

ECOENGENHARIA EM GEOTECNIA: UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE AÇAÍ DA AMAZÔNIA (EUTERPE OLERACEA) NO MELHORAMENTO DE SOLOS ARENOSOS

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: Explorando a utilização de fibras naturais na melhoria das propriedades geotécnicas de solos granulares, o presente estudo se concentra em avaliar a aplicabilidade das fibras de açaí, oriunda da região amazônica do Brasil, como reforço no solo de matriz arenosa. A pesquisa se motiva pela necessidade de métodos de reforço mais sustentáveis e pela grande abundância de resíduos do fruto do açaí, muitas vezes dispostos inadequadamente. Adotando-se uma abordagem experimental, foram realizados ensaios de cisalhamento direto a fim de comparar a resistência de amostras de solo arenoso puro com amostras reforçadas com fibras de açaí em diferentes concentrações (0,5%, 0,75%, 1,0%, e 1,5%), sob diferentes tensões normais (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa) para simular diferentes condições de carga. Os resultados revelaram incrementos na resistência ao cisalhamento, assim como melhorias no ângulo de atrito e no comportamento coesivo da areia reforçada. O reforço do solo arenoso com as fibras de açaí representa um passo promissor para a engenharia geotécnica sustentável, oferecendo um duplo benefício: melhoria das propriedades do solo e avanço na sustentabilidade ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Fibras naturais, fibras de açaí, sustentabilidade, ecoengenharia.

ABSTRACT: Exploring the utilization of natural fibers to enhance the geotechnical properties of granular soils, this study focuses on evaluating the applicability of açaí fibers, derived from the Amazon region of Brazil, as reinforcement in sandy soil matrix. The research is motivated by the need for more sustainable reinforcement methods and the abundance of açaí fruit waste, often improperly disposed of. Adopting an experimental approach, direct shear tests were conducted to compare the strength of pure sandy soil samples with samples reinforced with açaí fibers at different concentrations (0.5%, 0.75%, 1.0%, and 1.5%), under different normal stresses (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, and 400 kPa) to simulate different loading conditions. The results revealed increases in shear strength, as well as improvements in the friction angle and cohesive behavior of the reinforced sand. Reinforcing sandy soil with açaí fibers represents a promising step towards sustainable geotechnical engineering, offering a dual benefit: enhancing soil properties and advancing environmental sustainability.

KEYWORDS: Natural fibers, açaí fibers, sustainability, ecoengineering.

1 INTRODUÇÃO

A erosão, a degradação dos solos e os movimentos de massa representam desafios globais, pois afetam cada vez mais diversas regiões do mundo, fato majorado pelas alterações climáticas. Nas últimas décadas, a

necessidade de mitigar esses fenômenos e preservar os recursos naturais motivou uma série de iniciativas para promover a utilização de técnicas ligadas ao comportamento do solo (Miele *et al.*, 2021).

A busca por soluções sustentáveis na engenharia, que dá vazão à ecoengenharia, levou à exploração de alternativas inovadoras a fim de melhorar as propriedades dos solos, com um foco crescente em regiões tropicais, como a Amazônia, que abriga materiais pouco estudados na geotecnia até o momento. Dentre as técnicas utilizadas, destaca-se o uso de fibras como reforço de solo, que não apenas fortalecem os solos, como também contribuem para a preservação ambiental.

O reforço de solo com fibras é historicamente empregado, dadas as práticas ancestrais de mistura de solo com materiais orgânicos, que evoluiu para o uso de fibras e geotêxteis (Sotomayor e Casagrande 2018). A utilização de fibras vegetais como reforço desperta cada vez mais interesse, especialmente para o uso em terraplenagens temporárias, devido ao seu baixo custo e a natureza ecologicamente correta, além de se destacar pelo fato de haver uma enorme produção desse material, tendo em vista o extenso potencial agrícola do Brasil, cujo descarte representa um problema crítico e crescente (Siqueira *et al.* 2022; Carvalho, Monteiro e Casagrande, 2023).

