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/COBRAMSEG2026.6/109

Nature-Based Solutions em Geotecnia: Fibras Naturais e Impacto Hidráulico em Solos Arenosos sob Análise Experimental e Numérica

Kauã da Silva Gomes
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, kauagomes555@gmail.com

Augusto Barbosa Silva, Msc.
Professor, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, augusto0412@hotmail.com

André Luís Brasil Cavalcante, Dsc.
Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, abrasil @unb.br

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

RESUMO: O uso de soluções baseadas na natureza (nature-based solutions) na geotecnia tem crescido por conciliar sustentabilidade e desempenho técnico. Entre essas abordagens, a incorporação de fibras naturais em solos pode melhorar propriedades mecânicas, porém seus efeitos hidráulicos, especialmente quanto à alteração de permeabilidade e à possível formação de caminhos preferenciais de percolação, ainda demandam verificação experimental. Este trabalho avaliou a influência da adição de fibras de açaí (*Euterpe oleracea*) no comportamento hidráulico de uma areia lavada por meio de abordagem experimental–numérica. Foram determinados granulometria, índices de vazios (emáx e emín) e compacidade relativa, além de ensaios de permeabilidade em permeâmetro de carga variável. Compararam-se solo puro e compósito com 1% de fibras (Cr = 70% e umidade inicial de 10%). Em paralelo, um modelo físico em escala reduzida, representativo da fundação de uma barragem, foi monitorado com traçador colorido para visualização das linhas de fluxo, e uma simulação de percolação no SEEP/W foi realizada para o solo puro, permitindo comparação qualitativa do padrão de escoamento. Observou-se aumento discreto da condutividade hidráulica com a adição de fibras ($3{,}14\times10^{-6}$ para $3{,}92\times10^{-6}$ m/s), mantendo a mesma ordem de grandeza, sem evidências de canalização preferencial nas trajetórias observadas. Conclui-se que, nas condições investigadas, a adição de fibras de açaí não alterou de forma relevante o padrão global de percolação do meio arenoso.

PALAVRAS-CHAVE: Nature-based solutions; Fibras de açaí; Solos reforçados; Linhas de fluxo; Permeabilidade.

ABSTRACT: The use of nature-based solutions in geotechnical engineering has grown due to their ability to combine sustainability and technical performance. Among these approaches, incorporating natural fibers into soils can improve mechanical properties; however, their hydraulic effects—particularly changes in permeability and the potential formation of preferential seepage paths—still require experimental verification. This study evaluated the influence of açaí (*Euterpe oleracea*) fibers on the hydraulic behavior of a washed sand using an experimental–numerical approach. Grain-size distribution, void ratio limits (emin and emax), and relative density were determined, and permeability was measured using a falling-head permeameter. Clean sand and a composite with 1% fibers (Cr = 70% and initial water content of 10%) were compared. In addition, a reduced-scale physical model representative of a dam foundation was monitored with a dye tracer to visualize flow lines, and a SEEP/W seepage simulation was performed for the clean sand, enabling qualitative comparison of flow patterns. A slight increase in hydraulic conductivity was observed with fiber addition (3.14×10^{-6} to 3.92×10^{-6} m/s), with no change in order of magnitude and no evidence of preferential channeling in the observed trajectories. It is concluded that, under the investigated conditions, açaí fiber inclusion did not significantly alter the global seepage pattern of the sandy medium.

KEYWORDS: Nature-based solutions; Açaí fibers; Reinforced soils; Flow lines; Permeability.

1 INTRODUÇÃO

A adoção de soluções baseadas na natureza tem se consolidado como uma diretriz relevante para a engenharia, em especial quando se busca conciliar desempenho técnico, redução de impacto ambiental e aproveitamento de resíduos agroindustriais. Na geotecnia, uma das estratégias mais difundidas nesse contexto é o reforço de solos por meio da incorporação de fibras naturais, com foco em ganhos de resistência e rigidez e em respostas mais dúcteis do compósito. Sob a ótica conceitual, o reforço pode ser entendido como a introdução de elementos capazes de mobilizar esforços de tração no maciço terroso, complementando a capacidade resistente do solo (Castro, 2020). Diversos trabalhos indicam que fibras vegetais, quando adequadamente dosadas e distribuídas, podem melhorar o desempenho mecânico e, em certos casos, contribuir para o controle de fissuração, reduzindo abertura e espaçamento de trincas (Gomes, 2018; Faustino & Ferreira, 2024).

