

Influência da Textura de Geomembranas na Resistência de Interface com Solo Argiloso

Henrique Rodrigues Lopes

Mestre, EESC/USP, São Carlos/SP, Brasil, E-mail: eng.henriquelopes@usp.br

Jefferson Lins da Silva

Professor Associado, EESC/USP, São Carlos/SP, Brasil, E-mail: jefferson@sc.usp.br

RESUMO: Apesar da crescente utilização de geossintéticos em obras de engenharia, o comportamento dos materiais poliméricos inseridos no solo é complexo, e a diversidade de produtos disponíveis no mercado dificulta a padronização e previsão do comportamento da interação. Portanto, compreender os principais mecanismos físicos envolvidos em uma interação solo-geossintético, bem como as características físicas e mecânicas dos materiais que mais impactam nos resultados, é essencial para promover interações mais eficientes e contribuir para o desenvolvimento de geossintéticos com propriedades direcionadas. Neste artigo foram realizados ensaios para estimar a resistência de interface envolvendo um solo laterítico coesivo e dois tipos de geomembranas, uma lisa e outra texturizada, em equipamento de cisalhamento direto com a caixa de cisalhamento medindo 300 mm x 300 mm em um modelo de área reduzida. O objetivo do estudo foi mensurar a influência do tipo de superfície da geomembrana nos parâmetros de resistência de interface solo-geossintético. Os resultados indicaram que o ângulo de atrito de interface diminuiu de 31.1° na interface solo-geomembrana texturizada para 8.9° na interface solo-geomembrana lisa. A redução também ocorreu para a adesão, esta de 9.1kPa tornou-se nula. Além disso, os resultados evidenciaram que a interação entre o solo coesivo e a geomembrana texturizada apresentou parâmetros de resistência de interface superiores aos parâmetros de resistência interna do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Cisalhamento direto, Argila laterítica, Parâmetros de interface, Interação solo-geossintético, Solo tropical.

ABSTRACT: Despite the increasing use of geosynthetics in engineering works, the behavior of polymeric materials inserted into the soil is complex, and the variety of products available in the market hinders standardization and prediction of interaction behavior. Therefore, understanding the main physical mechanisms involved in soil-geosynthetic interaction and the physical and mechanical characteristics of the materials that most impact the results is essential to promote more efficient interactions and contribute to the development of geosynthetics with targeted properties. This article conducted tests to estimate interface resistance involving cohesive lateritic soil and two types of geomembranes, one smooth and the other textured, using a direct shear apparatus with a shear box measuring 300 mm x 300 mm in a reduced area model. The study aimed to measure the influence of the geomembrane surface type on soil-geosynthetic interface resistance parameters. The results indicated that the interface friction angle decreased from 31.1° in the textured soil-geomembrane interface to 8.9° in the smooth soil-geomembrane interface. The reduction also occurred for adhesion, which decreased from 9.1 kPa to zero. Additionally, the results showed that the interaction between cohesive soil and textured geomembrane resulted in interface resistance parameters superior to the internal soil resistance parameters.

KEYWORDS: Direct shear, Lateritic clay, Interface parameters, Soil-geosynthetic interaction, Tropical soil.

1 INTRODUÇÃO

Os geossintéticos, definidos por Martins (2014) como "materiais feitos de polímeros sintéticos que são colocados sobre ou dentro dos solos e podem desempenhar várias funções", destacam as vantagens do avanço tecnológico na engenharia de materiais, especialmente na engenharia geotécnica. Além de possibilitar a substituição de recursos naturais, os geossintéticos melhoram a resposta do solo às demandas específicas.

Segundo Effendi (2011) e Fleming et al. (2006), o emprego de materiais geossintéticos tem se tornado cada vez mais comum em obras de engenharia civil, com ênfase nas geomembranas, que se destacam como um dos geossintéticos mais amplamente utilizados em diversas aplicações. A principal função de uma geomembrana é servir como barreira para o fluxo de líquidos e/ou vapor, embora também possa desempenhar o papel de material de separação.