As fibras vegetais, inseridas nos compósitos como elemento de reforço, apresentam grandes vantagens, com ênfase no aumento da resistência ao cisalhamento. Tal resistência é afetada pelas características mecânicas das fibras e dos solos, melhorando o mecanismo de transferência de esforços em comparação com o solo natural (Lirer, Flora e Consoli, 2011; Silveira, Ferreira e Casagrande, 2022).

A abundância desses materiais na região amazônica, dada sua vasta biodiversidade, aumenta significativamente a possibilidade de sua aplicação, podendo ser uma alternativa aos reforços sintéticos, e promovendo a sustentabilidade. Além disso, a utilização dessas fibras naturais amazônicas tem o potencial de impulsionar o crescimento econômico e fomentar o desenvolvimento da região (da Silveira *et al.*, 2024). Nesse contexto, são inseridas as fibras de açaí, provenientes do resíduo do caroço deste fruto, amplamente produzidas nesta região. Tais fibras, que são subprodutos da produção de polpa de açaí, e muitas vezes descartadas inadequadamente, carecem de estudos para que sejam utilizadas na área geotécnica.

No cenário de solos reforçados, o uso de fibras em solos arenosos é cada vez mais bem quisto, tendo em vista que esse tipo de solo é amplamente distribuído em todo o mundo, além de desempenhar um papel crucial na geotecnia (Huang e Hartemink, 2020). Assim, de forma a contribuir para a melhoria do comportamento do solo, a adição de fibras em areias, considerando o estudo de Carvalho, Monteiro e Casagrande (2023), destacou o aumento dos parâmetros de cisalhamento e da ductilidade, em comparação com a areia não reforçada. Com base nisso, esta pesquisa se propõe a investigar o potencial das fibras de açaí como uma solução sustentável de forma a melhorar as propriedades geotécnicas em solos arenosos, com ênfase na resistência ao cisalhamento do compósito solo-fibra. Por meio de uma abordagem experimental detalhada, foram analisados os efeitos de diferentes concentrações de fibras de açaí nas propriedades mecânicas da areia, oferecendo uma alternativa de aplicação na área da geotecnia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa envolve uma abordagem experimental para avaliar o uso de fibras de açaí como reforço em solos arenosos. Isso inclui ensaios de caracterização física e mecânica do solo natural e dos solos reforçados.

2.1 Materiais

2.1.1 Solo arenoso

O solo empregado consistiu exclusivamente de areia lavada fina (Figura 1), obtida através de fornecedores comerciais em Brasília. Este solo foi classificado como areia siltosa, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), e apresenta massa específica real dos grãos igual a 2,62 g/cm³, dados obtidos a partir de ensaios prévios de caracterização.



Figura 1. Areia Siltosa

A granulometria do solo estudado é detalhada na Figura 2, em curva granulométrica cujo ensaio foi realizado com a utilização de defloculante. A distribuição das partículas apresentou índices de 55,43% de areia fina, 22,67% de silte, 18,54% de areia média e 3,3% de areia grossa.

