XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/25

Avaliação da Resistência de Interface Solo-Geomembrana e Multicamadas sob Altas Tensões Normais

Ana Laura Cassini Souza Bernardinelli
Engenheira de pesquisa de aplicação, AzulPack TechGround, Jacutinga, Brasil, laura.cassini@techground.com.br

André Coutinho Lima
Supervisor de Projetos, ALTA Geotecnia, Rio de Janeiro, Brasil, andre.lima@altageotecnia.com

Débora Toledo Vieira da Silva
Assistente de Engenharia, AzulPack TechGround, Jacutinga, Brasil, debora.toledo@techground.com.br

Daniel Moreno Meucci
Gerente de Engenharia, AzulPack TechGround, Jacutinga, Brasil, daniel.meucci@techground.com.br

RESUMO: A estabilidade de estruturas geotécnicas que incorporam sistemas de impermeabilização está diretamente relacionada ao comportamento mecânico das interfaces formadas entre geomembranas e os materiais adjacentes. A resistência ao cisalhamento mobilizada nessas interfaces resulta da interação entre as propriedades da geomembrana e as características do solo ou de outros geossintéticos em contato, sendo usualmente determinada por meio de ensaios laboratoriais específicos. Embora a literatura apresente diversos estudos sobre resistência de interface, muitos deles consideram faixas limitadas de tensões normais, o que pode reduzir a representatividade dos resultados frente às condições reais de campo. Em aplicações como aterros sanitários e pilhas de lixiviação, entretanto, as interfaces podem ser submetidas a níveis de tensão significativamente elevados, exigindo avaliações experimentais sob condições mais representativas. Neste contexto, este trabalho investigou a resistência de interface entre uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) bitexturizada, com espessura de 2,0 mm, solo compactado e geotêxtil não tecido. Ensaios de cisalhamento direto foram realizados em caixa de grandes dimensões (300 mm × 300 mm), conforme a ASTM D5321, considerando tensões normais entre 200 kPa e 800 kPa, em condições seca e saturada. Os resultados evidenciaram diferenças relevantes nos parâmetros de resistência definidos pelo critério de Mohr–Coulomb.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência de interface, Cisalhamento direto, Geomembrana PEAD Texturizada, Altas Tensões Normais.

ABSTRACT: The stability of geotechnical structures incorporating lining systems is strongly influenced by the mechanical behavior of interfaces formed between geomembranes and adjacent materials. The shear strength mobilized at these interfaces results from the interaction between the geomembrane properties and the characteristics of the soil or other geosynthetics in contact and is commonly determined through laboratory testing. Although numerous studies addressing interface shear strength are available in the literature, many investigations consider relatively limited ranges of normal stresses, which may reduce the representativeness of the results when compared to field loading conditions. In applications such as landfill liner systems and heap leach pads, however, interfaces may be subjected to significantly higher stress levels, requiring experimental evaluation under more representative loading conditions. In this context, this study investigated the interface shear strength between a double-sided textured high-density polyethylene (HDPE) geomembrane, 2.0 mm thick, compacted soil, and a nonwoven geotextile. Large-scale direct shear tests were conducted using a shear box measuring 300 mm × 300 mm in accordance with ASTM D5321, under normal stresses ranging from 200 kPa to 800 kPa and under both dry and saturated conditions. The results indicated significant differences in the shear strength parameters defined by the Mohr–Coulomb criterion.

KEYWORDS: Interface friction, Direct shear test, Textured HDPE geomembrane, High normal stresses.

1 INTRODUÇÃO

Geomembranas são comumente empregadas em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários, atuando como barreiras destinadas a impedir a percolação do lixiviado para o solo de fundação. No Brasil, os aterros sanitários representam a principal forma de destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU), recebendo cerca de 61% do total gerado em 2022 (ABREMA, 2023). Esse panorama difere daquele observado em países com políticas mais consolidadas de gestão de resíduos. Na União Europeia, por exemplo, a disposição em aterros foi reduzida de 64% para 26% entre 1995 e 2015, acompanhada pelo aumento da reciclagem, compostagem e incineração (Scarlat et al., 2019). A elevada dependência de aterros sanitários no Brasil reforça a necessidade de projetos geotécnicos que garantam não apenas desempenho ambiental, mas também estabilidade estrutural adequada.