De acordo com Zhou et al. (2020), as geomembranas podem ser feitas de diferentes polímeros, incluindo poliéster (PES), polietileno (PE) e polipropileno (PP). A mais comum é a geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), caracterizada por ser um material com baixíssima permeabilidade e com alta resistência, feita de resina de polietileno com uma fórmula específica e processamento adicional. Existem dois tipos específicos: as geomembranas lisas e as texturizadas.

Segundo Junior (2023), ao instalar a geomembrana sobre a camada de solo, uma zona de contato entre os materiais é gerada. Nesta zona de contato, a tensão normal, também chamada de tensão confinante, contribui para a surgência de uma força que impede o movimento relativo entre os dois materiais, conhecida como força de cisalhamento. A resistência ao cisalhamento é uma função que depende do ângulo de atrito entre os dois materiais, chamado de ângulo de atrito de interface, e da adesão, que é um parâmetro que se assemelha a coesão aparente do solo. Estes parâmetros dependem tanto das características do solo (granulometria, teor de umidade, grau de compactação, entre outros) quanto da geomembrana (matéria-prima e textura do material).

A utilização dos geossintéticos oferece inúmeras vantagens para os envolvidos na indústria da construção civil, incluindo empreiteiros, projetistas e proprietários (MARTINS, 2014). Ainda que haja inúmeras vantagens na utilização do geossintético, vale ressaltar que existe a necessidade de uma melhor compreensão do comportamento destes materiais quando inseridos na massa de solo (interação entre solo e geossintético). A vasta quantidade de materiais disponíveis em mercado, com propriedades e finalidades distintas, promove diversas interfaces de estudo com diferentes mecanismos de interação e comportamento.

Dessa forma, neste artigo são apresentados os resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados utilizando um equipamento em grande escala (300 mm x 300 mm) com condições de contorno bem estabelecidas e fundamentadas em aplicações práticas para um solo coesivo (argila laterítica).

O presente artigo teve como objetivo mensurar a influência do tipo de superfície da geomembrana nos parâmetros de resistência de interface solo-geossintético.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Diante a natureza do estudo, o método de pesquisa tem uma abordagem quantitativa através de pesquisa básica experimental com objetivo exploratório, ou seja, é um estudo desenvolvido de forma prática em laboratório. Os materiais utilizados na campanha de ensaios foram: dois tipos de geomembranas de PEAD, uma lisa e outra texturizada, e um tipo de solo, argila laterítica.

2.1 Informações gerais sobre os materiais

2.1.1 Solo

As amostras do solo coesivo (argila laterítica) foram coletadas no Distrito de Bonfim Paulista, na cidade de Ribeirão Preto – SP, providas de uma escavação para subsolo de um edifício comercial, na região Sul, com coordenadas aproximadas de 21°13'28.2"S 47°48'55.8"W.

A Figura 1 ilustra o solo, enquanto a Tabela 1 fornece a caracterização do solo.



Figura 1. Solo coesivo.

Tabela 1. Características do solo coesivo.

| Propriedades | Normativa | Solo |
|---|-----------|---------------------------|
| Distribuição de tamanho de partícula | NBR 7181 | Argila siltosa laterítica |
| Peso específico aparente seco máximo – $\gamma_{d,max}$ | NBR-7182 | 1.58 g/cm ³ |
| Umidade ótima – ω_{ot} | NBR-7182 | 27.8% |
| Limite de plasticidade – LP | NBR 7180 | 54 |
| Limite de liquidez – LL | NBR 6459 | 30 |

2.1.2 Geomembranas

Para a campanha de ensaios, foram empregados dois tipos de geomembranas, lisa (GM1) e texturizada (GM2), ambas de PEAD (Polietileno de Alta Densidade). Essas geomembranas são fabricadas utilizando o processo de extrusão por matriz plana. A Figura 2 ilustra essas amostras de geomembrana, enquanto as propriedades são apresentadas na Tabela 2.