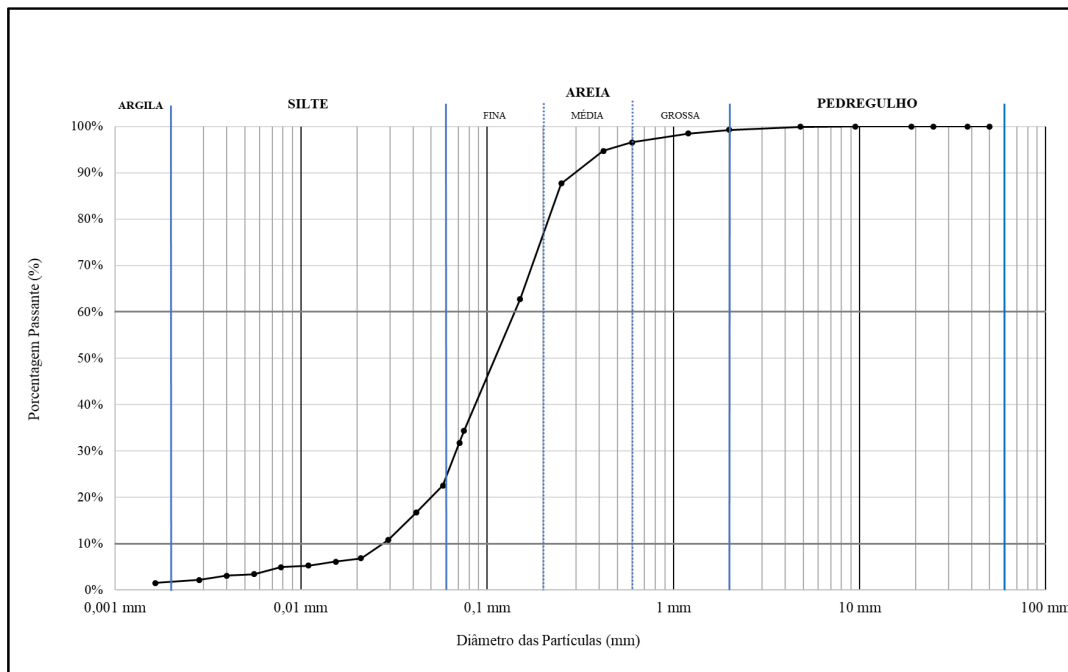


Figura 2. Curva granulométrica do solo arenoso.

2.1.2 Fibras de açáí

As fibras naturais utilizadas (Figura 3) como elemento de reforço do solo são resíduos provenientes do caroço do açáí (*Euterpe oleracea*), resultantes da produção comercial dessa fruta, sendo extraídas após a remoção da polpa. Este material foi adquirido junto a uma empresa que comercializa biomassa de fibras de açáí, localizada no estado do Pará.



Figura 3. Fibras de açáí.

Com relação a este material, são encontrados valores dispersos correspondentes ao comprimento e diâmetro das fibras que evidenciaram sua grande variabilidade, haja vista que se trata de um material natural não padronizado. Na Tabela 1 são dispostas as propriedades físicas desta fibra, cujos resultados representam a média de valores encontrados após ensaios.

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	9,48	0,14

2.2 Métodos

O programa experimental deste trabalho foi conduzido com o objetivo de obter os parâmetros de compacidade relativa da areia e a resistência ao cisalhamento do compósito areia-fibra, sendo os ensaios conduzidos em conformidade com as normas vigentes e apresentados a seguir.

2.2.1 Determinação dos índices de vazios

A determinação dos índices de vazios mínimos em solos não coesivos foi realizada conforme o procedimento estabelecido na ABNT NBR 16843:2020, em que o processo se iniciou com a compactação da amostra utilizando um molde específico e uma carga controlada. A determinação da massa específica aparente seca máxima proporcionou uma medida do estado mais compacto alcançável pelo solo.

Para a determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos, conforme estipulado pela ABNT NBR 16840:2020, empregou-se um funil específico para verter o solo no molde, assegurando um fluxo contínuo e lento de forma a evitar segregação de partículas. A determinação da massa específica aparente seca mínima ofereceu uma medida do estado mais fofo alcançável pelo solo.

2.2.2 Preparação das amostras para o cisalhamento direto

Os índices de vazios máximo e mínimo são parâmetros essenciais para a determinação da massa do corpo de prova, tendo em vista a compacidade relativa adotada. Neste trabalho, foi adotada uma compacidade relativa de 50%, cujo cálculo de massa das amostras foi realizado de modo a alcançar o volume da caixa do cisalhamento direto (60 x 60 x 20 mm). Além disso, foi adotada uma umidade inicial de 10% para que as fibras melhor aderissem à areia, como realizado por Carvalho, Monteiro e Casagrande (2023).

