26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO

Mayara Luana de Jesus Santos[1]; Michéle Dal Toé Casagrande[2]

RESUMO
Na engenharia geotécnica, é fundamental explorar alternativas para viabilizar obras em solos com baixa capacidade de suporte. Uma estratégia eficaz é o reforço do solo com fibras, seja em estradas não pavimentadas ou em aterros sobre solos moles. No entanto, o custo das fibras sintéticas muitas vezes torna sua aplicação inviável. Uma alternativa mais econômica e amplamente estudada é o uso de fibras naturais. No norte do Brasil, o descarte inadequado das fibras de açaí, um subproduto da produção de polpa de açaí, representa um desafio considerável. Além disso, a problemática do descarte inadequado da casca de coco verde persiste em todo o país, especialmente nas regiões litorâneas. Em busca de soluções geotécnicas mais sustentáveis, o desenvolvimento de novos materiais geotécnicos tem como objetivo não apenas melhorar a resistência dos compósitos solo-fibra, mas também encontrar usos mais apropriados para as fibras de açaí e de coco, trazendo benefícios técnicos, ambientais, financeiros e sociais. Este estudo investigou o comportamento físico e mecânico de um solo argiloso tropical reforçado com diferentes proporções de fibras de açaí e de coco. Foram realizados ensaios de compactação, resistência à compressão simples e tração direta nas fibras. Os resultados demonstraram que os compósitos solo-fibra apresentaram melhorias nos índices de compactação, além de maior resistência, tanto de pico quanto pós-pico, em comparação com o solo puro. As fibras também exibiram uma notável resistência à tração, indicando que são uma opção viável para projetos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Estradas não Pavimentadas; Reforço de Solo; Fibras de Açaí; Fibras de Coco; Geotecnia ambiental.

ABSTRACT
In geotechnical engineering, it is crucial to explore alternatives to enable construction on soils with low bearing capacity. An effective strategy is soil reinforcement with fibers, whether in unpaved roads or embankments on soft soils. However, the cost of synthetic fibers often renders their application unfeasible. A more economical and widely studied alternative is the use of natural fibers. In the northern region of Brazil, the improper disposal of açaí fibers, a byproduct of açaí pulp production, poses a significant challenge. Additionally, the issue of improper disposal of green coconut husks persists throughout the country, especially in coastal regions. In pursuit of more sustainable geotechnical solutions, the development of new geotechnical materials aims not only to improve the strength of soil-fiber composites but also to find more suitable uses for açaí and coconut fibers, bringing technical, environmental, financial, and social benefits. This study investigated the physical and mechanical behavior of tropical clay soil reinforced with different proportions of açaí and coconut fibers. Compaction tests, unconfined compression tests, and direct tensile tests on the fibers were conducted. The results showed that the soil-fiber composites improved compaction indices and exhibited greater peak and post-peak strength compared to the pure soil. The fibers also demonstrated notable tensile strength, indicating their viability for geotechnical projects.

KEY WORDS: Unpaved Roads; Soil Reinforcement; Açaí Fibers; Coconut Fibers; Environmental Geotechnics.

[1] **Universidade de Brasília, mayaraluana.ml@gmail.com**
[2] **Universidade de Brasília, mdtcasagrande@unb.com.br**

INTRODUÇÃO

Certamente é um grande desafio da engenharia geotécnica adaptar suas obras para que, mesmo sobre solo não favoráveis, sejam construídas obras de grande e médio porte. Existem aquelas obras que são temporárias, mas não deixam de ser necessárias e relevantes como por exemplo aterros temporários e estradas não pavimentas que servem de acesso a localidades mais restritas. Dessa forma, é preciso buscar alternativas de melhorar a capacidade de suporte do solo de modo que não se tenham grandes gastos, e que não agrida tanto o meio ambiente.

No Brasil, o transporte rodoviário é o principal meio de movimentação de mercadorias, serviços e pessoas, representando cerca de 60% de todas as atividades de transporte no país. Aproximadamente 86% das estradas não possuem pavimentação e frequentemente estão em condições precárias, (CNT, 2022). A maioria essas estradas servem como elo entre cidades, vilas e distritos, sendo vitais para conduzir a comunidade aos centros urbanos e proporcionar acesso a serviços essenciais como hospitais e escolas. Conforme observado por Pitilin (2020), os principais problemas enfrentados por essas estradas incluem a falta de sistemas de drenagem, o abaulamento do leito, a ausência de cascalho como superfície de rolamento, presença de agregados soltos, buracos, trilhas de rodas, corrugações e poeira.

