



Resistência de Interface entre Geomembrana Texturizada e Argila: Ensaio e Comparaçāo com Bibliografia

André Coutinho Lima

Mestrando, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, andrecoutinho@coc.ufrj.br

Alessandra Conde de Freitas

Professora Titular, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, alessandracfreitas@poli.ufrj.br

Cláudio Fernando Mahler

Professor Titular, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mahler@coc.ufrj.br

RESUMO: Geossintéticos são amplamente utilizados em obras geotécnicas, sendo comum a existência de uma superfície de contato com o solo, situação em que deve-se avaliar a resistência de interface. Esse parâmetro não pode ser controlado industrialmente, uma vez que depende do material em contato com o geossintético, reforçando a importância de ensaios. Nesse sentido, o presente trabalho buscou avaliar a relação entre uma argila residual do Vale do Paraíba Fluminense, classificada pelo SUCS como CH, e uma geomembrana bitexturizada com espessura de 2,0 mm fabricada pelo processo de matriz plana. Foram consultadas pesquisas com condições de contorno similares, realizados ensaios de caracterização do solo (granulometria, limites de Atterberg e compactação Proctor Normal), e ensaios de cisalhamento direto no solo e na interface. Estes últimos foram realizados em caixa 60 mm x 60 mm, em amostras preparadas na umidade ótima e massa específica seca máxima, com e sem inundação do corpo de prova por 24 horas. Os resultados verificados estiveram dentro da bibliografia, e indicaram que a interface reduziu os parâmetros de resistência em relação ao solo, com ϕ' de 25,1° e adesão de 19,8 kPa, e ϕ' de 25,2° e adesão de 11,6 kPa (sem e com inundação, respectivamente).

PALAVRAS-CHAVE: Resistência de interface, Cisalhamento direto, Argila, Geomembrana de PEAD

ABSTRACT: Geosynthetics are widely used in geotechnical works, often involving contact with soil, where interface shear strength must be evaluated. This parameter cannot be industrially controlled, as it depends on the material type, reinforcing the need for testing. Therefore, this study investigated the interaction between a residual clay from the Paraíba Valley in Rio de Janeiro State, classified by SUCS as CH, and a 2.0 mm thick double-textured geomembrane manufactured using a flat-die matrix extrusion process. Literature with similar boundary conditions was reviewed, and laboratory tests were conducted, including soil characterization (grain size distribution, Atterberg limits and Standard Proctor compaction) and direct shear tests were performed on soil and at the interface. Shear tests were performed in a 60 x 60 mm box on specimens prepared at optimum moisture content and maximum dry unit weight, with and without 24-hour inundation. Results aligned with literature values and showed that the interface reduced shear strength parameters compared to the soil alone, with $\phi' = 25.1^\circ$ and adhesion (a') of 19.8 kPa, and $\phi' = 25.2^\circ$ and $a' = 11.6$ kPa (without and with flooding, respectively).

KEYWORDS: Interface shear strength, Direct shear, Clay, HDPE geomembrane

1 INTRODUÇÃO

Geossintéticos são frequentemente utilizados em obras geotécnicas. Eles desempenham funções diversas, como separação, filtração, drenagem, reforço, controle de processos erosivos e barreiras de fluidos e gases. Nessa última finalidade, um exemplo possível é a utilização de geossintéticos na base de aterros sanitários, visando proteger o solo de fundação da migração de percolados da massa de resíduos aterrada. Segundo Lavoie *et al.* (2020), o mais utilizado em escala global é a geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), cuja permeabilidade é muito baixa, tipicamente entre 10^{-11} cm/s e 10^{-13} cm/s.



2025

Nessas obras tende a ocorrer, portanto, o contato entre a geomembrana e o solo. Sánchez (2018) ressalta que a resistência de interface é mobilizada pelo deslocamento relativo entre o geossintético e o material envolvente. Costa Junior *et al.* (2023) pontuam que o ângulo de atrito de interface e a adesão entre as duas camadas dependem tanto das características da geomembrana (matéria-prima e textura do material) quanto do solo (granulometria, teor de umidade, grau de compactação, entre outros).

Dessa forma, o processo industrial de fabricação das geomembranas confere controle tecnológico acerca de todas as propriedades dos geossintéticos, com exceção da resistência ao cisalhamento de interface, como sinalizado por Punetha *et al.* (2017). Ou seja, a identificação dessas propriedades em uma determinada obra depende, idealmente, da execução de ensaios específicos com seus materiais constituintes.

