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/COBRAMSEG2026.6/81

Desempenho não drenado de argila pura e reforçada com fibras de açaí em ensaios inundados de Direct Simple Shear (DSS)

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

José Wilson dos Santos Ferreira, Dsc.
Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jose.wilson@unb.br

Michéle Dal Toé Casagrande, Dsc.
Professora, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: Este estudo avaliou o comportamento mecânico de uma argila tropical reforçada com 1% de fibras de açaí por meio de ensaios de Cisalhamento Simples Direto (DSS). Os experimentos foram conduzidos em condição consolidada-não drenada e inundada, sob tensões de 200, 400 e 800 kPa, visando preencher lacunas na literatura sobre o uso deste reforço sob controle de volume. Os resultados finais demonstraram benefícios consistentes do reforço de açaí: houve um incremento de 4,34° no ângulo de atrito efetivo, enquanto a análise das trajetórias de tensão revelou que a inclusão de fibras mitigou a geração de poropressão positiva, preservando a tensão normal efetiva de forma mais eficiente que o solo puro. Quanto à rigidez, observou-se aumento no módulo de cisalhamento secante (G), embora a degradação da rigidez tenha seguido padrões similares. O reforço com fibras de açaí se mostra uma estratégia eficaz para melhorar a estabilidade e a ductilidade de solos argilosos saturados, consolidando-se como uma alternativa sustentável para a engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: DSS, Fibras de açaí, Argila tropical, Resistência não drenada.

ABSTRACT: This study evaluated the mechanical behavior of a tropical clay reinforced with 1% açaí fibers through Direct Simple Shear (DSS) tests. The experiments were conducted under consolidated-undrained and inundated conditions, at vertical stresses of 200, 400, and 800 kPa, aiming to address gaps in the literature regarding the use of this reinforcement under volume-controlled conditions. The results demonstrated consistent benefits from the açaí reinforcement: there was a 4.34° increase in the effective friction angle, while the analysis of stress paths revealed that the inclusion of fibers mitigated the generation of positive pore water pressure, preserving the effective normal stress more efficiently than the pure soil. Regarding stiffness, an increase in the secant shear modulus (G) was observed, although stiffness degradation followed similar patterns. Reinforcement with açaí fibers proves to be an effective strategy for improving the stability and ductility of saturated clayey soils, establishing itself as a sustainable alternative for geotechnical engineering.

KEYWORDS: DSS; Açaí fibers; Tropical clay; Undrained shear strength.

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis na engenharia geotécnica tem impulsionado o uso de fibras naturais como alternativa aos métodos tradicionais de estabilização de solos, que frequentemente

demandam alto consumo energético e elevada emissão de CO_2. Nesse contexto, o reforço com fibras vegetais atua na mobilização de tensões de tração, além do aumento da resistência ao cisalhamento através do intertravamento entre as fibras e a matriz do solo.

Estudos anteriores com fibras de sisal e coco indicam ganhos significativos em ductilidade e resistência, embora a eficiência do sistema dependa da interface solo-fibra e de tratamentos específicos (Silveira, Ferreira & Casagrande, 2022). Nesse cenário, a fibra de açaí (*Euterpe oleracea*) surge como um material promissor, dado o grande volume de resíduos gerado na região Norte do Brasil.

Pesquisas preliminares utilizando fibras de açaí como reforço de solo indicaram, por meio de ensaios de compressão simples, que teores de até 2% dessa fibra elevam a resistência de pico em argilas (Santos et al., 2026). Contudo, a literatura ainda carece de dados sobre o comportamento desse compósito sob condições de cisalhamento, que melhor representam as solicitações de campo em solos finos. Neste aspecto, o ensaio de Cisalhamento Simples Direto (DSS) é fundamental na caracterização mecânica de solos finos, permitindo a rotação de tensões principais de forma mais fidedigna que o cisalhamento direto convencional (Kalumba et al., 2025).