Dessa maneira, pensando em melhorar as propriedades do solo das estradas não pavimentas, por exemplo, pode-se recorrer a técnica de inclusão de fibras, que atuam como elementos de reforço que não impedem a formação de fissuras, mas atuam diretamente no controle da propagação destas, melhorando as propriedades mecânicas do material compósito em questão (Casagrande, 2001).

Esse método já vem sendo consagrado na literatura e nas obras geotécnicas, em razão de, conforme Casagrande (2005), ser capaz de conferir aos solos, aumento da resistência, da ductilidade e da tenacidade, e a diminuição da queda de resistência pós-pico. Sendo assim, o uso dessas fibras que em sua maioria são fabricadas com produtos poliméricos é muito procurado pelos engenheiros. No entanto, o alto custo das fibras sintéticas, o fato de não ser um material renovável e de não contribuir com a conservação ambiental faz com que alternativas de produção fibras sejam almejadas pelos profissionais da área.

Portanto as fibras naturais, que são renováveis e sustentáveis, podem ser aplicadas e seu uso já é observado na literatura. Assim, confrontando com as fibras sintéticas, as naturais incluem também aspectos ecológicos e sociais, em razão da melhor reciclabilidade e biodegrabilidade e do aumento da qualidade de vida dos habitantes de regiões onde é realizado o cultivo (Joekes, 2013). Pode-se citar, como exemplo, as muralhas da Mesopotâmia (1400 A.C.), existentes ainda hoje, que foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Indícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do emprego de lã de lhama como reforço.

Estudos mais recentes podem ser citados, como por exemplo Lopes (2022) que realizou ensaios de caracterização, compressão simples e cisalhamento direto em amostras de solo argiloso e de solo arenoso, com a inserção aleatória de fibras de açaí em ambos os solos, nos teores de 0,5% e 1,0% de fibras, em relação ao peso do solo seco. Esse autor demonstrou que a adição das fibras de açaí

melhorou significativamente as propriedades mecânicas do solo, alterando o comportamento de ruptura do material e proporcionando uma maior resistência de pico, bem como diminuição da queda de resistência pós-pico e maior resistência ao cisalhamento, quando a mistura solo-fibra se compara ao solo puro.

A escolha pelo uso de fibras de açaí é uma alternativa de suma relevância, afinal são provenientes dos caroços da fruta que se tornam resíduos após a retirada da polpa. No Brasil, especialmente Norte do país no Estado do Pará, o cultivo e consumo do açaí é extremamente significativo, pois a polpa do fruto é culturalmente a base alimentar de grande parte da população. Por consequência o descarte dos caroços gera grande quantidade de resíduo sólido. Conforme dados do IBGE (2023), em 2020, foram produzidas aproximadamente 220.489 mil toneladas de açaí, estimando-se uma geração de cerca de 177 mil toneladas de resíduos orgânico, constituído principalmente de caroços descartados em aterros sanitários e cursos d'água por exemplo, que podem causar um significativo passivo ambiental.

Além das fibras de açaí, as fibras de coco verde também se destacam como uma opção promissora na geotecnia, especialmente em projetos de infraestrutura. Elas oferecem um desempenho satisfatório, são economicamente viáveis e representam uma oportunidade importante de aproveitamento de resíduos que, de outra forma, seriam descartados inadequadamente, muitas vezes poluindo o meio ambiente.

Conforme destacado por Rocha et al. (2015), a casca do coco corresponde a uma grande parte da massa total do fruto, representando cerca de 85%, e é frequentemente considerada como lixo. As fibras presentes na casca possuem uma vida útil em campo que varia entre 2 e 10 anos, o que as torna adequadas para aplicações em obras geotécnicas, especialmente em projetos temporários, como apontado por Hejazi et al. (2012). Adicionalmente, conforme mencionado por Faustino (2022), o alto teor de lignina, cerca de 40%, presente nas fibras de coco confere durabilidade ao material. Isso, aliado à quase inércia das fibras e sua alta porosidade, torna o aproveitamento da casca de coco verde altamente vantajoso. A facilidade de produção, obtenção, baixo custo e ampla disponibilidade são outras características favoráveis desse material.

