

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/731

Estudo Estatístico Comparativo da Resistência Entre Interfaces Geossintéticas Obtidas por Meio de Ensaios de Cisalhamento Direto Convencional (CDC) e Plano Inclinado (PI)

Raísla Martins da Silva Gomes

Mestranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, raislagomess@gmail.com

Gregório Luís Silva Araújo

Phd, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, gregorio@unb.br

Francisco Evangelista Junior

Phd, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, fejr@unb.br

RESUMO: O uso crescente de geossintéticos em obras geotécnicas requer compreensão de seu comportamento na interface com outros materiais. Para a elaboração deste artigo, um banco de dados foi montado com diversas variáveis (taxa de velocidade ensaio (v), tensões normais (σ_n), área de contato (A_c), espessura da geomembrana (t_{GM}), altura de rugosidade da geomembrana (h_G), 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}), gramatura (M_A) e tipo de ensaio), considerando ensaios CDC e PI utilizando interfaces areia-geomembrana (SG) e geotêxtil-geomembrana (GG). Os dados foram tratados utilizando Python (bibliotecas como Pandas e NumPy), além do Excel para análises mais simples. As correlações revelaram que, para interfaces CDC-SG e CDC-GG, o ângulo de atrito do solo (ϕ_s) e a altura da rugosidade da geomembrana (h_G) foram as variáveis que apresentaram correlações mais altas, enquanto para PI-SG e PI-GG, foram a altura da rugosidade (h_G) e a área de contato (A_c), respectivamente. Por fim, o uso da estatística se mostrou adequada para avaliar os principais parâmetros que mais influenciam a resistência entre interfaces geossintéticas.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Geomembranas, Resistência de interface, Análises estatísticas, Correlação.

ABSTRACT: The increasing use of geosynthetics in geotechnical projects necessitates understanding their behavior at the interface with other materials. For this article, a database was assembled with various variables (test velocity (v), normal stresses (σ_n), contact area (A_c), geomembrane thickness (t_{GM}), geomembrane roughness height (h_G), density index (I_D), specific mass (ρ_s), curvature coefficient (C_c), non-uniformity coefficient (C_u), average grain diameter (D_{50}), peak soil friction angle (ϕ_s), interface friction angle (ϕ_{int}), grammage (M_A), and test type), considering both direct shear (CDC) and inclined plane (PI) tests using sand-geomembrane (SG) and geotextile-geomembrane (GG) interfaces. The data were processed using Python (libraries such as Pandas and NumPy), along with Excel for simpler analyses. The correlations revealed that, for CDC-SG and CDC-GG interfaces, the soil friction angle (ϕ_s) and geomembrane roughness height (h_G) were the variables with the highest correlations, while for PI-SG and PI-GG interfaces, they were roughness height (h_G) and contact area (A_c), respectively. Ultimately, the use of statistics proved adequate for evaluating the main parameters that most influence the resistance between geosynthetic interfaces.

KEYWORDS: Geosynthetics, Geomembranes, Interface Resistance, Statistical Analyses, Correlation.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem sido cada vez mais evidente o aumento do uso de geossintéticos em projetos geotécnicos. Para garantir a correta aplicação das geomembranas, um dos geossintéticos mais comumente

empregados conforme Fleming et al. (2006), é fundamental compreender a interação entre esse material e o solo subjacente. Essa compreensão não se limita apenas ao ângulo de atrito da interface, mas também abrange as propriedades da rugosidade da geomembrana e o tipo de solo em questão. De acordo com Mello (2001), o ângulo de atrito da interface está diretamente relacionado à aspereza do geossintético, e além desse parâmetro, diversos outros fatores podem influenciar a resistência da interface, como o tamanho dos grãos, o nível de estresse aplicado no ambiente de campo, entre outros.

