

POTENCIAL USO GEOTÉCNICO DE FIBRAS DE AÇAÍ COMO REFORÇO DE SOLOS ARGILOSOS: ESTUDO GEOTÉCNICO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Augusto Barbosa Silva, Msc.

Professor, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, augusto.silva@ifro.edu.br

Lídia Bruna Teles Gonzaga, Msc.

Professora, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, lidia.bruna@ifro.edu.br

André Luís Brasil Cavalcante, Dsc.

Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

Michéle Dal Toé Casagrande, Dsc.

Professora, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: O incremento da capacidade de suporte e redução da deformabilidade dos solos através de métodos de reforço constitui um campo de estudo significativo na engenharia geotécnica. A inserção de elementos com alta resistência à tração promove o aprimoramento das propriedades mecânicas do solo, expandindo suas potenciais aplicações. Dentre os materiais de reforço, destacam-se elementos diversificados como as fibras naturais, abundantes no Brasil devido à larga produção agrícola. Nesse contexto, as fibras naturais de açaí se destacam pela sua grande abundância na região amazônica, havendo um interesse especial, considerando o grande volume de resíduos gerados na produção deste fruto, que necessita de soluções ambientalmente adequadas. Tendo isso em vista, o presente estudo integra o uso de materiais inovadores na geotecnia à gestão ambiental responsável dos resíduos, avaliando o uso de fibras naturais de açaí como reforço de solo. Trata-se de um trabalho experimental, realizado por meio de ensaios de cisalhamento direto comparativos entre o solo puro e os compósitos solo-fibra, dispersas aleatoriamente em diferentes teores (1,0%, 1,5% e 2,0%), sob aplicação de diferentes tensões normais (100 kPa, 200 kPa e 400 kPa). Os resultados experimentais indicaram aumentos bastante significativos na resistência ao cisalhamento do solo reforçado com as fibras de açaí, quando comparado ao solo não reforçado. Além disso, identificou-se um teor ótimo de fibras, uma vez que o estudo mostrou perda de coesão gradativa com maiores incrementos de fibras. Os resultados se mostraram promissores quanto ao uso desta fibra natural como reforço de solos, abrindo novas perspectivas para a aplicação em projetos de engenharia geotécnica, além de proporcionar uma melhor destinação a este material.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia sustentável; fibras de açaí; materiais inovadores; resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT: The enhancement of load-bearing capacity and reduction of soil deformability through reinforcement methods constitutes a significant field of study in geotechnical engineering. The insertion of elements with high tensile strength enhances the mechanical properties of soil, broadening its potential applications. Among reinforcement materials, diverse elements, such as natural fibers stand out, abundant in Brazil due to its extensive agricultural production. In this context, natural açai fibers are particularly notable for their great abundance in the Amazon region, with special interest given the large volume of waste generated in the production of this fruit, which requires environmentally appropriate solutions. With this in mind, the current study integrates the use of innovative materials in geotechnics to the responsible environmental management of waste, evaluating the use of natural açai fibers as soil reinforcement. This is an experimental work, conducted through comparative direct shear tests between pure soil and soil-fiber composites, randomly dispersed in different contents (1.0%, 1.5%, and 2.0%), under the application of different normal stresses (100

kPa, 200 kPa, and 400 kPa). The experimental results indicated quite significant increases in the shear strength of the soil reinforced with açai fibers, compared to the unreinforced soil. Furthermore, an optimal fiber content was identified, as the study showed a gradual loss of cohesion with higher increments of fibers. The findings are promising regarding the use of this natural fiber as soil reinforcement, opening new perspectives for application in geotechnical engineering projects, in addition to providing a better destination for this material.

KEYWORDS: Sustainable geotechnics, açai fibers, innovative materials, shear strength.

1 INTRODUÇÃO

Técnicas de reforço de solo são frequentemente empregadas para aprimorar as propriedades dos solos em aplicações geotécnicas. Nesse contexto, as fibras naturais e sintéticas têm despertado interesse por se configurar uma técnica de reforço alternativa aos métodos tradicionais de estabilização, devido à sua resistência, custo reduzido e fácil disponibilidade (Yazici e Kesking, 2021).