Embora o DSS tenha sido utilizado para avaliar solos reforçados com microfibras de vidro e basalto (ex.: Calaunan, 2022; Seyyedrezaie et al., 2024), não há registros de sua aplicação em argilas reforçadas com fibras de açaí. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento mecânico de uma argila reforçada com fibras de açaí por meio de ensaios DSS. A análise foca na resistência ao cisalhamento e na rigidez do material sob condição inundada e não drenada, visando preencher a lacuna existente sobre o desempenho desse resíduo agroindustrial em solicitações complexas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo consistem nas fibras de açaí (Figura 1a) e em um solo argiloso tropical (Figura 1b), coletado no campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG) da Universidade de Brasília.



a) b)

Figura 1. a) Fibras de açaí b) Solo argiloso típico de Brasília.

As fibras naturais de açaí são extraídas do caroço e, neste estudo, foram incorporadas ao solo para investigação de melhoria geomecânica. Este subproduto, derivado do processamento industrial da polpa do fruto do açaí, foi adquirido de uma empresa que comercializa biomassa em Belém–PA.

As especificações física e geométrica desse material (Tabela 1), que abrangem densidade e morfologia das fibras, baseiam-se em caracterizações prévias reportadas por Silva et al. (2024).

Tabela 1. Propriedades físicas e geométricas das fibras de açaí.

Densidade (g·cm^{-3})	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
0.89 ± 0.03	9.432 ± 2.83	0.136 ± 0.04

O teor de reforço utilizado foi de 1% em massa de solo seco, disperso aleatoriamente para a obtenção dos compósitos solo-fibra. Essa dosagem reflete os resultados ótimos de resistência obtidos por Silva et al. (2024), que validaram o potencial geomecânico dessa proporção específica através de ensaios experimentais prévios.

A matriz de solo utilizada nesta pesquisa provém de horizontes superficiais (1,0 a 3,0 m), coletada na forma de amostra deformada. Ensaios prévios de caracterização revelaram um material com densidade real dos grãos de 2,67 g/cm³ (determinada via picnometria a gás) e uma composição granulométrica mista (Figura 2), composta por 44% de areia, 21% de silte e 35% de argila.

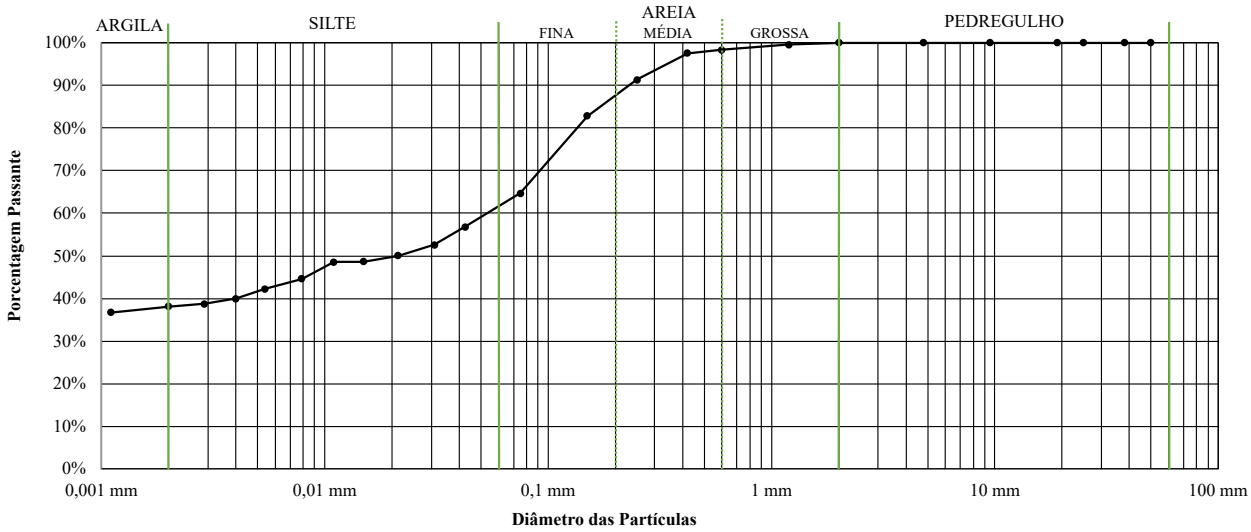


Figura 2. Curva granulométrica do solo.

