

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/401

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLO AMAZÔNICO REFORÇADO COM FIBRAS VEGETAIS DE TUCUMÃ

Flávian Gyovanna Teixeira Alves.
Engenheira Civil, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, flaviangyovanna@gmail.com

Valeria Costa de Oliveira, Dsc.
Professor, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, valeria.oliveira@ifro.edu.br

Lídia Bruna Teles Gonzaga, Msc.
Professora, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, lidia.bruna@ifro.edu.br

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

Rodrigo Cesar Pierozan, Dsc.
Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, rodrigopierozan@utfpr.edu.br

RESUMO: O solo tropical é complexo e variável, requerendo cuidado especial para atender às exigências de resistência em obras geotécnicas e evitar acidentes como deslizamentos de terra. Este estudo visa analisar as propriedades mecânicas de um solo amazônico reforçado com fibras de tucumã, comparando-o com solo sem adições. O tucumã, planta natural da Amazônia, foi utilizado como reforço, cujo comprimento adotado consistiu em 50 mm a um teor de 0,5% adicionado ao solo e aleatoriamente disperso. Os procedimentos metodológicos abrangem ensaios de caracterização do solo, compactação e resistência. Durante a compactação, notou-se que o solo reforçado com tucumã teve uma redução na massa específica seca máxima e um aumento na umidade ótima. Os resultados dos ensaios de compressão axial não confinada indicaram que o solo reforçado com fibra de tucumã obteve uma resistência superior ao solo natural, assim como tornou-se mais dúctil, em contraste com o comportamento frágil do solo puro. Também recorreu-se a uma avaliação visual dos corpos de prova após seu rompimento, podendo-se observar que, apesar da presença de fissuras nos corpos de prova reforçados, as fibras impediram sua separação da matriz do solo, o que não ocorreu no solo sem adições. Conclui-se que a adição de fibras de tucumã melhorou as propriedades mecânicas do solo, potencializando seu uso na geotecnia.

PALAVRAS-CHAVE: Fibras Naturais, Tucumã, Solo Reforçado.

ABSTRACT:

Tropical soil is complex and variable, requiring special care to meet the strength requirements in geotechnical works and to prevent accidents such as landslides. This study aims to analyze the mechanical properties of an Amazonian soil reinforced with tucumã fibers, comparing it with pure soil. Tucumã, a plant native to the Amazon, was used as reinforcement, with a length of 50 mm and a content of 0.5% added to the soil and randomly dispersed. The methodological procedures include soil characterization tests, compaction, and strength testing. During compaction, it was noted that the soil reinforced with tucumã showed a reduction in maximum dry density and an increase in optimum moisture content. The results of the unconfined axial compression tests indicated that the soil reinforced with tucumã fiber had higher strength than the natural soil, and it also became more ductile, in contrast to the brittle behavior of the pure soil. A visual evaluation of the specimens after failure showed that, despite the cracks in the reinforced specimens, the fibers prevented their

separation from the soil matrix, which did not occur in the pure soil. It is concluded that the addition of tucumã fibers improved the mechanical properties of the soil, enhancing its potential use in geotechnical applications.

KEYWORDS: Natural Fibers, Tucumã, Reinforced Soil.

1 INTRODUÇÃO

O reforço de solos é uma prática crescente na engenharia civil, fundamental para superar desafios geotécnicos e mitigar riscos de desastres, como deslizamentos, especialmente diante de condições climáticas adversas, como nos períodos chuvosos. Entre as técnicas empregadas, o uso de materiais como geogrelhas e geotêxteis tecidos é comum no campo da geotecnia (Ehrlich e Becker, 2017). No entanto, materiais alternativos para o reforço de solos, como as fibras vegetais, têm o potencial de serem utilizados para reduzir a deformabilidade do maciço. Além de serem sustentáveis, por serem de origem orgânica, as fibras vegetais representam recursos renováveis com amplas aplicações na geotecnia, sendo empregadas como soluções temporárias de estabilização do solo e controle de erosão, entre outras. As fibras vegetais disponíveis para este propósito são diversas, incluindo fibras de coco, folha de bananeira, bagaço de cana-de-açúcar, sisal, entre outras (Gonçalves *et al.*, 2017).