De maneira geral, quando se analisam as diversas opções para reforço de solos, as fibras sintéticas são benéficas devido à capacidade de terem suas propriedades controladas durante o processo de produção, possibilitando uma previsão mais precisa do comportamento do solo reforçado em situações de uso (Ferreira, Senéz e Casagrande, 2021; He *et al.*, 2021; Shen *et al.*, 2021; Yuan *et al.*, 2022). Já as fibras naturais exigem a adoção de um fator de segurança maior, devido à ausência de estudos aprofundados do comportamento dessas fibras sob as solicitações impostas. Portanto, é crucial desenvolver uma compreensão mais detalhada sobre o comportamento dos solos reforçados com fibras naturais, especialmente para promover uma maior utilização na área da geotecnia (Danso, Martinson e Williams, 2015; Thanushan e Sathiparan, 2022).

Estudos realizados com fibras naturais como elemento de reforço constataram alterações em diversas propriedades do compósito, como a formação de pontes de ligação entre as partículas, e mediante cargas externas aumentam a deformação elástica no solo, melhorando a resistência de pico e sua ductilidade (Liu *et al.*, 2020; Sotomayor e Casagrande 2018; Zhang *et al.*, 2020; Silva e Castro, 2022). Estudos atuais, a exemplo de Faustino (2022), especificamente sobre a adição de fibras naturais em matriz argilosa, demonstrou alteração nas propriedades dos compósitos em várias vertentes, como a sua resistência, permeabilidade e sucção, quando comparadas às do solo puro.

Dentre as fibras naturais, se destacam aquelas provenientes do caroço de açai, por ser um fruto amplamente disponível na região amazônica, cujo descarte inadequado de resíduos provenientes do despulpamento tem gerado problemas recorrentes. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), referente ao açai (*Euterpe oleracea*), somente no ano de 2022 foram produzidas cerca de 1.700.000 toneladas deste fruto, gerando um grande volume de resíduos, que tem sido subaproveitado em contraste ao seu grande potencial econômico.

Tendo em vista o possível aproveitamento dos resíduos de açai, especificamente de suas fibras, no campo geotécnico, este estudo visa explorar o potencial dessas fibras como uma solução sustentável de forma a aprimorar as propriedades geotécnicas da matriz argilosa estudada. O foco deste trabalho se deu especialmente na resistência ao cisalhamento do compósito solo-fibra, por meio de uma abordagem experimental detalhada, onde foram examinados os efeitos de várias concentrações de fibras de açai adicionadas ao solo.

2.1 Materiais

2.1.1 Solo argiloso

O solo empregado (Figura 1) consistiu no solo típico de Brasília - DF, coletado no campo experimental ligado ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPG - UnB), cujas amostras deformadas foram retiradas de profundidades entre 1,0 e 3,0 metros e apresentaram valor de densidade real dos grãos igual a $2,67 \text{ g/cm}^3$, obtida a partir de ensaio prévio no pentapycnometro.



Figura 1. Solo argiloso típico de Brasília/DF.

A granulometria do solo é detalhada pela curva granulométrica presente na Figura 2, cujo ensaio foi realizado com a utilização de defloculante, e mostra a distribuição das partículas de índices iguais a 43,8% para areia, 21,25% para silte e 34,95% para argila. Quanto aos limites de consistência, foi encontrado um valor de Limite de Liquidez de 40% e um valor de Limite de Plasticidade de 28%, resultando no Índice de Plasticidade igual a 12%.