Complementarmente, foi empregado o método MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), que forneceu parâmetros intrínsecos ao comportamento tropical do solo, com coeficientes c' de 2,24 mm e d' de 43,48 kg/m³, resultando em um índice e' de 0,99 e uma perda por imersão de 51,12%. Todas essas propriedades fundamentaram o enquadramento do solo nos principais sistemas de classificação apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo das classificações geotécnicas do solo.

Sistema de classificação	Índice/Grupo	Designação técnica
MCT (DNIT 259/2023)	LG’	Solo laterítico argiloso
AASHTO (M145-91)	A-6 (6)	Solo argiloso
SUCS (ASTM D2487)	ML	Silte de baixa compressibilidade

As curvas de compactação do solo e do compósito solo-fibra são ilustradas na Figura 3, juntamente com as curvas de saturação, relacionando os teores de umidade às respectivas massas específicas secas. Elas foram geradas a partir de resultados do ensaio de compactação do tipo Proctor, realizado sob energia normal, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7182 (ABNT, 2025). Por meio delas, são observados picos bem definidos, associados à condição de máxima densificação do arranjo das partículas.

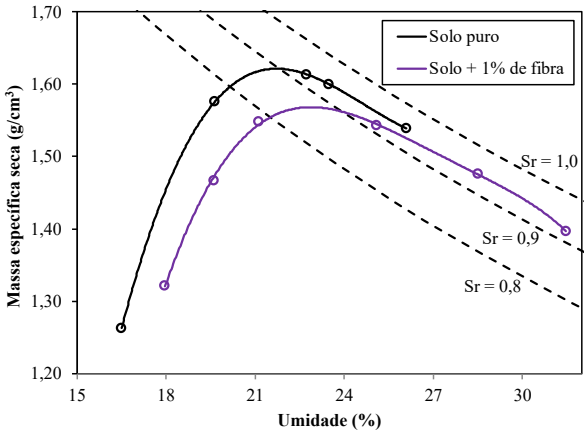


Figura 3. Curvas de compactação do solo e do compósito solo-fibra.

As propriedades de compactação da matriz pura e do compósito foram utilizadas para estabelecer as condições de moldagem dos corpos de prova. A adição do reforço vegetal promove, neste caso, um ligeiro incremento na umidade ótima e uma redução na densidade seca máxima.

2.2 Métodos

O escopo experimental consistiu na avaliação do comportamento geomecânico da matriz argilosa e do compósito com fibras aleatoriamente distribuídas, por meio de ensaios de Cisalhamento Simples Direto (DSS) em condição inundada. O foco residiu na determinação dos parâmetros de resistência sob carregamento monotônico, seguindo as diretrizes normativas vigentes.

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando a fração passante na peneira de 4,75 mm, com teores de umidade e densidade baseados nos parâmetros ótimos da energia Proctor Normal. O protocolo de preparação seguiu as seguintes etapas: i) umidificação: adição de água destilada até a umidade ótima, seguida de homogeneização dos materiais e armazenamento em câmara úmida por 12 horas; ii) compactação: o material foi compactado nos moldes cilíndricos do ensaio Proctor Normal, garantindo um grau de compactação mínimo de 98%; e iii) extração e talhagem: a partir dos blocos compactados, procedeu-se à talhagem cuidadosa das amostras para as dimensões finais de 63,5 mm de diâmetro e 25,4 mm de altura, preservando a integridade estrutural e a orientação das partículas.

Os ensaios foram executados no sistema automatizado ShearTrac Direct Simple Shear (Geocomp), em conformidade com a norma ASTM D6528 (ASTM, 2024). O experimento (Figura 4) contemplou a execução de seis ensaios, divididos igualmente entre o solo puro e o solo reforçado (1% de fibra), sob tensões de consolidação efetiva de 200, 400 e 800 kPa, que foram conduzidos na condição não drenada com controle de volume constante. A taxa de deslocamento cisalhante calculada foi de 0,021 mm/min, definida conforme os critérios de tempo de consolidação da referida norma, permitindo uma análise precisa da mobilização da resistência na interface solo-fibra.