Diante do crescente número de estudos nessa área (Petrovic, 2016; Jahanfar, 2017; Daciolo, 2021; Tanga, 2022; Tanga et al., 2023), torna-se viável e pertinente o uso de estatísticas e linguagens de programação para analisar os parâmetros que mais impactam a resistência da interface. O objetivo deste artigo foi realizar uma avaliação estatística correlacional do comportamento do ângulo de atrito da interface (ϕ_{int}) em relação a outras variáveis, como 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 uniformidade (C_u) do solo, diâmetro médio dos grãos (D_{50}), ângulo de atrito do solo (ϕ_s), peso (M_A), entre outros. Essa análise estatística identificou as principais variáveis que influenciam a resistência da interface e com isso foi possível definir correlações usando a Matriz de Pearson (MCP), amplamente utilizada em estudos estatísticos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, 445 ângulos de atrito de interface foram avaliados estatisticamente em relação à influência de 11 variáveis numéricas para interfaces de geomembrana com areias (SG) e geotêxteis (GG). Algumas variáveis foram consideradas como categóricas, representadas não por valores obtidos nos ensaios, mas sim pelo uso ou não. Para as interfaces SG-CDC e SG-PI, as variáveis categóricas foram HDPE, PVC e LDPE, respectivamente. É importante destacar que os tipos de ensaios selecionados, bem como as condições de contorno consideradas, foram adotados nesse formato para manter a aleatoriedade na busca pelas variáveis que mais influenciam a resistência entre as interfaces geossintéticas.

A preferência na obtenção dos dados foi inicialmente dada aos ensaios de cisalhamento realizados para a interface areia-geomembrana. As variáveis consideradas foram: velocidade do ensaio (v), tensões normais (σ_n), área de contato (A_c), espessura da geomembrana (t_{GM}), altura da rugosidade da geomembrana (h_G), 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 máximo do solo (ϕ_s), ângulo de atrito da interface (ϕ_{int}), tipo de ensaio (CDC ou PI) e material de fabricação da geomembrana. Na sequência abriu-se espaço para inserir interfaces com geotêxteis, para os quais a gramatura (M_A) também passou a ser considerada como variável. A seleção de dados consistiu em levantamentos de estudos nacionais e internacionais sobre a resistência entre interfaces com geossintéticos, principalmente geomembranas. O foco do banco de dados foi considerar ensaios convencionais de cisalhamento direto (CDC) e de plano inclinado (PI), com um total de 270 e 175 interfaces avaliadas, respectivamente.

2.1 Estatísticas e linguagem Python aplicadas na pesquisa

O foco deste artigo foi construir a matriz de correção de Pearson, obtida pela correlação das variáveis numéricas utilizadas. A obtenção da matriz de correlação baseia-se no cálculo do coeficiente de correlação, conforme mostrado na Equação 1. Para obter a matriz de Pearson, é necessário conhecer o coeficiente de correlação de Pearson (r) para cada par de variáveis estudadas. Para isso, os dados foram processados utilizando Python e bibliotecas como Pandas e NumPy, juntamente com o Excel, para análises descritivas mais simples.

$$r = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X).var(Y)}} \quad (1)$$

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.

Neste artigo, as correlações foram classificadas de acordo com os intervalos estabelecidos por Pant & Ramana (2021), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 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 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional (CDC)

2.1.1 Histogramas de distribuição das Interfaces Areia-Geomembrana – SG-CDC e Geotêxtil-Geomembrana (GG)

Para a interface SG-CDC, os histogramas de distribuição dos dados podem ser vistos na Figura 1a. 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. Por outro lado, para a interface GG-CDC, os histogramas das variáveis podem ser vistos na Figura 1b. 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}).

