

ANÁLISE DA INTERAÇÃO SOLO-GEOTÊXTIL EM CONDIÇÕES DEFORMADAS UTILIZANDO ENSAIO DE CISALHAMENTO EM PLANO INCLINADO

Larissa Faria Ribeiro, José Antonio Schiavon.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias- 12228-900 - São José dos Campos-SP, Brasil, larissa.ribeirof@gmail.com, schiavon@ita.br.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a interação solo-geotêxtil em diferentes condições, utilizando o ensaio de cisalhamento em plano inclinado. Foram avaliadas duas configurações: uma indeformada e outra com deformação perpendicular ao plano induzida pelo uso de um geoespaçador subjacente. O objetivo foi investigar o impacto dessas condições na resistência ao cisalhamento do sistema solo-geotêxtil com dois tipos de solo: uma areia média e uma mistura de 90% de quartzo e 10% de caulim. Os resultados indicaram que a deformação perpendicular ao plano do geotêxtil teve um efeito limitado na melhoria das propriedades mecânicas da interface e que a inserção do geoespaçador não aumentou significativamente o ângulo de atrito de interface.

Palavras-chave: Geossintéticos, Geotêxtil, Geoespaçador, Cisalhamento em plano inclinado, Interface solo-reforço.

Área do Conhecimento: Engenharia civil.

Introdução

O uso de geossintéticos oferece atrativos para aplicação em obras geotécnicas devido ao seu custo-benefício competitivo, melhoria de estabilidade, resistência e durabilidade. Entre os materiais aplicáveis, destacam-se os geocompostos drenantes, que são materiais em forma de painéis ou folhas, constituídos por um núcleo rígido de polímero (geoespaçador) ou por uma rede tridimensional (georrede). Quando se utiliza uma georrede, a percolação de fluidos na direção perpendicular ao plano é facilitada por um material geotêxtil, que desempenha as funções de filtração e separação, retendo e separando os sólidos. Esses geocompostos podem ser aplicados em diversas obras geotécnicas, sendo uma de suas funções a função drenagem, que também requer a garantia da estabilidade contra o deslizamento de interface quando empregados em planos inclinados. Para assegurar a adequação do material, diversos ensaios podem ser realizados para assegurar uma análise mais precisa da interação solo-geossintético.

Entre os ensaios utilizados para a análise da interação solo-reforço, destaca-se o ensaio de cisalhamento direto, amplamente difundido, mas que apresenta certas desvantagens que limitam sua utilidade. Entre essas limitações estão os efeitos de borda, o cisalhamento em um plano predeterminado e as dificuldades no controle da velocidade do teste e das condições de drenagem. Devido a essas limitações, o ensaio de cisalhamento direto pode não ser o mais adequado para avaliar a interação solo-reforço (Pierozan et al., 2019). Outra alternativa é o ensaio de cisalhamento em plano inclinado, que é realizado sob baixas tensões normais, como em aterros sanitários e taludes, e pode contornar os problemas associados ao ensaio de cisalhamento direto (Giroud et al., 1990).

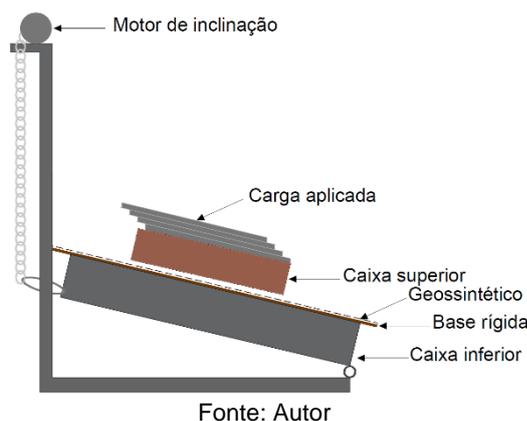
O ensaio de cisalhamento em plano inclinado analisa o comportamento de deslizamento de uma caixa superior à medida que a inclinação do plano aumenta gradualmente, até que ocorra um deslocamento de 5 cm da caixa. O dispositivo utilizado nesse ensaio, ilustrado na Figura 1, inclui uma caixa inferior para ensaios em maior escala, uma base rígida para fixação do material geossintético, o geossintético propriamente dito, uma caixa superior para inserção do solo, a carga aplicada e o motor de inclinação responsável pela inclinação da caixa (ABNT, 2013).