Figura 2. Amostras das geomembranas.

Tabela 2. Características das geomembranas.

| Propriedades | Normativa | GM1 | GM2 |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| Tipo | - | Lisa | Texturizada |
| Material de fabricação | - | PEAD | PEAD |
| Espessura | ASTM D5994 | 1.5 mm | 1.5 mm |
| Altura de aspereza | ASTM D7466 | - | 0.4 mm |
| Densidade | ASTM D1505/D792 | 0.94 g/cm ³ | 0.94 g/cm ³ |
| Resistência à tração na ruptura | ASTM D6693 | 40 kN/m | 16 kN/m |
| Resistência ao Puncionamento | ASTM D4833 | 480 N | 400 N |
| Resistência ao Rasgo | ASTM D1004 | 187 N | 187 N |

2.2 Método experimental

2.2.1 Dispositivo de ensaio

O equipamento de cisalhamento direto utilizados neste estudo foi desenvolvido no Laboratório de Geossintéticos da Universidade de São Paulo em São Carlos – SP. O equipamento é de grandes dimensões, e os ensaios são conduzidos com meias-caixas de mesma área (ensaio de área reduzida), 300 mm x 300 mm, com adaptações feitas com base nas especificações recomendadas pela NBR ISO 12957-1. A Figura 3 ilustra o equipamento.

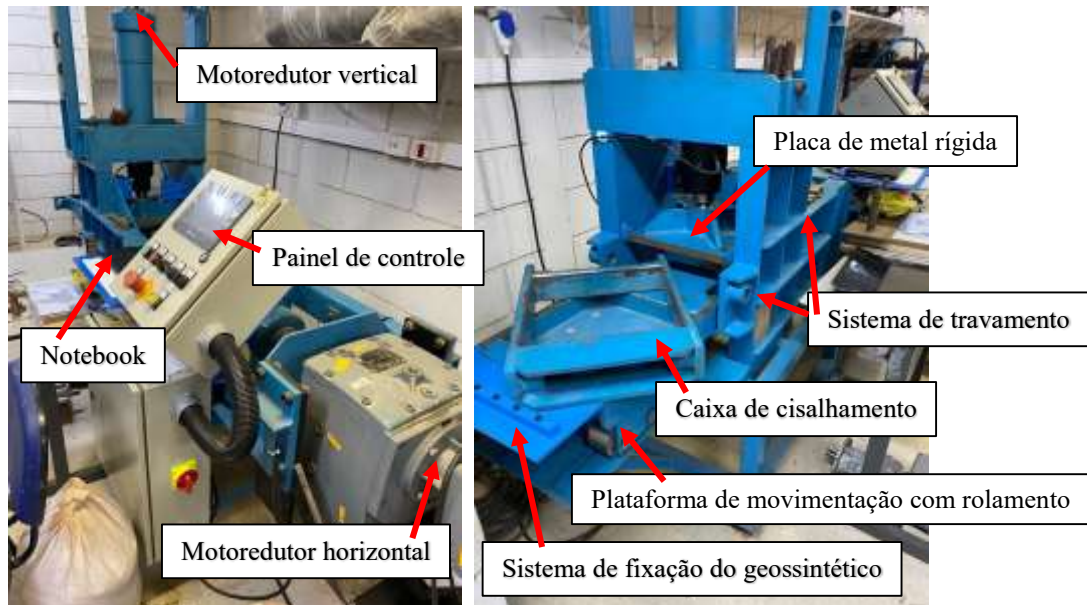


Figura 3. Detalhes do equipamento.

2.2.2 Procedimentos de ensaio

A montagem do ensaio envolve, em termos simplificados, colocar duas camadas da mistura de solo ou do suporte rígido na meia-caixa inferior. Posteriormente, o geossintético é fixado nesta caixa, as partes metálicas de ambas as caixas são lubrificadas, e a meia-caixa superior é posicionada sobre a inferior, preenchendo-a com duas camadas de solo. A compactação deve ser realizada entre as camadas.