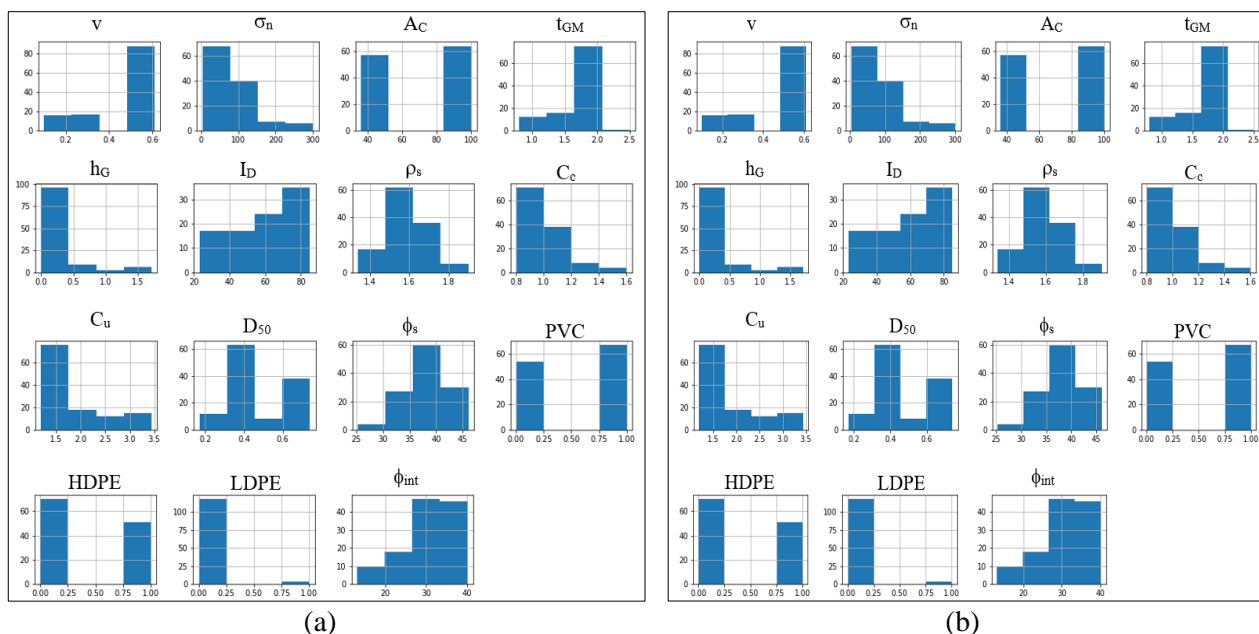


Figura 1 – Histogramas das variáveis estudadas nas interfaces – (a) SG-CDC e (b) GG-CDC.

3.2 Ensaio de Plano Inclinado (PI)

3.2.1 Histogramas de distribuição das Interfaces Areia-Geomembrana (SG-PI) e Geotêxtil-Geomembrana (GG-PI)

Em relação à variável tensão normal (σ_n), na interface SG-PI (Figura 2a), observou-se que 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. Também foram observadas duas classes de dados para a variável área de contato (A_c), como mostra a Figura 2a. 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).

Quanto à interface GG-PI, considerando uma análise da Figura 2b, 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°/min, o que está de acordo com a NBR 12957-2 (ABNT, 2013). Já 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).

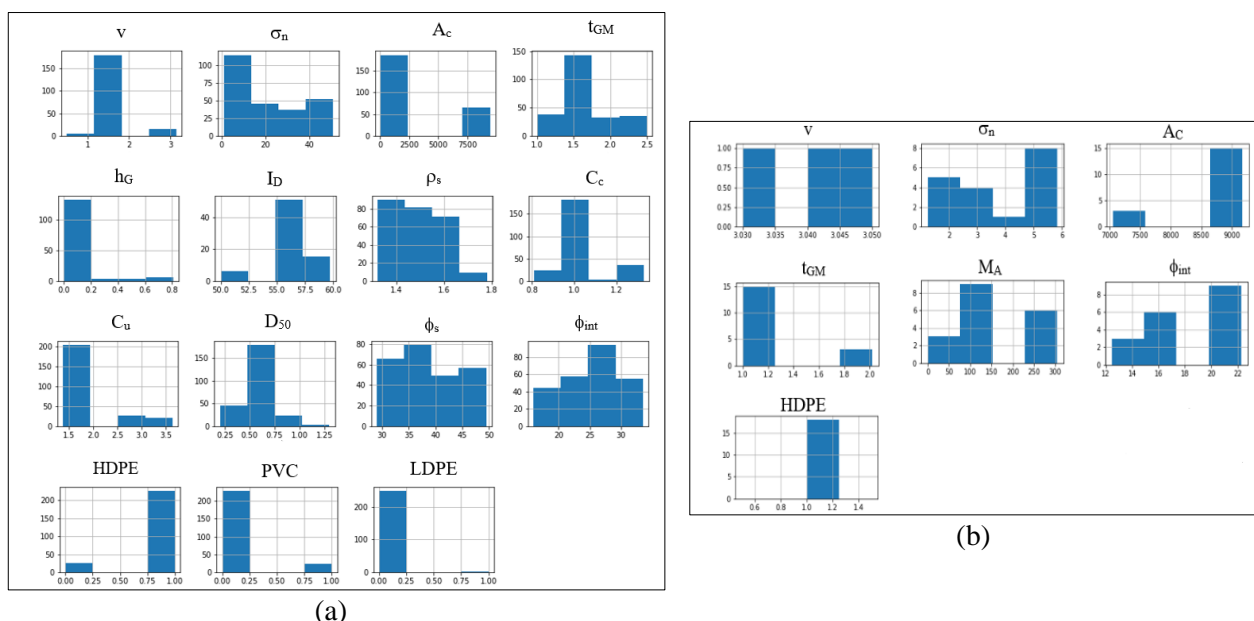


Figura 2 – Histogramas das variáveis estudadas nas interfaces – (a) SG-PI e (b) GG-PI.