Nos sistemas de base do aterro, as geomembranas são frequentemente associadas a solos compactados e a outros geossintéticos, formando interfaces críticas do ponto de vista mecânico. A estabilidade global do maciço pode ser governada pelo comportamento dessas superfícies de contato, especialmente sob elevadas tensões normais. Assim, a resistência de interface constitui um dos parâmetros mais relevantes no dimensionamento de aterros sanitários e estruturas correlatas.

A resistência mobilizada na interface depende do deslocamento relativo entre os materiais em contato (Sánchez, 2018) e é influenciada tanto pelas características superficiais da geomembrana — como textura e processo de fabricação — quanto pelas propriedades do solo, incluindo granulometria, teor de umidade e grau de compactação (Costa Junior et al., 2023). Trata-se, portanto, de um parâmetro de natureza complexa e específico para cada combinação de materiais, não podendo ser definido exclusivamente com base em propriedades individuais.

Estudos internacionais evidenciam a importância dessa temática. Zhang et al. (2020), ao analisarem 62 deslizamentos em aterros sanitários em 22 países, identificaram que rupturas ao longo de interfaces associadas aos sistemas de impermeabilização representaram 11,28% dos casos avaliados. Esses dados demonstram que o comportamento das interfaces pode desempenhar papel determinante nos mecanismos de instabilidade.

Apesar da ampla utilização de ensaios de cisalhamento direto para determinação da resistência de interface, grande parte das pesquisas disponíveis concentra-se em tensões normais relativamente baixas, geralmente inferiores a 400 kPa. Entretanto, estruturas modernas, como células de grande altura e pilhas de lixiviação, estão sujeitas a níveis de carregamento significativamente superiores, demandando investigações experimentais sob condições mais representativas de campo.

Diante da escassez de estudos na literatura que abordem parâmetros de resistência de interface entre geomembranas e solos residuais argilosos do Vale do Paraíba Fluminense (RJ), o presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência de interface entre uma geomembrana texturizada e diferentes configurações de contato, considerando tensões normais variando entre 200 kPa e 800 kPa. Foram realizados três programas experimentais conforme a ASTM D5321, utilizando caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões (300 mm × 300 mm), além de ensaios de caracterização de uma argila residual da região. A adoção de elevadas tensões normais associada ao uso de amostras de grandes dimensões permite a obtenção de parâmetros mais representativos das condições de campo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Condições dos ensaios do programa experimental

2.1.1 Geomembrana

Para a campanha de ensaios, foi empregada a geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), com espessura nominal de 2,0 mm, obtida por meio do processo de extrusão com matriz balão com todos os parâmetros atendendo à GRI-GM13 (2025). O material apresenta superfície texturizada em ambas as faces e os valores de altura de aspereza referentes aos três programas experimentais (GMB1, GMB2 e GMB3) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Altura de aspereza da Geomembrana (mm) - ASTM D7466.

Amostra	GMB 1	GMB 2	GMB 3
1	0,850	0,825	0,775
2	0,850	0,850	0,800
3	0,850	0,825	0,825
4	0,875	0,825	0,800

2.1.2 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma jazida associada a um aterro sanitário localizado no estado do Rio de Janeiro, na região Sul Fluminense, mais especificamente na microrregião do Vale do Paraíba Fluminense. Após a coleta, o material foi devidamente homogeneizado para garantir maior uniformidade nas amostras empregadas no programa experimental. A Figura 1 apresenta o solo após o processo de homogeneização, pronto para o início da execução dos ensaios, enquanto a Tabela 2 fornece a caracterização do solo segundo Lima (2025).



Figura 1. Solo proveniente da jazida do aterro sanitário após homogeneização, preparado para a execução dos ensaios (Lima, 2025).

