhamento direto de grande escala atingiram-se valores de resistência ao cisalhamento mais conservadores em relação aos ensaios de cisalhamento convencional.

Veerla et al. (2022) realizaram uma revisão sistemática do estudo sobre os mecanismos que são desenvolvidos durante os ensaios de resistência de interface. Os autores concluíram que o coeficiente de atrito e a dilatância máxima desenvolveram-se de forma mais rápida quando o plano de inclinação se situava entre $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$.

Uma comparação dos ângulos de atrito de interface obtidos, para três interfaces, por meio de um plano inclinado e um aparelho de cisalhamento direto não convencional sob a mesma tensão normal baixa foi realizado por Pavanello et al. (2022). Apesar de os ensaios de cisalhamento direto modificado ter sido reportado como uma melhor alternativa para garantir um aumento gradual da força mobilizada em relação ao ensaio de plano inclinado, os autores chegaram à conclusão de que existe uma boa correspondência dos resultados dos dois tipos de ensaios para cargas menores. Além disso, nessa pesquisa foi observado que a não uniformidade da tensão normal, fator intrínseco do ensaio do plano inclinado, não causou mudanças significativas nos resultados, se comparados à condição de carga centrada do ensaio de cisalhamento direto.

Wang & Yin (2022) realizaram uma modelagem a partir de uma série de ensaios de cisalhamento de interface utilizando o método de elementos discretos (DEM) para entender o papel da quebra de partículas na interface. Todos os resultados demonstram que a quebra de partículas diminui a dilatação, a tensão normal, a tensão de cisalhamento e a espessura da zona de cisalhamento no teste de cisalhamento de interface. Além disso, a quebra de partículas diminui o ângulo de atrito de pico enquanto aumenta o ângulo de atrito residual na interface.

Nos estudos de Cazzuffi et al. (2022), que foram realizados utilizando interfaces com geomembranas lisas (HDPE-S), geomembranas texturizadas (HDPE-T), geocomposto bentonítico (GCL) e geocomposto drenante (GCD) em contato com solos granulares e coesivos, bem como com outros geossintéticos (geotêxteis e georredes), todos os ensaios foram realizados sob tensões confinantes variando de 10 a 50 kPa. Essa faixa de tensão vertical foi escolhida, segundo os autores, porque representa as tensões de campo que atuam

sobre sistemas de cobertura de aterros sanitários. Como conclusões principais, os autores afirmam que os resultados de ângulo de atrito de interfaces obtidos na faixa de tensão normal aplicada se mostraram superiores aos fornecidos pela Koerner & Narejo (2005). A razão dessa diferença foi provavelmente a faixa diferente de tensão utilizada no banco de dados utilizado por Koerner & Narejo (2005), ou seja, 150 a 300 kPa. As diferenças encontradas também podem estar relacionadas à quebra de partículas, falha interna do geossintético e deterioração da interface (por exemplo, redução ou ruptura em rugosidades ou asperezas de geossintéticos texturizados).

Guo et al. (2023) estudaram o efeito da temperatura na resposta ao cisalhamento monotônico e cíclico de uma interface solo-concreto utilizando ensaio de cisalhamento direto convencional. Os autores concluíram que os parâmetros de resistência da interface areia podem ser razoavelmente considerados constantes dentro da gama de temperaturas relativamente amenas. Além disso, foi observado também que os ensaios de cisalhamento cíclicos indicaram uma possível redução progressiva do atrito de interface, especialmente para as interfaces areia-concreto.

Por meio da pesquisa de Jia et al. (2023) foi desenvolvido um modelo tridimensional pelo método dos elementos discretos (DEM) para explorar as influências da direção de cisalhamento e da anisotropia da geogrelha no comportamento da resistência ao cisalhamento das interfaces geogrelha-solo. A evolução da microestrutura das partículas do solo indicou que a direção de cisalhamento tem uma certa influência na amplitude da força de contato normal, mas pouca influência na direção principal. Os autores observaram também que a resistência ao cisalhamento da interface diminui geralmente com o aumento da anisotropia da geogrelha biaxial, devido à diminuição da resistência global da geogrelha. Por outro lado, a anisotropia da geogrelha biaxial tem uma influência importante na resistência passiva da nervura da geogrelha, mas pouca influência na resistência de interface da superfície da geogrelha.

Stacho et al. (2023) executaram ensaios de cisalhamento utilizando um aparelho modificado, no qual foram ensaiados um total de 5 amostras diferentes, a saber: cinzas, areia, cascalho bem graduado, e cascalho fino e médio mal graduados. Esses materiais foram reforçados com avaliados frente às interfaces com geotêxtil tecido e geogrelhas. Esses autores também definiram um coeficiente de interface (α), sobre o qual concluíram que de um modo geral α

umenta com a diminuição das dimensões dos grãos dos materiais pouco graduados. No caso da interface com geotêxtil, o material de fabricação do geossintético, bem como o tamanho e a forma dos grãos do material têm uma influência decisiva na resistência ao cisalhamento da interface.

Muluti et al. (2023) utilizaram um equipamento de cisalhamento modificado 305×305 mm para efetuar ensaios de interfaces em condições saturadas com tensões normais aplicadas que variaram de 50 a 400 kPa. Os resultados mostraram uma boa concordância entre as envoltórias de resistência derivadas de ensaios de interface de camada única e multicamada para os materiais testados, a saber: geotêxtil, geomembrana e GCL. No entanto, as resistências de pico obtidas para esses mesmos materiais foram geralmente 9% e 24% inferiores, respectivamente, para os ensaios de interface simples do que para os ensaios de interface multicamada em todo intervalo de tensões normais consideradas. Salienta-se ainda que as respostas de interface convencionais solo-solo-geossintético e geossintético-geossintético versus deslocamento de cisalhamento com comportamento não linear foram observadas em ensaios de interface de camada única e multicamada.

Zhang et al. (2023) elaboraram um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos no qual foi considerada a influência das características do tipo equipamento de cisalhamento na resposta dinâmica do solo. Os resultados mostraram que a resposta do deslocamento lateral do solo por dois métodos de ensaio, a saber, caixa de cisalhamento inclinada e caixa de cisalhamento rígida horizontal apresentam grandes diferenças, podendo o valor máximo da diferença chegar a 45%.

2.5. ESTATÍSTICA E SEUS FUNDAMENTOS

De acordo com Ching et al. (2015), a incerteza estatística está presente porque a quantidade de informação coletada em um local é sempre limitada, e a única maneira de eliminar a incerteza estatística é investigar a população inteira. Porém, investigar a população inteira no âmbito da geotecnia, considerando o ponto de vista técnico e econômico não costuma ser viável.

A estatística pode ser subdividida em duas grandes áreas, segundo Larson & Farber (2010): estatística descritiva e estatística inferencial. Por outro lado, de forma mais subdividida, Assis

et al. (2018) afirmam que são três grandes áreas, a saber: Estatística Descritiva, Estatística Inferencial, e regressões e correlações.

Para a compreensão correta das subdivisões das áreas da estatística, é importante falar sobre quatro definições, a saber: população (ou universo), amostra, parâmetro e a medida estatística em si. Larson & Farber (2010) afirmam que a população é definida como uma coleção de todos os resultados, respostas, medições ou contagens que são de interesse de uma determinada pesquisa. Em contrapartida, a amostra, como o próprio nome já pressupõe, trata-se de um subgrupo de uma população. Por fim, de acordo com Levine et al. (1998), um parâmetro é uma medida calculada para descrever uma característica de toda uma população e uma estatística é uma medida calculada para descrever uma característica de apenas uma amostra da população.

Também é importante definir os possíveis tipos de variáveis que normalmente são aplicadas nos estudos estatísticos, ou seja: variáveis aleatórias categorizadas e variáveis aleatórias numéricas. Em termos práticos, se o tipo de resposta for realizado com sim ou não, trata-se então de uma variável categorizada. Por outro lado, as variáveis aleatórias numéricas podem ser discretas e contínuas, segundo Levine et al. (1998). Na sequência serão abordados os tipos de estatísticas supracitados, a fim de apresentar as principais variáveis de estudo que compõe cada subdivisão.

2.5.1. Estatística Descritiva (ED)

Guimarães (2008) afirma que o principal objetivo da Estatística Descritiva é resumir as principais características de um conjunto de dados por meio de tabelas, gráficos e resumos numéricos. A análise estatística deve ser extremamente cuidadosa ao escolher a forma para resumir os dados avaliados. O arsenal da ED é composto por diversas variáveis, e as principais estão descritas abaixo.

2.5.1.1. Medidas de tendência central

De acordo com Ferreira (2005), pela concentração de dados de um conjunto de mensurações nas proximidades de alguns valores, verifica-se que esses valores podem ser usados para representar todos os dados estudados. Ou seja, é possível afirmar que alguns valores podem ser representantes do conjunto de mensurações. Eles são denominados de medidas de posição ou medidas de tendência central.

Em consenso com a definição supracitada, Levine et al. (1998) afirmam que a maioria dos dados apresenta uma diferente tendência de se agrupar ou concentrar em torno de um ponto central. Desta forma, para um conjunto de dados em particular, geralmente torna-se possível selecionar um valor típico ou médio para descrever todo o conjunto. Tal valor descrito típico é uma medida de localização ou tendência central. Neste trabalho, serão utilizados três tipos de medidas de tendência central, a saber, média aritmética, mediana e moda, que serão melhor descritas na metodologia, juntamente com as demais análises estatísticas realizadas.

2.6. ESTATÍSTICA APLICADA À ENGENHARIA GEOTÉCNICA E ÁREAS CORRELATAS

Existem alguns estudos na geotecnia que abordam a aplicação da estatística. O trabalho de Koppe (1982) abordou a caracterização geotécnica e análise estatística dos parâmetros de um solo residual, por meio de estatística descritiva e correlações realizadas entre os ensaios de campo e de laboratório. Diagramas de controle de qualidade foram utilizados para determinar as medições dentro de um intervalo de variabilidade aceitável, sendo que o autor utilizou o limite como a média geral mais três desvios padrão. Apesar de ter obtido bons resultados por meio da constatação da ocorrência de uma distribuição normal dos dados com intervalos de confiança de 95% para todos os parâmetros, o autor observou a necessidade de realizar uma nova análise estatística considerando um solo de características mais homogêneas a fim de obter um melhor aproveitamento dos parâmetros obtidos.

Um modelo de regressão foi utilizado por Benson et al. (1994) para relacionar a variabilidade espacial das medições de controle de qualidade de construção, a saber, dados de compactação, limites de Atterberg e medições de tamanho de partícula, às variações na condutividade hidráulica. Para isso, esses autores elaboraram uma regressão para relacionar variabilidade de medições; aplicaram estatísticas que descreveram a variabilidade espacial da condutividade hidráulica em escala pontual com o intuito de estimar a condutividade hidráulica equivalente do liner; e calcularam o erro de estimativa para condutividade hidráulica equivalente, bem como a probabilidade de excedência da condutividade hidráulica equivalente dado um valor máximo predefinido. Os autores concluíram que dimensão da amostra a ser analisada depende das propriedades do solo, da sua variabilidade espacial e do número de camadas aplicadas na formação do liner.

Os estudos de Orr & Farrell (1999) concluíram que os intervalos típicos para o coeficiente de variação (COV) dos parâmetros do solo, a saber coesão (COV_c) e ângulo de atrito (COV_ϕ) estão no intervalo de 4% a 11% e 20% a 40%, respectivamente. Esses resultados foram obtidos por meio da elaboração dos estudos presente no código europeu de práticas para projetos geotécnicos (Eurocode 7), o qual foi baseado em estudos de casos de obras reais.

Uma área na qual estudos estatísticos são bastante aplicados é na engenharia estrutural. Larrossa et al. (2014), na pesquisa acerca da conformidade do concreto aplicado obras portuárias, utilizaram análises estatísticas e de aceitação do produto, com base nos critérios de aceitação de distintas metodologias de diferentes continentes. Os autores mostraram que as variações podem ocorrer nos resultados dos testes de conformidade dependendo do modelo adotado. Por fim, verificou-se, com base nas análises estatísticas apresentadas, que a construção das obras portuárias em concreto na região está em conformidade com as normas brasileiras vigentes, tendo em vista que dentre os coeficientes de variação dos lotes avaliados, o máximo valor encontrado foi de aproximadamente 12%.

Paiva (2009) buscou analisar estatisticamente a mudança de umidade, sucção e variação de volume de um depósito de argila potencialmente expansiva com três tipos distintos de cobertura, utilizando como ferramenta a estatística clássica e a Geoestatística. Os principais resultados mostraram que o estudo estatístico descritivo seguido da análise de variância conferiu um aspecto de confiabilidade às conclusões, chegando a ser adotado um nível de confiança de 95%. Por fim, o estudo de análise estatística mostrou que para se controlar a variação volumétrica é preciso ter controle da variável sucção matricial, pois existe uma correlação forte e positiva entre as mesmas.

Koerner & Koerner (2013) elaboraram um estudo relacionado a obras de reforço realizadas com geossintéticos. Nesse artigo foi utilizada uma base de dados de 171 rupturas em muros estabilizados mecanicamente (MSE) com geossintéticos. Dentre as principais causas das rupturas estudadas, os autores destacaram as inadequações de projeto, principalmente as interligadas à falta de drenagem, bem como a inserção de canalizações e outros serviços públicos na zona de solo reforçado. Os autores também ressaltaram que 91% dos muros eram reforçados com geogrelhas e os restantes eram reforçados com geotêxteis. O mecanismo de ruptura interligado ao aumento de poropressões nos MSE pode ser vista na Figura 2.11. Do

ponto de vista estatístico, os autores também concluíram que nenhuma dessas rupturas do banco de dados avaliado foi causada por falhas de fabricação do geossintético.

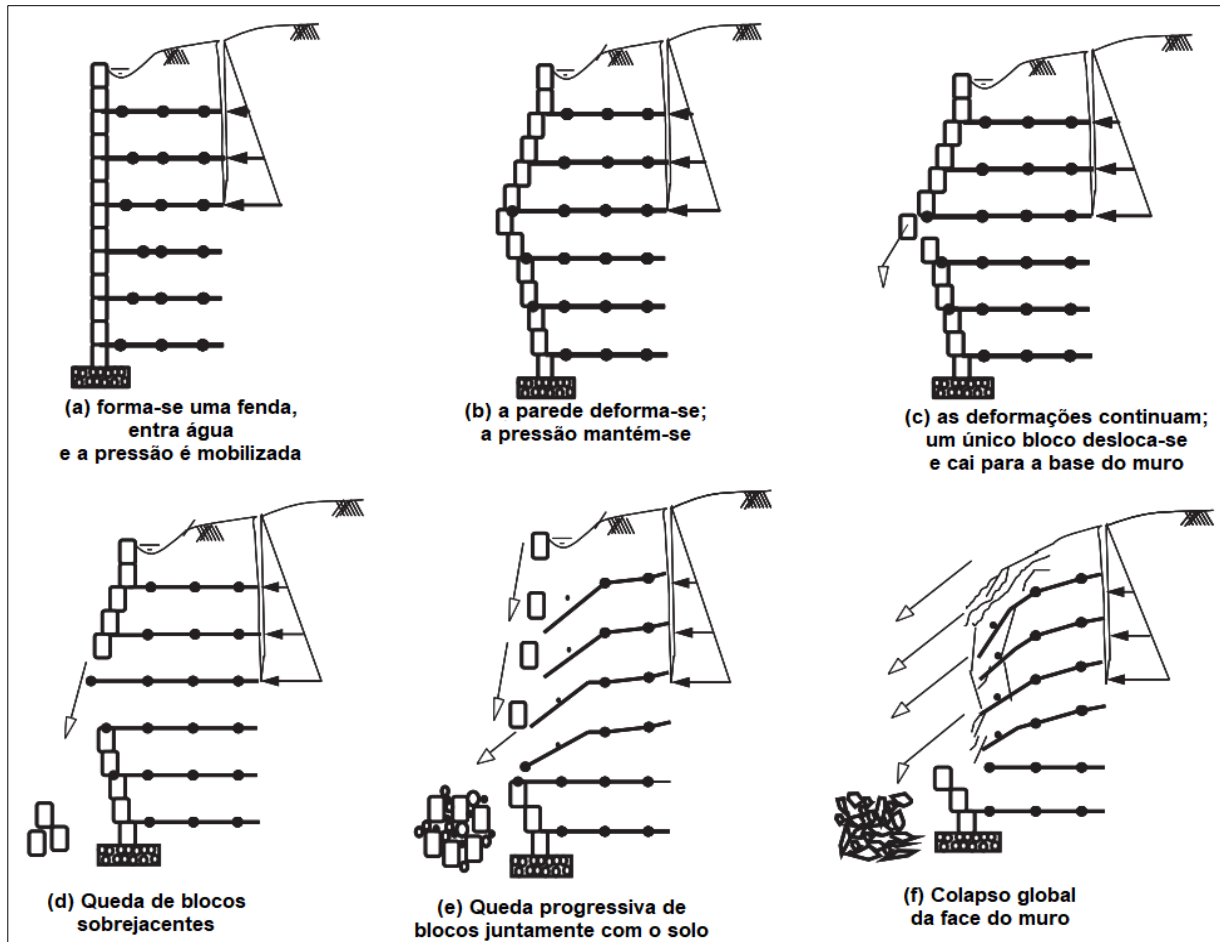


Figura 2.11 – Mecanismo de ruptura de muro estabilizados mecanicamente devido ao aumento de poropressões (Adaptado de Koerner & Koerner, 2013).

Na pesquisa de Ching & Phoon (2014), os autores abordaram as correlações entre alguns parâmetros de argila por meio da aplicação de distribuição multivariada. Dentre as principais conclusões, os autores destacaram que a abordagem de regressão em pares tem sido amplamente utilizada para estimar um parâmetro de projeto (por exemplo, resistência ao cisalhamento não drenada) a partir de um parâmetro medido (por exemplo, resistência à ponta do cone). Entretanto, essa metodologia não permite que múltiplos parâmetros de projeto (por exemplo, resistência ao cisalhamento não drenado e razão de sobre adensamento) sejam estimados simultaneamente a partir de múltiplas medições de campo e (ou) de laboratório (por exemplo, resistência da ponta do cone e limite de liquidez).

Nejad et al. (2016) utilizaram a metodologia de superfície de resposta (RSM) para investigarem o efeito da temperatura, da largura da fissura, do tipo de geossintético (geotêxtil não tecido de polipropileno e geogrelha) e das interações entre estes parâmetros na propagação da fissura de pavimentos reforçados com geogrelha e geotêxtil. A metodologia RSM é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas úteis para analisar os efeitos de diversas variáveis independentes no problema estudado. Com base nos resultados obtidos, foi identificado que a geogrelha tem o melhor efeito na melhoria do desempenho da camada do pavimento, bem como na diminuição da propagação da trinca. Além disso, os autores ressaltaram que o coeficiente de determinação de todos os modelos foi superior a 0,95, indicando que os valores medidos nas respostas podem ser explicados pelas variáveis experimentais, bem como pelas interações entre elas.

Na área de estudos de resíduos sólidos urbanos (RSU), uma compilação de parâmetros de resistência ao cisalhamento foi reportada por Díaz-Beltrán et al. (2016), os quais encontraram uma independência estatística entre a coesão dos RSU e o ângulo de atrito. Com uma representação simples baseada em histogramas e probabilidade de excedência (Figura 2.12) as variáveis coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ'), os autores conseguiram contribuir para esclarecimento do comportamento dessas variáveis em projetos de aterros sanitários. Por fim, eles concluíram estatisticamente que as principais variáveis que afetam a resistência ao cisalhamento de aterros sanitários são a composição dos resíduos, o nível de deformação e idade (grau de degradação).

Os autores Díaz-Beltrán et al. (2016) também concluíram que o histograma de coesão (Figura 2.12a) se inclina para o lado esquerdo da distribuição, a média foi de cerca de 15 kPa, o desvio padrão cerca de 22 kPa e o coeficiente de variação foi de 94,3%, aproximadamente. Por outro lado, diferentemente do histograma de coesão, a distribuição dos ângulos de atrito (Figura 2.12b) se apresenta significativamente mais simétrica, com média em torno de 27°, desvio padrão de 9° e coeficiente de variação de 34,20%.

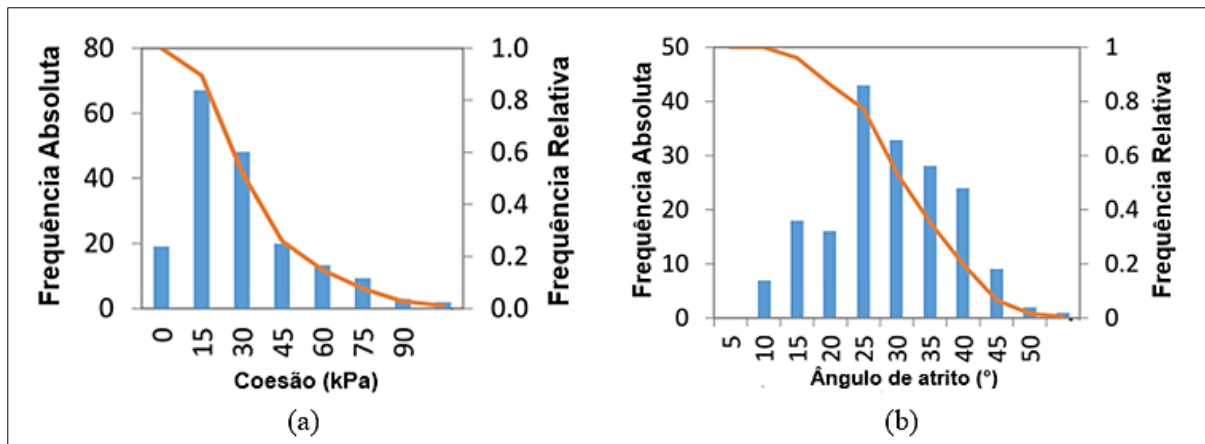


Figura 2.12 – Histogramas de distribuição e probabilidade de excedência da coesão e do ângulo de atrito (Fonte: Adaptado de Díaz-Beltrán et al., 2016).

Seguindo nessa mesma linha de pesquisa, Petrovic et al. (2016) propuseram um estudo para entender melhor a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) não tratados, ou seja, a coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ'). Os autores aplicaram uma série de análises que mostraram que a tendência central de ambos os parâmetros se ajusta razoavelmente bem dentro das faixas de valores recomendados pela literatura. Além disso, foi estabelecido que a correlação entre o ângulo de atrito e a coesão não é forte, mas ainda permanece significativa.

Miyata et al. (2017) utilizaram uma base de dados de ensaios laboratoriais de arrancamento de grelhas de aço de várias fontes para avaliar a exatidão de diferentes modelos. Segundo esses autores, o novo modelo proposto nesse artigo, que foi baseado em vieses estatísticos, se mostrou mais preciso do que o atual modelo da Administração Federal das Estradas (FHWA, 2009) para muros estabilizados mecanicamente (MSE), recomendado nos Estados Unidos para ensaios de arrancamento em contato com solos granulares.

Jahanfar et al. (2017) também apresentaram análises estatísticas e correlações de modelos de distribuição de parâmetros de resistência ao cisalhamento em aterros sanitários utilizando estudo de retroanálises de inclinações de rupturas históricas desses aterros. Nas análises, foram consideradas também as distribuições de probabilidade para as variáveis densidade, ângulo de atrito e coesão, que foram atribuídas com base no método de disposição (aterro ou lixão) e composição do material residual (materiais fibrosos ou resíduos de alimentos). Como conclusão, os autores mostraram que a metodologia desenvolvida forneceu resultados

estatísticos mais precisos sobre o risco de fatalidades associadas a uma determinada ruptura de talude de aterro sanitários. Os resultados obtidos pelos autores podem ser vistos na Figura 2.13.

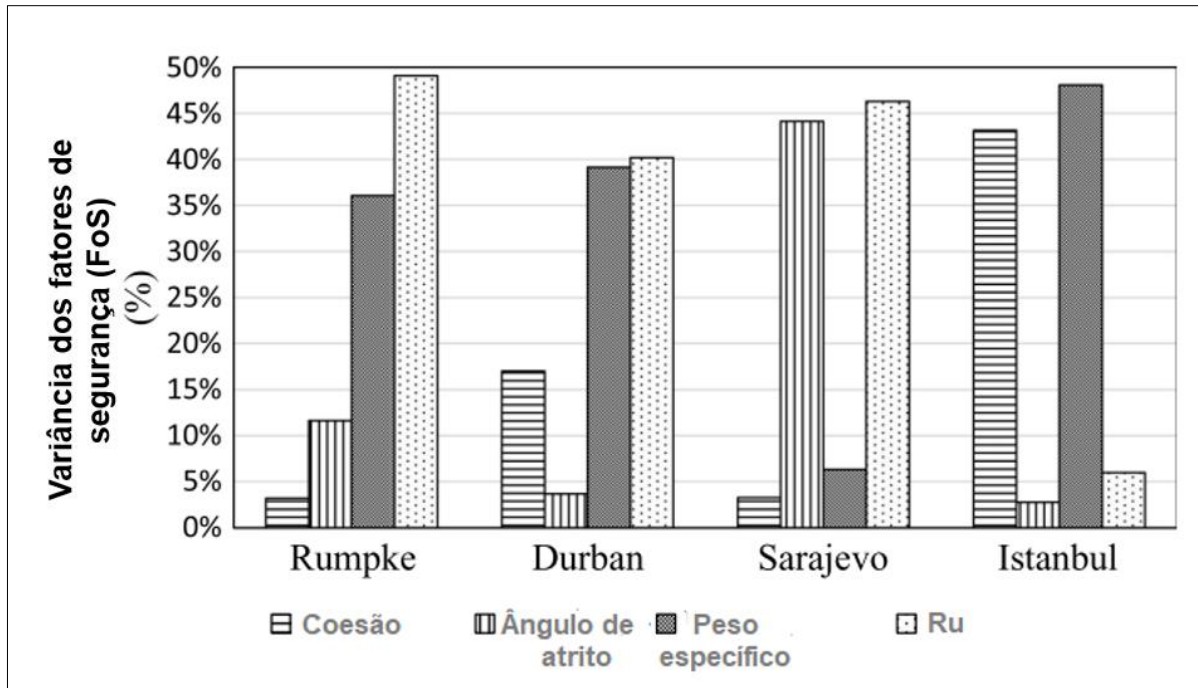


Figura 2.13 – Variância dos fatores de segurança em função dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito, peso específico e parâmetro de poropressão Ru (Fonte: Adaptado de Jahanfar et al., 2017).

A previsão do recalque de uma barragem de enrocamento com face de concreto foi objeto de estudo de Sigtryggsdottir et al. (2018). Nesse trabalho, um modelo estatístico foi desenvolvido para analisar o comportamento de deformação do enrocamento em função da carga e do tempo. Os objetivos dos estudos estatísticos foram duplos: em primeiro lugar, criar um modelo de previsão dos recalques da barragem a curto e longo prazo; e em segundo lugar, extrair padrões de comportamento para aplicação no monitoramento da estrutura. O modelo estatístico foi aplicado em um caso real, a barragem de Kárahnjúkar, na Islândia, utilizando os dados de monitoramento de deslocamentos da barragem. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que o modelo estatístico foi capaz de prever os recalques de forma adequada (Figura 2.14). Além disso, a análise estatística dos dados de monitoramento revelou padrões de comportamento, incluindo detalhes relacionados a uma resposta viscoelástica, que pode ocorrer devido às variações no carregamento hidrostático do reservatório.

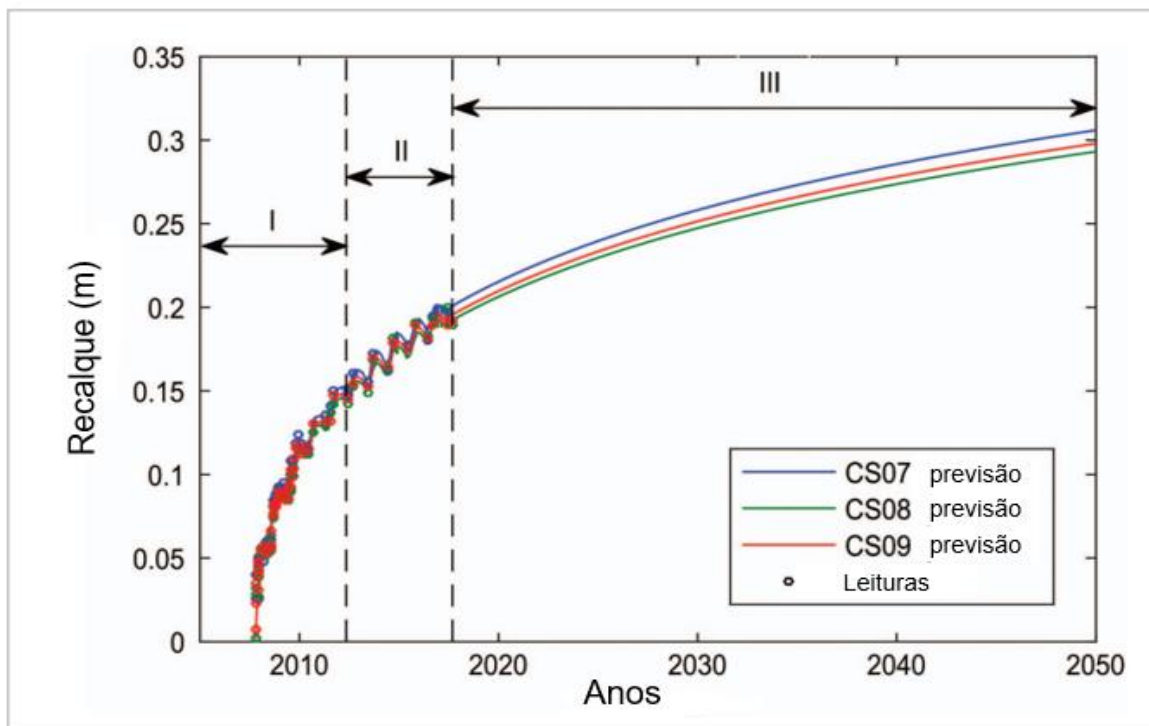


Figura 2.14 – Previsão do recalque em função do tempo para as estações CS-7, CS-8 e CS-9 (barragem de Kárahnjúkar) desde o final do primeiro enchimento, juntamente com um gráfico das leituras do levantamento disponíveis até setembro de 2017. (Adaptado de Sigtryggdottir et al., 2018).

Ching & Phoon (2019) pesquisaram sobre como aplicar Modelos de Função de Autocorrelação (ACF), que mostra basicamente como os pontos de dados de uma série temporal estão relacionados com os pontos de dados anteriores. Para a presente pesquisa, o cenário mais interessante estudado pelos autores foi a simulação numérica de um deslizamento de uma camada de solo em condições de plano inclinado (Figura 2.15). Nesse estudo, as características de aspereza da superfície foram inseridas no modelo por meio de um parâmetro de lisura (v), desenvolvido pelos autores. O (v) foi representado no artigo por meio de um modelo de autocorrelação que pode controlar a rugosidade da superfície avaliada, sendo simulados cinco cenários distintos que podem ser vistos na Figura 2.16. Como principal conclusão, os autores afirmaram que a variável (v) possui uma grande influência na probabilidade de ruptura do plano inclinado simulado. A Figura 2.16 também mostra as simulações realizadas pelos autores.

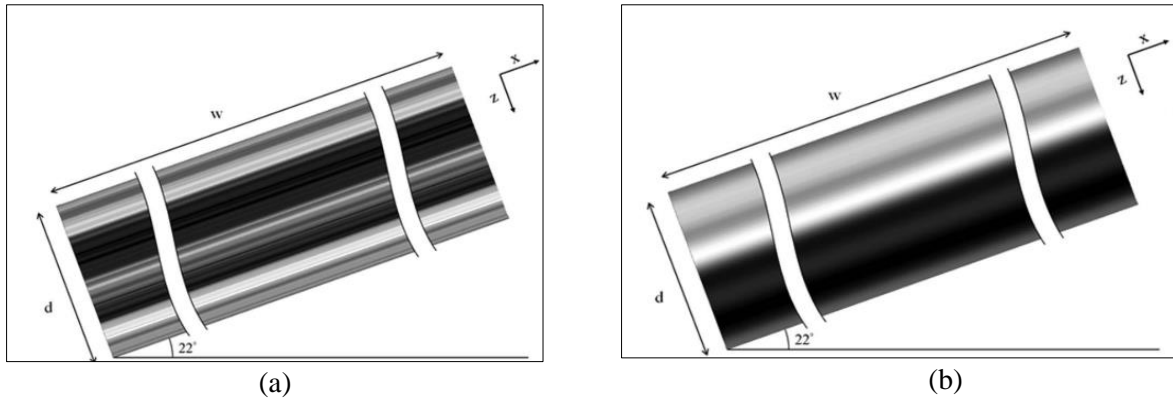


Figura 2.15 – Simulação do deslizamento de camada de solo – (a) Modelo com $v=0,50$ e (b) Modelo com $v = \infty$ (Adaptado de Ching & Phoon, 2019).

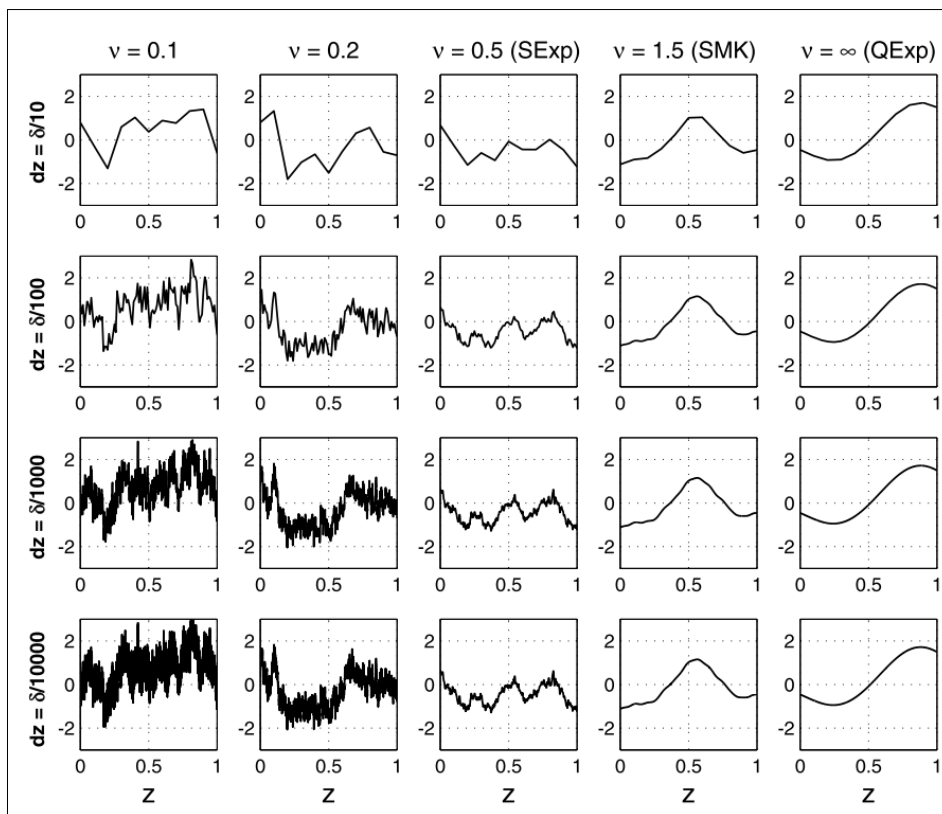


Figura 2.16 – Diversos valores do parâmetro de lisura v (Adaptado de Ching & Phoon, 2019).

No trabalho de Campello (2020), a autora apresentou uma metodologia para modelagem da variabilidade e incertezas associadas às propriedades geotécnicas dos solos de um grupo de barragens de mineração. A metodologia utilizada pela autora contemplou a compilação de dados obtidos por meio de ensaios geotécnicos, os quais passaram por tratamento estatístico e probabilístico, com ênfase no coeficiente de variação (CV), distribuições probabilísticas, grau de correlação entre as variáveis e variabilidade espacial. A autora afirma que os resultados dos ensaios de caracterização e de resistência ao cisalhamento indicaram, no geral, valores de (CV) aderentes às faixas reportadas na literatura. Foi

possível identificar, para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito efetivos, que a variação do CV tende a se aproximar de 0% a partir de 10 ensaios. Já para os parâmetros não drenados, a variação do CV se aproximou de 0% a partir de 20 observações. Por fim, foi concluído que os CV obtidos para os parâmetros coesão, resistência não drenada e razão de resistência, assim como reportado na literatura, são significativamente maiores do que os CV para o ângulo de atrito.

Gonzalez et al. (2020) analisaram a estabilidade de taludes reforçados por estacas para buscar conclusões a respeito da sensibilidade do fator de segurança (FS) às propriedades relacionadas à estaca, isto é, localização da estaca, espaçamento, profundidade de embutimento e diâmetro. Essa avaliação foi realizada em duas e três dimensões, ou seja, via métodos do equilíbrio limite (LE) e elementos finitos (FE). Os autores observaram que a localização da estaca, a profundidade da inclusão e o espaçamento tiveram efeitos significativos no FS. A localização ideal da estaca varia não apenas com mudanças na resistência do solo, mas também com variações nas propriedades geométricas devido à presença de interações entre os fatores. Por fim, foi observado também que a análise comparativa não encontrou diferença estatisticamente significativa entre os métodos estudados. Os autores resumiram os resultados por meio do gráfico de Pareto (Figura 2.17), no qual a linha vertical é um limiar para classificar os efeitos como significativos ou não.

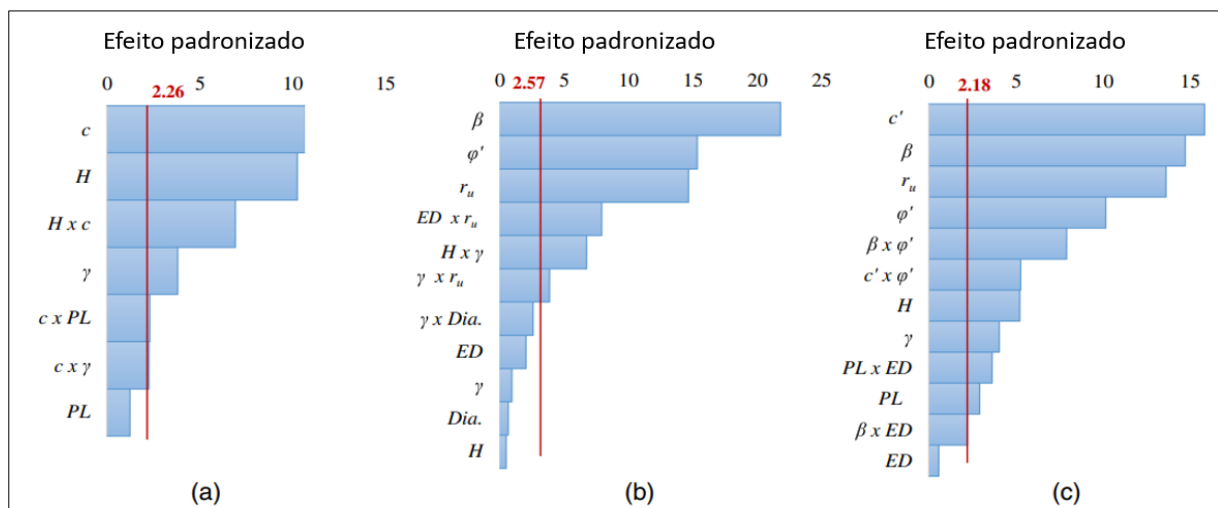


Figura 2.17 – Gráficos de Pareto dos efeitos normalizados das variáveis analisadas – (a) solos puramente coesivos; (b) solos puramente friccionais; e (c) solos mistos (Adaptado Gonzalez et al., 2020).

Chen et al. (2020) desenvolveram uma abordagem baseada na estatística estocástica (padrão aleatório), para realizar a avaliação de vazamentos através de orifícios em redes de rugas que ocorrem normalmente nas geomembranas durante a fase de projeto de aterros sanitários. O método proposto pelos pesquisadores demonstrou eficácia na avaliação de vazamentos através de um furo durante a fase de projeto. Os resultados revelaram que o maior erro relativo, comparado com os resultados obtidos por meio de imagens aéreas das redes de rugas, foi de apenas 8% quando a densidade da malha de rugas foi modelada como um campo aleatório. Contudo, os pesquisadores enfatizaram que, para uma aplicação futura mais abrangente dessa abordagem, é fundamental adquirir maior experiência na compreensão de como os parâmetros estatísticos das rugas se relacionam com diversos fatores, tais como a topografia do local, o material de fabricação da geomembrana, a temperatura do ar e a radiação solar.

Processos estatísticos também foram utilizados por Floresta et al. (2020) para confrontar os valores de projeto obtidos no modelo de cálculos estruturais convencional com resultados experimentais. As comparações realizadas neste trabalho mostraram que o modelo de cálculo utilizado no dimensionamento de tubos de concreto armado resulta em valores superdimensionados. Os autores observaram que para tubos de concreto de diâmetros nominais de 800 e 1200 mm foram observados desvios padrão de 7,0 e 6,0 kN/m, respectivamente, na obtenção da carga última de resistência dos tubos.

Daciolo et al. (2021) avaliaram o comportamento estatístico dos parâmetros de resistência normalmente aplicados para projetos de aterros sanitários (coesão e ângulo de atrito). A base de dados desses autores foi analisada utilizando uma ferramenta estatística para agrupar as observações, analisar e identificar fatores comuns aos ensaios estudados (análise de fatores e componentes principais), descrição de dados (estatística descritiva, dados de dispersão e distribuição), comparação de amostras e verificação dos efeitos do tratamento nas amostras utilizando análise univariada e multivariada. Como resultado principal, eles observaram que apesar da grande variação dos parâmetros, reportada pela análise estatística, a categorização dos dados de acordo com a composição mecânico-morfológica dos materiais apresentou resultados promissores.

Por sua vez, Pant & Ramana (2021) utilizaram índices estatísticos, tais como R^2 , erro quadrático médio, média, desvio padrão, mínimo, mediana, máximo, quartis Q_1 e Q_3 e etc., para validar os treinamentos via redes neurais para a estimativa do coeficiente de

arrancamento de geogrelhas embutidas em diferentes preenchimentos estruturais e com tensão normal variável. Como principal conclusão do ponto de vista estatístico, os autores observaram que o desvio padrão mais alto foi apresentado pela variável D_{50} , com uma dispersão de cerca de 0,985. Em relação aos coeficientes de correlação apresentados, os autores concluíram que a variável tensão normal foi a que desempenhou o papel mais significativo na estimativa do coeficiente de arrancamento, apresentando coeficiente de correlação forte e positivo no intervalo de 0,50 a 0,70.