Estudos acerca do tema são verificados mundialmente, como o trabalho de Zhang *et al.* (2020), que avaliou 62 deslizamentos em aterros sanitários envolvendo 22 países, verificando que superfícies de ruptura ao longo da interface com a impermeabilização representaram a terceira maior causa de incidentes (11,28% dos casos). No Brasil, tal aspecto ganha relevância considerando que aterros sanitários representam a maior parcela de destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU), responsáveis por cerca de 61% do total de resíduos gerados em 2022, conforme estudo da ABREMA (2023).

2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

A motivação para o presente trabalho surgiu de uma dificuldade na verificação de bibliografias relacionadas a parâmetros de resistência de interface entre geomembranas e solos residuais argilosos para o estado do Rio de Janeiro, mais especificamente na microrregião do Vale do Paraíba Fluminense.

Dessa forma, visando contribuir para a ampliação do banco de dado de resistência de interface entre solos argilosos e geomembranas texturizadas, o presente trabalho objetivou realizar uma revisão bibliográfica de casos similares e verificação dos parâmetros de resistência do caso em estudo, isto é, interface entre geomembrana texturizada e solo residual classificado pelo SUCS como CH (argila de alta compressibilidade), comparando os valores encontrados com a bibliografia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Tabela 1 apresenta um resumo de pesquisas que avaliaram a resistência de interface entre solos argilosos e geomembranas texturizadas: Lopes e Silva (2024) e Costa Junior e Lodi (2023) com solos do estado de São Paulo e Chiarello (2022) do Rio Grande do Sul.

Vale citar que diversos outros trabalhos abordam o tema, porém considerando condições de contorno diferentes, como solos arenosos e misturas diversas, tanto no Brasil como em outros países, como China, Turquia e Índia. Esses trabalhos são melhor detalhados em Lima (2025).

Tabela 1. Pesquisas que avaliaram a resistência de interface solo argiloso x geomembrana texturizada.

Pesquisa	Interface estudada	Ensaios Realizados	Principais Resultados
Lopes & Silva (2024)	Geomembrana de PEAD texturizada de 1,5mm e argila siltosa laterítica de Ribeirão Preto, SP	Cisalhamento direto de grandes dimensões (300mm x 300mm), com tensões normais de 50, 100 e 150kPa. O teste foi realizado sem saturação; Granulometria do solo, limites de atterberg e compactação Proctor Normal	- O ensaio em solo indicou coesão de 8,8kPa e ϕ' de 27,0°; - A interface geomembrana texturizada- solo indicou adesão de 9,1kPa e ϕ' de 31,1°;
Costa Junior & Lodi (2023)	Geomembrana de PEAD texturizada (matriz plana e matriz balão) 2,00mm e solo argilo-arenoso coluvial, laterítico, tropical, típico da cidade de Campinas (SP)	Cisalhamento direto convencional (100mm x 100mm), com tensões normais de 55, 110 e 165kPa. As amostras de solo ficaram uma semana saturadas com água ou chorume; Caracterização do solo (peso específico natural, peso específico dos grãos, umidade de campo, índice de vazios, porosidade, grau de saturação, limites de Atterberg, granulometria com e sem defloculante e Proctor Normal	- Geomembranas texturizadas indicaram ϕ' entre 15,9 e 34,5°, e adesão entre 4,6 e 25,3kPa; - Para as geomembranas texturizadas, em ambos os casos a saturação com chorume reduziu o ângulo de atrito e aumentou a adesão;



Pesquisa	Interface estudada	Ensaios Realizados	Principais Resultados
Chiarello (2022)	Geomembrana de PEAD (2,00mm) e solo classificado pelo SUCS como argila inorgânica de alta plasticidade (CH) e pelo MCT como solo laterítico argiloso, do município Minas do Leão, RS	Cisalhamento direto convencional e médio (300mm x 300mm) com tensões normais de 25, 50, 100, 200 e 400kPa. Algumas geomembranas foram expostas ao chorume do aterro por 6 meses, bem como foram exumadas geomembranas de lagoas de lixiviados; Caracterização do solo (granulometria com e sem defloculante, massa específica, limites de Atterberg, granulometria, Proctor Normal, Mini-MCV e perda de massa por imersão);	- Geomembranas texturizadas indicaram ϕ' entre 17,8 e 36,2°, e adesão entre 0,0 e 18,4kPa;

4 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1 GEOMEMBRANA

A geomembrana utilizada no presente trabalho foi fornecida por um aterro sanitário, conforme ilustrado na Figura 1. Trata-se de um geossintético constituído de polietileno de alta densidade (PEAD) de espessura 2mm, bitexturizada com altura de aspereza maior ou igual a 0,4mm e fabricada pelo processo de matriz plana.