Uma vez que a montagem do ensaio estiver completa, as caixas são movidas para o pistão de carga horizontal, fixadas com um pino, e através do sistema automatizado, é iniciada a descida da placa rígida responsável por aplicar a carga vertical.

A carga vertical é aplicada por 60 min antes de iniciar o movimento horizontal da meia-caixa inferior. Este intervalo de tempo é suficiente para estabilizar os deslocamentos verticais da placa de carga. O deslocamento máximo, correspondente ao fim do ensaio, é de 50 mm (16.5% da largura da caixa).

Para a mesma interface, são necessários quatro ensaios para determinar o envelope de resistência. Esses ensaios devem ser conduzidos com tensões verticais constantes de 50, 100 e 150 kPa, com dois ensaios a 100 kPa. Após a conclusão de cada ensaio, os materiais devem ser removidos e uma nova montagem deve ser realizada.

2.2.3 Condições de ensaio

As condições de contorno para os ensaios são as seguintes:

- Velocidade padrão de 1 mm/min;
- Tensões normais de 50, 100 e 150 kPa;
- Para solos coesivos: Teor de umidade ótimo ($\pm 1\%$) e compactação padrão Proctor de 98% ($\pm 2\%$);
- Fim do ensaio: 50 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas três tipos de interações: a primeira sendo “solo – solo”, a segunda “solo – GM1”, e a terceira entre o “solo – GM2”.

3.1 Solo – Solo

Conforme mostrado na Figura 4.a, o ensaio de cisalhamento direto revelou um comportamento de ruptura plástica, com a ausência de uma distinção clara entre a tensão cisalhante de pico e a residual. A tensão de cisalhamento foi crescente à medida que o ensaio se desenvolveu, tendendo a se estabilizar ao longo do tempo.

Os parâmetros de resistência foram derivados da envoltória de resistência Mohr-Coulomb apresentada na Figura 4.b, com um ângulo de atrito interno de pico de 27.0° e uma coesão de 8.9 kPa.