Tabela 2. Características dos solos residuais argilosos.

Propriedades	Normativa	Solo
Distribuição de tamanho de partícula	NBR-7181	Argila inorgânica de alta plasticidade
Peso específico aparente seco máximo – $\gamma d,max$	NBR-7182	1,515 g/cm³
Umidade ótima – ωot	NBR-7182	25,4%
Limite de plasticidade – LP	NBR 7180	19%
Limite de liquidez – LL	NBR 6459	51%
Índice de plasticidade (IP)	NBR 7180/6459	32%

As tensões normais aplicadas nos ensaios de cisalhamento direto solo–solo foram de 50 kPa, 150 kPa, 225 kPa e 300 kPa. Os resultados dos ensaios também foram apresentados por Lima (2025). A partir de amostras compactadas na umidade ótima e na massa específica seca máxima, os corpos de prova foram extraídos diretamente do cilindro do ensaio de compactação Proctor Normal e posicionados na caixa de cisalhamento. Foram analisadas duas condições de contorno: (1) solo compactado na umidade ótima e (2) solo compactado na umidade ótima submetido à inundação por 24 horas, com o objetivo de simular uma possível condição de saturação.

A relação tensão cisalhante–tensão normal, os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto solo–solo são, para a resistência do solo compactado na umidade ótima, ângulo de atrito de interface de 25,4° e uma adesão de 28,4 kPa e para o solo compactado na umidade ótima submetido à inundação por 24 horas, ângulo de atrito de interface de 27,7° e uma adesão de 13,5 kPa. Maiores detalhes e informações são apresentados em Lima (2025).

2.1.3 Geotêxtil

Em relação ao geotêxtil utilizado em uma das combinações de interface, o mesmo é um geotêxtil não tecido de poliéster, com gramatura igual ou superior a 700 g/m². O material foi fornecido por um fabricante e

utilizado com o objetivo de representar uma condição usual em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários, nos quais o geotêxtil atua como camada de proteção da geomembrana.

2.2 Condições dos ensaios do programa experimental

Para a realização dos ensaios de cisalhamento de interface entre solo e geomembrana e de múltiplas camadas (solo, geomembrana e geotêxtil) foi utilizada uma caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões, especialmente projetada para investigações envolvendo interfaces solo–geossintético, conforme a norma ASTM D5321. O equipamento apresenta área efetiva de cisalhamento de 300 mm × 300 mm e é equipado com atuadores de alta capacidade, capazes de aplicar e controlar tensões normais elevadas, compatíveis com aquelas verificadas em obras geotécnicas de grande porte, como pilhas de lixiviação, células de aterros sanitários e estruturas de contenção.

Os ensaios foram conduzidos nos laboratórios do TRI, localizados na Califórnia (EUA). O sistema da caixa de cisalhamento direto conta com controle automatizado de carregamento, o que possibilita maior estabilidade das condições experimentais, elevada repetibilidade e maior confiabilidade dos resultados. Adicionalmente, o equipamento permite a realização de ensaios sob diferentes condições de contorno, ampliando a representatividade dos parâmetros de resistência de interface obtidos. Foram realizados três programas experimentais de cisalhamento de interface, considerando tensões normais de 200, 400 e 800 kPa, cujas configurações são apresentadas a seguir.

(1) Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição seca:

- Velocidade de cisalhamento: 1 mm/min;
- Solo compactado na umidade ótima, com grau de compactação correspondente a 95% do Proctor padrão;
- Condicionamento: ensaio realizado em condição seca, com aplicação da tensão normal por 1 hora antes do início do cisalhamento;
- Deslocamento máximo do ensaio: 76,2 mm.

(2) Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada:

- Velocidade de cisalhamento: 0,1 mm/min;
- Solo compactado na umidade ótima, com 95% de compactação Proctor padrão;
- Condicionamento: após a aplicação da tensão normal, a interface permaneceu inundada por 24 horas antes da realização do cisalhamento;
- Deslocamento máximo do ensaio: 76,2 mm.