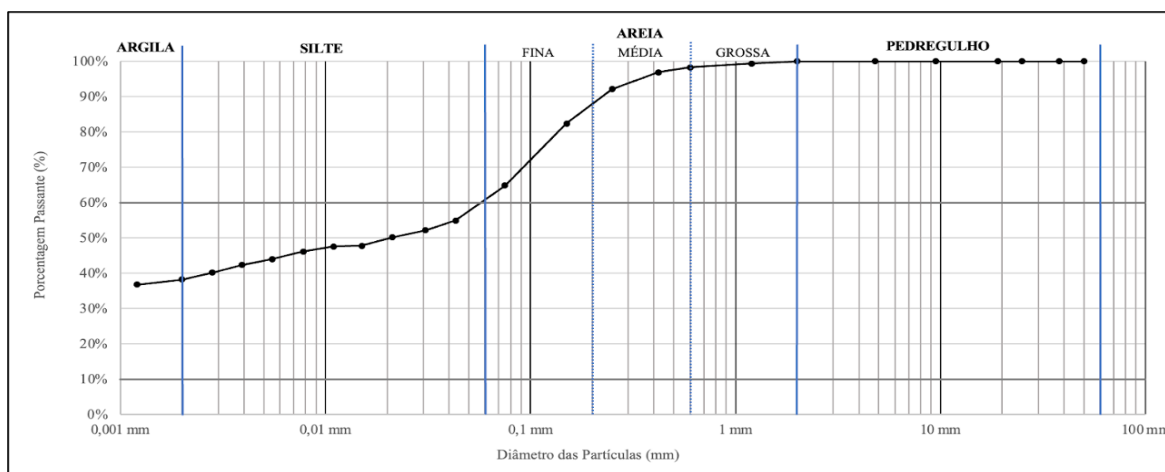


Figura 2. Curva granulométrica do solo.

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar o solo de acordo com a classificação HRB, em um material argiloso, pertencente ao grupo A-6 e com Índice de grupo igual a 10.

2.1.2 Fibras de açaí

As fibras naturais utilizadas nesta pesquisa, exibidas na Figura 3, consistem em resíduos provenientes do caroço do açaí, obtidos após o processo de despolpamento deste fruto. Essas fibras foram adquiridas de uma empresa especializada na venda de biomassa de fibras de açaí, localizada no estado do Pará.



Figura 3. Fibras de açaí.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades físicas das fibras utilizadas, cujo resultado representa a média dos valores encontrados após ensaios, uma vez que, por ser um material vegetal, apresenta grande variabilidade nas propriedades geométricas.

Tabela 1. Características físicas das fibras de açaí

Densidade (ρ) (g/cm ³)	Área da seção transversal (mm ²)	Comprimento (L) (mm)	Diâmetro (D) (mm)
0,89	0,15	10,11	0,14

2.2 Métodos

O conjunto de experimentos deste estudo foi desenvolvido com o intuito de determinar os parâmetros de compactação e resistência ao cisalhamento do compósito solo-fibra. Os ensaios foram realizados em conformidade com as normas aplicáveis e estão detalhadamente descritos a seguir.

2.2.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação do solo, também conhecido como ensaio de Proctor, seguiu os procedimentos estabelecidos pelas normas NBR 7182 (ABNT, 2016), envolvendo a compactação de uma amostra por meio de impactos sucessivos de um soquete padronizado, com energia normal, para correlacionar o teor de umidade do solo à sua massa específica aparente seca quando compactado.

Este ensaio foi realizado para o solo puro, assim como para compósitos solo-fibra em diferentes teores (1%, 1,5% e 2%), compactando corpos de prova com aproximadamente 2% de teor de umidade de diferença entre eles.

2.2.2 Preparação das amostras para o cisalhamento direto

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando-se os teores de umidade ótima e as massas específicas secas máximas correspondentes obtidas em cada curva de compactação, considerando o material passante da peneira de 4,75 mm. As amostras foram compactadas em um cilindro de ensaio Proctor Normal de 1000 cm³, a exemplo do ensaio de compactação, com solo puro e também com diferentes teores gravimétricos de fibras (1%, 1,5% e 2%) aleatoriamente dispersas no compósito. A partir disso, o volume de amostra necessário para alcançar as dimensões da caixa de cisalhamento (60 x 60 x 20 mm), foi obtido por meio da talhagem, realizada com um molde de forma cuidadosa para manter a integridade da amostra.