Tanga et al. (2023) realizaram um estudo a respeito da aplicação uso da regressão Random Forest (algoritmo de *Machine Learning*) para prever o ângulo de atrito de interfaces geomembrana-areia, incluindo geomembranas lisas e rugosas em contato com areia, totalizando 495 interfaces de várias literaturas nacionais e internacionais. Como resultado principal, os autores observaram que os valores dos coeficientes de determinação mostraram forte correlação entre os ângulos de atrito provindos de laboratório e as estimativas da Random Forest, com valores de $R^2 = 0,93$ e $R^2 = 0,92$ para os conjuntos de treinamento e teste, respectivamente, confirmando assim a eficiência da técnica do Random Forest utilizada pelos pesquisadores.

O trabalho de Hong et al. (2023) abordou a elaboração de um método avançado de projeto geotécnico de escavação baseado em conceitos de confiabilidade considerando falhas múltiplas e incertezas estatísticas. Para as análises realizadas, foi aplicado o método de estimativa de pontos que consiste em avaliar o risco frente às incertezas. Dentre as conclusões obtidas pelos autores, destacam-se: a incerteza da informação estatística dos parâmetros do solo tem um efeito negativo na análise da confiabilidade; os parâmetros geotécnicos c e ϕ foram considerados como variáveis aleatórias, assim como o índice de confiabilidade (β) e probabilidade de falha (p_f); considerando o Coeficiente de Variação relacionado à coesão (COV_c) e o Coeficiente de Variação relacionado ao ângulo de atrito (COV_ϕ) como variáveis aleatórias, o valor de β variou de 1 a 8, e o desvio padrão do (COV_β) encontrado foi próximo de 30%.

O estudo de Pinto (2023) propôs a aplicação de modelos capazes de prever a resistência não drenada de pico de um rejeito de bauxita usando ensaios de campo, como piezocone e palheta, e ensaios de laboratório, como o teor de umidade. Além disso, o autor apresentou uma

proposta metodológica para caracterizar o comportamento não drenado com base nos dados dos ensaios de Cone de Penetração (CPTu) e dissipação de poropressão. Os modelos de ciência de dados obtidos foram comparados com a metodologia tradicional que utiliza fatores do cone como, por exemplo, N_{kt} , $N_{\Delta u}$ e N_{ke} , calibrados com o ensaio de Vane Test para determinar a resistência não drenada. Foi observado pelo autor que as técnicas de ciência de dados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,90. Além disso, esses modelos demonstraram uma menor dispersão dos resultados preditos em comparação com a metodologia baseada nos fatores mencionados anteriormente.

É interessante observar que a estatística, bem como os estudos que derivam dela, esteja se tornando cada vez mais difundida na engenharia e no meio geotécnico, permitindo análises mais precisas e fundamentadas. No entanto, percebe-se a necessidade de estudos específicos que explorem a aplicação da estatística nas interfaces solo-geossintéticos. É notório que a dificuldade em encontrar artigos, dissertações e teses que utilizem abordagens estatísticas para estudar os parâmetros que mais influenciam a resistência nessas interfaces, reforça a necessidade de desenvolvimento de estudos nessa área, sendo esse o objetivo desta dissertação.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3. METODOLOGIA APLICADA NA PESQUISA E ROTINA DE TRATAMENTO DE DADOS

3.1. ESTATÍSTICA APLICADA NA PESQUISA

A seguir serão detalhados os principais conceitos estatísticos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

3.1.1. Média Aritmética

Para Pianezzer (2020), considerando uma certa amostra aleatória com n elementos de uma população definida como (X_1, X_2, \dots, X_n) , a média aritmética (\bar{X}) pode ser definida conforme a Equação 3.1. Em outras palavras, trata-se de uma medida de tendência central é utilizada para representar um valor típico ou central de um conjunto de dados.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

3.1.2. Mediana

Segundo Assis et al. (2018), a mediana é o valor do meio de uma sequência ordenada de dados. Caso não existam valores repetidos, metade das observações será menor e metade será maior do que a mediana. A mediana não é afetada por qualquer observação extrema em um conjunto de dados. Assim, sempre que uma observação extrema estiver presente, é apropriado utilizar a mediana em vez da média aritmética para descrever a tendência do conjunto de dados. A mediana também pode representar o limite em que 50% dos dados se encontram acima e abaixo da mesma, ou seja, os dados apresentam iguais chances de ocorrência.

O cálculo da mediana de um conjunto de dados coletados deve ser feito inicialmente posicionando-se os mesmos numa disposição ordenada. Depois disso, para encontrar a disposição ordenada o lugar que representa o valor da mediana, utiliza-se a fórmula do ponto de posicionamento apresentada pela Equação 3.2.

$$M_e = \frac{n + 1}{2} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Em que:

n é o número de dados ordenados.

Vale salientar que existem algumas regras que auxiliam no cálculo correto da mediana. A primeira delas é que se o tamanho da amostra for um número ímpar, a mediana é representada pelo valor correspondente ao ponto mostrado na Equação 3.2 após o ordenamento. Em contrapartida, se o tamanho da amostra for um número par, a mediana é representada pelo valor médio correspondente as duas observações centrais.

3.1.3. Moda

Às vezes, ao resumir ou descrever um conjunto de dados, a moda é utilizada como uma medida de tendência central. A moda é o valor que aparece mais frequentemente em um conjunto de dados. Pode ser obtida por meio de uma disposição ordenada (Crespo, 2006). Diferentemente da média aritmética, a moda não é afetada pela ocorrência de quaisquer valores extremos. No entanto, a moda é utilizada somente para fins descritivos uma vez que ela é mais variável, de amostra para amostra, do que outras medidas de tendência central.

3.1.4. Variância e desvio padrão

A seguir serão apresentados dois tipos de medidas de variação: a variância e o desvio padrão. A variância e o desvio padrão medem a dispersão média em torno da média amostral, ou seja, como as observações flutuam em torno da média amostral.

Para Pianezzer (2020), considerando uma certa amostra aleatória com n elementos de uma população definida como (X_1, X_2, \dots, X_n) , a variância amostral (s^2) e o desvio padrão amostral (s) podem ser definidos, respectivamente, pelas Equação 3.3 e Equação 3.4.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Em que:

s^2 : variância;

\bar{X} : média aritmética.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Em que:

s: desvio padrão;

\bar{X} : média aritmética.

3.1.5. Desvio Médio Absoluto (DMA)

O desvio médio absoluto (DMA) pode ser definido como uma medida robusta de quão disperso é um conjunto de dados. A variância e o desvio padrão também são medidas de dispersão, porém são mais afetados por valores extremamente altos ou extremamente baixos, e não por valores medianos. Se os dados estudados apresentarem comportamento de distribuição normal, o desvio padrão geralmente é a melhor escolha para avaliar a propagação. No entanto, se os dados estudados não forem normais, o DMA é uma estatística que provavelmente encaixar-se-á nessa análise de dados, pois sua medida, baseada em medianas, faz com que este estimador possua boas propriedades de robustez, o que lhe confere um melhor desempenho em processos sujeitos a contaminação por outliers (Santos, 2008).

3.1.6. Coeficiente de Variação (CV)

De maneira geral, o Coeficiente de Variação (CV) demonstra o quanto os dados analisados estão dispersos. Dessa forma, o CV pode ser obtido conforme mostra a Equação 3.5:

$$CV = \left(\frac{s}{\bar{X}} \right) 100\% \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Em que:

s: desvio padrão;

\bar{X} : média aritmética.

De acordo com Campello et al. (2019), o coeficiente de variação é uma medida adimensional de análise da variabilidade dos dados em relação à média. Dessa forma, quanto maior for o coeficiente de variação, mais heterogêneo será o conjunto dos dados. Se o valor de CV for

igual a 1, a dispersão equivale a 100% da média, ou seja, o conjunto de dados possui alta variabilidade.

Também é importante salientar, apoiando nos estudos de Naghettini & Pinto (2007), que o CV deve ser aplicado somente em casos em que a média aritmética se diferir de zero, e as observações resultem como positivas. Caso sejam sempre negativas, o respectivo CV deve ser calculado com base no valor absoluto da média.

3.1.7. Amplitude interquartil (IQR)

A Amplitude Interquartil (Interquartile Range - IQR) é a diferença entre o terceiro e o primeiro quartis. De acordo com Medri (2011), os quartis, decis e percentis são muito similares à mediana, uma vez que também subdividem a distribuição de medidas de acordo com a proporção das frequências observadas. Os quartis dividem um conjunto de dados em quatro partes iguais, isto é, 25% por parte. Salienta-se que a IQR também pode ser empregada como uma medida de dispersão.

A Figura 3.1 mostra como os quartis normalmente são subdivididos. Ressalta-se que Q_1 , Q_2 e Q_3 representa o primeiro, segundo e terceiro quartis, respectivamente, nos quais 25%, 50% e 75% dos elementos são deixados de fora das análises. Além disso, o segundo quartil normalmente coincide com a mediana.

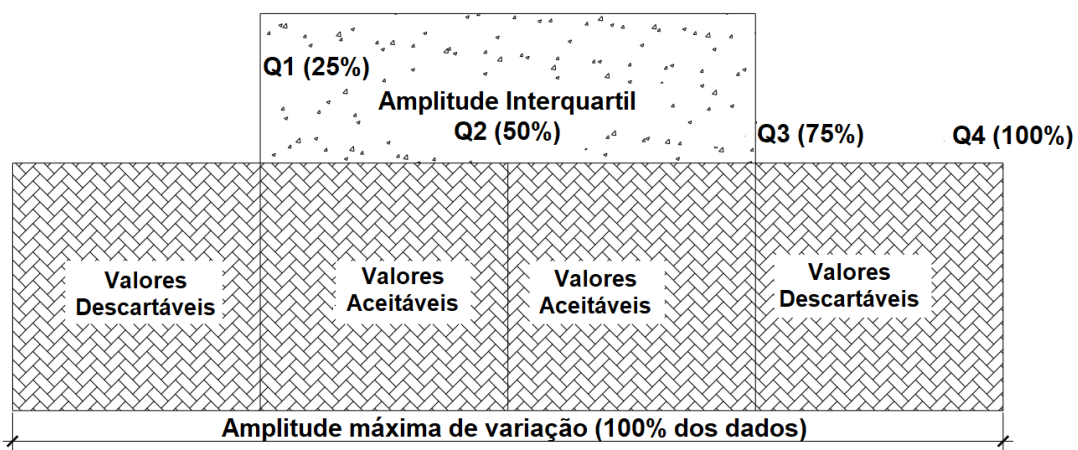


Figura 3.1 – Representação gráfica da amplitude interquartil (Adaptado de Paiva, 2009).

Para Larson & Farber (2010), a IQR é uma medida de variação que fornece uma ideia de quanto 50% dos dados variam. Ela também pode ser utilizada para identificar valores que

apresentam comportamento discrepantes, ou seja, qualquer valor de dado que seja maior que $1,50 \cdot IQR$ à esquerda de Q_1 ou à direita de Q_3 é considerado um valor discrepante. Resumidamente, a IQR pode ser escrita conforme a Equação 3.6:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Em que:

Q_3 : terceiro quartil;

Q_1 : primeiro quartil.

Ressalta-se que os percentis 25º, 50º e o 75º são os mesmos que Q_1 , Q_2 e Q_3 , respectivamente.

Em resumo, a respeito dos assuntos que permeiam a definição da IQR, Medri (2011) diz que os quartis dividem os dados em quatro partes (cada parte tem 25% dos dados), os decis dividem os dados em décimas partes (cada parte tem 10% dos dados) e os percentis dividem os dados em centésimas partes (cada parte tem 1% dos dados). No entanto, a avaliação de decis e percentis não será feita neste estudo.

3.1.8. Outliers e boxplot

Para a determinação dos *outliers* nos dados desta pesquisa foi utilizada a definição proposta por Andriotti (2010) e também por Pant e Ramana (2021), que definem como valores *outliers* àqueles inferiores a $(Q_1 - 1,5 \cdot IQR)$ e superiores a $(Q_3 + 1,5 \cdot IQR)$, sendo IQR a Amplitude Interquartil, Q_1 e Q_3 os primeiro e terceiro quartis, respectivamente, definidos no item 3.1.7.

Outro conceito importante na estatística é o de boxplot, também é conhecido como diagrama de caixa, que segundo Siqueira (2021), trata-se de uma ferramenta gráfica que pode ser utilizada para visualizar a distribuição de dados divididos nos quartis. Além disso, mostra onde os dados estão mais concentrados e se há outliers fora dos quartis, tendo como principais vantagens a apresentação da distribuição dos dados e sua estatística, como locação central, assimetria e definição de outliers (Andriotti, 2010). Um esquema representativo pode ser visto na Figura 3.2.

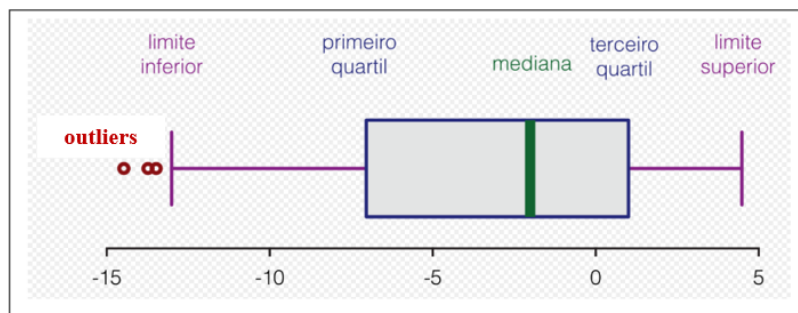


Figura 3.2 – Esquema representativo das partes que compõem um boxplot (Adaptado de Siqueira, 2021).

3.1.9. Medidas de forma e histogramas

Ao se interpretar um gráfico é possível perceber diversas características de uma distribuição de frequência. Uma delas, segundo Larson & Farber (2010), é a forma das distribuições, as quais normalmente são representadas por histogramas.

Histogramas são gráficos de barras verticais nos quais as barras retangulares são construídas nos limites de cada classe. Ao desenharem-se os histogramas, a variável aleatória ou o fenômeno de interesse é exibido no eixo horizontal e no eixo vertical é disposto o número, a proporção ou o percentual de observações por intervalo de classe (Assis et al., 2018).

De acordo com Larson & Farber (2010) uma distribuição de frequência é simétrica quando a linha vertical pode ser desenhada no meio do gráfico de distribuição e as metades resultantes são aproximadamente imagens espelhadas. Uma distribuição de frequência é uniforme (ou retangular) quando todas as entradas, ou classes, na distribuição têm frequências iguais ou aproximadamente iguais. Salienta-se que uma distribuição uniforme também é simétrica. Por outro lado, uma distribuição de frequências é assimétrica se a cauda do gráfico se alonga mais em um dos lados. Diz-se então que a distribuição é assimétrica à esquerda (negativamente assimétrica) se a cauda se estende à esquerda, e assimétrica à direita (positivamente assimétrica) se a cauda se estende à direita.

Por fim, diz-se que quando a distribuição for simétrica e unimodal, a média, a mediana e a moda são iguais. Se a distribuição for assimétrica à esquerda, a média é menor do que a mediana, e a mediana é igualmente menor que a moda. Se a distribuição for assimétrica à

direita, a média é maior do que a mediana e igualmente maior do que a moda. A Figura 3.3 mostra algumas das formas de distribuições definidas anteriormente.

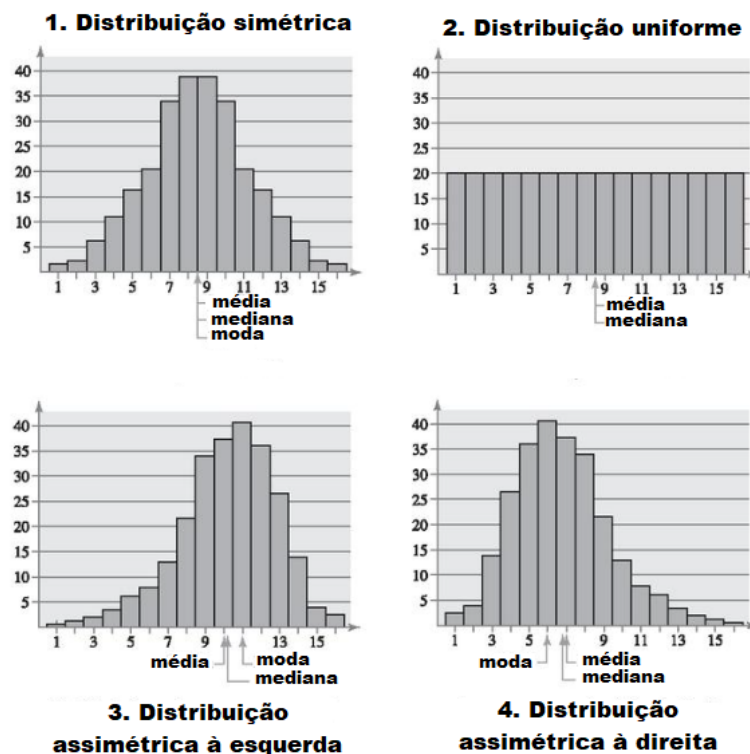


Figura 3.3 – Possíveis formatos para as curvas de distribuições de dados (Adaptado de Larson & Farber, 2010).

Salienta-se que existem 03 (três) elementos importantes que devem ser considerados ao analisar uma distribuição de dados via histogramas, a saber: classes, amplitudes e frequências. Esses elementos podem ser vistos na Figura 3.4.

De acordo com Crespo (2006), as classes são as barras indicadoras dos valores estatísticos, que representam tanto os valores mínimos como os máximos, os quais determinam os limites de cada classe. Já a amplitude representa o tamanho de cada uma das classes (barras) estudadas. Por fim, a frequência é a representação da variação do conjunto de dados analisados. Salienta-se que na avaliação dos histogramas, o eixo x representa a variável analisada e o eixo y representa a frequência dos dados.

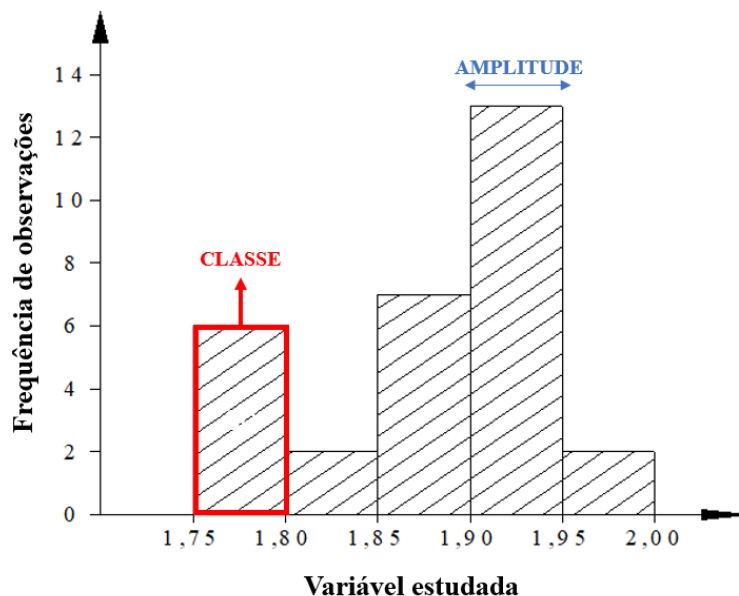


Figura 3.4 – Partes componentes de um histograma (Adaptado de Assis et al., 2018).

3.1.10. Curtose

De acordo com Medri (2011), a curtose pode ser definida como o grau de achatamento de uma curva de distribuição em relação a uma curva distribuição padrão, chamada na estatística de curva normal ou mesocúrtica. Existem ainda as curvas leptocúrtica e platicúrtica, sendo a primeira destinada a explicar o comportamento de uma curva mais achatada que a normal, e a segunda, mais achatada que a normal. A Figura 3.5 mostra os três tipos de curvas explicadas anteriormente.

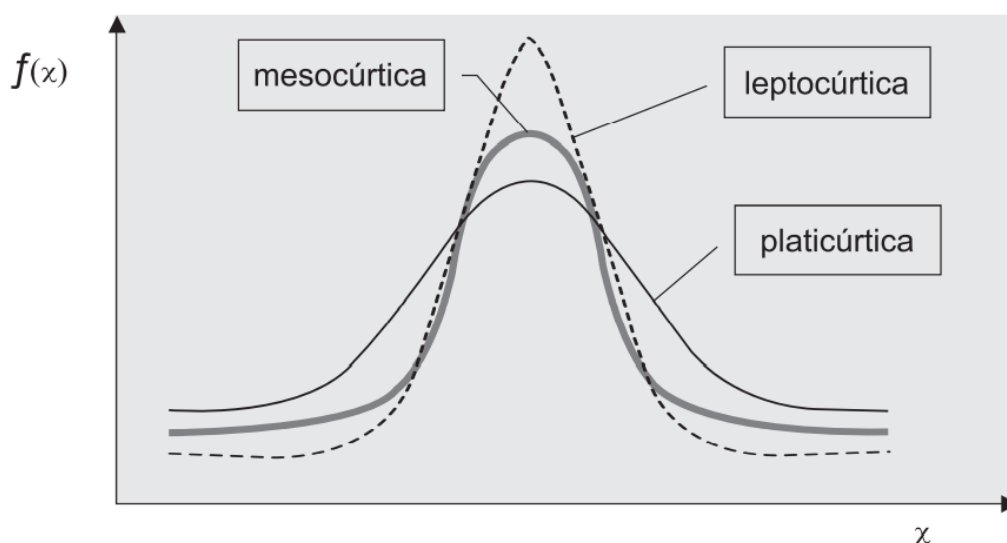


Figura 3.5 – Categorização das distribuições de frequências com relação à curtose (Naghetini & Pinto, 2007).

Segundo Medri (2011), para determinar qual tipo de curva os dados representam é necessário aplicar a Equação 3.7 para obter o coeficiente de Curtose.

$$C = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Em que:

Q_3 : terceiro quartil;

Q_1 : primeiro quartil;

P_{90} : percentil 90º;

P_{10} : percentil 10º.

Salienta-se que para interpretar o valor do coeficiente de Curtose, segundo Medri (2011), devem-se considerar as premissas descritas abaixo. Também é importante ressaltar que o valor de 0,263 diz respeito ao coeficiente de curtose de uma distribuição normal e, portanto, simétrica.

- Se $C = 0,263$, a curva é mesocúrtica;
- Se $C < 0,263$, a curva é leptocúrtica;
- Se $C > 0,263$, a curva é platicúrtica.

3.1.11. Assimetria

De acordo com Costa Neto (2002), as medidas de assimetria procuram caracterizar como e quanto a distribuição de frequências se afasta de uma condição de simetria. As distribuições alongadas à direita são ditas positivamente assimétricas, e à esquerda, negativamente assimétricas. O autor também afirma que o momento centrado de terceira ordem (m_3), definido como o valor que caracteriza a tendência da assimetria de uma distribuição, pode ser usado para avaliar o comportamento de assimetria de uma amostra, porém é mais conveniente a utilização de um coeficiente adimensional, definido como coeficiente de assimetria (a_3), o qual pode ser visto na Equação 3.8:

$$a_3 = \frac{m_3}{s^3} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Em que:

s : desvio padrão;

m_3 : momento centrado de terceira ordem dado por: $(m_3 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^3 \cdot f_i}{\sum f_i})$, sendo X_i a média de uma classe, f_i a frequência dos dados e \bar{X} a média calculada pelo produto entre $X_i \cdot f_i$ dividido pela soma das frequências.

Para interpretar o valor de a_3 , Piana et al. (2013) estabeleceram os seguintes intervalos:

- Se $a_3 < 0$, a distribuição é classificada como assimétrica negativa, indicando que a maioria dos valores são maiores ou se localizam à direita da média aritmética;
- Se $a_3 = 0$, a distribuição é classificada como simétrica, indicando que os valores estão uniformemente distribuídos em torno da média aritmética;
- Se $a_3 > 0$, a distribuição é classificada como assimétrica positiva, indicando que a maioria dos valores são menores ou se localizam à esquerda da média aritmética.

Outra forma de medir a assimetria, segundo Medri (2011), é a utilização do coeficiente de assimetria de Pearson, descrito pela Equação 3.9:

$$A_s = \frac{3(\bar{X} - M_d)}{s} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Em que:

\bar{X} : média;

M_d : mediana;

s : desvio padrão.

A Figura 3.6 mostra comportamento simétricos e assimétricos de uma curva de distribuição.

Ressalta-se que nesse caso, \bar{X} , M_d e M_o são a média, mediana e a moda, respectivamente.

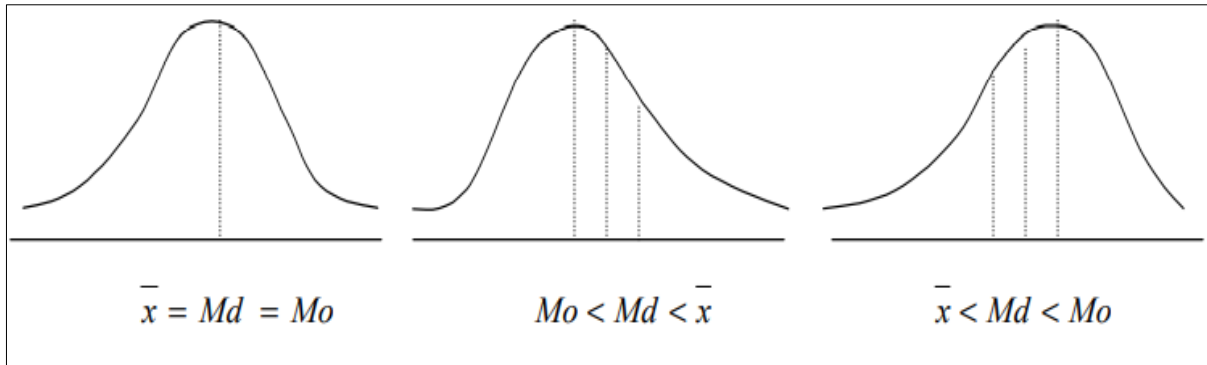


Figura 3.6 – Comportamento simétrico, assimétrico à direita e assimétrico à esquerda (Medri, 2011).

Salienta-se que Medri (2011) define as seguintes premissas para análise do A_s :

- Se $|A_s| < 0,15$, a distribuição poderá ser considerada simétrica;
- Se $0,15 < |A_s| < 1$, a assimetria é considerada moderada;
- Se $|A_s| > 1$, a assimetria é considerada forte.

Em contrapartida, Lopes (2003) utiliza as seguintes premissas para a avaliar o A_s :

- Se $A_s = 0$, a distribuição poderá ser considerada simétrica;
- $A_s < 0$, a distribuição será considerada assimétrica negativa;
- $A_s > 0$, a distribuição será considerada assimétrica positiva.

Pela análise dos boxplots (ver item 3.1.8), também é possível avaliar a assimetria dos dados. Quando a linha da mediana está próxima ao primeiro quartil (Q1), os dados são considerados assimétricos positivos, enquanto que quando a linha da mediana está próxima ao terceiro quartil (Q3), os dados são considerados assimétricos negativos.

3.1.12. Máximo e Mínimo

Os valores de máximo e mínimo de uma amostra representam o maior e o menor valor de uma dada população ou amostra, respectivamente. Tais análises devem ser utilizadas para identificar possíveis pontos fora da curva (*outliers*) ou um erro de entrada de dados. Uma das maneiras mais simples para avaliar a dispersão de seus dados é comparar o mínimo e o máximo. Se o valor máximo for muito elevado, mesmo quando se considerar o centro, a

dispersão e o formato dos dados, então os dados deverão passar por uma nova investigação a fim de entender o que pode estar causando os extremos.

3.1.13. Percentil 5° e 95°

O 5º percentil é um valor associado à localização nos dados em que 5% dos dados estão abaixo desse valor. Por outro lado, o 95º percentil é o valor em que 5% dos dados estudados apresentam-se como um valor maior.

Quanto aos percentis, Larson & Farber (2010) afirmam que eles são mais utilizados para comparar um indivíduo, pertencente a um conjunto, em relação a outro. Eles também podem ser utilizados para identificar valores excepcionalmente altos ou baixos. Por exemplo, medidas pertencentes ao 95º ou acima são excepcionalmente altas enquanto aquelas pertencentes ao 5º percentil ou abaixo são excepcionalmente baixas.

3.1.14. Range (Intervalo)

O intervalo é a diferença entre o maior e o menor valores de dados da população ou amostra estudada. Ele pode ser utilizado para entender a dispersão dos dados. Sendo assim, um valor elevado no intervalo indica uma maior dispersão nos dados, e um valor pequeno no intervalo indica que há menor dispersão nos dados. Como o intervalo é calculado utilizando apenas dois valores de dados, o mesmo pode ser considerado ainda mais útil em conjuntos de dados pequenos.

3.1.15. Correlações, Regressões e Matrizes de correlação

Schultz & Schultz (1992) afirmam que em meados de 1897, Galton e Karl Pearson desenvolveram uma fórmula matemática usada até os dias de hoje para o cálculo do coeficiente de correlação, chamada de coeficiente de correlação do produto-momento de Pearson. A correlação é uma ferramenta fundamental das ciências sociais e do comportamento, bem como das engenharias e das ciências naturais.

As regressões e correlações, segundo Assis et al. (2018), avaliam a dependência entre duas ou mais variáveis obtidas de um mesmo meio, bem como a relação matemática entre elas. Salienta-se que as variáveis podem ser numéricas ou categóricas. As variáveis categóricas

possuem um número finito de categorias ou grupos distintos. Por outro lado, as variáveis numéricas têm um número contável de valores num intervalo qualquer.

Neste trabalho foi aplicada a Matriz de Correlação de Pearson (MCP) para avaliação das correlações existentes entre as variáveis. De acordo com Lira (2004), as suposições básicas para a utilização dessa análise é o de que a relação entre as duas variáveis estudadas seja linear e aleatória.

Uma matriz de correlação é uma tabela que indica os coeficientes de conexão entre as variáveis estudadas, sendo que cada célula da tabela mostra a correlação entre cada par de variáveis. De acordo com Rocha (2018), o uso desse tipo de matriz está atrelado à possibilidade de resumir uma grande quantidade de dados para estudar os padrões, verificar se existe relação linear entre as variáveis, criar modelos de regressão e realizar estudos de métodos multivariados como Análise Fatorial e Análise de componentes principais, sendo esses dois últimos muito utilizados em *Machine Learning*.

A obtenção de uma matriz de correlação pode ser feita de diversas formas, seja ela manual, por meio do cálculo do coeficiente de correlação apresentado na Equação 3.10 e também por meio de ferramentas computacionais como o Excel e pelas bibliotecas presentes na linguagem Python. Quando se trabalha com um banco de dados robusto é mais interessante obter tais coeficientes e, conseqüentemente, a matriz de Pearson com o apoio computacional. Para obtenção da matriz de Pearson, deve-se conhecer o coeficiente de correlação de Pearson (r) para cada par de variáveis estudadas. Esse coeficiente pode ser obtido por meio da Equação 3.10 apresentada por Gravetter & Wallnau (2015).

$$r = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X).var(Y)}} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Em que:

r : coeficiente de correlação de Pearson;

$cov(X,Y)$: covariância entre as variáveis X e Y;

$var(X).var(Y)$: produto das variâncias de X e Y calculadas separadamente, também conhecido como desvio padrão, após extração da raiz quadrada.

É importante ressaltar que o (r) pode assumir valores entre -1 e 1. Quanto mais distante (r) estiver de zero, mais forte será a relação linear entre as duas variáveis. Além disso, o sinal de (r) corresponde à direção da relação, ou seja, se (r) for positivo, à medida que uma variável aumenta, a outra tende a aumentar. Em contrapartida, se (r) for negativo, à medida que uma variável aumenta, a outra tende a diminuir. Ressalta-se que uma relação linear perfeita ($r = -1$ ou $r = 1$) significa que uma das variáveis pode ser perfeitamente explicada por uma função linear da outra (Ching & Phoon, 2015; Gravetter & Wallnau, 2015).

A Tabela 3.1 mostra uma forma de interpretar o resultado do (r) de acordo com os seguintes intervalos de correlações: muito fraca, fraca, moderada e forte (Pant & Ramana, 2021).

Tabela 3.1 – Valores interpretativos do coeficiente de correlação de Pearson (Adaptado de Pant & Ramana, 2021).

Coeficiente de correlação de Pearson (r)	Classificação da correlação
0,0 a 0,10 (-0,0 a -0,10)	Positiva (ou negativa) muito fraca
0,10 a 0,20 (-0,10 a -0,20)	Positiva (ou negativa) fraca
0,20 a 0,50 (-0,20 a -0,50)	Positiva (ou negativa) moderada
0,50 a 0,70 (-0,50 a -0,70)	Positiva (ou negativa) forte

3.2. LINGUAGEM PYTHON PARA ESTUDOS ESTATÍSTICOS

O Python é uma importante linguagem de programação, a qual é utilizada em diversos segmentos, como em jogos eletrônicos, na análise de dados, *Machine Learning*, Data Science, Big Data, internet das coisas, dentre outras. De acordo com Zanardini (2020), a linguagem foi criada em 1991, no *Centrum Wiskunde & Informatica* (CWI), um centro de matemática e computação em Amsterdam, na Holanda. O pioneiro no desenvolvimento a linguagem foi o matemático Guido Van Rossum, o qual criou a linguagem com o intuito de desenvolver uma linguagem interpretada, mas com comandos simples de entender.

Atualmente a linguagem Python é aplicada na maioria das grandes empresas do mundo, como é o caso do Google, Microsoft, Youtube, e etc. Uma das grandes vantagens de se trabalhar com essa linguagem é o fato de ela ser *open source* (de instalação e uso gratuitos), e mesmo assim possuir ricos conjuntos de bibliotecas (Sahoo et al., 2019).

Zanardini (2020) também afirma que existe uma grande quantidade de bibliotecas desenvolvidas para a resolução de problemas relacionados à estatística, análise de sinais, banco de dados, aprendizado de máquina, mineração de dados e muito outras, a saber: NumPy, SciPy, Panda, StatsModel, Matplotlib, Eli5 e Keras. As bibliotecas NumPy, SciPy, Panda e StatsModels são mais aplicadas para estudos estatísticos; já a Matplotlib é uma biblioteca específica para criar diagramas e gráficos bidimensionais. Por outro lado, as bibliotecas Eli5 e Keras são mais utilizadas para estudar acerca das previsões de modelos de aprendizado de máquina com foco na visualização e depuração do algoritmo, e para trabalhar com redes neurais, respectivamente.

Dando uma ênfase maior nas bibliotecas de programação utilizadas nesta pesquisa, a saber, Panda, NumPy e Matplotlib, é importante ressaltar que a aplicação delas têm crescido na área estatística. Sahoo et al. (2019) fizeram uma revisão geral a respeito da estatística descritiva (ED) utilizando a linguagem Python e avaliaram conjuntos de dados eletrônicos da Amazon. Os autores concluíram que com essas ferramentas foi possível visualizar as distribuições dos dados estudados, bem como a elaborar gráficos de barras, histogramas, e calcular e visualizar correlações entre variáveis estudadas. Os principais parâmetros estatísticos evidenciados pelos autores foram a média, máximo, mínimo, desvio padrão e a IQR (Amplitude Interquartil).

Ali & Shakir (2022) propuseram um estudo a respeito da aplicação da linguagem Python para prever as propriedades geotécnicas de solos característicos da região de Nasiriyah, no Iraque.

Os autores concluíram que por meio dessa linguagem foi possível elaborar um código capaz de armazenar, recuperar, exibir, gerenciar e analisar todos os tipos de dados geoespaciais do banco de dados utilizado. Como contribuição final, o trabalho desses autores forneceu a possibilidade de produzir o mapa geotécnico das propriedades do solo em qualquer área da região estudada.

A utilização de ferramentas capazes de otimizar processos tem sido cada vez mais difundida. A aplicação de linguagens de programação e todo o arsenal de bibliotecas que existem podem tornar as análises de dados cada vez mais rápidas e precisas. Boumezerane (2022) publicou um estudo robusto acerca das novas tendências no uso de métodos de otimização em geotecnia durante os últimos anos. O autor observou que as particularidades dos problemas geotécnicos exigem cada vez mais a adoção de técnicas capazes de descrever corretamente os

diversos mecanismos presentes nessa área, e a associação da linguagem Python com análises estatísticas tem se mostrado promissora.

3.3. DISCRETIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS

Nesta pesquisa, 445 ângulos de atrito de interface foram avaliados estatisticamente frente à influência de 11 variáveis numéricas para interfaces de geomembranas com areias (SG) e 6 variáveis numéricas para interfaces de geomembranas com geotêxteis (GG). Os dados foram coletados para ensaios de cisalhamento direto convencional (CDC) e plano inclinado (PI). Dessa forma, ao longo da pesquisa serão avaliadas as seguintes interfaces:

- Interface areia-geomembrana utilizando ensaios CDC (SG-CDC);
- Interface geotêxtil-geomembrana utilizando ensaios CDC (GG-CDC);
- Interface areia-geomembranas utilizando ensaios PI (SG-PI);
- Interface geotêxtil-geomembranas utilizando ensaios PI (GG-PI);

Salienta-se que do ponto de vista de variáveis categóricas, ou seja, não numéricas, em cada interface foram considerados os tipos de material de fabricação da geomembrana nessa categoria, e a quantidade de variáveis categóricas depende de cada interface. Ou seja, para as interfaces SG-CDC, GG-CDC, SG-PI e GG-PI as variáveis categóricas consideradas foram HDPE, PVC e LDPE, HDPE e LDPE, HDPE, PVC e LDPE e HDPE, respectivamente.

É importante ressaltar que os tipos de ensaios selecionados, bem como as condições de contorno consideradas, foram adotados neste formato com o intuito de manter a aleatoriedade na busca pelas variáveis que mais influenciam a resistência entre interfaces geossintéticas. Essa abordagem aleatória de levantamento de dados também foi considerada por Tanga (2022). A Tabela 3.2 mostra um resumo dos principais trabalhos utilizados como base de dados nesta pesquisa.

Tabela 3.2 – Pesquisas utilizadas no levantamento de dados desta pesquisa.

Autores	Título do estudo	País	Tipo de ensaio		Tipo de interface	
			CDC	PI	SG	GG
O'Rourke et al. (1990)	Shear Strength characteristics of sand-polymer interfaces	EUA	x		x	
Tupa (1994)	Estudo da aderência e interação solo geossintético	Brasil	x		x	
Izgin (1997)	Geomembrane-sand interface friction	Turquia	x	x	x	
Lima Junior (2000)	Estudo da interação solo-geossintético em obras de proteção ambiental com o uso de equipamento de plano inclinado	Brasil		x	x	
Mello (2001)	Estudo da interação solo-geossintético em taludes de obras de disposição de resíduos	Brasil		x	x	
Lopes (2001)	Estudo da interação solo-geossintético através de ensaios de corte em plano inclinado	Portugal		x	x	
Palmeira et al. (2002)	Interaction between soils and geosynthetic layers in large-scale ramp tests	Brasil		x	x	x
Viana (2007)	Estudo da estabilidade e condutividade hidráulica de sistemas de revestimento convencionais e alternativos para obras de disposição de resíduos	Brasil		x	x	

Tabela 3.2 – Principais trabalhos utilizados no levantamento de dados desta pesquisa (cont.).

Autores	Título do estudo	País	Tipo de ensaio		Tipo de interface	
			CDC	PI	SG	GG
Frost et al. (2011)	Microscale Geomembrane- Granular Material Interactions	EUA	x		x	
Carbone et al. (2016)	Dry friction behavior of a geosynthetic Interface using inclined plane and shaking table tests	França		x	x	Carbone et al. (2016)
Amanda Sousa et al. (2016)	Determinação da Resistência de Interface entre Geomembranas e Geotêxteis por Meio do Ensaio de Cisalhamento Direto	Brasil	x			x
Sánchez (2018)	Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais	Brasil	x	x	x	x
Lashkari & Jamali (2021)	Global and Local sand- geosynthetic interface	Irã	x		x	

Neste trabalho, inicialmente a preferência de obtenção de dados foi dada para ensaios de cisalhamento que foram realizados com interface areia-geomembrana. Porém, no decorrer do desenvolvimento da dissertação, abriu-se espaço para inserção de alguns dados de interfaces com geotêxtil, a fim de expandir um pouco mais as análises. A seleção de dados consistiu na busca por estudos nacionais e internacionais a respeito de estudos relacionados à resistência entre interfaces com geossintéticos. O foco do levantamento de ensaios para compor o banco de dados foi dado para ensaios de cisalhamento direto convencional (CDC) e plano inclinado (PI). As Tabela 3.3 e Tabela 3.4 mostram as variáveis consideradas em cada interface.

Tabela 3.3 – Variáveis consideradas nesta pesquisa para as interfaces SG-CDC e SG-PI.

Tipo de ensaio e interface	Características dos ensaios e definição dos pesquisadores	Propriedade dos solos	Propriedade dos geossintéticos (Geomembranas e Geotêxteis)
SG-CDC SG-PI	Taxa de velocidade (v) Tensões normais (σ_n) Área de contato (A_c)	Índice de densidade (I_D) Massa específica (ρ_s) Coeficiente de curvatura (C_c) Coeficiente de não uniformidade (C_u) Diâmetro médio dos grãos (D_{50}) Ângulo de atrito de pico do solo (ϕ_s)	Ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) Espessura da geomembrana (t_{GM}) Altura de rugosidade da geomembrana (h_G)

Tabela 3.4 – Variáveis consideradas nesta pesquisa para as interfaces GG-CDC e GG-PI.

Tipo de ensaio e interface	Características dos ensaios e definição dos pesquisadores	Propriedade dos geossintéticos (Geomembranas e Geotêxteis)
GG-CDC GG-PI	Taxa de velocidade (v) Tensões normais (σ_n) Área de contato (A_c)	Ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) Espessura da geomembrana (t_{GM}) Altura de rugosidade da geomembrana (h_G) Gramatura (M_A)

As Figura 3.7 e Figura 3.8 mostram os quantitativos totais de variáveis numéricas levantadas nesta pesquisa considerando todas as premissas expostas acima aplicadas para os ensaios CDC (Figura 3.7) e PI (Figura 3.8) com as interfaces SG e GG.