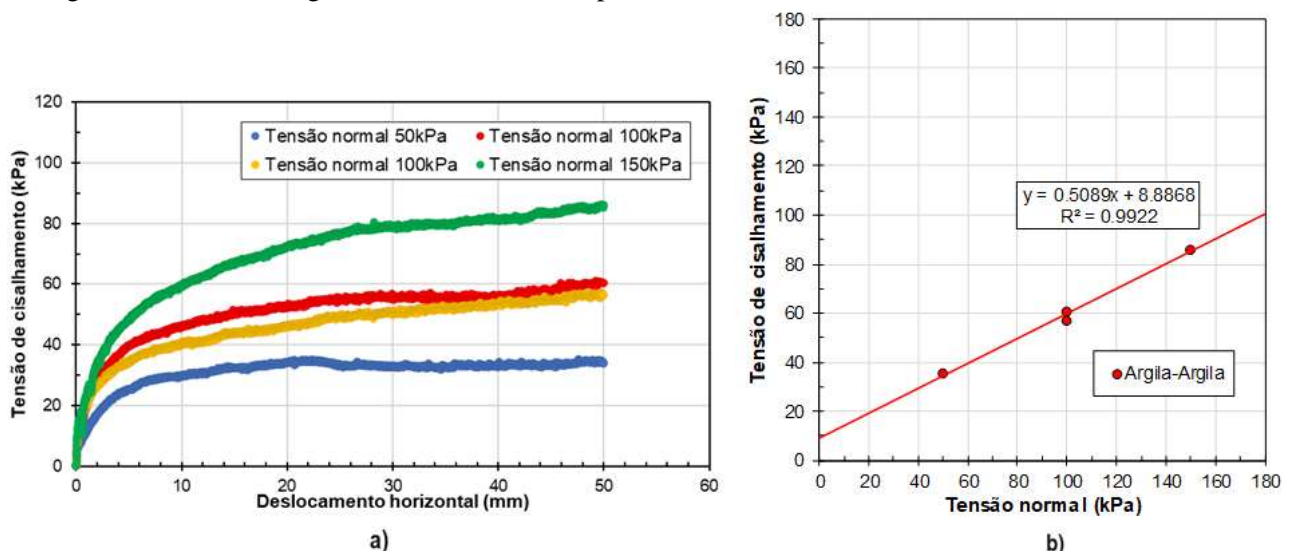


Figura 4. Interface Argila-Argila (GC=98% P.N.). a) Deslocamento horizontal x Tensão de Cisalhamento; b) Envoltória de resistência de pico.

3.2 Solo – GM1

Como ilustrado na Figura 5.a, foi verificado que o ensaio de cisalhamento direto forneceu uma curva com uma distinção bem definida entre a tensão de cisalhamento de pico máxima e a tensão de cisalhamento residual. Vale ressaltar que nenhuma resistência de interface foi mobilizada para a tensão normal de 50 kPa, tornando necessária a realização de um ensaio com uma tensão de 75 kPa.

Os parâmetros de resistência foram derivados da envoltória de resistência Mohr-Coulomb apresentada na Figura 5.b, com um ângulo de atrito de interface de 8.9° e uma adesão nula.

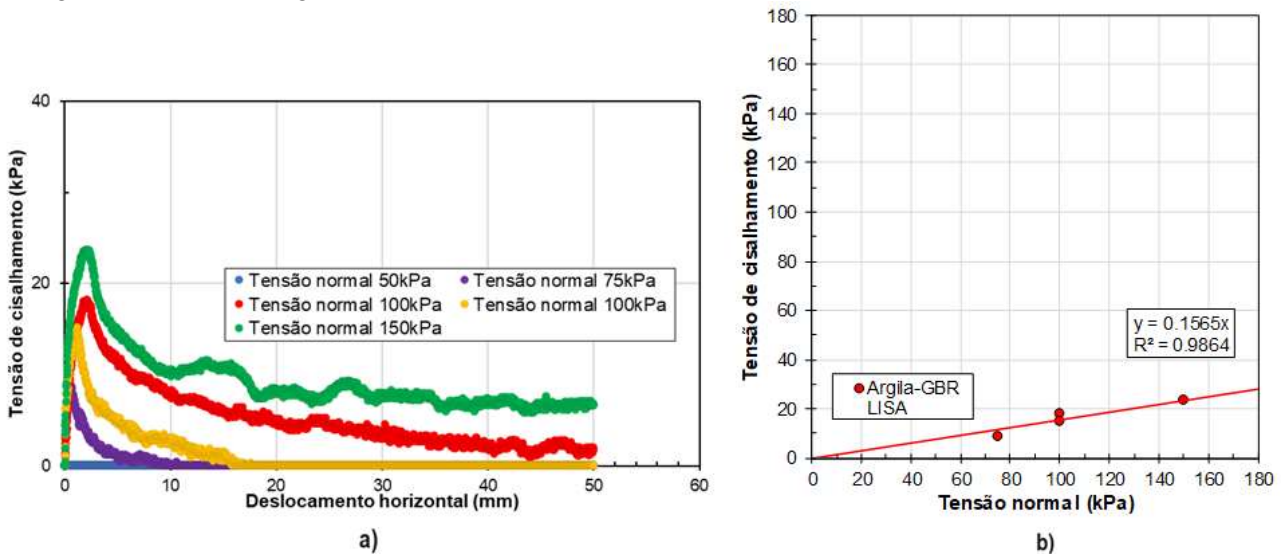


Figura 5. Interface Argila-Geomembrana lisa (GC=98% P.N.). a) Deslocamento horizontal x Tensão de Cisalhamento; b) Envoltória de resistência de pico.

