

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DESEMPENHO MECÂNICO E AVALIAÇÃO DA
DURABILIDADE DE SERRAGEM DE BAMBU, FIBRAS DE
COCO E FIBRAS DE AÇAÍ COMO MATERIAIS DE
REFORÇO DE UM SOLO TROPICAL**

MAYARA LUANA DE JESUS SANTOS

ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc.

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM 397/2023**

BRASÍLIA – DF, 11 DE AGOSTO DE 2023.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DESEMPENHO MECÂNICO E AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE
SERRAGEM DE BAMBU, FIBRAS DE COCO E FIBRAS DE AÇAÍ COMO
MATERIAIS DE REFORÇO DE UM SOLO TROPICAL**

MAYARA LUANA DE JESUS SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR:

**PROF^a. MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADORA)**

**PROF. ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PROF^a. MARIANA VELLA SILVEIRA D.Sc. (UFC)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 11 DE AGOSTO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, MAYARA LUANA DE JESUS

Desempenho Mecânico e Avaliação da Durabilidade de Serragem de Bambu, Fibras de Coco e Fibras de Açaí como Materiais de Reforço de um Solo Tropical, 2023, 150 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2023).

Dissertação Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.;

- | | |
|----------------------|-------------------|
| 1. Serragem de Bambu | 2. Fibras de Coco |
| 3. Fibras de Açaí | 4. Resíduos |
| 5. Solo Reforçado | 6. Degradação |
| I. ENC/FT/UnB | Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, M. L. J. (2023). **Desempenho Mecânico e Avaliação da Durabilidade de Serragem de Bambu, Fibras de Coco e Fibras de Açaí como Materiais de Reforço de um Solo Tropical**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 397/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Mayara Luana de Jesus Santos.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Desempenho Mecânico e Avaliação da Durabilidade de Serragem de Bambu, Fibras de Coco e Fibras de Açaí como Materiais de Reforço de um Solo Tropical**.

GRAU/ANO: Mestre/2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Mayara Luana de Jesus Santos
CLN 408, bloco E, Apto. 202, Asa Norte
70856-550 – Brasília/DF - Brasil
Mayaraluana.ml@gmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico essa e todas as conquistas da minha vida a Deus e a Nossa Senhora de Guadalupe, que me abençoa e me dá forças em todas as minhas escolhas e sonhos. Dedico também à minha família, em especial aos meus pais e a minha irmã por todo apoio, compreensão e amor.

AGRADECIMENTOS

Atribuo essa realização à Deus e à Nossa Senhora de Guadalupe, pois eles me proporcionaram a força e a saúde durante essa jornada, renovaram minha energia nos momentos em que pensei que não tinha mais e iluminaram minha mente para que eu pudesse chegar até aqui.

Essa importante transformação e conquista que aqui se concretiza, só se tornou realidade devido ao imensurável apoio e incentivo dos meus queridos pais, Irailde e Marivaldo. Eles sempre se empenharam para me proporcionar essa experiência e foram um suporte inabalável nos momentos mais desafiadores.

Expresso minha profunda gratidão à minha irmã, Mariana, cuja presença tem sido meu refúgio nos momentos em que pensei em desistir, proporcionando-me momentos de descontração e serenidade. Também sou imensamente grata a todos da minha família (tias, avós, avôs, madrinha, primas), pelo apoio ao longo de toda a minha vida, principalmente agora que estão fisicamente distantes, mas sempre mantendo suas orações e torcendo pelo meu sucesso.

Durante esse período de transformações significativas em minha vida, repleto de obstáculos a superar, uma pessoa extremamente especial foi colocada por Deus em meu caminho para me auxiliar, formando uma valiosa rede de apoio pela qual sou imensamente grata: Karla Araújo. Sua acolhida como uma figura materna aqui em Brasília, seus conselhos e apoio foram fundamentais para o meu progresso. Você representa uma inspiração para mim, expresso aqui minha profunda gratidão por tudo que faz.

Minha profunda gratidão e admiração à minha orientadora querida, Michéle Casagrande. Ela é uma fonte constante de inspiração, não apenas por sua vasta experiência na geotecnia, mas também pelo seu caráter excepcional como mulher e ser humano. Fazer parte do grupo de pesquisa liderado por ela foi uma das minhas melhores escolhas. Sinto-me extremamente privilegiada e honrada por ter essa oportunidade.

Faço um agradecimento especial pelos amigos que cultivei durante o mestrado, todos os colegas do programa de pós-graduação: Isabela Silva, Maria Camila, Paulo Netto, Camila Pinto, Anna Clara, Beatriz Mapa e Leandro Gomes obrigada pela amizade e gentileza. Ressalto aqueles que me ajudaram na dissertação: a Monique Paixão, minha afilhada que cuida tão bem de mim, o Anderson Villamil que, além de me proporcionar momentos de descontração, sempre se mostrou solícito e generoso comigo. E a Gabriella Vieira, essa menina extraordinária e de um coração imenso, você é mais que uma irmã acadêmica, é minha irmã de fé. Grata a Deus por ter todos vocês comigo.

Agradeço a todos do “*Casagrande Research Group*”, esse grupo de pesquisa com pessoas tão sensacionais que me apoiaram e se fizeram solícitos, em especial ao Matheus Machado que compartilhou comigo todo seu conhecimento sobre as fibras de açaí.

A Capes pelo apoio financeiro. À equipe do laboratório de geotecnia, a todos os professores do programa de Pós-Graduação e à Universidade de Brasília e Universidade Federal da Bahia.

RESUMO

Desempenho Mecânico e Avaliação da Durabilidade de Serragem de Bambu, Fibras de Coco e Fibras de Açaí como Materiais de Reforço de um Solo Tropical.

O presente estudo experimental aborda a destinação adequada de resíduos como serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí. A falta de destinação adequada desses materiais resulta em descarte inadequado no meio ambiente. Para lidar com esse problema, a linha de pesquisa de novos materiais geotécnicos propõe o uso desses resíduos como reforço de solos. O presente estudo investiga a interação desses reforços vegetais com o solo tropical ao longo do tempo, levando em consideração os processos de degradação resultantes de fatores ambientais. Além disso, analisa as propriedades desses resíduos vegetais e como eles influenciam nas características mecânicas e de durabilidade dos compósitos. Também se propõe a análise de parâmetros-chave que traduzem a interação entre as propriedades dos compósitos e a resistência à compressão simples. Os resultados mostram que, inicialmente, os compósitos reforçados com a serragem de bambu apresentaram um pico de resistência mais pronunciado, no entanto, a sua resistência diminuiu rapidamente após a resistência de pico, ao contrário das fibras de coco e açaí, que mantiveram estes valores elevados. Em termos de resistência máxima atingida e de resistência pós-pico, as fibras de açaí se mostraram mais efetivas, superando o bom desempenho obtido com as fibras de coco. Durante a exposição dos compósitos, pelo período de 6 meses, todos os materiais de reforço estudados mostraram uma perda de resistência, porém as fibras de coco e as de açaí continuaram contribuindo como elemento de reforço na matriz de solo tropical, visto que a resistência à compressão simples permaneceu maior quando comparado ao solo tropical sem reforço. Ao longo dos meses de exposição, as fibras de coco mostraram uma redução de resistência consideravelmente menor em comparação com os outros materiais, demonstrando uma boa resistência à degradação. Embora os materiais vegetais tenham desvantagens, como variações nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à degradação, a sua utilização se mostra viável em situações em que o aumento dos parâmetros de resistência do solo é necessário em curto prazo. Este estudo contribui para a compreensão do comportamento de compósitos reforçados, destacando o potencial de reutilização de resíduos vegetais diversos na engenharia geotécnica, como uma alternativa sustentável.

Palavras-chave: Serragem de Bambu; Fibras de Coco; Fibras de Açaí; Resíduos; Solo Reforçado; Degradação.

ABSTRACT

Mechanical Performance and Durability Evaluation of Bamboo Sawdust, Coconut Fibers, and Açaí Fibers as Reinforcement Materials for Tropical Soil.

The present experimental study addresses the proper disposal of waste such as bamboo sawdust, coconut fibers, and açaí fibers. Improper disposal of these materials leads to inadequate environmental waste. To tackle this problem, the research line of new geotechnical materials proposes the use of these waste materials as soil reinforcements. The present study investigates the interaction of these vegetative reinforcements with tropical soil over time and the degradation processes resulting from environmental factors. Additionally, it analyzes the properties of these vegetative residues and how they influence the mechanical and durability characteristics of the composites. Furthermore, it aims to analyze key parameters that translate the interaction between composite properties and simple compression strength. The results show that initially, composites reinforced with bamboo sawdust presented a more pronounced peak strength. Still, their strength decreased rapidly after the peak, unlike coconut and açaí fibers, which maintained these high values. In terms of maximum achieved and post-peak strength, açaí fibers proved to be more effective, surpassing the good performance obtained with coconut fibers. During the 6-month exposure of the composites, all studied reinforcement materials showed a loss of strength. Still, coconut and açaí fibers continued to contribute as reinforcement elements in the tropical soil matrix, as the simple compression strength remained higher when compared to unreinforced tropical soil. Throughout the months of exposure, coconut fibers exhibited a considerably smaller reduction in strength compared to the other materials, demonstrating good resistance to degradation. Although vegetative materials have disadvantages such as variations in mechanical properties and susceptibility to degradation, their use proves feasible in situations where increasing soil strength parameters is necessary. This study contributes to understanding the behavior of reinforced composites, highlighting the potential for reusing various vegetative wastes in geotechnical engineering as a sustainable alternative.