Em situações como aterros sanitários e taludes, onde as faces estão submetidas a baixas tensões normais, a aplicação de geocompostos pode levar a deformações sobre as nervuras do material. Essas deformações podem, ao se distribuírem na interface solo-geotêxtil, gerar um empuxo passivo durante o deslocamento cisalhante, potencialmente aumentando a resistência ao cisalhamento nessas condições. Avaliar com precisão as propriedades de cisalhamento das interfaces entre solos e geossintéticos e diferentes geossintéticos é crucial. Quando geossintéticos são usados, as interfaces

entre outros materiais podem servir como potenciais planos de falha (Pitanga; Gourc; Vilar, 2009; Moraci et al., 2014).

Com base nessa hipótese, o presente trabalho apresenta resultados de ensaios de cisalhamento em plano inclinado em dois cenários distintos: o primeiro explora a resistência ao cisalhamento da interface solo-geotêxtil em uma condição não deformada e o segundo explora a resistência ao cisalhamento da interface solo-geotêxtil em uma condição deformada, obtida ao inserir o geotêxtil sobre um geoespaçador. A análise foi realizada utilizando dois tipos de solo, com o objetivo de também avaliar a influência desse fator nas características de atrito da interface.

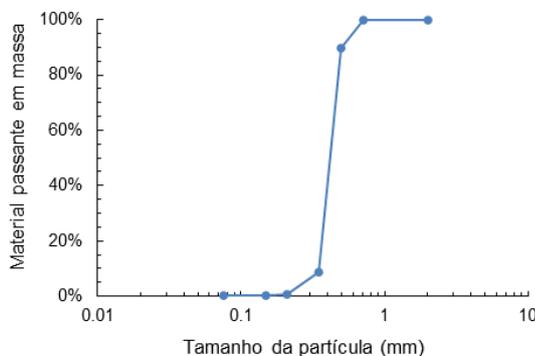
Figura 1 - Representação esquemática de um aparato de ensaio de cisalhamento em plano inclinado



Metodologia

- **Solo:** no presente estudo, foram empregadas duas composições de solo distintas. O primeiro solo é uma areia média quartzosa, caracterizada por um diâmetro médio (d_{50}) de aproximadamente 0,4 mm, determinado conforme o ensaio de granulometria descrito na ABNT NBR 7181 (ABNT, 2018). A curva granulométrica correspondente é apresentada na Figura 2. Essa areia foi utilizada em sua condição seca. O segundo solo é uma mistura preparada em laboratório, composta por 90% de quartzo e 10% de caulim, com peso específico de 16 kN/m^3 e umidade de 15%.

Figura 2 - Curva granulométrica da areia utilizada



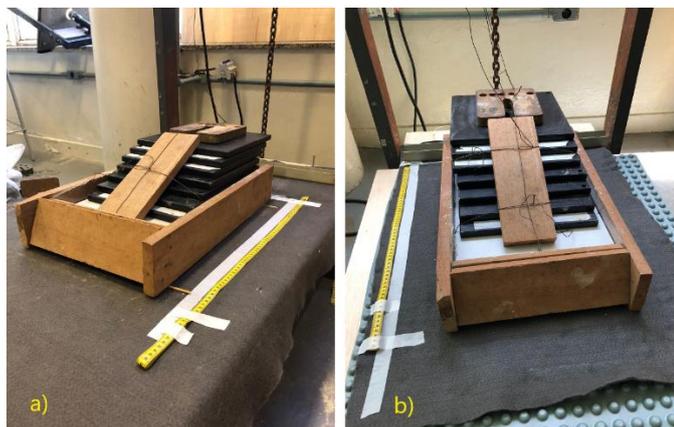
- **Geossintético:** Foi utilizado um geoespaçador de polietileno de alta densidade (PEAD) e um geotêxtil não tecido de polipropileno (PP) com massa por unidade de área de 300 g/m^2 , resistência à tração de 14 kN/m na direção longitudinal e 16 kN/m na transversal, conforme especificado pelo fabricante. O geotêxtil foi sempre aplicado em contato direto com o solo, sendo posicionado sobre uma base rígida ou sobre o geoespaçador. Os materiais geossintéticos foram cuidadosamente preparados e fixados para garantir que não ocorresse deslocamento em relação à base de fixação.