Entretanto, a incorporação de fibras não altera apenas a resposta mecânica: ela também pode modificar o arranjo granular e, consequentemente, o comportamento hidráulico do meio poroso. As propriedades do compósito solo-fibra dependem simultaneamente de parâmetros das fibras (teor, comprimento e características físicas) e do solo de base, com reflexos diretos no comportamento global observado (Curcio, 2008; Silveira, Ferreira & Casagrande, 2022). Do ponto de vista hidráulico, há registros na literatura de aumento da condutividade hidráulica com o incremento do teor de fibras, hipótese frequentemente associada à criação de descontinuidades e microcanais que facilitariam o escoamento no interior do compósito (Curcio, 2008; Faustino & Ferreira, 2024). Esse aspecto é particularmente relevante em estruturas e maciços sujeitos à percolação, pois mudanças em permeabilidade e em trajetórias de fluxo podem influenciar a evolução de gradientes hidráulicos, elevando a suscetibilidade a processos de carreamento de partículas e erosão.

A compreensão do escoamento em meios porosos parte do fato de que a água ocupa os vazios do solo de forma parcial ou total e, quando submetida a um gradiente hidráulico, tende a deslocar-se no interior do maciço (Pinto, 2011). Para interpretar esse fenômeno, uma representação clássica é a rede de fluxo, construída a partir de linhas de fluxo (trajetórias preferenciais do movimento da água) e linhas equipotenciais (linhas de mesma carga hidráulica), que se cruzam ortogonalmente em regime laminar (Massad, 2003). A análise dessas redes permite avaliar como o fluxo se distribui no maciço e identificar cenários em que há concentração de percolação e elevação de gradientes, condições associadas ao início de mecanismos erosivos. Para estudo e visualização dessas redes, podem ser empregados métodos analíticos, gráficos, numéricos e experimentais; entre eles, modelos físicos em laboratório têm sido amplamente utilizados para reproduzir geometrias e condições hidráulicas de interesse e permitir a observação direta das trajetórias de percolação com auxílio de corantes (Leão, 2018; Oliveira et al., 2018; Moreira, Cavalcante e Costa, 2022).

Apesar do avanço no uso de fibras naturais para reforço e da ampla discussão de ganhos mecânicos, ainda é limitada a base experimental que descreve, de forma clara, se e como a presença das fibras altera as linhas de fluxo e a ocorrência de caminhos preferenciais de percolação em solos arenosos. Essa lacuna é crítica, pois a manutenção de um fluxo “bem distribuído” e previsível é um requisito de segurança hidráulica em diferentes aplicações geotécnicas. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar, por meio de ensaios físicos em modelo reduzido com visualização de linhas de fluxo por traçador colorido, e de simulações numéricas no SEEP/W, se a incorporação de fibras naturais de açaí em um solo arenoso altera a permeabilidade e o padrão de percolação (incluindo a eventual formação de caminhos preferenciais). A comparação entre os resultados experimentais e numéricos busca avaliar a consistência das interpretações e discutir as implicações do comportamento observado para a segurança hidráulica do compósito.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Solo arenoso

O material de base foi uma areia lavada obtida comercialmente em Brasília/DF. Optou-se por esse solo em função de sua ampla disponibilidade e de sua aplicação recorrente como material padrão em ensaios geotécnicos, além de permitir controle mais direto das condições de percolação no modelo físico.

2.1.2 Fibras naturais de açaí

O reforço foi composto por fibras naturais provenientes do caroço do açaí (*Euterpe oleracea*), resultantes do processamento industrial após remoção da polpa. As fibras de açaí (Figura 3) foram adquiridas de um fornecedor que comercializa biomassa em Belém – PA, cujas propriedades geométricas e físicas (densidade, área de seção, comprimento e diâmetro) seguem dados previamente determinados pelos autores (Silva et al., 2024), e são apresentados na Tabela 1.



Figura 1. Fibras de açaí (*Euterpe oleracea*).

Tabela 1. Propriedades físicas e geométricas das fibras de açaí. (Silva et al., 2024)

Densidade (g/cm³)	Área da seção transversal (mm²)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
0,89	0,15	10,11	0,14

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização física do solo

A distribuição granulométrica da areia foi determinada conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), por peneiramento nas faixas granulométricas aplicáveis e sedimentação para eventuais frações finas. Já a massa específica dos grãos foi obtida conforme a NBR 6458 (ABNT, 2016), utilizando picnômetros.