Keywords: Bamboo Sawdust; Coconut Fibers; Açaí Fibers; Residues; Reinforced Soil; Degradation.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 3 |
| 1.2.1. OBJETIVO GERAL | 3 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO..... | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1. SOLOS REFORÇADOS | 6 |
| 2.2. CONTEXTO HISTÓRICO DOS SOLOS REFORÇADOS..... | 7 |
| 2.3. SOLO REFORÇADO COM FIBRAS..... | 8 |
| 2.3.1. ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS | 12 |
| 2.3.2. INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS FATORES DAS FIBRAS NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS REFORÇADOS..... | 14 |
| 2.4. FIBRAS VEGETAIS | 18 |
| 2.4.1. SERRAGEM DE BAMBU | 23 |
| 2.4.2. FIBRAS DE COCO | 27 |
| 2.4.3. FIBRAS DE AÇAÍ..... | 30 |
| 2.5. ESTUDOS EXPERIMENTAIS COM FIBRAS VEGETAIS | 34 |
| 2.5.1. SERRAGEM DE BAMBU: ESTUDOS EXPERIMENTAIS | 35 |
| 2.5.2. FIBRAS DE COCO: ESTUDOS EXPERIMENTAIS..... | 37 |
| 2.5.3. FIBRAS DE AÇAÍ: ESTUDOS EXPERIMENTAIS..... | 38 |
| 2.6. DURABILIDADE DAS FIBRAS VEGETAIS..... | 40 |
| 2.7. PARÂMETROS-CHAVE..... | 43 |
| 3. METODOLOGIA | 47 |
| 3.1. MATERIAIS..... | 47 |
| 3.1.1. SOLO TROPICAL ARGILOSO..... | 48 |
| 3.1.2. SERRAGEM DE BAMBU | 49 |
| 3.1.3. FIBRAS DE COCO | 50 |
| 3.1.4. FIBRAS DE AÇAÍ..... | 51 |
| 3.2. MÉTODOS | 52 |
| 3.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO..... | 53 |
| 3.2.2. CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS MATERIAIS DE REFORÇO..... | 53 |
| 3.2.3. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X NOS MATERIAIS DE REFORÇO | 55 |
| 3.2.4. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X NOS MATERIAIS DE REFORÇO..... | 56 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.2.5. | ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER NOS MATERIAIS DE REFORÇO..... | 57 |
| 3.2.6. | ANÁLISE MICROESTRUTURAL NOS MATERIAIS DE REFORÇO | 58 |
| 3.2.7. | TRAÇÃO DIRETA NOS MATERIAIS DE REFORÇO | 59 |
| 3.2.8. | COMPACTAÇÃO EM EQUIPAMENTO MINIATURA | 61 |
| 3.2.9. | COMPÓSITOS SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL | 62 |
| 3.2.10. | COMPRESSÃO SIMPLES..... | 66 |
| 4. | RESULTADOS..... | 69 |
| 4.1. | SOLO TROPICAL ARGILOSO | 69 |
| 4.2. | SERRAGEM DE BAMBU..... | 70 |
| 4.2.1. | COMPACTAÇÃO MINI-MCV..... | 70 |
| 4.2.2. | COMPRESSÃO SIMPLES..... | 72 |
| 4.2.3. | TRAÇÃO DIRETA..... | 75 |
| 4.2.4. | MEV..... | 76 |
| 4.3. | FIBRAS DE COCO | 78 |
| 4.3.1. | COMPACTAÇÃO MINI-MCV..... | 78 |
| 4.3.2. | COMPRESSÃO SIMPLES..... | 80 |
| 4.3.3. | TRAÇÃO DIRETA..... | 84 |
| 4.3.4. | MEV..... | 85 |
| 4.4. | FIBRAS DE AÇAÍ | 87 |
| 4.4.1. | COMPACTAÇÃO MINI- MCV..... | 87 |
| 4.4.2. | COMPRESSÃO SIMPLES..... | 89 |
| 4.4.3. | TRAÇÃO DIRETA..... | 93 |
| 4.4.4. | MEV..... | 94 |
| 4.5. | ANÁLISE GLOBAL DOS MATERIAIS DE REFORÇO..... | 96 |
| 4.5.1. | CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA | 96 |
| 4.5.2. | PERDA DE MASSA..... | 98 |
| 4.5.3. | ASPECTO DOS COMPÓSITOS EXPOSTOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL E AVALIAÇÃO DE pH..... | 100 |
| 4.5.4. | DRX | 102 |
| 4.5.5. | FRX..... | 103 |
| 4.5.6. | FTIR | 105 |
| 4.5.7. | COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES | 107 |
| 4.5.8. | COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS MATERIAS DE REFORÇO..... | 110 |
| 4.5.9. | COMPARATIVO DAS IMAGENS EM MEV | 111 |
| 4.6. | PARÂMETROS-CHAVE..... | 113 |
| 5. | CONCLUSÕES | 116 |
| | REFERÊNCIAS | 119 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2-1 – Origem e composição química de algumas fibras vegetais. (Adaptado de Gehlen, 2014)..... | 23 |
| Tabela 2-2 – Propriedades físicas das fibras de bambu. | 26 |
| Tabela 2-3 – Propriedades químicas das fibras de bambu. | 27 |
| Tabela 2-4 – Propriedades físicas das fibras de coco..... | 29 |
| Tabela 2-5 – Propriedades químicas das fibras de coco..... | 30 |
| Tabela 2-6 – Propriedades mecânicas das fibras de coco. | 30 |
| Tabela 2-7 – Propriedades físicas das fibras de açai..... | 34 |
| Tabela 2-8 – Propriedades químicas das fibras de açai..... | 34 |
| Tabela 2-9 – Estudo de solos reforçados com fibras naturais. | 35 |
| Tabela 3-1 – Caracterização física do solo: normas utilizadas. | 53 |
| Tabela 4-1 - Resumo dos parâmetros de compactação do solo reforçado sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu. | 71 |
| Tabela 4-2 - Resultados do ensaio de Compressão simples no solo não reforçado e reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu. | 75 |
| Tabela 4-3 - Resultados médios e desvios-padrões obtidos no ensaio de tração direta na serragem de bambu..... | 76 |
| Tabela 4-4 - Resumo dos parâmetros de compactação do solo reforçado sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco..... | 80 |
| Tabela 4-5 - Resultados do ensaio de Compressão simples no solo não reforçado e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco..... | 83 |
| Tabela 4-6 – Resultados médios e desvios-padrões obtidos no ensaio de tração direta em fibras de coco..... | 84 |
| Tabela 4-7 - Resumo dos parâmetros de compactação do solo reforçado sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibras de açai | 89 |
| Tabela 4-8 - Resultados do ensaio de Compressão simples no solo não reforçado e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de açai. | 93 |
| Tabela 4-9 - Resultados médios e desvios-padrões obtidos no ensaio de tração direta em fibras de açai..... | 94 |
| Tabela 4-10 – Resultados dos ensaios de pH nos compósitos. | 102 |
| Tabela 4-11 – Resultado do ensaio de FRX na Serragem Bambu. | 104 |
| Tabela 4-12 – Resultado do ensaio de FRX nas Fibras de Coco. | 104 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4-13 – Resultado do ensaio de FRX nas Fibras de Açai. | 104 |
| Tabela 4-14 – Perda de resistência dos compósitos submetidos a exposição. | 109 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Representação de fissura em solo reforçado com fibras (Coutts, 1986)..... | 10 |
| Figura 2.2 – Forças componentes do compósito durante um carregamento (Taylor, 2013).... | 11 |
| Figura 2.3 – Formas de distribuição de fibras em solo (REIS, 2022)..... | 16 |
| Figura 2.4 – Classificação das fibras (Adaptado de Santiago, 2011)..... | 18 |
| Figura 2.5 – Ilustração esquemática de uma fibrocélula (Adaptado de Silva et al., 2010)..... | 19 |
| Figura 2.6 – Composição química das fibras vegetais (a) Hemicelulose; (b) Lignina; (c) Celulose (Adaptado de Canilha et al., 2010)..... | 21 |
| Figura 2.7 – (a) Bambu. (b) Localização do cultivo de bambu no mundo (Adaptado de Marçal, 2008)..... | 24 |
| Figura 2.8 – Descarte de resíduos de BLaC. | 26 |
| Figura 2.9 – (a) Coqueiro. (b) Localização da produção de coco no Brasil..... | 27 |
| Figura 2.10 – Descarte negligente de resíduo de coco (Fenacoco, 2013)..... | 28 |
| Figura 2.11 – Fibras da casca do coco. | 29 |
| Figura 2.12 – (a) Açaizeiro. (b) Localização do plantio de açaizeiro (Adaptado de Mesquita, 2013)..... | 31 |
| Figura 2.13 – (a) Polpa do açaí – parte aproveitada pela indústria alimentícia. (b) Descarte inadequado de resíduo de açaí. (Mesquita, 2013) | 32 |
| Figura 2.14 – Caroco e fibras de açaí..... | 33 |
| Figura 2.15 – Previsão da tensão desvio por meio da relação vazios/cimento (Consoli et al., 2007b)..... | 44 |
| Figura 2.16 – Variação da resistência à compressão simples (q_u) de amostras não reforçadas e reforçadas com fibra em relação ao índice de porosidade/cimento ajustado para rejeito de ouro (Consoli et al., 2017)..... | 44 |
| Figura 2.17 – Relação da Resistência a Compressão Simples com o índice de porosidade e teor volumétrico de polímero para os compósitos rejeito-polímero-fibra (Alelvan, 2022). | 45 |
| Figura 3.1 – Fluxograma de materiais e métodos propostos na pesquisa. | 47 |
| Figura 3.2 – Solo Tropical Argiloso..... | 48 |
| Figura 3.3 – Serragem de Bambu: material passante na peneira de 2,00 mm. | 50 |
| Figura 3.4 – (a) Fibras de Coco antes de cortadas. (b) Fibras de Coco com 15 mm de comprimento..... | 51 |
| Figura 3.5 – Fibras de Açaí. | 52 |
| Figura 3.6 – Ensaio de capacidade de absorção de água..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.7 – Equipamento de difração de raios-X. | 56 |
| Figura 3.8 – Equipamento de Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X. | 57 |
| Figura 3.9 – Equipamento de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier. | 58 |
| Figura 3.10 – Microscópio Eletrônico de Varredura. | 59 |
| Figura 3.11 - Quantidade de corpos de prova submetidos ao ensaio de tração direta. | 60 |
| Figura 3.12 – Ensaio de tração direta: (a) Corpos de prova dos matérias naturais; (b) Corpo de prova antes de rompido; (c) Corpo de prova após rompimento. | 61 |
| Figura 3.13 – Equipamento de compactação em miniatura. | 62 |
| Figura 3.14 – (a) Solo espalhado na bandeja para iniciar a mistura. (b) Adição do material de reforço na mistura. (c) Adição de água na mistura. (d) Homogeneização da mistura. (e) Corpo de prova compactado. | 63 |
| Figura 3.15 – (a) Caixas perfuradas. (b) Geotêxtil não tecido de proteção. (c) Corpo de prova compactado. (d) Corpo de prova embalado em lona plástica tecida. (e) Caixa contendo corpos de prova submetidos para degradação. | 64 |
| Figura 3.16 – Local de exposição dos corpos de prova à degradação natural. | 65 |
| Figura 3.17 – Parâmetros meteorológicos dos meses de exposição dos compósitos: temperatura média, umidade relativa média do ar e precipitação (INMET, 2023). | 65 |
| Figura 3.18 – Corpos de prova retirados após tempo de degradação. | 66 |
| Figura 3.19 – Ensaio de compressão simples. | 67 |
| Figura 3.20 – Quantidade de corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão simples para análise de durabilidade dos compósitos. | 68 |
| Figura 3.21 – Quantidade de corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão simples para análise de parâmetros-chave nos compósitos. | 68 |
| Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo puro. | 69 |
| Figura 4.2 - (a) Resultado da compactação do solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu. (b) Índice de vazios do solo sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu. | 71 |
| Figura 4.3 – Resultados do ensaio de compressão simples em amostras não reforçadas e reforçadas com serragem de bambu nos tempos de exposição de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses. | 73 |
| Figura 4.4 – Planos de ruptura dos corpos de prova com serragem de bambu: (a) Solo sem reforço em 0 meses; (b) Solo + 1,0% em 0 meses; (c) Solo + 2,0% em 0 meses; (d) Solo + 1,0% | |

| | |
|---|-----|
| em 2 meses; (e) Solo + 2,0% em 2 meses; (f) Solo + 1,0% em 4 meses; (g) Solo + 2,0% em 4 meses; (h) Solo + 1,0% em 6 meses; (i) Solo + 2,0% em 6 meses. | 74 |
| Figura 4.5 - Morfologia da superfície e seção transversal da serragem de bambu ao longo do tempo: (a) 0 meses, (b) 2 meses; (c) 4 meses e (d) 6 meses..... | 77 |
| Figura 4.6 - Resultado da compactação do solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco. (b) Índice de vazios do solo sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco..... | 79 |
| Figura 4.7 - Resultados do ensaio de compressão simples em amostras não reforçadas e reforçadas com fibras de coco nos tempos de exposição de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses..... | 81 |
| Figura 4.8 - Planos de ruptura dos corpos de prova com fibras de coco: (a) Solo sem reforço em 0 meses; (b) Solo + 1,0% em 0 meses; (c) Solo + 2,0% em 0 meses; (d) Solo + 1,0% em 2 meses; (e) Solo + 2,0% em 2 meses; (f) Solo + 1,0% em 4 meses; (g) Solo + 2,0% em 4 meses; (h) Solo + 1,0% em 6 meses; (i) Solo + 2,0% em 6 meses. | 83 |
| Figura 4.9 - Morfologia da superfície e seção transversal da fibra de coco ao longo do tempo: (a) 0 meses, (b) 2 meses; (c) 4 meses e (d) 6 meses..... | 86 |
| Figura 4.10 - Resultado da compactação do solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de açaí. (b) Índice de vazios do solo sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de açaí..... | 88 |
| Figura 4.11 - Resultados do ensaio de compressão simples em amostras não reforçadas e reforçadas com fibras de açaí nos tempos de exposição de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses. | 90 |
| Figura 4.12 - Planos de ruptura dos corpos de prova com fibras de açaí: (a) Solo sem reforço em 0 meses; (b) Solo + 1,0% em 0 meses; (c) Solo + 2,0% em 0 meses; (d) Solo + 1,0% em 2 meses; (e) Solo + 2,0% em 2 meses; (f) Solo + 1,0% em 4 meses; (g) Solo + 2,0% em 4 meses; (h) Solo + 1,0% em 6 meses; (i) Solo + 2,0% em 6 meses. | 92 |
| Figura 4.13- Morfologia da superfície e seção transversal da fibra de açaí ao longo do tempo: (a) 0 meses, (b) 2 meses; (c) 4 meses e (d) 6 meses..... | 95 |
| Figura 4.14 – Resultados ensaio de absorção de água. | 97 |
| Figura 4.16 – Massa remanescente dos materiais vegetais expostos a degradação no solo. ... | 99 |
| Figura 4.17 – Aspecto visual em 2, 4 e 6 meses dos compósitos com: (a) Serragem de bambu; (b) Fibra de coco; (c) Fibra de açaí. | 101 |
| Figura 4.15 – Resultados dos ensaios de DRX: (a) Serragem de Bambu; (b) Fibras de Coco; (c) Fibras de Açaí..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.18 – Resultados do ensaio de FTIR nas: (a) Serragem de Bambu; (b) Fibras de Coco; (c) Fibras de Açaí. | 106 |
| Figura 4.19 – Análise comparativa dos resultados de compressão simples nos tempos de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses..... | 107 |
| Figura 4.20 - Análise comparativa dos resultados de resistência à tração e alongamento na ruptura da serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí..... | 110 |
| Figura 4.21 - Análise comparativa das superfícies longitudinais no tempo 0 e 6 meses de: (a) Bambu; (b) Coco; (c) Açaí. | 112 |
| Figura 4.22 - Análise comparativa das seções transversais no tempo 0 e 6 meses de: (a) Bambu; (b) Coco; (c) Açaí..... | 113 |
| Figura 4.23: Curvas de Parâmetros-chave solo reforçado com: (a) Serragem de Bambu; (b) Fibra de Coco; (c) Fibra de Açaí. | 114 |

LISTA DE ABREVIACÕES

| Abreviação | Significado |
|------------|---|
| A | Alumínio |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| BLaC | Bambu Laminado Colado |
| Ca | Cálcio |
| CPAB | Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais |
| DRX | Difração de Raios-X |
| Embrapa | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| FAO | <i>Food and Agriculture Organization</i> |
| F | Teor de fibra |
| Fe | Ferro |
| FRX | Espectrometria de Fluorescência de Raios-X |
| FTIR | Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IC | ndice de Cristalinidade |
| INMT | Instituto Nacional de Meteorologia |
| IP | ndice de Plasticidade |
| K | Potássio |
| LL | Limite de Liquidez |
| LMM | Laboratório de Microscopia e Microanálise |
| LP | Limite de Plasticidade |
| MCT | Miniatura, Compactado, Tropical |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| Mn | Manganês |
| Na | Sódio |

LISTA DE ABREVIACÕES

| Abreviação | Significado |
|-------------------|--|
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| PUC-Rio | Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro |
| PVDF | Fluoreto de Polivinilideno |
| RBB | Rede Brasileira do Bambu |
| S | Enxofre |
| Si | Sílica |
| SUCS | Sistema Unificado de Classificação de Solos |
| Ti | Titânio |
| U | Urânio |
| UFBA | Universidade Federal da Bahia |
| UFPA | Universidade Federal do Pará |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------|---|
| A | Absorção |
| d | Diâmetro |
| d_f | Densidade das fibras/serragem |
| e | Índice de vazios |
| e_{min} | Índice de vazios Mínimo |
| $e_{máx}$ | Índice de vazios Máximo |
| F | Teor de fibra/serragem |
| G_s | Densidade real dos grãos |
| g | Aceleração da gravidade |
| I_{002} | Intensidade correspondente ao material cristalino |
| I_{min} | Intensidade correspondente ao halo amorfo |
| l | Comprimento de fibra |
| l/d | Comprimento/Diâmetro |
| m_f | Massa de fibras/serragem |
| P_e | Peso seco das fibras/serragem |
| P_{ht} | Peso úmido das fibras/serragem |
| R^2 | Fator de determinação |
| V_t | Volume total |
| V_f | Volume total de fibras/serragem |
| ρ_d | Massa específica seca do solo |
| ρ_s | Massa específica dos grãos de solo |

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Ao longo do tempo, é reconhecido que o meio físico é bastante afetado pela atividade humana, contudo a partir da Revolução Industrial, o processo de contaminação e poluição do meio ambiente mudou drasticamente, tanto na forma quanto na intensidade. Conforme estabelecido pela Lei nº 12.305/2010, conhecida como Política Nacional dos Resíduos Sólidos, é de responsabilidade do gerador dos resíduos garantir sua correta destinação, independentemente da quantidade produzida. Caso não sejam adequadamente descartados, esses resíduos podem ocasionar sérios danos ao meio ambiente.

Países com vasto potencial agrícola, como o Brasil, produzem grandes quantidades de fibras que frequentemente são descartadas como resíduo após passarem por algum processo de beneficiamento. Por exemplo, de acordo com Almeida et al. (2015), durante a produção de ripas a partir do corte do colmo de bambu, utilizado como material estrutural, aproximadamente 72,46% do bambu se transforma em aparas e serragens que são posteriormente descartadas. Outro exemplo de produto agrícola que gera resíduos ambientais é o coco. Conforme observado por Lacerda & Leitão (2021), cerca de 80% dos resíduos encontrados nas praias brasileiras consistem em cascas de coco verde. Além disso, tem-se os resíduos do vegetal açaí, que de acordo com o IBGE (2021), considerando que a produção anual de açaí no Brasil ultrapassa 220 mil toneladas, tem-se um total de 161 mil toneladas de despojo na forma de fibras e caroços.

Portanto, é fundamental abordar sobre uma destinação ou reutilização desses resíduos, que por não terem uma destinação adequada, muitas das vezes, acabam por serem descartados de forma irresponsável no meio ambiente. Nesse contexto, a linha de pesquisa de novos materiais geotécnicos visa, entre outros objetivos, tornar viável a utilização de materiais com potencial significativo, porém pouco comumente empregados, para compor obras de terra.

De acordo com o relato de Bernardina (2019), devido à complexidade e à variabilidade das propriedades dos solos, é comum que, em certas situações de construção, sua capacidade e características não atendam plenamente aos requisitos dos projetos de engenharia, exigindo assim a necessidade de reforço para melhorar suas propriedades. Sendo a aplicação das fibras uma alternativa que apresenta um desempenho satisfatório ao serem utilizadas como reforço

para o solo, contribuindo para melhorar diversas propriedades, como resistência ao cisalhamento, tenacidade, resistência à tração, coesão e trabalhabilidade, entre outras. Embora não impeçam a formação de fissuras no compósito, seu uso auxilia no controle da propagação dessas fissuras, o que resulta em um aumento da resistência à tração (Taylor, 2013).