(3) Solo compactado – geotêxtil não tecido (fixado) vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada

- Velocidade de cisalhamento: 0,1 mm/min;
- Solo compactado na umidade ótima, com grau de compactação de 80% do Proctor padrão;
- Condicionamento: após a aplicação da tensão normal, a interface foi mantida inundada por um período de 24 horas antes do cisalhamento;
- Deslocamento máximo do ensaio: 76,2 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada condição dos ensaios do programa experimental são apresentados e discutidos os resultados.

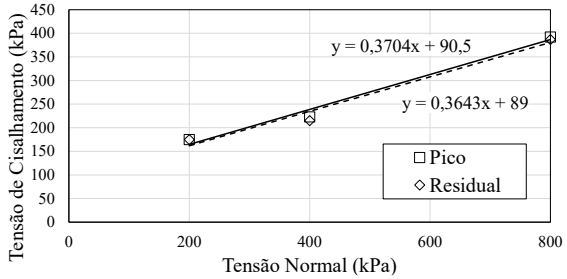
3.1 Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição seca:

Para este ensaio, foi utilizada a interface composta por solo local compactado e geomembrana de PEAD texturizada com espessura de 2,0 mm, em condição seca. O condicionamento consistiu na aplicação da carga normal por um período de 1 hora antes do início do cisalhamento. O ensaio foi conduzido com velocidade de cisalhamento de 1,0 mm/min, adotada com base nas características do solo e nas condições do ensaio, buscando-se um comportamento predominantemente drenado.

A adoção de 95% do grau de compactação do Proctor Normal teve como objetivo assegurar a representatividade das condições reais de obra, uma vez que compactações mais elevadas tendem a não ser

alcançadas de forma homogênea em campo e podem resultar em parâmetros de resistência de interface artificialmente elevados.

A Figura 2a. apresenta a relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal obtida nos ensaios realizados, incluindo envoltórias para a resistência de pico com um ângulo de atrito de interface de 20,3° e uma adesão de 90,5 kPa e residual com um ângulo de atrito de interface de 20° e uma adesão de 89 kPa. Os parâmetros de resistência de pico e residual apresentaram valores próximos, reduzindo a sensibilidade das análises à escolha do critério resistente. A Figura 2b. apresenta individualmente cada tensão normal a resistência de interface e a secante do ângulo.



(a)

	Tensão Normal (kPa)	200	400	800
Pico	Tensão de Cisalhamento (kPa)	175	223	392
	Angulo Secante (deg.)	41,1	29,1	26,1
Residual	Tensão de Cisalhamento (kPa)	175	215	387
	Angulo Secante (deg.)	41,1	28,3	25,8

(b)

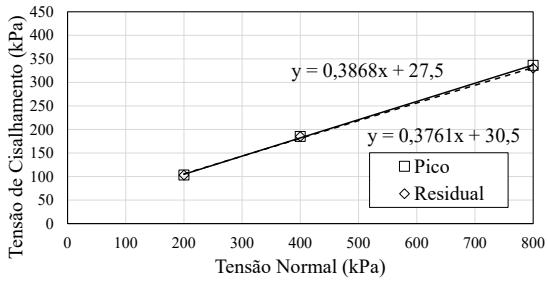
Figura 2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface do programa experimental (1): (a) Relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal; (b) Resistência de interface e ângulo de atrito secante determinados para diferentes níveis de tensão normal.

Conforme esperado, o aumento da tensão normal resultou em incremento da resistência ao cisalhamento na interface. Observou-se, entretanto, uma redução progressiva do ângulo de atrito secante com o aumento da tensão normal, evidenciando o efeito da adesão, que implica em comportamento não linear típico de interfaces solo–geomembranas texturizadas sob elevados níveis de carregamento. Tomando como referência a condição de 200 kPa, verificaram-se reduções relativas do ângulo de atrito secante da ordem de 30% e 35% para tensões normais de 400 kPa e 800 kPa, respectivamente. Ainda que a tensão normal tenha sido aumentada em aproximadamente 100% e 300% em relação à condição de referência, a redução do ângulo de atrito secante mostrou-se relativamente moderada, indicando que a capacidade resistente da interface permanece elevada mesmo sob níveis de carregamento significativamente superiores.