2.2.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos em conformidade com a norma D3080/D3080M-23 (ASTM, 2023), no equipamento de MS 102 - Cisalhamento Automático, da fabricante Owntec. O ensaio realizado foi do tipo saturado, em que a amostra se manteve submersa em água durante 24 horas antes e durante todo ensaio. Foi aplicada uma velocidade de cisalhamento lenta, de 0,05 mm/min, de modo a se dissipar a poropressão. Essa velocidade foi calculada com base nos parâmetros da etapa de adensamento do material, sendo aplicadas cargas normais variadas de 100, 200 e 400 kPa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Curvas de compactação

As curvas de compactação, considerando o solo puro e os compósitos solo-fibra em diferentes teores, são apresentadas na Figura 4, onde são relacionadas os teores de umidade às massas específicas secas correspondentes.

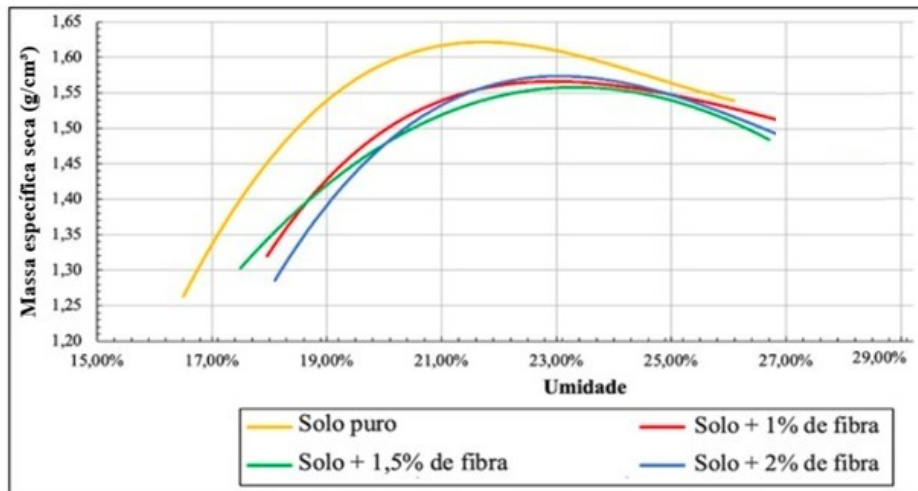


Figura 4. Curvas de compactação das amostras.

A partir das curvas de compactação apresentadas, é possível perceber que o solo puro possui massa específica seca máxima mais alta quando comparado aos compósitos solo-fibra, se destacando também um aspecto importante, em que todas as curvas dos diferentes compósitos se mantêm abaixo da curva do solo puro. Infere-se com isso que a presença das fibras de açaí reduz a massa específica seca do solo enquanto promove o aumento do teor de umidade ótimo.

Além da notória diferença entre as massas específicas secas, maiores para o solo puro e menores para os compósitos, nota-se também que, entre os compósitos, independente do teor de fibras adicionado, há uma baixíssima variação dos valores de massa específica seca e umidade ótima entre elas. Isso implicou em uma compactação dos corpos de prova cuja umidade ótima utilizada foi praticamente igual entre os compósitos, independentemente dos teores de fibra, gerando amostras com massa específica semelhantes, enquanto se utilizou uma umidade ótima mais baixa e maior massa específica para o solo puro.

3.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

A Figura 5 apresenta dados detalhados para avaliação dos ensaios de cisalhamento direto, expondo distinções das propriedades mecânicas entre a argila em seu estado natural e aquela reforçada com vários teores de fibras de açaí, quando submetidas a tensões normais de 100, 200 e 400 kPa.