As fibras podem ser classificadas como naturais, facilmente encontradas na natureza (fibras de curauá, de sisal, de coco, de açai, bambu, entre outras) e artificiais ou sintéticas, quando obtidas por meio de processos industriais com a utilização de polímeros naturais ou subprodutos do petróleo (fibras de poliéster, de poliamida, polipropileno, entre outras). Em comparação com as fibras sintéticas, as fibras vegetais apresentam vantagens como baixo custo, fácil obtenção, manuseio simples, disponibilidade abundante, boas propriedades mecânicas, geração reduzida de resíduos, uso de tecnologia simples e demanda de pouca energia no processo de produção, além de serem fontes renováveis (Dittenber & Gangarao, 2012). No entanto, é importante mencionar que as fibras vegetais também possuem desvantagens, como uma maior variabilidade das propriedades mecânicas e físicas, suscetibilidade à degradação e variações dimensionais em resposta a mudanças no teor de umidade e temperatura (Ghavami et al., 1999).

No estudo realizado por Silveira & Casagrande (2021), as autoras mostram que, mesmo após exposição à degradação natural, o solo reforçado com fibras vegetais distribuídas aleatoriamente apresenta grande potencial como material de reforço de solo. Afinal, mesmo com as limitações de perda de massa, as fibras naturais mantiveram ganhos quanto aos parâmetros de resistência do solo analisado.

Apesar de serem mais susceptíveis à degradação, as fibras vegetais podem ser utilizadas em situações em que a estabilização ou funcionalidade da obra é imediatamente após a construção. Por exemplo, em uma estrada de acesso construída sobre um solo de argila mole saturada, onde a prioridade é permitir a construção da estrada, as fibras vegetais podem ser utilizadas. Nesses casos, é importante identificar a variação temporal das funções e características essenciais para resolver o problema e, em seguida, produzir um produto que atenda a essas necessidades (Silveira, 2018).

O presente trabalho pretende expor sobre o comportamento de compósitos de um solo tropical reforçado com resíduos de vegetais de bambu, coco e açai, aleatoriamente distribuídas. Foi investigado como esses reforços vegetais interagem com o solo ao longo do tempo,

considerando os processos de degradação que podem ocorrer devido a fatores ambientais, bem como ao examinar os diferentes tipos de resíduos vegetais, buscou-se entender suas propriedades, como influenciam nas características mecânicas e de durabilidade dos compósitos. Visando o uso desses materiais como alternativa de reforço em obras de terra como aterro sobre solos moles e na estabilidade de taludes, por exemplo. Também se propõe a análise de parâmetros-chave que traduzem a interação entre as propriedades dos compósitos e a resistência à compressão simples.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O principal propósito desta pesquisa é analisar o desempenho mecânico e a durabilidade de solos reforçados com serragem de bambu, fibras de coco e de açaí, distribuídas aleatoriamente na massa dos solos, quando expostos a diferentes condições climáticas ao longo do tempo. Visando utilizar esses materiais como alternativa de destinar resíduos solos em obras geotécnicas.

A fim alcançar esse objetivo, foram avaliados os comportamentos de tensão *versus* deformação e resistência do solo e das misturas, com e sem exposição ao envelhecimento natural. Essa análise permitirá estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição de materiais naturais relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação do solo.

Com base no objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento físico e mecânico da influência da adição de serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí em solo tropical argiloso, nos teores de 1,0% e 2,0% em relação à massa seca do solo, aleatoriamente distribuídos, por meio de ensaios de compactação e compressão não confinada;
- Avaliar os efeitos de 0, 60, 120, 180 dias de envelhecimento natural dos materiais vegetais utilizados como reforço no solo argiloso tropical, no comportamento tensão *versus* deformação, por meio de ensaios de compressão não confinada;

- Determinar as propriedades físico-químicas e mecânicas dos insumos vegetais, pelo estudo da degradação por meio de ensaios de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) e tração direta, bem como os ensaios de absorção de água e Difração de Raios-X (DRX) sem degradação;
- Conduzir uma investigação da microestrutura dos materiais naturais em questão, com e sem degradação, por meio do uso de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a fim de explicar o comportamento desses nos compósitos com a matriz de solo;
- Quantificar a influência das variáveis de interesse: teor de serragem e fibras, porosidade das misturas compactadas e densidade de moldagem sobre a resistência à compressão não confinada dos compósitos estudados na obtenção de parâmetros-chave.

1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi estruturada em 5 capítulos descritos sucintamente a seguir:

No capítulo 1, foi disposta a proposta do trabalho, sua justificativa e objetivos.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão da literatura que aborda os tópicos relevantes para o objetivo da pesquisa, fornecendo uma compreensão fundamental sobre solos reforçados, solo reforçado com fibras e suas especificidades, composição e origem dos materiais vegetais, assim como o comportamento mecânico e a durabilidade dos compósitos de solo-fibras vegetais. Além disso, são apresentadas as bases teóricas da metodologia utilizada para o estudo dos parâmetros-chave.

O capítulo 3 apresenta o detalhamento do programa experimental realizado nesta pesquisa. Descreve todos os materiais utilizados, preparação dos corpos de prova, equipamentos e procedimentos executados.

O capítulo 4 mostra todos os resultados obtidos da caracterização física do solo, caracterização mecânica da serragem de bambu e das fibras de coco e açai. Bem como uma análise global para comparar os resultados dos compósitos, no tempo zero e submetidos ao envelhecimento natural. Por fim, são apresentados os gráficos de parâmetro-chave dos compósitos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas por meio das avaliações dos resultados, assim como as recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico para o desenvolvimento do tema, realizado por meio de uma extensa revisão de literatura, tanto nacional como internacional, disponível sobre os assuntos aqui tratados. Inicialmente, são apresentadas algumas definições gerais, em seguida, o comportamento solo-fibra é discutido e são abordadas as particularidades dos materiais vegetais, em especial do bambu, coco e açai. Além disso, serão apresentados estudos experimentais envolvendo esses materiais e estudos de durabilidade. Por fim, será desenvolvida uma base teórica sobre a metodologia de estudo de parâmetros-chave.

2.1. SOLOS REFORÇADOS

Para Santos & Guedes, (2022), reforço de solo é uma solução geotécnica que consiste na introdução de elementos resistentes à tração, como as fibras e os geossintéticos, a fim de compensar a pouca capacidade que o solo possui em resistir a esse esforço de tração. Os subsídios de reforço, portanto, propiciam ao solo o aumento de resistência aos esforços externos e uma diminuição da deformabilidade do maciço.

Sabe-se que melhorar e/ou reforçar solos consiste em valer-se de processos físicos e/ou químicos que contribuam para aprimorar as propriedades mecânicas dos solos. É importante ressaltar que, conforme Casagrande (2005), o termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes. Dessa maneira, depreende-se que a introdução dos reforços não representa um melhoramento significativo das características do solo, como ocorrido nos métodos de tratamento, mas sim um melhoramento do comportamento global, possível pela transferência de esforços para os elementos de reforço, causando, então, um efeito essencialmente estrutural, uma vez que a estrutura global do maciço é alterada (Cardoso, 1987).

Quando o solo no local da obra de construção civil não possui as características geotécnicas necessárias para o projeto, uma escolha comum é utilizar o processo de reforço. Essa abordagem permite aprimorar certas propriedades do solo, evitando assim os custos associados ao transporte de materiais adequados de jazidas distantes e a remoção do solo inadequado para áreas de descarte (Pessoa, 2004).

2.2. CONTEXTO HISTÓRICO DOS SOLOS REFORÇADOS

Nas mais diversas áreas de atuação da geotecnia, reforçar solos é um método que faz parte da história das soluções de engenharia. Segundo Palmeira (1992), essa técnica de melhorar as propriedades mecânicas dos solos é há muito tempo conhecida e empregada pela humanidade. Afinal, desde o quinto e quarto século antes de Cristo, os homens perceberam a possibilidade de melhorar as características dos solos adicionando diversos materiais (Jones, 2010).

Como por exemplo, hastes de bambu e junco eram utilizadas no reforço de tijolos de barro e solos granulares para auxiliar na construção de diversas obras de terra. A pirâmide de Ziggurat e a torre de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 A. C.), existentes ainda hoje, foram construídas utilizando-se camadas alternadas de solo e mantas de raízes. Em alguns Ziggurats, utilizavam-se, como reforço adicional, cordas com 5 cm de diâmetro, inseridas perpendicularmente ao talude e regularmente espaçadas nas direções vertical e horizontal (Silva, 2009). Também, foram encontrados vestígios de tecidos e peles utilizadas para reforço em algumas das estradas que conectavam o Império Romano. Segundo Sotomayor & Casagrande (2018), indícios do emprego dessa técnica são, ainda, encontrados em partes da Grande Muralha da China.

Ainda de acordo com os autores Sotomayor & Casagrande (2018), no Peru, os incas construíram as estradas no Palácio do Sol e da Lua reforçadas com misturas de lã de lhama e argila. Muralhas de adobe reforçadas com bambu podem ser encontradas na cidade histórica de Chan-Chan, existentes há mais de 600 anos, feitas pela civilização anterior aos incas, numa zona de grande atividade sísmica. Outrossim, conforme Casagrande (2005), é conhecida a utilização de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros no interior do Brasil e outros países.

No final dos anos 60, o arquiteto francês Henry Vidal patenteou a técnica denominada “Terra Armada” (Vidal, 1969), onde o reforço foi alcançado através da introdução de tiras metálicas e painéis de concreto que constituíam a face do maciço. Uma das aplicações pioneiras do que mais se aproxima de um geossintético dos dias atuais foi a utilização de mantas de algodão, em 1926, pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul, Estados Unidos, como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (Palmeira, 1992).

Foi somente em meados do século XX que estudos sobre solos reforçados foram amplamente discutidos e avaliados por pesquisadores da engenharia geotécnica. Kaul (1965), Endo & Tsuruta (1969), Gray & Ohashi (1983) evidenciaram a contribuição positiva de raízes de plantas para a resistência ao cisalhamento dos solos, além de comprovarem que estas contribuíam também para a estabilidade dos taludes.

Reforços em forma de tiras de aço, telas metálicas e vários tipos de materiais sintéticos têm sido amplamente utilizados na construção de obras geotécnicas. Tais aplicações vão desde as estruturas convencionais à estabilização de aterros sobre solos moles, passando por reforços de taludes, aumento da capacidade de suporte de fundações e reforço de pavimentos. Obras executadas a partir de solos reforçados apresentam inúmeras vantagens técnicas, construtivas e econômicas, quando comparadas aos métodos tradicionais, contribuindo, desta forma, para o grande aumento de sua utilização em diversos tipos de obra (Palacios et al., 2015).

2.3. SOLO REFORÇADO COM FIBRAS

Sabe-se que a inclusão de fibras no solo, com a finalidade de potencializar suas propriedades, o torna um material reforçado, conhecido na engenharia como compósito. De acordo com Budinski (1996), um compósito é o resultado da combinação de dois ou mais materiais, os quais, quando unidos, possuem propriedades que os componentes isolados não possuem. Sendo assim, em suas fases tem-se que um dos componentes garante a ligação – chamado de matriz (no caso o solo) – e o outro a resistência – reforço (fibras).

A comunidade científica oportuniza, portanto, o desenvolvimento de pesquisas de tal modo que, nos livros de Engenharia dos Materiais, os compósitos fibrosos são tratados em capítulos específicos (Hannant, 1994; Hollaway, 1994; Illston, 1994; Budinski, 1996; Taylor, 2013). Além desses livros, artigos recentes tratam da eficiência dos compósitos solo-fibras em pavimentos (Gondim et al., 2008), em fundações superficiais (Consoli et al., 2009), aterros sobre solos moles (Sotomayor & Casagrande, 2018), e em estabilidade de taludes (Santos et al., 2022).

Referente às propriedades mecânicas dos materiais compósitos, segundo Zhou et al. (2021), observa-se que eles possuem grandes vantagens sobre os metálicos, podendo destacar a alta rigidez e resistência que combinadas com a baixa massa específica, acarreta componentes

dimensionados com alta eficiência estrutural. Além disso, outra vantagem no uso desses materiais é que eles permitem o controle da resistência mecânica ou outros parâmetros estruturais de interesse em direções específicas. Dessa forma, é possível obter componentes estruturais mais leves, os quais podem cumprir com critérios de resistência específicos e restrições impostas pelo projeto.

Compósitos de solos reforçados com fibras nos moldes de hoje passou a ser investigado desde a metade do século XX. Em princípio, conforme relata Feuerharmel (2000), essa técnica era estudada de tal modo que os reforços de solos eram feitos com inclusões discretas e orientadas das fibras, porém, com o passar do tempo, passou-se a focar o reforço de solos por meio de inclusões aleatoriamente distribuídas em uma massa de solo, assim como será abordado e discutido neste presente trabalho.

Conforme Cheng-Wei (2010), solo-fibras são utilizados em estabilizações de rupturas de taludes, construção de novos aterros com solos marginais, redução das fissuras de contração em *liners* de argila compactadas e como reforço de sub-bases rodoviárias. O uso de fibras naturais e/ou sintéticas em engenharia geotécnica é viável em seis campos: camadas de pavimento (construção de estradas), muros de contenção, aterros ferroviários, proteção de encostas, engenharia sísmica e fundação de solos (Hejazi et al., 2012).

Dessa maneira, tem sido aplicada a solução de inclusão de fibras de forma que elas atuem como elemento de reforço que não impede a formação de fissuras, mas atuam diretamente no controle da propagação destas, melhorando as propriedades mecânicas do material compósito em questão (Casagrande, 2001).

Diversos estudos apontam que as fibras possuem potencial de ser capaz de conferir aos compósitos solo-fibra aumento da resistência, da ductilidade e da tenacidade, e a diminuição da queda de resistência pós-pico (Casagrande, 2005; Silveira, 2018; Sotomayor et al., 2021; Silveira et al., 2022; Souza et al., 2022; Santos et al 2022).

Sendo assim, conforme Reis (2022), no material compósito o solo representa a matriz que configura geometricamente o material compósito e distribui as tensões de uma fibra para a outra, entre elas e para a superfície adjacente. Ratificando, portanto, o encargo que as fibras possuem em absorver mais energia de tal modo que estabelece um aumento de resistência e

rigidez do material compósito, além de diminuir a quantidade de fissura e seu espaçamento. O verdadeiro potencial dos materiais compósitos fibrosos é alcançado no estado pós-pico, quando as fibras desempenham um papel significativo no aumento da resistência do material e, conseqüentemente, na capacidade de absorção de energia (Casagrande, 2005).

O aumento da resistência ocorre porque a deformação necessária para o surgimento de fissuras na matriz de solo é inferior à elongação das fibras, nas quais não se espera aumento da tensão de fissuração (Hannant, 1994; Taylor, 2013). A propagação de fissuras é reduzida porque as fibras mantêm as interfaces das fissuras unidas, melhorando as propriedades mecânicas do compósito na fase pós-fissuração e a sua ductilidade (Hannant, 1994). A Figura 2.1 abaixo mostra a representação de uma fissura atravessando um compósito reforçado com fibras aleatoriamente distribuídas, onde: o número (1) representa uma fibra rompida; o (2) representa uma fibra arrancada, de modo que ela “escorrega” da matriz; enquanto o (3) representa uma fibra íntegra, se deformando e atravessando a fissura. Nesse último caso, mostra ela absorvendo parcialmente a energia a qual o material está submetido (Coutts, 1986).