Além da preparação das amostras de areia pura, diferentes concentrações de fibras de açaí (0,5%, 0,75%, 1,0% e 1,5%) foram adicionadas e aleatoriamente dispersas na produção dos compósitos, totalizando 20 amostras preparadas para o ensaio de cisalhamento direto.

2.2.2 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, sendo aplicada uma velocidade de cisalhamento de 0,5 mm/min, calculada com base nos parâmetros da etapa de adensamento do material, e cargas normais variadas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Índices de vazios máximos e mínimos

O resultado da análise de determinação dos índices de vazios, essenciais para a compreensão da estrutura granular e do comportamento mecânico do solo em estudo, proporcionou valores iguais a 0,67 e 1,10, respectivamente, para o índice de vazios mínimo e máximo. Para a subsequente fase experimental, envolvendo o ensaio de cisalhamento direto, foram considerados estes valores de índices de vazios, assim como a

compacidade relativa adotada, para o cálculo de massa úmida das amostras, que resultou na quantificação de aproximadamente 110 g.

3.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

A análise dos resultados do ensaio de cisalhamento direto, representados na Figura 4, revela o comportamento mecânico da areia pura em comparação com a areia reforçada com diferentes teores de fibras de açaí, sob tensões normais aplicadas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

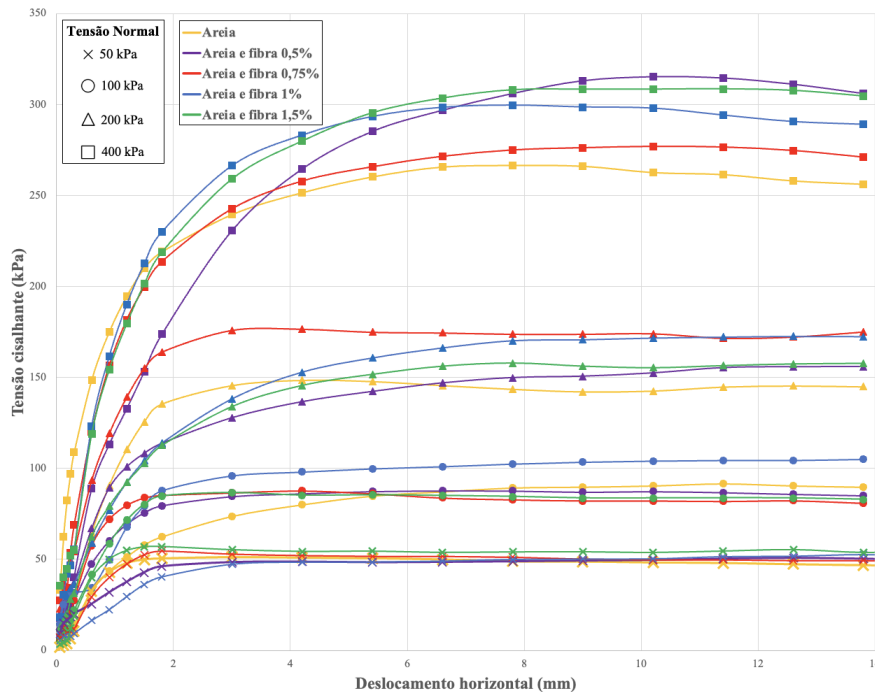


Figura 4. Tensão cisalhante vs deslocamento horizontal.

Observa-se, de maneira geral, que a adição de fibras ao solo arenoso resultou em um aumento na resistência ao cisalhamento, evidenciado pelo crescimento da tensão cisalhante com o incremento do teor de fibras. Para a amostra de areia pura, a curva de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal demonstra um comportamento típico de material granular, com um rápido ganho de resistência seguido de uma tendência a um platô, indicando ter atingido a resistência ao cisalhamento máxima.