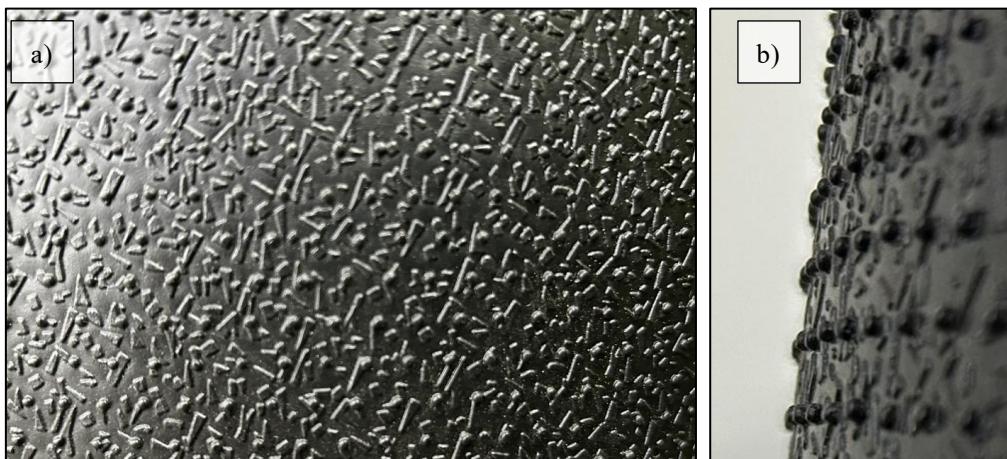


Figura 1. Geomembrana utilizada no estudo: a) vista de frente, b) vista de lado, com destaque para a textura.

4.2 SOLO

O solo foi retirado da jazida de um aterro sanitário localizado na microrregião do Vale do Paraíba Fluminense. Vale pontuar que a metodologia operacional para utilização do solo como camada impermeabilizante ou proteção mecânica consiste na retirada do material, usualmente por maquinário de grande porte, como escavadeira, transporte por caminhões para o local de aplicação ou para bota-espera, ajuste da umidade, espalhamento e compactação. Dessa forma que, visando reproduzir a situação de campo, não houve preocupação em retirar uma amostra indeformada.

Vale contextualizar que do ponto de vista geológico, o mapeamento do Serviço Geológico do Brasil (2024) sinaliza que a área tem seu substrato composto por rochas do Complexo Paraíba do Sul, mais especificamente da unidade Sillimanita Gnaisse, constituídas por gnaisse pelíticos, ricos em granada e sillimanita, sendo esta última a mais representativa do substrato do terreno do empreendimento.



Figura 2. Jazida do solo utilizado no presente trabalho, com destaque para os taludes locais.

4.3 ENSAIOS

A amostra de ensaio foi preparada com a homogeneização de cerca de 40kg de solo. Foram realizados, então, ensaios de granulometria, compactação Proctor normal e limites de *Atterberg*, seguindo as normas NBR ABNT orientativas.

Os ensaios de cisalhamento direto em solo e na interface foram realizados em caixa de cisalhamento 60 mm x 60 mm. Nesse sentido, destaca-se que a norma brasileira (ABNT NBR 12.957-1, 2022) segue a diretriz da ASTM D5321 (2021) e indica a realização do ensaio em caixa com medida igual ou superior a 300mm x 300mm. Vale pontuar que a norma brasileira busca verificar a resistência de interface entre geomembranas e uma areia média padronizada. Koerner (2005), por outro lado, indica que para ensaios de cisalhamento direto entre interfaces de geomembranas e areias, siltes ou argilas, as caixas tradicionais de 100mm x 100m são adequadas. O autor ressalta que caixas de maiores dimensões somente são necessárias em casos de avaliações de britas ou geossintéticos de maiores dimensões, como geogrelhas, por exemplo.