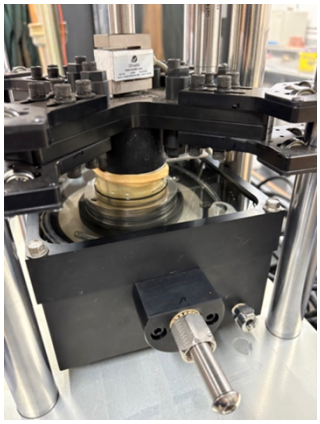


Figura 4. Disposição de amostra em execução no equipamento de DSS.

Nos ensaios DSS com controle de volume, a poropressão não foi medida diretamente por transdutor. Em vez disso, adotou-se a premissa clássica de que, para amostras cisalhadas em condição não drenada com altura constante, a variação da tensão vertical total durante o cisalhamento corresponde à geração de poropressão equivalente (Dyvik et al., 1987). Dessa forma, a tensão normal efetiva (σ′) foi calculada a partir da tensão total consolidada e da poropressão inferida, permitindo a apresentação das trajetórias de tensões efetivas (τ×σ′) e dos parâmetros efetivos de Mohr-Coulomb.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas de tensão versus deformação cisalhante (Figura 5) evidenciam, tanto para o solo puro quanto para o compósito, um comportamento de endurecimento progressivo (strain hardening) sem um pico de resistência claramente definido. Em todos os casos, a estabilização da tensão ocorreu apenas em níveis elevados de deformação (15–20%), caracterizando um padrão de ductilidade análogo ao reportado por Calaunan (2022) em ensaios DSS com argilas bentoníticas.

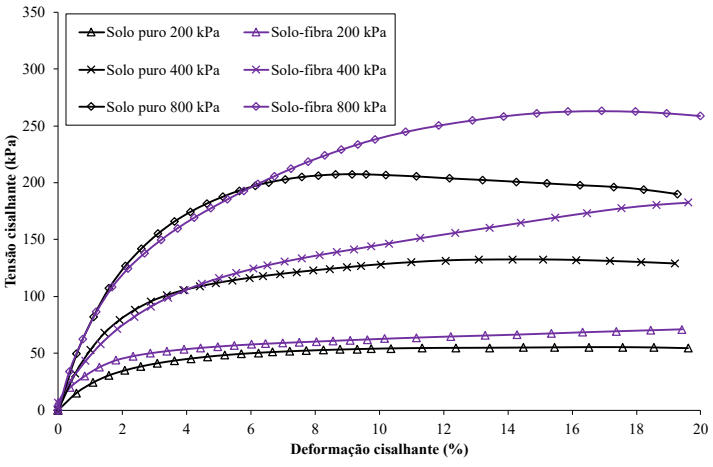


Figura 5. Curvas tensão cisalhante *versus* distorção angular.

Complementarmente, a Figura 6 apresenta as trajetórias de tensões efetivas, nas quais se observa uma intensa geração de poropressão positiva durante o cisalhamento. Como o ensaio DSS é realizado a volume constante, essa poropressão manifesta-se indiretamente pela queda da tensão normal efetiva, refletindo a transferência de carga da matriz mineral para a água nos poros.

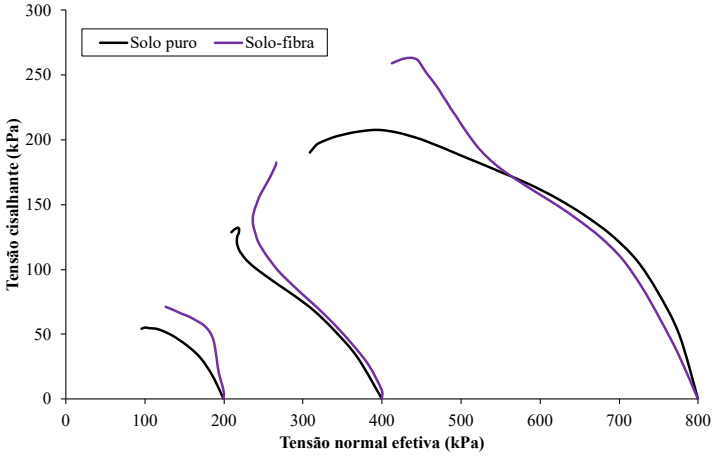


Figura 6. Curvas de tensões efetivas em solo e solo-fibra.