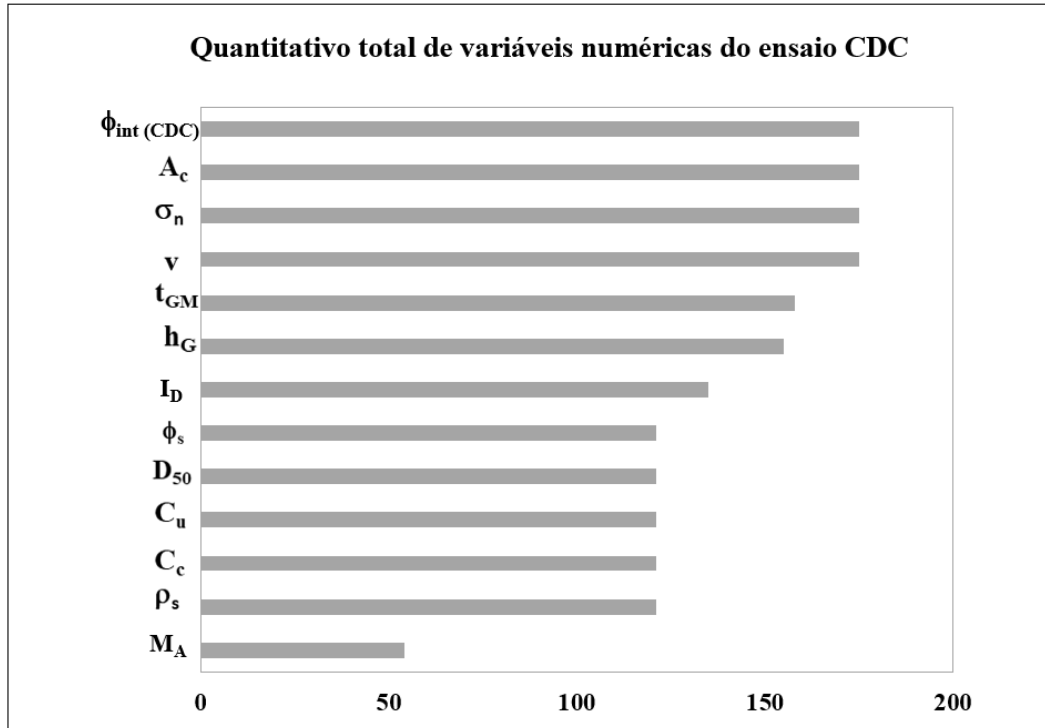


Figura 3.7 – Quantidade de variáveis numéricas levantadas nesta pesquisa considerando ensaios CDC com as interfaces SG e GG.

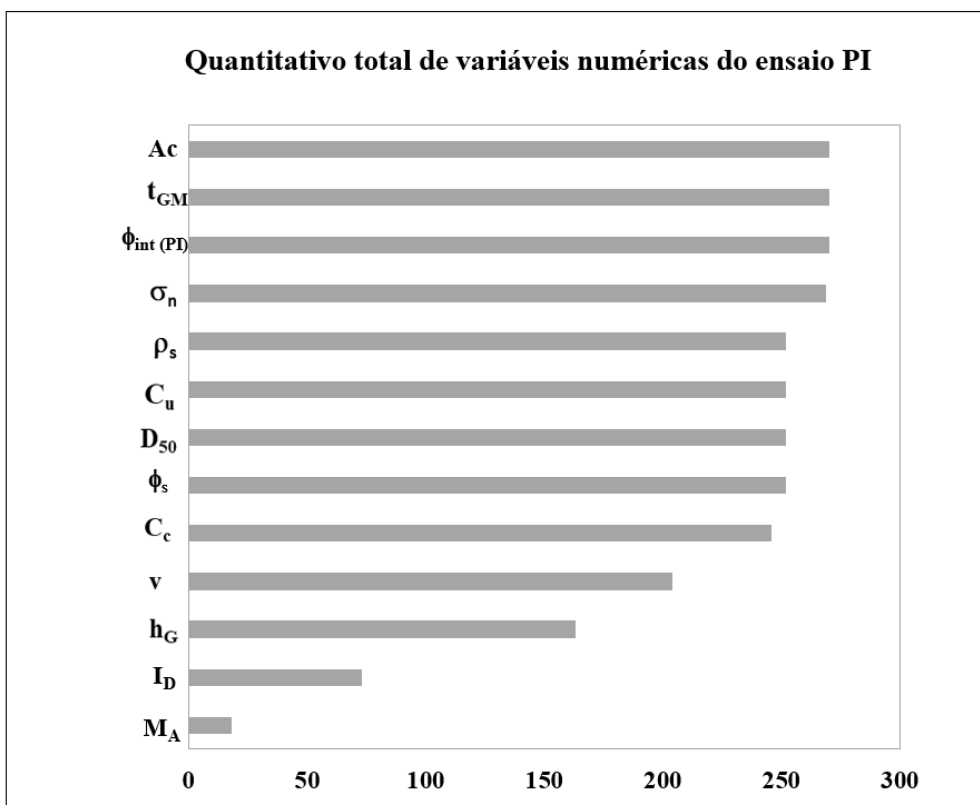


Figura 3.8 – Quantidade de variáveis numéricas levantadas nesta pesquisa considerando ensaios PI com as interfaces SG e GG.

Por outro lado, a Figura 3.9 mostra a distribuição, por países, da quantidade total de ensaios de interface levantados no decorrer da pesquisa e a Figura 3.10 mostra a quantidade total desses mesmos dados, porém considerando a divisão por tipo de ensaio (CDC e PI).

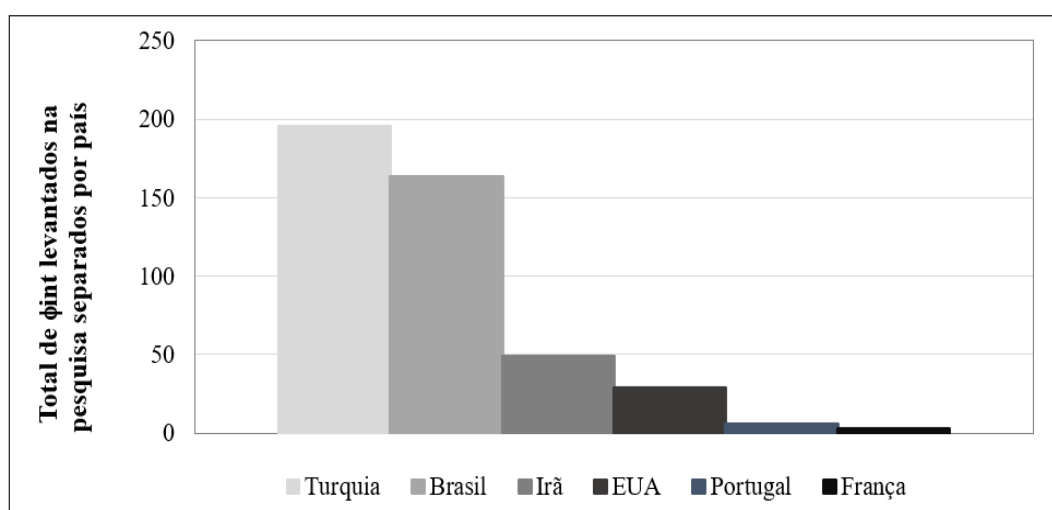


Figura 3.9 – Soma total de ensaios de interface CDC e PI levantados nesta pesquisa separados por países.

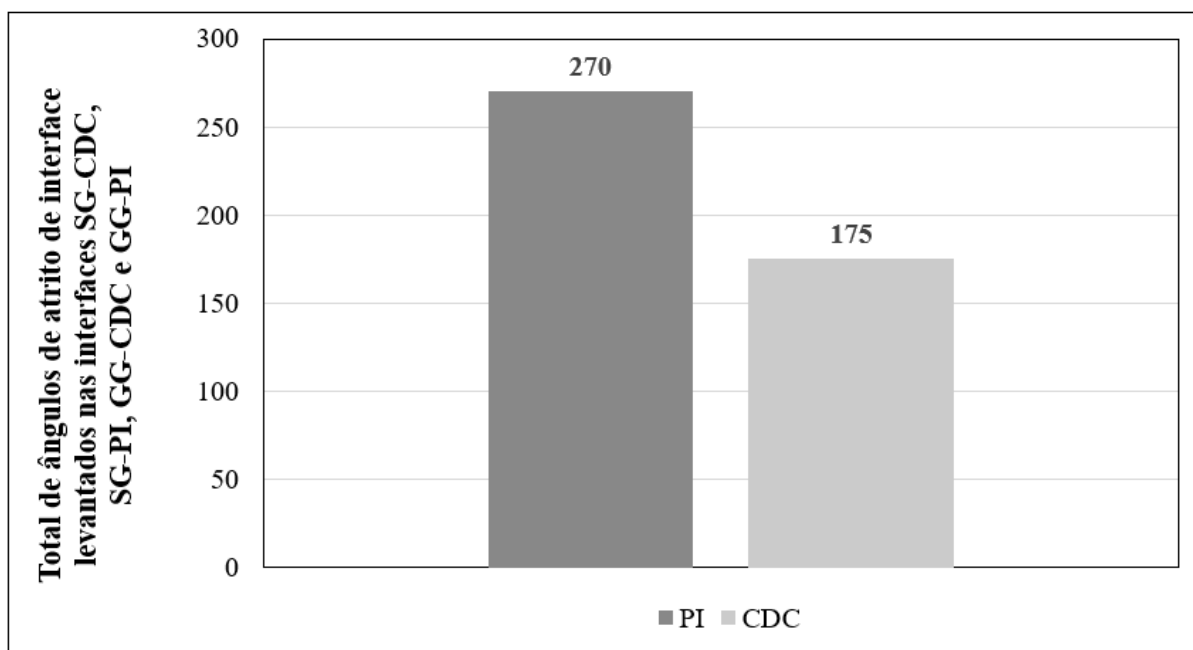


Figura 3.10 – Relação da quantidade total de variáveis numéricas levantadas nesta pesquisa separados por tipo de ensaio.

Baseando-se nesses dados, foram calculados, média, o desvio-padrão, e demais parâmetros provenientes da estatística descritiva, conforme descrito no item 3.1 . Por fim, então os dados estatísticos foram analisados de forma a se dar explicações sobre as variações obtidas, conforme cenários discretizados nos itens subsequentes. Os resultados estatísticos, bem como a comparação entre o comportamento observados para os ensaios CDC e PI poderão ser consultados no item 4, referente aos resultados e discussão.

3.4. APLICAÇÃO DA ROTINA DE PROCESSAMENTO DOS DADOS

Nesta pesquisa, as principais bibliotecas utilizadas nos tratamentos estatísticos foram Panda, Numpy e Matplotlib. De forma geral, a biblioteca Numpy permitiu a realização da manipulação de matrizes, geração de números aleatórios e a utilização de diversos recursos de álgebra linear quando foi preciso, tendo em vista o objetivo final da pesquisa de obter as matrizes de correlação para as variáveis propostas neste estudo.

Por outro lado, a aplicação das bibliotecas Panda e Matplotlib foi necessária, pois elas forneceram um suporte para a modelagem das análises estatísticas exploratória do banco de dados, bem como a visualização de dados por meio de diversos gráficos.

A partir do tratamento dos dados apresentados no item 3.3, foi possível obter toda a estatística descritiva para cada tipo de ensaio e interfaces avaliadas nesta pesquisa. Como resultado do processamento dos dados, foram obtidos os resumos dos tratamentos para cada interface, os quais podem ser consultados nos Apêndice A (tratamento dos dados dos ensaios de cisalhamento direto convencional) e B (tratamento dos dados dos ensaios de plano inclinado) desta dissertação.

O tratamento dos dados consistiu na alimentação da rotina de processamento com uma planilha de dados, contendo somente os valores das variáveis estudadas e os nomes de referência das mesmas. As funções exploradas nessa rotina de tratamento foram inseridas num código capaz de retornar os alguns resultados estatísticos dos dados, focada em evidenciar os resultados da estatística de quantis, ou seja, apresentando o comportamento dos valores de máximos, mínimos, amplitude interquartil (IQR), percentis 5° e 95°, medianas e quartis superior (Q_1) e inferior (Q_3). Por outro lado, a estatística descritiva também foi obtida, evidenciando os resultados dos desvios padrão, coeficiente de variação, média, assimetria e variância.

3.5. DISCRETIZAÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS

Conforme explicado ao longo desta dissertação, a avaliação dos parâmetros que mais influenciam a resistência de interface, do ponto de vista estatístico, foi realizada para ensaios de Cisalhamento Direto Convencional (CDC) e ensaios de plano inclinado (PI). A seguir estão discretizados os cenários avaliados nesta pesquisa, a saber: interfaces com areia-geomembrana e geotêxtil-geomembrana para o ensaio CDC (SG-CDC e GG-CDC), e interfaces areia-geomembrana e geotêxtil-geomembrana para o ensaio PI (SG-PI e GG-PI). Observou-se, de maneira geral, que os ensaios de interface com areia-geomembranas aparentemente são mais aplicados pelas literaturas, justificando a predominância dessa interface no presente estudo. Também é importante salientar que em cada cenário estudado, os dados estatísticos foram tratados com e sem a separação do material de fabricação das geomembranas, com o intuito de verificar a influência desse fato na resistência de interface.

3.5.1. Cisalhamento Direto Convencional (CDC)

A quantidade total de dados levantados nesta pesquisa para o ensaio CDC considerando as interfaces SG e GG pode ser vista na Figura 3.11. Ao longo dessa etapa, buscou-se manter

aleatoriedade na busca por países, com o intuito de evitar qualquer viés de interferência nos dados.

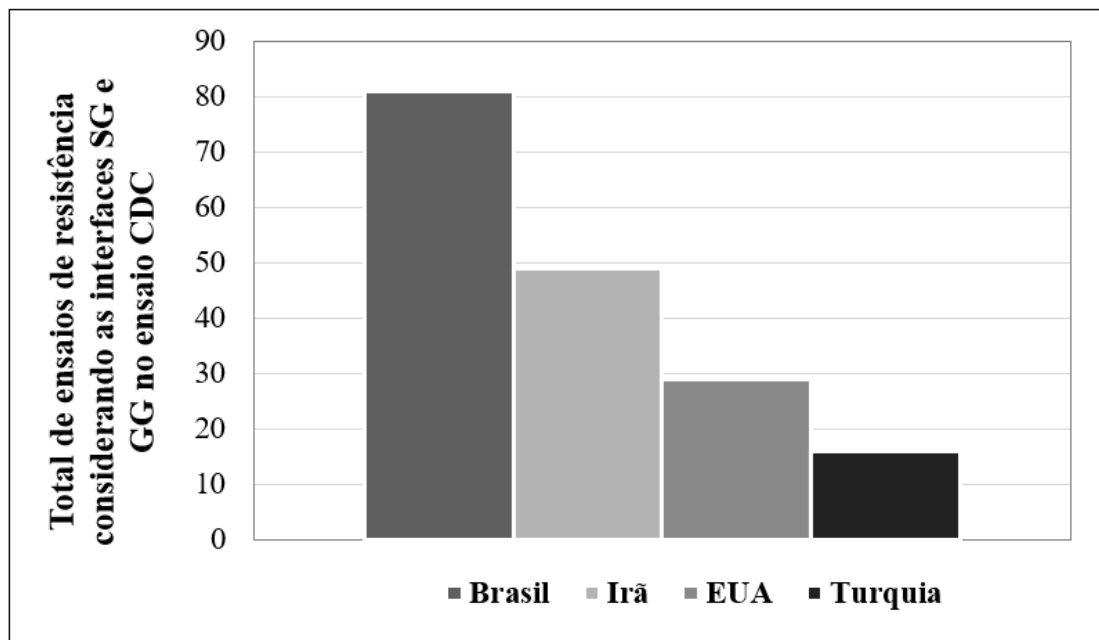


Figura 3.11 – Quantidade total de ϕ_{int} para o ensaio CDC, separado por países.

3.5.2. Plano Inclinado (PI)

Para o ensaio PI, a quantidade de dados utilizados nesta pesquisa levando em conta as interfaces SG e GG pode ser vista na Figura 3.12. Assim como para os ensaios CDC, durante a busca pelo banco de dados, tentou-se manter aleatoriedade.

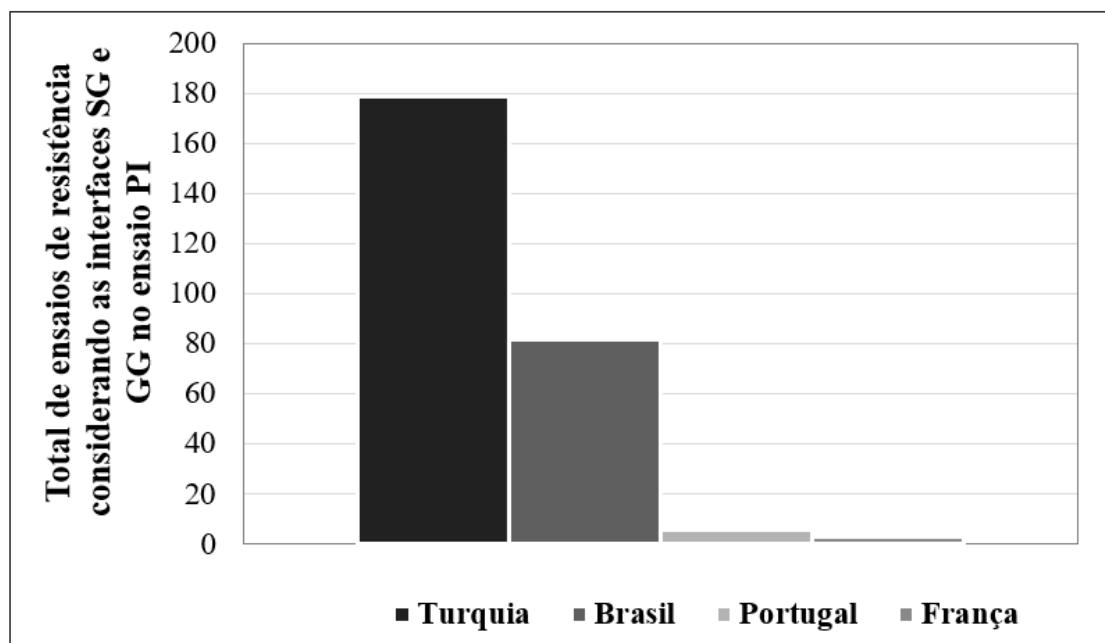


Figura 3.12 – Quantidade total de ϕ_{int} levantados para o ensaio PI, separado por países.

3.6. OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Tendo em vista que foram avaliados dois tipos de ensaios (CDC e PI), e em cada um deles foram avaliadas duas interfaces distintas, foram elaboradas ao todo 04 matrizes de correlação de Pearson (MCP).

As MCPs foram obtidas a partir dos cálculos dos coeficientes de correlação de Pearson (vide item 3.1.15) feitos para cada par de variável. Devido à quantidade de variáveis analisadas, foi necessário realizar esse procedimento de forma computacional, com o apoio da linguagem Python, aplicando principalmente as bibliotecas Panda, NumPy e Matplotlib.

A Figura 3.13 mostra um resumo geral da metodologia utilizada nesta pesquisa.

1. Estudo bibliográfico acerca dos parâmetros que influenciam a resistência de interface

- Levantamento das possíveis variáveis para compor o banco de dados dos ensaios de Cisalhamento Direto Convencional (CDC) e Plano Inclinado (PI) nas interfaces SG e GG.
- Busca por literaturas nacionais e internacionais.

2. Elaboração e estruturação do banco de dados

- Variáveis consideradas nas interfaces areia-geomembranas:
 $v, \sigma_n, AC, t_{GM}, h_G, I_D, \rho_s, C_u, C_c, D_{50}, \phi_{int}, \phi_s$
- Variáveis consideradas nas interfaces geotêxteis-geomembranas:
 $v, \sigma_n, AC, t_{GM}, h_G, M_A, \phi_{int}$

3. Análises estatísticas - Excel

- Elaboração das planilhas de tratamentos estatísticos dos dados via Excel, com os dados tratados conjuntamente e separadamente para cada tipo de material de fabricação da geomembrana.
- Elaboração de alguns resultados gráficos preliminares: CV, IQR/Range, %Outliers.

4. Análises estatísticas - Python

- Processamento dos dados via rotinas elaboradas com Python para os ensaios CDC nas interfaces SG e GG.
- Processamento dos dados via rotinas elaboradas com Python para PI nas interfaces SG e GG.

5. Elaboração das matrizes de correlação de Pearson

- Obtenção das matrizes de correlação de Pearson para os ensaios CDC.
- Obtenção das matrizes de correlação de Pearson para os ensaios PI.

6. Interpretação geral dos resultados obtidos

- Avaliação dos coeficientes de correlação obtidos pelas matrizes de Pearson.
- Classificação das correlações obtidas conforme Pant & Romana (2021).
- Conclusão de quais parâmetros mais influenciaram a resistência das interfaces estudadas.

Figura 3.13 – Resumo da metodologia aplicada nesta pesquisa.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL (CDC)

4.1.1. Interface Areia-Geomembrana – SG-CDC

Para a interface SG-CDC, os histogramas de distribuição dos dados podem ser vistos na Figura 4.1. Analisando tal figura, foi possível observar que as variáveis que apresentaram uma distribuição mais próxima da normal foram o ângulo de atrito do solo (ϕ_s) e a massa específica do solo (ρ_s). Isso indica que para essas variáveis notou-se a existência de um valor de pico, e os demais pontos de dados estão equidistantes desse ponto, apresentando frequências muito próximas.

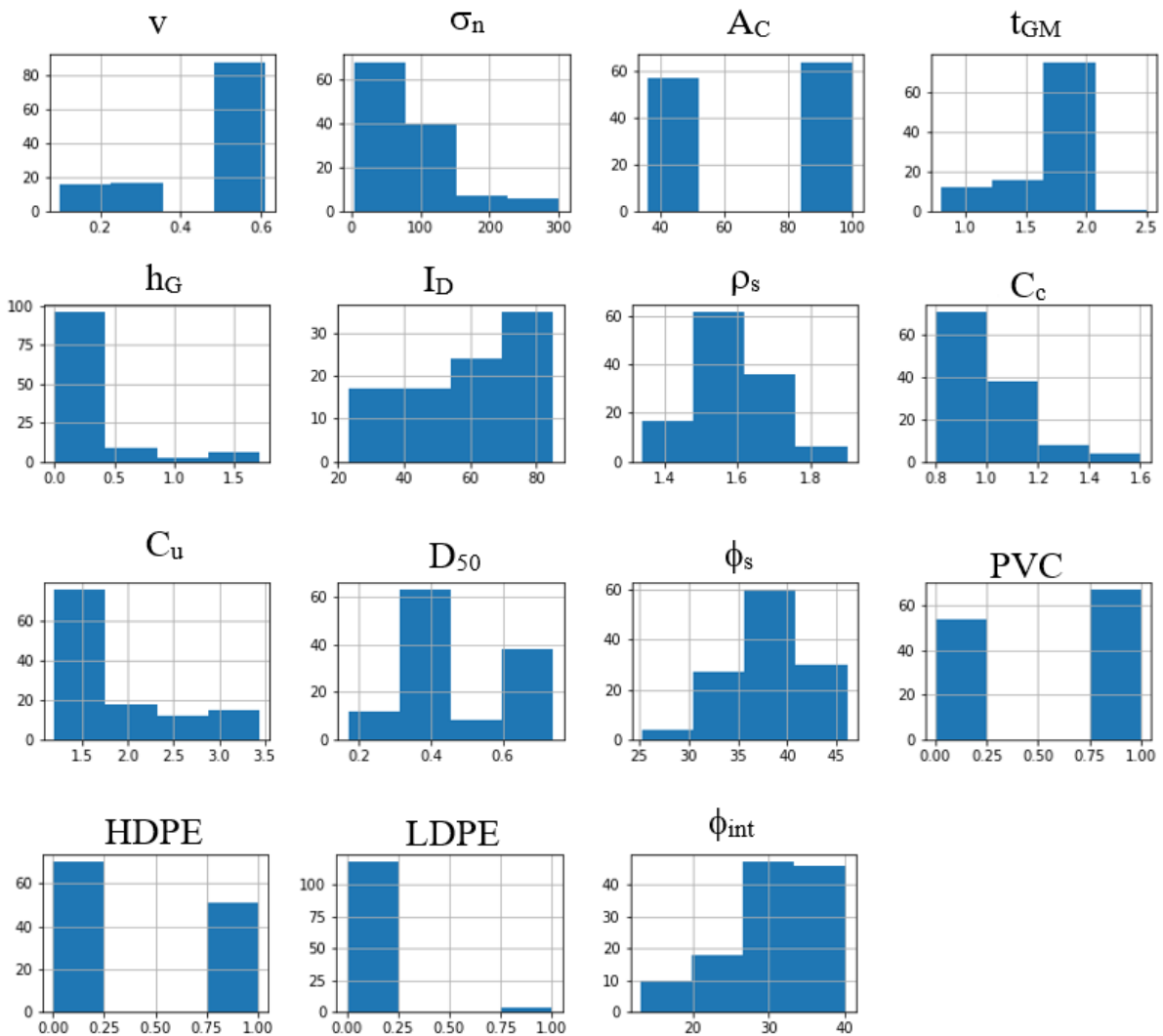


Figura 4.1 – Histogramas das variáveis estudadas na interface SG-CDC.

Analisando a Figura 4.1 também é possível perceber as classes e as amplitudes das variáveis estudadas nesta pesquisa, conforme define Crespo (2006). Para a taxa de velocidade (v) de realização dos ensaios de cisalhamento direto convencional (CDC), por exemplo, observou-se a presença de 03 classes de dados, sendo a maior classe locada entre 0,40 mm/min e 0,60 mm/min, indicando que a maioria dos ensaios aqui estudados foram realizados com uma taxa de deslocamento entre as caixas cisalhantes dentro da taxa prevista pela D3080 (ASTM, 2020), ou seja, entre 0,0025 e 1,0 mm/min.

Para as tensões normais (σ_n) aplicadas nos ensaios CDC observou-se uma maior frequência de dados distribuída entre 0 e 100 kPa, apesar de existirem alguns pontos com tensões mais altas, próximas de 200 e 300 kPa, conforme mostra a Figura 4.1. Para o ensaio CDC já eram esperados níveis de tensão mais altos, tendo em vista que esse tipo de ensaio possui uma estruturação propícia para carregamentos mais altos (Sánchez, 2018).

Quanto à área de contato (A_c), foram observadas duas classes de dados, com variações entre 40 e 60 cm² e 80 e 100 cm². Dentro das condições existentes nos equipamentos de ensaios CDC, essa variação de área é esperada, tendo em vista que os moldes dos ensaios normalmente variam de 6,00 a 10,00 cm de lado, resultando então em áreas de contato máximas próximas de 100,00 cm².

Em relação às propriedades geométricas das geomembranas, pela Figura 4.1 observou-se que a classe dominante na variável espessura da geomembrana (t_{GM}) ocorre no intervalo de 1,50 a 2,00 mm. Além disso, as alturas das rugosidades das geomembranas (h_{GM}) foram predominantes no intervalo de 0 a 0,50 mm, sendo o 0 representante das geomembranas lisas nesta pesquisa. De acordo com a especificação GM 13 (GRI, 2021), as geomembranas podem ser fabricadas com espessuras que variam de 0,75 mm a 3,00 mm e no caso das texturas, a especificação indica alturas de rugosidades a partir de 0,40 mm. Em todo caso, a fabricação deverá sempre levar em consideração as características específicas de cada obra e contar com projetos realizados por especialistas da área (Costa Junior, 2020).

A respeito das propriedades dos solos estudados, a Figura 4.1 mostra que a variável índice de densidade (I_D) apresentou 4 classes no histograma, sendo a de maior frequência definida no intervalo de 60 a 80%. Também foram observadas 04 classes para as variáveis ângulo de

atrito do solo (ϕ_s), D_{50} , coeficiente de curvatura (C_c) e coeficiente de não uniformidade (C_u), sendo que para essas duas últimas variáveis, os intervalos de maiores frequências foram observados nos intervalos de 0,80 a 1,00 e 1 a 2,00, respectivamente, indicando que os solos que compõem o banco de dados são, em sua grande maioria, uniformes e bem graduados (Sousa Pinto, 2007).

Quanto aos tipos de material de fabricação das geomembranas, para os 3 tipos de estudados, a saber, HDPE, PVC e LDPE foram observadas 2 classes nos histogramas. Conforme mostra a Figura 4.1, as maiores frequências de dados foram observadas para geomembranas de HDPE, evidenciando uma predominância do uso desse tipo de material no banco de dados estudado, o que pode ser explicado pela durabilidade do HDPE que na maioria das vezes supera o tempo de vida da estrutura (Colmanetti, 2006). Porém, essa predominância é seguida pelas geomembranas de PVC, com frequências próximas às de HDPE. Por fim, para as geomembranas de LDPE foi observada uma baixa presença de dados. Em termos de divisão por países, considerando a interface SG-CDC, foi observada uma predominância de geomembranas HDPE nos estudos realizados no Brasil, EUA e Turquia. Por outro lado, as geomembranas de PVC foram mais utilizadas por pesquisas desenvolvidas no Irã e Brasil.

Os resumos dos tratamentos dos dados estatísticos para a interface SG-CDC podem ser vistos nas Tabela 4.1 a Tabela 4.4. Salienta-se que com o intuito de avaliar estatisticamente a influência do tipo de material da geomembrana nas análises, tais dados foram tratados conjuntamente, ou seja, sem a separação por tipo de material da geomembrana, e na sequência, foi considerada a separação dos 03 (três) tipos de materiais empregados na interface

SG-CDC.

Tabela 4.1 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC com todos os dados analisados conjuntamente.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_CDC_SG ⁽¹⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	mm/min	0,10	0,61	0,51	0,42	0,16	0,38	0,50	-1,07	-0,27	0,50	0,25	0,25
σ _n	kPa	3,45	300,00	296,55	82,57	67,06	0,81	56,00	1,84	3,51	103,00	36,00	67,00
A _c	cm ²	36,00	100,00	64,00	70,55	31,38	0,44	100,00	-0,12	-2,01	100,00	36,00	64,00
t _{GM}	mm	0,80	2,50	1,70	1,79	0,41	0,23	2,00	-1,63	1,49	2,00	1,50	0,50
h _G	mm	0,00	1,71	1,71	0,17	0,44	2,53	0,00	2,68	6,29	0,00	0,00	0,00
I _D	%	23,00	85,00	62,00	58,35	20,30	0,35	57,00	-0,16	-1,30	80,00	42,00	38,00
ρ _s	g/cm ³	1,34	1,90	0,56	1,60	0,12	0,07	1,59	0,22	0,51	1,67	1,53	0,14
C _c	-	0,80	1,60	0,80	1,01	0,17	0,17	0,98	1,76	4,04	1,06	0,96	0,10
C _u	-	1,19	3,44	2,25	1,93	0,67	0,35	1,60	1,31	0,65	2,20	1,53	0,67
D ₅₀	mm	0,17	0,74	0,57	0,47	0,16	0,35	0,45	0,02	-0,79	0,63	0,36	0,27
φ _s	°	25,30	46,00	20,70	38,50	4,09	0,11	38,50	-0,32	0,99	40,50	35,50	5,00
φ _{int}	°	13,05	40,20	27,15	31,01	5,93	0,19	32,30	-1,07	0,50	35,00	29,54	5,47

⁽¹⁾ Análise estatística realizada com todos os dados de forma reunida, ou seja, sem separar o tipo do material de fabricação da geomembrana.

Tabela 4.2 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC considerando somente o material HDPE.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_CDC_SG_HDPE (2)	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	mm/min	0,10	0,50	0,40	0,29	0,17	0,57	0,25	0,23	-1,58	0,50	0,10	0,40
σ_n	kPa	3,45	300,00	296,55	102,91	87,35	0,85	100,00	1,28	0,72	100,00	34,50	65,50
A _c	cm ²	36,00	100,00	64,00	52,71	26,58	0,50	40,96	1,26	-0,39	40,96	36,00	4,96
t _{GM}	mm	1,50	2,50	1,00	1,78	0,28	0,16	2,00	0,30	-0,90	2,00	1,50	0,50
h _G	mm	0,00	1,71	1,71	0,42	0,63	1,49	0,00	1,24	0,03	0,78	0,00	0,78
I _D	%	57,00	80,00	23,00	70,48	11,53	0,16	80,00	-0,37	-2,01	80,00	57,00	23,00
ρ_s	g/cm ³	1,40	1,71	0,31	1,59	0,10	0,06	1,59	-0,55	-0,59	1,66	1,52	0,14
C _c	-	0,80	1,05	0,25	0,94	0,10	0,10	0,97	-0,43	-1,47	1,02	0,84	0,18
C _u	-	1,19	3,44	2,25	2,06	0,86	0,42	1,75	0,71	-1,05	2,46	1,38	1,08
D ₅₀	mm	0,40	0,74	0,34	0,56	0,13	0,24	0,52	0,11	-1,63	0,72	0,42	0,30
ϕ_s	°	32,70	46,00	13,30	39,44	3,92	0,10	39,00	0,31	-0,60	43,50	38,00	5,50
ϕ_{int}	°	13,05	40,20	27,15	29,68	7,48	0,25	32,00	-0,43	-0,98	37,10	24,00	13,10

(2) Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (HDPE).

Tabela 4.3 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC considerando somente o material PVC.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_CDC_SG_PVC ⁽³⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	mm/min	0,50	0,61	0,11	0,52	0,04	0,08	0,50	1,71	0,96	0,50	0,50	0,00
σ_n	kPa	3,45	200,00	196,55	68,17	42,36	0,62	56,00	1,29	2,11	106,00	36,00	70,00
A _c	cm ²	36,00	100,00	64,00	82,81	28,58	0,35	100,00	-1,07	-0,89	100,00	36,00	64,00
t _{GM}	mm	0,80	2,00	1,20	1,79	0,46	0,26	2,00	-1,71	0,96	2,00	2,00	0,00
h _G ⁽⁴⁾	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I _D	%	23,00	85,00	62,00	54,34	21,91	0,40	48,00	0,33	-1,32	74,50	32,00	42,50
ρ_s	g/cm ³	1,34	1,90	0,56	1,60	0,13	0,08	1,60	0,38	0,33	1,67	1,53	0,14
C _c	-	0,69	1,60	0,91	1,08	0,19	0,17	1,02	1,58	2,15	1,07	0,96	0,11
C _u	-	1,53	2,46	0,93	1,75	0,32	0,18	1,60	1,24	-0,15	2,10	1,56	0,54
D ₅₀	mm	0,17	0,65	0,48	0,40	0,16	0,39	0,40	0,24	-0,75	0,45	0,32	0,13
ϕ_s	°	25,30	46,00	20,70	37,76	4,18	0,11	38,10	-0,66	1,31	40,20	35,00	5,20
ϕ_{int}	°	17,90	37,40	19,50	31,83	4,31	0,14	32,30	-1,90	3,96	34,90	31,00	3,90

⁽³⁾ Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Policloreto de Vinila (PVC).

⁽⁴⁾ A variável h_G não possui parâmetros estatísticos, pois todas as geomembranas de PVC são lisas no banco de dados desta pesquisa, evidenciando possivelmente que boa parte das geomembranas rugosas são fabricadas com HDPE.

Tabela 4.4 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – CDC considerando somente o material LDPE.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_CDC_SG_LDPE (5)	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	mm/min	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50	-	-	0,50	0,50	0,00
σ_n	kPa	25,00	100,00	75,00	58,33	38,19	0,65	50,00	0,94	-	100,00	25,00	75,00
A _c	cm ²	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	-	-	100,00	100,00	0,00
t _{GM}	mm	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	2,00	-	-	2,00	2,00	0,00
h _G	mm	0,52	0,52	0,00	0,52	0,00	0,00	0,52	-	-	0,52	0,52	0,00
I _D	%	57,00	57,00	0,00	57,00	0,00	0,00	57,00	-	-	57,00	57,00	0,00
ρ_s	g/cm ³	1,59	1,59	0,00	1,59	0,00	0,00	1,59	-	-	1,59	1,59	0,00
C _c	-	0,80	0,80	0,00	0,80	0,00	0,00	0,80	-2,45	-	0,80	0,80	0,00
C _u	-	3,44	3,44	0,00	3,44	0,00	0,00	3,44	-	-	3,44	3,44	0,00
D ₅₀	mm	0,42	0,42	0,00	0,42	0,00	0,00	0,42	-	-	0,42	0,42	0,00
ϕ_s	°	39,00	39,00	0,00	39,00	0,00	0,00	39,00	-	-	39,00	39,00	0,00
ϕ_{int}	°	34,00	36,00	2,00	35,33	1,15	0,03	36,00	-1,73	-	36,00	34,00	2,00

(5) Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Polietileno de Baixa Densidade (LDPE).

Por meio da avaliação das Tabela 4.1 a Tabela 4.4, observou-se que o Coeficiente de Variação (CV) mais acentuado (2,53) foi registrado para o parâmetro altura da rugosidade da geomembrana (h_G), quando os dados foram avaliados conjuntamente (Tabela 4.1), ou seja, sem considerar a separação dos dados por tipo de material de fabricação da geomembrana. É importante ressaltar que esse CV se apresentou alto porque a altura de rugosidade das geomembranas lisas foi representada pelo número 0, simulando uma situação em que não existe nenhuma rugosidade na superfície e, portanto, essa premissa pode ter contribuído para o valor apresentado, sendo a mesma necessária por questões de processamento dos dados.

Orr & Farrell (1999) concluíram que os intervalos típicos para o coeficiente de variação (COV) dos parâmetros do solo, a saber coesão (COV_c) e ângulo de atrito (COV_ϕ) estão no intervalo de 4% a 11% e 20% a 40%, respectivamente. Já Díaz-Beltrán et al. (2016) também concluíram que os dados de coesão apresentaram um CV de 94,3%, frente a um CV de 34,20% para o ângulo de atrito. Sendo assim, observou-se que apenas a variável h_G apresentou um CV fora do intervalo observado pelos autores supracitados. No entanto, cabe salientar que o tipo de parâmetro é diferente e, além disso, há uma grande variação de tal valor, tendo em vista que vários valores foram atribuídos como sendo igual a zero (geomembrana sem asperezas).

O CV mais baixo quando os dados foram avaliados conjuntamente (Tabela 4.1) foi registrado para a variável massa específica do solo (ρ_s). Esse fato indica que no banco de dados estudado nesta pesquisa, os solos aplicados na interface SG-CDC apresentaram uma tendência de proximidade desse valor, apesar de terem sido levantados em países diferentes. Em termos de valores médios, a massa específica dos solos que compõe o banco de dados dessa pesquisa resultou em 1,59 g/cm³, valor praticamente igual ao apresentado por Sánchez (2018), que trabalhou com uma areia média, considerando um índice de densidade (I_D) de 57%.

A massa específica média observada nos trabalhos de O'Rourke (1990) e Frost et al. (2012) foi de 1,56 e 1,64 g/cm³, respectivamente, sendo o primeiro um pouco abaixo do valor médio do banco de dados utilizado nesta pesquisa, e o segundo um pouco acima. Porém, tal diferença representa algo em torno de 2% de variação, sendo essa diferença pouco significativa. Por outro lado, Igzin (1997) e Laskari & Jamali (2021) apresentaram médias das massas específicas iguais a 1,53 e 1,65 g/cm³, respectivamente. Foi possível observar que os

valores apresentados por esses autores se aproximaram mais dos valores apresentados por O'Rourke (1990) e Frost et al. (2012).

Analisando os valores dos demais CV para os dados tratados conjuntamente (Tabela 4.1), observou-se que para as demais variáveis, os valores ficaram abaixo de 0,45, com exceção da variável tensão normal (σ_n), a qual apresentou um valor de 0,81. O valor médio das tensões normais do banco de dados estudado resultou em 82 kPa, e como existem alguns pontos de tensão mais altos (cerca de 300 kPa), como é o caso do trabalho de Frost et al. (2012), tais valores podem ter contribuído para o aumento do CV. Salienta-se que para os dados separados, considerando somente as geomembranas de HDPE, o CV para o nível de tensões permaneceu quase o mesmo (Tabela 4.2). Uma redução no valor do CV ocorreu quando os dados foram tratados de forma separada considerando somente as geomembranas de PVC (Tabela 4.3), na qual é possível observar uma queda máxima de 0,20 no CV, que ocorreu para a variável tensão normal (σ_n). Esse resultado já era esperado, tendo em vista que nos ensaios com geomembrana de PVC, a média das tensões normais aplicadas foi menor do que as aplicadas nos ensaios com geomembrana HDPE.

Por meio do tratamento dos dados considerando a separação de material também foi possível observar uma queda no desvio padrão (SD) dos dados, conforme era esperado. Porém, por meio da Tabela 4.2, é possível perceber que os desvios padrão entre os dados tratados conjuntamente e por meio da separação das geomembranas HDPE se mostram similares e isso ocorreu devido ao fato de o banco de dados possuir uma quantidade considerável de geomembranas fabricadas com esse material. Desvios padrão mais altos indicam que os dados se encontram mais afastados dos valores médios do banco de dados, e na presente pesquisa, quando os dados foram tratados conjuntamente, e isso foi observado principalmente para as variáveis tensão normal (σ_n), área de contato (A_c) e índice de densidade (I_D).

Salienta-se que conforme afirma Assis (2018), diferentemente do SD, a mediana não é afetada por qualquer observação extrema em um conjunto de dados. Assim, sempre que uma observação extrema estiver presente, é apropriado utilizar a mediana em vez da média aritmética ou o desvio padrão para descrever a tendência do conjunto de dados.

Os SD altos observados para as variáveis σ_n , A_c e I_D podem ser explicados pelo fato de essas variáveis terem intervalos grandes de dados, sendo essa premissa de aleatoriedade de dados também aplicada por Tanga (2022), com o intuito de diminuir as interferências humanas nos resultados. Por exemplo, para a variável σ_n foram observados valores mínimos e máximos de 3 e 200 kPa, respectivamente, intervalo esse já esperado para o ensaio CDC (Costa Junior, 2020). Para as variáveis A_c e o I_D , os intervalos existentes entre os valores máximos e mínimos foram respectivamente de 64 cm² e 62%, demonstrando que para essas variáveis os dados se mostraram mais dispersos.

Vale salientar que a área de contato dos ensaios pode seguir normalmente definições dos próprios projetos de pesquisa, bem como as dimensões dos próprios equipamentos desenvolvidos durante os estudos. Existem casos nos quais os autores estão interessados em estudar diferentes tamanhos de áreas de contato, às vezes realmente diferentes das estabelecidas em normas, para verificar a influência dessa mudança na área de contato dos ensaios, os quais são conhecidos na literatura como ensaios de cisalhamento modificados (Koutsourais, 1991; Rebelo, 2003; Vangla & Gali, 2016; Alzahrani, 2017; Cen et al., 2018; Sánchez, 2018; Punetha et al., 2018; Adeleke, 2020).

Observou-se que na interface SG-CDC, uma parcela considerável das interfaces possui contato com geomembrana PVC (Tabela 4.3), as quais são lisas. Justamente por essa questão, o resumo do tratamento estatístico para a variável altura não foi apresentado. Também é importante salientar que de todos os dados levantados, referentes à interface com geomembrana de baixa densidade (LDPE) são os dados em menor quantidade, indicando uma menor predominância desse tipo de geomembrana nos ensaios apresentados pela literatura.