As tensões normais utilizadas foram de 50 kPa, 150 kPa, 225 kPa e 300 kPa. Os corpos de prova submetidos ao cisalhamento foram previamente preparados a partir de ensaios de compactação, visando atingir a umidade ótima e a massa específica seca máxima, e então foram extraídos do cilindro do ensaio de compactação proctor normal diretamente para a caixa de cisalhamento. Importante ressaltar que foram consideradas duas condições de contorno no ensaio: solo compactado na umidade ótima (w_{ot}), e solo compactado na umidade ótima com inundação do corpo de prova por 24 horas, visando simular uma eventual saturação do meio. As Figuras 3 a 8 ilustram parte dos ensaios. Um detalhamento mais ampliado pode ser verificado em Lima (2025).



Figura 3. Granulometria: sedimentação.



Figura 4. Limite de liquidez: corte com cinzel.



Figura 5. Compactação: corpo de prova extraído na umidade ótima.



Figura 6. Extração de corpo de prova do cilindro compactado para caixa 60 mm x 60mm.



Figura 7. Cisalhamento direto: caixa bipartida (60mm x 60mm) com geomembrana fixada.



Figura 8. Corpo de prova pós ensaio: destaque para ranhuras causadas pela textura da geomembrana.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A curva de distribuição granulométrica indicou as frações de cada material, a saber: 0,4% de pedregulho, 41,3% de areia, 8,2% de silte e 50,1% de argila.

Os ensaios de limite de atterberg indicaram um limite de plasticidade de 19,0% e um limite de liquidez de 51,0%. O índice de plasticidade, obtido pela subtração do limite de liquidez pelo limite de plasticidade é, portanto, de 32,0%.

O resultado indicou um solo classificado pelo SUCS como CH, isto é, argila inorgânica de alta plasticidade. Vale pontuar, entretanto, que o solo ficou no limiar entre CH e CL (argila inorgânica de baixa a média liquidez). Nesse sentido, o ábaco estabelece um limite empírico para a categorização, isto é, LL de 50%, porém na natureza a variação acontece de forma gradual. É possível, portanto, que na prática seu comportamento esteja em uma faixa de transição entre média e alta liquidez.

O ensaio de compactação encontrou o par umidade ótima (w_{ot}) 25,4% e massa específica seca máxima (γ_{dmax}) 1,515 g/cm³. As curvas de distribuição granulométrica e compactação são apresentadas em detalhe no trabalho de Lima (2025), assim como imagens ilustrativas do processo de ensaio.

5.2 CISALHAMENTO DIRETO

A Figura 9 apresenta o gráfico da tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para a interface entre geomembrana e solo na umidade ótima. É possível perceber que não houve uma tensão cisalhante de pico bem definida, ela seguiu aumentando conjuntamente com o deslocamento horizontal, em um comportamento de *strain-hardening*, similar ao verificado no trabalho de Chiarello (2022).



No presente trabalho, foi considerada a tensão cisalhante máxima como referência para a construção da envoltória de resistência, contudo, seria possível estabelecer critérios adicionais, como, por exemplo, De Campos e Carrillo (1995). Comparações acerca das metodologias podem ser verificadas em Lima (2025).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados encontrados, enquanto a Figura 10 ilustra as envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb, sendo que os ensaios em solo estão em amarelo, enquanto a interface geomembrana/solo encontra-se em preto. As linhas contínuas representam os ensaios na umidade ótima e as linhas tracejadas o ensaio com compactação na umidade ótima e corpo de prova inundado por 24 horas.

Verifica-se que os ensaios em solo apresentaram, em geral, resistência superior aos ensaios de interface, de acordo com o esperado, indicando que a interface geomembrana/solo configura um plano de fraqueza. Também é possível perceber que os ensaios na umidade ótima exibiram maior coesão/adesão, enquanto os ensaios inundados apresentaram maior ângulo de atrito. Para o intervalo estudado (50 kPa a 300 kPa), as envoltórias na umidade ótima indicaram resistências superiores, de acordo com o esperado.