3.2 Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada:

No programa experimental (2), avaliou-se a interface entre solo local compactado e geomembrana de PEAD texturizada, com espessura de 2,0 mm, sob condição inundada. Antes do início do cisalhamento, a carga normal foi aplicada e mantida por um período de 24 horas, com a interface completamente inundada, de modo a permitir a acomodação do sistema e a dissipação de pressões neutras. O cisalhamento foi realizado a uma taxa de deslocamento de 0,01 mm/min, definida em função das propriedades do solo e das condições do ensaio, visando a obtenção de um comportamento predominantemente drenado.

O grau de compactação adotado, correspondente a 95% do Proctor Normal, assim como no programa experimental anterior, foi selecionado com o propósito de reproduzir condições típicas de campo, uma vez que níveis mais elevados de compactação dificilmente são alcançados de forma uniforme durante a execução das obras e podem conduzir à superestimação dos parâmetros de resistência de interface. A Figura 3a. ilustra a variação da tensão cisalhante em função da tensão normal obtida nos ensaios realizados, incluindo envoltórias para a resistência de pico com um ângulo de atrito de interface de 21,1° e uma adesão de 27,5 kPa e residual com um ângulo de atrito de interface de 20,6° e uma adesão de 30,5 kPa. Assim como realizado para o ensaio (1), a Figura 3b. apresenta, de forma individualizada, os valores de resistência de interface e da secante do ângulo de atrito correspondentes a cada nível de tensão normal analisado.



(a)

		Tensão Normal (kPa)	200	400	800
Pico		Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	336
		Angulo Secante (deg.)	27,3	24,8	22,4
Residual		Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	330
		Angulo Secante (deg.)	27,2	24,8	22,4

(b)

Figura 3. Parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface do programa experimental (2): (a) Relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal; (b) Resistência de interface e ângulo de atrito secante determinados para diferentes níveis de tensão normal.

Para as condições de ensaio (1) e (2), observou-se que, embora no ensaio (1) o solo tenha sido disposto na caixa superior em condição seca, com aplicação da carga normal por apenas 1 hora antes do cisalhamento, e no ensaio (2) a interface tenha sido mantida inundada por 24 horas, com adoção de uma velocidade de cisalhamento significativamente menor, os valores dos ângulos de atrito de pico e residual apresentaram magnitudes semelhantes em ambas as condições.

Por outro lado, verificou-se uma redução significativa da adesão na condição (2), inundada e conduzida com baixa velocidade de cisalhamento, sendo o valor aproximadamente 65% inferior àquele obtido na condição (1). Do ponto de vista físico, a inundação promove a eliminação da sucção matricial e reduz os mecanismos de engrenamento mecânico inicial entre o solo e a geomembrana, resultando em menores valores de adesão, enquanto o atrito de interface permanece como o principal mecanismo resistente.

Sob a ótica da estabilidade de taludes, esses resultados indicam que, mesmo em condição inundada e sob parâmetros de ensaio mais conservadores, o comportamento resistente da interface solo–geomembrana permanece predominantemente governado pelo atrito, com valores de ângulo de atrito relativamente estáveis entre as condições analisadas. Apesar da redução observada na adesão na condição inundada, o valor segue significativo, isto é, próximo a 46 kPa. Além disso, para tensões normais mais elevadas, onde a parcela de resistência mobilizada pelo ângulo de atrito passa a ser preponderante, os resultados encontrados são próximos ao verificado em (1). Nesse contexto, a proximidade entre os parâmetros de resistência de pico e residual aliada à predominância do atrito de interface, reduz a sensibilidade das análises de estabilidade à escolha do critério resistente, resultando em avaliações mais robustas e seguras para o dimensionamento de taludes em obras geotécnicas que incorporam sistemas de impermeabilização.