Para a tensão normal de 50 kPa, todas as amostras apresentam valores próximos de tensão cisalhante máxima, com um pequeno acréscimo de tensão conforme há o incremento de fibras. Isso sugere que, sob carregamentos mais leves, a contribuição das fibras para a resistência ao cisalhamento é limitada. No entanto, ainda é possível observar uma tendência de que as fibras começam a influenciar o comportamento do solo, fornecendo um leve aumento na resistência ao cisalhamento.

Sob a tensão normal aplicada de 100 kPa, o comportamento dos compósitos ainda se manteve semelhante à areia pura, indicando que não houve muito acréscimo, considerando os diferentes teores de fibra adicionados, exceto para o teor de 1%, que proporcionou um leve ganho de resistência cisalhante. Já sob a aplicação de tensões maiores (200 kPa), tendo em vista a adição de 0,5% de fibras, nota-se um ganho modesto na tensão cisalhante máxima, que se torna mais pronunciado à medida que o teor de fibras aumenta para 0,75% e 1%.

Considerando tensões aplicadas ainda mais altas (400 kPa), as misturas de areia com 0,5% e 1,5% de fibras de açaí exibem o desempenho mais significativo, alcançando os maiores valores de tensões cisalhantes ao longo do deslocamento horizontal, o que implica uma melhoria na capacidade de carga e na resistência ao cisalhamento do material. Isso também ocorre com os compósitos com teores de fibras de 0,75% e 1%, em menor grau, mas ainda assim apresentam tensões cisalhantes maiores que as encontradas no solo puro.

Esse comportamento sob maiores tensões, se justifica pela matriz de areia, nessas circunstâncias, estar mais compactada, aumentando a sollicitação das fibras na redistribuição das tensões e na melhora da coesão interna. Em contrapartida, sob tensões mais baixas, essa compactação é menor, reduzindo o impacto positivo das fibras.

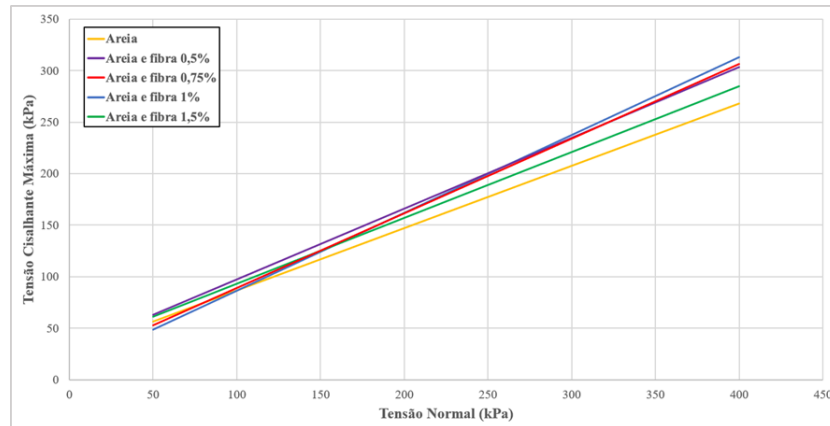


Figura 5. Tensão cisalhante vs deslocamento horizontal.

A relação entre as tensões normais e as tensões cisalhantes máximas (Figura 5) gerou retas cujas equações detinham coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,99, garantindo alta confiabilidade dos dados. O compilado dessa relação, que apresenta ângulo de atrito e coesão, está disposto na Tabela 2.