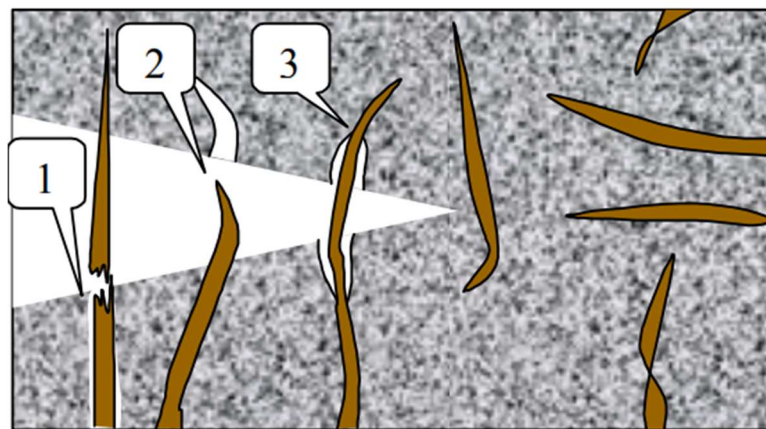


Figura 2.1 – Representação de fissura em solo reforçado com fibras (Coutts, 1986).

De forma didática a Figura 2.2 mostra uma ilustração das forças atuantes no compósito no instante em que há a sollicitação da fibra durante um carregamento.

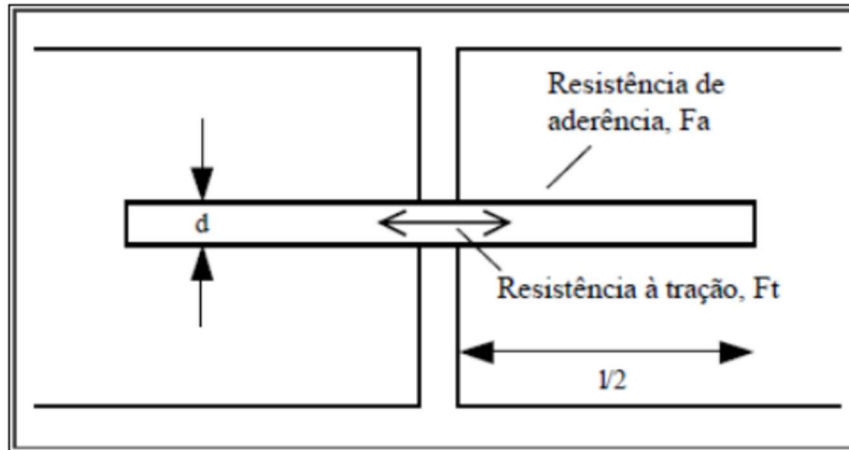


Figura 2.2 – Forças componentes do compósito durante um carregamento (Taylor, 2013).

$$\frac{\tau d^2}{4} F_t = \tau d \frac{l}{2} F_a \quad (2.1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a} \quad (2.2)$$

Sendo assim, é compreensível a importância do comprimento da fibra (l), bem como do diâmetro (d) desta. Afinal, a relação l/d (comprimento/diâmetro) ou fator de forma, como é conhecido, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência da aderência fibra/matriz (F_a). Se a fibra tem uma alta resistência à tração, como por exemplo, fibra de aço, então, ou a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou fibras de alta relação l/d deverão ser utilizadas (Taylor, 2013).

Outros parâmetros que influenciam no comportamento do compósito solo-fibra são: o teor de fibra, as propriedades físicas da fibra e da matriz de solo (orientação, distribuição, módulo de elasticidade, comprimento da fibra, entre outros) e a aderência entre o solo e a fibra (Hannant, 1994). De acordo com a influência dos principais parâmetros relacionados ao comportamento de solos reforçados, são mostradas as conclusões alcançadas por diversos pesquisadores. Alguns aspectos apresentaram resultados antagônicos, dependendo do tipo de fibra empregada.

Existem diversos tipos de fibras que são utilizadas para atribuir resistência ao material compósito, elas são distinguidas conforme sua origem: minerais (carbono, vidro e amianto), vegetais (sisal, curauá, juta, açai, bambu, coco etc.), poliméricas (polipropileno, polietileno,

poliéster e poliamida), e metálicas (aço). A definição do tipo de fibra, portanto, dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (Silveira, 2018).

É necessário conhecer, portanto, as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais, bem como sua origem, que são as características intrínsecas do comportamento de cada uma das fases dos compósitos. Dessa maneira, pode-se compreender melhor o modo como irão afetar o comportamento do material como um todo.

2.3.1. ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS

A inclusão de fibras no solo pode trazer várias alterações nas suas propriedades, dependendo do tipo de fibra utilizada e da própria matriz do compósito. De fato, combinações solo-fibras são diversas e podem promover melhorias significativas, porém, ao mudar ao menos um do material compósito, pode não ter a eficiência similar e apresentar um comportamento totalmente diferente.

Segundo Casagrande (2005), é viável analisar até que ponto o comportamento mecânico dos solos reforçados pode ser compreendido através das alterações na composição do material reforçado com fibras, comparando-o com o solo sem fibras. Dessa forma, é possível avaliar se as mudanças nos parâmetros convencionais utilizados para solos não reforçados podem explicar o comportamento dos solos reforçados. Silveira (2018) ainda afirma que as características almejadas com a inclusão de fibras vão depender do tipo de aplicação do compósito, e não necessariamente serão de ganho de resistência.

Portanto, a seguir são apresentadas algumas alterações que ocorrem no compósito de solo devido à inclusão de fibras.

- **Compactação:** Se o material reforçado com fibras naturais for compactado na mesma energia que o solo natural, é comum que apresente um peso específico seco máximo menor e um teor de umidade ótimo maior. Como resultado, a compactação do solo pode ser reduzida, aumentando a porosidade e a capacidade de drenagem. Esse comportamento pode ser justificado pela habilidade das fibras de absorver água e pelo seu baixo peso específico

(Al-Wahab & Al-Qurna, 1995; Leocádio, 2005; Bolaños, 2013; Khatri et al., 2015; Lopes & Casagrande, 2022; Santos & Casagrande, 2023). Bueno (1996) constatou que, em solo argiloso, a inclusão de fibras não resultou em nenhuma mudança na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo. Vários outros pesquisadores também relataram não terem identificado alterações significativas na presença de fibras (Maher & Ho, 1994; Nataraj et al., 1996; Ulbrich, 1997; Consoli et al., 1999; Casagrande, 2001; Heineck, 2002);

- Resistência de pico: É possível notar um aumento significativo na resistência ao cisalhamento de pico em solos reforçados com fibras, tornando-o capaz de suportar cargas maiores e evitar a ruptura. Como relatado por Consoli et al., (2007a); Casagrande (2005); Trindade et al. (2006); Santiago (2011); Bolaños (2013); Aguilar (2015); Kutanaei & Choobbasti (2016); Lopes (2019); Santos et al. (2022); Santos & Casagrande (2023);
- Resistência ao cisalhamento pós-pico: A maioria das pesquisas que examinaram o desempenho da resistência dos solos reforçados concluíram que a inclusão de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (Consoli et al., 1999; Donato et al., 2004; Leocádio, 2005; Casagrande, 2005; Festugato, 2008; Martins, 2014; Trindade et al., 2006; Tang et al., 2007; Kutanaei & Choobbasti, 2016; Tang et al., 2016; Oliveira, 2018; Santos & Casagrande, 2023);
- Propagação de fissuras: De forma geral, as fibras têm a capacidade de limitar a abertura das fissuras relacionadas à falha do compósito. Esse fenômeno resulta em um aumento da área abaixo das curvas de tensão versus deformação, o que é conhecido como tenacidade. Essa propriedade representa a energia absorvida pelo compósito durante a formação de fissuras ou sua capacidade de absorção de energia, como explicado por Casagrande (2005). Também observado por Teodoro & Bueno (1998); Teodoro (1999); Plé et al. (2009);
- Rigidez inicial: A influência do reforço na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo, como encontrado no trabalho de Plé et al. (2009); Bernardina & Casagrande (2018); Tran et al. (2018); Silveira (2018);
- Modo de ruptura: A adição de fibras no solo promove aumento da ductilidade. Este comportamento é relatado por Claria & Vettorelo (2016); Tang et al. (2016); Kutanaei &

Choobbasti (2016); Oliveira (2018); Abbaspour et al. (2019); Menezes et al. (2019). A adição de fibras rígidas com alto módulo de elasticidade, como a PET, tende a ser retiradas da matriz, resultando numa ruptura de comportamento menos dúctil (Consoli et al., 2002);

- Permeabilidade: De modo geral, a incorporação de fibras resulta em um aumento na permeabilidade do compósito, pois as fibras criam vazios e caminhos preferenciais para o fluxo, aumentando, assim, a condutividade hidráulica do compósito, Feuerharmel (2000); Curcio (2008); Aguilar (2015); Costa (2015); Oliveira (2018). Em trabalhos como os de Conceição (2021) e Pinto (2021) em que os compósitos desenvolvidos foram preparados com índice de vazios constante, a permeabilidade tende a não variar de forma significativa;
- Comportamento volumétrico no cisalhamento: Existem relatos divergentes na literatura em relação ao comportamento volumétrico de solos reforçados com fibras. Autores como Aguilar (2015), Bernardina (2019) e Conceição (2021), que estudaram areias reforçadas por meio de ensaios triaxiais, não encontraram nenhuma relação significativa entre o comportamento volumétrico do solo com e sem reforço. Por outro lado, Michalowski & Cermák (2003) relataram que a adição de fibras atenuou a dilatância de areias reforçadas com fibras de aço, especialmente para baixos valores de tensão confinante.

Além das alterações no solo acima mencionadas, existem outros aspectos que podem ser afetados pela inclusão de fibras no solo reforçado. Por exemplo, a sucção, a resistência à fadiga, Índice de Suporte Califórnia, entre outros. No entanto, assim como os demais comportamentos, é importante considerar que as mudanças observadas no comportamento do solo reforçado com fibras são altamente dependentes dos materiais utilizados e suas interações, sendo necessário avaliar cuidadosamente as características do solo e das fibras a serem empregados em cada aplicação específica.

2.3.2. INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS FATORES DAS FIBRAS NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS REFORÇADOS

Como descrito anteriormente, alguns fatores são preponderantes no que se refere ao reforço de solos com fibras. Eles foram baseados em conclusões de estudos de vários pesquisadores sobre a influência dos principais parâmetros como: teor de reforço, orientação, distribuição, comprimento, módulo de elasticidade, resistência e mecanismos de adesão no comportamento

de solos reforçados com fibras. No entanto, Bolaños (2013) ressalta que deve ser levado em consideração a natureza das diferentes fibras e matrizes empregadas nos diversos trabalhos, conforme será mostrado a seguir.

Sabe-se que um alto teor de fibras confere maior resistência ao compósito, afinal, provoca um aumento na capacidade de absorção de energia de deformação. Bem como diminui a dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura (Casagrande, 2005). É importante observar que, segundo os estudos de Gray & Ohashi (1983), há um crescimento da resistência ao cisalhamento do solo com o aumento do teor de fibra empregada, porém até um determinado ponto. Existe, portanto, um teor limitante ao qual a resistência ao cisalhamento começa a decrescer. Esse limite é uma característica dependente de matriz e do tipo de fibra do compósito estudado. Em síntese, haverá um teor ótimo de fibra que confere a melhor resistência, diminuindo o índice de fragilidade do solo e aumentando seu potencial de absorção de energia (Gray & Ohashi, 1983; Consoli et al., 2007a; Bolaños, 2013; Bernadina, 2019).

Com relação à orientação das fibras, Gray & Ohashi (1983), avaliaram o comportamento da inclinação delas em uma areia reforçada em ensaios de cisalhamento direto. Os autores constataram que a inclinação da fibra exerce influência significativa na resistência do compósito. Foi observado que as que estavam inclinadas a 60° em relação ao plano de ruptura representaram a maior contribuição em termos de resistência e as de inclinação de 120° representam a redução da resistência ao cisalhamento. Johnston (1994) reafirma que a orientação de uma fibra em relação ao plano de ruptura implica na forma que esta tem de contribuir com a transferência de carga. Uma fibra paralela ao plano de ruptura não oferece efeito, em contrapartida, uma fibra posicionada de forma perpendicular a este plano contribuiu com a sua capacidade de resistência à tração.

Quanto à distribuição das fibras, duas formas são representadas na Figura 2.3 e nos estudos mostram que quando são distribuídas aleatoriamente, mantém a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade. O emprego de fibras discretas aleatoriamente distribuídas possui duas grandes vantagens em relação aos solos reforçados com inclusões orientadas, contínuas ou não: minimiza o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induz planos preferenciais de (Peter et al., 2016; Yixian et al., 2016; Menezes et al., 2019; Reis, 2022).

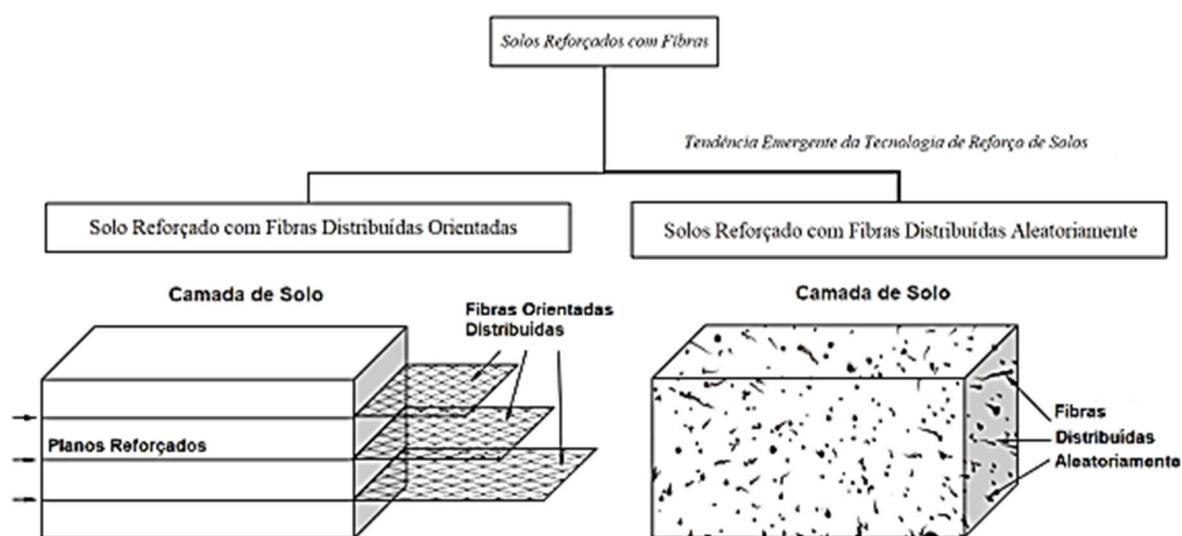


Figura 2.3 – Formas de distribuição de fibras em solo (REIS, 2022).

Além disso, Tang et al. (2016) ressalta a simplicidade de incorporação de fibras aleatoriamente distribuídas na matriz, podendo ser acrescentadas da mesma forma que o cimento, a cal e outros aditivos estabilizantes, o que facilita a empregabilidade da metodologia na engenharia geotécnica.

O comprimento da fibra é um fator que influencia no ganho de resistência. Quanto maior o comprimento da fibra maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (Gray & Ohashi, 1983; Vendruscolo, 2003; Casagrande, 2005, Silveira, 2018). Existe um determinado comprimento ótimo de fibra, que confere a maior resistência ao compósito. Wei et al. (2018) destacaram que o comprimento ótimo de fibras é de cerca de 30 - 40% do diâmetro da amostra.