Diferentemente do solo puro, que exibiu queda proeminente na tensão efetiva, o solo-fibra demonstrou menor geração de poropressão em todos os estágios de carga. Esse comportamento corrobora os achados de Kong et al. (2025), sugerindo que o reforço cria uma estrutura tridimensional que limita a contração da matriz e o acúmulo de pressão neutra. A menor geração de poropressão no solo-fibra sob condição inundada representa uma vantagem crítica para aplicações em zonas saturadas ou sujeitas à variação do nível d'água pois, ao preencher vazios e densificar a estrutura, as fibras retardam a transferência de carga para a água dos poros (Kong et al., 2025; Robinson et al., 2019).

A envoltória de ruptura (Figura 6) revelou uma troca característica entre coesão e atrito promovida pelo reforço. Enquanto a coesão efetiva (c') reduziu-se de 9,99 kPa para 4,29 kPa, o ângulo de atrito efetivo (ϕ') aumentou de 27,16° para 31,50°. Essa tendência, também descrita por Calaunan (2022) e Consoli, Prietto & Ulbrich (1998), ocorre porque a presença física das fibras pode reduzir os contatos argila-argila (base da coesão), mas amplia o intertravamento e a mobilização de forças de tração interfacial. Conforme Sun et al. (2023), a rugosidade superficial da fibra natural permite que ela cruze planos de falha e distribua tensões, o que macroscopicamente eleva o ângulo de atrito.

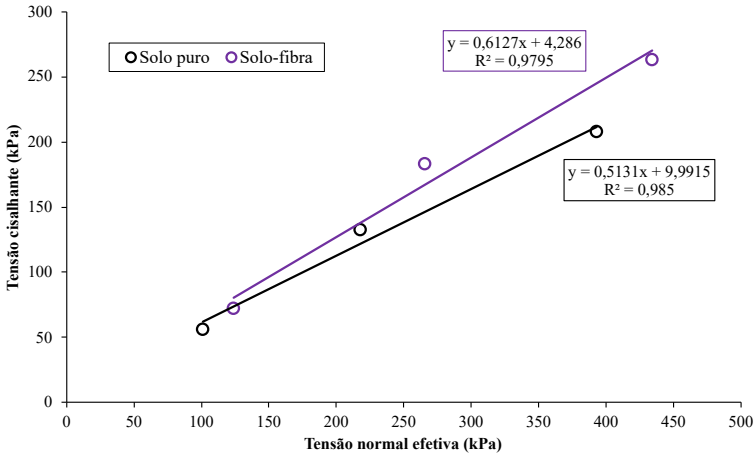


Figura 6. Envoltórias Mohr–Coulomb.

A análise comparativa do módulo de cisalhamento secante (G) entre o solo puro e o solo reforçado revela que a inclusão de 1% de fibras de açaí eleva a rigidez inicial da matriz, de forma sutil, em todos os níveis de tensão. Em ambos os materiais, o módulo de cisalhamento secante

apresentou redução marcante com o avanço das deformações (Figura 7), comportamento universal em solos e geomateriais.

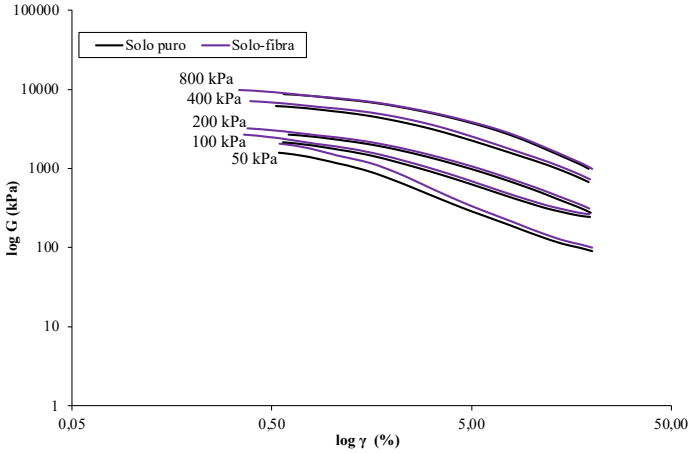


Figura 7. Curvas de rigidez do solo: relação logarítmica entre G e γ.