3.3 Solo – GM2

Foi observado, conforme apresentado na Figura 6.a, que o ensaio de cisalhamento direto não apresentou uma tensão de cisalhamento de pico evidente para 100 e 150 kPa; ao contrário, a tensão foi aumentando progressivamente até o final do ensaio, sem a ocorrência de uma ruptura visível. Por outro lado, no ensaio com tensão confinante de 50 kPa a tensão cisalhante tendeu a constância próximo do fim do ensaio, entre 45-50 mm, contudo, também sem ruptura visível, representando uma “ruptura plástica”.

Os parâmetros de resistência foram derivados da envoltória de resistência Mohr-Coulomb apresentada na Figura 6.b, com um ângulo de atrito de interface de 31.1° e uma adesão de 9.1 kPa.

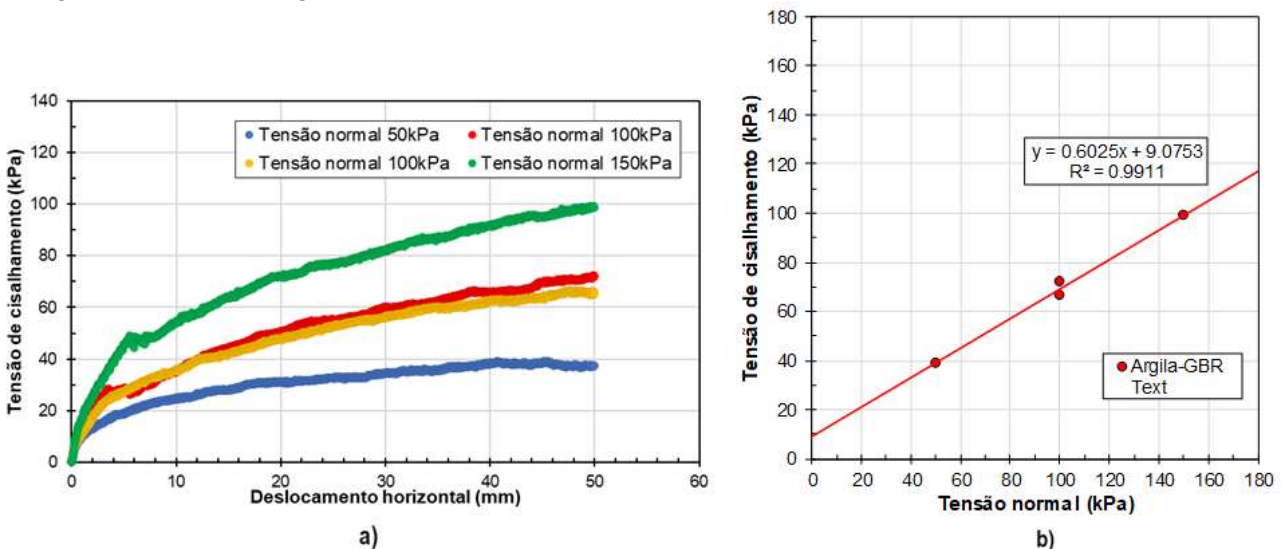


Figura 6. Interface Argila-Geomembrana texturizada (GC=98%P.N.). a) Deslocamento horizontal x Tensão de Cisalhamento; b) Envoltória de resistência de pico.

3.4 Comparação dos resultados

Ao comparar os parâmetros de interface com os parâmetros internos do solo, os quais foram obtidos pela envoltória de resistência Mohr-Coulomb conforme apresentada na Figura 7, observou-se que para a interação “solo – GM1”, houve uma redução de 67.0% no ângulo de atrito e uma redução completa (100%) na adesão. Para a interação “solo – GM2”, houve um aumento de 15.2% no ângulo de atrito e um aumento de 2.2% na adesão.