Essas fibras, por sua vez, apresentam diversas vantagens, como baixo custo, baixa densidade, alta resistência à tração, assim como elevado módulo de elasticidade. Além disso, são não abrasivas e não tóxicas, tornando-as seguras e adequadas para uma ampla gama de aplicações. Suas propriedades físico-químicas podem ser facilmente modificadas com produtos químicos, ampliando ainda mais suas possíveis utilizações na geotecnia (Vieira *et al.*, 2020; Aguilar, 2015; Yazici e Keskin, 2021).

Neste estudo, destaca-se o emprego da fibra de tucumã, produzida a partir da folha de tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), que é uma fruta característica da região norte, encontrada principalmente no estado do Amazonas. Considerando a abundância deste material, assim como a necessidade do uso de novos materiais geotécnicos, que sejam sustentáveis, esta pesquisa teve como objetivo analisar o desempenho mecânico do solo reforçado com essas fibras vegetais, comparando suas propriedades com as do solo não reforçado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa adota uma abordagem experimental para examinar o potencial das fibras de Tucumã como reforço em solo. Por meio de uma série de ensaios de caracterização física e mecânica, tanto do solo natural quanto dos solos reforçados, buscou-se analisar o impacto das fibras de tucumã nas propriedades geotécnicas do solo. Essa investigação é essencial para compreender a eficácia do reforço de fibras vegetais em solos, abrindo possibilidades para sua aplicação em projetos geotécnicos desafiadores.

2.1 Materiais

2.1.1 Solo

Para realizar a análise, foi utilizado solo comumente conhecido como cascalho, amplamente empregado na região de Porto Velho - RO para aterros, sendo obtido em loja de materiais básicos de construção localizada na cidade mencionada.

2.1.1 Fibras de Tucumã

Foram empregadas fibras derivadas das folhas da palmeira do tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), obtidas em uma cooperativa de artesãos sediada no estado do Amazonas (Figura 1).



Figura 1. Fibra de tucumã natural

A Tabela 1 apresenta os resultados do diâmetro, tensão de tração e deformação das fibras de tucumã, cujos dados utilizados foram obtidos através da pesquisa de Silva *et al.* (2023), que utilizou o mesmo material do presente estudo com comprimento de 100 ± 3 mm em ensaios de tração direta.

Tabela 1. Características físicas e mecânicas das fibras de tucumã

Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Tensão de tração (MPa)	Deformação (mm/mm)
100	0,021	30137,92	0,025

2.2 Procedimento experimental

O programa experimental desta pesquisa foi conduzido com a finalidade de obter a caracterização física e classificação dos materiais utilizados, juntamente com os resultados de ensaios à resistência mecânica. As etapas do programa experimental são apresentadas na Figura 2.