3.3 Comparação entre os resultados obtidos para os ensaios CDC e PI

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

Conforme explanado no início deste artigo, o banco de dados avaliado foi composto por ensaios CDC e PI, considerando interfaces de geomembranas com areias e geotêxteis. A Tabela 3.1 mostra um resumo comparativo dos resultados das correlações obtidas para as interfaces SG-CDC e SG-PI, as quais foram obtidas pela Matriz de Correlação de Pearson.

Tabela 3.1 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa utilizando a Matriz de Pearson.

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
	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
	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 3.1, 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 (Igzin, 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).

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

Em relação às interfaces com geotêxteis, a Tabela 3.2 mostra um resumo comparativo dos resultados das correlações obtidas para as interfaces GG-CDC e GG-PI, também obtidos pela Matriz de Correlação de Pearson.

Tabela 3.2 – Comparação por interface das correlações obtidas nesta pesquisa utilizando a Matriz de Pearson

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
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 (Igzin, 1997; Igzin & 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.

4 CONCLUSÕES

Este artigo avaliou o uso da estatística para estudar a influência de diferentes variáveis na resistência ao cisalhamento da interface entre areias e geotêxteis em contato com diferentes tipos de geomembranas. Com base nos resultados, as seguintes conclusões podem ser ressaltadas:

- Foi observado que os parâmetros que mais influenciam a resistência da interface nos testes SG-CDC foram o ângulo de atrito do solo (ϕ_s) e a altura da rugosidade da geomembrana (h_G). Também foi possível concluir que, para interfaces SG-CDC, 7,15% das correlações exibiram correlações fortes e moderadas, 35,70% foram fracas e 50% das correlações foram muito fracas.
- Por outro lado, para o ensaio de plano inclinado (PI), foi observado que os parâmetros que mais influenciaram a resistência da interface para SG-PI foram h_G e ϕ_s . Para a interface SG-PI, apenas h_G mostrou uma correlação forte, com 29%, 50% e 14% das variáveis classificadas como moderadas, fracas e muito fracas, respectivamente.
- É importante destacar que os parâmetros que apresentam correlações muito fracas podem indicar que o comportamento em relação a ϕ_{int} é não linear. Estudos adicionais seriam necessários para investigar esse comportamento, pois a não linearidade não foi o foco deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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.
- 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 (2022): 751–763.
- Adbdelaal, 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 (2022): 55-68.
- Bacas, A. B. M. (2009). Comportamiento resistente al deslizamiento de geosintéticos. Tesis de Doctorado. Universidad de Cantabria. España. 474p.
- Bilgin, Ö; P.E., M. ASCE. (2011). Viscoelastic Contact Characteristics of Soil-Geomembrane Interfaces. *Geo-Frontiers*, v. (2011): 2092-2100.
- Blond, E; Elie, G. (2006). Interface shear-strength properties of textured polyethylene geomembranes. 59th Canadian Geotechnical Conference, Quebec, Canada, (59): 898-904.
- 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*, 20 (2022), 100-111.
- Costa Junior, S. L; Lodi, P. C. (2023). Assessment of the interface shear strength between HDPE geomembrane and tropical soil by the direct shear test. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, São José dos Pinhais, v.16, n.8, p. 9902-9915.

- 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, 245259.
- 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.
- Ferreira, F. B; Fernandes, F; Vieira, C. S. (2023). Soil-geosynthetic interface shear behaviour: Insights from inclined plane and direct shear tests. *Geosynthetics: 12 International Conference on Geosynthetics - Leading the Way to a Resilient Planet*, v. (1): 418-224.
- Frost, D.J., Kim, D. & Lee, S.W. (2012). Microscale geomembrane-granular material interactions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 16(1): 79-92.
- 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.
- Igzin, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 (2020):100403
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. (1): 705-710.
- Tanga, A. T. (2022). Machine learning for geomembrane-sand interface analysis. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 84 p.
- 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.
- 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.