Sendo assim, buscar soluções para viabilizar as obras temporárias mais sustentáveis, que é o caso de melhorar, mesmo que temporariamente, as condições de estradas não pavimentadas, e destinar adequadamente o resíduo das fibras de açaí e das fibras de coco é de grande valia para a geotecnia e para o meio ambiente. Á vista disso, o presente estudo objetiva, estudar o comportamento de compósitos adicionados com as fibras supracitadas no teor de 1,0% e 2,0%, por meio de ensaios geotécnicos, a fim de verificar seu comportamento no solo de análise.

MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são apresentados os materiais estudados para verificar o comportamento das fibras de açaí e fibras de coco como reforço em solos de estradas não pavimentadas. Nos compósitos, foi utilizado como matriz um solo argiloso típico de regiões tropicais, tanto com quanto sem a incorporação das fibras, sendo submetido a uma série de ensaios, incluindo compactação, compressão simples e tração direta das fibras.

Solo Argiloso Laterítico Utilizado na Análise

Do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília foi coletado um solo argiloso laterítico. Dessa forma, foi realizado ensaio de granulometria, onde foi possível verificar que se tratava de um solo composto em sua maior parte por fração de argila, representando 53,3%, seguido por 36% de areia e 10,7% de silte (Figura 1). A massa específica real dos grãos do solo puro, obtido no pentapycnometro, foi de 2,70 g/cm³. Quanto aos limites de consistência foi encontrado um valor de Limite de Liquidez de 42% e um valor de Limite de Plasticidade de 27%, resultando em um Índice de Plasticidade de 15%. A partir dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar o solo de acordo com a Classificação TRB, em um material argiloso, pertencente ao grupo A-7-6 e com Índice de grupo igual a 10. Este material é considerado de regular a mau comportamento para aplicação em pavimentos.

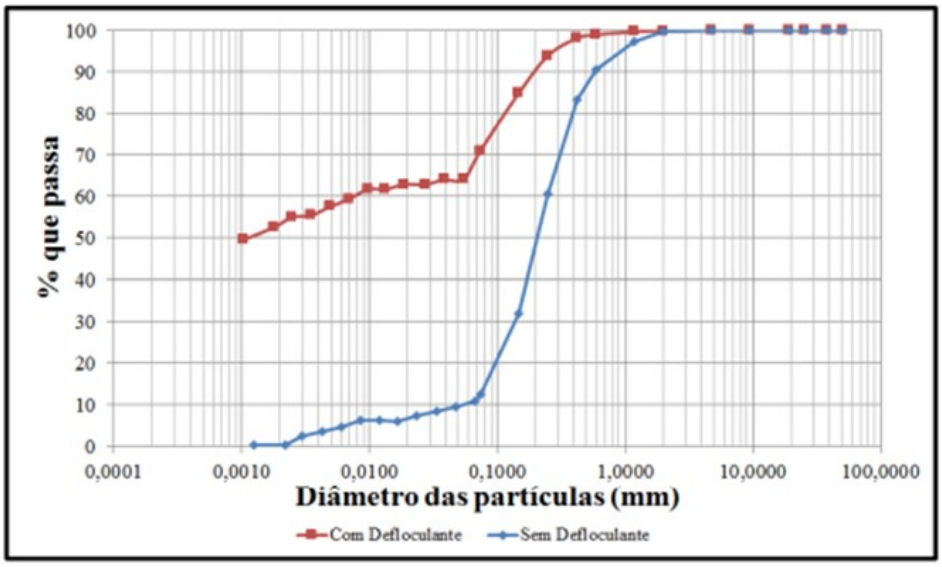

Figura 1. Curva granulométrica do solo (Autora, 2023).

Fibras de açaí estudadas

As fibras de açaí (Figura 2) utilizadas na pesquisa foram obtidas a partir de resíduos de açaí, os quais foram coletados após a retirada da polpa. Para a obtenção das fibras, foi realizada uma parceria com a Universidade Federal do Pará (UFPA), que dispunha de uma máquina capaz de separar as fibras do caroço. Essas fibras são comumente encontradas em áreas do nordeste paraense sem destinação adequada, sendo frequentemente encontradas em ruas, leitos de rios e lixões. O diâmetro e comprimento delas também foram considerados fatores importantes, pois afetam diretamente as propriedades mecânicas do material compósito final. No entanto, devido à origem natural das fibras de açaí, suas dimensões variam mesmo dentro de uma mesma amostra. Portanto, as utilizadas neste estudo apresentaram diâmetros variando em cerca de 0,10 mm a 0,18 mm e comprimentos de 6 mm a 20 mm.