Quanto à assimetria dos dados empregados nesta pesquisa, foi possível observar que quando os mesmos foram tratados sem separar o tipo de material de fabricação da geomembrana (Tabela 4.1), as variáveis tensão normal (σ_n), espessura da geomembrana (t_{GM}), altura da rugosidade da geomembrana (h_G) e coeficiente de uniformidade (C_c) apresentaram alto grau de assimetria, sendo a tensão (σ_n), a espessura (t_G) e o coeficiente de curvatura (C_c) assimétricos à direita da curva de distribuição normal, e a espessura assimétrica à esquerda da curva de distribuição normal. Salienta-se que conforme definem Larson & Farber (2010), se a distribuição for assimétrica à esquerda, a média é menor do que a mediana, e a mediana é

igualmente menor que a moda. Por outro lado, se a distribuição for assimétrica à direita, a média é maior do que a mediana e igualmente maior do que a moda.

Os dados assimétricos à esquerda indicaram que o banco de dados apresentou valores menores do que os apresentados pelas medidas de tendência central, que também podem ser observadas nas Tabela 4.1 a Tabela 4.4. Isso provavelmente se deve ao fato de cerca de 85% das literaturas consultadas nos ensaios CDC terem utilizado geomembranas com espessuras de 2,00 mm.

Em contrapartida, quando os dados são assimétricos à direita, comportamento observado para as variáveis σ_n , t_{GM} e C_c , os valores do banco de dados estão maiores do que os valores apresentados pelas medidas de tendência central. Os valores de assimetria específicos para cada cenário estudado nesta pesquisa podem ser vistos nas Tabela 4.1 a Tabela 4.4. Como era esperado, os dados se mostraram mais assimétricos ao serem avaliados sem a separação por tipo de material da geomembrana (Tabela 4.1), e isso pode ser observado por meio dos valores negativos demonstrados nas tabelas supracitadas.

No decorrer do tratamento dos dados com a separação do tipo de geomembrana, as tendências assimétricas foram diminuindo, conforme exposto pelas Tabela 4.2 a Tabela 4.4. As variáveis que apresentaram assimetria próxima a 0 nas tabelas supracitadas indicam a existência de uma distribuição simétrica, como foi o caso da massa específica (ρ_s) e do ângulo de atrito do solo (ϕ_s), demonstrando que essas variáveis possuem um comportamento próximo à curva de distribuição normal. Por fim, comparando as quatro formas de tratamento aplicadas no banco de dados CDC-SG, foi possível notar que os dados se mostraram mais simétricos no tratamento apresentado na Tabela 4.2, ou seja, para o banco de dados separados para as geomembranas HDPE.

Analisando os coeficientes de curtose apresentados na Tabela 4.1 foi possível notar que 67% das variáveis apresentaram comportamento de uma distribuição platicúrtica, ou seja, a distribuição dos dados, em termos de achatamento da curva, se mostrou abaixo de uma distribuição normal, tendo em vista que os coeficientes de curtose resultaram em valores maiores do que 0,263 (Medri, 2011). Por outro lado, cerca de 33% apresentaram uma distribuição leptocúrtica, ou seja, os coeficientes de curtose apresentados foram menores do

que 0,263. As distribuições leptocúrticas demonstram que o grau de achatamento da distribuição dos dados analisados é menor que o da curva normal padrão, fato que indica que os dados estão mais concentrados e, portanto, apresentam desvios padrão menores (Medri, 2011).

É importante observar que as variáveis que mais se aproximaram de uma curva mesocúrtica, ou seja, de uma distribuição normal, foram o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) e a massa específica do solo (ρ_s), as quais apresentaram coeficiente de curtose próximos de 0,50 (ver Tabela 4.1). De acordo com Medri (2011), uma variável tem comportamento mesocúrtico de curtose quando o coeficiente de curtose for igual a 0,263. Uma tendência de comportamento de uma distribuição normal também foi evidenciada nos estudos de Sia & Dixon (2007), os quais relataram que uma distribuição normal pode ser atribuída ao comportamento de forças de cisalhamento de interface, bem como para parâmetros derivados dela, como é o caso da eficiência (relação entre a tangente do ângulo de atrito entre o solo e o geossintético, e a tangente do ângulo de atrito do solo). Esse fato justifica o comportamento de curtose da variável ϕ_{int} apresentado nesta pesquisa.

Salienta-se que distribuições leptocúrticas também foram observadas pelos autores Sreelakshmi et al. (2021). A distribuição da curtose dos dados analisados foi definida como leptocúrtica para os 3 casos analisados pelos autores, a saber, interfaces com madeira, alumínio e concreto. Eles observaram que a variação do valor da curtose foi mais significativa nas interfaces com alumínio devido à formação de picos mais elevados após o cisalhamento da interface. Por fim, nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4 não foi possível calcular alguns coeficientes de curtose. Isso pode ser justificado pelo fato de que esse coeficiente depende da amplitude interquartil (IQR) e quando ele resulta em zero e indica baixa variabilidade dos dados, não é possível calcular a curtose.

Em relação aos quartis inferior (Q_1) e superior (Q_3), esses foram calculados com o intuito de definir os pontos *outliers* do banco de dados estudado. A diferença entre (Q_1) e (Q_3) é chamada de Amplitude Interquartil (IQR) que, para Larson & Farber (2010), é uma medida de variação que fornece uma ideia de quanto 50% dos dados variam, identificando assim valores que apresentam comportamento discrepantes. Qualquer valor de dado que seja maior do que $1,50IQR$ à esquerda de Q_1 ou à direita de Q_3 é considerado um valor discrepante (Vinutha et

al., 2018; Nardelli et al., 2019). Salienta-se que quanto maior a variabilidade dos dados, maior será a IQR, e caso não haja variabilidade, a IQR tende a apontar valor nulo.

Visando a avaliação de possíveis *outliers* nos dados, foi plotada a Figura 4.2, que apresenta os *boxplot* para tais essas variáveis. Para análise dos dados que se comportaram como *outliers*, foi aplicado o conceito apresentado no item 3.1.8 desta dissertação, ou seja, valores *outliers* foram mapeados utilizando as definições de Andriotti (2010), o qual define como valores *outliers* àqueles inferiores a $(Q_1 - 1,5IQR)$ e superiores a $(Q_3 + 1,5 IQR)$. A partir disso, todo valor que se posicionou fora dos limites determinados anteriormente foi considerado um *outlier*.

Na Figura 4.3 mostrada abaixo estão apresentados os resultados gráficos relacionados ao Coeficiente de Variação (CV), da amplitude interquartil normalizada pelo range (IQR/Range), e a porcentagem de *outliers* para os dados tratados conjuntamente e separadamente. Como observado, as variáveis velocidade de deslocamento (v), espessura da geomembrana (t_{GM}) e diâmetro médio dos grãos (D_{50}) não apresentaram *outliers* na interface SG-CDC.

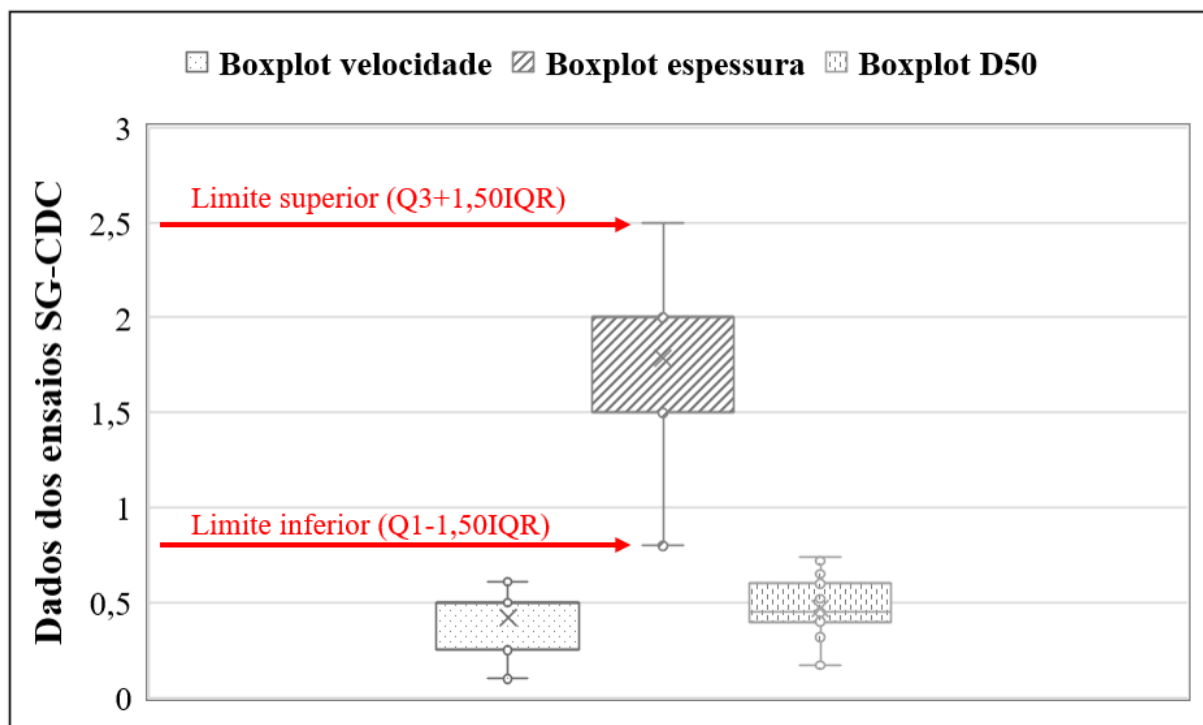
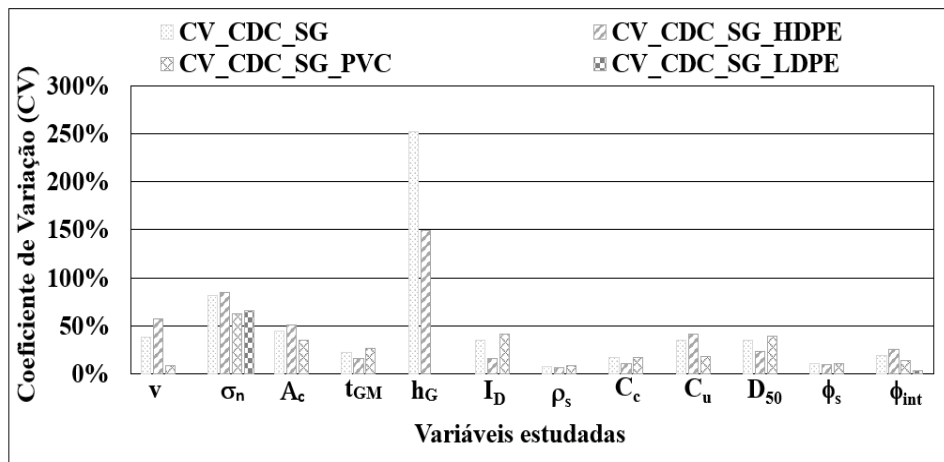
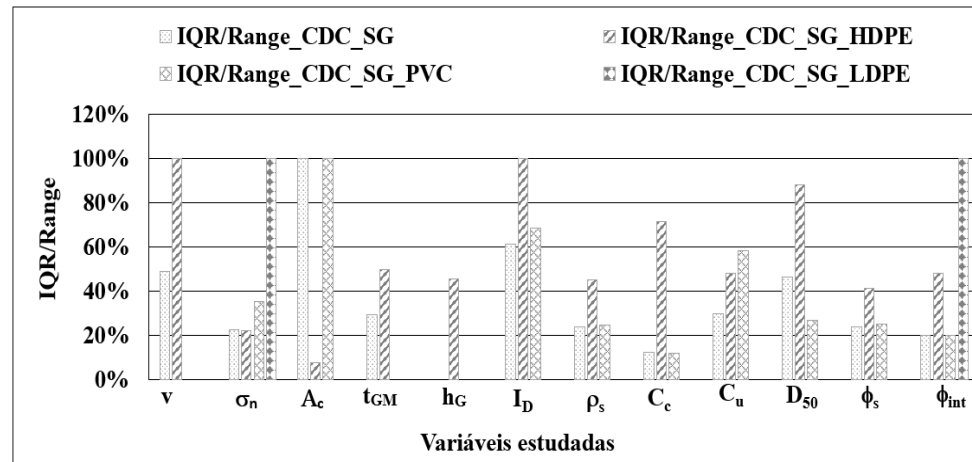


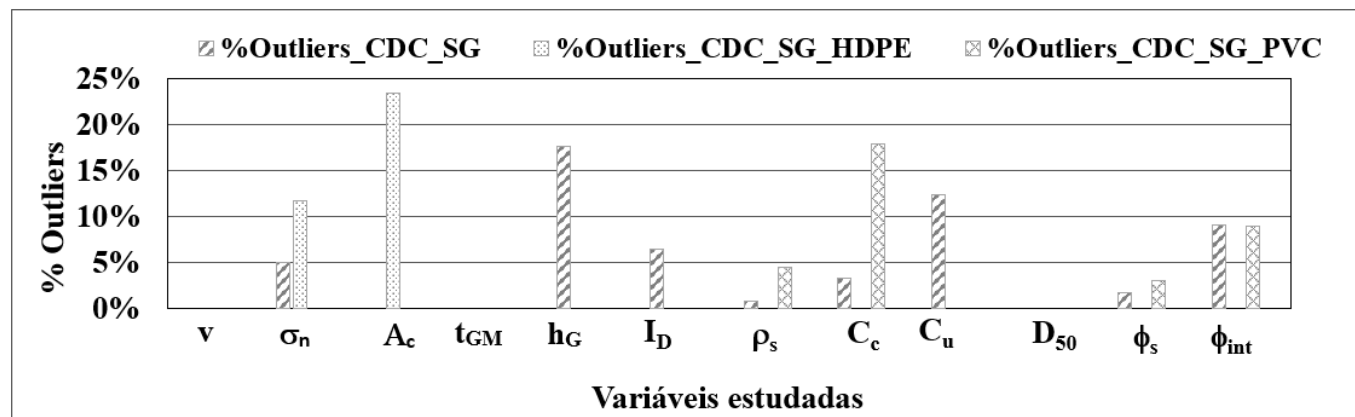
Figura 4.2 – Gráficos *boxplot* para avaliação de dados *outliers* para a interface SG-CDC, considerando as variáveis velocidade do ensaio de resistência de interface, espessura da geomembrana e o diâmetro médio dos grãos (D_{50}).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.3 – Avaliação estatística dos dados da interface SG-CDC – (a) Coeficientes de variação dos dados tratados conjuntamente e separadamente, (b) Normalização do IQR pelo range para os dados tratados conjuntamente e separadamente (c) Porcentagem de *Outliers* para os dados tratados conjuntamente e separadamente.

Conforme definido no Capítulo 03 desta dissertação (ver item 3.1.6), o coeficiente de variação (CV) é uma medida adimensional de análise da variabilidade dos dados em relação à média (Campello et al., 2019). De forma geral, como era esperado, observou-se que os CV diminuíram quando os dados dos ensaios CDC foram tratados considerando a separação por tipo de material de fabricação da geomembrana, uma vez que a porcentagem de outliers tendeu a diminuir, conforme pode ser visto na Figura 4.3. Nessa mesma figura, foi possível constatar também que as variáveis velocidade (v) e o D_{50} do solo não apresentaram porcentagem de outliers (ver Figura 4.2), demonstrando certa constância na velocidade dos ensaios estudados, bem como uma tendência de repetição do tipo de material no banco de dados considerado nesta pesquisa, que está de acordo com os resultados anteriormente apresentados.

Analisando a Figura 4.3a, foi possível perceber que a variável que apresentou o maior CV na interface SG-CDC foi a altura da rugosidade da geomembrana (h_G) quando os dados foram tratados sem separar o tipo de fabricação da geomembrana. Isso ocorreu principalmente porque a altura de rugosidade das geomembranas lisas foi representada pelo número 0, com o intuito de simular uma geomembrana lisa. Porém, salienta-se que o valor encontrado no CV para essa variável foi o único que se apresentou fora de intervalos já observados por outros autores que aplicaram estatística para avaliação de parâmetros de resistência do solo, a saber, coesão e ângulo de atrito (Orr & Farrell (1999); Díaz-Beltrán et al. (2016)), com valores de CV variando de 4 a 94%.

Por outro lado, considerando os resultados apresentados na Figura 4.3b, que apresenta a normalização da IQR (diferença entre o terceiro e o primeiro quartis) pelo Range (diferença entre o terceiro e o primeiro quartis), foi possível notar que os valores mais altos dessa normalização foram apresentados pelas variáveis v , σ_n , A_c , I_D , D_{50} e ϕ_{int} principalmente quando os dados foram tratados separadamente para as geomembranas de HDPE. Isso indica que, apesar de os dados em alguns casos se mostrarem mais padronizados, para essas variáveis os existem pontos que se distanciam da amplitude interquartil (IQR).

O conceito de *outlier* foi definido no item 3.1.8 desta dissertação, e trata-se de uma ferramenta gráfica que pode ser utilizada para visualizar a distribuição de dados divididos nos quartis (Siqueira, 2021). Conforme pode ser visto na Figura 4.3c, as variáveis que

apresentaram uma maior porcentagem de *outliers* (quantidade de valores fora dos limites superior e inferior em relação ao total de dados) foram a altura da rugosidade da geomembrana (h_G), a área de contato (A_c), o coeficiente de curvatura (C_c) e o coeficiente de não uniformidade (C_u) para os três cenários estudados, ou seja, com os dados tratados conjuntamente, separado por geomembranas HDPE e separados por geomembrana PVC, respectivamente. Para a altura da rugosidade, como foi adotado o valor 0 para geomembranas lisas, tal variabilidade pode ser justificada por esse fato. Em relação à A_c , e aos coeficientes de curvatura e não uniformidade (C_c e C_u), observou-se variações no banco de dados de 36 a 100 cm^2 , 0,80 a 1,60 e 1,19 a 3,44, respectivamente, demonstrando que já era esperado encontrar uma porcentagem de *outliers* mais alta, tendo em vista a existência de intervalos maiores no banco de dados.

É importante ressaltar que as variáveis que não possuem nenhuma barra na Figura 4.3c são as que não apresentaram nenhum *outlier* no banco de dados analisado, e para comprovar essa afirmação, foram montados os boxplot para essas variáveis, os quais estão representados na Figura 4.2, referentes às variáveis velocidade de deslocamento (v), espessura da geomembrana (t_{GM}) e diâmetro médio dos grãos (D_{50}).

Terminadas as análises estatísticas para a interface SG-CDC, a seguir serão retratadas algumas explicações a respeito do comportamento dos ensaios CDC em si. Para a interface SG-CDC observou-se que a mínima velocidade de ensaio aplicada no banco de dados foi de 0,10 mm/min e a máxima foi de 0,61 mm/min, quando os dados foram tratados conjuntamente. De acordo com a norma D3080 (ASTM, 2020), a fim de testar uma gama de solos os equipamentos de cisalhamento direto devem permitir o ajuste da taxa de deslocamento de 0,0025 a 1,0 mm/min. Com isso percebeu-se que os autores pertencentes ao banco de dados estudado nesta pesquisa respeitaram o intervalo da velocidade de deslocamento das caixas de cisalhamento (O'Rourke, 1990; Sánchez, 2018; Lashkari & Jamali, 2021; e dentre outros).

Ainda a respeito da velocidade de realização do ensaio resistência de interface, a NBR 12957-1 (ABNT, 2022) indica que a aparelhagem do ensaio de cisalhamento deve ser capaz de aplicar uma força cisalhante horizontal à caixa de cisalhamento a uma velocidade de deslocamento entre 0,80 a 1,20 mm/min, evidenciando também a coerência das taxas de

deslocamento que foram utilizadas nos ensaios que compõem o banco de dados desta dissertação.

As tensões aplicadas nos ensaios estudados nesta pesquisa variaram de 3,45 a 300 kPa e esse intervalo também era esperado uma vez que, conforme afirma Sánchez (2018), os ensaios de cisalhamento direto convencional devem ser utilizados quando o interesse for avaliar os materiais sob tensões mais altas, diferentemente do que ocorre com o ensaio do plano inclinado, indicado para tensões mais baixas. Salienta-se que foram observadas tensões mais baixas, na ordem de 3,45 kPa, mas conforme pode ser visto na Figura 4.3c, tais pontos devem ser considerados como *outliers*. Em consenso com a classificação de pontos de tensão baixa no ensaio CDC como *outlier* está o estudo de Girard et al. (1990), os quais observaram que a utilização de baixos níveis de tensão em ensaios de cisalhamento direto podem fornecer resultados desfavoráveis à segurança dos parâmetros de resistência, dependendo do nível de tensões admitido na obra.

Quanto à área de contato dos ensaios, salienta-se que para estudo de interfaces geossintéticas, a norma D5321 (ASTM, 2021) indica o uso de caixas quadradas ou retangulares, as quais devem possuir uma dimensão mínima de 300 mm, 15 vezes o d_{85} do solo de maior granulometria usado no teste, ou um mínimo de 5 vezes o tamanho máximo de abertura (no plano) do geossintético testado. Em tais casos é mais comum a aplicação do ensaio de cisalhamento direto modificado (Koutsourais & Sprague, 1991; Vangla & Gali, 2016; Saeed, 2017; Cen et al., 2018; Sánchez, 2018; Adeleke, 2020). No banco de dados para o ensaio CDC, observou-se uma variação de 36 a 100 cm² nas áreas utilizadas e, portanto, percebeu-se que esse intervalo é menor do que o recomendado pela D5321 (ASTM, 2021).

Conforme explanado no início desta dissertação, a Matriz de Pearson foi construída com o intuito de avaliar as correlações entre as variáveis estudadas. O resultado dessa construção para a interface SG-CDC pode ser visto na Figura 4.4. A Tabela 4.5 apresenta um resumo das correlações obtidas por meio da Matriz de Pearson apresentada na Figura 4.4 para a interfaces SG-CDC, quando comparadas com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), e mostra também a classificação da correlação de acordo com as definições apresentadas por Pant & Ramana (2021).

Pela análise da Figura 4.4 e Tabela 4.5 foi possível notar que os coeficientes de correlação mais altos na interface SG-CDC ocorreram para as variáveis ângulo de atrito do solo (ϕ_s) e altura da rugosidade da geomembrana (h_G), com valores de correlação de 0,52 e 0,42, representando assim correlações forte e moderada, respectivamente. Essas variáveis foram avaliadas por diversos autores, os quais concluíram que a altura da rugosidade da geomembrana, bem como a dimensão e angularidade das partículas do solo, possuem grande influência na resistência de interface (Igzin, 1997; Blond & Elie, 2006; Afonso, 2009; Vangla et al. 2017; Sánchez, 2018). Salienta-se ainda que a quebra de partículas pode causar uma ligeira redução na espessura da zona de cisalhamento (Wang & Yin, 2022).

Vangla et al. (2016) concluíram que uma maior resistência de interface pode ser obtida quando o tamanho médio das partículas (D_{50}) da areia corresponde igualmente ao tamanho da aspereza do material de interface. Porém, nesta pesquisa observou-se na Figura 4.4 a existência de uma correlação muito fraca de -0,019 entre o ϕ_{int} e o D_{50} , conforme classificação definida por Pant & Ramana (2021). Analisando o banco de dados estudados para a interface SG-CDC, o tamanho médio dos grãos foi de 0,47 mm e a altura das asperezas foi de 0,17 mm quando os dados foram tratados conjuntamente, ou seja, o tamanho médio dos grãos foi cerca de 2,50 vezes maior do que a altura média das asperezas. Possivelmente, esse fato colabora para não ser possível avaliar a conclusão obtida por Vangla et al. (2016), reportada acima. No entanto, cabe salientar que a Matriz de Pearson representa uma relação linear entre uma variável e outra e os ensaios podem não estar sendo representados dessa forma pois a interferência de outras variáveis pode estar influenciando no resultado.

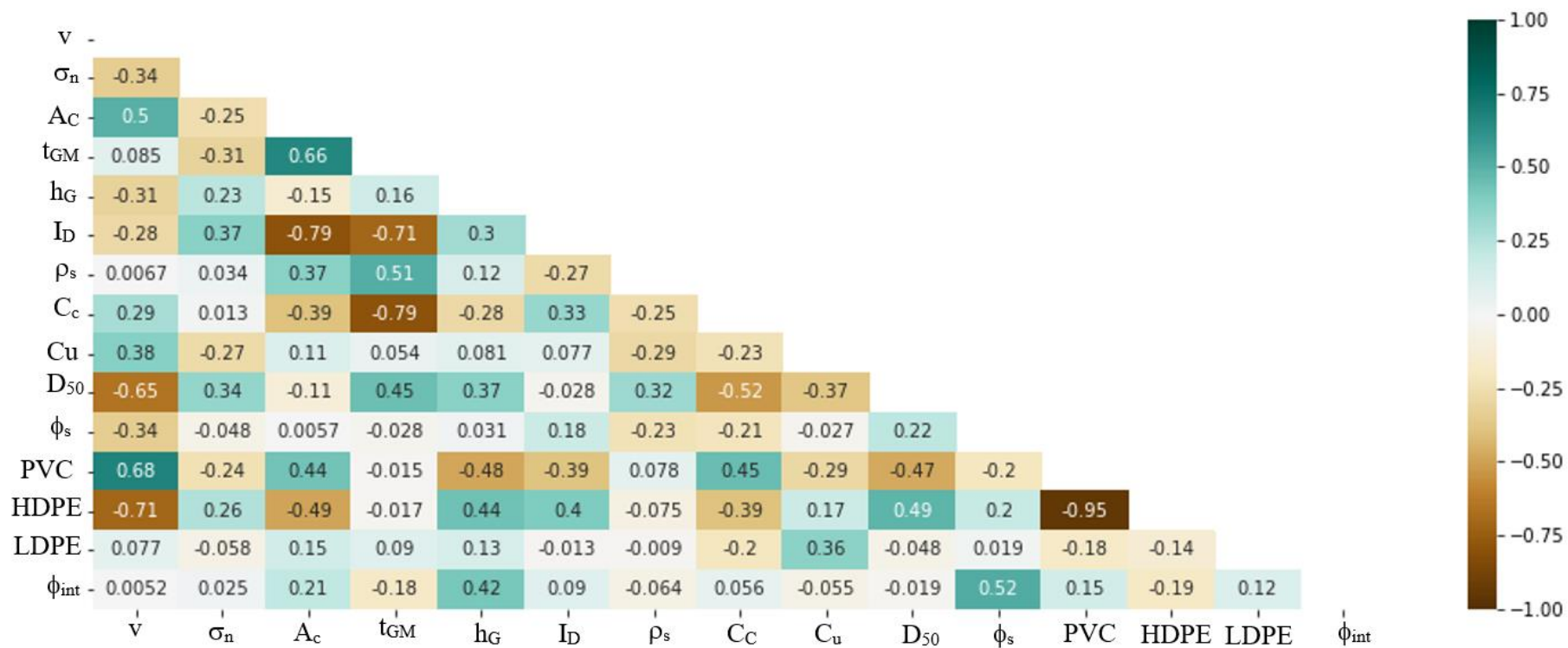


Figura 4.4 – Matriz de correlação de Pearson para a interface SG-CDC.

Tabela 4.5 – Classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces SG-CDC em relação ao ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}).

Variável	Valor da correlação	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
ϕ_s	+0,52	Forte
h_G	+0,42	Moderada
A_c	+0,21	Moderada
PVC	+0,15	Fraca
LDPE	+0,12	Fraca
I_D	+0,09	Muito fraca
C_c	+0,056	Muito fraca
σ_n	+0,025	Muito fraca
v	+0,0052	Muito fraca
D_{50}	-0,019	Muito fraca
C_u	-0,055	Muito fraca
ρ_s	-0,064	Muito fraca
t_{GM}	-0,18	Fraca
HDPE	-0,19	Fraca

A correlação muito fraca obtida entre o ϕ_{int} e o D_{50} nesta pesquisa também pode ser explicada pelas conclusões de Holtz & Kovacs (1981), que sugeriram que o tamanho das partículas não tem efeito se os ensaios de cisalhamento forem realizados na mesma proporção de vazios. O índice de vazios não foi uma variável considerada nesta pesquisa, porém o índice de densidade (I_D) quando evidenciado pelos autores dos artigos, foi reportado como variável. Observou-se que no banco de dados estudado na interface SG-CDC, o I_D foi constante em quase todos os estudos, com exceção do trabalho de Lashkari & Jamali (2021), mostrando que as conclusões reportadas por Holtz & Kovacs (1981) estão coerentes com o obtido nesta pesquisa, tendo em vista a constância observada nos valores do I_D .

Já a área de contato (A_c) dos ensaios CDC, em relação à resistência de interface, demonstrou uma correlação moderada segundo a classificação de Pant & Ramana (2021), apresentando um valor positivo de 0,21 para a interface SG-CDC. Isso quer dizer que um incremento na

área de contato dos ensaios CDC tende a fazer com que também ocorra um aumento no ângulo de atrito de interface (Igzin & Wasti, 1998; Heish & Heish, 2003; Sánchez, 2018).

Igzin & Wasti (1998) observaram que o aumento da área de contato provoca um aumento do ângulo de interface médio de cerca de três graus da menor para a maior área de contato, e Sánchez (2018) concluiu que a mesma mostrou influência nos resultados dos ensaios realizados de interface pelo autor. Salienta-se que em discordância a essas conclusões existe o estudo de Aguiar (2008), no qual a área de contato se mostrou inversamente proporcional ao ângulo de atrito de interface.

Quanto à influência da massa específica do solo (ρ_s) na resistência de interface, O'Rourke (1989) afirma que há um aumento gradual na tensão de cisalhamento máxima conforme ocorre o aumento dessa massa específica do solo e, caso ocorra uma maior penetração do grão na geomembrana, a tendência é que a resistência de interface também aumente. Para a interface SG-CDC não foi possível observar uma correlação forte entre a massa específica e o ângulo de atrito de interface e isso pode ser explicado pelo fato de o índice de densidade médio do banco de dados ter resultado em cerca de 60%, indicando que possivelmente durante os ensaios, os grãos passam pelo processo de rearranjo em intensidades diferentes de acordo com o carregamento, e somente depois penetram no material da geomembrana.

Além disso, como a angularidade das partículas não foi considerada como variável de estudo, não foi possível avaliar quanto o grão tenderia a adentrar na interface, mas é de conhecimento que o efeito da morfologia (redondeza e esfericidade) é mais pronunciado no caso de geomembranas lisas do que qualquer outro material contínuo, porque as areias podem facilmente formar sulcos mais profundos para oferecer maior resistência ao cisalhamento da interface (Holtz & Kovacs, 1981; Santamarina & Cho, 2001; Vangla & Gali, 2016).

Dos três tipos de geomembrana analisados em relação ao comportamento do ângulo de atrito, observou-se que para PVC e LDPE a correlação apresentada foi positiva e para HDPE negativa (Tabela 4.5). Cabe salientar que para o banco de dados usado 40% das geomembranas são lisas e de HDPE. A influência do material de fabricação da geomembrana foi investigado por O'Rourke et al. (1990), que concluíram que para geomembranas HDPE o

ângulo de atrito de interface tende a ser menor do que para geomembranas PVC, pois os mecanismos de deslizamentos dos grãos são diferentes.

Os estudos de Marques (2021) também mostraram que existe uma queda na resistência de interface de cerca de 15% quando se utiliza uma geomembrana lisa de HDPE na interface solo-geomembrana. Dessa forma, a correlação negativa encontrada nesta pesquisa entre o ângulo de atrito de interface e as geomembranas de HDPE se mostrou coerente. Observou-se que o tipo de fabricação da matriz da geomembrana pode dificultar a penetração dos grãos do solo no polímero. Porém, para confirmar tal conclusão é necessário realizar mais estudos a respeito do assunto, principalmente estudos laboratoriais. Apesar da diferença no sentido da correlação para as interfaces com geomembranas HDPE, PVC e LDPE em relação ao ângulo de atrito de interface, as correlações obtidas via Matriz de Pearson foram classificadas como fracas (Tabela 4.5).

Outro ponto importante a ser observado na Tabela 4.5 é a correlação negativa fraca apresentada entre o ângulo de atrito de interface e a espessura da geomembrana (t_{GM}). Nos estudos de Saeed (2017) foi identificado que para geomembranas de 120 mils (cerca de 3 mm) e 40 mils (cerca de 1 mm) de espessura, a diferença encontrada no ângulo de atrito foi de $1,60^\circ$. Porém, vale salientar que esse valor pode estar dentro da margem de erro do equipamento, sendo considerada uma variação não relevante em termos práticos.

Para as variáveis C_c , σ_n , v e C_u foi encontrada uma correlação muito fraca, ou seja, com valores abaixo de $\pm 0,10$, com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), conforme pode ser observado na Tabela 4.5, sendo uma correlação fraca positiva para a tensão, coeficiente de curvatura e taxa de velocidade de execução, e correlação fraca negativa observada para o coeficiente de não uniformidade.

Para a tensão normal (σ_n), a obtenção da correlação muito fraca e positiva pode ser explicada por uma possível existência de correlação não linear entre essas variáveis. O conceito de não linearidade não foi abordado nesta pesquisa, porém foi observado nos estudos de Tanga (2022) que o modelo de regressão funcionou melhor quando foi considerada a não linearidade dos dados. Além disso, tensões muito altas podem danificar as rugosidades das geomembranas, tendo em vista que conforme concluiu Pedroso (2017) o aumento da tensão

de 600 kPa para 1800 kPa foram observadas maiores concentrações de deformações nas superfícies da geomembranas texturizadas, fazendo com que as rugosidades perdessem contato com a interface. A diminuição das asperezas das geomembranas devido ao aumento da tensão também foi observada por Xu et al. (2023).

Ainda sobre a influência da tensão normal na resistência de interface também é importante ressaltar que Negussey & Vaid (1989) afirmam que o ângulo de atrito de interface apresenta geralmente um leve aumento conforme o nível de tensão também é acrescido, possivelmente devido à penetração dos grãos nas geomembranas. Essas conclusões também foram reportadas por Feng et al. (2017) e Adeleke et al. (2020). Porém, neste trabalho, observou-se que o ângulo de atrito de interface apresentou uma correlação muito fraca com valor de, conforme intervalos definidos por Pant & Ramana (2021), com o nível de tensão em ambas as interfaces. Em relação a esse ponto, seria interessante avaliar também a influência da angularidade dos grãos na resistência de interface (Igzin, 1997; Janoo, 1998; Jensen et al., 2001; Vangla & Gali, 2016; Afzali-Nejad et al., 2017), porém ela não foi considerada nesta pesquisa, tendo em vista que tal propriedade nem sempre é reportada nos artigos, dificultando a inserção de tal variável no banco de dados.

Em relação às correlações dos coeficientes C_c e C_u com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), que resultaram em muito fracas, é importante ressaltar que C_c apresentou uma correlação positiva e o coeficiente de não uniformidade C_u uma correlação negativa. Ambos coeficientes são dependentes do tamanho dos grãos, mais especificamente dos D_{30} , D_{10} e D_{60} (Sousa Pinto, 2006). Apesar de terem sido observadas correlações muito fracas para essas variáveis nesta pesquisa, a angularidade dos grãos proporciona uma maior mobilização das tensões cisalhantes devido ao bloqueio e travamento do solo na camada geossintética (Igzin, 1997; Gomes, 1993; Afzali-Nejad et al., 2017). Sendo assim, para a interface SG-CDC, não foi possível observar concordância com a literatura, possivelmente por não existir uma correlação linear entre C_c e C_u e o ϕ_{int} .

Por fim, a taxa de deslocamento do ensaio (v) também apresentou uma correlação muito fraca e positiva com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}). Isso indica que para a interface SG-CDC a velocidade não impactou o ϕ_{int} e, apesar de a correlação ter sido positiva, para ensaios de pequena escala não é possível afirmar que essa variável influencia a resistência de interface

baseando-se nos resultados obtidos. Um possível motivo pode ser o fato de a aplicação da taxa de deslocamento entre as caixas ser um valor constante, conforme prevê a NBR 12957-1 (ABNT, 2022). Salienta-se que Tanga (2022) também concluiu que a taxa de deslocamento dos ensaios não se mostrou relevante na escala dos fatores que mais influenciam a resistência de interface.

4.1.2. Interface Geotêxtil-Geomembrana – GG-CDC

Para a interface GG-CDC, os histogramas das variáveis podem ser vistos na Figura 4.5. Com base nessa figura foi possível perceber que diferentemente do observado para a interface SG-CDC, para a interface GG-CDC nenhuma variável mostrou tendência de ter uma distribuição de dados simétrica. As variáveis que demonstraram uma distribuição uniforme mais evidente foram a área de contato (A_c) e o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}).

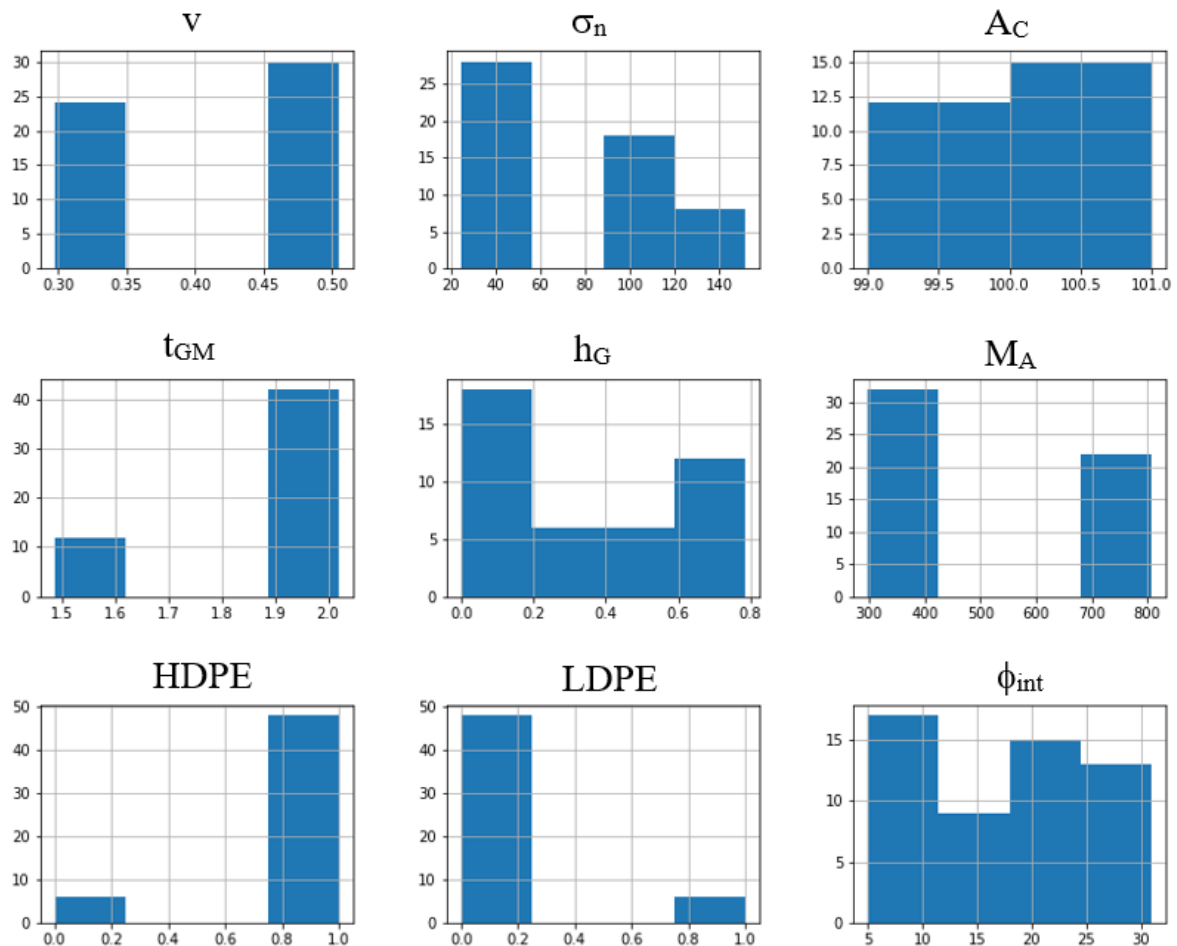


Figura 4.5 – Histogramas das variáveis estudadas na interface GG-CDC.

Assim como observado na interface SG-CDC, na interface GG-CDC os ensaios foram realizados respeitando a taxa proposta pela D3080 (ASTM, 2020), que indica uma taxa de deslocamento entre as caixas entre 0,0025 a 1,0 mm/min.

Quanto à variável tensão normal (σ_n), foram observadas 03 classes de dados, com amplitudes alocadas entre 20 a 60 kPa, 90 a 120 kPa e 120 a 150 kPa. É comum que ensaios CDC sejam realizados com tensões mais altas, conforme previsto pela literatura (Sánchez, 2018; Costa Junior, 2020; Chiarello, 2022). Salienta-se que a escolha do tipo de ensaio, bem como das tensões aplicadas no mesmo, será dependente das condições que a interface será submetida em campo (Aguiar, 2003), bem como das definições específicas de cada pesquisa.

Ainda com base na Figura 4.5, foi possível observar que para a área de contato (A_c) foram evidenciadas quatro classes de dados, mas todas elas com valores muito próximos de 100 cm², demonstrando que para interfaces com geotêxteis na base de dados estudada foi mais comum encontrar ensaios de cisalhamento com caixas de 10x10 cm². Porém, utilizando-se caixas maiores no ensaio CDC é possível simular os ensaios de forma mais precisa com a condição de campo (Sánchez, 2018; Pedroso, 2017; Chiarello, 2022). Também é importante ressaltar que apesar de a interface GG-CDC apresentar área de contato maior do que a interface SG-CDC, a NBR 12957-1 (ABNT, 2022) prevê que ensaios com interfaces geossintéticas tenham áreas de contato mínimas de 300 cm². Porém, a utilização de áreas diferentes da normativa pode ser de interesse do pesquisador, como ocorreu para essa interface GG-CDC.

Para as características relacionadas à geometria da geomembrana, ou seja, espessura (t_{GM}) e altura da rugosidade (h_{GM}) foram observadas a presença de 02 e 04 classes, respectivamente. As amplitudes observadas para t_{GM} estão divididas entre 1,50 e 1,60 mm e 1,90 a 2,00 mm, e para h_{GM} estão divididas entre 0 e 0,80 mm, salientando que a classe predominante ocorreu na amplitude de 0 a 0,20 mm. Na interface GG-CDC, a predominância de altura da rugosidade se mostra abaixo da prevista pela GM 13 (GRI, 2021) em duas classes. Porém, no banco de dados também foram observadas amplitudes que atendem a tal especificação.