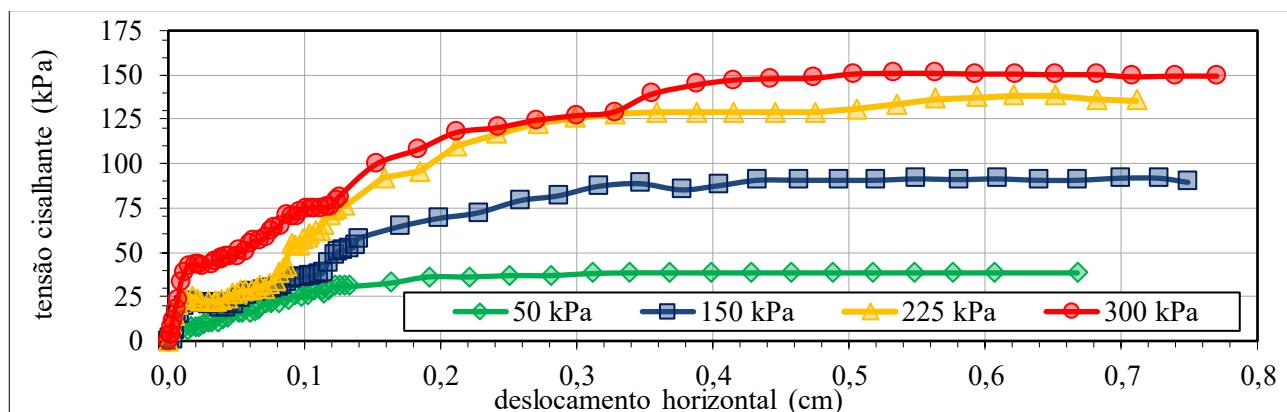


Figura 9. Cisalhamento direto geomembrana/solo w_{ot} : tensão cisalhante por deslocamento horizontal.

Tabela 2. Comparação dos resultados: ensaios de cisalhamento direto em solo e em geomembrana

Ensaio	ϕ' ($^{\circ}$)	$\tan \phi'$	c' ou a' (kPa)	Equação da envoltória
Solo wot	25,4	0,475	28,4	$y = 0,475x + 28,4$
Solo inundado	27,7	0,525	13,5	$y = 0,525x + 13,5$
GMB/Solo wot	25,1	0,469	19,8	$y = 0,469x + 19,8$
GMB/Solo inundado	25,2	0,471	11,6	$y = 0,471x + 11,6$

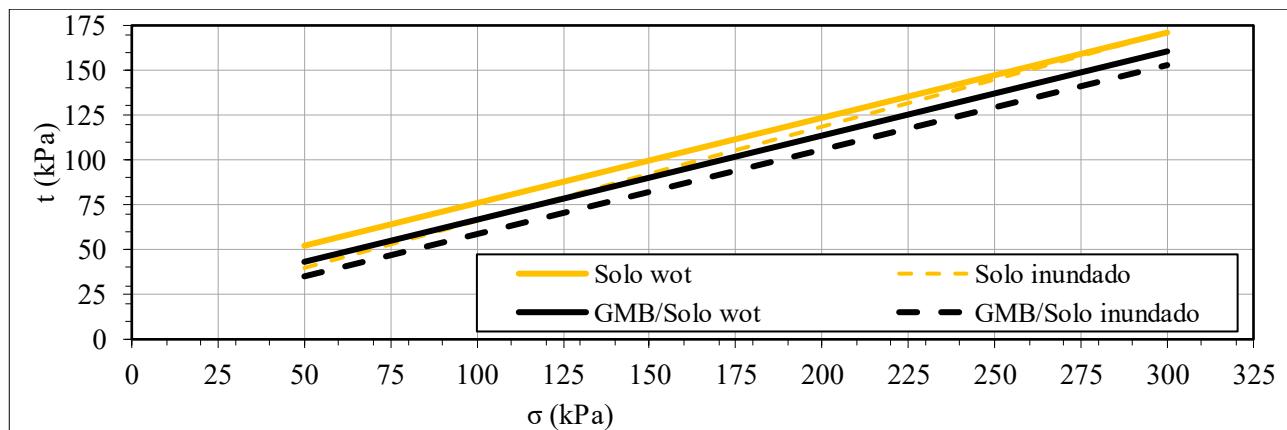


Figura 10. Cisalhamento direto geomembrana/solo w_{ot} : tensão cisalhante por tensão normal.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS E BIBLIOGRAFIA

A Figura 11 apresenta uma comparação entre as envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb para os resultados verificados em bibliografia e no presente estudo. As pesquisas são agrupadas por escala de cor,

sendo Lopes e Silva (2024) laranja, Costa Junior e Lodi (2023) em tons de verde e Chiarello (2022) em tons de azul. As linhas contínuas representam ensaios realizados na umidade ótima, enquanto as linhas tracejadas ensaios inundados. Os resultados da presente pesquisa estão indicados em preto