Figura 2. Fibras de açaí (Autora, 2023).

Fibras de coco estudadas

As fibras de coco ilustradas na Figura 3(a) foram adquiridas da empresa Hobby Verde que comercializa vários tipos de fibras naturais. Essas fibras são consideradas um material sustentável, pois são obtidas a partir de resíduos de coco, um subproduto da indústria de alimentos. Essas fibras foram fornecidas em comprimentos consideráveis (cerca de 90 mm), então foi necessário cortá-las em um tamanho previamente determinado, mostrado na Figura 3(b) para que se tornassem relativamente parecidas, em termo de comprimento, com os outros materiais de reforço analisados nesta pesquisa. Dessa maneira, as fibras foram desembaraçadas manualmente, uma a uma, e cortadas em comprimentos de aproximadamente 15 mm.

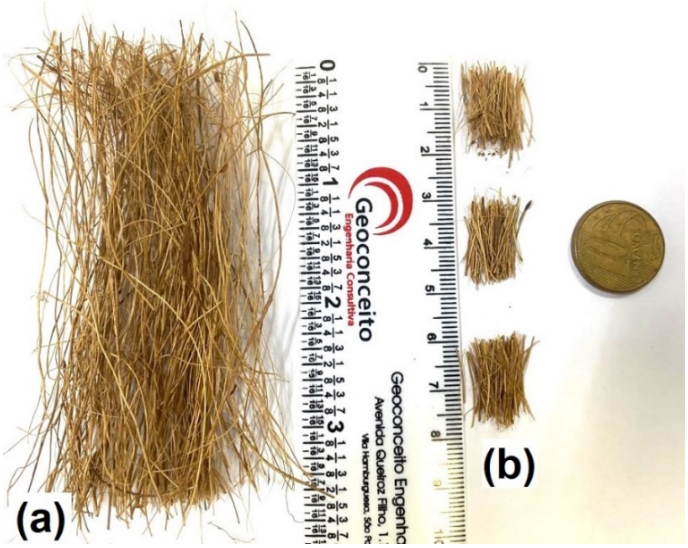

Figura 3. (a) Fibras de Coco antes de cortadas. (b) Fibras de Coco com 15 mm de comprimento (Autora, 2023).

Métodos

O programa de ensaios estabelecido tem como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de fibras de açaí e coco nas propriedades mecânicas de um solo tropical laterítico argiloso. Desta forma, foi desenvolvido um programa experimental que se baseia em três etapas:

(i) ensaio de compactação MCT com base na norma DNER-ME 228/23 Solos - Compactação em Equipamento Miniatura;
(ii) ensaio de compressão não confinada em corpos de prova sem reforço, para fins comparativos, e em compósitos solo-fibras de açaí e com fibras de coco. Com base na NBR 12770 (ABNT, 2022);
(iii) para avalição da resistência das fibras utilizadas como reforço, foram realizados ensaios de tração direta. Além da resistência, esse ensaio permite determinar módulo de elasticidade e alongamento na ruptura, sendo fundamental para explicar o comportamento desses materiais. Para tanto seguiu-se as recomendações da ASTM C1557 (2020) e foi usada uma prensa universal (Materialprufung 1445, Zwick, Alemanha), a uma velocidade de 0,1 mm/min.

Foram moldados corpos de prova (moldes cilíndricos com 50 mm de diametro) com teores de 1,0% e 2,0% de fibras, em relação ao peso do solo seco, bem como um corpo de prova sem adição de fibras para fins comparativos, todos em tréplica.

RESULTADOS

Nessa sessão, apresenta-se os resultados dos ensaios descritos acima, que visam verificar a eficiência as fibras naturais de açaí e coco como reforço de solo tropical aplicado a base de estradas não pavimentadas.