A respeito da variável gramatura (M_A), foram observadas 02 classes de dados, e as amplitudes estão alocadas entre 300 e 400 g/m² e 700 e 800 g/m². A aplicação de uma camada de geotêxtil com gramatura maior se mostra mais eficiente quando o intuito é o aumento da

resistência contra o puncionamento das geomembranas, sendo que gramaturas inferiores à 250 g/m² podem não garantir o antipuncionamento da geomembrana (Macaferri, 2009). Em linhas gerais, gramaturas mais altas eram esperadas na interface GG-CDC, tendo em vista que são ensaios normalmente realizados com tensões maiores e que, portanto, podem colaborar com o puncionamento da geomembrana. Os estudos de Abdelaal & Solanki (2022), por exemplo, utilizaram gramaturas que variaram de 200 a 2400 g/m² para avaliar o efeito do envelhecimento do geotêxtil e da rugosidade da superfície da geomembrana nas interfaces geomembrana-geotêxtil, e os intervalos avaliados estão de acordo com os apresentados pelo banco de dados desta pesquisa.

Quanto aos tipos de material de fabricação das geomembranas, na interface GG-CDC foram observados dois tipos de materiais, a saber, HDPE e LDPE. Para essa interface, o tipo de material predominante foi o HDPE, representando cerca de 90% das geomembranas. Essa predominância da aplicação de geomembranas HDPE foi evidenciada por alguns autores (Villar, 2003; Colmanetti, 2006). O principal motivo está ligado à durabilidade a longo prazo, alta resistência a ataques químicos e também às tensões geradas durante a construção e instalação (Geroto, 2008; Chiarello, 2022).

A seguir estão expostos os tratamentos estatísticos dos dados da interface GG-CDC que foram estudados conjuntamente (Tabela 4.6), ou seja, sem a separação por tipo de material e, na sequência, considerando a separação dos 02 (dois) tipos de materiais de fabricação da geomembrana, ou seja, HDPE na Tabela 4.7 e LDPE na Tabela 4.8.

Tabela 4.6 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – CDC analisados conjuntamente.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_CDC_GG ⁽⁶⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	mm/min	0,30	0,50	0,20	0,41	0,10	0,24	0,50	-0,23	-2,02	0,50	0,30	0,20
σ _n	kPa	25,00	150,00	125,00	76,85	41,73	0,54	50,00	0,43	-0,98	100,00	50,00	50,00
A _c	cm ²	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	-	-	100,00	100,00	0,00
t _{GM}	mm	1,50	2,00	0,50	1,89	0,21	0,11	2,00	-1,37	-0,12	2,00	2,00	0,00
h _G	mm	0,00	0,78	0,78	0,33	0,32	0,96	0,32	0,17	-1,67	0,67	0,00	0,67
M _A	g/m ²	300,00	800,00	500,00	514,81	240,60	0,47	400,00	0,34	-1,90	800,00	300,00	500,00
φ _{int}	°	5,00	30,96	25,96	17,90	7,83	0,44	18,50	-0,07	-1,26	24,25	10,96	13,30

⁽⁶⁾ Análise estatística realizada com todos os dados de forma reunida, ou seja, sem separar o tipo do material de fabricação da geomembrana.

Tabela 4.7 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – CDC considerando somente o material HDPE.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_CDC_GG_HDPE ⁽⁷⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	mm/min	0,30	0,50	0,20	0,40	0,10	0,25	0,40	0,00	-2,09	0,50	0,30	0,20
σ _n	kPa	25,00	150,00	125,00	79,17	42,32	0,53	75,00	0,39	-1,05	100,00	50,00	50,00
A _c	cm ²	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	-	-	100,00	100,00	0,00
t _{GM}	mm	1,50	2,00	0,50	1,88	0,22	0,12	2,00	-1,19	-0,61	2,00	1,63	0,38
h _G	mm	0,00	0,78	0,78	0,30	0,33	1,12	0,16	0,45	-1,61	0,67	0,00	0,67
M _A	g/m ²	300,00	800,00	500,00	510,42	239,00	0,47	400,00	0,39	-1,87	800,00	300,00	500,00
φ _{int}	°	5,00	30,96	25,96	17,79	8,29	0,47	18,00	-0,03	-1,46	25,48	9,85	15,63

⁽⁷⁾ Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (HDPE).

Tabela 4.8 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – CDC considerando somente o material LDPE.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_CDC_GG_LDPE ⁽⁸⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	mm/min	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50	-	-	0,50	0,50	0,00
σ_n	kPa	25,00	100,00	75,00	58,33	34,16	0,59	50,00	0,52	-1,88	100,00	25,00	75,00
A _c	cm ²	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	-	-	100,00	100,00	0,00
t _{GM}	mm	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	2,00	-	-	2,00	2,00	0,00
h _G	mm	0,52	0,52	0,00	0,52	0,00	0,00	0,52	-	-	0,52	0,52	0,00
M _A	g/m ²	300,00	800,00	500,00	550,00	273,86	0,50	550,00	0,00	-3,33	800,00	300,00	500,00
ϕ_{int}	°	17,00	21,00	4,00	18,83	1,83	0,10	18,50	0,36	-2,10	21,00	17,00	4,00

⁽⁸⁾ Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Polietileno de Baixa Densidade (LDPE).

Por meio da análise das Tabela 4.6 e Tabela 4.7, observou-se que a maior diferença encontrada no CV comparando os dados tratados de forma conjunta (Tabela 4.6), e separando os dados da geomembrana de HDPE (Tabela 4.7) foi de 0,16, e isso ocorreu para a variável altura da rugosidade da geomembrana (h_G). Observou-se que essa diferença no CV não foi grande, e ela pode ter ocorrido pelo fato de o banco de dados ser composto por rugosidade que variam de 0 (geomembranas lisas) a 0,78 mm de altura de aspereza.

Por meio de uma análise análoga, comparando os dados tratados conjuntamente (Tabela 4.6) e comparando com os dados separados para a geomembrana LDPE (Tabela 4.8) observou-se que a maior diferença observada na comparação desses CVs foi o da variável ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), com um valor de 0,34, sendo esse valor proveniente da diferença entre os CVs do ϕ_{int} presentes nas Tabela 4.6 e Tabela 4.8. Salienta-se que essa diferença está dentro do intervalo definido por Orr & Farrell (1999) e Díaz-Beltrán et al. (2016), que estudaram a variação dos coeficientes de variação dos parâmetros do solo, a saber coesão (COV_c) e ângulo de atrito (COV_ϕ) por meio de ensaios de laboratório, e a relação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento com a composição dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos), respectivamente.

Por meio das análises estatísticas expostas nas Tabela 4.7 e Tabela 4.8, foi possível perceber que os coeficientes de variação para as geomembranas de HDPE (Tabela 4.7) tenderam a ser maiores do que os apresentados para as geomembranas de LDPE (Tabela 4.8). Isso pode ter ocorrido pelo fato de o banco de dados contendo o uso de geomembranas HDPE ser maior do que o de LDPE. Essa predominância de uso do HDPE pode ser explicada por uma das conclusões do trabalho de Colmanetti (2006), que afirma que durabilidade da geomembrana de HDPE é alta e supera o tempo de vida útil da estrutura na qual é aplicada.

Os desvios padrão (SD) mais altos apresentados na interface GG-CDC foram maiores para as variáveis tensão normal (σ_n) e gramatura (M_A), conforme mostra a Tabela 4.6. Os intervalos observados para essas variáveis foram 125 kPa e 500 g/m², respectivamente, quando os dados foram tratados conjuntamente. Salienta-se que esse intervalo mostra a diferença existente entre os valores máximos e mínimos registrados para essas variáveis, sendo elas altamente influenciadas pelas definições do pesquisador. Para ensaios CDC, o intervalo de 125,00 kPa (diferença entre os valores máximo e mínimo do banco de dados) se mostra coerente, tendo

em vista que se trata de um ensaio para simulação de carregamentos maiores (Sánchez, 2018; Chiarello, 2022).

Quanto ao intervalo observado para a variável gramatura (M_A), ou seja, 500 g/m², também se mostrou próximo aos valores estudados por Askari et al. (2012) que concluiu que gramaturas alocadas entre 460 e 715 g/m² apresentam a maior e a menor tendência ao puncionamento, respectivamente.

O desvio padrão observado pelo modelo elaborado por Shahnammia et al. (2023), ao estudarem a aplicação de camadas geotêxteis para absorver petróleo bruto e melhorar as propriedades geotécnicas do solo contaminado por meio de ensaios de cisalhamento direto usando geotêxtil com gramatura de 360 g/m², ficou alocado próximo de 0,78, valor muito abaixo do encontrado nesta pesquisa (240,60), conforme pode ser visto na Tabela 4.6. Isso pode ter ocorrido devido aos pontos isolados de gramaturas mais altas analisadas por Sousa et al. (2016) e Sanchez (2018), e também pelo fato de Shahnammia et al. (2023) apresentarem uma linearização dos dados estudados, e não uma avaliação descritiva da estatística dos dados utilizados por eles.

Assim como ocorreu nas demais interfaces, na interface GG-CDC foi observada uma tendência de diminuição dos SD quando os dados foram tratados separadamente considerando o tipo de material. Nessa interface GG-CDC, foram observadas diminuições do SD para o tipo de material LDPE, mas isso pode ter ocorrido pelo fato de o banco possuir uma menor quantidade de dados para esse tipo de material. Valores de SD na ordem de 0,87 a 1,53 foram observados por Melo (2016) ao estudar interfaces de geotêxtil não tecido em contato com composição de RCD-R (areia reciclada sem argila) e material cerâmico. Sendo assim, todas as variáveis apresentaram-se dentro desse intervalo, com exceção da gramatura (M_A), conforme pode ser visto nas Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8. Isso ocorreu devido aos valores mais altos de gramatura estudados por Sousa et al. (2016), presente no banco de dados estudado. Isso indica que os materiais usados nas pesquisas observadas estão nessa faixa.

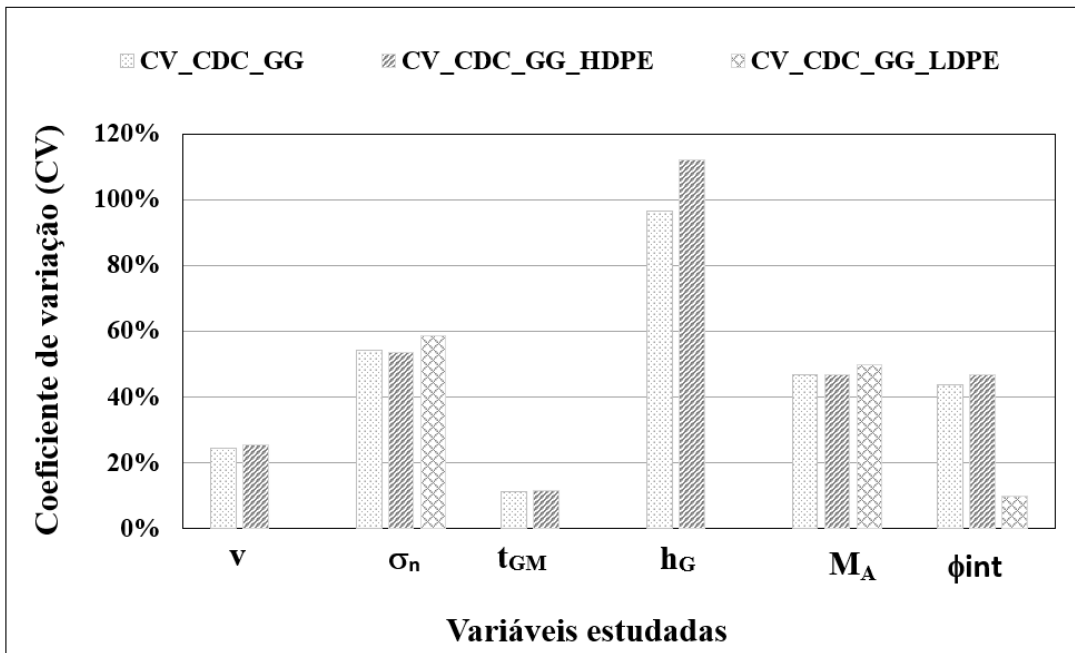
Em relação à assimetria dos dados da interface GG-CDC foi possível concluir que a tendência foram os dados irem se tornando cada vez mais assimétricos à direita, à medida que os mesmos foram sendo tratados separadamente. Na Tabela 4.6, por exemplo, é possível

encontrar 3 variáveis com comportamento assimétrico à esquerda, a saber, tensão normal (σ_n), espessura da geomembrana (t_{GM}) e ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}). Isso indica que os dados dessas variáveis tendem a estar concentrados abaixo das medidas de tendência. Para tais variáveis, notou-se que cerca de 51%, 22% e 48% apresentaram valores abaixo das médias apresentadas na Tabela 4.6, respectivamente. Já na Tabela 4.7 apenas as variáveis espessura da geomembrana (t_{GM}) e ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) permaneceram assimétricas à esquerda, e esse comportamento não foi observado para os dados tratados separados para as geomembranas LDPE, possivelmente por ser um banco de dados menor.

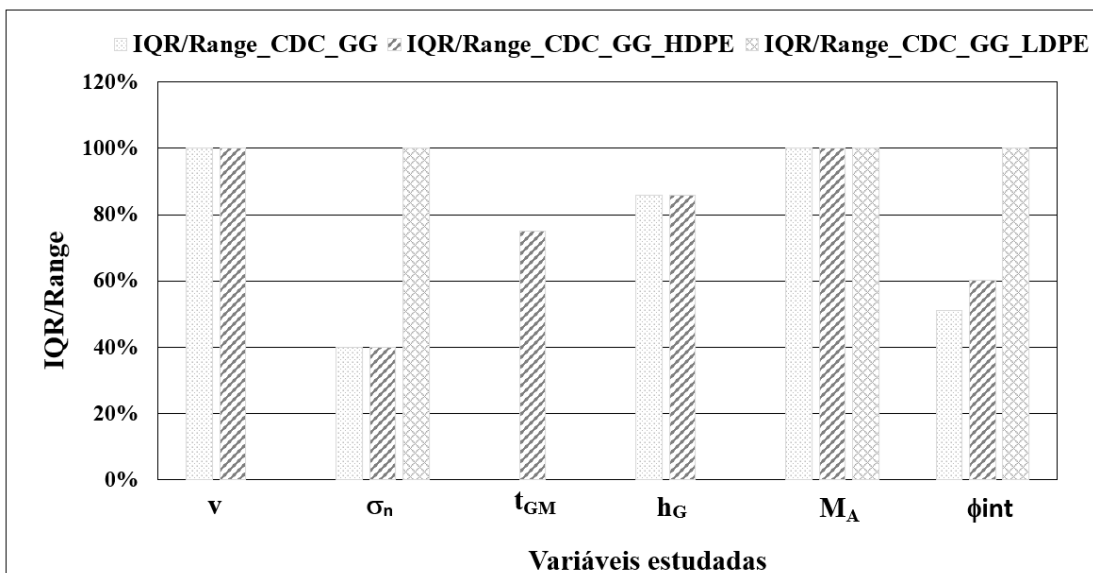
Para a interface GG-CDC foi possível notar um comportamento que não foi observado na SG-CDC, ou seja, a existência de valores de IQR iguais a 0. Nesse caso, foram observados 7 valores nulos, demonstrando que os dados que compõem o banco de dados avaliado variaram pouco. Porém, é importante fazer um adendo referente a essa conclusão, uma vez que do ponto de vista estatístico, seria interessante avaliar uma quantidade maior de dados, a fim de averiguar se tal comportamento permanecerá. O valor da IQR nulo indica que não existe diferença interquartilica no intervalo avaliado (Medri, 2011), demonstrando assim certa constância nos dados.

Com base nos coeficientes de curtose apresentados na Tabela 4.6 foi possível observar que todas as variáveis apresentaram uma distribuição leptocúrtica, tendo em vista que os coeficientes de curtose estão negativos. Isso indica que a interface GG-CDC apresentou dados com dispersão menores na maioria das variáveis. Distribuições leptocúrticas indicam que o desvio-padrão das variáveis foi menor nessa interface. Os resultados de Sánchez (2018) mostraram que a assimetria e curtose obtidos para todas as interfaces estudadas apresentaram distribuição de probabilidade não achatada (leptocúrtica) para abaixo da linha média, demonstrando coerência com o resultado obtido nesta pesquisa.

Os resultados gráficos das análises apresentadas nas Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8 podem ser vistos na Figura 4.7. Salienta-se que o gráfico relacionado a porcentagem de outliers não precisou ser plotado tendo em vista a não existência de dados com esse comportamento.



(a)



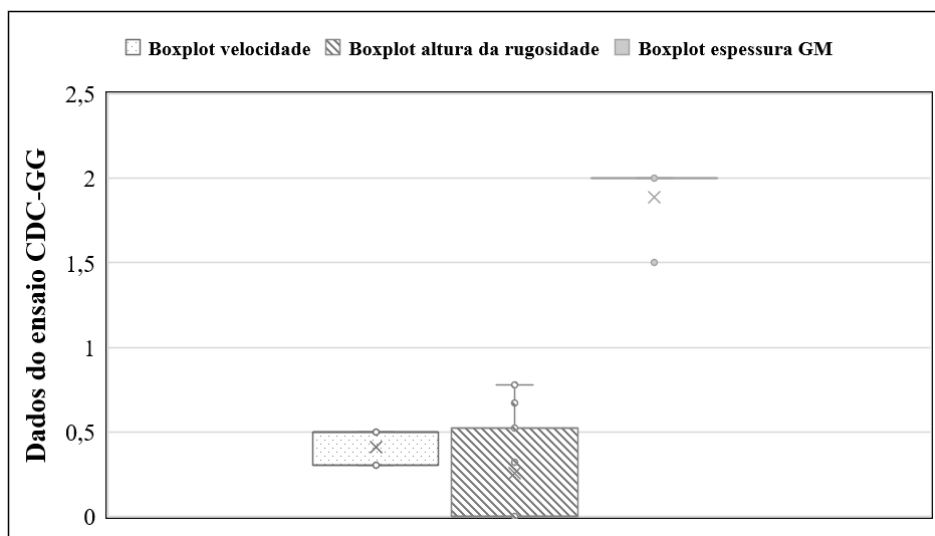
(b)

Figura 4.6 – Avaliação estatística dos dados da interface GG-CDC, considerando os dados tratados conjuntamente e separadamente – (a) Coeficiente de variação (CV) e (b) Normalização do IQR pelo Range.

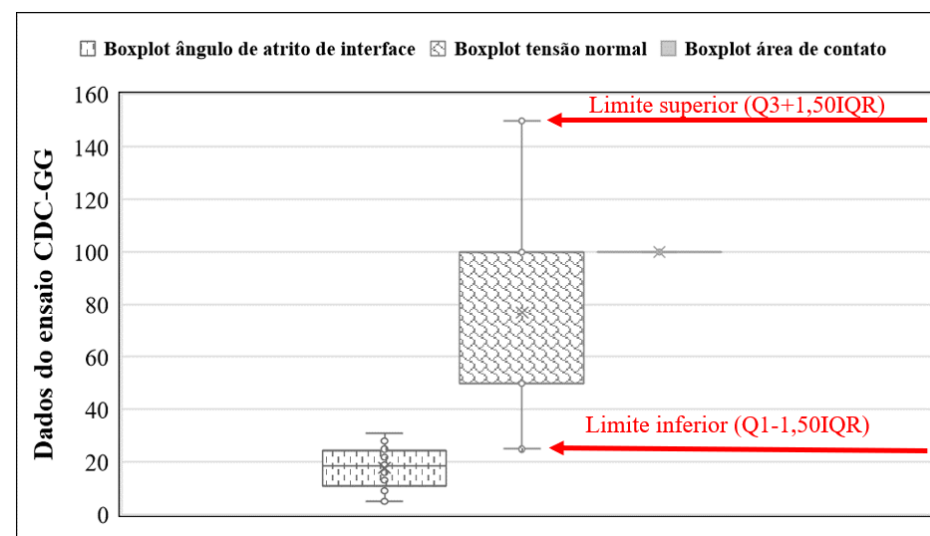
Na Figura 4.6 é possível observar que não existem barras representando a variável área de contato (A_c). Isso ocorreu porque em todos os trabalhos inseridos no banco de dados estudado, a área de contato foi de 100 cm², diferentemente da interface SG-CDC que

apresentou variação de 36 a 100 cm² nesse quesito de área de contato, indicando a possível necessidade de mais ensaios envolvendo tais materiais em amostras maiores.

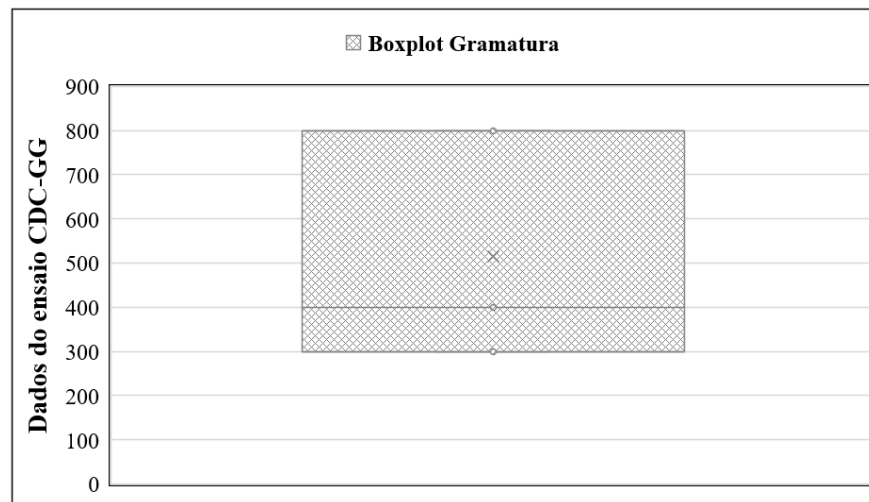
É importante salientar que a interface CDC-GG não apresentou *outliers* nos dados estudados nesta pesquisa. Em relação a isso, a Figura 4.7 evidencia a não existência de *outliers* para os dados da interface CDC-GG. Ressalta-se que as variáveis área de contato (A_c) e espessura da geomembrana (t_{GM}) apresentaram IQR igual a zero e, portanto, o comportamento gráfico apresentado na Figura 4.7 é esperado, tendo em vista que não existem, nesses casos, limites superior e inferior, já que os mesmos dependem da IQR.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7 – Gráfico Boxplot para avaliação de dados outliers na interface CDC-GG (a): velocidade do ensaio, altura da rugosidade e espessura da geomembrana (b) – tensões (kPa), ângulos de atrito de interface ($^{\circ}$) e Área de contato (cm^2) e (c) Gramatura.

Terminadas as análises apresentadas pela estatística descritiva da interface GG-CDC expostas acima, para o estudo das correlações entre as variáveis avaliadas na interface GG-CDC foi elaborada a Matriz de Pearson (Figura 4.8). Além disso, a Tabela 4.9 mostra a classificação da correlação obtida pela Matriz de Pearson de acordo com Pant & Ramana (2021). É importante lembrar que quanto mais próximo de 1, mais forte é a correlação linear entre as variáveis.

Percebeu-se, de antemão, que para a interface GG-CDC as correlações apresentadas pela Matriz de Pearson foram maiores, e isso pode ser justificado pelo fato de que os dados estudados na interface CDC-GG não apresentaram pontos de *outliers*. Porém, para saber se de fato essa tendência é correta, é importante expandir um pouco mais o banco de dados em pesquisas futuras.

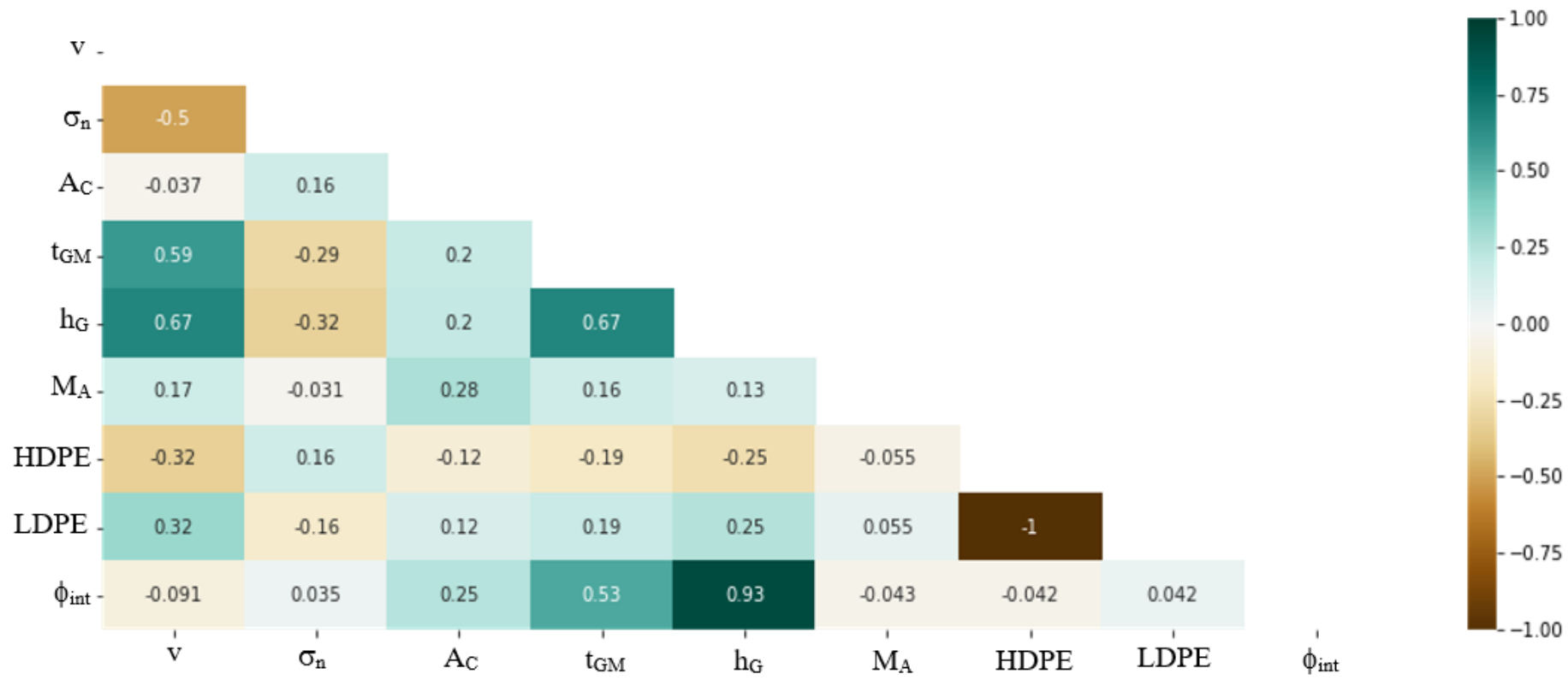


Figura 4.8 – Matriz de correlação de Pearson para a interface GG-CDC.

Tabela 4.9 – Classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces GG-CDC.

Variável	Valor da correlação	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
h_G	+0,93	Forte
t_{GM}	+0,53	Forte
A_c	+0,25	Moderada
LDPE	+0,042	Muito fraca
σ_n	+0,035	Muito fraca
HDPE	-0,042	Muito fraca
M_A	-0,043	Muito fraca
v	-0,091	Muito fraca

Diferentemente da interface SG-CDC, não foram observadas correlações fracas na interface GG-CDC. Em contrapartida, essa interface apresentou uma quantidade maior de variáveis com correlações forte e muito fracas, conforme pode ser visto na Tabela 4.9.

Com base na Figura 4.8 e Tabela 4.9, observou-se que a alta influência da altura da rugosidade também foi constatada nas interfaces GG-CDC, sendo a correlação de h_G apresentada pela interface GG-CDC mais do que o dobro da evidenciada pela interface SG-CDC, ou seja, 0,93. Esse fato pode estar ligado ao efeito gancho e laço (*hook and loop*), reportado por Hebel et al. (2005), os quais concluíram que as interações de gancho e laço em sistemas geomembrana-geotêxtil são fortemente dependentes das características das texturas apresentadas pelas geomembranas.

Os estudos de Feng et al. (2022) também mostraram que o intertravamento entre asperezas e filamentos do geotêxtil (efeito gancho e laço) têm uma influência significativa no comportamento de cisalhamento da interface. Salienta-se que a influência positiva da altura da rugosidade da geomembrana na resistência de interface também foi reportada por outros autores (Sánchez, 2018; Adeleke et al., 2021; Tanga, 2022; Kahan & Latha, 2023; Xu et al., 2023), demonstrando consenso com o resultado apresentado nesta pesquisa.

A segunda correlação mais alta apresentada na interface GG-CDC ocorreu entre a espessura da geomembrana (t_{GM}) e o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), conforme mostra a Tabela 4.9.

Porém, a influência positiva da espessura da geomembrana na resistência de interface não foi evidenciada por Lima Júnior (2000), conclusão contrária à obtida nesta pesquisa e isso, novamente, pode estar relacionado ao fato de a matriz de Pearson levar em consideração apenas a relação linear entre duas variáveis.

Por sua vez, a Área de Contato (A_c) apresentou uma correlação moderada para a interface GG-CDC. Izgin & Wasti (1998) e Sánchez (2018) também evidenciaram influência da área de contato na resistência de interface, afirmando que para todas as interfaces analisadas em seus estudos foi possível concluir que o aumento da área de contato influenciou significativamente na resposta cisalhante das interfaces. Em contrapartida, ainda em relação à área de contato, os resultados de Aguiar (2008) mostraram que independente da interface, a diminuição da área de contato pouco altera o valor do ângulo de atrito de interface. Tanga (2022) também observou por meio de sua pesquisa aplicando o modelo de florestas aleatórias (Random Forest) que dentro da análise do nível de importância das variáveis que mais influenciam a resistência de interface, que a A_c se comportou num nível de baixa importância, juntamente com a espessura (t_{GM}) da geomembrana.

É importante salientar que o tipo de material de fabricação das geomembranas também foi correlacionado com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), sendo observado que as correlações apresentaram valores iguais, porém em sentido contrário, ou seja, as geomembranas de LDPE apresentaram correlação positiva e as de HDPE negativa. Como as correlações foram muito fracas conclui-se que a diferenciação do material na interface GG-CDC pouco influenciou o ângulo de atrito de interface nesta pesquisa. Salienta-se, porém, que a quantidade de dados de geomembranas do tipo LDPE se mostrou muito menor do que o de HDPE. A respeito da rigidez do material de fabricação da geomembrana, Mello (2001) concluiu que valores diferentes de rigidez à tração das geomembranas tendem a gerar níveis diferentes de deslocamentos da interface. Além disso, Gómez (2015) concluiu que as geomembranas de HDPE possuem maior rigidez, e então era esperado que o material fizesse diferença nas correlações obtidas, e isso possivelmente não ocorreu devido ao fato de o banco de dados geomembranas do tipo LDPE ser menor.

Para a variável tensão (σ_n) foi observada a existência de uma correlação muito fraca (+0,035) quando relacionada com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}). Alguns autores reportaram que

em casos de ensaios de resistência ao cisalhamento que são realizados com altas tensões, as rugosidades das geomembranas podem ser esmagadas pelos filamentos dos geotêxteis (Manheim et al., 2015; Namjoo et al., 2020; Xu et al., 2023). Os autores observaram também que o aumento da rugosidade resultou no aumento da resistência ao cisalhamento, enquanto o mecanismo específico de deformação das características das rugosidades das geomembranas causou a diminuição da resistência ao cisalhamento (Manheim et al., 2015).

Em relação à variável gramatura (M_A), observou-se que a correlação obtida em relação à variável ϕ_{int} foi muito fraca e negativa (-0,043). Hebel et al. (2005) concluíram que para geotêxteis com gramaturas maiores, os ângulos de atrito de interface foram mais altos, mas a gramatura por si só não garante esse aumento, tendo em vista que ela é diretamente ligada à altura da rugosidade da geomembrana. Os estudos de Abdelaal & Solanki (2022) mostraram que o ângulo de atrito de interface entre geomembranas HDPE e geotêxteis não tecido aumenta com a diminuição da massa por unidade de área (gramatura) do geotêxtil.

Para a variável taxa de deslocamento (v) na interface GG-CDC, observou-se a existência de uma correlação muito fraca e negativa (-0,091) com ϕ_{int} . Stoltz et al. (2020) realizaram um estudo sobre a determinação do ângulo de atrito entre a geomembrana e o geotêxtil com foco em avaliar o efeito da taxa de cisalhamento. Nesse estudo foram considerados quatro tipos de geomembranas, dentre elas de HDPE, PP e PVC, e foi utilizado um único geotêxtil não tecido. Os resultados mostraram que para determinar de forma confiável o ângulo de atrito estático das interfaces entre geossintéticos, nesse caso geotêxtil/geomembranas, principalmente aquelas compostas por polipropileno, o ensaio deve ser feito em velocidades de deslizamento muito baixas, cerca de 0,001mm/min. Para as demais geomembranas, os autores concluíram ser necessário realizar mais estudos a respeito da taxa de deslocamento durante o processo de cisalhamento.

Para a interface GG-CDC é importante ressaltar, conforme afirma Bacas et al. (2011) e Anubhav & Wu (2015), que as envoltórias de ruptura de interfaces GG e, portanto, os fatores que influenciam às mesmas, podem apresentar um comportamento não linear. Dessa forma, as correlações muito fracas apresentadas na Tabela 4.9 podem estar evidenciando tal fato. Para a interface GG-CDC, cerca de 40% das variáveis analisadas apresentaram correlação relevante, ou seja, de forte a moderada. Porém, as demais demonstraram correlação muito fraca. Para as

variáveis com correlações muito fracas e negativas, pode estar ocorrendo uma correlação que não seja linear, a qual deverá ser averiguada em estudos futuros. Conforme mostram Liu et al. (2023), que estudaram a interação entre uma geomembrana lisa e um geotêxtil com gramatura de 800 g/m², a tensão de pico exibiu um comportamento bilinear claro no intervalo de 50 a 2308 kPa, tanto em condições secas quanto submersas.

4.2. ENSAIOS DE PLANO INCLINADO (PI)

4.2.1. Interface Areia-Geomembrana – SG-PI

A Figura 4.9 mostra os histogramas de distribuição dos dados estudados na interface SG-PI separados por variáveis.

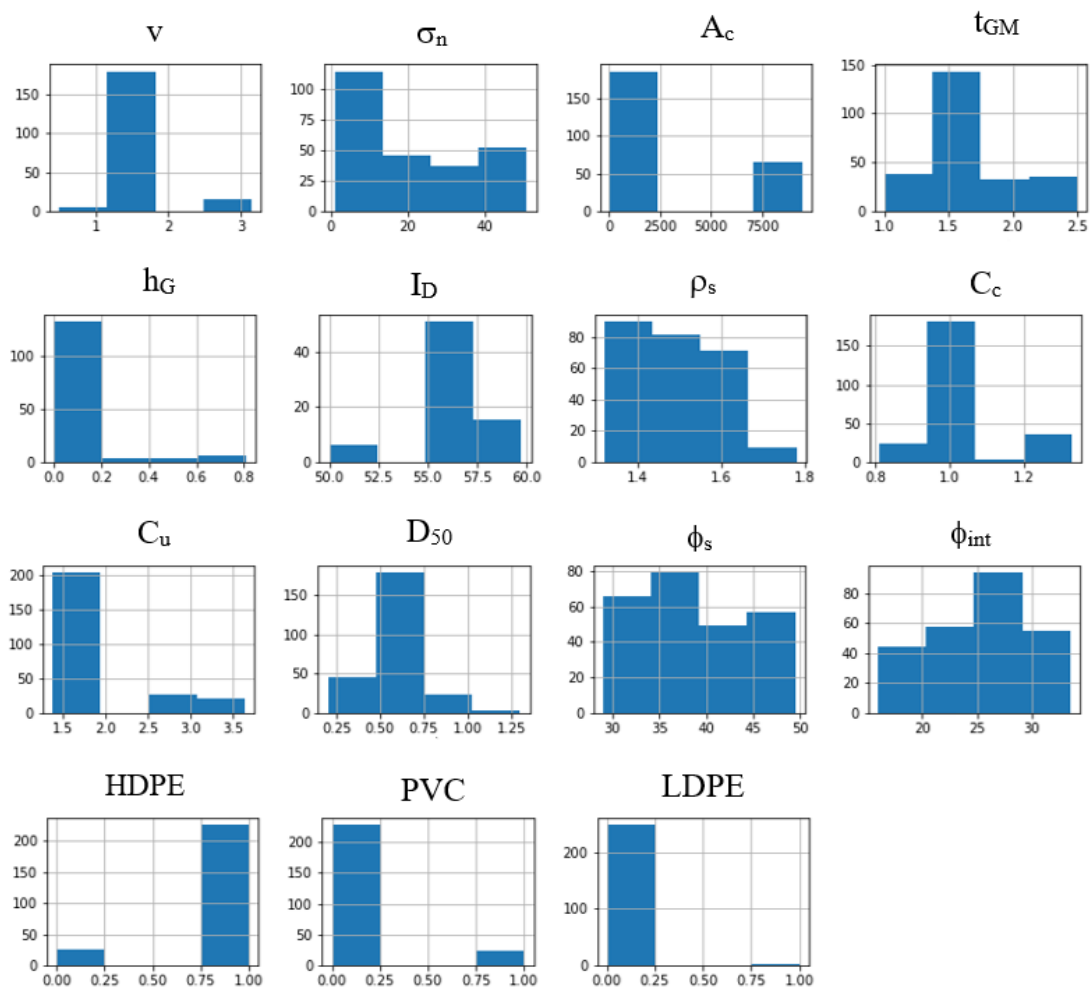


Figura 4.9 – Histograma de distribuição do banco de dados para o ensaio SG-PI.

Para a taxa de inclinação da rampa (v), a Figura 4.9 mostra a predominância de uma classe locada na amplitude de 1 a 2°/min, sendo essa taxa um pouco abaixo da indicada pela norma

12957-2 (ABNT, 2013), que indica uma taxa de inclinação de 2,50 a 3,50° por minuto para a realização de ensaios PI. Porém, tal variável às vezes pode ser uma definição própria dos pesquisadores, o qual pode estar interessado em comparar valores mais baixos de taxa de inclinação. Sendo assim, não se pode atribuir puramente que os dados dessa variável estão em desacordo com a norma. A taxa de inclinação utilizada por Igzin (1997), por exemplo, está abaixo da recomendada pela NBR 12957-2 (ABNT, 2013), porém esse fato é justificável por se tratar de um estudo realizado na Turquia, reforçando assim a tese de que essa variável poderá ser influenciada pelos objetivos de cada pesquisa e também pelas normativas de cada país.

Em relação à variável tensão normal (σ_n), boa parte dos dados estão locados numa classe com tensões mais baixas (0 a 15 kPa), conforme era esperado, tendo em vista que algumas literaturas explicam que os ensaios PI, por simularem quase fielmente a situação de campo, tendem a ser realizados com tensões mais baixas (Lalarakotoson et al., 1999; Sánchez, 2018; Pavanello et al., 2022). Além disso, salienta-se que as tensões maiores estão alocadas nos ensaios de plano inclinado com áreas menores.

Pela análise da Figura 4.9, foram observadas duas classes de dados para a variável área de contato (A_c). Essas classes estão locadas nas amplitudes de 0 a 2.500 e 7.500 a 9.000 cm², valores muito superiores aos apresentados nos ensaios CDC, como era esperado, tendo em vista que os ensaios de plano inclinado, por simularem de forma mais realística as condições de campo, tendem a apresentar áreas de contato maiores (Sanchez, 2018). Além disso, é importante ressaltar que a NBR 12957-2 (ABNT, 2013) recomenda que os ensaios PI sejam realizados em equipamentos com dimensões mínimas de 300x300 mm. Percebeu-se que cerca de 60% dos dados apresentaram A_c abaixo da recomendada pela norma citada anteriormente, porém a variável A_c pode ser determinada pelo pesquisador que está buscando confrontar em sua pesquisa ensaios com áreas menores.

Analisando as propriedades geométricas das geomembranas por meio dos histogramas apresentados na Figura 4.9, observou-se a existência de 04 classes para as variáveis espessura da geomembrana (t_{GM}) e altura da rugosidade da geomembrana (h_{GM}). As classes predominantes estão alocadas nas amplitudes de próximas de 1,30 a 1,70mm e 0 a 0,20 mm, respectivamente, sendo 0 o valor representativo da altura de rugosidade para geomembranas

lisas. É importante ressaltar que existem classes com frequências menores para h_{GM} , e essas amplitudes estão variando de 0,20 a 0,80 mm. Considerando a GM 13 (GRI, 2021), as espessuras estão respeitando as indicações mínimas, frente às alturas de rugosidades menores do que as mínimas recomendadas (16 mils, ou seja, 0,40 mm).

Para as propriedades de caracterização do solo, a saber, índice de densidade (I_D) e coeficiente de não uniformidade (C_u), os histogramas mostraram a existência de 03 classes para essas variáveis. A amplitude com maior frequência na variável I_D foi observada entre 55 e 57,50%, valores comuns utilizados pela literatura (Lima Júnior, 2000; Mello, 2001; Viana, 2007; Sánchez, 2018), frente a uma amplitude predominante de 1,50 a 2,0 na variável C_u , que indica que os solos do banco de dados apresentam uma característica de solos mais uniformes (Sousa Pinto, 2006).

Por outro lado, a massa específica do solo (ρ_s), o coeficiente de curvatura (C_c), o diâmetro médio dos grãos (D_{50}) e ângulo de atrito do solo (ϕ_s), conforme pode ser visto na Figura 4.9, apresentaram 04 classes nos histogramas. Para a variável (ρ_s), foram observadas que três classes localizadas nas amplitudes que variaram de 1,20 a 1,60 g/cm³ apresentaram frequências de dados muito próximas. O mesmo ocorreu para a variável ϕ_s , tendo em vista a presença de somente uma classe com frequências de dados maior, numa amplitude de 35 a 40°. Por fim, as variáveis C_c e D_{50} apresentaram intervalos nas faixas de 0,90 a 1,10 e 0,50 a 0,75 mm, respectivamente.

Em relação ao ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), a classe de dados predominante foi observada na amplitude entre 25 e 30°. Porém, outras 3 classes de dados com frequências menores também foram evidenciadas (Figura 4.9). Observou-se que na interface SG-PI a média dos ângulos de atrito para geomembranas texturizadas foi de 31° frente a um ângulo de atrito de interface médio de cerca de 23° para geomembranas lisas. Salienta-se que no banco de dados estudados, cerca de 50% das geomembranas adotadas nas pesquisas são lisas e que esses valores médios estão de acordo com os apresentados pela literatura (Sánchez, 2018; Cazzuffi et al.; 2022; Pavanello et al., 2022).