- **Procedimento experimental:** O ensaio de cisalhamento em plano inclinado foi conduzido no Laboratório de Geossintéticos da Divisão de Engenharia Civil do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), utilizando equipamento específico para esse fim. A execução do ensaio, em conformidade com a norma técnica ABNT NBR ISO 12957-2 (ABNT, 2013), envolveu a fixação do geotêxtil sobre uma base rígida. Sobre o geotêxtil, foi posicionada uma caixa de madeira com dimensões de 300 mm x 400 mm, revestida internamente com plástico para minimizar o atrito entre o solo e a madeira. A caixa foi preenchida com solo, compactado por meio de vibração, até atingir uma espessura final de 50 mm.

Um peso de 50 kg foi colocado sobre o solo, ajustando-se a caixa a um ângulo padrão de 27°, conforme estabelecido pela norma, para aplicar uma tensão normal de 5 kPa, equivalente a uma altura de solo de 30 cm. Nos ensaios que incluíram o geoespaçador, este foi posicionado sobre a base rígida, seguido pela inserção do geotêxtil, mantendo-se o procedimento adotado no ensaio com apenas o geotêxtil.

O monitoramento dos deslocamentos foi realizado utilizando uma fita métrica acoplada à caixa, enquanto o ângulo de inclinação foi controlado por meio de um aplicativo de celular com resolução de 0,1°. Os ensaios foram conduzidos com uma velocidade de elevação da caixa de $3 \pm 0,5$ graus por minuto, sendo finalizados ao atingir 50 mm de deslocamento da caixa contendo o solo. A Figura 3 ilustra o esquema de montagem para as duas condições ensaiadas. A Figura 3a apresenta o ensaio realizado utilizando apenas o geotêxtil, enquanto a Figura 3b mostra o ensaio que inclui tanto o geotêxtil quanto o geoespaçador.

Figura 3 - Equipamento de cisalhamento em plano inclinado a 27° com dispositivo de segurança para evitar deslizamentos repentinos: a) Aparelho configurado para ensaio apenas com o geotêxtil não tecido; b) Aparelho configurado para ensaio com geotêxtil sobre o geoespaçador.