Para o ensaio (2), tomando como referência a condição de 200 kPa, observou-se que o ângulo de atrito secante manteve aproximadamente 90% e 80% do valor de referência para tensões normais de 400 e 800 kPa, respectivamente. Ainda que a tensão normal tenha sido aumentada em aproximadamente 100% e 300% em relação à condição de referência, a redução do ângulo de atrito secante mostrou-se relativamente pequena, indicando que a capacidade resistente da interface permanece elevada, mesmo sob níveis de carregamento significativamente superiores.

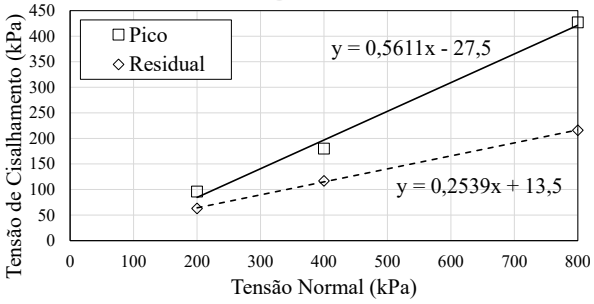
3.3 Solo compactado – geotêxtil não tecido (fixado) vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada:

No programa experimental (3), avaliou-se a interface composta por solo local compactado, geotêxtil não tecido de PET com gramatura de 700 g/m² e geomembrana de PEAD texturizada, com espessura de 2,0 mm, sob condição inundada. O ensaio foi montado com o solo local e o geotêxtil não tecido fixado ao solo na caixa superior do equipamento de cisalhamento direto, enquanto a geomembrana foi posicionada na caixa inferior.

Antes do início do cisalhamento, a carga normal foi aplicada e mantida por um período de 24 horas, com a interface completamente inundada, de modo a permitir a acomodação do sistema e a dissipação de pressões neutras. O cisalhamento foi realizado a uma taxa de deslocamento de 1,0 mm/min, definida em função das propriedades do solo e das condições do ensaio, visando a obtenção de um comportamento predominantemente drenado.

O grau de compactação de 80% do Proctor Normal foi adotado por representar condições de campo menos controladas, as quais podem resultar na superestimação da resistência de interface.

A Figura 4a. ilustra a variação da tensão cisalhante em função da tensão normal obtida nos ensaios realizados, incluindo envoltórias para a resistência de pico com um ângulo de atrito de interface de 29,3° e uma adesão de 27,5 kPa e residual com um ângulo de atrito de interface de 14,2° e uma adesão de 13,5 kPa para a condição de ensaio (3). A Figura 4b. apresenta individualmente cada tensão normal a resistência de interface e a secante do ângulo.



(a)

	Tensão Normal (kPa)	200	400	800
Pico	Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	336
	Angulo Secante (deg.)	27,3	24,8	22,4
Residual	Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	330
	Angulo Secante (deg.)	27,2	24,8	22,4

(b)

Figura 4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface do programa experimental (3): (a) Relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal; (b) Resistência de interface e ângulo de atrito secante determinados para diferentes níveis de tensão normal.

Na condição de ensaio (3), observou-se um comportamento distinto em relação às condições (1) e (2). Os resultados indicaram que o ângulo de atrito de pico foi aproximadamente 45% superior àquele obtido na condição (1) e 40% superior ao obtido na condição (2). Esse aumento é atribuído ao efeito de intertravamento mecânico (“efeito velcro”) entre o geotêxtil não tecido e a geomembrana texturizada.

Em contrapartida, o ângulo de atrito residual apresentou valores cerca de 30% inferiores aos observados nas condições (1) e (2). Esse comportamento pode ser associado à migração de água e partículas finas do solo para a interface geotêxtil–geomembrana, formando uma camada de material fino (lama) que reduz progressivamente o atrito mobilizado durante o cisalhamento contínuo.