Quanto aos materiais de fabricação da geomembrana, observou-se que na interface SG-PI foram observadas 02 classes para HDPE e PVC, frente a 01 classe para LDPE. A

predominância de dados nessa interface foi verificada para as geomembranas de HDPE, assim como na interface SG-CDC. Essa predominância de uso de geomembranas de HDPE já foi evidenciada pela literatura (Colmanetti, 2006; Tarnowski & Baldauf, 2006), e o principal motivo ressaltado é a durabilidade das geomembranas fabricadas com esse material dependendo do tipo de obra.

Os resumos dos dados estatísticos podem ser vistos nas Tabela 4.10 a Tabela 4.13. Com o intuito de avaliar estatisticamente a influência do tipo de material da geomembrana nas análises, os dados foram tratados conjuntamente, ou seja, sem a separação por tipo de material da geomembrana. Na sequência, foi considerada a separação dos 03 (três) tipos de materiais empregados na interface SG-PI.

Tabela 4.10 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI com todos os dados analisados conjuntamente.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_PI_SG ⁽⁹⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	°/min	0,50	3,00	2,50	1,72	0,42	0,24	1,65	1,47	6,29	1,65	1,65	0,00
σ _n	kPa	1,00	49,95	48,95	20,05	15,84	0,79	16,65	0,51	-1,11	33,30	5,55	27,75
A _c	cm ²	36,00	9024,00	8988,00	2508,64	3907,91	1,56	36,00	1,07	-0,84	9024,00	36,00	8988,00
t _{GM}	mm	1,00	2,50	1,50	1,63	0,45	0,27	1,50	0,69	-0,20	2,00	1,50	0,50
h _G	mm	0,00	0,78	0,78	0,05	0,17	3,49	0,00	3,48	10,98	0,00	0,00	0,00
I _D	%	50,00	57,00	7,00	56,42	1,95	0,03	57,00	-3,08	7,70	57,00	57,00	0,00
ρ _s	g/cm ³	1,32	1,78	0,46	1,49	0,13	0,08	1,45	0,41	-0,94	1,63	1,40	0,23
C _c	-	0,80	1,33	0,53	1,04	0,14	0,13	1,05	0,95	0,66	1,05	0,97	0,08
C _u	-	1,38	3,64	2,27	1,85	0,62	0,34	1,75	1,58	1,34	1,75	1,38	0,38
D ₅₀	mm	0,20	1,30	1,10	0,55	0,18	0,33	0,52	0,76	3,10	0,60	0,52	0,08
φ _s	°	29,00	49,50	20,50	38,75	5,26	0,14	38,00	0,04	-0,98	42,00	33,00	9,00
φ _{int}	°	16,00	33,00	17,00	25,37	4,41	0,17	25,00	-0,24	-0,74	29,00	23,00	6,00

⁽⁹⁾ Análise estatística realizada com todos os dados de forma reunida, ou seja, sem separar o tipo do material de fabricação da geomembrana.

Tabela 4.11 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI considerando somente o material HDPE.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_PI_SG_HDPE ⁽¹⁰⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	°/min	0,50	3,00	2,50	1,70	0,39	0,23	1,65	1,44	7,94	1,65	1,65	0,00
σ _n	kPa	1,00	49,95	48,95	21,98	15,62	0,71	20,00	0,36	-1,20	33,30	6,00	27,30
A _c	cm ²	36,00	9024,00	8988,00	1755,75	3398,20	1,94	36,00	1,67	0,84	900,00	36,00	864,00
t _{GM}	mm	1,00	2,50	1,50	1,68	0,42	0,25	1,50	0,84	-0,09	2,00	1,50	0,50
h _G	mm	0,00	0,78	0,78	0,05	0,17	3,70	0,00	3,73	12,77	0,00	0,00	0,00
I _D	%	50,00	57,00	7,00	56,09	2,38	0,04	57,00	-2,27	3,29	57,00	57,00	0,00
ρ _s	g/cm ³	1,32	1,78	0,46	1,49	0,13	0,09	1,45	0,42	-1,11	1,66	1,40	0,26
C _c	-	0,80	1,33	0,53	1,02	0,11	0,11	1,00	1,19	2,52	1,05	0,97	0,08
C _u	-	1,38	3,64	2,27	1,80	0,59	0,33	1,75	1,85	2,41	1,75	1,38	0,38
D ₅₀	mm	0,20	1,30	1,10	0,55	0,16	0,28	0,52	1,26	6,96	0,60	0,52	0,08
φ _s	°	29,00	49,50	20,50	39,45	4,98	0,13	38,00	-0,01	-0,96	46,00	36,00	10,00
φ _{int}	°	16,00	33,00	17,00	25,46	4,56	0,18	26,00	-0,32	-0,83	29,00	23,00	6,00

⁽¹⁰⁾ Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (HDPE).

Tabela 4.12 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI considerando somente o material PVC.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_PI_SG_PVC ⁽¹¹⁾	Mediana (Q2)	Assimetria	Curtose	Q3	Q1	IQR
v	°/min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σ_n	kPa	1,00	5,88	4,88	3,37	1,77	0,53	3,50	0,07	-1,41	5,00	1,25	3,75
A _c	cm ²	9024,00	9024,00	0,00	9024,00	0,00	0,00	9024,00	-	-	9024,00	9024,00	0,00
t _{GM}	mm	1,00	2,00	1,00	1,13	0,34	0,30	1,00	2,35	3,86	1,00	1,00	0,00
h _G	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I _D	%	57,00	57,00	0,00	57,00	0,00	0,00	57,00	-	-	57,00	57,00	0,00
ρ_s	g/cm ³	1,48	1,51	0,03	1,50	0,02	0,01	1,51	-0,09	-2,19	1,51	1,48	0,03
C _c	-	1,33	1,33	0,00	1,33	0,00	0,00	1,33	1,10	-2,29	1,33	1,33	0,00
C _{un}	-	1,61	2,70	1,09	2,13	0,56	0,26	1,61	0,09	-2,19	2,70	1,61	1,09
D ₅₀	mm	0,21	0,90	0,69	0,57	0,35	0,61	0,90	-0,09	-2,19	0,90	0,21	0,69
ϕ_s	°	29,00	36,00	7,00	31,83	2,52	0,08	31,00	0,70	-0,62	32,00	29,00	3,00
ϕ_{int}	°	21,80	25,00	3,20	23,69	0,92	0,04	24,00	-0,88	0,51	24,00	23,40	0,60

⁽¹¹⁾ Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Policloreto de Vinila (PVC).

Tabela 4.13 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface SG – PI considerando somente o material LDPE.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_PI_SG_LDPE ⁽¹²⁾	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	°/min	3,00	3,00	0,00	3,00	0,00	0,00	3,00	-	-	3,00	3,00	0,00
σ _n	kPa	2,00	6,00	4,00	6,00	2,00	0,33	4,00	0,00	-	6,00	2,00	4,00
A _c	cm ²	9024,00	9024,00	0,00	9024,00	0,00	0,00	9024,00	-	-	9024,00	9024,00	0,00
t _{GM}	mm	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	2,00	-	-	2,00	2,00	0,00
h _G	mm	0,52	0,52	0,00	0,52	0,00	0,00	0,52	-	-	0,52	0,52	0,00
I _D	%	57,00	57,00	0,00	57,00	0,00	0,00	57,00	-	-	57,00	57,00	0,00
ρ _s	g/cm ³	1,59	1,59	0,00	1,59	0,00	0,00	1,59	-	-	1,59	1,59	0,00
C _c	-	0,80	0,80	0,00	0,80	0,00	0,00	0,80	-2,45	-	0,80	0,80	0,00
C _u	-	3,44	3,44	0,00	3,44	0,00	0,00	3,44	-	-	3,44	3,44	0,00
D ₅₀	mm	0,42	0,42	0,00	0,42	-	-	0,42	-	-	0,42	0,42	0,00
φ _s	°	39,00	39,00	0,00	39,00	0,00	0,00	39,00	-	-	39,00	39,00	0,00
φ _{int}	°	31,00	32,00	1,00	31,33	0,58	0,02	31,00	1,73	-	32,00	31,00	1,00

⁽¹²⁾ Análise estatística realizada com os dados provenientes das interfaces com geomembranas de Polietileno de Baixa Densidade (LDPE).

Confrontando as Tabela 4.10 a Tabela 4.13, observou-se que o Coeficiente de Variação (CV) mais acentuado foi registrado para as variáveis área de contato (A_c) e altura da aspereza da geomembrana (h_G), respectivamente, quando os dados foram avaliados conjuntamente (Tabela 4.10). Para a área de contato do ensaio (A_c), o CV apresentou uma variação alta devido ao intervalo abarcado no banco de dados dessa pesquisa, que variou de 36 a 9024 mm². Para esse caso, com base na norma, pode-se dizer que a área de 36 cm² se mostra como um candidato a *outlier*, tendo em vista que ela se distancia muito da média apresentada no banco de dados, ou seja, cerca de 2.508 cm². Porém, é importante ter cuidado ao analisar as distorções dos dados da variável A_c , tendo em vista que pode ser uma premissa determinada pelos autores. Para a variável A_c , Tanga (2022) observou um coeficiente de variação de 1,97 frente a um CV de 1,56 encontrado nesta pesquisa quando os dados foram tratados conjuntamente (Tabela 4.10).

A altura de aspereza (h_G) apresentou um CV alto porque a altura de rugosidade das geomembranas lisas foi representada pelo número 0, simulando uma situação em que não existe nenhuma rugosidade na superfície e, portanto, essa premissa pode ter contribuído para o valor de CV apresentado.

O CV mais baixo quando os dados foram avaliados conjuntamente (Tabela 4.10) foi registrado para a variável índice de densidade (I_D). Esse fato indica que no banco de dados estudado nesta pesquisa, os solos aplicados na interface SG-PI apresentaram uma tendência de igualdade, apesar de países diferentes. Em termos médios, o índice de densidade que compõe o banco de dados dessa pesquisa foi cerca de 56%. Salienta-se que de acordo com os estudos de Lira et al. (2003), para obras geotécnicas, principalmente barragens de pequeno e médio porte se deseja uma especificação de índice de densidade igual ou maior a 60% para a areia, demonstrando coerência dos valores adotados pela literatura do banco de dados desta pesquisa.

Uma redução do CV ocorreu quando os dados foram tratados de forma separada considerando somente as geomembranas de PVC (Tabela 4.12) na qual é possível observar que todos os CV ficaram abaixo de 1,0. Ressalta-se ainda que para as variáveis velocidade (v) e altura da rugosidade (h_G) não foram apresentados valores estatísticos na Tabela 4.12, tendo em vista que as velocidades não foram reportadas pelos autores e as geomembranas de PVC são todas

lisas para esse tipo material. Além disso, apenas 23 ensaios foram executados dessa forma (cerca de 9% do total de dados estudados na interface SG-PI). Comportamento similar pode ser visto na Tabela 4.13 que apresenta os dados referentes à interface com geomembrana de baixa densidade (LDPE), que são os dados em menor quantidade (03 ensaios).

Ainda respeito dos coeficientes de variação (CV), Phoon (2015) afirma que admitir um único CV para uma determinada propriedade pode não ser realista, pois, tais valores variam em função da acurácia do método de investigação/ensaio. O autor mostrou que o CV pode ser categorizado nas faixas baixo, médio e alto. Além disso, observou que para os parâmetros geotécnicos resistência ao cisalhamento não drenada, ângulo de atrito efetivo e coeficiente de empuxo, os CV's podem chegar a 70, 20 e 90%, respectivamente. Considerando esses intervalos apresentados, observou-se que na interface SG-PI, apenas as variáveis A_c e h_G apresentaram CV acima desses valores. Para o caso da A_c , trata-se de uma variável que depende das definições e interesses do pesquisador e no caso da h_G há à premissa adotada para o processamento dos dados, com $h_G = 0$ para geomembranas lisas.

Em relação ao desvio padrão (SD), os maiores valores observados ocorreram para as variáveis tensão normal (σ_n) e área de contato (A_c) na interface SG-PI, conforme mostra a Tabela 4.10. Pianezzer (2020) afirma que o desvio padrão é uma métrica de dispersão de um conjunto de dados e representa a distância média entre cada valor e a média do conjunto. Quanto mais próximo de zero for o desvio padrão, menor é a dispersão dos dados no conjunto, sugerindo uma maior concentração em torno da média. Salienta-se que para as variáveis σ_n e A_c é comum que tais valores possam ser definidos de acordo com o interesse do pesquisador.

Nesta pesquisa observou-se que praticamente as mesmas variáveis apresentaram desvios padrão altos na também na interface SG-CDC, com exceção do índice de densidade (I_D). Para as variáveis σ_n e A_c , a diferença nos SD era esperada, tendo em vista que os ensaios CDC e PI possuem condições de contorno de aplicação distintas, sendo o primeiro indicado normalmente para tensões maiores e o segundo para tensões menores, bem como ser usados áreas de contato distintas. Na interface SG-PI, o SD foi menor para a variável σ_n e maior para A_c . Isso pode ser explicado pelo fato de o intervalo dos dados da área de contato do ensaio PI ser cerca de 140 vezes maior do que o intervalo da variável A_c nos ensaios CDC. Além disso,

foi observada a presença de áreas de contato menores no banco de dados estudado, como foi o caso do estudo de Igzin (1997), que variou a A_c de 36 a 900 cm².

Conforme os dados foram sendo tratados considerando a separação do tipo de material de fabricação da geomembrana, foi observada uma tendência de queda nos desvios padrão das variáveis tensão normal (σ_n) e área de contato (A_c) na interface SG-PI. Para geomembranas de PVC, por exemplo, observou-se um desvio padrão (SD) na ordem de 1,70 na variável (σ_n), frente a um desvio de 15,84 quando os dados foram tratados conjuntamente. Isso se deve ao fato de que cerca de 89% dos ensaios terem sido realizados com geomembranas HDPE, frente a 9% que usaram geomembranas de PVC, o que pode ter diminuído o desvio-padrão (SD) quando os dados foram tratados separadamente.

Por meio da análise da assimetria, foi possível observar que quando os dados foram tratados sem separar o tipo de material de fabricação da geomembrana (Tabela 4.10), as variáveis velocidade (v), altura da rugosidade (h_G), índice de densidade (I_D) e Coeficiente de não uniformidade (C_u) apresentaram alto grau de assimetria, sendo a velocidade (v), a altura da rugosidade (h_G) e o C_u assimétricos à direita e o índice de densidade (I_D) assimétrico à esquerda. Para as variáveis que apresentaram comportamento assimétrico à direita, pode-se concluir que os valores da distribuição estão concentrados abaixo da média. Em contrapartida, a variável C_u apresentou valores concentrados acima da média.

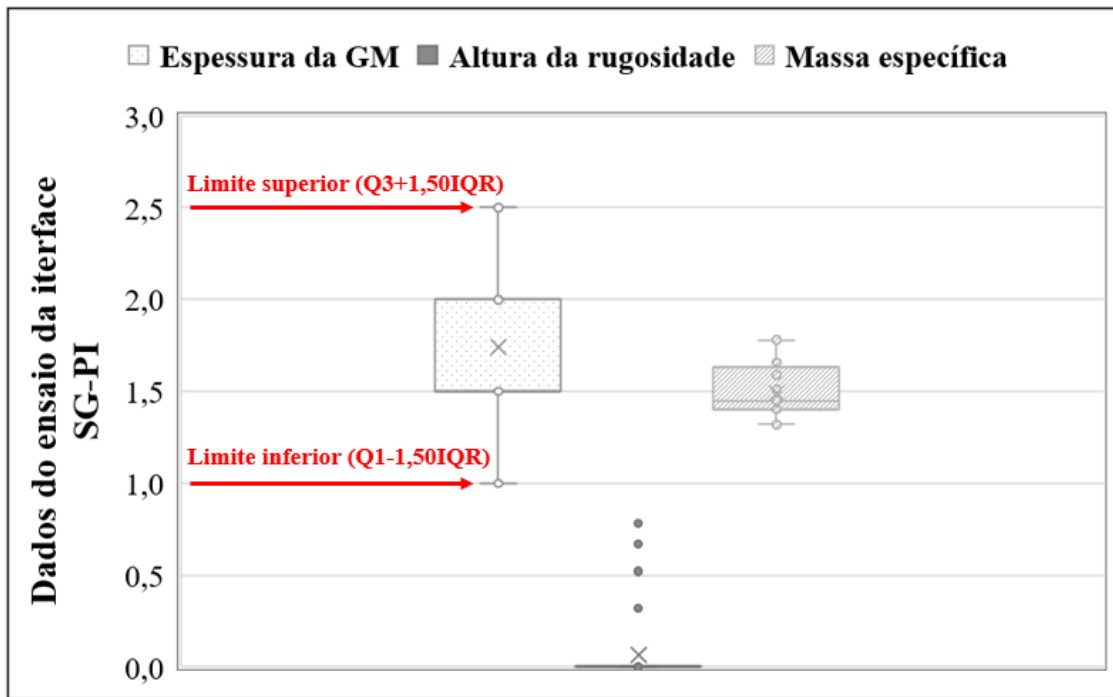
Conforme mencionado anteriormente, a variável altura da rugosidade (h_G) exibiu uma assimetria à esquerda (Tabela 4.10). Em relação aos comportamentos de curtose e assimetria, os estudos de Sánchez (2018) indicam que os resultados obtidos na análise da influência da determinação de parâmetros de rugosidade com métodos 2D e 3D não revelaram uma tendência clara. As variações observadas nas medidas de curtose e assimetria estiveram associadas à maior altura de aspereza. Além disso, as conclusões do autor destacam que todas as superfícies estudadas, independentemente do método utilizado para determinar a altura da aspereza, apresentaram distribuições de probabilidade não achatadas e com um viés abaixo da média.

Os graus de assimetria apresentados pelo banco de dados tratado conjuntamente e separado para as geomembranas de HDPE se mostraram similares, e a maior diferença, em termos absolutos de assimetria, foi encontrada para a variável índice de densidade (I_D), seguida pela

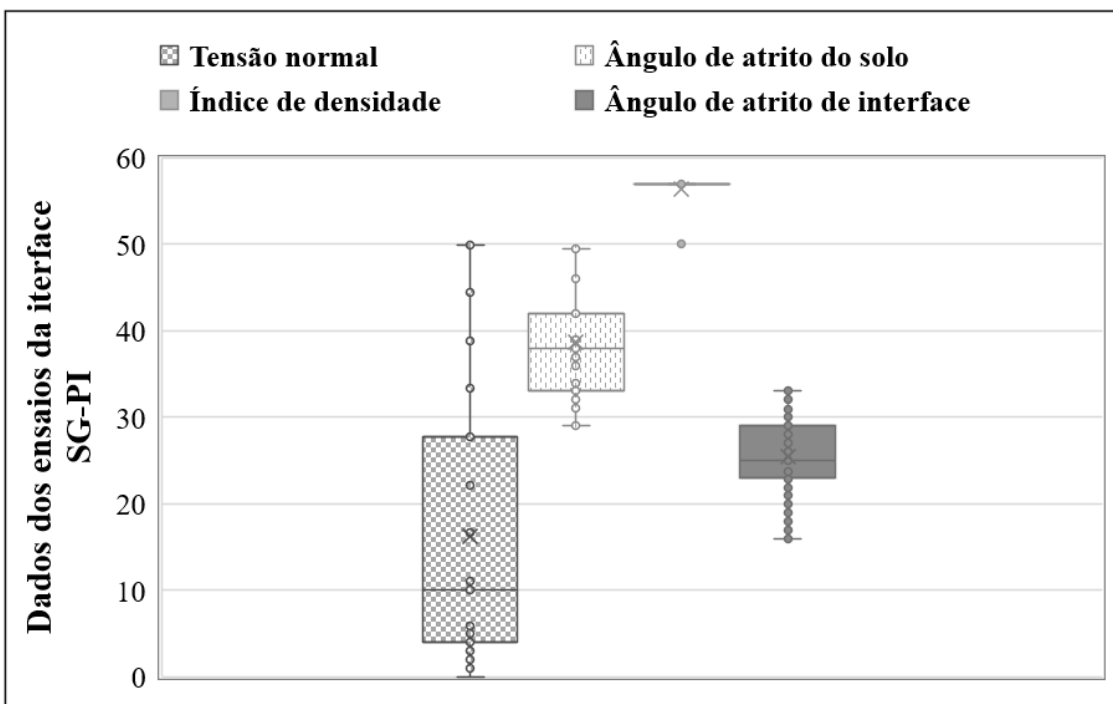
variável área de contato (A_c). Essa similaridade já era esperada, tendo em vista que boa parte dos dados estudados na interface PI-SG é com geomembrana HDPE, possivelmente evidenciando certa predominância de aplicação desse tipo de geomembranas, como já comentado.

Também é importante realizar uma avaliação dos coeficientes de curtose apresentados na Tabela 4.10, a qual demonstra que metade das variáveis apresentam uma distribuição platicúrtica e a outra metade leptocúrtica. No primeiro caso, curtoses platicúrticas indicam que os dados das variáveis tensão normal (σ_n), área de contato (A_c), espessura da geomembrana (t_{GM}), massa específica do solo (ρ_s), ângulo de atrito do solo (ϕ_s) e ângulo de atrito de interface (ϕ_i) estão concentrados abaixo de uma distribuição normal e também são mais dispersos. Em contrapartida, as variáveis taxa de inclinação (v), altura da rugosidade da geomembrana (h_G), índice de densidade (I_D), coeficiente de curvatura (C_c), coeficiente de não uniformidade (C_u) e diâmetro médio dos grãos (D_{50}), mostraram coeficientes de curtose relacionados aos dados concentrados acima de uma distribuição normal e também que os dados são menos dispersos.

Para análise dos dados que se comportaram como *outliers* foi aplicado o conceito apresentado no item 3.1.8 desta dissertação, ou seja, valores *outliers* foram mapeados utilizando as definições de Andriotti (2010) e Pant & Ramana (2021), os quais definem como valores *outliers* àqueles inferiores a ($Q_1 - 1,5IQR$) e superiores a ($Q_3 + 1,5 IQR$). A partir disso, todo valor que se posicionou fora dos limites determinados anteriormente foi considerado um *outlier*.



(a)



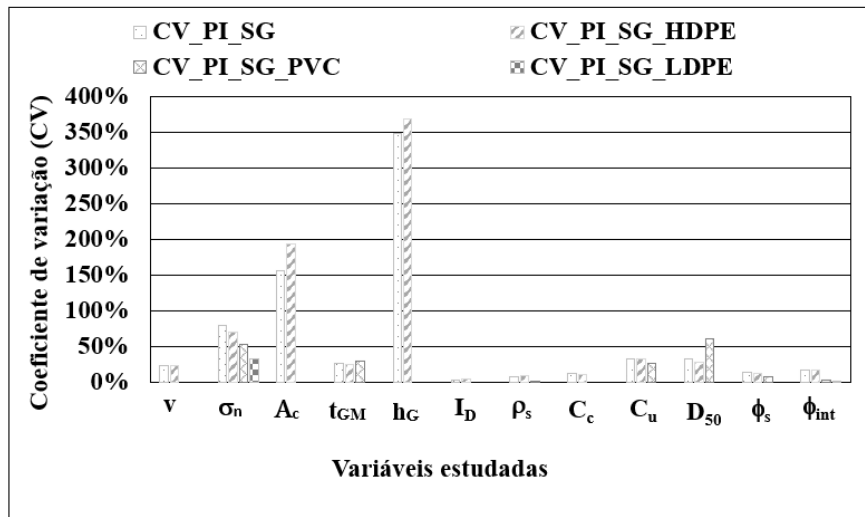
(b)

Figura 4.10 – Gráficos *boxplot* para avaliação de dados *outliers* para a interface SG-PI – (a) variáveis t_{GM} , h_G e ρ_s (b) variáveis σ_n e ϕ_s , I_D e ϕ_{int} .

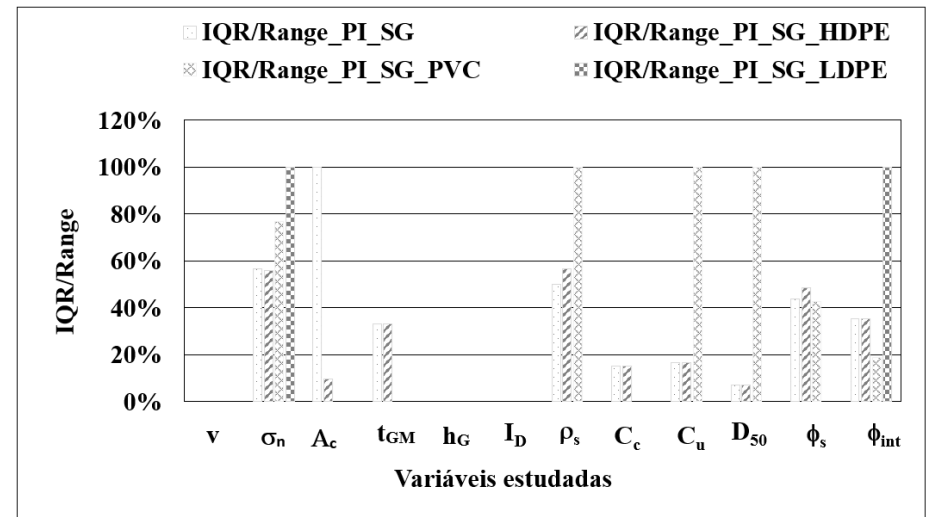
Avaliando a Figura 4.10a, observou-se que a variável altura da rugosidade apresentou um comportamento de *boxplot* diferente das demais. Esse fato ocorreu devido ao valor da IQR,

que resultou em valor nulo, não sendo possível diferenciar os limites superior e inferior. O mesmo ocorreu para a variável índice de densidade (I_D), apresentado na Figura 4.10b. É importante destacar que o valor da IQR nulo indica que não existe diferença interquartílica no intervalo avaliado (Medri, 2011), demonstrando assim certa repetibilidade nos dados. Por fim, para as variáveis t_{GM} , ρ_s , σ_n e ϕ_s observou-se que os dados estão distribuídos dentro dos limites superiores e inferiores.

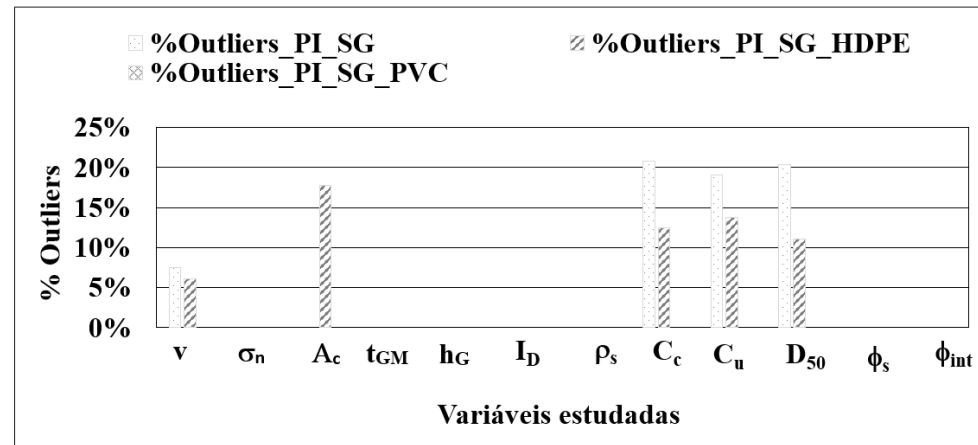
Para complementar a visualização dos tratamentos estatísticos estabelecidos nesta dissertação na Tabela 4.10 a Tabela 4.13 foram elaborados os gráficos relacionados ao Coeficiente de Variação (CV), Amplitude Interquartil normalizada pelo Range (IQR/Range), e as porcentagens de *outliers* (Figura 4.11).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.11 – Avaliação estatística dos dados da interface SG-PI – (a) Coeficientes de variação dos dados tratados conjuntamente e separadamente, (b) Normalização do IQR pelo range para os dados tratados conjuntamente e separadamente (c) Porcentagem de *Outliers* para os dados tratados conjuntamente e separadamente.

Pela análise da Figura 4.11a foi possível notar que quando os dados foram tratados considerando todas as geomembranas de forma conjunta, e separadamente para as geomembranas de PVC, os CV'S se mostraram mais altos, principalmente para as variáveis A_c e h_G . A área de contato pode apresentar variações por se tratar normalmente de uma definição do pesquisador. Por outro lado, a premissa de adotar o valor 0 para geomembranas que são lisas pode ter colaborado para o CV alto nos dados das geomembranas de PVC.

Pela análise da Figura 4.3b foi possível notar que a normalização do IQR pelo Range apresentou valor igual a 1,00 para as variáveis σ_n , A_c , ρ_s , C_u , D_{50} e ϕ_{int} . Essa normalização resultando em 1,0 indica que a amplitude interquartil – IQR (diferença entre o terceiro Q_3 e o primeiro Q_1 quartis) se igualou com o Range (diferença entre o maior e o menor valores de dados da população ou amostra estudada). Para as demais variáveis, desde o tratamento dos dados realizados conjuntamente e separadamente, observou-se que essa normalização permaneceu entre 0,10 a 0,60.

Conforme pode ser visto na c, a variável que apresentou uma maior porcentagem de *outliers* foi a área de contato (A_c), considerando o tratamento dos dados para a geomembrana de HDPE. Para a A_c , observou-se variações de área de 36 a 9024 cm² demonstrando que já era esperado encontrar uma porcentagem de *outliers* mais alta. É importante ressaltar que para a altura da rugosidade, como foi adotado o valor 0 para geomembranas lisas, a variabilidade para essa variável pode ser justificada por esse fato. É importante salientar também que as variáveis que não possuem nenhuma barra na Figura 4.3c são as que não apresentaram nenhum *outlier* no banco de dados analisado. Na Figura 4.3c também foi possível observar que as variáveis σ_n , t_{GM} , h_G , I_D , ρ_s e ϕ_s não apresentaram nenhuma barra indicando porcentagens de *outliers*.

Para avaliar as correlações entre as variáveis observadas para a interface SG-PI, foi elaborada a Matriz de Pearson, que pode ser observada na Figura 4.12. Além disso, a Tabela 4.14 mostra a classificação da correlação obtida para cada variável, conforme definição de Pant & Ramana (2021).

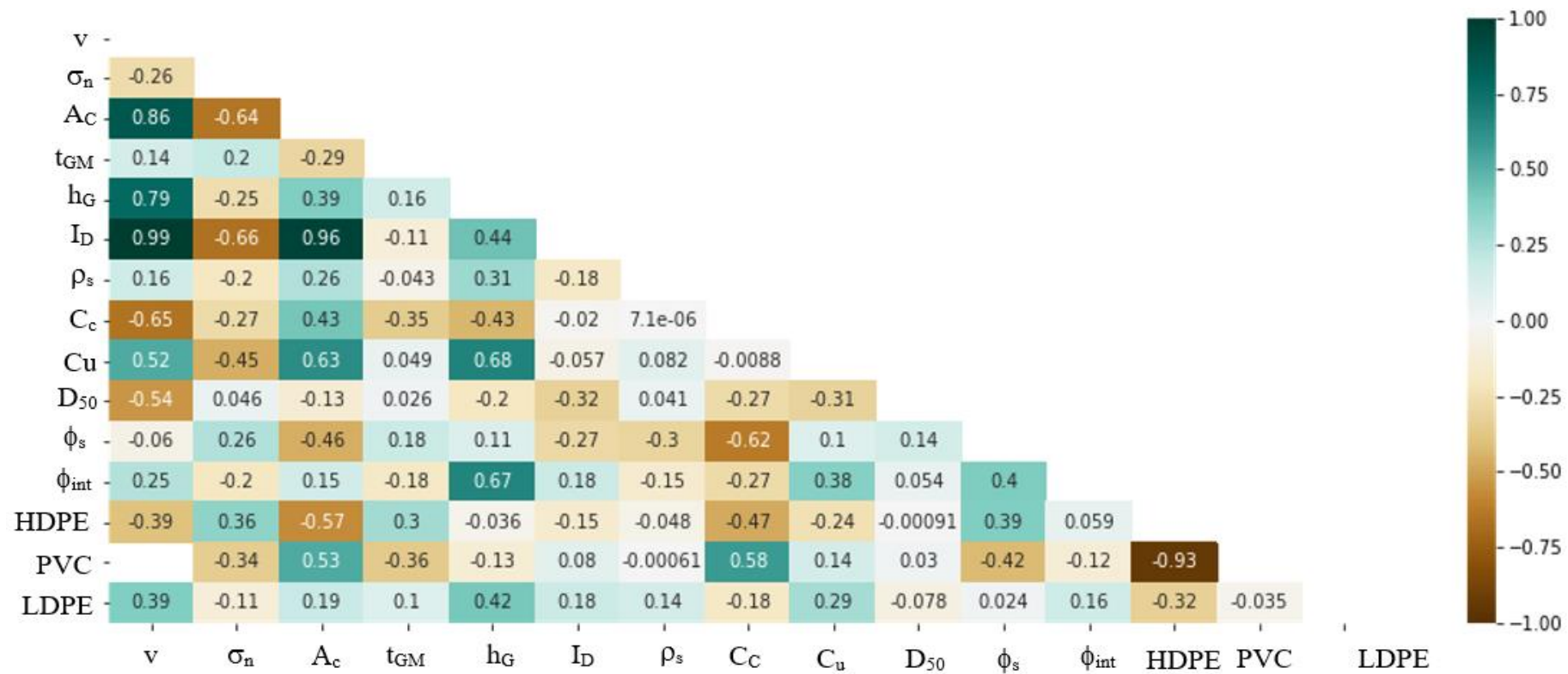


Figura 4.12 – Matriz de correlação de Pearson para a interface SG – PI.

Tabela 4.14 – Resumo da classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces SG-PI em relação ao ângulo de atrito de interface.

Variável	Valor da correlação	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
h_G	+0,67	Forte
ϕ_s	+0,40	Moderada
C_u	+0,38	Moderada
v	+0,25	Moderada
I_D	+0,18	Fraca
LDPE	+0,16	Fraca
A_c	+0,15	Fraca
HDPE	+0,059	Muito fraca
D_{50}	+0,054	Muito fraca
PVC	-0,12	Fraca
ρ_s	-0,15	Fraca
t_{GM}	-0,18	Fraca
σ_n	-0,20	Fraca
C_c	-0,27	Moderada

Analisando a Figura 4.12 e a Tabela 4.14 foi possível notar que os coeficientes de correlação mais altos na interface SG-PI ocorreram para as variáveis altura da rugosidade da geomembrana (h_G) e ângulo de atrito do solo (ϕ_s), com valores de correlação positiva de 0,67 e 0,40, respectivamente. Essas variáveis foram avaliadas por diversos autores, os quais concluíram que a altura da rugosidade da geomembrana, bem como o ângulo de atrito do solo estudado possuem grande influência na resistência de interface (Butterfield & Andrawes, 1972; Igzin, 1997; Vangla et al. 2017; Sánchez, 2018; Pavanello et al., 2020; Araújo et al., 2022; Tanga, 2022; Tanga et al., 2023; Ferreira et al., 2023; Costa Júnior, 2023). Portanto, pode-se concluir que as correlações forte e moderada para as variáveis h_G e ϕ_s já eram esperadas e elas convergem com as conclusões provindas da literatura.

As variáveis coeficiente de não uniformidade (C_u) e taxa de deslocamento da rampa (v) também apresentaram uma correlação moderada positiva, com valores de 0,38 e 0,25,

respectivamente. Ressalta-se que as propriedades morfológicas das areias possuem papel relevante na resistência ao cisalhamento da interface (Uesugi & Kishida, 1986; Vaid & Rinne, 1995; Zettler et al., 2000; Frost et al., 2012; Vangla et al., 2017). Por sua vez, quanto à variável velocidade de inclinação da rampa (v), ressalta-se que quanto mais rápido ocorrer a inclinação do equipamento, menos tempo as partículas do solo terão para se reajustarem e esse fato poderá influenciar nos resultados dos ensaios, como comentado. Para inclinações levemente acentuadas da rampa, apenas uma fração insignificante do comprimento da geomembrana é sujeita a solicitações. Entretanto, à medida que a inclinação da rampa aumenta, ocorre a deformação ao longo de toda a extensão da geomembrana, sendo a distribuição das tensões não uniforme para casos de planos inclinados (Villar et al., 1999; Mello, 2001; Mello & Palmeira, 2003). Por isso, é de suma importância respeitar a recomendação normativa de velocidade de inclinação da rampa (2,50 a 3,50° por minuto), proposto pela NBR 12957-2 (ABNT, 2013).

Ainda em relação à velocidade de inclinação do equipamento, Ramirez & Gourc (2003) afirmaram que para a interfaces com geomembranas de polipropileno, em taxas de inclinação variando de 0,50 a 3,0°/min, não foi possível diagnosticar se existe ou não uma influência da taxa de inclinação do equipamento para realização de ensaios de plano inclinado. Para a interface SG-PI, os valores da variável v também variaram de 0,50 a 3,0°/minuto. Também é importante ressaltar que para ensaios com áreas de contato próximas de 900 cm², a taxa de inclinação do equipamento não demonstrou grande influência nos resultados dos ensaios de resistência de interface (Igzin, 1997). Talvez por isso a correlação obtida nesta pesquisa tenha sido moderada, e não forte (Tabela 4.14).

As variáveis que demonstraram uma correlação positiva muito fraca em relação ao ângulo de atrito de interface foram o índice de densidade (I_D) e a área de contato (A_c). Avaliando o I_D , esse resultado já era esperado, tendo em vista que conforme mostram os estudos de Vangla et al., (2017), a morfologia dos materiais particulados interfere mais na resistência de interface do que a índice de vazios com a qual a interface é ensaiada, e nesse caso o índice de vazios está mais ligado ao I_D do solo.

Sobre a variável A_c , a correlação positiva fraca pode ser justificada com base nas conclusões reportadas por Igzin (1997), de que para áreas de contato maiores do que 900 cm², não foi notada nenhuma influência na taxa de inclinação do equipamento e, por consequência, no

ângulo de atrito de interface. No banco de dados estudados, mais de 50% dos dados apresentaram áreas de contato maiores do que a citada por Igzin (1997). Essas conclusões são contrárias às reportadas por Sánchez (2018), indicando possivelmente que não existe uma relação linear entre a área de contato e o ângulo de atrito de interface para os ensaios PI.

Uma correlação muito fraca (+0,054) positiva foi observada para a variável D_{50} na interface SG-PI. Essa faixa de classificação muito fraca para o D_{50} também foi obtida para a interface SG-PI, porém em sentido negativo (-0,019). Para os dados avaliados nesta pesquisa, os resultados mostraram discordância com a literatura, tendo em vista que foi referido na literatura que as propriedades do solo, bem como do teor de finos e o D_{50} , interferem na resistência de interface (Igzin, 1997; Wang et al. 2009; Phan et al. 2016). Isso pode ter ocorrido pelo fato da Matriz de Pearson apresentar uma correção linear entre as variáveis, sendo que esse comportamento com o D_{50} pode ser não linear.

Abordando um pouco das correlações moderadas negativas observadas nesta pesquisa, tem-se que a maior correlação negativa com o ângulo de atrito de interface foi a apresentada pela variável coeficiente de curvatura (C_c). Essa correlação foi classificada como negativa moderada conforme proposição feita por Pant & Ramana (2021). Em termos interpretativos de correlação, pode-se dizer que quanto maior os valores de C_c , menor poderá ser o ângulo de atrito de interface. Igzin (1997) conclui em seu estudo que o atrito de interface da areia com partículas arredondadas é mais sensível ao grau de rugosidade da geomembrana quando comparada à areia com grãos angulares. Lopes et al. (2001) também concluíram que a dimensão das partículas do solo tem uma influência importante no ângulo de atrito da interface solo-geossintético.

Em relação ao formato do grão na resistência entre interfaces geossintéticas, os estudos de Zhao et al. (2022), indicaram que uma partícula maior é mais suscetível a rodar e se deslocar, o que aumenta o efeito de encravamento entre o geossintético e o solo. A influência do formato do grão também foi estudada por Araújo et al. (2022) que concluíram que para interfaces geossintéticas que utilizam areia na interface, o tamanho do grão, bem como a densidade do material, pode interagir de formas diferentes dependendo da superfície das geomembranas analisadas.

Tanga et al. (2023) demonstraram que o D_{50} não se destacou como uma variável que influencia a resistência de interface solo-geossintético. Dentre as 14 variáveis estudadas pelos autores, foi possível notar que o D_{50} foi classificado como uma das últimas variáveis de influência, resultado que condiz com o observado nesta pesquisa. Salienta-se ainda que conforme determina Spanos (2003), os resultados provenientes das análises feitas via coeficiente de Pearson podem induzir uma interpretação equivocada da correlação, sugerindo a ausência de influência entre as variáveis em estudo. No entanto, a análise também pode ser compreendida como uma indicação de possível não-linearidade nas relações entre os pares de variáveis.

A variável tensão (σ_n) apresentou uma correlação fraca negativa de 0,20, e para os ensaios PI essa correlação negativa já era esperada, pois conforme concluíram Gourc & Reyes-Ramírez (2004), Pitanga et al. (2009) e Sánchez (2018), o ângulo de atrito diminuiu com o aumento da tensão normal nos cenários estudados por esses autores. Essa correlação negativa pode estar ligada ao fato de ocorrer as decomposições de forças quando o equipamento é inclinado, tendo em vista que a tensão normal sobre a interface varia com a inclinação da rampa. Além disso, em geral, assume-se que a distribuição de tensões normais sobre a interface é uniforme, o que não corresponde à realidade (Mello, 2001).

O mecanismo de ruptura também pode estar influenciando nessa correlação negativa, tendo em vista que para os ensaios de maior escala é comum observar uma ruptura por deslizamento, com sulcos levemente profundos nas geomembranas, e isso ocorre devido ao fato de os ensaios PI serem realizados sob baixas tensões (Pavanetto et al., 2022). Os estudos de Carneiro et al. (2023) mostraram que o aumento da tensão vertical resultou em menores ângulos de atrito de interface, mostrando que pode existir uma correlação negativa entre ϕ_{int} e σ_n .

Por fim, uma correlação negativa fraca também foi obtida nesta pesquisa para as variáveis massa específica seca dos sólidos (ρ_s) e espessura da geomembrana (t_{GM}). Para a variável ρ_s não foram encontrados estudos que discutem essa correlação direta da resistência de interface com a massa específica, sendo mais comum os autores explorarem as configurações granulométricas do solo utilizado na interface. Por outro lado, no que diz respeito à espessura da geomembrana, Lima Júnior (2000) conduziu estudos sobre a viabilidade da aplicação do

ensaio de plano inclinado na simulação da resistência de interface em taludes impermeabilizados com geomembranas lisas de 1 e 2 mm de espessura. O autor concluiu que a resposta em relação ao ângulo de atrito foi consistente, resultando em 24° com uma interface de areia fina. Isso leva à conclusão de que, segundo os resultados obtidos, a espessura da geomembrana não exerce uma influência direta sobre a resistência de interface.