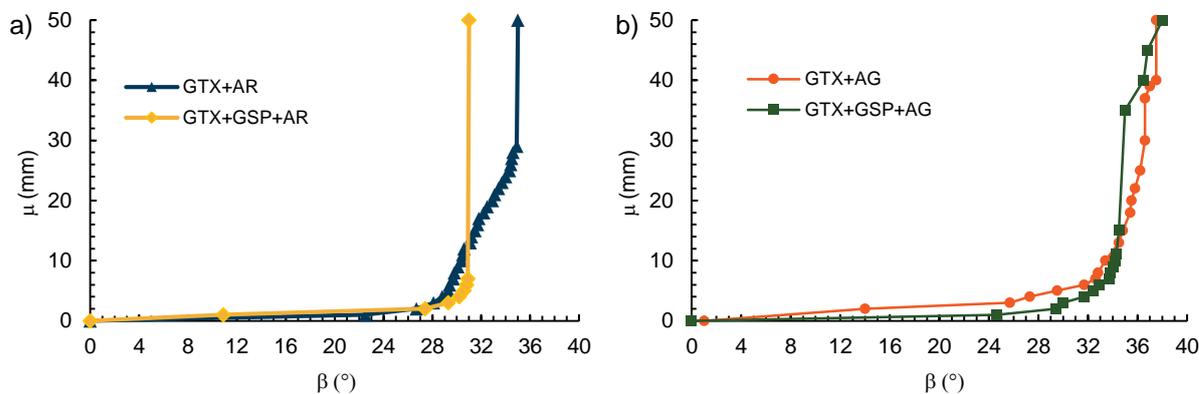
Fonte: Autor

Resultados

Para o presente trabalho foram realizados dois ensaios de cisalhamento direto com dois tipos de solo cada. O primeiro ensaio foi realizado na configuração geotêxtil+areia (GTX+AR) e geotêxtil+argila (GTX + AG), já o segundo foi realizado na configuração geoespaçador+geotêxtil+areia (GSP+GTX+AR) e geoespaçador+geotêxtil+argila (GSP+GTX+AG). O ensaio de cisalhamento em plano inclinado, realizado nas configurações mencionadas, teve como objetivo analisar a resposta ao cisalhamento e o desempenho da interface composta sob condições deformadas. O foco principal foi avaliar se a deformação do geotêxtil causaria aumento das forças mecânicas atuantes no deslizamento tangencial do solo.

A Figura 4a apresenta os resultados dos ensaios realizados com argila, enquanto a Figura 4b mostra os resultados dos ensaios realizados com areia.

Figura 4 - a) deslocamento da caixa superior (μ) em relação ao ângulo de inclinação (β) no ensaio com argila; b) deslocamento da caixa superior (μ) em relação ao ângulo de inclinação (β) no ensaio com areia;



Fonte: Autor.

Discussão

Os resultados apresentados na Figura 4a e Figura 4b indicam que, contrariamente ao esperado, a inclusão do geoespaçador em ambos os solos resultou em uma redução no ângulo de atrito final. Analisando primeiramente o ensaio com argila, presente na Figura 4a, observa-se que a presença do geoespaçador no sistema causou uma mudança relativamente pequena na resposta ângulo-deslocamento e, portanto, no desempenho ao cisalhamento. Isso sugere que a deformação do geotêxtil, quando combinada com o geoespaçador, não proporcionou uma interação mecânica significativa nem um aumento na resistência ao atrito na interface solo-geotêxtil. No ensaio realizado exclusivamente com o GTX+AG, observou-se uma maior linearidade nos resultados obtidos, sem ocorrência de deslocamentos abruptos. Em contraste, no ensaio com o GTX+GSP+AG, ocorreu um deslocamento abrupto de 12 mm para 33 mm ao atingir 35 $^{\circ}$ de inclinação. Ainda considerando o ensaio realizado com a argila, foi observado que o ângulo de ruptura nos dois casos apresentou uma diferença mínima, de apenas 0,5 $^{\circ}$, com o ângulo final de 37,5 $^{\circ}$ para o sistema GTX+AG e 38 $^{\circ}$ para o sistema GTX+GSP+AG, esse comportamento similar é coerente com o descrito por Pinho-Lopes e Lopes (2018).

Para o ensaio com areia, observa-se que, de modo semelhante ao ensaio com argila, a inclusão do geoespaçador não resultou em uma mudança significativa no ângulo de atrito. No entanto, notou-se uma variação considerável no ângulo de ruptura, com o valor sendo 37 $^{\circ}$ para o sistema GTX+AR e 31 $^{\circ}$ para o sistema GSP+GTX+AR, resultando em uma diferença de 6 $^{\circ}$. Em ambos os ensaios, ocorreu um rompimento abrupto: para o sistema GSP+GTX+AR, o deslocamento aumentou de 8 mm para 50 mm aos 31 $^{\circ}$, enquanto no sistema GTX+AR, a variação abrupta foi de 28 mm para 50 mm aos 37 $^{\circ}$. Essa característica de deslocamento abrupto é descrita por Pitanga, Gourc e Vilar (2009b) e é caracterizada como um deslizamento não estabilizado.