Para Casagrande (2005), o aumento da resistência relacionado ao aumento do comprimento da fibra acontece pelo fato das fibras de maiores comprimentos apresentarem uma ancoragem maior dentro da amostra. Nesse mesmo estudo, em ensaios de cisalhamento *ring shear*, que admite maiores deformações, independentemente do comprimento inicial do reforço, as fibras sofrem grandes deformações plásticas. Na pesquisa desenvolvida por Yixian et al. (2016), foram realizados ensaios triaxiais CU com amostras de 40 mm x 80 mm, em que afirmam que fibras com comprimentos de cerca de 12 mm podem reforçar o solo por meio das interações das fibras, enquanto comprimentos maiores que estes levam a uma certa aglomeração e dobras nas fibras, reduzindo a uniformidade da fibra distribuída no compósito.

Maher & Ho (1994), concluíram que fibras mais curtas são mais numerosas dentro de uma matriz para um mesmo teor de fibras. Dessa maneira, é mais provável de elas estarem presentes na superfície de ruptura, colaborando no aumento da resistência. Contudo, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas com maior facilidade, o que torna claro a importância de fibras mais longas quando se pretende melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia.

Segundo Shewbridge & Sitar (1990) quanto maior o módulo de elasticidade da fibra maior a probabilidade de haver o arrancamento desta. Enquanto fibras com módulo baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis, não contribuem para o aumento da resistência mecânica (Gray & Ohashi, 1983; Specht, 2000). O comportamento tensão x deformação do solo reforçado depende fundamentalmente das características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço.

McGown et al. (1978) propuseram a divisão do reforço de solos baseada na deformabilidade do reforço em inclusões extensíveis e não-extensíveis. Sendo assim, tem-se que o elemento de reforço extensível tem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração do solo sem reforço. Dessa forma, a função principal é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós pico, além do acréscimo de resistência mecânica. Quanto ao elemento de reforço não extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, conferindo ganho de resistência mecânica, no entanto, se o reforço romper, rupturas indesejáveis podem suceder.

A resistência das fibras também é um fator crucial, o aumento da resistência das fibras aumenta a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz. A resistência necessária para o reforço atender às aplicações dependerá do teor de fibras incorporado e das condições de aderência entre matriz e fibra (Casagrande, 2005).

Por fim, as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz (Casagrande, 2005). As fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que sua resistência à tração seja mobilizada (Taylor, 2013).

Salienta-se que há diversos outros fatores que podem contribuir significativamente no comportamento das fibras em um compósito. Como por exemplo, Lirer et al. (2012), em seu estudo observou o comportamento de uma areia com pedregulho misturada com fibras de polipropileno e concluiu que a adição das fibras ao material apresenta maior influência em baixas tensões confinantes. Casagrande (2005) também concluiu que as fibras agem mais efetivamente sob tensões efetivas médias iniciais mais baixas. Havendo, por conseguinte, uma tensão de confinamento crítica, onde, com valores inferiores a esta, os elementos de reforço são arrancados e acima disto, são alongados (Teodoro, 1999; Heineck, 2002).

2.4. FIBRAS VEGETAIS

São variados os tipos de fibras que permitem ser empregadas na técnica de reforço de solo, podendo ser de origem natural ou sintéticas (artificiais), conforme sintetizado no esquema da Figura 2.4. As fibras naturais dividem-se em fibras de origem vegetal (fibras de caules, folhas, talos e frutos), origem mineral (amianto, wollastonita) e de origem animal (fibras de pelo, seda). Se tratando especificamente das fibras vegetais, sabe-se que elas foram as primeiras fibras empregadas na história da humanidade.

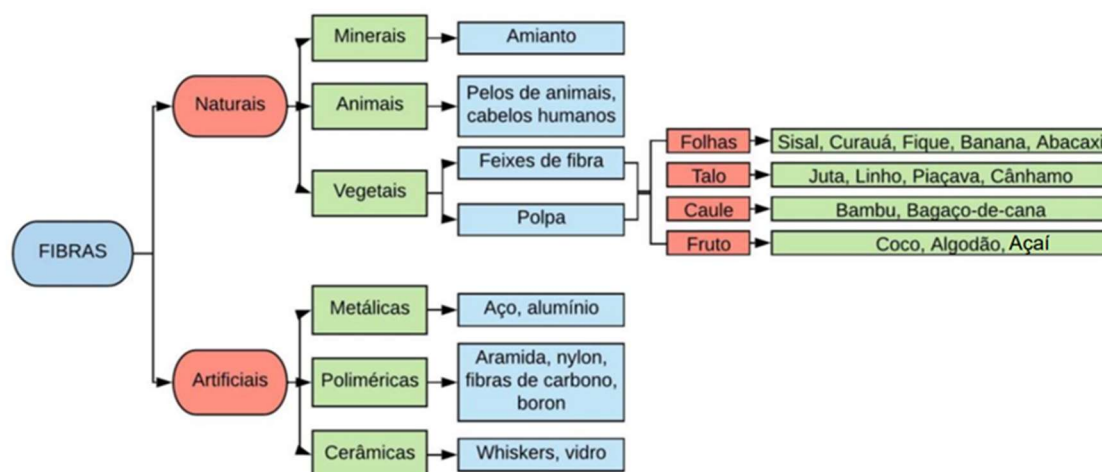


Figura 2.4 – Classificação das fibras (Adaptado de Santiago, 2011).

Segundo Santiago (2011), dentre as fibras vegetais, as provenientes das folhas são as que despertam um maior interesse como reforço de solo, apesar de fibras da semente, do fruto e do caule também possam ser utilizadas. As fibras do talo e frutos são mais finas e referenciadas como fibras “macias”, sendo mais adequada para fins têxteis, enquanto as fibras da folha e do

caule são mais grossas e referenciadas como fibras “duras”. Neste estudo, foram utilizadas duas fibras oriundas do fruto (coco e açai) e uma do caule (bambu).

As principais vantagens das fibras vegetais, de acordo com Bernardina (2019) são: baixa massa específica, maciez a abrasividade reduzida, baixo custo, reciclável, não tóxica e biodegradável, estimula empregos na zona rural, demanda baixo consumo de energia em sua produção. Como desvantagem, essa autora citou a acentuada variabilidade em suas propriedades mecânicas, sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade), a presença de seções transversais de geometria complexa e não uniforme, possui propriedades mecânicas modestas quando comparadas com fibras sintéticas.

As fibras vegetais são compostas por numerosas fibras naturais individuais, chamadas de fibrocélulas, unidas pelas lamelas médias. Cada fibrocélula, esquematizada na Figura 2.5, é composta por quatro partes principais: a parede primária, a parede secundária, a parede terciária e o lúmen (Silva et al., 2010; Alves Fidelis et al., 2013; Ferreira et al., 2017). O lúmen é a parte viva da célula que proporciona a flexibilidade da fibra, pela baixa massa específica aparente e elevada absorção de água (Tolêdo Filho, 1997).

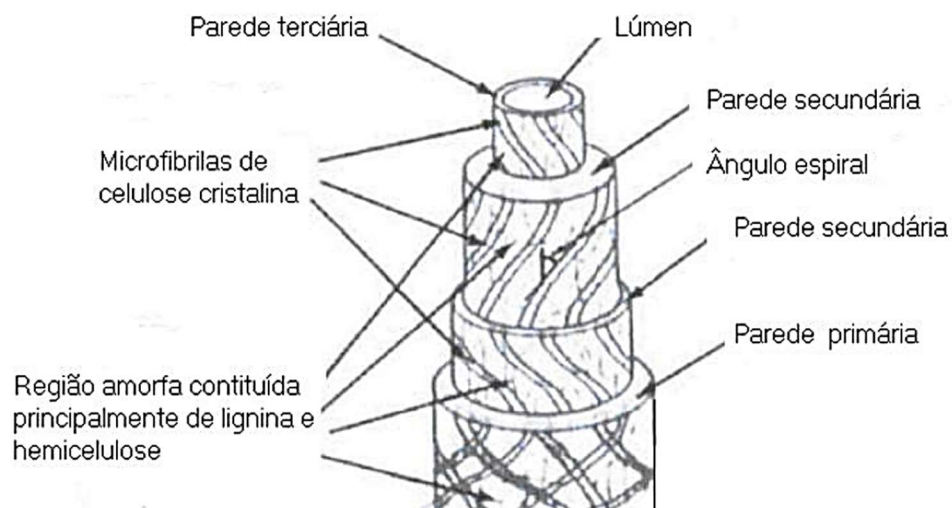


Figura 2.5 – Ilustração esquemática de uma fibrocélula (Adaptado de Silva et al., 2010).

As paredes celulares são responsáveis por definir o tamanho e a forma da célula, conferir resistência mecânica e proteção contra o ataque de predadores e patógenos, promover adesão entre as células, controlar o nível de umidade e ainda pode funcionar como reserva de nutrientes (Buckeridge et al., 2011). Essas paredes são constituídas por microfibrilas unidas por uma

matriz dos polímeros orgânicos de lignina e hemicelulose e apresentam diferentes orientações em cada parede celular. As microfibrilas possuem diâmetro de cerca de 10 – 30 nm e são constituídas por 30 – 100 moléculas de celulose (John & Anandjiwala, 2008; Thomas et al., 2011; Dittenber & Gangarao, 2012). O ângulo microfibrilar, ou ângulo médio, formado entre as microfibrilas e o eixo da fibra varia de uma fibra para outra e pode ser o responsável por propriedades mecânicas das fibras (Defoirdt et al., 2010).

Embora apresentem basicamente a mesma estrutura celular (paredes celulares, lamela média e lúmens), as fibras vegetais se diferenciam uma das outras por aspectos físicos como a área transversal total, densidade, diâmetro, o número de fibrocélulas e espessura das paredes celulares, quantidade e área de lúmens, composição química. Esses fatores afetam a resistência mecânica das fibras (Fidelis et al., 2013).

A composição química das fibras vegetais, mostrada na Figura 2.6, é definida principalmente por compostos naturais de celulose, lignina, hemicelulose e pectina. Sendo os três primeiros responsáveis pelas propriedades físicas das fibras e os encontrados em maior abundância. Essas fibras são chamadas também de fibras celulósicas ou lignocelulósicas. A quantidade desses componentes depende da idade da fibra, origem, cultivo, condições de extração, solo e clima da região, fatores ambientais, entre outros (Perissoto, 2005).

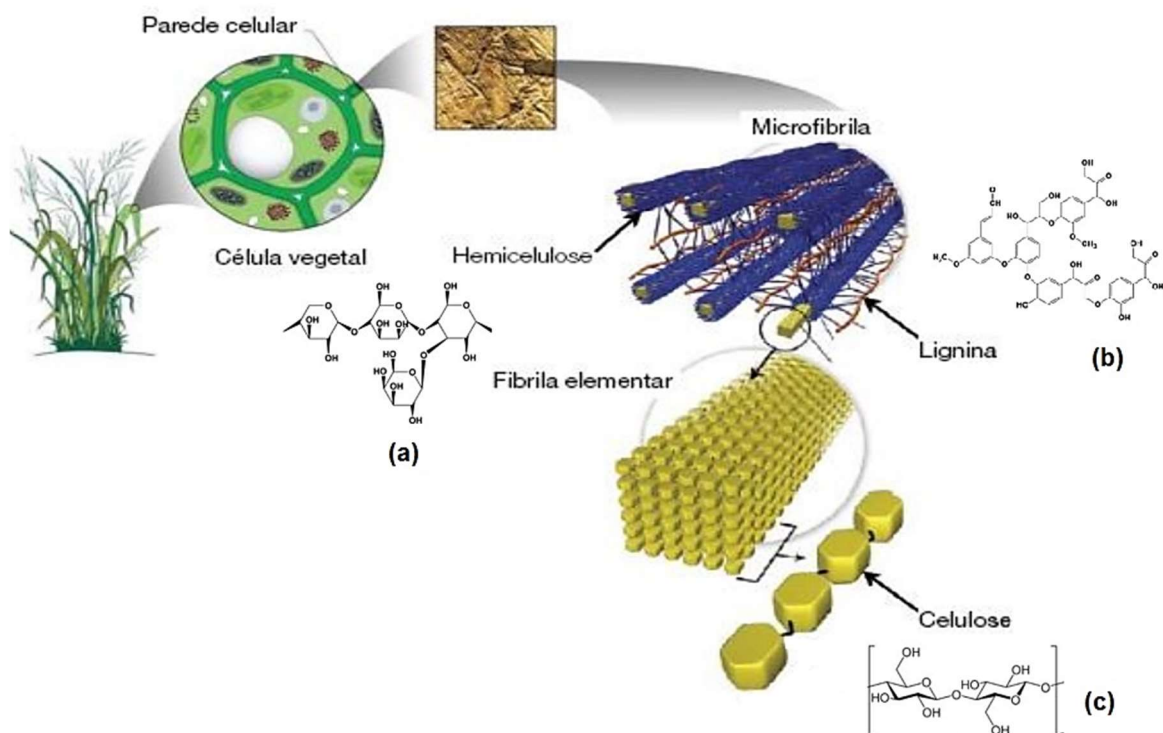


Figura 2.6 – Composição química das fibras vegetais (a) Hemicelulose; (b) Lignina; (c) Celulose (Adaptado de Canilha et al., 2010)

Aprimorando mais sobre a celulose, sabe-se que ela é um biopolímero e o principal polissacarídeo linear presente nessas fibras, com alto peso molecular, formado por moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio ($C_6H_{10}O_5$). De acordo com Araújo (2008), em função das ligações de hidrogênio há uma forte tendência de a celulose formar cristais que a tornam completamente insolúvel em água e na maioria dos solventes orgânicos. Esse índice de cristalinidade (IC) da celulose varia de acordo com sua origem e processamento, por exemplo, a celulose de algodão possui cadeias mais ordenadas, então, apresenta um IC de aproximadamente 70%, já a celulose de árvores apresenta um IC de cerca de 40%. Esse polissacarídeo fornece maior resistência mecânica e rigidez, bem como, juntamente com a hemicelulose, tem influência direta na capacidade de absorção da planta (Zakikhani et al., 2014). Entretanto, é importante que outros fatores, além do teor de celulose, sejam avaliados, como o tipo de celulose, sua geometria celular e o uso da fibra, pois influenciam no comportamento mecânico (Passos, 2005).

A lignina é um polímero complexo de estrutura amorfa, menos polar que a celulose e que atua como adesivo químico. Conforme Tolêdo Filho (1997), ela proporciona resistência à compressão ao tecido celular e as fibras, tornando a parede celular mais rígida. A função

principal da lignina é agir como barreira à degradação causada por microorganismos, juntamente com a hemicelulose (Passos, 2005).

A hemicelulose é um polímero composto por vários monossacarídeos polimerizados, caracterizado pela ausência de cristalinidade, baixa massa molecular e higroscopicidade, que contribuem para a mobilidade interna, grande capacidade de absorção de água, aumento da flexibilidade e da área superficial disponível para interações (Bernardina, 2019). No entanto, tem pouca contribuição na resistência mecânica das fibras. A depender da espécie vegetal, estes açúcares podem se associar com a celulose ou lignina (Passos, 2005; Bolaños, 2013). Segundo Martins (2014) a alta capacidade de absorção de água de uma fibra vegetal também pode ser proveniente da sua estrutura porosa.