2.2.2 Determinação de índices de vazio máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$)

Os índices de vazios máximo e mínimo foram medidos para permitir o cálculo da compacidade relativa (C_r) e, consequentemente, a determinação da massa necessária para moldagem das amostras. O índice de vazios máximo (estado mais fofo) foi determinado conforme a NBR 16840 (ABNT, 2020) e o índice de vazios mínimo (estado mais compacto) conforme a NBR 16843 (ABNT, 2020).

2.2.3 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas adotando $C_r = 70\%$ tanto para a areia pura quanto para o compósito solo-fibra, de modo a garantir estabilidade geométrica durante o manuseio, a saturação e a execução do modelo físico. Para melhorar a interação inicial entre os constituintes e favorecer a aderência/dispersão das fibras, foi adotada uma umidade inicial de 10%, conforme procedimento aplicado por Carvalho, Monteiro & Casagrande (2023).

O compósito foi produzido com 1% de fibras de açaí (relação em massa, em relação ao solo seco), incorporadas de forma aleatória e cuidadosamente homogeneizadas durante a mistura. Esse teor foi selecionado com base em resultados prévios do grupo (Silva et al., 2024), que indicaram desempenho mecânico favorável para essa ordem de grandeza de dosagem.

2.2.4 Ensaio de permeabilidade

A condutividade hidráulica foi determinada em laboratório para as duas condições (areia e compósito solo-fibra). Considerando os valores reduzidos de permeabilidade e a maior confiabilidade operacional para esse cenário, adotou-se o permeâmetro de carga variável, conforme a NBR 14545 (ABNT, 2021). Os resultados foram utilizados tanto para comparação direta entre as misturas quanto como dado de entrada para a etapa numérica.

2.2.5 Modelo físico em escala reduzida: montagem e visualização das linhas de fluxo

Para gerar as linhas de fluxo no compósito solo-fibra, foi construído um modelo físico representativo da percolação na fundação de uma barragem de concreto. Utilizou-se um tanque de vidro (aquário) com dimensões internas de 58 cm × 24 cm × 25 cm, no qual foi instalado um protótipo de barragem em acrílico (Figura 2). O interior do protótipo foi então preenchido com pedregulhos de forma a aumentar sua massa, simulando assim uma barragem de gravidade.

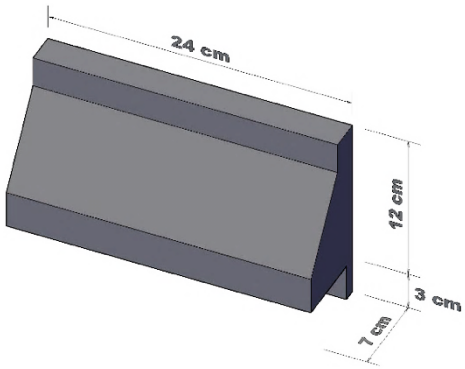


Figura 2. Geometria do protótipo de barragem.

A fundação foi montada em seis camadas com 2,5 cm de altura cada, garantindo a manutenção da compacidade relativa adotada e buscando homogeneidade ao longo do volume. A instalação do protótipo nas camadas superiores demandou maior cuidado para evitar heterogeneidades localizadas, especialmente no contato com a estrutura (Figura 3).

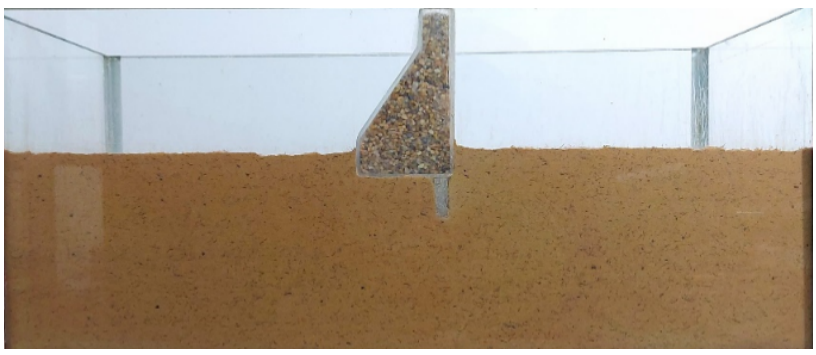


Figura 3. Vista lateral do modelo físico.