Os valores de adesão, tanto no pico quanto residual, mostraram-se baixos. No pico, foram semelhantes aos da condição (2), enquanto no residual foram aproximadamente 55% inferiores. Esse comportamento pode ser atribuído à menor compacidade do solo, ao condicionamento sob carga normal com inundação e, adicionalmente, pelo efeito da migração de água e solo fino para a interface geotêxtil–geomembrana.

Ressalta-se um aumento considerável da adesão do pico para a condição residual, provavelmente em função do incremento da carga normal, que favoreceu o aumento do atrito mobilizado na interface geotêxtil–geomembrana.

Para o programa experimental (3), o aumento da tensão normal resultou em incremento da resistência ao cisalhamento da interface, especialmente para 800 kPa. Em relação ao ângulo de atrito secante de pico, não se observou uma tendência decrescente com o aumento de σ_n. Tomando como referência 200 kPa (φsec,pico = 25,6°), os valores obtidos foram 24,3° em 400 kPa (aproximadamente 95% do valor de referência), e 28,1° em 800 kPa (cerca de 110% do valor de referência). Esse comportamento sugere influência de efeitos de adensamento e rearranjo do sistema multicamada sob diferentes níveis de confinamento, associados ao menor grau de compactação adotado (80% do Proctor Normal).

Por outro lado, para a condição residual, observou-se uma redução progressiva do ângulo de atrito secante com o aumento da tensão normal. Em relação à condição de 200 kPa, os valores corresponderam a aproximadamente 94% em 400 kPa e 87% em 800 kPa. Essa tendência é compatível com a degradação do intertravamento mecânico e/ou com a migração de água e partículas finas para a interface geotêxtil–geomembrana ao longo do cisalhamento, o que tende a reduzir o atrito mobilizado em grandes deslocamentos.

4 CONCLUSÕES

De forma geral, os resultados evidenciam que o comportamento resistente das interfaces avaliadas é fortemente influenciado pela configuração do sistema e pelas condições de ensaio. Para as condições (1) e (2),

a ruptura por cisalhamento ocorreu consistentemente na interface solo–geomembrana, indicando que essa interface controla o mecanismo de instabilidade sob as condições analisadas. Já na condição (3), a presença do geotêxtil não tecido alterou o plano de ruptura, que passou a ocorrer sistematicamente na interface geomembrana–geotêxtil, independentemente do nível de tensão normal aplicado, caracterizando essa interface como o plano crítico de deslizamento do sistema multicamada.

Os resultados dos ensaios (1) e (2) apresentaram boa concordância, tanto para os valores de pico quanto para os valores residuais. O ensaio (3), por outro lado, apresentou ao mesmo tempo os menores e maiores valores entre as interfaces estudadas, respectivamente para residual e pico.

Esses resultados demonstram que a introdução de geotêxteis pode aumentar a resistência inicial da interface por efeito de engrenamento mecânico, porém o comportamento residual e a identificação da interface crítica permanecem fundamentais para análises de estabilidade e dimensionamento seguro de sistemas de impermeabilização em obras geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão à AzulPack Techground e à Alta Geotecnia pelo fornecimento dos materiais utilizados neste estudo. Agradecem, ainda, ao laboratório TRI Ambiental pela elaboração dos relatórios de ensaio e pelo suporte técnico prestado ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6459. *Solos - Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7180. *Solos - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Solos - Ensaio de compactação (método Proctor)*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023*. São Paulo.

ASTM International (2021). ASTM D5321: *Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method*.

ASTM International (2023). ASTM D7466: *Standard test method for measuring the large-scale direct shear interface shear strength between geomembranes and geosynthetic clay liners*.

Costa Junior, S. L., 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).

Geosynthetic Research Institute (2025). GRI - GM13: *Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*.

Lima, A. C. (2025) *Resistência de Interface Geomembrana Texturizada-Argila em Aterro Sanitário no Sul Fluminense, RJ*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.

Sánchez, N. P. (2018) *Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília (UnB), Brasília.

Scarlat, N., Fahl, F., Dallemand, J. F. (2019) Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe. *Waste Biomass Valorization*, 10, p. 2425-2444.

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. *Waste Management & Research*, 38, p. 1389-1404.