Também é importante ressaltar que foram avaliados os materiais de fabricação das geomembranas por meio das variáveis HDPE, PVC e LDPE. Dos três tipos de geomembrana analisados em relação ao comportamento do ângulo de atrito, observou-se que para HDPE e LDPE, a correlação apresentada foi positiva e para PVC negativa (Tabela 4.14).

No banco de dados estudado nesta pesquisa na interface PI, cerca de 90% das geomembranas são de HDPE. Para geomembranas HDPE, o ângulo de atrito de interface tende a ser menor do que para geomembranas PVC, pois os mecanismos de deslizamentos dos grãos são diferentes (O'Rourke et al., 1990). Apesar disso, a correlação para as interfaces com geomembranas HDPE, PVC e LDPE em relação ao ângulo de atrito de interface, foram classificadas como fraca (Tabela 4.14). Salienta-se também que a respeito do comportamento mecânico das geomembranas, Girould et al. (1992) afirmam que as geomembranas de HDPE e PVC têm coeficientes semelhantes de expansão térmica, mas os seus módulos de elasticidade são significativamente diferentes.

4.2.2. Interface Geotêxtil-Geomembrana – GG-PI

Para a interface GG-PI, os dados foram tratados somente de forma conjunta, tendo em vista que para essa interface só foram analisados dados com geomembranas lisas de HDPE. A Figura 4.13 mostra os histogramas de distribuição para essa interface.

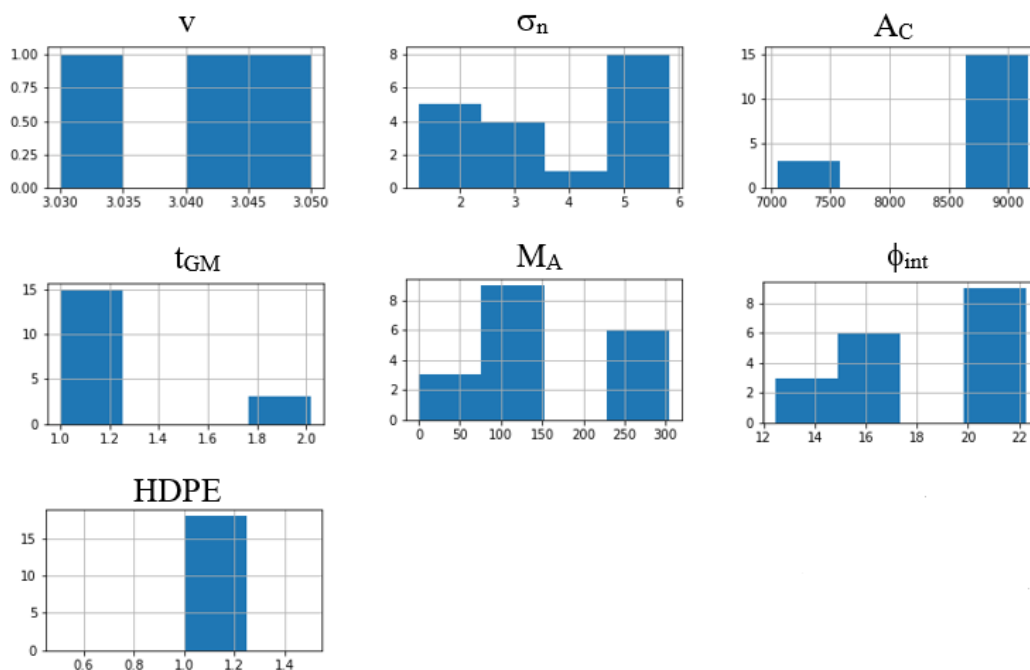


Figura 4.13 – Histograma de distribuição do banco de dados para o ensaio GG-PI.

Analisando a Figura 4.13, foi possível observar a existência de um histograma composto por frequência constante (variável v), tendo em vista que nessa interface todos os ensaios levantados foram realizados com uma velocidade de inclinação da rampa de $3^\circ/\text{min}$, o que está de acordo com a NBR 12957-2 (ABNT, 2013). Já para a para a variável tensão normal (σ_n), como era esperado, as classes observadas estão divididas entre as amplitudes de 1 a cerca de 6 kPa, ou seja, tensões mais baixas do que as observadas na interface GG-CDC. O ensaio de plano inclinado é mais indicado para tensões mais baixas conforme prevê a literatura (Palmeira et al., 2002; Carbone et al., 2015; Sánchez, 2018; Pavanello et al., 2022; Cazzuffi et al., 2022; Ferreira et al., 2023).

Quanto à variável área de contato (A_c), foi observada uma classe na amplitude de 7000 a 7500 cm^2 , que atende ao disposto pela NBR 12957-2 (ABNT, 2013), que exige uma área mínima de 900 cm^2 . Existe também outra classe alocada na amplitude próxima de 9000 cm^2 , que também está de acordo com a norma supracitada. De toda forma, as amplitudes possuem valores muito próximos e áreas menores podem ser definidas pelos autores com o intuito de realizar um estudo comparativo sobre o que a variação de áreas de contato pode causar na resistência de interface (Izgin, 1997; Izgin & Wasti, 1998).

Para a variável espessura da geomembrana (t_{GM}) notou-se a existência de duas classes de dados na Figura 4.13, que estão distribuídas nas amplitudes de 1,0 a 1,20 mm e 1,80 a 2,0 mm. Em ambas as classes, notou-se que as espessuras estão de acordo com as dimensões previstas na GM 13 (GRI, 2021).

Quanto à gramatura (M_A) dos geotêxteis utilizados nesta interface, observou-se pela Figura 4.13 a presença de 03 classes de dados, sendo a principal delas locada na amplitude de 75 a 150 g/m², e a gramatura máxima observada foi de 300 g/m². É importante observar que as gramaturas do banco de dados da interface GG-PI são maiores do que as apresentadas pela interface GG-CDC, que variou de 300 a 800 g/m².

Analisando o histograma do ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}), constatou-se a presença de 3 classes de dados, sendo a classe locada na amplitude de 20 a 22° a mais frequente. Observou-se que para interfaces de geomembranas lisas com geotêxteis, ocorrem ângulos de atrito menores, próximos de 12°. Esse valor está de acordo com os encontrados pela literatura (Carbone et al., 2015; Costa Junior, 2020).

A Tabela 4.15 mostra o resumo dos resultados estatísticos obtidos para a interface GG-PI. Analisando esse resumo, foi possível observar que o máximo coeficiente de variação (CV) foi obtido para a variável gramatura (M_A), com um valor de 40%. Esse resultado era esperado, tendo em vista que o intervalo de variação dessa variável foi de 130 a 300 g/m². A variável tensão normal também apresentou um CV alto, próximo de 50%, sendo o intervalo de tensões analisado de 1,25 a 5,75 kPa.

Quanto aos desvios padrão (SD) apresentados na Tabela 4.15, observou-se que os maiores valores ocorreram para as variáveis área de contato (A_c) e gramatura (M_A). Isso indica que os dados apresentados no banco de dados em questão tendem a estar mais afastados dos valores médios. Além da grande variação que esses dados permitem, esses valores altos de SD podem estar ligados à baixa quantidade de dados encontrados para essa interface sendo indicado, portanto, que em estudos futuros essa interface sendo complementada.

Tabela 4.15 – Resumo dos parâmetros estatísticos da interface GG – PI para geomembranas de HDPE.

Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo	Intervalo	Média	SD	CV_PI_GG	Mediana (Q ₂)	Assimetria	Curtose	Q ₃	Q ₁	IQR
v	°/min	3,00	3,00	0,00	3,00	0,00	0,00	3,00	-	-	3,00	3,00	0,00
σ _n	kPa	1,25	5,75	4,50	3,75	1,82	0,49	3,50	-0,36	-1,45	5,75	1,25	4,50
A _c	cm ²	7000,00	9024,00	2024,00	8686,67	776,17	0,09	9024,00	-1,96	2,04	9024,00	9024,00	0,00
t _{GM}	mm	1,00	2,00	1,00	1,17	0,38	0,33	1,00	1,96	2,04	1,00	1,00	0,00
h _G	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00
M _A	g/m ²	130,00	300,00	170,00	201,20	83,56	0,42	138,00	0,45	-2,09	300,00	138,00	162,00
φ _{int}	°	12,30	22,00	9,70	18,56	3,15	0,17	19,00	-0,57	-0,88	21,00	17,00	4,00

Para a interface GG-PI, os coeficientes de curtose mostrados na Tabela 4.15 indicam que duas variáveis possuem curvas de achatamento do tipo platicúrtica, pois os resultados dos coeficientes foram negativos. Isso indica que as variáveis área de contato (A_c), espessura da geomembrana (t_{GM}) tendem a apresentar um nível de dispersão mais alto. Por outro lado, as variáveis tensão normal (σ_n), gramatura (M_A) e ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) apresentaram uma distribuição do tipo leptocúrtica, ou seja, os dados estão alocados abaixo da curva de achatamento normal, e pode-se dizer que os dados são menos dispersos.

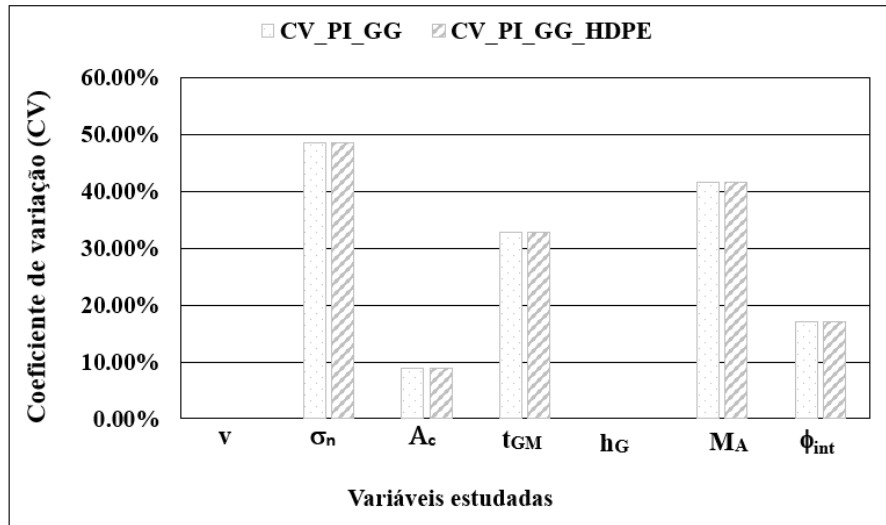
É importante ressaltar que para a interface GG-PI, as variáveis taxa de inclinação (v) e altura da rugosidade não possuem coeficiente de curtose na Tabela 4.15. Para a variável v isso pode ser justificado pelo fato de que todas as velocidades analisadas nessa interface foram de $3^\circ/\text{min}$, ou seja, não ocorreu nenhum intervalo de variação para causar mudança na distribuição da curtose. Para a variável h_G , como todas as geomembranas analisadas na interface GG-PI são lisas, não existem valores estatísticos calculados para essa variável na Tabela 4.15.

Como forma de complementação da análise estatística apresentada na Tabela 4.15, a Figura 4.14a e Figura 4.14b mostram os resultados gráficos dos coeficientes de variação, bem como a normalização da amplitude interquartil (IQR) pelo Range (intervalo) estudado para cada variável. Salienta-se que os gráficos de outliers não foram plotados porque nesse banco de dados não foram observados pontos com esse comportamento.

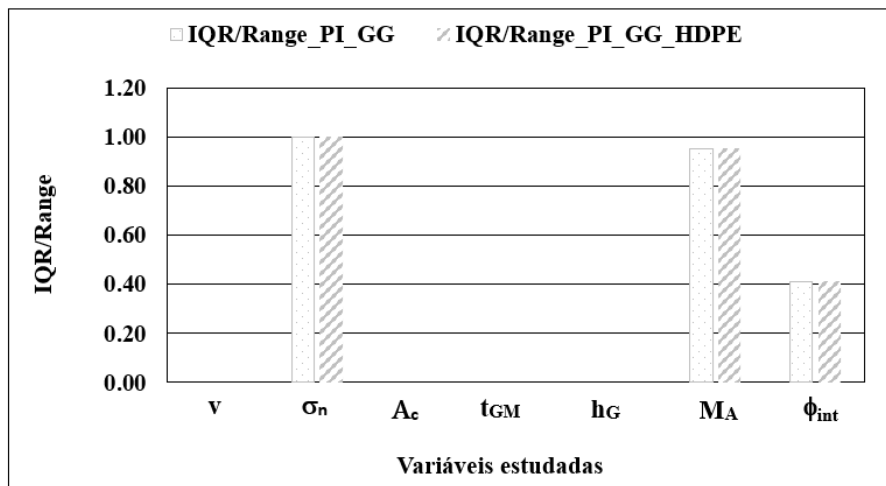
O primeiro ponto importante a ser observado na Figura 4.14 são as ausências de barras para algumas variáveis. Para a Figura 4.14a, as variáveis velocidade (v), e altura da rugosidade (h_G) não apresentaram variação nos dados e por isso as barras não aparecem. Isso pode ter ocorrido por causa do banco de dados para a interface PI-GG abranger uma quantidade menor de dados.

Por outro lado, na Figura 4.14b é possível observar que não existem barras representando as variáveis velocidade (v), área de contato (A_c), espessura da geomembrana (t_{GM}) e altura da rugosidade (h_G). Isso ocorreu devido ao fato de a diferença interquartil para esses dados ser nula. Estatisticamente isso significa que não existe diferença interquartil no intervalo

avaliado sendo possível afirmar que os limites superiores (Q_1) e inferiores (Q_3) são iguais para essas variáveis.



(a)



(b)

Figura 4.14 – Avaliação estatística dos dados da interface GG-PI para geomembranas de HDPE lisas – (a) Coeficiente de variação (CV) e (b) Normalização do IQR pelo Range.

A respeito dos coeficientes de variação apresentados na Figura 4.14a, observou-se que os valores mais altos foram detectados para a variável tensão normal (σ_n), seguida da variável gramatura (M_A), demonstrando dispersões maiores para esses dados, que pode ser explicado pelo fato de ser uma interface com baixo número de dados e à grande variabilidade que esses tipos de dados apresentam. Campello (2020) mostra que intervalos típicos de coeficientes de variação de propriedades geotécnicas, como o ângulo de atrito, podem apresentar um CV de até 50% a depender do tipo de material, bem como o tipo de ensaio utilizado para avaliação

desse parâmetro. Para estudos com interfaces geossintéticas não foram encontrados estudos específicos que mostrem uma classificação o valor do CV. A respeito de coeficiente de variação de uma forma geral, Simon (1995) determina que ao analisar um conjunto de valores experimentais, a distribuição será classificada como pequena, média e grande para dispersões da ordem de 15%, entre 15 e 30%, e acima de 30%, respectivamente. Por isso a importância de expandir um pouco mais o banco de dados da interface GG-PI.

Assim como realizado para outros ensaios, terminadas as análises apresentadas pela estatística descritiva da interface GG-PI, para o estudo das correlações entre as variáveis avaliadas foi elaborada a Matriz de Pearson (Figura 4.15). Além disso, foi elaborada a Tabela 4.16 que mostra a classificação das correlações de acordo com Pant & Ramana (2021).



Figura 4.15 – Matriz de correlação de Pearson para a interface GG-PI.

Tabela 4.16 – Classificação das correlações obtidas nesta pesquisa para as interfaces GG-PI.

Variável	Valor da correlação	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
A_c	+0,76	Forte
M_A	+0,18	Fraca
σ_n	-0,25	Moderada
v	-0,52	Forte
t_{GM}	-0,76	Forte

Conforme explanado anteriormente, para a interface GG-PI foram avaliadas somente geomembranas lisas de HDPE. Apesar disso, optou-se por avaliar as correlações para essa interface com o intuito de observar qual a variável influencia mais o ângulo de atrito de interface quando uma das principais variáveis estudadas até o momento, ou seja, a altura da rugosidade, não se apresenta como variável dominante no banco de dados. Justamente por isso, não será possível observar nenhuma correlação para a variável h_G na Figura 4.15.

Observou-se, para esses cenários de interfaces com geomembranas lisas, que a variável área de contato (A_c) foi a que apresentou o valor de correlação mais alto, na ordem de 0,76, sendo essa uma correlação positiva classificada como forte (Pant & Ramana, 2021). Essa correlação forte pode estar ligada ao efeito velcro, que nas interfaces com geomembranas para tamanhos de amostra maiores, como é o caso do ensaio PI, aumentou levemente com a gramatura do geotêxtil. Por isso, mesmo sendo menor do que em interfaces com geomembranas texturizadas, pode-se dizer que o efeito também foi observado nas interfaces com geomembranas lisas (Sánchez, 2018). De toda forma, como a correlação foi positiva e forte, é muito importante que sejam realizadas mais análises com um banco de dados mais amplo, a fim de entender se tal correlação permanecerá na mesma linha apresentada.

Em relação à variável gramatura (M_A), observou-se uma correlação fraca conforme pode ser visto na Tabela 4.16. Lima Júnior (2000) concluiu que os geotêxteis não tecidos não diferem seu comportamento em função da gramatura, considerando o uso de geomembranas lisas. Esse resultado também se mostra coerente quanto ele é comparado com as conclusões reportadas por Sánchez (2018) que, ao estudar a influência da gramatura do geotêxtil nas interfaces por meio

e ensaios de plano inclinado para dois geotêxteis de polipropileno de gramaturas 300 g/m² e 800 g/m², comprovou que essa variação de gramatura demonstrou apenas 2° de diferença nos ângulos de atrito, valor que pode ser considerado pouco significativo para essa interface.

Os estudos conduzidos por Abdelaal & Solanki (2022) revelaram que as propriedades dos geotêxteis avaliados (gramatura, espessura e o tipo de polímero da fibra) não tiveram qualquer efeito nos ângulos de atrito da interface com geomembranas lisas, que foram avaliadas na interface GG-PI. Por outro lado, para geomembranas texturizadas, eles concluíram que a espessura do geotêxtil, bem como a gramatura, parecem afetar exclusivamente a resistência ao cisalhamento da interface geotêxtil-geomembrana apenas quando ocorre o entrelaçamento no nível da matriz dos geotêxteis. Porém, geomembranas texturizadas não foram avaliadas na interface GG-PI desta pesquisa e, portanto, deverão ser avaliadas em estudos futuros.

Quanto à variável tensão normal (σ_n), observou-se assim como na interface SG-PI, a existência de uma correlação moderada de -0,25. Com base na literatura, sob tensão normal muito baixa, o coeficiente de atrito de interface não é constante. Além disso, é observada uma não-linearidade com tensões muito baixas, nas quais o coeficiente de atrito de interface diminui à medida que a tensão normal aumenta, justificando possivelmente a correlação negativa encontrada entre a tensão normal e o ângulo de atrito de interface.

A respeito da variável taxa de inclinação (v) foi observada uma correlação negativa forte de -0,52. Esse valor pode ser justificado pelo fato de que devido à inexistência de rugosidades, bem como ao mecanismo de decomposição das forças presentes no plano inclinado, quanto mais rápido a rampa for elevada, menos tempo o conjunto do ensaio terá para realizar acomodações em níveis de tensão baixa e, portanto, entende-se que é esperado a diminuição do ângulo de atrito de interface, justificando assim a correlação negativa. Por isso, é de suma importância que a taxa de inclinação prevista na NBR 12957-2 (ABNT, 2013) seja respeitada.

Por fim, em relação à influência da espessura da geomembrana (t_{GM}), que obteve uma correlação forte e negativa (-0,76) com ângulo de atrito de interface nesta pesquisa, Lima Júnior (2000) percebeu em seus estudos que a espessura da geomembrana não influencia a resistência de interface. Essa conclusão pode significar que como os grãos não estão em contato direto com a geomembrana, por ser uma interface entre geotêxtil, não existe a

possibilidade de o grão adentrar no polímero. Os níveis baixos de tensões normalmente aplicados nos ensaios PI também colaboram para que isso não ocorra. As conclusões de Tanga (2022), obtidas por meio de *Random Forest*, também mostraram que na estimativa da importância relativa para cada elemento de influência da resistência entre interfaces geossintéticas, a espessura da geomembrana não se mostrou influente.

Para a interface GG-PI foi observado que será necessário expandir mais o banco de dados analisado considerando outros tipos de geomembranas, bem como de geotêxteis, tendo em vista que os mecanismos de ruptura desse tipo de interface costumam apresentar diversas particularidades, como é o caso das fases de deslizamento abordadas por Pitanga et al. (2009) e da não linearidade reportada por Carbone et al. (2015).

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS

4.3.1. Correlações obtidas para a interface Areia-Geomembrana – Ensaios CDC e PI

Conforme explanado no início desta pesquisa, o banco de dados avaliado foi composto por ensaios CDC e PI, considerando interfaces de geomembranas com areias e geotêxteis. A Tabela 4.17 mostra um resumo comparativo dos resultados das correlações obtidas para as interfaces SG-CDC e SG-PI utilizando a Matriz de Pearson.

Tabela 4.17 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa.

Interface	Variável	Valor da correlação (Matriz de Pearson)	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
SG-CDC	ϕ_s	0,52	Forte
	h_G	0,42	Moderada
	A_c	0,21	Moderada
	PVC	0,15	Fraca
	LDPE	0,12	Fraca
	I_D	0,09	Muito fraca
	C_c	0,056	Muito fraca
	σ_n	0,025	Muito fraca
	v	0,0052	Muito fraca
	D_{50}	-0,019	Muito fraca

Tabela 4.17 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa (cont.).

Interface	Variável	Valor da correlação (Matriz de Pearson)	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
SG-CDC	C_u	-0,055	Muito fraca
	ρ_s	-0,064	Muito fraca
	t_{GM}	-0,18	Fraca
	HDPE	-0,19	Fraca
SG-PI	h_G	0,67	Forte
	ϕ_s	0,40	Moderada
	C_u	0,38	Moderada
	v	0,25	Moderada
	I_D	0,18	Fraca
	LDPE	0,16	Fraca
	A_c	0,15	Fraca
	HDPE	0,059	Muito fraca
	D_{50}	0,054	Muito fraca
	PVC	-0,12	Fraca
	ρ_s	-0,15	Fraca
	t_{GM}	-0,18	Fraca
	σ_n	-0,20	Fraca
C_c	-0,27	Moderada	

Conforme pode ser visto na Tabela 4.17, para a interface a interface SG-CDC, a única variável que apresentou uma correlação forte e positiva com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) foi o ângulo de atrito do solo (ϕ_s), sendo que na interface SG-PI essa variável recebeu uma classificação moderada e positiva. Algumas pesquisas já evidenciaram que o ângulo de atrito do solo possui grande influência na resistência de interface (Vangla, et al., 2017; Namjoo et al., 2020; Wang et al., 2022; Costa Junior & Lodi, 2023) e por isso correlações mais altas já eram esperadas nesta pesquisa. A diferença de correlação encontrada entre as interfaces supracitadas pode estar ligada ao nível de tensão com a qual os ensaios foram realizados. No ensaio PI, as tensões costumam ser mais baixas do que no ensaio CDC conforme explicada Sanchez (2018) e, conseqüentemente, o ϕ_s terá uma influência menor na resistência de interface, tendo em vista que os grãos estarão submetidos a uma carga menor no

momento da formação de sulcos nas geomembranas, justificando assim a correlação moderada e não forte obtida para SG-PI.

Para a variável altura da rugosidade (h_G), a correlação obtida foi classificada como forte positiva e moderada positiva na interface PI-SG e CDC-SG, respectivamente. A diferença encontrada se justifica principalmente devido às diferentes formas que ocorre a interação na interface em cada tipo de ensaio, conforme explica Frost et al. (2012). No ensaio CDC, por exemplo, quando se tem tensões normais mais baixas é possível notar um imbricamento menor e, portanto, o mecanismo ocorre de forma superficial, diferentemente do que ocorre para tensões normais mais altas, tendo em vista que as interações ocorrem em nível interno tendo em vista o aumento do imbricamento dos grãos (Bacas, 2009). No ensaio PI esse mecanismo ocorre em três fases distintas, a saber, fase estática, fase transitória e fase transitória não estabilizada (Pitanga et al., 2009).

A altura das asperezas da geomembrana é umas das variáveis que mais influenciam a resistência de interface (Izgin, 1997; Blond & Elie, 2006; Afonso, 2009; Vangla et al. 2017; Sánchez, 2018; Araújo et al., 2022; Tanga, 2022; Tanga et al. 2023; Ferreira et al., 2023; Costa Júnior & Lodi, 2023).

Quanto à variável espessura da geomembrana (t_{GM}), observou-se para as duas interfaces a existência de uma correlação negativa e fraca. As conclusões reportadas por Lima Júnior (2000) mostraram que a espessura da geomembrana realmente não causou influência na resistência de interface, pois o ângulo de atrito resultante foi igual em espessuras diferentes. Ressalta-se que a espessura da geomembrana possui um papel fundamental quando a mesma é utilizada como material de impermeabilização (Koerner, 2012; Islam & Rowe, 2007). Porém, como variável que influencia a resistência de interface, ela se mostrou pouco representativa com base nos resultados apresentados nesta pesquisa, demonstrando assim consenso com o observado por Lima Júnior (2000) e Tanga (2022).

A correlação apresentada pela área de contato (A_c) com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) foi classificada como fraca positiva na interface SG-PI e como moderada positiva na interface SG-CDC. Essa variável foi estudada por diversos autores (Izgin, 1997; Izgin & Wasti, 1998; Aguiar, 2008; Sánchez, 2018), sendo que alguns concordam que a A_c possui influência na

resistência de interface (Izgin, 1997; Izgin & Wasti, 1998; Sánchez, 2018) e outros discordam desse fato (Aguilar, 2008).

Para a presente pesquisa, observou-se que a diferença numérica existente entre as correlações de A_c nas interfaces SG-CDC e SG-PI com o ϕ_{int} foi de 0,03, ou seja, uma diferença muito pequena, apesar de mudar a classificação da correlação conforme Pant & Romana (2021). Sendo assim, é possível concluir com base nos resultados apresentados nesta pesquisa que a A_c possui influência na resistência de interface, e a depender do tipo de ensaio, ela pode se mostrar mais ou menos influente no ϕ_{int} , pois os mecanismos de ruptura, bem como os ajustamentos dos grãos em cada ensaio, ocorrem de formas diferentes (Palmeira, 2002; Rebelo, 2003; Pitanga et al. 2009; Frost et al., 2012).

Ao comparar as correlações obtidas para a variável tensão normal (σ_n) nas interfaces SG-CDC e SG-PI, foi possível notar que elas se apresentaram discrepantes e com sinal contrário, sendo positiva muito fraca e negativa fraca, respectivamente. Para os ensaios CDC, a correlação da tensão com o ângulo de atrito foi muito fraca, e isso pode ser justificado pelo fato de que além da tensão o fator angularidade das partículas pode ser bastante influente nesse caso (Vangla & Gali, 2016; Afzali-Nejad et al., 2017), mas essa variável não foi avaliada nesta pesquisa.

Por outro lado, no ensaio PI à medida que as tensões aumentam, o ângulo de atrito de interface diminui, conforme é reportado pela literatura (Gourc *et al.*, 1996; Lalarakotoson et al., 1999). A principal justificativa para essa diferença encontrada nos ensaios CDC e PI são os mecanismos com os quais os ensaios ocorrem. A tensão normal no CDC tende a ser constante para cada ponto avaliado, frente à uma tensão que é não linear à medida que o plano de inclinação no ensaio PI é elevado (Palmeira, 2002; Sayão et al. 2009; Stoltz et al., 2020).

Vale ressaltar que conforme afirmam Abdulmuttalip & Akbulut (2022), a resistência ao cisalhamento envolve não somente a resistência contra o movimento das partículas, mas também a contribuição da propriedade de resistência do material que está em contato com o grão na interface. O grau de penetração é diretamente proporcional ao estado de tensão normal e à dimensão das partículas.

Para a variável velocidade de deslocamento ou inclinação do ensaio (v), foi possível perceber que as correlações apresentadas nas interfaces SG-CDC e SG-PI foram muito discrepantes, ou seja, correlação positiva muito fraca e positiva moderada, respectivamente. Isso evidencia que a velocidade se mostrou muito mais influente nos ensaios PI. A influência da velocidade de realização dos ensaios de resistência de interface foi estudada por diversos autores (Igzin, 1997; Mello, 2001; Mello & Palmeira, 2003; Ramirez & Gourc, 2003; Stoltz et al., 2020). No ensaio CDC, por se tratar da aplicação de uma taxa constante, observou-se uma correlação muito fraca com a variável ϕ_{int} . Em contrapartida, devido às fases de deslizamento do ensaio PI e, conseqüentemente, aumento da velocidade do deslizamento com a inclinação do equipamento, esse fato pode ter colaborado para a existência de uma correlação moderada com o ϕ_{int} (Pitanga et al., 2009; Stoltz et al., 2020).

Em relação às características intrínsecas dos solos analisados nas interfaces SG-CDC e SG-PI, foi possível notar que a variável índice de densidade (I_D) da interface SG-CDC apresentou uma correlação 2 vezes menor quando comparada com a correlação apresentada pela interface SG-PI. Em resumo, as correlações obtidas foram classificadas como positiva muito fraca e positiva fraca, respectivamente. Os estudos de Fleming et al. (2006) e Ferreira et al. (2015) mostraram que a resistência de interface sofre um leve aumento com o aumento da densidade dos solos e isso pode justificar as correlações positivas obtidas nesta pesquisa.

Também é importante evidenciar que de acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, o I_D se mostrou mais influente nos ensaios PI provavelmente devido ao nível de tensões mais baixas que são utilizadas nos ensaios, porém essa variável não deverá ser analisada de forma isolada, tendo em vista que a morfologia dos materiais possui mais influência na resistência de interface do que a índice de vazios com a qual a interface é ensaiada (Igzin, 1997; Vangla et al., 2017).

Comparando as correlações obtidas para a variável massa específica do solo (ρ_s), observou-se correlações negativas em relação ao ângulo de atrito de interface, sendo uma correlação negativa muito fraca e negativa fraca para as interfaces SG-CDC e SG-PI, respectivamente. Isso mostra que possivelmente não existe uma correlação direta entre essas variáveis para os dois ensaios, principalmente pelo fato de os mecanismos de execução serem diferentes. Porém, análises de correlações não lineares não foi objeto de estudo desta pesquisa. Portanto,

é necessário investigar por meio de outras metodologias a correlação entre ρ_s e ϕ_{int} . Além disso, conclui-se que a massa específica não deverá ser analisada de forma isolada, tendo em vista que a angularidade das partículas também é um fator que influencia o comportamento da resistência de interface (Vangla et al., 2017; Afzali-Nejad et al., 2017; Namjoo et al., 2020; Abdulmuttalip & Akbulut, 2022).

Em relação às variáveis C_u , C_c e D_{50} nas interfaces SG-CDC e SG-PI observou-se pouca aderência entre os resultados nessas duas interfaces. A variável D_{50} nas duas interfaces apresentou correlações muito fracas e negativa para a interface SG-CDC. Em ambos os casos, tal conclusão está em desacordo à que foi proposta por Namjoo et al. (2020) e Feng (2022), os quais concluíram que a influência do tamanho das partículas é mais significativa quando se utiliza solos com D_{50} maiores, uma vez que o comportamento de intertravamento ocorre entre as partículas de areia e as asperezas do material analisado. Salienta-se que a irregularidade das partículas e a textura da superfície dos geossintéticos têm um efeito associado na eficiência de atrito das interfaces areia-geossintético (Khan & Latha, 2023). Tal resultado pode estar também associado à quantidade de amostras empregadas.

A variável C_u na interface SG-PI apresentou uma correlação positiva e moderada com o ângulo de atrito de interface frente a uma correlação muito fraca e negativa na interface SG-CDC. Por fim, a variável C_c apresentou uma correlação positiva muito fraca quando foi analisada a interface SG-CDC e uma correlação negativa moderada quando da análise da interface SG-PI. As características das areias utilizadas nos ensaios utilizados no banco de dados indicam que elas são uniformes, devido ao fato do C_u ser sempre menor do que 5, e bem graduado pelo fato de o C_c estar sempre entre 1 e 3 (Sousa Pinto, 2007). Quanto à influência da granulometria do solo na resistência de interface, Vangla e Latha (2017) destacaram que uma areia de granulometria média ($C_u = 1,96$ e $C_c = 0,97$) é capaz de estabelecer um maior número de contatos efetivos com sulcos mais profundos na interface. Isso culmina em uma resistência superior, uma vez que o número de sulcos foi reduzido quando comparado ao uso de areias grossas ($C_u = 1,49$ e $C_c = 0,93$) e finas ($C_u = 1,51$ e $C_c = 0,93$). Este fenômeno resultou em um menor atrito na interface para as duas areias mencionadas em comparação com a areia de granulometria média.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.17, para as interfaces SG-CDC e SG-PI, o banco de dados foi formado por geomembranas de HDPE, PVC e LDPE. Tal divisão foi realizada com o intuito de entender qual a influência causada no ângulo de atrito de interface conforme ocorre mudanças no material de fabricação da geomembrana. Em relação a isso, observaram-se duas correlações fracas e positivas (variáveis categóricas PVC e LDPE e uma correlação fraca e negativa (variável categórica HDPE) para a interface SG-CDC. Em contrapartida, para a interface SG-PI notou-se a presença de uma correlação fraca positiva (LDPE), uma correlação muito fraca e positiva (HDPE) e uma correlação fraca e negativa (PVC).

A influência do tipo de material de fabricação da geomembrana foi estudado por O'Rourke (1990), o qual evidenciou que as medições nas interfaces com areia e geomembrana de PVC indicaram que a dilatância contribuiu com uma quantidade pequena, porém mais perceptível, para a resistência ao cisalhamento na interface areia/PVC do que areia/HDPE. Foi observado também por O'Rourke (1990) que a dureza da superfície do polímero pode desempenhar um papel importante no mecanismo de ruptura da interface, pois superfícies com polímeros relativamente duros contribuem para o deslizamento de grãos de areia na interface, enquanto superfícies mais macias promovem o rolamento de partículas. Além disso, Abdulmuttalip & Akbulut (2022) concluíram que se o plano de ruptura ocorrer na interface areia-geossintético, um aumento da dureza da superfície resulta numa diminuição dos ângulos de interface.

Nesta pesquisa, não foi identificada diferença significativa na correlação para o material LDPE, e em ambas as interfaces a correlação foi fraca e positiva, indicando que para os dois tipos de ensaios avaliados, geomembranas de LDPE apresentaram comportamentos parecidos. Porém, para os materiais HDPE e PVC, as correlações obtidas para as interfaces SG-CDC e SG-PI foram contrárias e esse resultado pode ser atribuído possivelmente à diferença de dureza dos materiais, ao mecanismo de ruptura que é particular de cada ensaio e interface, e à dilatância das areias que foi mais evidente na interface com PVC (O'Rourke, 1990). Salienta-se que a dilatância não foi uma variável avaliada nesta presente pesquisa e, portanto, indica-se que em pesquisas futuras ela seja incorporada ao banco de dados. Mais informações a respeito do fenômeno de dilatância em interfaces geossintéticas podem ser verificadas nos estudos Xu et al. (2023).

Chen et al. (2021) concluíram que existe um elevado efeito de acoplamento entre a tensão normal e a dureza da superfície na resistência da interface. Um aumento simultâneo da tensão

normal e uma diminuição da dureza da geomembrana conduz geralmente a um aumento mais significativo do coeficiente de atrito da interface do que se apenas um dos dois fatores forem alterados. Além disso, os autores concluíram que os pequenos danos que as partículas de areia causam na geomembrana lisa depende das propriedades da própria geomembrana e da tensão normal externa aplicada e isso está diretamente relacionado com o mecanismo de cisalhamento da interface.

Um aspecto adicional a ser considerado em pesquisas subsequentes é o tipo de matriz de fabricação da geomembrana. De acordo com Araújo et al. (2022), no estudo da resistência nas interfaces entre geomembranas e geotêxteis utilizando plano inclinado, as geomembranas fabricadas com uma matriz plana de maior altura podem não se ancorar nos filamentos dos geotêxteis. Essa falta de ancoragem é provavelmente atribuída à distribuição topográfica das asperezas na superfície da geomembrana. A respeito do processo de fabricação da geomembrana, Costa Junior e Lodi (2023) concluíram que as geomembranas texturizadas fabricadas pelo processo de matriz plana, que tem uma textura regular e uma altura de rugosidade controlada, apresenta um ângulo de atrito mais elevado do que a geomembrana pelo processo de coextrusão, na qual as asperezas são impressas de forma irregular.

4.3.2. Correlações obtidas para a interface Geotêxtil-Geomembrana – Ensaios CDC e PI

Em relação às interfaces com geotêxteis, a Tabela 4.18 mostra um resumo comparativo dos resultados das correlações obtidas para as interfaces GG-CDC e GG-PI.

Tabela 4.18 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa

Interface	Variável	Valor da correlação (Matriz de Pearson)	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
GG-CDC	h_G	0,93	Forte
	t_{GM}	0,53	Forte
	A_c	0,25	Moderada
	LDPE	0,042	Muito fraca
	σ_n	0,035	Muito fraca
	HDPE	-0,042	Muito fraca
	M_A	-0,043	Muito fraca
	v	-0,091	Muito fraca

Tabela 4.18 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa (cont.).

Interface	Variável	Valor da correlação (Matriz de Pearson)	Classificação da correlação (Pant & Ramana, 2021)
GG-PI	A_c	0,76	Forte
	M_A	0,18	Fraca
	σ_n	-0,25	Moderada
	v	-0,52	Forte
	t_{GM}	-0,76	Forte
	h_G	-	-

Para as interfaces GG-CDC observou-se novamente a forte influência da variável altura da rugosidade (h_G), a qual apresentou uma correlação forte e positiva (+0,93) com o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}). Essa correlação forte pode ser explicada pelo efeito de gancho e laço (Hebeler et al., 2005; Sánchez, 2018; Abdelaal & Solanki, 2022; Lin et al., 2023).

Por sua vez, para as interfaces GG-PI, não foram analisadas geomembranas texturizadas. Porém, é importante evidenciar qual a variável se tornaria a dominante no caso em que não existam rugosidades no material analisado. A presente pesquisa concluiu que nesse caso a variável área de contato (A_c) alcançaria uma predominância primária como variável que mais influencia o ϕ_{int} , resultando numa correlação de +0,76. Nesse aspecto, a importância da A_c foi reportada por outros autores (Izgin, 1997; Izgin & Wasti, 1998; Sánchez, 2018), demonstrando que o resultado obtido se mostra coerente.

Comparando as variáveis área de contato (A_c) foi possível observar que em ambas as interfaces os resultados de correlação foram positivos, as quais foram classificadas como forte e moderada para as interfaces GG-CDC e GG-PI, respectivamente. Dessa forma, notou-se que a área de contato é um fator importante de ser avaliado nos ensaios de resistência de interface e isso também foi concluído por outros estudos (Izgin & Wasti, 1998; Bilgin et al., 2011; Sánchez, 2018). De acordo com essa literatura, é esperado que ocorra um aumento do ϕ_{int} com o aumento da A_c . Esse fato pode ser utilizado como justificativa para explicar o porquê da correlação positiva forte nos ensaios PI e a correlação positiva moderada nos ensaios CDC, tendo em vista que as áreas utilizadas nos ensaios CDC são menores.

A variável espessura da geomembrana (t_{GM}) assumiu comportamentos opostos nas interfaces GG-CDC e GG-PI. Enquanto a interface GG-CDC apresentou uma correlação positiva forte, a interface GG-PI apresentou uma correlação negativa forte. A influência da espessura da geomembrana em interfaces com geotêxteis foi avaliada por Lima Júnior (2000) considerando ensaios PI, o qual constatou ângulos de atrito de interface praticamente iguais para duas geomembranas com espessuras distintas, demonstrando que a relação entre tais variáveis pode ser não linear. Por sua vez, a correlação forte e positiva apresentada para a interface GG-CDC pode estar ligada aos níveis de tensões altas com as quais esse tipo de ensaio é realizado, tendo em vista que nesse caso as tensões confinam mais a geomembrana, o que pode levar a diferença dos resultados das correlações obtidas para a variável t_{GM} .

Ao analisar o comportamento da variável tensão (σ_n), observou-se que as correlações se mostraram discrepantes, a começar pelo sinal obtido, que para a interface GG-CDC foi positivo e na GG-PI foi negativo, e pela classificação de Pant & Ramana (2021), se trata de correlações muito fraca e moderada, respectivamente. Para a interface GG-PI, a existência de uma correlação moderada negativa de 0,25 corrobora com algumas conclusões da literatura, a saber, Pitanga et al., 2009 e Carbone et al., 2015, que reportam um comportamento de não-linearidade com tensões muito baixas, nas quais o coeficiente de atrito de interface diminui à medida que a tensão normal aumenta, justificando assim a correlação negativa obtida nesta pesquisa. Por outro lado, para a interface GG-CDC, a correlação muito fraca pode estar ligada à deformação das rugosidades das geomembranas pelos filamentos dos geotêxteis, devido a um nível de tensão maior para o ensaio CDC (Manheim et al., 2015; Namjoo et al., 2020; Xu et al., 2023; Jan et al., 2024).

Khan & Latha (2023) concluíram que o aumento da tensão normal reduziu o pico dos ângulos de atrito das interfaces areia-geotêxtil, mas aumentou o mesmo para as interfaces areia-geomembrana, devido à alteração dos mecanismos de cisalhamento. Segundo os autores, as partículas tentam penetrar na superfície lisa da geomembrana com maiores tensões normais, o que resulta num ângulo de atrito da interface mais elevado.

Em outro trabalho, Jan et al. (2024) mostraram que a utilização de tensões mais altas induzem uma deformação das rugosidades fazendo com que elas não se deformem ao longo do

processo de cisalhamento. Isso faz com que o coeficiente de atrito diminua com o aumento da tensão.

Comparando a variável taxa de velocidade (v), foi possível observar que em ambas as interfaces as correlações resultaram como negativas. Para a interface GG-CDC, obteve-se uma correlação muito fraca e uma correlação forte na interface GG-PI. Por se tratar de ensaios que são realizados em níveis de confinamento diferentes, já era esperado que as respostas de correlação também se diferissem. No caso dos ensaios CDC, Yegian & Kadakal (1998), Wartman et al. (2003) e Pavanello et al. (2018), observaram que ocorre um aumento do ângulo de atrito da interface com a velocidade de deslizamento em ensaios de cisalhamento dinâmicos. Apesar de os ensaios analisados nesta pesquisa serem estáticos, o resultado de uma correlação negativa e muito fraca se mostra coerente com tal resultado. Além disso, os estudos de Stoltz et al. (2020) mostraram que para determinar de forma confiável o ângulo de atrito estático o ensaio de cisalhamento deve ser feito em velocidades de deslizamento muito baixas, ou seja, próximas de 0,001mm/min, sendo essa taxa menor do que a estabelecida pela NBR 12957-1 (ABNT, 2022).