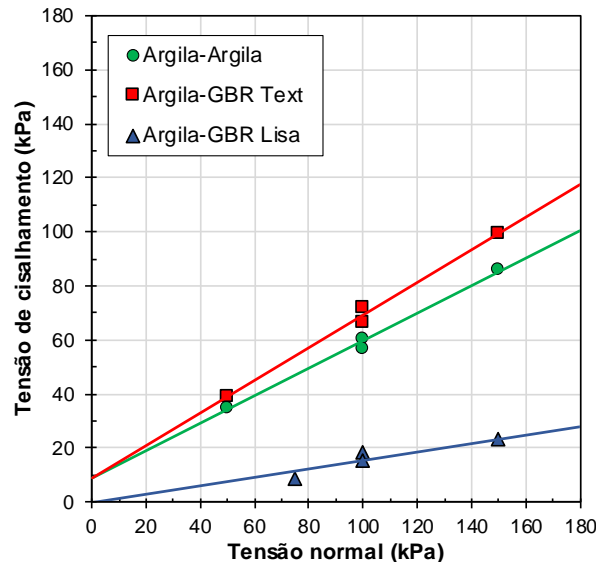


Figura 7. Comparação entre envoltórias de resistência.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados desta investigação e dentro das limitações impostas pelo número de ensaios realizados, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Para a interação com a geomembrana lisa, o solo argiloso laterítico não apresentou bom desempenho; a eficiência da interação foi baixa, anulando qualquer efeito da adesão, e o ângulo de atrito de interface diminuiu em 67% em comparação com o ângulo de atrito interno do solo coesivo. Além disso, em baixas tensões de confinamento, não foi observada mobilização de resistência;
- A interface do geossintético influenciou significativamente os resultados da interação. Para a geomembrana texturizada a eficiência foi maior, sendo que nesta o ângulo de atrito de interface aumentou em 15.2% e a adesão em 2.2% em comparação com o ângulo de atrito interno do solo coesivo;
- O ângulo de atrito de interface diminuiu de 31.1° na interface “solo – GM2” para 8.9° na interface “solo – GM1”. A redução também ocorreu para a adesão, esta de 9.1kPa tornou-se nula;
- Os resultados evidenciaram que a interação entre o solo argiloso laterítico e a geomembrana texturizada apresentou parâmetros de resistência de interface superiores aos parâmetros de resistência interna do solo.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à CAPES, pelo financiamento da pesquisa; ao Laboratório de Geossintéticos da EESC/USP, por toda a estrutura disponibilizada; a empresa OBER S/A pelos geossintéticos fornecidos; ao Edifício VOX Corporate, pela amostra de solo doada e ao laboratório técnico UNITEC Engenharia Civil, por ter se prontificado em realizar os ensaios de caracterização da amostra de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR ISO 12957-1. *Geossintéticos – Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2020) ASTM D792. Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement. In: ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM International (2021) ASTM D1004. Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting. In: ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM International (2018) ASTM D1505. Standard test method for density of plastics by the density-gradient technique. In: ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM International (2020) ASTM D4833. Standard test method for index puncture resistance of geomembranes and related products. In: ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM International (2021) ASTM D5994. Standard test method for measuring core thickness of textured geomembranes. In: ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM International (2020) ASTM D6693. Standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes. In: ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM International (2015) ASTM D7466. Standard Test Method for Measuring Asperity Height of Textured Geomembranes. In: ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Effendi, R. Interface friction of smooth geomembranes and Ottawa sand. *Info Teknik*, 12 (1), 61 – 72, 2011.
- Fleming, I.R., Sharma, J.S., Jogi, M.B. (2006). Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, No. 5, pp. 274-284, Elsevier.
- Junior, S.L.C., Ardila, M.A.A., Palomino, C.F., Silva, J. L. Analysis of Textured Geomembrane–Soil Interface Strength to Mining Applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* (2023) 9:3, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00423-w>.
- Martins, J. C. A. Caracterização de interfaces entre geossintéticos através de ensaios de corte direto cíclico. 2014. 77 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Materiais e Processos de Construção) – Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Porto, 2014.
- Zhou, L., Zhu, Z., Yu, Z., Zhang, C. Shear Testing of the Interfacial Friction Between an HDPE Geomembrane and Solid Waste. *Mater.*, 13, 1 – 16, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13071672>.