Na comparação dos ensaios realizados com ambos os materiais, observa-se que a inserção do geoespaçador não melhorou as características de resistência ao cisalhamento, tanto para a areia quanto para a argila. O deslocamento da caixa sobre o geotêxtil foi eficiente para garantir uma condição de resistência ao cisalhamento, que não foi aprimorada ao se utilizar uma superfície com relevo acentuado, como o geoespaçador. O alto relevo do geoespaçador facilitou a penetração do solo nos espaços entre as fibras do geotêxtil, com a presença de partículas de areia e argila observada tanto em condições deformadas quanto indeformadas. Isso sugere que a resistência obtida pode ser atribuída ao entrelaçamento e contato dessas partículas, um fenômeno comumente observado em testes com geotêxteis tecidos (Gomes, 1993).

Conclusão

Neste trabalho, foi realizado um ensaio de cisalhamento em plano inclinado para avaliar a influência da deformação perpendicular ao plano de um geotêxtil e investigar possíveis melhorias nas

propriedades mecânicas do geotêxtil deformado. O ensaio foi conduzido em duas configurações: GTX+SOLO e GSP+GTX+SOLO, utilizando dois tipos de solo diferentes: uma areia média e uma mistura composta por 90% de quartzo e 10% de argila. As principais conclusões do estudo são:

- Nos ensaios com argila, ambos os testes apresentaram um comportamento similar, com uma variação de menos de 2% ao adicionar o geoespaçador.
- Nos ensaios com areia, os ângulos de atrito foram aproximadamente 10% menores quando o geoespaçador foi inserido, em comparação com o ensaio sem deformação (sem geoespaçador). Essa redução pode ser explicada pela diminuição da compacidade da areia nas áreas de deformação. Além disso, observou-se um rompimento abrupto, caracterizado como instável.
- O ensaio forneceu valiosas contribuições para a compreensão do comportamento de cisalhamento na interface solo-geotêxtil nas duas condições avaliadas. Os resultados indicaram que a deformação causada pelo geoespaçador teve um efeito limitado no ângulo de atrito do material, contrariando as expectativas iniciais. No entanto, os dados obtidos enriquecem o conhecimento existente e proporcionam uma melhor compreensão do comportamento dessa interface.
- A análise das condições reais de aplicação é sempre fundamental e deve ser considerada em ensaios.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12957-2**: Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio de Plano Inclinado. Rio de Janeiro, 2013.

GIROUD, J. P. et al. Geosynthetic landfill cap: laboratory and field tests, design and construction. *In: International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, 4., 1990, The Hague. **Proceedings...** The Hague: Balkema, 1990. p. 493-498.

GOMES, R. **Interação Solo-Reforço e Mecanismos de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis**. 1993. 300 f. Tese (doutorado em Engenharia civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

MORACI, N. et al. Soil Geosynthetic Interaction: Design Parameters from Experimental and Theoretical Analysis. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, v. 1, n. 2, p. 165–227, 2014. DOI: 10.1007/s40515-014-0007-2

PIEROZAN, R. C. et al. Avaliação da Interação Solo-Geossintéticos por Meio de Ensaios de Arrancamento e de Plano Inclinado. *In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (REGEOSSINTÉTICOS 2019)*, 8., 2019, São Carlos. **Anais...** São Carlos: ABMS/IGS Brasil, 2019. p. 575-582.

PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. DE L. Influence of mechanical damage induced in laboratory on the soil-geosynthetic interaction in inclined-plane shear. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 468–480, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.094

PITANGA, H. N.; GOURC, J. P.; VILAR, O. M. Interface shear strength of geosynthetics: Evaluation and analysis of inclined plane tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 6, p. 435–446, 2009. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2009.05.003

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, o que é reconhecido com apreço pela autora. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, concedido por meio do Processo nº 435898/2018-3.