Observa-se que as curvas de degradação do solo puro e do solo-fibra são praticamente sobrepostas em todos os níveis de tensão. Isso indica que a adição de fibras não altera o padrão intrínseco de degradação da rigidez: ambos os materiais perdem rigidez de forma proporcional ao mesmo ritmo. A contribuição das fibras é, portanto, elevar o nível de G em toda a curva de forma aproximadamente proporcional, e não retardar ou modificar a trajetória de degradação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa investigou o comportamento geomecânico de uma argila tropical reforçada com fibras de açaí por meio de ensaios DSS. Os resultados obtidos permitem concluir que a incorporação de 1% de fibras atua como um mecanismo eficiente de melhoria das propriedades de resistência e rigidez. A adição das fibras promoveu um incremento significativo no ângulo de atrito efetivo, que se elevou de 27,16° para 31,50°, além de gerar sistematicamente menores excessos de poropressão durante o cisalhamento em comparação ao solo puro. Além disso, observou-se um aumento sutil no módulo de cisalhamento secante (G) com a adição de fibras, embora o padrão de degradação da rigidez tenha seguido a tendência intrínseca do solo.

Os resultados validam a fibra de açaí como uma alternativa tecnicamente robusta e ambientalmente sustentável para o reforço de solos tropicais, oferecendo uma solução de baixo custo e menor impacto energético em comparação a reforços sintéticos.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2021). M 145-91. *Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*.

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

ASTM International (2017). ASTM D2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.

ASTM International (2024). ASTM D6528: *Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils.*

Calaunan, J. M. F. V. (2022) *Evaluation of Swelling Pressure and Shear Strength of Inorganic Microfiber-reinforced Bentonite for the Engineered Barrier System*. Master's thesis, University of Nebraska, 132 p.

Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., & Ulbrich, L. A. (1998) Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(12), 1211–1214.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 259/2023 – CLA: *Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação*. Rio de Janeiro, 2023.

Kalumba, D., Babalola, Z., Aneke, F., Chebet, F., & Sobhee-Beetu, L. (2025) Assessment of Soil Shear Strength Parameters: Insights from Direct Shear and Direct Simple Shear Testing. *Civil Engineering Journal*, 11(11).

Kong, B.-W., He, H., Yan, Y.-T., Ding, Z., & Zou, B.-P. (2025) Liquefaction behavior of fiber-reinforced calcareous sand under cyclic simple shear tests. *Acta Geotechnica*, 20, 5139–5158.

Robinson, S., Brennan, A. J., Knappett, J. A., Wang, K., & Bengough, A. G. (2019) Cyclic simple shear testing for assessing liquefaction mitigation by fibre reinforcement. *Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Associazione Geotecnica Italiana.

Santos, M. L. de J., Lopes, M. M., Silva, A. B., Ferreira, J. W. dos S., & Casagrande, M. D. T. (2026) Mechanical performance and durability of açaí fibers as reinforcement in tropical clay soil. *Journal of Natural Fibers*, 23(1), 2595560.

Silva, A. B., Gonzaga, L. B. T., Cavalcante, A. L. B., & Casagrande, M. D. T. (2024) Ecoengenharia em geotecnia: utilização de fibras de açaí da Amazônia (euterpe oleracea) no melhoramento de solos arenosos. In: *Anais eletrônicos do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Balneário Camboriú.

Silveira, M. V., Ferreira, J. W. 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).

Seyyedrezaie, S. A., Tabarsa, A., Keramati, M., & Pordeli, H. (2024) *Dynamic behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP) improved loess soil with basalt fiber reinforcement using cyclic direct simple shear test* [Preprint]. SSRN.

Sun, Y., Li, H., Cheng, Z., Dong, J., & Wang, Y. (2023) Experimental and numerical simulation study on mechanical properties of shallow slope root-soil composite in Qinghai area. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(7), 2834–2852.