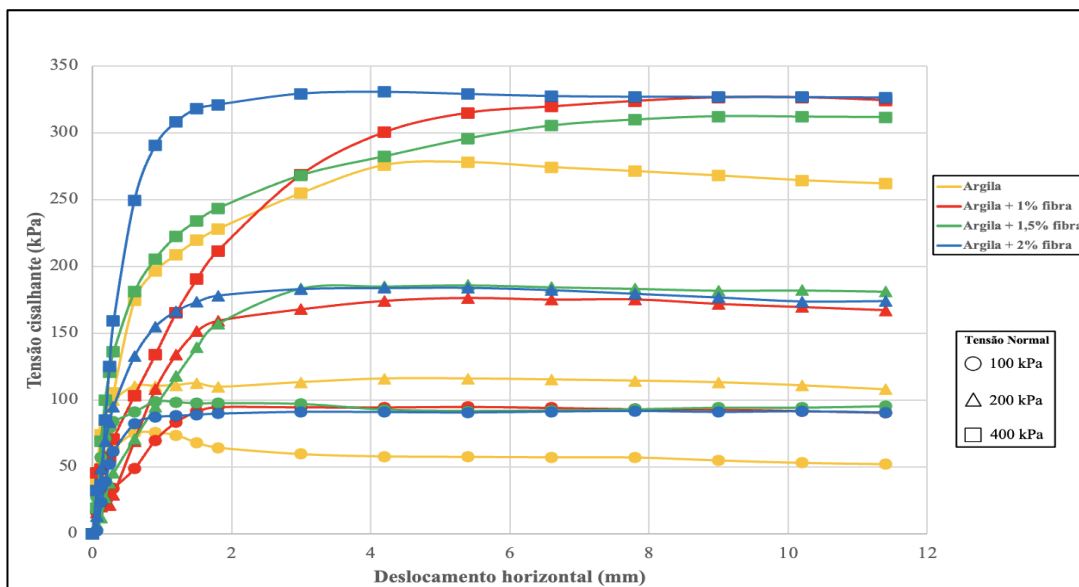


Figura 5. Tensão cisalhante vs deslocamento horizontal.

Observa-se, de forma geral, que a adição de fibras de açaí ao solo argiloso resultou em um aumento significativo na resistência ao cisalhamento, evidenciado pelo crescimento da tensão cisalhante com a adição do teor de fibras em relação à argila pura.

A argila pura, sob tensão normal de 100 kPa, apresentou um crescimento rápido da resistência ao cisalhamento ao longo do deslocamento horizontal, estabilizando-se após atingir o pico. Enquanto isso, para os compósitos com 1%, 1,5% e 2% de fibras, sob esta tensão mais baixa, a resistência ao cisalhamento já aumenta significativamente em comparação com a argila pura, se mantendo superior em praticamente todo o intervalo de deslocamento. A adição dos três teores de fibra resultou, neste caso, em um comportamento bastante similar entre os compósitos, com uma ligeira vantagem para o teor de 1,5% em termos de resistência ao cisalhamento.

Para a tensão aplicada de 200 kPa, os compósitos mantiveram e ampliaram, de forma clara, uma superioridade em resistência ao cisalhamento com relação à argila pura. O desempenho das amostras com 1,5% e 2% de fibras exibem a maior resistência ao cisalhamento dentre as amostras reforçadas. De toda forma, a diferença no comportamento dos compósitos é muito pouca quando comparados entre si nesta tensão.

Na maior tensão normal aplicada, a argila pura manteve comportamento inferior aos compósitos, tendo em vista os valores de resistência ao cisalhamento mais altos para estes últimos materiais mencionados. A amostra com 1,5% de fibra resistiu menos ao cisalhamento, quando comparado às amostras com teores de 1% e 2%, mesmo que com pouca diferença. É interessante observar que a amostra com 2% de fibra, em maiores tensões normais, demonstra o melhor comportamento resistivo, mas se assemelhando bastante aos outros dois compósitos, principalmente àquele com teor de 1% de fibras.

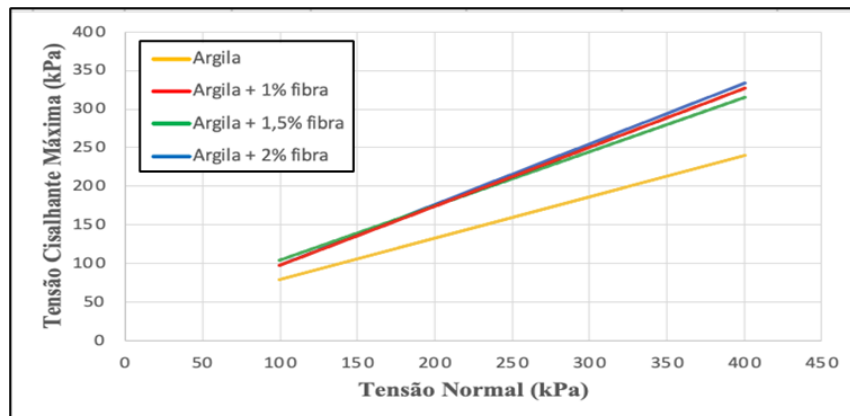


Figura 6. Tensão cisalhante vs deslocamento horizontal.