Após a moldagem, procedeu-se à saturação gradual do meio poroso por alimentação lenta de água, utilizando equipo conectado a reservatório, com o objetivo de minimizar aprisionamento de ar e perturbações no arranjo do material. A saturação foi conduzida por aproximadamente 24 horas.

Com o sistema saturado, foram então impostas condições de contorno hidráulicas representativas: a montante, a lâmina d'água foi elevada em 9 cm (mantendo borda livre de 1 cm na estrutura), enquanto a jusante foi mantido o nível de 1 cm, estabelecendo gradiente hidráulico controlado. Após a estabilização dos níveis, iniciou-se a injeção de corante a montante no contato fundação-vidro, em três pontos igualmente espaçados,

permitindo o rastreamento visual das trajetórias de percolação.

O desenvolvimento das linhas de fluxo foi registrado com câmera fotográfica de alta resolução ao longo de uma semana, com monitoramento diário, de modo a acompanhar a evolução espacial e temporal do traçador no interior do meio poroso.

2.2.6 Modelagem numérica no SEEP/W

Em paralelo ao modelo físico, foi realizada simulação de percolação no software SEEP/W, adotando-se a mesma geometria do protótipo e as mesmas condições de contorno hidráulicas (níveis a montante e jusante), apenas para o solo puro. Os valores de condutividade hidráulica determinados em laboratório foram inseridos como parâmetros do material, e as linhas de fluxo geradas numericamente foram comparadas às observadas experimentalmente, com foco na identificação de similaridades/diferenças quanto ao padrão de percolação e à ocorrência (ou não) de caminhos preferenciais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização física do solo

A curva granulométrica do material utilizado (Figura 7) evidencia predominância da fração areia, com 78% do total, composta por 55% de areia fina, 19% de areia média e 4% de areia grossa. As frações finas correspondem a 20% de silte e 2% de argila. Esse arranjo granulométrico é compatível com a classificação SM (areia siltosa) pelo sistema SUCS, indicando um solo arenoso com presença significativa de finos não plásticos ou de baixa plasticidade, o que pode influenciar tanto a compactação quanto o regime de percolação observado em laboratório.

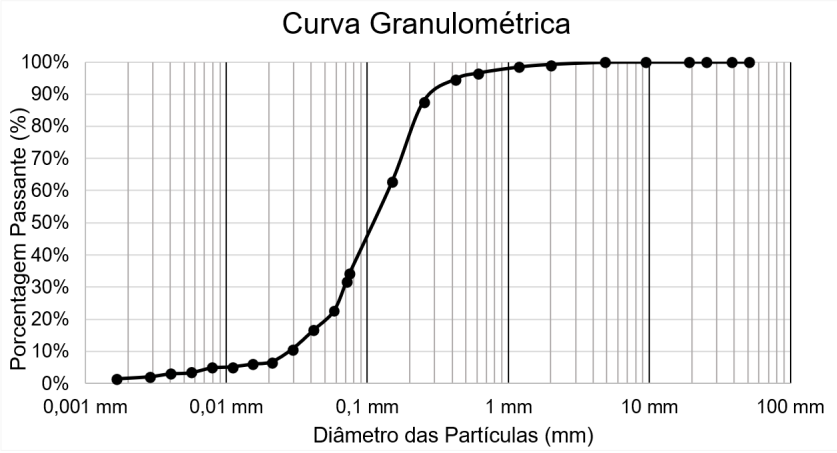


Figura 4. Curva de distribuição granulométrica do solo.

Os índices físicos complementares obtidos — massa específica real dos grãos Gs = 2,63, coeficiente de uniformidade C_u = 5,4 e coeficiente de curvatura C_c = 1,3 — sugerem uma areia com distribuição granulométrica relativamente bem graduada, o que tende a favorecer um esqueleto granular mais estável e reduzir a probabilidade de formação espontânea de macrocanais de fluxo quando a amostra é montada de modo homogêneo.

3.2 Índices de vazios e condições de moldagem

Os valores medidos para os índices de vazios foram $e_{máx}$ = 1,10 e $e_{mín}$ = 0,64, parâmetros fundamentais para o controle do estado de compactação por compacidade relativa. Com base nesses valores e na compacidade relativa adotada de 70%, foi possível definir a massa necessária para moldagem das amostras utilizadas no permeâmetro (aproximadamente 1487 g) e estimar o consumo de material para o modelo físico, que demandou cerca de 31 kg de solo. O controle por C_r é particularmente importante neste estudo, pois

variações locais de densidade poderiam, por si só, alterar a condutividade e o padrão de percolação, dificultando a atribuição de efeitos à presença das fibras.