Para a interfaces GG-PI, os autores Stoltz et al. (2020) reportaram que ao realizar o ensaio com taxas de inclinação muito baixas, um maior ângulo de atrito de interface poderá ser evidenciado para geomembranas de HDPE lisas, diferentemente do que ocorreria em caso de uma inclinação repentina, tendo em vista que o deslizamento ocorreria de maneira quase instantânea. Esse comportamento ocorre de forma inversa para geomembranas de PVC lisas, ou seja, os ângulos de atrito de interface foram menores com a aplicação de taxas incrementais de inclinação. É importante ressaltar que Pavanello et al. (2018) concluíram que a respeito das taxas de realização dos ensaios de resistência de interface ainda não existe um consenso apresentado na literatura e que são necessários mais estudos a respeito desse assunto, conclusão que também é indicada por esta presente pesquisa.

A variável gramatura (M_A) apresentou correlações negativa muito fraca e positiva fraca para as interfaces GG-CDC e GG-PI, respectivamente. Nas interfaces com ensaios CDC, Hebel et al. (2005) constataram que geotêxteis com gramaturas maiores apresentaram ângulos de atrito de interface mais altos, mas que essa conclusão é totalmente dependente altura da rugosidade da geomembrana, justificando a correlação negativa fraca apresentada. Por outro lado, para as interfaces do ensaio PI, Sánchez (2018) concluiu que a variação de gramatura de 300 para 800 g/m² demonstrou quase nenhuma diferença nos ângulos de atrito de interface,

fato que pode elucidar a correlação positiva fraca obtida para essa interface. Abdelaal & Solanki (2022) reportaram que as características dos geotêxteis (GTXs) analisados (espessura e tipo de fibra) não exerceram influência nos ângulos de atrito na interface com geomembranas lisas, como já era esperado. Por outro lado, para as três geomembranas de HDPE com superfícies rugosas analisadas (0,45, 0,51 e 3,3 mm), a redução na espessura ou da gramatura do geotêxtil resultou em aumentos nos ângulos de atrito de pico, devido ao aumento na relação entre a profundidade de incorporação da aspereza e a espessura do GTX. Importante destacar que, na interface GMB-GTX (geomembrana texturizada-geotêxtil), onde o entrelaçamento ocorreu na superfície das fibras do GTX, a variação na espessura ou da gramatura do GTX impactou apenas na resistência ao cisalhamento se o entrelaçamento ocorrer na matriz dos filamentos dos GTXs.

A respeito do tipo de material de fabricação da geomembrana é importante salientar que conforme relatam Briançon et al. (2011) e Stoltz et al. (2020), as interfaces com geomembranas HDPE e geotêxteis costumam apresentar um comportamento de deslizamento repentino, enquanto as outras interfaces, que envolvem geomembranas mais flexíveis, exibem um comportamento de deslizamento gradual, justificando novamente as correlações contrárias para as geomembranas de HDPE e LDPE obtidas nesta pesquisa para a interface GG-CDC. Porém, é de suma importância que novos estudos com um banco de dados mais amplo para a interface GG-PI, bem como novos ensaios de laboratório, sejam realizados para compreender melhor as conclusões reportadas nesta pesquisa acerca do material de fabricação.

Além do tipo de material de fabricação dos geossintéticos, os estudos de Lin et al. (2023) mostraram que o deslocamento necessário para que a interface geomembrana-geotêxtil (GMB/GTX) atinja o pico de resistência diminuiu com o aumento da temperatura. Sendo assim, além do material de fabricação também é importante avaliar em pesquisas futuras a correlação existente entre os materiais de fabricação com a temperatura de exposição da interface, tendo em vista que no caso das geomembranas o calor poderá afetar a estrutura interna do material.

É crucial destacar também que em todas as interfaces analisadas nesta dissertação pode ter ocorrido um comportamento não linear entre as variáveis, o que justifica algumas das correlações negativas observadas ao longo da pesquisa. De acordo com Tanga (2022), esses valores de correlação podem indicar a presença de uma distribuição não linear nos dados

utilizados. Portanto, é de suma importância aplicar algoritmos multivariados e não lineares baseados em *Deep Learning* para estudar as interfaces abordadas neste estudo.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. CONCLUSÕES

Esta pesquisa tratou do uso de estatística em ensaios de interface envolvendo geomembranas com areia (interface SG) ou geotêxtil (interface GG) para dois tipos de ensaios quais seja: Cisalhamento Direto Convencional (CDC) e Plano Inclinado (PI). Foram realizadas também análises de correlação linear entre diferentes variáveis, de forma a observar quais variáveis têm mais peso na resistência de interface obtida. Ao final da pesquisa, as seguintes conclusões são apresentadas:

- Observou-se que a resistência de interface pode ser influenciada por uma série de fatores, tais como a altura das asperezas da geomembrana, o nível de tensão da obra, as características do solo, entre outros. Estes aspectos precisam ser considerados tanto durante a fase de elaboração quanto na execução de projetos geotécnicos.
- Baseando-se nos resultados obtidos pela Matriz de Pearson, observou-se que os parâmetros que mais influenciaram a resistência de interface para SG-CDC foram o ângulo de atrito do solo (ϕ_s) e a altura da rugosidade da geomembrana (h_G). Já para a interface GG-CDC, os parâmetros que mais influenciaram a resistência de interface foram a altura de rugosidade da geomembrana (h_G) e a espessura da geomembrana (t_{GM}). Salienta-se que para as quatro variáveis citadas anteriormente a correlação foi positiva, ou seja, um aumento em qualquer uma delas representou aumento na resistência de interface.
- Foi possível concluir também com base na Matriz de Pearson que, para a interface SG-CDC, 7,15% das correlações se mostraram forte e moderada, 35,70% se mostraram fracas e 50% das correlações são muito fracas. Apesar disso, vale ressaltar que a correlação forte se trata da comparação entre o ângulo de atrito de interface ϕ_{int} com o ângulo de atrito do solo ϕ_s , e a correlação moderada avaliou o ϕ_{int} com h_G . Por outro lado, para a interface GG-CDC, 25% das variáveis apresentaram correlação forte com o ϕ_{int} , enquanto 12,50% e 62,50% apresentaram correlações moderada e muito fraca, respectivamente.

- Quanto ao sinal das correlações, observou-se que para a interface SG-CDC, 64,20% apresentaram uma correlação positiva com o ϕ_{int} . Para a interface GG-CDC, as correlações positivas foram observadas em 62,50% das variáveis estudadas. Salienta-se que correlações positivas indicam que as variáveis tendem a se comportar de forma conjunta e no mesmo sentido. O inverso também é válido, ou seja, para os 35,70% das variáveis SG-CDC e 37,50% das variáveis GG-CDC, notou-se que por se tratar correlações negativas, enquanto uma variável cresce, a outra estará diminuindo.

- Em relação ao ensaio de plano inclinado (PI), a Matriz de Pearson mostrou que os parâmetros que mais influenciaram a resistência de interface para SG-PI foram a altura de aspereza (h_G) e o ângulo de atrito do solo (ϕ_s). Já para a interface GG-PI, os parâmetros que mais influenciaram o ângulo de atrito de interface foram área de contato (A_c) e a gramatura do geotêxtil (M_A), considerando geomembranas lisas. Conforme explicado ao longo do desenvolvimento da dissertação, a interface GG-PI foi avaliada somente para geomembranas lisas. Esse cenário se mostrou interessante, uma vez que foi possível avaliar qual variável influenciou mais a resistência de interface quando o domínio maior da correlação não sofreu interferência da rugosidade da geomembrana.

- Do ponto de vista da estatística descritiva, para as medidas de dispersão dos dados estudados, notou-se que as variáveis que apresentaram desvios-padrão (SD) mais altos nas interfaces SG-CDC, GG-CDC, SG-PI, GG-PI foram σ_n , A_c e I_D , σ_n e M_A , σ_n e A_c , e A_c e M_A , respectivamente. Valores de SD mais altos indicam o quanto os dados encontram-se afastados dos valores médios apresentados. Foi possível concluir que as interfaces estudadas nesta pesquisa mostraram uma tendência de apresentar valores de desvios-padrão comuns para variáveis iguais, ou seja, observou-se que as variáveis tensão (σ_n) e área de contato (A_c) apresentaram SD altos em mais de uma interface. Constatou-se também que conforme os dados são tratados considerando a separação do tipo de material de fabricação da geomembrana, foi observada uma diminuição dos valores de SD.

- Quanto às medidas de forma, a análise das curtoses mostrou que a maioria das variáveis aqui estudadas apresentaram comportamento do tipo platicúrtica quando os dados foram tratados conjuntamente, indicando que a distribuição dos dados em termos de achatamento da curva se mostrou abaixo de uma distribuição normal e, portanto, as variáveis tendem a

apresentar desvios-padrão mais altos. Por outro lado, também foram evidenciadas, em quantidade menor, distribuições de curtose do tipo leptocúrtica, indicando desvios-padrão mais baixos no banco de dados analisado. Apenas na interface SG-CDC foram observadas variáveis que mais se aproximaram de uma curva mesocúrtica, ou seja, de uma distribuição normal, a saber, o ângulo de atrito de interface (ϕ_{int}) e a massa específica do solo (ρ_s). Isso ocorreu possivelmente devido à tendência dos dados levantados para essas variáveis apresentarem um comportamento menos disperso.

- Algumas variáveis apresentaram desvio-padrão (SD) nulo, não sendo possível fazer a análise da assimetria. Esse fato foi observado para as variáveis A_c (interface CDC-GG) e v e h_G (interface PI-GG), quando os dados foram tratados sem considerar a separação do tipo de geomembrana. O valor da SD nulo sugere que há pequena variação dos dados no intervalo analisado nas variáveis supracitadas, tanto para a interface CDC-GG (variável área de contato), quanto para a interface PI-GG (taxa de velocidade e altura da rugosidade).
- No que diz respeito à assimetria dos dados utilizados nesta pesquisa, observou-se, de maneira geral, que quando os dados foram tratados sem separar o tipo de material de fabricação da geomembrana, aproximadamente 54% das variáveis apresentaram assimetria positiva (à direita). Quando os dados são assimétricos à direita, os valores do banco de dados são maiores do que os valores apresentados pelas medidas de tendência central. Por outro lado, cerca de 35% dos dados apresentaram assimetria negativa (à esquerda), indicando que o banco de dados demonstrou valores menores do que os apresentados pelas medidas de tendência central. É importante ressaltar que o comportamento simétrico foi observado de forma aproximada apenas para as variáveis D_{50} (interface SG-CDC) e ϕ_s (interfaces SG-PI e GG-PI).
- É importante ressaltar que os parâmetros que apresentaram correlações muito fracas podem estar indicando que o comportamento em relação ao ϕ_{int} é não linear, sendo necessário fazer outros estudos para averiguar tal comportamento, uma vez que a não linearidade não foi objeto de estudo desta pesquisa. Mais detalhes a respeito de comportamentos não lineares em interfaces geossintéticas podem ser buscados em Anubhav & Wu (2015). Além disso, conforme também concluíram Sia & Dixon (2007), as análises feitas com bancos de dados

originados de diversas fontes trazem consigo uma incerteza, que resulta da variabilidade de procedimentos, equipamentos, operadores e materiais utilizados no decorrer dos ensaios.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Diante do que foi exposto, sugere-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Ampliar o banco de dados de ensaios de interface, considerando a interação entre outros tipos de geossintéticos e diferentes tipos de solo;
- Ampliar o banco de dados para novos tipos de ensaios considerando, por exemplo, ensaios de cisalhamento direto modificado;
- Para as variáveis que apresentaram correlações muito baixas, avaliar a possibilidade da existência de correlações não-lineares;
- Considerar a influência da dilatância das areias como uma variável nas análises de correlações com o ângulo de atrito de interface;
- Considerar o tempo de aplicação do carregamento como uma variável que influencia a resistência de interface.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR ISO 10318-1 Geossintéticos - Termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR ISO 12957.1: Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 12 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR ISO 12957.2: Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio de Plano Inclinado. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 16 p.
- Abdulmuttalip, A; Akbulut, S. (2022). Effect of fractal dimension on sand-geosynthetic interface shear strength. *Powder Technology*, v. 401: 117349.
- Abdelaal, F. B; Solanki, R. (2022). Effect of geotextile ageing and geomembrane surface roughness on the geomembrane-geotextile interfaces for heap leaching applications. *Geotextiles and Geomembranes* v. 50: 55-68.
- Acar, Y.B; Durgunoglu, H.T; Tumay, M.T. (1982). Interface properties of sand. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 108(4): 648-654.
- Adeleke, D; Nolutshungu, L; Kalumba, D; Orikot, J. (2020). An Investigation into the Effects of Asperities on Geomembrane/Geotextile Interface Shear Characteristics. Master's thesis, University of Cape Town, South Africa, 144 p.
- 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, 82 p.
- 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*, v. 45(1): 54-66.
- Aguiar, R. A. (2003). Ensaio de rampa para estudo da resistência de interface solo-geossintético. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 121 p.
- Ali, H. M; Shakir, R. R. (2022). Applying a Python script to predict the geotechnical Properties of the Nasiriyah soil. *Earth and Environmental Science*, v.961:012004.
- ASTM - American society for testing and materials. (2020). D3080 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, 2020.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2021). D5321 - Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear. West Conshohocken, 2021.
- Andriotti, J. L. S. (2010). Interpretação de dados de prospecção geoquímica com auxílio de estatística. Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Porto Alegre, CPRM, 75 p.
- Ari, A; Akbulut, S. (2022). Effect of fractal dimension on sand-geosynthetic interface shear strength. *Powder Technology*, v. 401:117349.

- Anubhav; Wu, H. (2015). Modelling of Non-linear Shear Displacement Behaviour of Soil–Geotextile Interface. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v.1: 1-19.
- Araújo, G. L. S; Sánchez, N. P; Palmeira, E. M; Almeida, M. G. G. (2022). Influence of micro and macroroughness of geomembrane surfaces on soil-geomembrane and geotextile-geomembrane interface strength. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50: 751-763.
- Assis, A. P; Espósito, T. J. B; Gardoni, M. G. A; Maia, J. A. C. (2018). Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia. Notas de aula, Departamento Engenharia Civil e Ambiental - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 29 p.
- Bacas, A. B. M. (2009). Comportamiento resistente al deslizamiento de geosintéticos. Tesis de Doctorado. Universidad de Cantabria. España. 474p.
- Bacas, A. B. M; Konietzky, H; Berini, J. C; Sagasetta, C. (2011). A new constitutive model for textured geomembrane/geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, v.29: 137-148.
- Bilgin, Ö; P.E., M. ASCE. (2011). Viscoelastic Contact Characteristics of Soil-Geomembrane Interfaces. *Geo-Frontiers*, 2092-2100.
- Bouazza, A; Zornberg, J. G; Adam, D. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: Recent advances. *7th International conference on geosynthetics*, 7: 445-507.
- Boumezerane, D. (2022). Recent tendencies in the use of optimization Techniques in Geotechnics: a review. *Geotechnics*, v. 2(1): 114-132.
- Butterfield, R; Andrawes, K.Z. (1972). On the angles of friction between sand and plane surfaces. *Journal of Terramechanics*, v. 8(4): 15-23.
- Blond, E; Elie, G. (2006). Interface shear-strength properties of textured polyethylene geomembranes. *59th Canadian Geotechnical Conference*, Quebec, Canada, 59: 898-904.
- Briançon, L; Girard, H; Poulain, D. (2002). Slope stability of lining systems experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 20(3): 147-172.
- Cadwallader, M. W. (1991). Addressing the Special Concerns of Landfill Closures: VLDPE and Textured Geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 10: 411-425.
- Campello, I. C; Ávila, J. P; Vecci, A. N; Machado, J. L. M. (2019). Variabilidade de Propriedades Geotécnicas. *XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Comitê Brasileiro de Barragens, Salvador, BA, 32: 1-19.
- Campello, C. C. (2020). Abordagem probabilística aplicada ao estudo da variabilidade geotécnica dos solos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 158 p.
- Cabalar, A.F. (2016). Cyclic behavior of various sands and structural materials interfaces. *Geomechanics and Engineering*, v. 10(1): 1-19.
- Carbone, L; Gourc, J. P; Carrubba, P; Moraci, N; Briançon, L; Pavanello, P. (2013). New perspectives in the interface shear strength characterization through the inclined plane test. *Proceedings Sardinia, Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium*, v. 14: 1-10.
- Carbone, L; Gourc, J.P; Briançon, L; Moraci, N; Carrubba, P. (2015). Dry friction behavior of a geosynthetic interface using inclined plane and shaking table tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 43: 293-306.

- Cazzuffi, D; Recalcati, P; Calvanaro, L. S; Marelli, S. (2022). A review of direct shear and inclined plane tests results for different interfaces in landfill capping. *Detritus*, v. 20: 100-111.
- Costa Junior, S. L. (2020). Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e diferentes geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 136 p.
- Chang, M. (2005). Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism. *Computers and geotechnics*, v. 32: 587-599.
- Chen, W. B; Xu, T; Zhou, W. H. (2021). Microanalysis of smooth Geomembrane–Sand interface using FDM–DEM coupling simulation. *Geotextiles and Geomembranes* v. 49: 276-288.
- Chiarello, G. P. (2022). Interação de interfaces entre solo e geomembranas por meio de ensaios de cisalhamento direto. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 117p.
- Ching, J; Wu, S. S; Phoon, K. K. (2014). Correlations among some clay parameters – The multivariate distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 51 (6): 686-704.
- Ching, J; Wu, S. S; Phoon, K.K. (2015). Statistical characterization of random field parameters using frequentist and Bayesian approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53 (2): 1-19.
- Ching, J; Wu, S. S; Phoon, K.K. (2019). Impact of autocorrelation Function Model on the Probability of Failure. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 145 (1): 04018123-1-13.
- Cen, W. J; Wang, H; Sun, Y.J; Wen, L.S. (2018). Monotonic and cyclic shear behavior of geomembrane-sand interface. *Geosynthetics International*, v. 25(4): 369-377.
- 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.
- Costa Neto, P.L. Estatística. 2ª ed, São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- Crespo, A. A. (2006). Estatística fácil. Saraiva, SP, p. 224.
- Daciolo, L. V. P; Correia, N.S; Boscov, M. E. G. (2021). Extensive database of MSW shear strength parameters obtained from laboratorial direct shear tests: Proposal for data classification. *Waste Management*, v.140: 245-259.
- Díaz-Beltrán, J. J; Iguarán-Fernández, J. J; Larrahondo, J. M; Jaramillo, L. A. (2016). Shear Strength of Municipal Solid Waste (MSW): Beyond the Raw Values of “Cohesion” and Friction Angles. *Geo-Chicago*, v.3 :264-274.
- Dove, J; Bents, D; Wang, J; Gao, B. (2006). Particle-scale surface interactions of non-dilatative interface systems. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24(3): 156-168.
- Dove, J; Jarret, J. B. (2002). Behavior of dilatative sand interfaces in a geotribology framework. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 1(25): 25-37.
- Effedi, R. (2011). Interface friction of smooth geomembranes and ottawa sand. *Info Teknik*, v. 12(1): 61-72.
- Eigenbrod, K. D; Locker, J. G. (2011). Determination of friction values for the design of side slopes lined or protected with geosynthetics. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 24(4): 509-519.
- Ehrlich, M.; Becker, L. (2009). Muros e Taludes de Solo Reforçado: projeto e execução. 1º

- edição, São Paulo: Oficina de Textos, 128p.
- Ferreira, F.B; Vieira, C.S; Lopes, M.L. (2015). Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces – influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type. *Geosynthetics International*, v. 22 (3): 257-272
- Ferreira, D. F. (2005). *Estatística básica*. Ed. UFLA, 2013, 2ª edição ampliada e revisada, 664 p.
- Feng, S. J; Liu, X; Chen, H.X; Zhao, T. (2017). Micro-mechanical analysis of geomembrane-sand interactions using dem. *Computers and Geotechnics*, v. 94: 58-71.
- Feng, S. J; Liu, X; Chen, H.X; Zhao, T. (2017). DEM simulation of geotextile-geomembrane interface direct shear test considering the interlocking and wearing processes. *Computers and Geotechnics*, v. 148: 104805.
- Fleming, I.R; Sharma, J.S; Jogi, M.B. (2006). Shear strength of geomembrane–soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24(5): 274-284.
- Floresta, F. M; Vieira, C. S; Mendes, L. A; Amorim, D. L. N. F. (2020). Statistical analysis of the design procedure used in reinforced concrete pipes. *Ibracon Structures and materials journal*, v. 13 (1): 69-86.
- Frost, J.D; Zettler, T.E; Dejong, J.T; Lee, S.W; Kagbo, S. (2002). Strain induced changes in geomembrane surface topography. *Geosynthetics International*, v. 9(1): 21-40.
- Frost, D.J., Kim, D. & Lee, S.W. (2012). Microscale geomembrane-granular material interactions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 16(1): 79-92.
- Geroto, R. E. (2008). *Desempenho de camadas de proteção para geomembranas*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 188p.
- 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*, v. 9(2): 129-143.
- Gireesha, N.T. and Muthukkumaran, K. (2011). Study on soil structure interface strength property. *J International Journal of Earth Sciences and Engineering*, v. 4(6): 89-93.
- Gomes, R. C. (1993). *Interação solo-reforço e mecanismo de solos reforçados em geotêxteis*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 270p.
- Gourc, J.P; Lalarakotoson, S; Müller-Rochholz, H. & Bronstein, Z. (1996). Friction measurement by direct shearing or tilting process - development of a european standard. *European Geosynthetics Conference (EUROGEO 1)*, v. 1: 1039-1046.
- Gourc, J.P; Reyes Ramirez, R. (2003). Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship. *Geosynthetics International*, v. 10(5): 165-175.
- Gourc, J; Reyes-Ramirez, R; Villard, P. (2004). Assessment of geosynthetics interface friction for slope barriers of landfill. *Proceedings of 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, v. 3:116-149.
- Gourc, J.P; Reyes Ramírez, R. (2004). Dynamics-based interpretation of the interface friction test at the inclined plane. *Geosynthetics International*, v. 11(6): 439-454.
- Gómez, C. R. (2014). *Análise de danos em geomembranas por meio de ensaios de laboratório em diferentes escalas*. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 151 p.

- Guo, Y; Golchin, A; Hicks, M. A; Liu, S; Zhang, G; Vardon, P. J. (2022). Experimental investigation of soil–structure interface behaviour under monotonic and cyclic thermal loading. *Acta Geotechnica*, v. 18: 3585-3608.
- Gravetter, F; Wallnau, L. (2015). *Statistics for the Behavioral Sciences*. 10th Edition, Cengage/Wadsworth, Boston, 768p.
- GRI - Geosynthetic Research Institute. (2021). GM13 Standard Specification: Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes. Folsom, PA, EUA, 2021. Disponível em: <<https://geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf>> Acessado em dezembro de 2023.
- Hong, Li; Wang, X; Zhang, W. (2023). Reability-based robut geotechnical design of braced excavations considering multiple failure modes. *Underground Space*, v. 9(4). :43-52.
- Harikumar, M., Sankar, N., Chadrakaran, S. (2015). Response of sand reinforced with multi-oriented plastic hexa-pods. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 4(52): 211-217.
- Hebeler, G., Frost, J. & Myers, A. (2005). Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane-geotextile systems. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 23(1): 77-105.
- Hsieh, C; Hsieh, M. W. (2003). Load plate rigidity scale effects on the frictional behavior of sand-geomembrane interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 21: 25-47.
- Holtz, R.D; Kovacs, W.D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, 864p.
- Islam, M. Z; Rowe, R. K. (2007). Effect of HDPE geomembrane thickness on the depletion of antioxidants. In: 60th Canadian Geotechnical Conference and 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Ottawa, Ontario, Canada, v. 60: 2129-2134.
- Izgin, M. & Wasti, Y. (1998). Geomembrane–sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 16(4): 207-219.
- Izgin, M. (1997). Geomembrane-sand interface friction. Master's thesis, Middle East Technical University of Turkey, 171 p.
- Jahanfar, A. (2017). A novel risk assessment method for landfill slope failure: Case study application for Bhalswa Dumpsite, India. *Waste Management & Research*, v. 35(3), p. 220-227.
- Jahanfar, A. (2016). Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: A Probabilistic Approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 143(8), p. 04017035.
- P. Jan, P., Zugelj, B; M. Kalin, M. (2024). In-situ micro-asperity investigation of real contact area formation during sliding with the effects of roughness and normal load considered. *Tribology International*, v. 191: 109171.
- Janoo, V. (1998). Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials. CRREL Special Report 98-1, US army Corps of Engineers, USA, 29 p.
- Jensen, P.R; Plesha, M. E; Edil, T. B; Bosscher, P. J; Kahla, N. B. (2001). DEM simulations of particle damage in granular media-structure interfaces. *The International Journal of Geomechanics*, v. 1(1): 21-39.
- Jia, Y; Zhang, J; Chen, X; Miao, C; Zheng, Y. (2023). DEM study on shear behavior of geogrid-soil interfaces subjected to shear in different directions. *Computers and Geotechnics*, v. 156: 105302.

- Khan, R., Latha, G. M. (2023). Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 51: 437-453.
- Koerner, R.M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. Prentice-Hall Inc., 4rd Ed., New Jersey, 761 pp.
- Koppe, J. C. (1982). Caracterização geotécnica e análise estatística de um solo residual da formação rosário do sul na região do 111° polo petroquímico do RS. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 122p.
- Koutsourais, M. M; Pucetas, R. C; Sprague, C.J. (1991). Interface Friction Study of Cap and Liner Components for Landfill Design. *Geotextiles and Geomembranes*, v.10 (1991): 531-548.
- Lalarakotoson, S; Villard, P; Gourc, J.P. (1999). Shear strength characterization of geosynthetic interfaces on inclined planes. *Geotechnical Testing Journal*, v. 4(22): 284-291.
- Larrossa, M. C; Real, M. V; Dias, C. R. R; Magalhães, F. C. (2014). Statistical analysis and conformity testing of concrete in port construction work. *Ibracon Structures and Materials Journal*, v. 7 (3): 468-497.
- Larson, R; Farber, B. (2010). *Estatística Aplicada*. Tradução por Luciane Ferreira e Pauleti Viana. 4 ed. São Paulo: Pearson Hall, 640 p.
- Lashkari, A; Jamali, V. (2021). Global and local sand-geosynthetic interface behavior. *Geotechnique*, v. 71(4): 346-367.
- Levine, D.M; Bereson, M.L; Stephan, D. (1998). *Estatística: Teoria e Aplicações*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 811 p.
- Lechowicz, Z., Wrzesinski, G. (2015). Assessment of embankment slope stability with geomembrane sealing. *XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 16: 2037-2042.
- 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, 148 p.
- Lin, H., Gong, X., Zeng, Y., Zhou, C. (2023). Experimental study on the effect of temperature on HDPE geomembrane/geotextile interface shear characteristics. *Geotextiles and Geomembranes*, Available online 28 December 2023.
- Lira, S. A. (2003). Compacidade relativa de areias: uma proposta prática para controle de campo. *XXV seminário nacional de grandes barragens*, v. 91(A22): 1-17.
- Lira, S. A. (2004). Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. 196 p.
- Lopes, C. P. F. C. (2001). Estudo da interação solo-geossintético através de ensaios de corte em plano inclinado. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Portugal, 212 p.
- Lopes, L. F. D. (2003). Apostila de estatística. Notas de aula, Universidade Federal de Santa Maria, 139 p.
- Mano, E. B. (1985). *Introdução a polímeros*. Blücher, São Paulo, SP. 111 p.
- Marques, L. B. (2021). Avaliação dos parâmetros de resistência na interface solo-geomembrana através do equipamento cisalhamento direto. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria, 75 p.

- 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, 137 p.
- Manheim, D; Yesiller, N; Hanson, J; Gourc, J.P; Carbone, L; Moraci, N; Carrubba, P; Pavanello, P. (2015). Investigation of post-shear surface texture characteristics of geomembranes. Geosynthetics Conference, v. 16: 1179-1189.
- Medri, M. (2011). Análise exploratória de Dados. Curso de Especialização “Lato Sensu” em Estatística. Universidade Estadual de Londrina, PR, 82 f. Notas de Aula.
- Mitchell, J. K; Seed, R. B; Seed, H.B. (1990). Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: Liner system properties. Journal of Geotechnical Engineering, v.116(4): 647-668.
- 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; Araújo, G.L.S; Palmeira, E.M. (2014). Friction measurement by direct shearing or tilting process. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique, v. 4: 3053-3056.
- National Research Council. (2007). Assessment of the Performance of Engineered Waste Containment Barriers. National Academies Press, 121 p.
- Nardelli, A. (2019). The shaft friction degradation of piles under cyclic axial loading in wind turbine foundations. Master's thesis, University of São Paulo, 182 p.
- Namjoo, A. M; Jafari, K; Toufigh, V. (2020). Effect of particle size of sand and surface properties of reinforcement on sand-geosynthetics and sand-carbon fiber polymer interface shear behavior. Transportation Geotechnics, v. 24:100403.
- Negussey, D; Vaid, W. K. D. (1989). Geomembrane interface friction. Canadian Geotechnical Journal, v. 26: 165-169.
- Naghettini, M.; Pinto, E. J. A. (2007). Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: Serviço geológico do Brasil – CPRM, 600 p.
- O’Rourke, T. D; Druschel, S.; Netravali, A. N. (1989). Shear Strength characteristics of sand-polymer interfaces. Journal of Geotechnical Engineering, v. 116 (3): 451-469.
- Ojea, D. M; Rocha, P. E. O; Santos Junior, P. J; Chiari, V. G. (2009). Critérios gerais para projeto, especificação e aplicação de geossintéticos. Manual técnico da Maccaferri, disponível em: <https://marcosporto.eng.br/wp-content/uploads/2018/02/TM_-_BR_-_Manual-Crit%C3%A9rios-gerais-para-aplica%C3%A7%C3%A3o-de-geossint%C3%A9ticos_-_PT_ Feb 21. pdf> Acessado em dezembro de 2022.
- Orr, T., & Farrell, E. R. (1999). Geotechnical Design to Eurocode 7. London: Springer, 199p.
- Paiva, W. (2009). Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 193 p.
- Palmeira, E. M. (2009). Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis. Geotextiles and Geomembranes, v. 27: 368-390.
- Palmeira, E.M. (2018). Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, SP, p. 388.
- Pant, A; Ramana, G. V. (2021). Novel application of machine learning for estimation of pullout coefficient of geogrid. Geosynthetics International, v. 29 (4): 342-355.
- Palomino, C. F. Comparativo entre geomembranas texturizadas pelo processo extrusão matriz plana e ranhuradas pelos processos de matriz balão. Disponível em: <



- <https://pt.linkedin.com/pulse/comparativo-entre-geomembranas-texturizadas-pelo-e-de-carolina>> Acessado em agosto de 2021.
- Pavanello, P; Carrubba, P; Moraci, N. (2018). Dynamic friction and the seismic performance of geosynthetic interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 46 (6): 715-725.
- Pavanello, P; Carrubba, P; Moraci, N. (2021). The characterization of geosynthetic interface friction by means of the inclined plane test. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 49: 257-275.
- Pavanello, P; Carrubba, P; Moraci, N. (2022). Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress: Two Approaches with Increasing Shear Loading. *Applied Sciences*, v. 12 (3): 1065.
- Pedroso, G. O. M. (2017). Avaliação da superfície deformada de geomembrana de PEAD em camadas de proteção por meio de ensaio de compressão estática. Universidade de São Paulo, 148p.
- Petrovic, I. (2016). Mini-review of the geotechnical parameters of municipal solid waste: Mechanical and biological pre-treated versus raw untreated waste. *Waste Management & Research*, v. 34 (9): 840-850.
- Petrovic, I. (2016). Application of continuous normal–lognormal bivariate density functions in a sensitivity analysis of municipal solid waste landfill. *Waste Management*, v. 55: 141-153.
- Piana, C. F. B; Machado, A. A; Selau, L. P. R. (2013). Estatística Básica. Notas de aula, Instituto de Física e Matemática, Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Federal de Pelotas, 204 p.
- 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*, v. 27(6): 435-446.
- Pianezer, G. A. (2020). Modelagem estatística. Curitiba: Contentus, 101 p.
- Phoon, K. K. (2015). Reliability of geotechnical structures. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Fukuoka, 169p.
- Potyondy, J. G. (1961). Skin friction between various soils and construction materials. *Geotechnique*, v. 11(4): 339-353.
- Pinto, G. H. S. (2023). Proposta de modelos de predição da Resistência não drenada de rejeitos de bauxita. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 152p.
- Punetha, P., Mohanty, P. & Samanta, M. (2017). Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 45(3): 197-210.
- Reis, J. H. C. (2006). Modelo de atrito estático em interface de contato entre concreto e areia. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, 188p.
- Rebelo, K. M. W. (2003). Resistência de interface entre geomembranas e solos através do ensaio de ring shear. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, 216p.
- Reddy, E; Chapman, D.N; Sastry, V.V.R.N. (2000). Direct shear interface test for shaft capacity of piles in sand. *Geotechnical Testing Journal*, v. 23(2), 199-205.
- Rizwan, M; Mujtaba, H; Farooq, K; Rehman, Z, U; Ashiq, S. Z; Kazmi, S. M. S; Munir, M. J. (2022). Laboratory Investigation of Sand-Geosynthetic Interface Friction Parameters Using Cost-Effective Vertical Pullout Apparatus. *Fibers*, 10 (84), 1-12.

- Rocha, D. (2018). Correlações e visualizações de matrizes de correlação no R. Disponível em: <https://rstudiopubsstatic.s3.amazonaws.com/437792_df39a5ff0a55491fb71f0f4a0f5cd0bf.html> Acessado em agosto de 2022.
- Rowe, R.K. (1998). Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. *Sixth International Conference on Geosynthetics*, v. 6(1): 27-103.
- Sahoo, K; Samal, A. K; Pramanik, J; Pani, S. K. (2019). Exploratory Data Analysis using Python. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, v. 8(12): 4727-4735.
- Samanta, M; Punetha, P; Sharma, M. (2017). Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface. *Geomechanics and Engineering*, v. 14(4): 387-398.
- Santamarina, J.C., Cho, G.C., 2001. Determination of critical state parameters in sandy soils-simple procedure. *Geotech. Test. J, ASTM*, v. 24 (2): 185-192.
- Saeed, A. B. E. (2017). Effect of time on soil-geomembrane interface shear strength. Master's thesis, University of Dayton, Ohio, 111 p.
- Sánchez, N. P. (2018). Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 190 p.
- Santos, R. M. (2008). Desvio Absoluto Mediano como Estimador Robusto no Aprimoramento de Ferramentas no Controle Estatístico da Qualidade. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, 99 p.
- Sia, A. H. I; Dixon, N. (2007). Distribution and variability of interface shear strength and derived parameters. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 25: 139-154.
- Silva, L. C. F. (2017). Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 140 p.
- Siqueira, D. (2021). Melhorando a análise com o boxplot. Disponível em: <<https://www.alura.com.br/artigos/melhorando-a-analise-com-o-boxplot#quer-saber-mais-sobre-o-assunto?>> Acesso em 22 de agosto de 2023.
- Simon, J. (1995). Curso de Estatística; Editora Atlas; 5ª edição, 320p.
- Sousa Pinto, C. (2006). Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de Textos, São Paulo, SP, p. 368.
- Scheirs, J. (2009). A guide to polymeric geomembranes. *Excelplas Geomembrane Testing Services*, Edithvale, Australia, 582 p.
- Shahnamnia, A; Sadeghi, M. M; Hejazi, S. M; Abtahi, S. M. (2023). Investigation the effect of geotextiles on the absorption of oil contamination and soil geotechnical Properties. *Journal of industrial Textiles*, v. 53: 1-22.
- Shukla, S. K; Sivakugan, N; Das, M. B. (2009). Fundamental concepts of soil reinforcement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v.3: 329-342.
- Sreelakshmi, G; Asha, M. N; Thejus, L. (2021). Interfacial studies on different pile materials and their roughness characterisation using 3D optical profilometer. *Architecture, Structures and Construction*, v. 1: 21-35.
- Stacho, J; Sulovska, M; Slavik, I. (2023). Analysis of the shear strength of a soilgeosynthetic interface. *Civil and Environmental Engineering*, 19 (1), 452-463.



- Stark, T.D.; Poeppel, A.R. (1994). Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests. *J. Geotech. Eng.*, v. 120, 597-615.
- Stark, T. D; Newman, E. J; Aust, R. L. (2008). Back analysis of a PVC geomembrane lined pond failure. *Geosynthetics International*, v. 15(4): 258-268.
- Stamatopoulos, A. C; Kotzias, P. C. (1996). Earth slide on Geomembrane. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, v. 22 (5): 408-411.
- 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*, v. 5: 1-5.
- Stoltz, G; Nicaise, S; Veylon, G; Poulain, D. (2020). Determination of geomembrane – protective geotextile friction angle: An insight into the shear rate effect. *Geotextile and Geomembranes*, v. 48(2): 176-189.
- Schultz, D. P.; Schultz, S; Ellen. (1992). *História da psicologia moderna*. 16. ed. São Paulo: Cultrix, 439 p.
- Tarnowski, C.; Baldauf, S. (2006). Ageing resistance of HDPE-geomembranes – Evaluation of long-term behavior under consideration of project experiences. *GSE Lining technology GmbH, Hamburg, Germany*, 1-4.
- Tanga, A. T. (2022). Machine learning for geomembrane-sand interface analysis. *Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília*, 84 p.
- Tanga, A.T; Araújo, G.L.S; Evangelista Jr, F; Gomes, R.M.S. (2023). Machine Learning for soil-geosynthetic interface shear strength analysis. *12 International Conference on Geosynthetics*, v.12: 705-710.
- Tejchman, J; Wu, W. (1995). Experimental and numerical study of sand-steel interfaces. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, v. 19(8): 513-536.
- Tsubakihara, Y; Kishida, H. (1993). Frictional behavior between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses. *Soil and Foundation*, v. 33(2): 1-13.
- Toufigh, V; Shirkorshidi, S.M; Hosseinali, M. (2017). Experimental investigation and constitutive modeling of polymer concrete and sand interface. *International Journal of Geomechanics*, v. 17(1), 04016043.
- Uesugi, M; Kishida, H. (1986). Influential factors of friction between steel and dry sand. *Soils and Foundation*, v. 26 (2): 33-46.
- Vaid, Y. P; Rinne, N. (2005). Geomembrane coefficients of interface friction. *Geosynthetics International*, v. 2 (1): 309-325.
- Vangla, P. & Gali, M.L. (2016a). Shear behavior of sand-smooth geomembrane interfaces through micro-topographical analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 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 behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 44(3): 254-268.
- Vangla, P; Latha, G. M. (2017). Surface topographical analysis of geomembranes and sands using a 3D optical profilometer. *Geosynthetics International*, v. 2(24): 151-166.
- Vertematti, J. C. (2015). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. Blucher, SP, 400p.
- Veerla, V. K; Srinivas, K. (2022). A study on soil interface interaction. *Materials Today: Proceedings*, v.51 (8), 2561-2568.

- Vieira, C.S; Lopes, M.D.L; Caldeira, L. (2015). Sand-Nonwoven geotextile interfaces shear strength by direct shear and simple shear tests. *Geomechanics & engineering*, v. 9(5): 601-618.
- Vinutha, H.P; Poornima, B; Sagar, B.M. (2018). Detection of Outliers Using Interquartile Range Technique from Intrusion Dataset. Satapathy, S., Tavares, J., Bhateja, V., Mohanty, J. *Information and Decision Sciences. Advances in Intelligent Systems and Computing*, v. 701: 511-518.
- Wang, R; Ong, D. E. L; Peerun, M; Jeng, D. S. (2022). Influence of surface Roughness and particle characteristics on soil-structura interactions: a state-of-the-art review. *Geosciences*, 12(145): 1-36.
- Wang, P; Yin, Z. (2022). Effect of particle breakage on the behavior of soil-structure interface under constant normal stiffness condition with DEM. *Computers and Geotechnics*, v. 147: 104766.
- Wartman, J; Bray, J.D; Seed, R.B. (2003). Inclined plane studies of the Newmark sliding block procedure. *J. Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, v. 129 (8): 673-684.
- Xu, L; Wang, R; Liu, Q; Chen, J. (2023). Effect of particle size distribution on monotonic direct shear characteristics of geotextile/geogrid-calcareous sand interface. *Applied Ocean Research*, v. 137: 103601.
- Xu, G; Shi, J; Li, Y. (2023). Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 51(1): 88-99.
- Zanardini, R. A. D. (2020). *Ferramentas matemáticas aplicadas*. Contentus, Curitiba, PR, p. 151.
- Zhang, C; Ji, J; Gui, Y; Kodikara, J; Yang, S.Q; He, L. (2016). Evaluation of soil-concrete interface shear strength based on LS-SVM. *Geomechanics and Engineering*, v. 11(3): 361-372.
- 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, 259p.
- Vilar, O. M. (2003). *Geossintéticos em Aplicações Ambientais*. 4° Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Porto Alegre, v. 4: 203-218.
- Yegian, M.K; Kadakal, U. (1998). Geosynthetic interface behavior under dynamic loading. *Geosynthetics International*, v. 5 (1-2):1-16.
- Yoshimi, Y; Kishida, T. (1981). A ring torsion approach for evaluating friction between soil and metal surfaces. *Geotech. Test. J.*, v. 4(4): 145-152.
- Zhang, X, Z; Zhao, X; Xu, C; Jia, K; Han, Y. (2023). Effects of different test methods on the seismic dynamic response in inclined liquefiable soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 170:107896.
- Zettler, T. E; Frost, J. D; DeJong, J. T. (2000). Shear-induced changes in smooth HDPE geomembrane surface topography. *Geosynthetics International*, v. 7 (3): 243-267.

APÊNDICE A – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL (CDC)

Interface	Resumo dos estudos estatísticos e correlações
CDC-SG	 CDC-SG_separado_RawData_Exploration.html
CDC-GG	 CDC-GG_separado_RawData_Exploration.html

APÊNDICE B – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE PLANO INCLINADO (PI)

Interface	Resumo dos estudos estatísticos e correlações
PI-SG	 PI-SG_separado_Raw Data_Exploration.html
PI-GG	 PI-GG_separado_Raw Data_Exploration.html