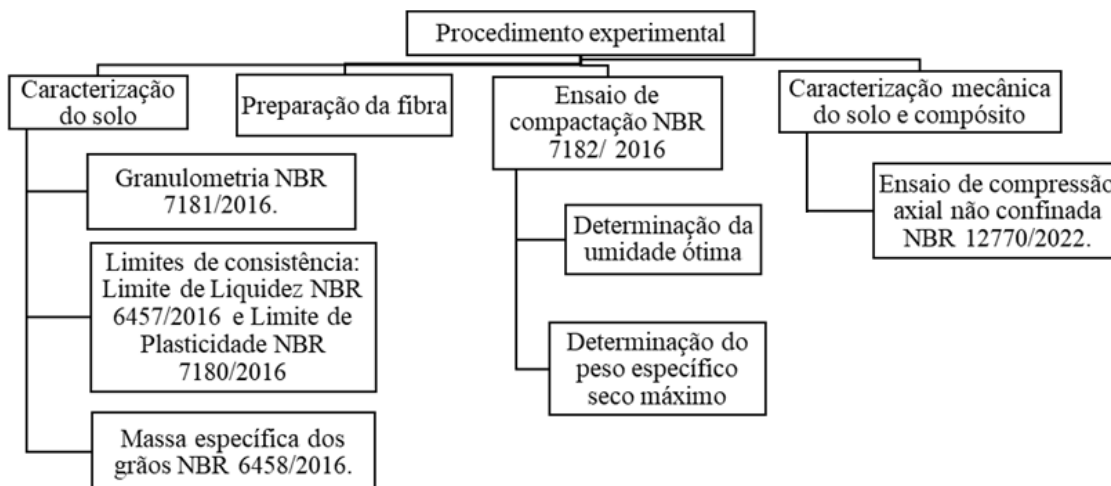


Figura 2. Fluxograma do procedimento experimental.

Para a preparação das fibras, foi adotado método de refinamento em que as fibras foram desfiadas manualmente com o auxílio até de uma carda, ferramenta utilizada no processo de preparação das fibras têxteis antes de serem fiadas. A função principal da carda é desembaraçar, alinhar e limpar as fibras e organizando-as em uma orientação paralela, até que os filetes de fibras se transformassem em fios e atingissem o menor diâmetro possível. A partir disso, foi adotado um comprimento de 50 mm, cuja escolha se baseou em estudos conduzidos por Silva *et al.* (2019), que encontraram neste comprimento o maior aumento nas propriedades mecânicas do solo. Também foi necessário determinar o teor de fibras a ser incrementado ao solo, igual a

0,5%, tendo como base o estudo de Aguilar (2015), cujo teor resultou em uma coesão mais evidente nos compósitos.

Os corpos de prova foram moldados em triplicata, totalizando 6 corpos de prova, utilizando-se os teores de umidade ótima e as massas específicas secas máximas correspondentes, obtidas em cada curva de compactação para o material passante da peneira de 2,00 mm. As amostras foram obtidas pelo método de compactação estática em um cilindro de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, com solo puro e também com o teor de fibras disperso no solo, e rompidas em uma Prensa Universal da marca EMIC, equipada com uma célula de carga de 5 kN, operando a uma velocidade calculada de 1 mm/min.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do solo

A seguir, são apresentadas as características do solo estudado, incluindo a análise granulométrica, os limites de consistência e a massa específica dos grãos.

3.1.1 Análise granulométrica

O gráfico apresentado na Figura 3 representa a curva granulométrica do solo, ilustrando a distribuição das partículas do material em diferentes tamanhos, obtida por meio dos ensaios de granulometria. A partir da análise granulométrica, observa-se que o solo estudado é composto por 49,9% de argila, 23,6% de areia, 15,5% de silte, seguido de 11% de pedregulho.