Por fim, conforme Tolêdo Filho (1997), a pectina está presente na região de união entre células adjacentes, tornando as paredes celulares mais hidratadas e, sendo assim, mais plásticas. A pectina e a lignina, por serem polímeros mais fracos que a celulose, devem ser removidos quando as fibras são utilizadas como reforço em compósitos. A maior parte da pectina é retirada quando os feixes são separados do caule pelo processo de maceração (imersão) e espadelagem (Dittenber & Gangarao, 2012). Lignina, hemicelulose e pectina em conjunto funcionam semelhante a um adesivo que liga a estrutura celulósica da fibra natural (Zainudin et al., 2018).

A Tabela 2-1 mostra a composição química de algumas fibras vegetais, bem como parte do local de origem na planta. Pode-se observar, então, que a fibra de coco tem um alto teor de lignina, de 2 a 4 vezes superior à de sisal e juta, o que está diretamente relacionado ao seu potencial de degradação. Visto que, conforme Silveira (2018), o principal fator que deve ser levado em consideração para determinar a taxa de degradação da fibra é o teor de lignina, que além de resistir à degradação, ainda diminui a degradação dos outros componentes celulares.

Tabela 2-1 – Origem e composição química de algumas fibras vegetais. (Adaptado de Gehlen, 2014).

| Fibra | Origem | Celulose (%) | Hemicelulose (%) | Lignina (%) | Pectina (%) | Cinzas (%) |
|--------------|---------------|---------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Abacaxi | Folhas | 80 – 83 | - | 12 | 0,9 – 1,5 | 0,1 – 1 |
| Algodão | Frutos | 82,7 | 5,7 | - | 5,7 | - |
| Açaí | Frutos | 26,1 – 28,9 | 12,3 – 15,5 | 37,9 – 40,3 | - | 1,6 – 2,1 |
| Bambu | Caule | 33 – 45 | 30 | 20 – 25 | - | - |
| Banana | Folhas | 60 – 65 | 6 – 8 | 5 – 10 | 1,5 – 2,5 | 1,2 |
| Cânhamo | Talo | 70 – 74 | 15 – 20 | 3,5 – 5,7 | 0,8 | 0,8 |
| Coco | Frutos | 43,4 – 53 | 14,7 | 38,3 – 40,77 | 4 | - |
| Curauá | Folhas | 70,7 – 73,6 | 21,1 | 7,5 – 11,1 | 10 - 15 | 0,79 – 0,9 |
| Juta | Caule | 60 | 22,1 | 15,9 | 0,2 | 1 |
| Sisal | Folhas | 60 – 75,2 | 10 – 15 | 7,6 – 7,98 | 0,8 | - |

As fibras vegetais podem ser aplicadas em diversas áreas, inclusive em compósitos para fins da construção civil. Afinal, é um setor que tem solicitado novos materiais que sejam ecológicos e vantajosos em termos de desempenho. Entretanto, esse tipo de fibra pode sofrer ações de fungos e micro-organismos, sendo, portanto, a durabilidade uma questão expressiva no comportamento do compósito fibroso, e deve ser abordada em pesquisas.

2.4.1. SERRAGEM DE BAMBU

Para Judziewicz (1999) o Brasil é o país com maior diversidade de espécies de bambu no mundo, sendo que uma das maiores reservas de bambu nativo está no sudoeste da Amazônia, chegando a uma área de 180.000km². A planta do bambu, mostrada na Figura 2.7(a), pertencente à família Poaceae, com elevada taxa de crescimento e presente naturalmente em regiões de clima tropical e subtropical, sendo mais comumente encontrado na Ásia e na América Latina, conforme mostra mapa de localização do cultivo do bambu na Figura 2.7(b), (Marçal, 2008).

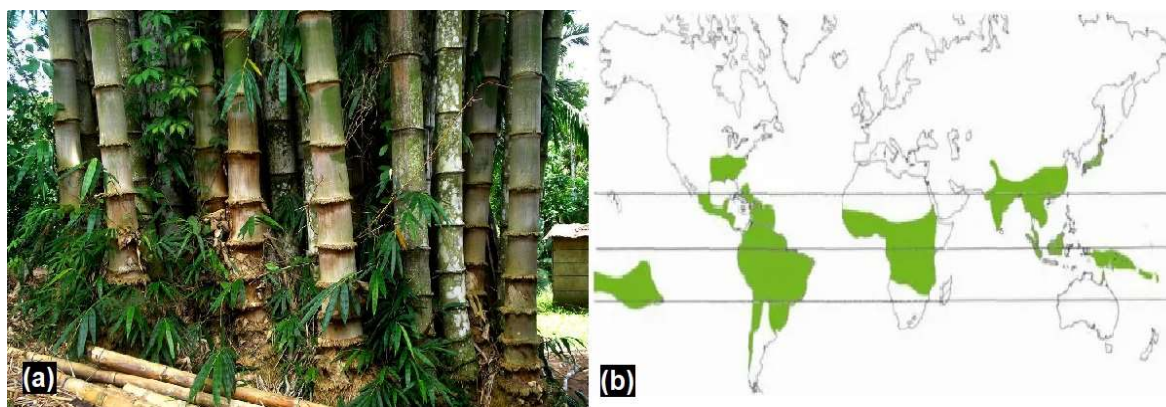


Figura 2.7 – (a) Bambu. (b) Localização do cultivo de bambu no mundo (Adaptado de Marçal, 2008).

No Brasil, são catalogadas mais de 200 espécies distintas de bambu. Dentre as espécies mais versáteis e aplicáveis à construção civil, destacam-se as seguintes: *Arundanaria*, *Bambusa*, *Cephalostachyum*, *Gigantochloa*, *Melocanna*, *Phyllostachys*, *Schizostachyum*, *Guaduae Chusquea*, *Dendrocalamus* (Correal, 2020).

Os tipos de bambu variam desde espécies de pequeno porte, com poucos centímetros de altura, até espécies consideradas gigantes, as quais atingem cerca de 30 m. Ele é formado por uma parte aérea e uma parte subterrânea, sendo a primeira constituída pelo colmo, galhos e folhas e a segunda constituída por rizomas e raízes. Conforme destaca Graça (1988), o bambu possui um grande potencial de crescimento podendo chegar a 40 cm/dia, no caso do *Dendrocalamus asper*. Ele é caracterizado por ter um formato cilíndrico e, na maioria dos gêneros, apresenta o interior vazio. Além disso, é formado por uma sequência alternada de entrenós (internódios) vazios e nós.

O tecido do colmo é composto, aproximadamente, por 50% de parênquima, 40% de fibras e 10% de tecidos condutores. Na camada interna da parede, a proporção de parênquima e vasos condutores é mais elevada, enquanto a camada externa é caracterizada principalmente pela presença de fibras. É importante destacar que a alta concentração de sílica presente na casca do colmo, embora aumente a resistência da estrutura, pode causar desgaste mais rápido em ferramentas de corte (Janssen, 2000).

Nesse contexto, o bambu se torna uma excelente alternativa de material construtivo, devido ao fato de ser um material de fácil renovação pela natureza, possuir baixo consumo energético para sua produção, assimilar gás carbônico, além de possuir um crescimento rápido e de baixo custo

(Teixeira, 2006). No entanto, segundo Ghavami et al. (2017), apenas recentemente essa espécie vegetal recebeu atenção merecida com a criação da Rede Brasileira do Bambu (RBB). Dessa maneira, em 2011, foi sancionada a lei que estabelece a política nacional de estímulo ao manejo sustentável e ao cultivo do bambu. Sendo assim, há algumas décadas, tem-se um esforço para divulgar as características agrônômicas e tecnológicas desse material natural de alto potencial. Como no Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), que vem desenvolvendo um programa de pesquisa utilizando o bambu, fibras vegetais, terra crua e solo-fibra, na produção de novos elementos estruturais para a construção civil.

Dentre as possibilidades de aplicação do bambu processado, o bambu laminado colado (BLaC) é o que apresenta maior potencial, em função da sua solidez e versatilidade. O BLaC pode ser comparado com produtos obtidos a partir de madeira, como por exemplo, vigas, treliças, laminados colados e folheados. Para a obtenção do BLaC são usadas diversas camadas de lâminas de bambu, coladas de forma que as fibras fiquem dispostas paralelamente ou direcionadas no mesmo sentido formando a placa, BLaC curvo (López, 2003).

Conforme relata Alves et al. (2015), durante o processo de produção das placas de BLaC gera um grande volume de aparas, sobras, serragens e resíduos são gerados e descartados conforme mostrado na Figura 2.8. Esse material de descarte corresponde a aproximadamente 40% de toda a massa vegetal da matéria-prima processada. Alguns pesquisadores buscam soluções para o aproveitamento do resíduo de bambu resultante da produção das lâminas para as placas de BLaC, além de outros processos que utilizam como matéria prima o bambu (Santos, 2018; Martins, 2021).



Figura 2.8 – Descarte de resíduos de BLaC.

O volume gerado em aparas e serragem durante o corte do colmo de bambu para a produção de ripas é bastante considerável, cerca de 72,46% (Almeida et al., 2015). Essa quantidade de resíduo é um dado importante a ser mitigado, a fim de tornar cada vez mais eficiente o sistema de produção de material laminado colado e gerar menor impacto ambiental.

A serragem de bambu é composta, principalmente, por um conjunto de fibras com propriedades físicas, químicas e mecânicas notáveis que oferecem um enorme potencial de aproveitamento. Essas fibras são extremamente resistentes e duráveis, afinal, possuem uma quantidade significativa de lignina, o que as torna ideais para uma ampla gama de aplicações. As propriedades das fibras de bambu podem ser compreendidas ao se analisar a Tabela 2-2 que mostra algumas propriedades físicas e a Tabela 2-3 onde são apresentadas as propriedades químicas do bambu.

Tabela 2-2 – Propriedades físicas do bambu.

| Referência | Massa Específica (ρ) (g/cm³) | Diâmetro (mm) |
|------------------------|--|--------------------------|
| Anokye et al. (2016) | 0,40 – 0,90 | - |
| Bazzetto et al. (2019) | 0,58 | 0,20 – 0,5 |

Tabela 2-3 – Propriedades químicas do bambu.

| Referência | Celulose (%) | Hemicelulose (%) | Lignina (%) | Umidade (%) |
|----------------------|--------------|------------------|-------------|-------------|
| Anokye et al. (2016) | 55 | 20 | 25 | - |
| Widyorini (2016) | 43,41 | 29,58 | 24,00 | 6,9 |
| Oliveira (2021) | 70,91 | 64,95 | 15,10 | 9,78 |

2.4.2. FIBRAS DE COCO

O coqueiro, Figura 2.9(a), é uma planta que pertence à família *Arecaceae*, do gênero *Euterpe*, espécie *Nucifera L.* Por se tratar de uma planta tropical, é originária principalmente de países da África, América Latina e Sul da Ásia. Por tanto, em virtude desta dispersão continental e adaptabilidade, seu cultivo e sua utilização se dão de forma expressiva em todo o mundo, com os mais variados produtos, tanto de forma in natura quanto industrializada.

Segundo a Produção Agrícola Municipal, (IBGE, 2022), o cultivo do coqueiro no Brasil ocupa uma área de aproximadamente de 187.497 hectares, sendo que aproximadamente 80% estão concentradas ao longo da faixa litorânea do Nordeste, conforme pode-se observar a proporção da produção na Figura 2.9(b).

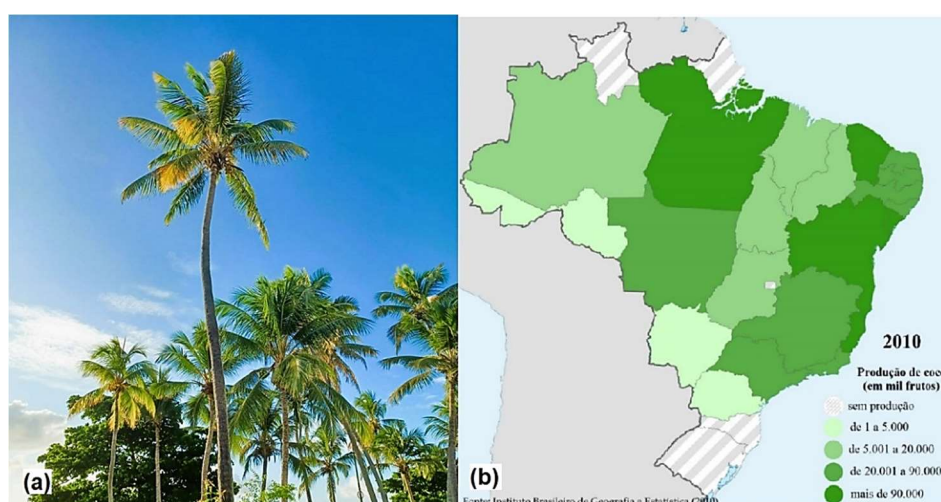


Figura 2.9 – (a) Coqueiro. (b) Localização da produção de coco no Brasil.

Existem duas variedades de palmeira de coco: a normal, que pode atingir 30 m, e a anã, que não ultrapassa 3 m. Apesar das diferenças, as características são as mesmas (Aguilar, 2015). O

tronco é cilíndrico e carrega no topo um tufo de folhas arqueadas com 3 a 6 m de comprimento, divididas em folíolos. Os frutos dão origem sob as folhas. Cabe ressaltar a importância da distribuição das chuvas durante o ano para o cultivo dessa planta, uma vez que o coqueiro exige uma precipitação média de 130 mm/mês para obter bom desenvolvimento (Passos et al., 2018).

Silva et al. (2017) aponta que por conta do baixo custo, abundância e disponibilidade, o coco verde tem uma maior aceitação para comercialização, sendo o consumo da água de coco crescente e significativo no Brasil. Segundo dados da FAO (2019), a produção saiu de 477 mil para 2,65 milhões de toneladas de 1990 a 2016. Toda essa produção gerou uma quantidade em próxima de 2,5 milhões de quilos de resíduos. Calcula-se que em torno de 80% dos resíduos presentes nas praias brasileiras sejam de cascas de coco verde (Lacerda & Leitão, 2021).

O problema é que o volume é jogado na areia ou na água, o que pode levar à acumulação de resíduos de coco nas praias, como ilustrado na Figura 2.10. E, por consequência, pode levar a uma série de problemas, como a contaminação da água e do solo, a proliferação de mosquitos e outras pragas, além de prejudicar a aparência da praia e comprometer a experiência dos turistas e moradores locais.



Figura 2.10 – Descarte negligente de resíduo de coco (Fenacoco, 2013).

Conforme relata Cabral et al. (2017), após o consumo da água de coco, a casca configura-se como um subproduto, sendo esta equivalente a 85% da massa do fruto do coqueiro. Ainda segundo os autores, somente 10% é reaproveitado pela indústria no processamento do coco,

então as fibras da casca (Figura 2.11) são rejeitadas sem o devido beneficiamento e seu potencial de reaproveitamento ainda deve ser mais explorado.



Figura 2.11 – Fibras da casca do coco.

As fibras de coco podem ser usadas como reforço de solo, embora sejam biodegradáveis. Sotomayor & Casagrande (2018), em seu estudo mostra a eficiência dessas fibras em conferir maior resistência ao solo e redução de recalques. Isso é particularmente útil em áreas onde o solo é instável ou sujeito a erosão, como em encostas íngremes ou margens de rios. Essas fibras possuem alta durabilidade e resistência, que varia dependendo do comprimento da fibra, diâmetro e grau do defeito (Singh & Bagra, 2007). O alto teor de lignina e o baixo teor de celulose faz com que a degradação da fibra de coco seja mais lenta que a de outras fibras vegetais (Hejazi et al., 2012). A seguir na Tabela 2-4 é apresentada algumas propriedades físicas das fibras de coco, a Tabela 2-5 mostra as propriedades químicas e a Tabela 2-6 as propriedades mecânicas das fibras de coco.