Ensaio de Compactação

A Figura 4 abaixo, apresenta as curvas de compactação do solo sem reforço e o solo reforçado com 1,0% e 2,0% das fibras de açaí e coco. Nota-se que a adição das fibras de açaí ao solo resultou em uma diminuição gradual do peso específico seco aparente do solo para os compósitos. Passou de 19,51 kN/m³ do solo sem reforço para 19,20 kN/m³ do solo reforçado com 1,0% das fibras de açaí e 18,78 kN/m³ para o solo com adição de 2,0% de fibra. Enquanto ocorreu um aumento progressivo da umidade ótima: 22,54% no solo sem reforço para 22,63% e 23,02% nos solos reforçados com 1,0% e 2,0% respectivamente.

Conforme Mirzababaei et al. (2013), a diminuição do peso específico seco máximo está relacionada com à diferença entre a densidade das partículas do solo em comparação com a das fibras. Sendo assim, essas mudanças indicam também possíveis mudanças nas propriedades mecânicas da mistura com a adição de fibras.

Quanto as fibras de coco, nota-se que a adição destas ao solo no teor de 1,0% fez com que o compósito se apresente peso específico seco aparente menor. Passou de 19,51 kN/m³ do solo sem reforço para 19,21 kN/m³ do solo reforçado com 1,0% de coco. E um aumento no teor de umidade

que passou de 22,54% para 24,82%. Da mesma forma ocorreu para os compósitos reforçados com 2,0% de fibra de coco, que passou de 19,51 kN/m³ do solo não reforçado para 18,86 kN/m³. E o teor de umidade ótimo passou de 22,54% para 26,80%.
Em conformidade com as conclusões de Al-Wahab & Al-Qurna (1995) que avaliaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibra na curva de compactação de uma argila e encontraram um decréscimo da massa específica aparente seca máxima e um acréscimo na umidade ótima para a adição de 2,0% de fibra.

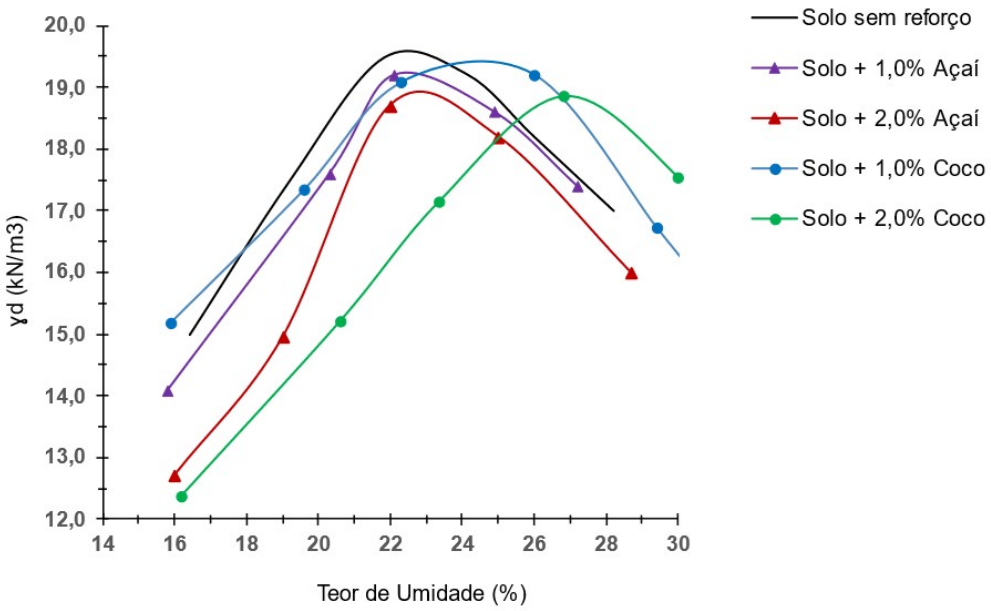

Figura 4. Curvas de Compactação (Autora, 2023).