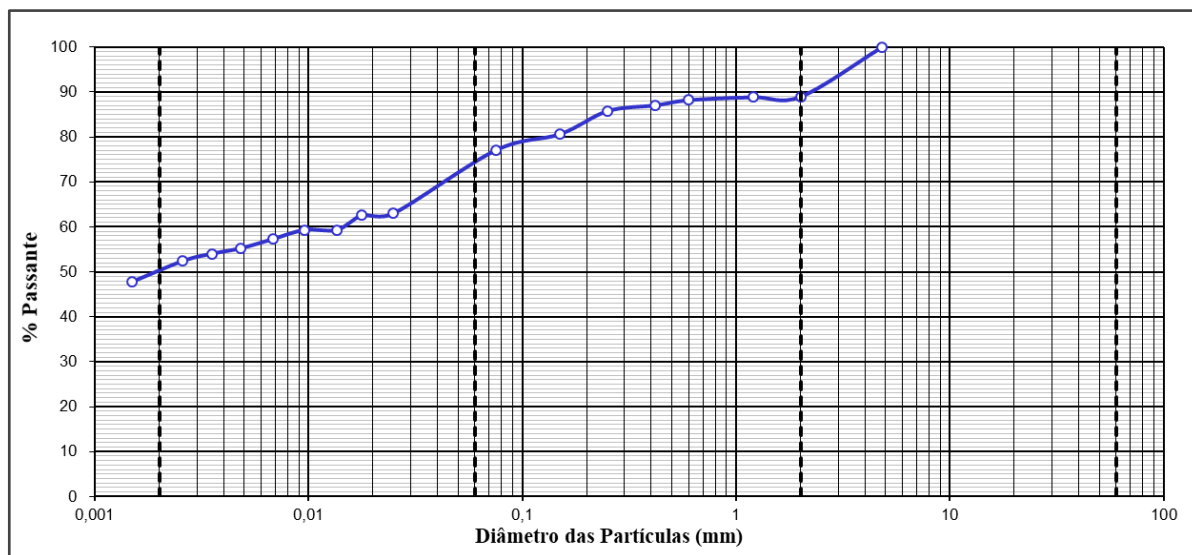


Figura 3. Curva granulométrica do solo.

3.1.2 Limites de consistência

Os resultados das análises laboratoriais revelaram um limite de liquidez (LL) de 39%, um limite de plasticidade (LP) de 31% e, conseqüentemente, um índice de plasticidade (IP) de 8%. A partir dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar o solo de acordo com a Classificação Highway Research Board (HRB), em um material siltoso, pertencente ao grupo A-4 e com Índice de grupo igual a 4. Este material é considerado de regular a mau comportamento para aplicação em pavimentos, pois apresenta uma parcela de finos consideráveis, os quais contribuem com o aumento dos valores de LL e LP.

3.1.3 Massa específica dos grãos

A massa específica dos grãos do solo (G_s) foi igual a $2,71 \text{ g/cm}^3$, obtida por meio do ensaio de picnômetro, conforme a Norma vigente que trata de tal ensaio.

3.2 Compactação do solo natural e compósito solo-fibra

A Figura 4 apresenta as curvas de compactação obtidas para o solo puro e para o compósito solo-fibra, onde se distinguem a massa específica seca máxima e a umidade ótima entre os materiais, com comportamentos diferentes nas curvas de compactação entre o solo natural e o solo reforçado. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de que as fibras ajudam a distribuir melhor o impacto dos golpes no ensaio de compactação, refletindo em uma curva com pico menos pronunciado (Casagrande, Aelvan e Pierozan, 2024; Sotomayor *et al.*, 2024). Isso indica que, mesmo no caso de a compactação em campo ser insatisfatória, o material reforçado com fibras pode não ter uma variação tão pronunciada de densidade, ao contrário do solo no estado natural.