Tabela 2-4 – Propriedades físicas das fibras de coco.

| Referência | Massa Específica (ρ) (g/cm ³) | Área da Seção Transversal (mm ²) | Diâmetro (mm) |
|------------------------|---|---|------------------|
| Tomczak (2011) | 1,15 | 0,023 | 0,1 – 0,23 |
| Oliveira et al. (2018) | 1,27 | - | 0,25 |

Tabela 2-5 – Propriedades químicas das fibras de coco.

| Referência | Celulose (%) | Hemicelulose (%) | Lignina (%) |
|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| Tolêdo Filho (1997) | 37 | 9 | 42 |
| Tomczak (2011) | 43,4 – 53 | 14,7 | 38 - 40 |

Tabela 2-6 – Propriedades mecânicas das fibras de coco.

| Referência | Módulo de Elasticidade (GPa) | Tração (MPa) | Alongamento (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Tomczak (2011) | 3,0 | - | 30 |
| Anggraini et al. (2016) | - | 60 - 90 | 30 |
| Bernardina (2019) | 1,62 | 151 | 45 |

2.4.3. FIBRAS DE AÇAÍ

O açaizeiro, planta apresentada na Figura 2.12(a), pertence à família Arecaceae, do gênero Euterpe e as espécies mais representativas no Brasil são a Precatoria e a Oleracea, típicas da Amazônia, que ocorrem espontaneamente em toda região do norte da América do Sul (Mesquita, 2013). Se tratando especialmente da espécie Euterpe Oleracea, estudada na presente pesquisa, pode-se encontrar as maiores concentrações naturais nas várzeas estuarinas no estado do Pará, mas também nos estados do Amapá, Maranhão, Mato Grosso, Tocantins, além das Guianas, Venezuela, Suriname, Colômbia, Panamá, Equador e Trinidad, conforme mostrado na Figura 2.12(b).

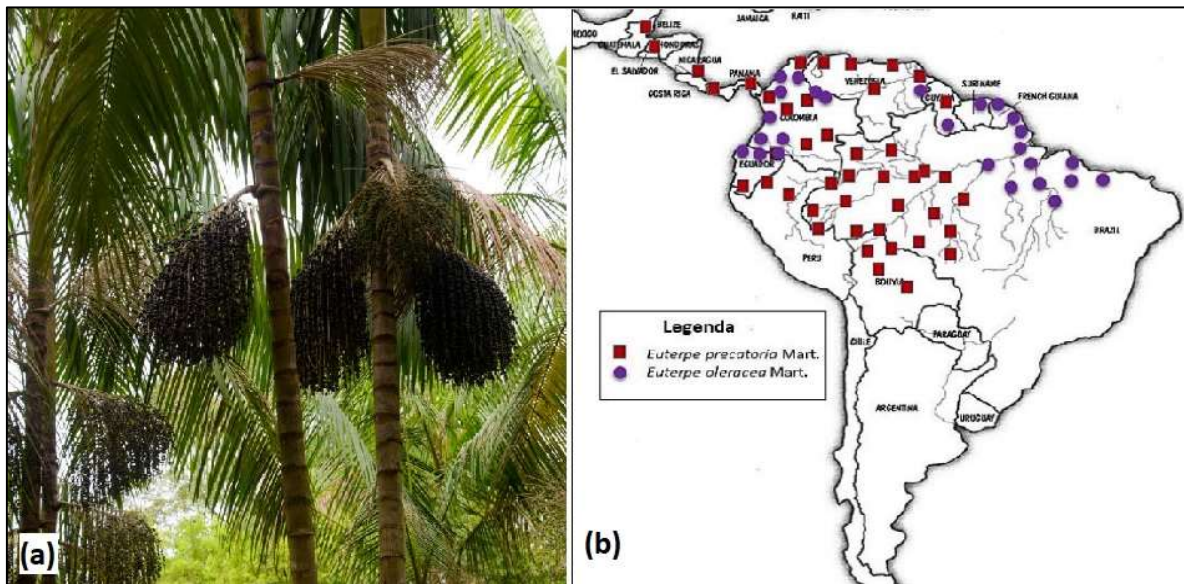


Figura 2.12 – (a) Açazeiro. (b) Localização do plantio de açazeiro (Adaptado de Mesquita, 2013).

Segundo a Embrapa (2022), essa espécie tem predominância de caules cespitosos, cerca de 3 a 20 m de altura e diâmetro de 7 a 18 cm, eretos ou inclinados, sendo raramente solitária. Desenvolve-se e se dispersa ao longo de rios e igarapés de solos heteromórficos, sendo bem adaptadas as condições de inundação, principalmente na várzea alta e de terra firme com boa drenagem, distribuição pluviométrica e matéria orgânica, possibilitando proteção permanente do solo.

A fruta do açazeiro é tradicionalmente consumida pelos nortistas do Brasil, e com o passar dos anos, vem se popularizando por todo o país. Como, por exemplo, em São Paulo, a procura pela polpa do açaí, mostrada na Figura 2.13(a), atinge cerca de 150 ton por mês, e no Rio de Janeiro em torno de 500 ton mensais são consumidas (Mesquita, 2013). De acordo com dados do IBGE (2013) a produção nacional de açaí extrativo atingiu 202.216 toneladas em 2013, sendo o Pará o maior estado produtor, com 98,3% do total nacional. Já segundo a última estimativa do IBGE (2023), a produção de açaí manteve-se praticamente estável, com 227.251 ton no ano de 2021.

No entanto, após a utilização do item mais consumido que é a polpa, enormes volumes de resíduos sólidos em forma de fibra e semente é gerado e descartado negligentemente a exemplo da Figura 2.13(b). O resíduo gerado pelo açaí é considerado um problema ecológico que traz transtorno para população, uma vez que ele traz impactos ambientais como: poluição visual onde os resíduos são deixados em locais que visem prejudicar a saúde visual das pessoas; lixeiras viciadas (resíduos lançados em ruas ou caçadas, que podem causar acidentes), descarte

em rios ou lixões, desperdiçando seu valor econômico que ao ser atribuído no produto poderia ser aproveitado.



Figura 2.13 – (a) Polpa do açai – parte aproveitada pela indústria alimentícia. (b) Descarte inadequado de resíduo de açai. (Mesquita, 2013)

Conforme Reis et al. (2002), devido ao amplo consumo da fruta, muitas pesquisas foram realizadas sobre a polpa, mas, em comparativo, tem-se um baixo número de pesquisas em relação ao resíduo fibroso que se concentra ao redor do caroço após a extração da polpa. Mesmo sabendo que, de acordo com Lopes (2019), o caroço e a fibra, representados na Figura 2.14, correspondentes ao endocarpo do açai, representando 73,46% do peso da fruta. Sendo assim, considerando que a produção anual no Brasil ultrapassa as 220 mil toneladas, tem-se o total de 161 mil toneladas de resíduos.



Figura 2.14 – Caroço e fibras de açaí.

Algumas pesquisas foram realizadas com o intuito de destinar o aproveitamento desse resíduo para aplicações como artesanato, fabricação de papéis, produção de adubo, extração de oxidante, substrato enzimático e geração de energia. Por exemplo, existem pesquisas que estudam o uso da fibra do açaí para fabricação de eco painéis que podem ser aplicados para isolamento acústico (Mesquita, 2013). Porém, apenas recentemente, estudos começaram a ser desenvolvidos direcionando às fibras de açaí em materiais compósitos. Deste modo, geram-se perspectivas para o emprego das fibras de açaí no desenvolvimento de novos materiais (Lopes, 2019; Azevedo et al., 2021b; Santos et al., 2022).

Essas fibras, classificadas como fibras lignocelulósicas, apresentam as seguintes vantagens: baixa massa específica, maciez, abrasividade reduzida, não toxicidade, biodegradabilidade, baixo custo e consumo de energia na produção, baixa condutividade térmica e bom isolamento térmico e acústico (Santos et al., 2017). Sendo assim, apresentam-se a seguir valores, disponíveis na literatura, para as propriedades físicas (Tabela 2-7) e químicas (Tabela 2-8) das fibras de açaí.

Tabela 2-7 – Propriedades físicas das fibras de açaí.

| Referência | Massa Específica (g/cm ³) | Área da Seção (mm ²) | Diâmetro (mm) | Comprimento (mm) |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------|------------------|
| Lima Junior (2007) | 1,11 | 0,002 | 0,130 | 18,41 |
| Gehlen (2014) | 0,74 | - | 0,104 | 15,32 |

Tabela 2-8 – Propriedades químicas das fibras de açaí.

| Referência | Celulose (%) | Hemicelulose (%) | Lignina (%) |
|-----------------------|--------------|------------------|-------------|
| Gehlen (2014) | 2,6,1 – 28,9 | 12,3 – 15,5 | 37,9 – 40,3 |
| Azevedo et al. (2021) | 46,43 | 17,21 | 31,12 |

Informações específicas sobre propriedades mecânicas, como resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação de ruptura das fibras de açaí ainda são bastante limitadas na literatura científica.

2.5. ESTUDOS EXPERIMENTAIS COM FIBRAS VEGETAIS

Diferentes tipos de fibras lignocelulósicas têm sido investigados como componentes de reforço para compostos. Nelas, é consenso que a adição destas fibras aumenta a resistência à compressão não confinada, a resistência ao cisalhamento, a tenacidade e a ductilidade, além de diminuir a máxima densidade seca.

No entanto, estudá-las de forma individualizada se faz necessário, afinal, são de origem natural, com alta variabilidade de propriedades químicas e físicas, além de que, a compatibilidade com a matriz do compósito deve ser levada em consideração. Sendo assim, essas informações e diversidades são cruciais para selecionar as fibras mais adequadas para uma aplicação específica e otimizar as condições de reforço. Abaixo a Tabela 2-9 mostra um resumo de alguns trabalhos com variadas fibras naturais utilizadas como reforço de solo.

Tabela 2-9 – Estudo de solos reforçados com fibras naturais.

| Referência | Tipo de Fibra | Tipo de Solo | Teor de Fibra (%) | Compr. (mm) | Principais resultados |
|------------------------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------|--|
| Carvalho & Casagrande (2019) | Curauá | Arenoso | 0,5 e 0,75 | 25 | Melhora de 150% no intercepto coesivo do solo e 11% de aumento no ângulo de atrito. |
| Bawadia et al. (2020) | Banana | Argiloso | 0,3; 0,5 e 1,0 | Variado | Teor ótimo de 1,0% para melhora nos parâmetros de resistência do solo. |
| Alqaissi et al. (2023) | Juta | Argiloso | 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 | 20 e 40 | Diminuição da máxima densidade seca em 5%; Aumento da resistência à compressão não confinada em até 4,26 vezes. |
| Kalkan et al. (2022) | Cânhamo | Argiloso | 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 | 5; 10 e 15 | Aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento; Redução do peso específico seco máximo. |
| Mohammed et al. (2022) | Sisal | Argiloso | 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 | 10; 15 e 20 | Aumento da resistência à compressão não confinada em até 2,24 vezes; O teor e o comprimento da fibra ideal são de 1,5% e 15mm. |

2.5.1. SERRAGEM DE BAMBU: ESTUDOS EXPERIMENTAIS

O bambu é utilizado como um elemento estrutural na construção civil devido às suas propriedades de alta resistência, durabilidade e baixo custo em comparação com outros materiais. No entanto, apesar de suas qualidades promissoras, ainda há estudos limitados sobre o seu potencial de uso em materiais compósitos na construção civil, especialmente em aplicações geotécnicas.

Porém, em um estudo realizado por Mustapha (2008), foi investigada a resistência à compressão não confinada e o módulo de rigidez de solo laterítico reforçado com até três placas de bambu

cortadas em formato de 34 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. Os resultados demonstraram uma diminuição na massa específica do solo de 1,638 mg/m³ para 1,470 mg/m³ e um aumento na resistência à compressão não confinada de 226 kN/m² para 621 kN/m². Além disso, houve um considerável aumento no módulo de rigidez à medida que o número de reforços em forma de placas de bambu foi aumentado.

Devi & Jempen (2016) estudaram o desempenho laboratorial do solo reforçado com bambu em suas diferentes formas e tamanhos. Na investigação foi observada a resistência ao cisalhamento em ensaios com solo não reforçado e reforçado com diferentes teores de fibra. O estudo revela o aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo com o aumento no teor de fibra até uma quantidade ótima de 4% em relação a massa de solo.

Mais tarde, Miranda et al. (2019) realizaram uma análise do comportamento mecânico de um solo mole compactado e reforçado com fibras aleatoriamente distribuídas na massa de solo em concentrações de 2,0%, 4,0% e 5,0%. As amostras de solo reforçado e não reforçado foram submetidas à ensaios de compactação e compressão simples. Foi observada uma redução na massa específica aparente seca máxima de 1,61 g/cm³ para 1,44 g/cm³, enquanto a resistência média à compressão simples aumentou de 1509,58 kN/m² para 2629,52 kN/m² no teor ótimo de fibras de 4,0%.

Também, Guedes et al. (2019) estudaram o uso do bambu na engenharia geotécnica, no entanto, em forma de geogrelhas naturais como reforço de solo arenoso. Para isso, foram conduzidos ensaios de prova de carga em equipamentos de grande porte, nos quais foram analisadas a inclusão de até três geogrelhas de bambu com dimensões de 100 cm x 100 cm e abertura de malha de aproximadamente 10 cm. Os resultados indicaram que o aumento do número de linhas de reforço melhorou a capacidade de carga do solo. Porém, o estudo também apontou que esse efeito pode ser prejudicado pela compactação do solo nas aberturas da geogrelha e pelo nível de tensões transferidas nas linhas inferiores de reforço. A estrutura que apresentou o melhor comportamento foi aquela com a inclusão de três geogrelhas de bambu, que permitiu um ganho na capacidade de carga de 270,1% em comparação com o solo natural.

2.5.2. FIBRAS DE COCO: ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Algumas pesquisas têm investigado o efeito do uso de fibras de coco como material de reforço de solo. Boland (2013) investigou, por meio de ensaios triaxiais isotropicamente drenados, o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com essas fibras. Foram executados ensaios em amostras com teores de fibra moída de 0,5% e 1,0%, nessas misturas as envoltórias de resistência apresentaram parâmetros de resistência similares ao do solo puro, tendo o teor de 0,5% um desempenho discretamente superior ao teor de 1,0%. Também foram ensaiados compósitos de solo com teores de fibra cortada de 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% e 1,5% em relação ao peso seco do solo. O autor constatou um aumento na resistência ao cisalhamento dos compósitos solo-fibra, por meio de um discreto aumento do ângulo de atrito e um expressivo aumento do intercepto coesivo, em relação ao solo puro. Dentre todos os teores testados, o teor mais alto (1,5%) foi o que apresentou os melhores resultados de resistência ao cisalhamento. Notou-se um aumento de 4° no ângulo de atrito nesse teor, e uma coesão de 188% maior em comparação com a amostra de solo puro.