3.3 Condutividade hidráulica: solo versus compósito areia–fibra

Os resultados do ensaio de permeabilidade indicam que a adição de 1% de fibras de açaí promoveu um aumento numérico discreto na condutividade hidráulica, passando de $3{,}14\times10^{-6}$ m/s (solo puro) para $3{,}92\times10^{-6}$ m/s (compósito solo-fibra). Apesar desse incremento, ambos os materiais permaneceram na mesma ordem de grandeza (10^{-6} m/s), sugerindo que a inclusão de fibras, na dosagem e morfologia adotadas, não foi suficiente para alterar de forma marcante o regime global de percolação do meio poroso.

Esse resultado é coerente com a interpretação de que fibras podem introduzir descontinuidades locais e microvazios adicionais, contribuindo para aumentos modestos de permeabilidade. Em compósitos solo-fibra, Faustino & Ferreira (2024) reportou incrementos de condutividade hidráulica que podem chegar a cerca de 31%, sem necessariamente modificar a ordem de grandeza. No presente estudo, a diferença observada se mantém nessa lógica: há variação numérica, mas não se identifica mudança expressiva do comportamento hidráulico global. Ainda assim, é importante destacar que a permeabilidade, isoladamente, não é suficiente para concluir sobre a existência de caminhos preferenciais, motivo pelo qual a avaliação direta das linhas de fluxo constitui etapa central do trabalho.

3.4 Linhas de fluxo no modelo físico e comparação com SEEP/W

A visualização experimental por traçador permitiu acompanhar a evolução espacial e temporal da percolação no modelo físico (Figura 5). Após a injeção de tinta a montante, observou-se a formação progressiva das trajetórias de fluxo, com desenvolvimento gradual em direção a jusante. A linha de fluxo mais próxima à estrutura foi a que apresentou maior avanço ao longo do período monitorado, completando a trajetória montante–jusante no intervalo observado. Esse comportamento é consistente com a tendência de maiores gradientes hidráulicos e maior “atratividade” do fluxo na região adjacente à barragem, como também observado por Moreira, Cavalcante & Costa (2022).

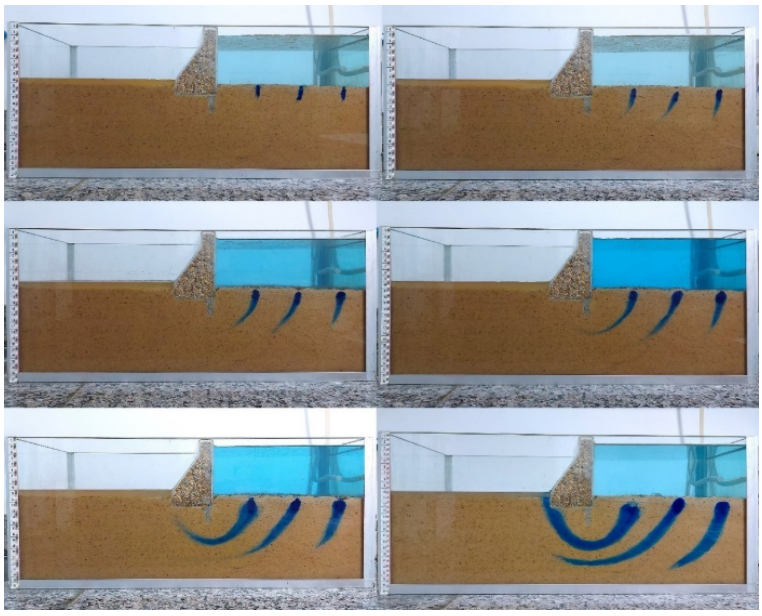


Figura 5. Evolução das linhas de fluxo no compósito solo-fibra.

No resultado do SEEP/W (Figura 6), as setas de velocidade indicam o sentido do escoamento e destacam as regiões de maior intensidade de percolação, enquanto as linhas de fluxo e equipotenciais permitem visualizar a distribuição do gradiente hidráulico no maciço. A etapa numérica no SEEP/W reproduziu um padrão de fluxo regular, característico de meios homogêneos com condutividade aproximadamente isotrópica: as linhas de

fluxo e as equipotenciais apresentaram distribuição uniforme, sem concentrações abruptas ou desvios que sugerissem canalização preferencial.