Lopes e Silva (2024) avaliaram uma geomembrana de PEAD de 1,5mm texturizada, sem saturação do meio. No trabalho de Costa Junior e Lodi (2023) foram realizados ensaios em geomembrana texturizada por matriz balão, inundando o meio com água ou com chorume, todos os itens detalhados na legenda. Chiarello (2022), por outro lado, avaliou geomembranas pelo cisalhamento direto convencional (100mm x 100mm), e pelo cisalhamento direto médio (300mm x 300mm), CDM. Também estudou uma geomembrana danificada, isto é, uma geomembrana que ficou por 7 meses exposta em um poço de bombeamento de chorume. Nesse caso a legenda também detalha as particularidades de cada ensaio. Vale ressaltar que para definir a equação da envoltória, a autora considerou quatro critérios: De Campos e Carrillo (1995), ajuste das curvas, ajuste hiperbólico + De Campos e Carrillo (1995), ajuste das curvas + ajuste hiperbólico. Nesse sentido, no gráfico são apresentados os resultados dos limites inferiores e superiores de cada ensaio realizado pela autora.

É possível perceber que a faixa de resultados encontrada nos ensaios ficou dentro do verificado nas referências bibliográficas, fator coerente, dado que foram compilados valores para geomembranas texturizadas e solos similares quanto à classificação granulométrica.

Em todo caso, vale sinalizar que mesmo para condições de contorno próximas, há uma ampla faixa de valores, conforme ilustrado graficamente. Por exemplo, para uma tensão normal de 100 kPa, a resistência ao cisalhamento pode variar entre 35 kPa e 90 kPa. Lima (2025) avalia o impacto da variação da resistência ao cisalhamento em termos de análises de estabilidade de aterros sanitários.

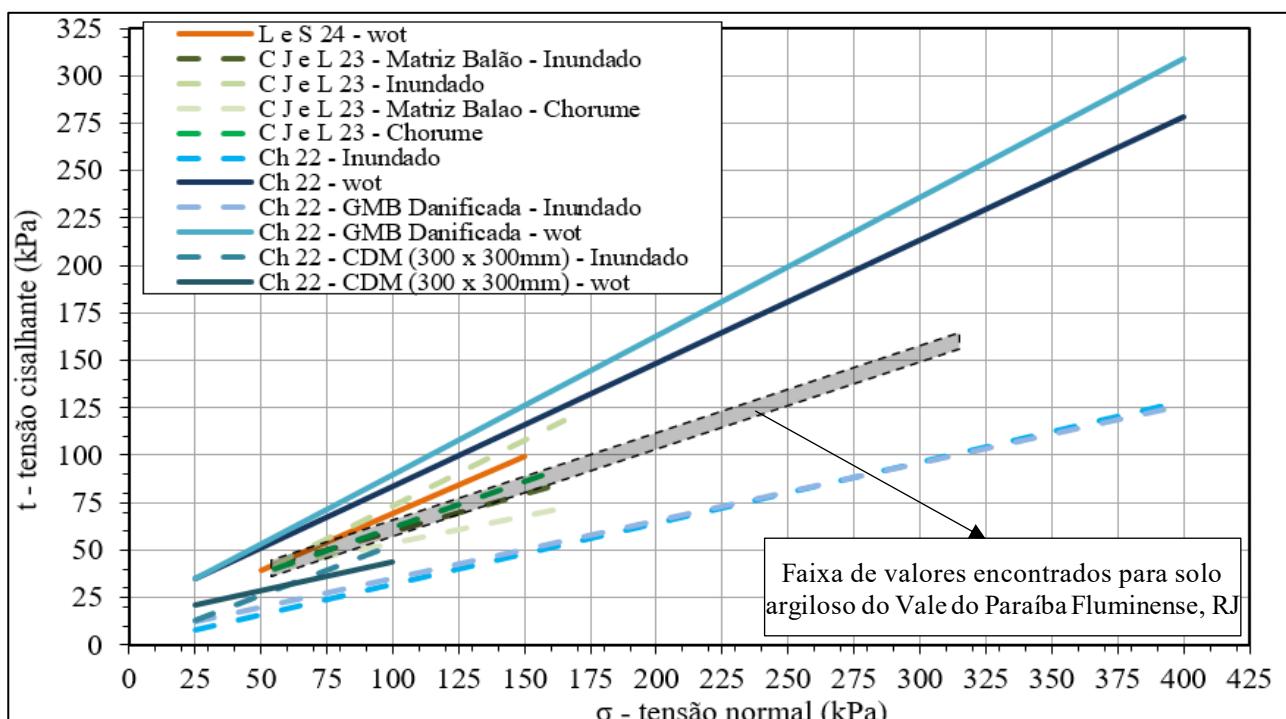


Figura 11. Envoltórias de resistência de interface entre solos argilosos e geomembranas texturizadas.