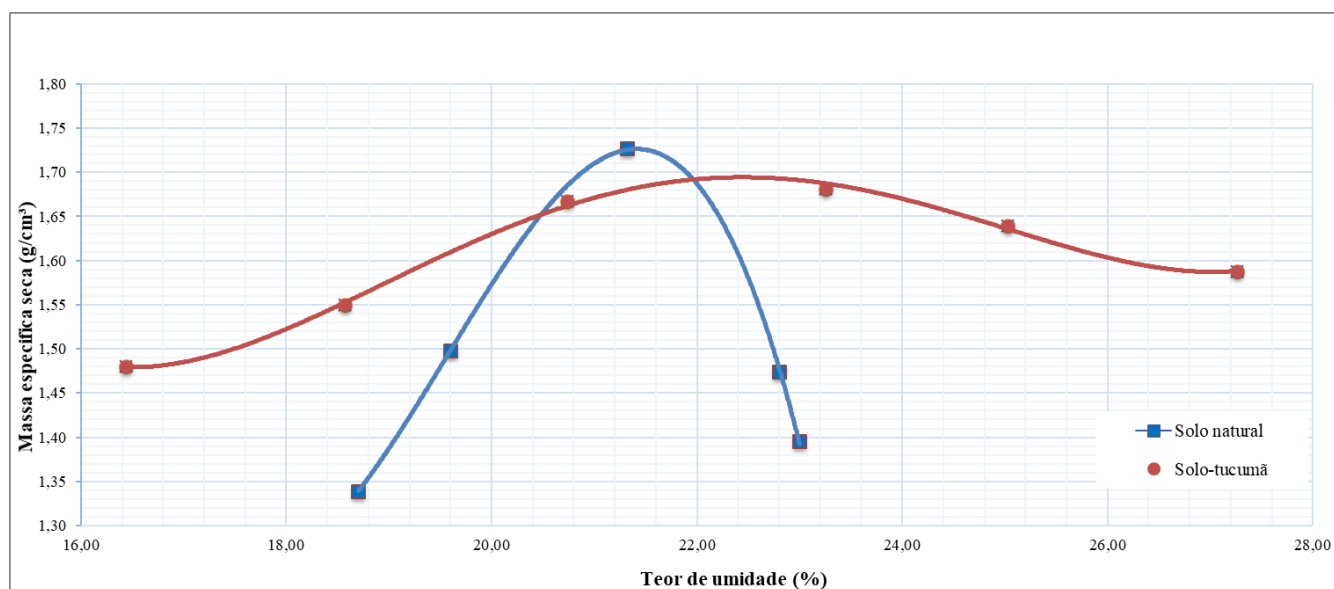


Figura 4. Curva de compactação com energia normal.

A análise dos resultados deste ensaio revelou que a massa específica seca máxima do solo sem adições alcançou aproximadamente $1,73 \text{ g/cm}^3$, com uma umidade ótima de 21,25%. Por outro lado, ao serem incorporadas as fibras ao solo, os valores de massa específica seca e de umidade ótima foram iguais a $1,69 \text{ g/cm}^3$ e 22,6%, respectivamente. Nota-se que não houve uma variação expressiva na massa específica máxima e na umidade ótima. A pequena variação pode ser justificada pela capacidade de absorção de água proporcionada pelas fibras, similar aos estudos conduzidos por Fonseca (2021), que constatou este efeito ao trabalhar com fibras de tucum (*Astrocaryum chambira Burret*), uma espécie da mesma família que o tucumã da Amazônia. O comportamento da curva de compactação com fibras foi mais aberto que no solo puro, devido à absorção dos impactos de compactação pelas fibras.

3.3 Compressão axial não confinada

As curvas de resistência compressão uniaxial *versus* deformação são apresentadas na Figura 5, onde se utilizou o comportamento do solo puro como parâmetro comparativo para o compósito.