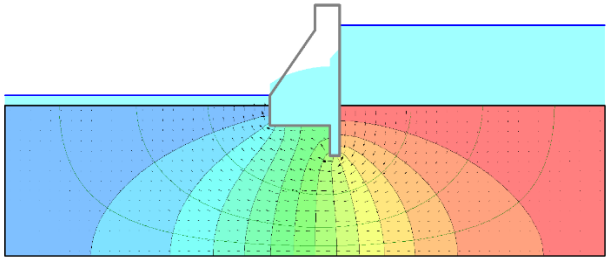


Figura 6. Simulação das linhas de fluxo no solo puro.

De forma qualitativa, o traçado do corante no modelo físico mostrou trajetórias compatíveis com essa configuração global do fluxo, especialmente quanto ao desenvolvimento de caminhos suaves e contínuos, sem evidência de canalização localizada; diferenças pontuais na extensão/definição das curvas observadas em laboratório são atribuídas ao tempo de avanço do traçador e às limitações de visualização do ensaio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o efeito da incorporação de 1% de fibras de açaí no comportamento hidráulico de uma areia lavada, combinando ensaios de permeabilidade, modelo físico com visualização de linhas de fluxo por traçador e modelagem numérica no SEEP/W. Os resultados de laboratório indicaram que a adição de fibras promoveu apenas um incremento numérico discreto na condutividade hidráulica, mantendo-se a mesma ordem de grandeza do solo de referência. Assim, para a dosagem, geometria das fibras e condição de moldagem adotadas, a presença do reforço não se refletiu em uma alteração marcante do parâmetro global de percolação.

A visualização das trajetórias no modelo físico evidenciou um padrão de escoamento contínuo e bem definido, sem indícios de canalização localizada associada à presença das fibras. Em paralelo, a simulação no SEEP/W para o solo puro reproduziu um campo de percolação regular, com linhas de fluxo e equipotenciais distribuídas de forma uniforme. A comparação qualitativa entre a configuração prevista numericamente e as trajetórias observadas com traçador mostrou compatibilidade quanto ao comportamento global do fluxo, sendo as diferenças pontuais atribuídas principalmente ao tempo de avanço do corante e às limitações inerentes ao método de visualização.

De forma aplicada, os resultados sugerem que o reforço com fibras de açaí, nas condições investigadas, pode ser empregado sem induzir mudanças relevantes no padrão de percolação do meio arenoso, aspecto desejável em situações nas quais a previsibilidade hidráulica é requisito de segurança. Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros investiguem outros teores, comprimentos e procedimentos de mistura, bem como condições hidráulicas mais severas e simulações também para o compósito, a fim de delimitar com maior robustez os intervalos em que o reforço pode (ou não) alterar a resposta hidráulica.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2016). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 48 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2016). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2020). NBR 16840. *Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2020). NBR 16843. *Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2021). NBR 14545. *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável*. Rio de Janeiro.

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.

Castro, C. L. de. (2020) *Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Enhenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 121 p.

Curcio, D. S. (2008) *Comportamento Hidromecânico de Compósito Solo-fibra*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Enhenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 129 p.

Faustino, O. W. C; & Ferreira, S. R. de M. (2024) Comportamento hidromecânico e processo de formação de fissuras em solo expansivo reforçado com fibras de coco verde. *Revista de Geociências do Nordeste*, 10(2), 348–362.

Gomes, N. C. (2018) *Comportamento Hidromecânico de Solos Reforçados com Fibras PET para Aplicação em Barreiras de Contenção de Resíduos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Enhenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 60 p.

Leão, M. F. (2018) *Fundamentos da mecânica dos solos: Origem e propriedades dos solos*, Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 216 p.

Massad, F. (2003) *Obras de terra, curso básico de geotecnia*, 2nd ed., São Paulo: Oficina de textos, 216 p.

Moreira, G. R., Cavalcante, A. L. B., & Costa, K. R. C. B. (2022) Estudos laboratoriais para a análise do fenômeno de erosão interna. *Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia*, Brasília.

Oliveira, T. C. F., Dezen, B. G. S., Dahmer R. R., Antonio, I. O.; & Bizarreta-Ortega J. C. Avaliação de Modelos Físicos Reduzidos Construídos em Laboratório para o Estudo da Percolação de Água em Duas Barragens Homogêneas de Terra. (2018) In: *Anais eletrônicos do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Salvador, v. III.

Pinto, C.S. (2011) Curso básico de mecânica dos solos, 3nd ed., Oficina de Textos, São Paulo.

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).