Tabela 2. Relação de tensão cisalhante, ângulo de atrito e coesão para as diferentes tensões normais aplicadas

Amostra	Tensão (kPa)	Tensão Cisalhante Máxima (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Equações da reta
Areia	50	51,25	26,15	31,17	$y = 0,6048x + 26,151$
	100	91,68			
	200	148,50			
	400	266,70			
Areia + 0,5% de Fibra	50	50,90	10,85	37,07	$y = 0,7555x + 10,856$
	100	87,81			
	200	155,95			
	400	315,40			
Areia + 0,75% de Fibra	50	54,70	29,34	32,54	$y = 0,6382x + 29,339$
	100	87,80			
	200	176,60			
	400	277,00			
Areia + 1,0% de Fibra	50	65,20	28,68	34,50	$y = 0,6872x + 28,68$
	100	105,10			
	200	172,60			
	400	299,70			
Areia + 1,5% de Fibra	50	57,10	16,60	35,95	$y = 0,7252x + 16,596$
	100	86,70			
	200	158,00			
	400	308,60			

A análise comparativa dos resultados de cisalhamento direto revela tendências distintas no comportamento mecânico da areia quando reforçada com fibras de açai. A areia pura, com um ângulo de atrito de $31,17^\circ$ e coesão de 26,15 kPa, serve como referência para avaliar o impacto da adição de fibras na matriz do solo.

Ao introduzir 0,5% de fibras, ocorre uma diminuição na coesão para 10,85 kPa, o que pode ser atribuído ao possível efeito inicial de inserção das fibras no arranjo das partículas de areia. Contudo, o aumento do ângulo de atrito para $37,07^\circ$ indica que as fibras melhoram o intertravamento entre as partículas, resultando em uma resistência ao cisalhamento incrementada. Essa melhoria é sustentada pelo aumento da tensão cisalhante máxima, que supera a da areia pura nas tensões normais aplicadas de 200 e 400 kPa.

Com 0,75% de fibras, a coesão sobe para 29,34 kPa, ultrapassando a da areia pura. Este aumento pode ser interpretado como um melhor contato entre solo e fibra, contribuindo para uma matriz mais coesiva e com maior capacidade de transmitir tensões. O ângulo de atrito permanece elevado ($32,54^\circ$), e a tensão cisalhante máxima continua a exibir valores superiores aos da areia pura, especialmente sob tensões normais mais altas.

A adição de 1% de fibras mantém a coesão praticamente estável (28,68 kPa) comparativamente ao teor anterior, contudo o ângulo de atrito e a tensão cisalhante máxima crescem ainda mais, alcançando $34,50^\circ$ e 299,70 kPa, respectivamente, sob uma tensão normal de 400 kPa. Isso sugere que este teor de fibras pode ser considerado ótimo para equilibrar resistência e deformabilidade do solo.

A mistura com 1,5% de fibras demonstra uma redução na coesão para 16,60 kPa, o que pode ser um indicativo de que há um limiar para a quantidade de fibras que podem ser adicionadas antes que a coesão do solo comece a diminuir, devido à ausência de contato direto entre as partículas de areia e as fibras, tendo maior contato de fibra com fibra. No entanto, são atingidos valores mais altos para o ângulo de atrito ($35,95^\circ$) e para a tensão cisalhante máxima (308,60 kPa sob tensão normal de 400 kPa), podendo indicar que a presença de fibras nessa concentração pode compensar a perda de coesão com um aumento no ângulo de atrito.

Essas observações sugerem que as fibras de açai, quando adicionadas à areia, alteram as propriedades de resistência ao cisalhamento do compósito, cuja tendência geral é de que o ângulo de atrito e a tensão cisalhante máxima aumentem consistentemente com a adição do teor de fibras.