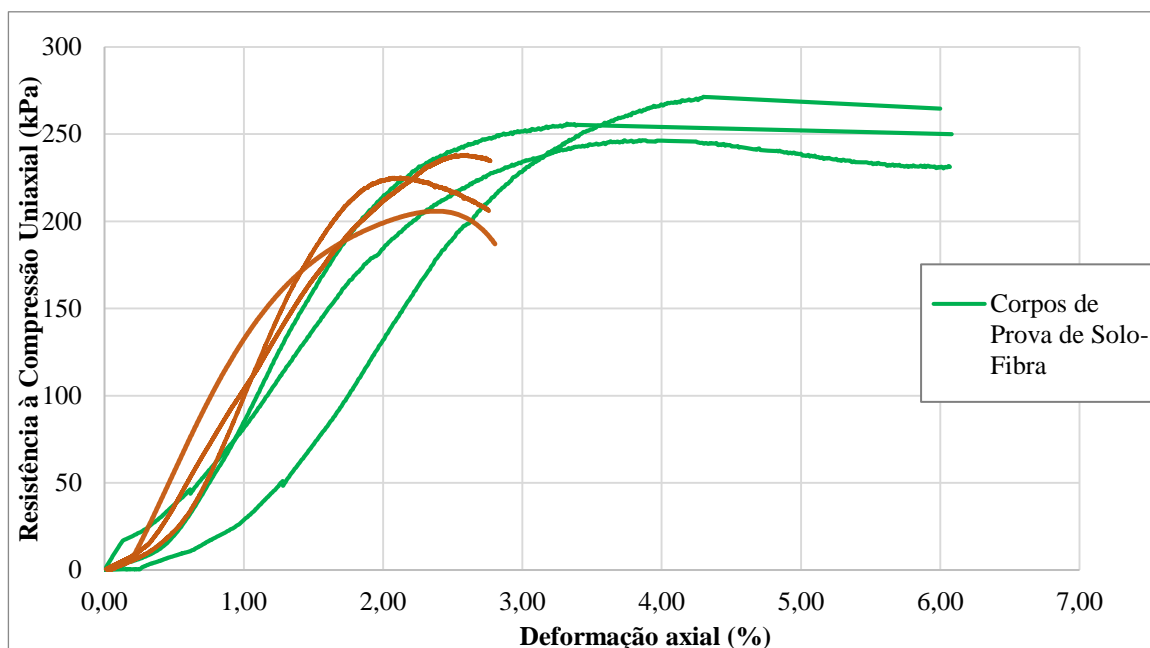


Figura 5. Resistência compressão uniaxial *versus* deformação do solo reforçado com tucumã.

Os corpos de prova correspondentes ao solo natural apresentaram um valor médio de resistência máxima de quase 230 kPa e deformação média correspondente de 2,3%, enquanto o solo reforçado com fibras da palha de tucumã apresentou uma média de resistência à compressão axial de 270 kPa e média de deformação de 4,0%. A partir disso, é possível perceber que a adição de fibras de tucumã melhora o comportamento do solo com relação à sua resistência, que é majorada, assim como torna o seu comportamento mais dúctil, uma vez que permite maiores níveis de deformação até que se atinjam as condições de ruptura, o que não ocorre no solo puro, que apresentou um comportamento frágil.

Outro importante aspecto observado corresponde à resistência pós-pico dos compósitos, em que a resistência à compressão é mantida em níveis elevados, enquanto a resistência do solo puro cai bruscamente após atingir seu valor máximo.

A partir de aspectos visuais das amostras após o rompimento, também é possível inferir alguns aspectos distintos do comportamento mecânico dos corpos de prova. Dessa maneira, verificou-se que o solo natural apresentou fissuras que se concentraram na região em que ocorreu o carregamento, enquanto nos solos reforçados foi observado um achatamento ao longo do seu comprimento, formando um ângulo de 45° no seu rompimento, comparativo ilustrado na Figura 6.

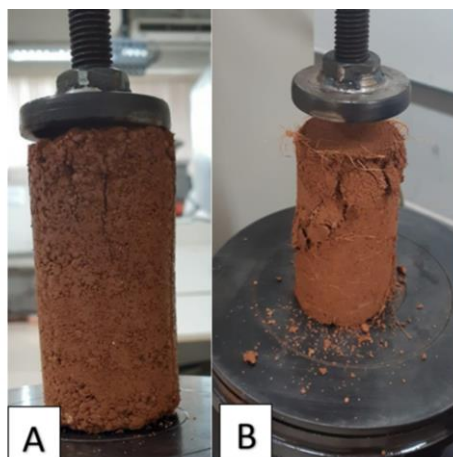


Figura 6. Comparativo visual do rompimento de solo puro (A) e do compósito (B).

Segundo Motta (2018), o modo de ruptura está diretamente relacionado à propagação de fissuras, onde a aleatoriedade das fibras inseridas é crucial para permitir uma melhor mobilização da resistência do compósito.