Ensaio de Compressão Simples

Com os resultados dos ensaios de compressão simples pode-se plotar os gráficos conforme a Figura 5. É possível observar que a adição aleatória das fibras de açaí ao solo resultou em um aumento na tensão máxima suportada pelo solo. Enquanto o solo sem reforço apresentava uma tensão de pico de 345 kPa, essa tensão aumentou para 1059kPa quando o solo foi reforçado com 1,0% de fibras de açaí. No caso do solo reforçado com 2,0% de fibras, a tensão de pico alcançou 1275 kPa.
Além disso, a deformabilidade do solo na ruptura também aumentou com a adição das fibras. Enquanto o solo sem reforço apresentou uma deformação de 1,43%, essa deformação aumentou para 2,82% no caso do solo reforçado com 1,0% de fibras e para 2,54% no caso do solo reforçado com 2,0% de fibras. Resultados semelhantes foram obtidos por Lopes & Casagrande, (2022), que realizaram um estudo no qual adicionaram 0,5% e 1,0% de fibras de açaí ao solo. Eles observaram um aumento na resistência de pico de 156% e 250% em relação ao solo sem reforço, respectivamente.

No que diz respeito ao comportamento após o pico das curvas de resistência à compressão não confinada, foi possível observar que ambos os teores de fibras mantêm valores elevados durante essa fase. Isso confere ao solo uma resistência que não era suportada antes do reforço. A adição desse tipo de fibra também resultou em uma modificação no mecanismo de ruptura do solo.

Semelhante, pode-se notar com a adição das fibras de coco ao solo que resultou em um aumento na tensão de pico do solo, a qual era de 345 kPa quando o solo não estava reforçado e passou a ser de 537 kPa para o solo reforçado com 1,0% de fibra de coco. No caso do solo reforçado com 2,0%, a tensão de pico chegou a 668 kPa. Da mesma forma, há um aumento na deformabilidade do solo, que passou de 1,43% de deformação no solo sem reforço para 1,67% nos dois teores estudados. Resultados semelhantes foram observados por Babu & Vasudevan (2007), em seu estudo onde também adicionaram 1,0% e 2,0% de coco, confirmando que esse reforço é eficiente para aumentar a resistência e rigidez do solo argiloso investigado por eles.

No que se refere ao comportamento durante os pós pico das curvas de resistência a compressão não confinada, observou-se que ambos os teores de fibra, mantêm os valores ainda altos durante o pós-pico. Conferindo ao solo uma resistência que antes de reforçado ele não suportava. O acréscimo de fibras resultou em uma alteração no mecanismo de ruptura. Foi observado um comportamento de endurecimento elasto-plástico (*strain-hardening*) nos compósitos reforçados com fibras de coco, em que a resistência aumenta constantemente com o aumento da deformação axial em todas as amostras de solo reforçado testadas.

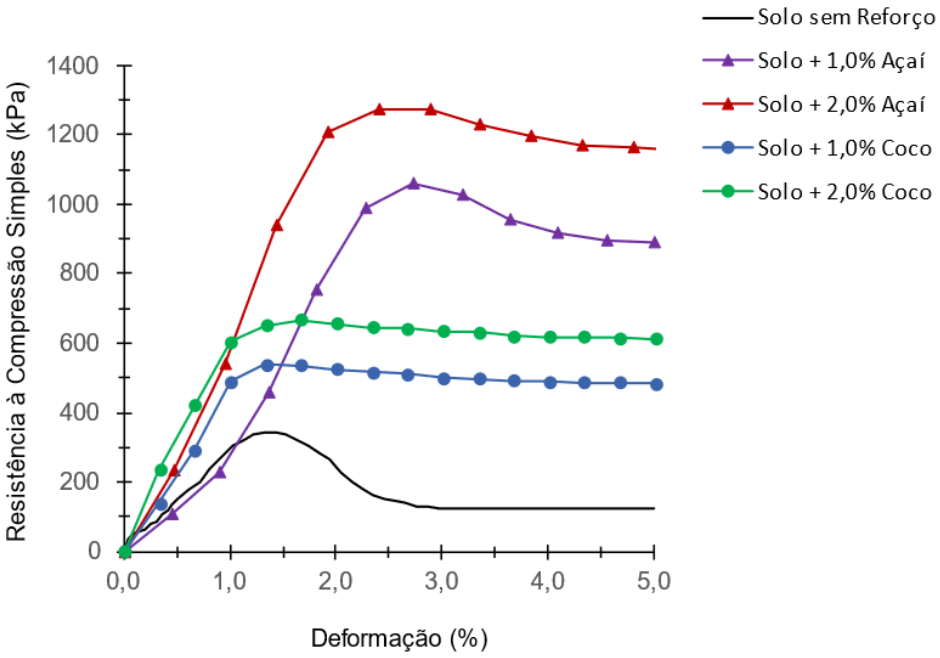

Figura 5. Curvas de Resistencia à Compressão Simples (Autora,2023).