A relação entre as tensões normais e as tensões cisalhantes máximas (Figura 6) gerou retas cujas equações apresentaram coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,99, o que garante a alta confiabilidade dos dados. O compilado dessa relação, que apresenta o ângulo de atrito e o respectivo intercepto coesivo de cada amostra, está disposto na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo.

Amostra	Ângulo de Atrito (°)	Intercepto coesivo (kPa)
Argila pura	25,7	28,1
Argila + 1% de fibras	36,68	27,59
Argila + 1,5% de fibras	36,17	24,53
Argila + 2% de fibras	38,57	15,19

A avaliação dos dados de cisalhamento direto revela evidência a distinção entre o comportamento mecânico da argila pura e dos compósitos reforçados com fibras de açaí. A argila pura apresenta valores de

ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a 25,7° e 28,1 kPa, respectivamente, sendo utilizada como o parâmetro base a fim de aferir a influência do reforço estudado na estrutura do solo.

Com o incremento de 1%, 1,5% e 2% de fibras ao solo, percebe-se a elevação substancial no valor dos ângulos de atrito dos compósitos, que assemelham-se entre si, com uma diferença maior entre o compósito de 2% de fibras, que apresenta cerca de dois graus a mais no ângulo de atrito. A percepção da dimensão do aumento dos ângulos de atrito é melhor apreendida por meio da Figura 7.

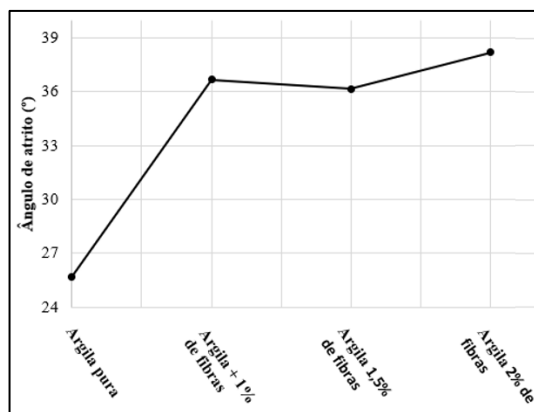


Figura 7. Comparativo de valores de ângulo de atrito.

Esta significativa elevação nos valores de ângulos de atrito observados nos compósitos sugere que as fibras aprimoram o encaixe mútuo entre as partículas, culminando em um reforço na resistência ao cisalhamento. Contudo, é necessário analisar este parâmetro de forma concomitante com os interceptos coesivos aferidos.

Os valores de intercepto coesivo das amostras demonstram que, à medida que as fibras são adicionadas ao solo, ele passa gradativamente a possuir menos coesão. Isso se prova pelo fato de o compósito com 1% de fibra manter a coesão praticamente estável, apresentando valor ligeiramente menor que a argila pura, mas que diminui de forma perceptiva quando se acrescenta 1,5% de fibras e declina ainda mais quando se adiciona 2% de fibras, onde se tem quase metade do valor de intercepto coesivo da argila pura.

Considerando alterações positivas observadas pelo ângulo de atrito e pela coesão, observa-se que a amostra com 1% de fibras alcança valores altos para estes dois parâmetros, despontando como um teor ótimo de fibras para a matriz argilosa.

Estes resultados indicam que a incorporação de fibras de açaí na argila modifica as características de resistência ao cisalhamento do material, com a relação inversamente proporcional entre o aumento de teor de fibras e a coesão, assim como a proporcionalidade de aumento do ângulo de atrito com o incremento das fibras.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fica evidenciado, com base nos resultados apresentados, que as fibras de açaí contribuem efetivamente com a melhoria no desempenho mecânico do material estudado para os níveis de tensão entre 100 e 400 kPa. Observa-se que o incremento das fibras na argila proporciona ganhos expressivos no ângulo de atrito dos compósitos, mas diminui, em contrapartida, sua coesão. Ressalta-se que nos níveis de tensão adotados nesta pesquisa, predominam comportamentos mais compressíveis, sendo que para níveis menores o comportamento em aspectos como rigidez, ductibilidade ou deformabilidade possivelmente seriam considerados.