Em alguns estudos em que foram utilizados outros tipos de fibras, resultados como os de Brahmachary e Rokonzaman (2018) indicaram que fibras mais longas possuem tendência a proporcionar melhores resultados no reforço de solos, atribuindo-se ao fato de que, para fibras menores, a área em contato com o solo é comparativamente menor, consequentemente havendo menor melhoria na resistência e rigidez do solo. No caso das fibras de açai, que são mais curtas, o aumento na resistência ao cisalhamento não é tão significativo em tensões mais baixas, mas sob tensões mais altas há uma melhor interação com a matriz de areia, resultando em uma redistribuição mais eficiente das tensões. Portanto, a eficácia das fibras de açai, apesar de seu comprimento mais curto, pode ser mais pronunciada sob condições de maior carga, onde a interação fibra-matriz é maximizada.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, evidencia-se que a adição de fibras de açai à areia impacta positivamente nas propriedades de resistência ao cisalhamento do compósito solo-fibra. Observa-se uma tendência geral de variação nas propriedades mecânicas do compósito, onde a coesão inicialmente diminui com pequenas adições de fibra, mas tem seu valor majorado à medida que se aumenta o teor delas. Adicionalmente, o ângulo de atrito e a tensão cisalhante máxima aumentam consistentemente com maiores concentrações de fibras.

Destaca-se que a eficácia do reforço com fibras de açai é mais pronunciada sob maiores tensões, como a tensão normal de 400 kPa, ressaltando o potencial deste compósito solo-fibra como uma alternativa para aplicações em engenharia geotécnica que demandam materiais com maior resistência. Com base nos resultados, conclui-se que o teor de fibras de açai igual a 1% pode ser considerado ótimo, de forma a equilibrar resistência e deformabilidade, sendo o mais promissor entre os avaliados para o solo estudado. Essa descoberta tem implicações significativas na seleção de teores de fibras para aplicações geotécnicas.

Em suma, este estudo reforça a eficácia do reforço com fibras de açai em solos arenosos, destacando a importância de selecionar cuidadosamente o teor de fibras para otimizar o desempenho do compósito solo-fibra. Essas descobertas abrem novas perspectivas para o desenvolvimento de soluções geotécnicas sustentáveis e eficientes, no entanto destaca-se a necessidade de pesquisas adicionais para uma compreensão

mais aprofundada dos mecanismos subjacentes, a fim de aprimorar os parâmetros de aplicação desses compósitos em diferentes contextos geotécnicos.

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 (2020). NBR 16840. *Solo—Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16843. *Solo—Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.
- ASTM, D. 3. 9. (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. *D3080/D3080M*, 3(9).
- Brahmachary, T. K., Rokonzaman, M. (2018). Investigation of random inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect CBR value. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1), 10.
- Carvalho, L. M. C. D., Monteiro, F. F., Casagrande, M. D. T. (2023). Large-scale direct shear testing in coir fibers reinforced sand. *Soils and Rocks*, 46, e2023002822.
- da Silveira, P. H. P. M., Cardoso, B. F. D. A. F., Marchi, B. Z., Monteiro, S. N. (2024). Amazon Natural Fibers for Application in Engineering Composites and Sustainable Actions: A Review. *Eng*, 5(1), 133-179.
- Huang, J., Hartemink, A. E. (2020). Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, 208, 103295.
- Lirer, S., Flora, A., Consoli, N. C. (2011). On the strength of fibre-reinforced soils. *Soils and foundations*, 51(4), p. 601-609.
- Miele, P., Di Martire, D., Di Napoli, M., Guerriero, L., Calcaterra, D. (2021). Temporal efficiencies of soil bioengineering techniques to mitigate geo-hydrological risks. *Ecological Engineering*, 170, 106338.
- Miele, P., Di Martire, D., Di Napoli, M., Guerriero, L., Calcaterra, D. (2021). Temporal efficiencies of soil bioengineering techniques to mitigate geo-hydrological risks. *Ecological Engineering*, 170, 106338.
- Silveira, M.V., Ferreira, J. W. D. S., Casagrande, M. D. T. (2022). Effect of surface treatment on natural aging and mechanical behavior of sisal fiber-reinforced sand composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 06022001.
- Siqueira, M. U., Contin, B., Fernandes, P. R. B., Ruschel-Soares, R., Siqueira, P. U., & Baruque-Ramos, J. (2022). Brazilian agro-industrial wastes as potential textile and other raw materials: a sustainable approach. *Materials Circular Economy*, 4(1), 9.
- 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.