Ensaio de Tração Direta nas Fibras

As fibras de açaí apresentaram um valor médio de resistência à tração de 249,72 MPa, o que é comparável ao valor de resistência à tração registrado para as fibras de sisal estudadas por Silveira (2018), que alcançou 270,86 MPa. Vale destacar que, apesar da área da seção transversal das fibras de açaí estar mais próxima daquelas das fibras de curauá (0,004 mm²), o comportamento na resistência à tração é semelhante à das fibras de sisal.

Em relação ao módulo de elasticidade, as fibras de açaí apresentaram um valor médio de 3,73 GPa, ligeiramente inferior ao valor obtido para as fibras de sisal, que foi de 5,51 GPa. Quanto ao alongamento na ruptura, as fibras de açaí exibiram um valor médio de 7,83%, o que é maior do que o alongamento de 5,21% observado nas fibras de sisal.

Já para as fibras de coco submetidas ao ensaio de tração direta, tem-se que o valor médio foi de 130 MPa, o que está em conformidade com o resultado encontrado por Bernardina (2019), que obteve uma resistência ligeiramente maior, de 151 MPa. No entanto, o valor médio de 130 MPa ainda se encontra dentro da média dos valores previstos. Em relação ao módulo de elasticidade, o valor encontrado neste estudo foi de 0,78 GPa, o que é menor do que o valor observado pela autora citada anteriormente em seu estudo que foi de 1,62 GPa. Quanto aos valores de alongamento na ruptura, também foram inferiores aos observados por ela, que apresentou um valor de aproximadamente 45,10%, enquanto neste estudo o valor foi de 21,94%.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, fica evidente que a incorporação de fibras de açaí e de fibras de coco como reforço para solos argilosos tropicais é altamente promissora do ponto de vista geotécnico. As fibras aumentam significativamente os parâmetros de resistência a compressão simples do solo e proporcionam uma resistência adicional pós-pico, são fibras com alto potencial de resistência a tração, absorvendo assim maior quantidade de energia. Além disso, ao mesmo tempo oferecem uma solução sustentável para os resíduos da produção de polpa de açaí e do descarte inadequado das cascas de coco verde.

Portanto, essa abordagem representa uma alternativa viável para a melhoria de estradas não pavimentadas, particularmente em estradas de acesso local e pouco tráfego, sendo uma solução viável temporariamente. Essa pesquisa é inovadora ao introduzir um novo material geotécnico com potencial de mercado, benefícios ambientais e custo acessível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (2022). Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. NBR ISSO 12770. Rio de Janeiro.

Al-Wahab, R.; & Al-Qurna, H. (1995). Fiber reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. the GEOSSYNTHETICS'95 CONFERENCE. v. 2, 433–466.

American Society For Testing And Materials (2008). Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers: ASTM C1557. West Conshohocken, Pennsylvania.

Babu, G. L. S., & Vasudevan, A. K. (2007). Evaluation of strength and stiffness response of coir-fibre-reinforced soil. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 11(3), 111–116. https://doi.org/10.1680/grim.2007.11.3.111

Bernardina, F. (2019). Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico de Solos Reforçados. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 123 p. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.46468

Casagrande, M. (2001). Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Dissertação de Mestrado, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, 94 p.

Casagrande, M. (2005) Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 219 p.

DNER – Departamanto Nacional De Estradas E Rodagem (2023). DNER-ME 228/23 "Solos – compactação em equipamento miniatura".

Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and Building Materials, 30, 100–116. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), Produção da extração vegetal e silvicultura - PEVS, Rio de Janeiro.

Lopes, M. M., & Casagrande, M. (2022). Mechanical Improvement of a Reinforced Sand with Açaí (Euterpe oleracea) Fibers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1260(1), 012025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1260/1/012025

Mirzababaei, M., Miraftab, M., Mohamed, M., & McMahon, P. (2013). Unconfined Compression Strength of Reinforced Clays with Carpet Waste Fibers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(3), 483–493. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792

PITILIN, Giovani R. Aplicação de metodologia de avaliação de trafegabilidade das estradas rurais na microrregião de Toledo-PR. Dissertação (Mestrado) -Desenvolvimento Regional e Agronegócio, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2020.

Silveira, M. (2018) Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 148 p.