A partir da sintetização destes dados, nota-se que os compósitos reforçados com fibras de tucumã apresentam uma ruptura progressiva, que ocorre devido às pontes de transferência de tensões formadas pelas fibras, permitindo a transferência de tensões ao absorverem parte das solicitações e gerar uma fissuração mais distribuída.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados dos ensaios de compressão axial, a fibra vegetal estudada demonstrou seu potencial de aprimoramento do comportamento mecânico do solo, evidenciado por uma mudança do comportamento do solo puro para o compósito, que passou de frágil para dúctil. A importância de um material mais dúctil é destacada, pois o solo reforçado é capaz de manter sua integridade estrutural mesmo quando submetido a níveis elevados de deformação. Em contraste, o solo natural tende a se deformar e enfraquecer mais rapidamente após a aplicação da carga. Essa ductilidade aprimorada do compósito é crucial para garantir maior durabilidade e segurança em aplicações geotécnicas, especialmente em condições de carregamento variáveis e extremas.

De modo geral, pode-se afirmar que as fibras vegetais estudadas influenciam positivamente o comportamento mecânico do solo, aumentando a ductilidade e reduzindo a ruptura do solo. Sendo assim, podem ser considerados materiais viáveis na geotecnia como reforço do solo, mas que ainda carecem de mais pesquisas que complementem o estado atual do conhecimento. Acredita-se que este trabalho possa contribuir para pesquisas futuras envolvendo o uso dessas fibras vegetais como material geotécnico.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Rondônia pelo suporte e recursos necessários ao desenvolvimento dessa pesquisa, além do apoio contínuo à capacitação docente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 12720. *Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada*. Rio de Janeiro.
- Aguilar, J. R. T. (2015). *Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco* (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado)—Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro).
- Casagrande, M. D. T.; Alelvan, G. M.; Pierozan, R. C. Performance of Mining Tailings Stabilized with Polymers and the Applicability in Geotechnical Engineering. In: KORF, E. P.; PRIETTO, P. D. M.; MÜLLER, C.; et al. (Ed.). *Environmental Geotechnics*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2024. Cap. 2. p. 28-57. ISBN 979-8-89113-651-9.
- Ehrlich, M., Becker, L. (2017). *Muros e Taludes de Solo Reforçado Projeto e Execução*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Fonseca, R. P. D. (2021). Influência de diferentes tipos de fibras vegetais amazônicas no desempenho de uma argamassa à base de cimento Portland e Metacaulim.
- Gonçalves, F. D. C., Amaral, E. L. S., Lopes Junior, J. L., Lopes, B. L. S., Ribeiro Junior, L. D. S., Brabo, D. R., Amarante, C. D. (2018). Fibras vegetais: Aspectos gerais, aproveitamento, inovação tecnológica e uso em compósitos. *Revista Espacios*, 39(0798), 1015.
- Motta, T. G. (2018). Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais.

- Silva, H. E. F., Camargos, C. S., Souza, M.V., Gongora, I. (2019). Estudo da viabilidade do uso de fibras naturais como reforço de solos. In: *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. pp. 1502-1509). IOS Press.
- Silva, T. S; Nascimento, C. B.; Cavalheiro, R.B. Barbosa, V. M.; Gonzaga, L. B. T; Oliveira, V. C. (2023). Análise da aderência à tração de fibras vegetais em matriz 63 cimentícia com fibras de coco, sisal e tucumã. in: *Congresso Brasileiro Do Concreto*, 64., 2023, Florianópolis: IBRACON.
- Sotomayor, J.M.G. et al. Geomechanical Performance of Gold Ore Tailings-Synthetic Fiber Composites. *Geotech Geol Eng*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02814-4>.
- Vieira, I. C. B., Barbosa, I. F., Zancanella, A. C. B., Maziero, R., Rubio, J. C. C. (2020). COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE FIBRAS ALEATÓRIAS DE SISAL COM RESINA POLIÉSTER. *Gramado: Ibeas*.
- 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).