6 CONCLUSÕES

Com base nos ensaios realizados, podem-se traçar as seguintes conclusões:

- O ensaio de cisalhamento direto 60 mm x 60 mm indicou, para o solo estudado (argila residual CH do Vale do Paraíba, RJ), ϕ' de 25,4° e c' de 28,4 kPa no ensaio com umidade ótima, e ϕ' de 27,7° e c' de 13,5 kPa em ensaio com inundação por 24 horas;
- O ensaio de cisalhamento direto para a interface entre o solo e a geomembrana texturizada de 2mm matriz plana indicou ϕ' de 25,1° e a' de 19,8 kPa no ensaio com umidade ótima, e ϕ' de 25,2° e a' de 11,6 kPa em ensaio com inundação por 24 horas;



- 2025
- c) Os ensaios em solo apresentaram, em geral, resistência superior aos ensaios de interface, de acordo com o esperado, indicando que a interface geomembrana/solo configura um plano de fraqueza;
 - d) A faixa de resultados encontrada nos ensaios ficou dentro do verificado nas referências bibliográficas, fator coerente, dado que foram compilados valores para geomembranas texturizadas e solos similares quanto à classificação granulométrica;
 - e) Mesmo para condições de contorno próximas, há uma ampla faixa de valores. Por exemplo, para uma tensão normal de 100 kPa, a resistência ao cisalhamento pode variar entre 35 kPa e 90 kPa de acordo com as bibliografias consultadas. Tal resultado reforça a importância de realizar ensaios específicos para uma determinada obra, de acordo com seus materiais e suas condições de contorno.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à COPPE, à UFRJ e, principalmente, aos técnicos de laboratório que possibilitaram este artigo: Carlinhos, Luizão, Serginho e Washington.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2023). ASTM D 3080M-23: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 12.957-1. *Geossintéticos – Determinação das características de atrito Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto*.
- Chiarello, G. P. (2022) *Interação de Interface entre Solo e Geomembranas por meio de Ensaio de Cisalhamento Direto*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, 117p.
- Costa Junior, S. L. da., Lodi, P. C. (2023) Assessment of the interface shear strength between HDPE geomembrane and tropical soil by the direct shear test. In: *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, São José dos Pinhais, v.16, n.8, p. 9902-9915.
- Costa Junior, S. L. da, Ardila, M.A.A., Palomino, C.F., Silva, J. L. (2023) Analysis of Textured Geomembrane–Soil Interface Strength to Mining Applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9 (3).
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics*. Fifth ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 796 p.
- Lavoie, F. L., Kobelnik, M., Valentin, C. A., Silva, J. L. da. (2020) Durability of HDPE geomembranes: an overview. In: *Química Nova*, V. 43, p. 656-667.
- Lima, A. C. (2025). *Resistência de Interface entre Geomembrana Texturizada e Argila: Ensaio com Solo do Vale do Paraíba Fluminense, RJ, e Revisão Bibliográfica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ, RJ), Rio de Janeiro, 115p..
- Lopes, H. R., Silva, J. L. da. (2024) Influência da Textura na Geomembrana na Resistência de Interface com Solo Argiloso. in: COBRAMSEG 2024, *Anais*....
- Punetha, P., Mohanty, P. & Samanta, M. (2017) Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test. In: *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3): p. 197–210.
- Sánchez, N. P. (2018) *Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília (UnB, DF), Brasília, 168 p.
- SGB (Serviço Geológico do Brasil). (2024) *Serviço Geológico do Brasil - CPRM - GeoSGB*. Disponível em: <<https://geoportal.sgb.gov.br/geosgb/>>. Acesso em: Outubro de 2024.
- Zhang, Z., Wang, Y., Fang, Y., Pan, X., Zhang, J., Xu, H. (2020) Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. in: *Waste Management & Research*, Volume 38, p. 1389 – 1404.