Os ganhos de resistência ao cisalhamento se dão de forma crescente nos compósitos à medida com que as tensões normais aplicadas aumentam, onde as tensões cisalhantes máximas encontradas se distanciam ainda mais do solo puro. Isso ressalta o potencial deste novo material geotécnico para aplicações em campo, como aterro para obras temporárias.

Depreende-se, a partir dos dados coletados, que o teor de fibras ótimo a ser adicionado à matriz argilosa é de 1%, tendo em vista o melhor equilíbrio alcançado com valores altos para ângulo de atrito e intercepto coesivo. Por consequência, a adição de maiores teores de fibras precisa ser considerada de forma cuidadosa, uma vez que os resultados deixam claro que há um limite em que o compósito potencializa a perda da coesão com maiores incrementos das fibras.

Dessa forma, esta pesquisa dá luz ao potencial uso das fibras de açaí como novo material geotécnico, de forma a melhorar as propriedades de solos argilosos, assim como enfatiza a relevância da determinação de uma quantidade ideal de fibras a se acrescentar, para que a performance mecânica do compósito seja maximizada. Com isso, novas possibilidades de avanço no meio geotécnico foram criadas, ao mesmo tempo em que soluções sustentáveis foram potencializadas com a inovação para uso deste resíduo.

AGRADECIMENTOS

Aos laboratórios Geofluxo e New Geotechnical Materials, da Universidade de Brasília, pelos suporte e recursos necessários ao desenvolvimento dessa pesquisa e ao Instituto Federal de Rondônia pelo apoio contínuo à capacitação docente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solo— Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2023). D3080M-23. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*.
- Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., Williams, J. B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101, 797-809.
- Faustino, O. W. C. (2022). *Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde* (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco).
- Ferreira, J. W. S., Senez, P. C., Casagrande, M. D. T. (2021). PET fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests. *Case Studies In Construction Materials*, v. 2, p. e00741.
- He S., Wang X., Bai H., Xu Z., Ma D. (2021). Effect of fiber dispersion, content and aspect ratio on tensile strength of PP fiber reinforced soil. *Journal of Materials Research and Technology*, V 15. P. 1613-1621.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura*. Rio de Janeiro.
- Liu, C., Lv, Y., Yu, X., Wu, X. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 581-590.
- Shen, Y. S., Tang, Y., Yin, J., Li, M. P., & Wen, T. (2021). An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement. *Construction and Building Materials*, 294, 123537.
- Silva, J. S., Castro, R. M. (2020). Análise da influência do comprimento e teor de fibras adicionadas em reforço de solos lateríticos. *Revista Uniaraguaia*, 15(2), 76-84.
- Sotomayor, J. M. G., Casagrande, M. D. T. (2018). The performance of a sand reinforced with coconut fibers through plate load tests on a true scale physical model. *Soils Rocks*, 41(3), 361-368.
- Thanushan, K., Sathiparan, N. (2022). Mechanical performance and durability of banana fibre and coconut coir reinforced cement stabilized soil blocks. *Materialia*, 21, 101309.
- Yazici, M. F., Keskin, S. N. (2021). A Review on Soil Reinforcement Technology by Using Natural and Synthetic Fibers. *Erzincan University Journal of Science & Technology*, 14(2).
- Yuan, B., Li, Z., Chen, Y., Ni, H., Zhao, Z., Chen, W., & Zhao, J. (2022). Mechanical and microstructural properties of recycling granite residual soil reinforced with glass fiber and liquid-modified polyvinyl alcohol polymer. *Chemosphere*, 286, 131652.
- Zhang, T., Yang, Y. L., & Liu, S. Y. (2020). Application of biomass by-product lignin stabilized soils as sustainable Geomaterials: A review. *Science of the Total Environment*, 728, 138830.