O estudo de Sotomayor (2014) analisou a resposta de um solo arenoso reforçado com fibras de coco de 50 mm de comprimento e uma concentração de 0,5% em peso seco do solo, que foram distribuídas aleatoriamente. A avaliação foi realizada por meio de testes de placa para analisar o comportamento de carga-recalque. De acordo com o autor, foi possível observar que as amostras reforçadas com fibras apresentaram um aumento na resistência ao cisalhamento em comparação com a areia pura. Além disso, foi possível observar uma melhora na inibição da propagação de fissuras. Aguilar (2015) estudou o comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de coco nos teores de 0,25%, 0,5% e 0,75% em relação ao peso seco do solo e comprimentos de 25 mm e 50 mm, por meio de ensaios triaxiais isotropicamente drenados. Ele constatou um aumento na resistência ao cisalhamento em todos os compósitos, observando-se um relevante aumento no intercepto coesivo das misturas e um discreto aumento do ângulo de atrito, em relação aos resultados obtidos para a areia pura.

Já Carvalho & Casagrande (2019), em sua pesquisa, examinou o desempenho mecânico de compósitos formados por uma matriz de solo arenoso e fibras naturais de sisal, curauá e coco, variando os comprimentos e teores de fibras utilizados. As fibras foram dispostas de maneira aleatória na massa de solo e o comportamento tensão *versus* deslocamento foi avaliado por meio de ensaios de cisalhamento direto em amostras de dimensões 300 x 300 mm e 220 mm de

altura. Os ensaios foram realizados utilizando fibras de 25 e 50 mm de comprimento, em teores de 0,5 e 0,75% em relação ao peso seco do solo, com densidade relativa de 50% e 10% de umidade. Os resultados mostraram que a mistura contendo fibras de coco com comprimento de 50 mm e teor de 0,75% apresentou os melhores resultados, com um ganho de cerca de 50% em relação aos parâmetros de resistência do solo arenoso.

Recentemente, em um estudo realizado por Reis (2022), foi investigada a aplicação de material fibroso de coco como reforço para o solo areno-siltoso na Região Metropolitana de Salvador. Diferentemente de outros estudos, o comprimento das fibras não foi previamente definido e foram utilizados teores de 0,5%, 1,0% e 1,5% em relação ao peso do solo seco. Os resultados do Índice de Suporte Califórnia demonstraram um ganho significativo na propriedade quando as fibras foram adicionadas em teores de 1,0% e 1,5%, elevando essa propriedade para 57% e 56%, respectivamente. Além disso, por meio dos ensaios triaxiais, foi constatado que os compósitos estudados apresentaram aumento de resistência em relação ao solo sem reforço em todos os teores de fibras analisados. O solo sem reforço apresentou valores de $c' = 20$ kPa e $\phi' = 31^\circ$, enquanto o compósito com 1,0% de fibras apresentou resistência semelhante ao teor de 1,5% ($c' = 46$ kPa e $\phi' = 36^\circ$ e $c' = 42$ kPa e $\phi' = 38^\circ$, respectivamente). É importante destacar que as amostras reforçadas com 1,5% de fibras apresentaram uma grande dificuldade de homogeneização, devido ao grande volume de fibras, e a distribuição das fibras não foi tão homogênea quanto nos teores inferiores.

2.5.3. FIBRAS DE AÇAÍ: ESTUDOS EXPERIMENTAIS

As fibras de açaí, por sua vez, são pouco estudadas quando comparadas aos estudos existentes com a polpa do açaí. No entanto, esse insumo vem ganhando espaço nas pesquisas, afinal há uma necessidade de melhor destinar o resíduo gerado pela indústria alimentícia do açaí. Santos et al. (2017) conduziram uma pesquisa analisando a viabilidade de usar fibras do mesocarpo e caroço do açaí como componente de misturas de areia e asfalto para pavimentação em Manaus, Amazonas. Durante o estudo, as fibras foram adicionadas em uma proporção de 0,5% do peso total do compósito asfáltico, e os corpos de prova foram submetidos a ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, bem como imagens em microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que as fibras apresentaram boas propriedades mecânicas, permitindo um desempenho mecânico superior e redução de custos no produto.

Azevedo et al. (2021a) investigaram a aplicação de fibras naturais de açaí em argamassas que contêm cimento e cal, com adições proporcionais de 1,5%, 3,0% e 5,0% em relação à massa de cimento. Tanto as fibras in natura (sem tratamento) quanto as fibras tratadas com NaOH foram utilizadas e caracterizadas quanto às suas propriedades físicas, químicas e morfológicas, bem como às propriedades das argamassas em estado fresco e endurecido. Os resultados obtidos indicaram que a adição de 3% de fibras tratadas proporcionou um melhorias na resistência das argamassas, o que é uma vantagem para sua aplicação na construção civil. No entanto, o estudo também destacou uma limitação comum na utilização de fibras naturais em matrizes cimentícias, que é a sua baixa durabilidade em ambientes com alta alcalinidade, como no caso da matriz de cimento Portland. Essa limitação pode comprometer a integridade do composto e deve ser levada em consideração ao utilizar fibras naturais em argamassas.

Lopes & Casagrande, (2022) realizaram um estudo sobre o potencial das fibras de açaí como material de reforço para solo argiloso. Foram realizados testes de compactação, compressão simples e cisalhamento direto em várias amostras, contendo teores de fibras de 0,5% e 1,0%, em relação ao peso do solo seco e distribuídas aleatoriamente na massa do solo. Observou-se um aumento da umidade ótima e uma redução do peso específico aparente seco durante a compactação. Na compressão simples, houve um aumento de 156% na resistência de pico para a mistura com 0,5% de fibras e um aumento de 250% para a mistura com 1,0%. No ensaio de cisalhamento direto, o solo sem reforço apresentou valores de $c' = 15,97$ kPa e $\phi' = 20,56^\circ$, enquanto o compósito com 0,5% de fibras apresentou $c' = 12,35$ kPa e $\phi' = 33,49^\circ$, e com 1,0% de fibras, $c' = 4,15$ kPa e $\phi' = 33,44^\circ$. Considerando o bom desempenho tanto no pico de resistência quanto na resistência ao cisalhamento pós-pico, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios do ponto de vista geotécnico, permitindo a possibilidade de utilização das fibras de açaí como material de reforço em obras como pavimentação e aterros de solos moles.

Mais tarde, os autores mencionados anteriormente, realizaram um estudo para avaliar a viabilidade da utilização dessa fibra em uma matriz de solo arenoso. Foram realizados ensaios para analisar o comportamento físico-mecânico dos compósitos solo-fibra, utilizando proporções de 0,5% e 1,0% de fibra em relação ao peso seco do solo e duas densidades relativas diferentes, 50% e 75%. A partir dos ensaios de cisalhamento, foi possível constatar que a melhor disposição de aplicação seria para a densidade relativa de 75%, utilizando o percentual de 0,5%

de fibras, em que se observaram menores tensões de confinamento, entre 50 e 100 kPa, e ganhos de resistência ao cisalhamento de até 24%.

2.6. DURABILIDADE DAS FIBRAS VEGETAIS

Embora os compósitos com fibras vegetais apresentem diversas vantagens em relação aos compósitos com fibras sintéticas, a durabilidade desses materiais ainda é um fator crítico que requer avaliação cuidadosa. A exposição ao ambiente, à umidade e às variações de temperatura pode causar a degradação das fibras naturais, o que compromete significativamente as propriedades mecânicas e a vida útil do compósito. O estudo da durabilidade de um material deve começar ao reconhecer os agentes danosos pertinentes em cada contexto de uso e compreender os mecanismos de deterioração associados a esses agentes. Portanto, é fundamental que sejam realizados estudos para avaliar e aprimorar a durabilidade desses materiais, a fim de expandir sua aplicação em diferentes setores da indústria e contribuir para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e renováveis.

Dessa maneira, Tolêdo Filho (1997) desempenhou ensaio de imersão das fibras de coco e sisal em água de torneira conferindo-se as massas em intervalos de 24 h. Após 10 dias de imersão, obteve-se a saturação completa, com absorção de 230% pelo sisal e 100% pelo coco, sendo que a maior parte da absorção ocorreu nas primeiras 24 h. Com o auxílio de um micrômetro foi possível observar um aumento de diâmetro de 15% no sisal e 9% no coco. Também foi realizado ensaios de tração para analisar a durabilidade das fibras até 420 dias após serem imersas em água de torneira. O autor chegou à conclusão que, ao final do tempo de imersão, as fibras de sisal e coco preservaram, respectivamente 83.3% e 77.2% da massa total. Concluiu-se, então, que a provável causa da perda de resistência seja a ação microbiana e de intempéries presentes durante o envelhecimento natural.

De acordo com Chesson (1997), o principal obstáculo ao uso de fibras naturais como reforço de solo é a perda de resistência à tração ao longo do tempo, que pode ser resultado de efeitos físicos, químicos e biológicos, ou uma combinação desses fatores. A deterioração da lignina, responsável por manter as fibras unidas para formar uma cadeia longa, pode ser considerada como um tipo de dano físico. O dano químico ocorre quando as cadeias moleculares nas fibras começam a se romper, e o dano biológico é causado por bactérias que digerem as fibras. A taxa

de degradação das fibras é determinada principalmente pela quantidade de lignina presente, que é resistente à degradação e ajuda a diminuir a degradação de outros componentes celulares.

Ghavami et al. (1999) afirmam que as alterações dimensionais da fibra natural, causadas pela variação de umidade e temperatura, têm um efeito sobre a aderência entre o solo e as fibras. Também inferem que a absorção de água pela fibra resulta em sua expansão ou inchamento, o que faz com que o solo em torno dela seja afastado, mesmo em uma escala microscópica. Sendo assim, as condições de elevada umidade no solo provocadas pela precipitação propiciam a proliferação de microrganismos acelerando o processo de biodegradação das fibras causando uma rápida deterioração. Quando a umidade é perdida pelo composto, a fibra retorna ao seu tamanho original, reduzindo suas dimensões e criando pequenos vazios em torno dela.

Segundo Moreira (2006), os fungos são mais adaptados a ambientes com pH inferior a 5,0, enquanto as bactérias, incluindo actinomicetos (streptomicetos, actinobacterias) e cianobactérias, são mais adaptados a ambientes com pH entre 6 e 8. É provável que a menor incidência de fungos em solos com pH entre 6 e 8 seja devido à competição mais eficiente das bactérias e actinomicetos, o que prejudica o estabelecimento dos fungos.

Em um experimento realizado por Bernardina & Casagrande (2018) em solo arenoso, foram utilizadas fibras de coco e polipropileno em uma concentração de 0,5% do peso seco. Foi avaliada a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova, que foram submetidos a um período de envelhecimento natural de um a 8 meses. Foi observado que quanto maior o tempo de exposição, menor a eficiência do reforço. A areia pura apresentou um ângulo de atrito de 32° e intercepto coesivo nulo. Já a areia reforçada com fibras de coco, sem envelhecimento, apresentou um ângulo de atrito de 42° e intercepto coesivo de 28 kPa. Após o envelhecimento de 8 meses, esses valores diminuíram para 38° e 23 kPa, respectivamente. O compósito com fibras de polipropileno apresentou um ângulo de atrito de 37° e intercepto coesivo de 89 kPa. Após o envelhecimento de 8 meses, esses valores aumentaram para 39° e diminuíram para 42 kPa, respectivamente. Foi relevante observar que os compósitos reforçados com fibras sintéticas também perderam parte da resistência ao longo do tempo.

Silveira (2018), em parte do seu estudo, examinou como o envelhecimento de fibras de sisal e curauá afetou o reforço de um solo arenoso. A perda de massa das fibras foi um fator determinante no comportamento mecânico do compósito. Os resultados indicaram que a fibra

de sisal teve uma resistência superior à degradação em comparação com a fibra de curauá, que mostrou uma maior perda de resistência ao longo do tempo. Ela explicou que isso ocorreu devido à menor seção transversal da fibra de curauá, que, embora tenha favorecido o aumento da resistência inicial, tornou-a mais suscetível a danos ambientais. A autora justificou essa conclusão argumentando que as duas fibras apresentaram teores semelhantes de lignina e celulose, sendo a lignina uma das variáveis mais importantes para a prevenção da degradação das fibras naturais.

No estudo de Bernardina (2019), foi analisado o efeito do envelhecimento de fibras de curauá, sisal e coco durante períodos de exposição de 60, 120 e 240 dias, com as fibras colocadas a profundidades de 75 e 125 cm. Observou-se que o envelhecimento afetou diretamente o comportamento das fibras, resultando em uma diminuição da resistência à tração, do módulo de elasticidade e da capacidade de deformação. As maiores perdas de resistência foram registradas nas amostras a 75 cm de profundidade em todas as fibras estudadas. O declínio mais acentuado na resistência ocorreu nos primeiros dois meses de exposição em todas as fibras. Após oito meses de exposição, as fibras de sisal perderam boa parte de sua resistência (diminuindo de 270 MPa para 116 MPa), enquanto as fibras de curauá sofreram um declínio ainda maior, de 464 MPa para 105 MPa. Por outro lado, as fibras de coco perderam, na pior das condições, 21% de sua resistência, caindo de 150 MPa no tempo zero para 118 MPa em oito meses de exposição. Dessa forma, a fibra de coco apresentou praticamente a mesma resistência que a de sisal após a exposição, enquanto a fibra de sisal, que no início apresentava quase o dobro da resistência da fibra de coco, sofreu uma perda significativa de resistência ao longo do tempo.

Lopes (2019) conduziu experimentos envolvendo amostras de solo argiloso laterítico e solo arenoso com dois teores de fibra de açaí (0,5% e 1,0%), tanto em ensaios de compressão simples como em ensaios de cisalhamento direto. Os testes foram realizados no momento zero e em compósitos que foram expostos às condições ambientais por até 5 meses. De acordo com o autor, a exposição das fibras de açaí às condições climáticas e ao tempo resultou na perda das suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, na perda da resistência dos compósitos solo-fibra. No entanto, as perdas de resistência não foram muito significativas, alcançando no máximo 30%.

2.7. PARÂMETROS-CHAVE

Uma metodologia de pesquisa conhecida como estudo de Parâmetros-chave consiste em uma abordagem matemática que busca correlacionar fatores que afetam a resistência do solo. Originalmente, essa técnica foi aplicada em solos que foram artificialmente cimentados, com o objetivo de correlacionar fatores como índice de vazios, teor de umidade, níveis de compactação e quantidade de cimentante adicionado ao solo. A metodologia envolve a realização de muitos ensaios de resistência, incluindo compressão simples, cisalhamento direto ou triaxiais, variando os fatores mencionados anteriormente. Dessa maneira, é possível obter uma curva que possa descrever o comportamento do material, correlacionando a resistência do solo cimentante com as condições a ele impostas.

Com o intuito de analisar o comportamento de tensão-deformação de compósitos de solo residual de arenito com cimento Portland, mantendo a relação entre o índice de vazios e teor de cimento, Consoli et al. (2007b) realizaram seis ensaios triaxiais não-drenados, com tensões de confinamento de 20 kPa, e compararam os resultados com a curva de resistência à compressão simples obtida por Foppa (2005). Três valores de $\eta/(Civ)$ foram utilizados para avaliação (20, 25 e 35), sendo apresentados na Figura 2.15. Com a pesquisa foi possível concluir que a relação entre o índice de vazios e cimento também é efetiva na previsão da tensão desvio nos ensaios triaxiais não-drenados. Além disso, notaram que a curva de ajuste dos ensaios triaxiais ficou próxima à curva dos ensaios de compressão simples, porém ligeiramente acima, devido ao efeito do confinamento.

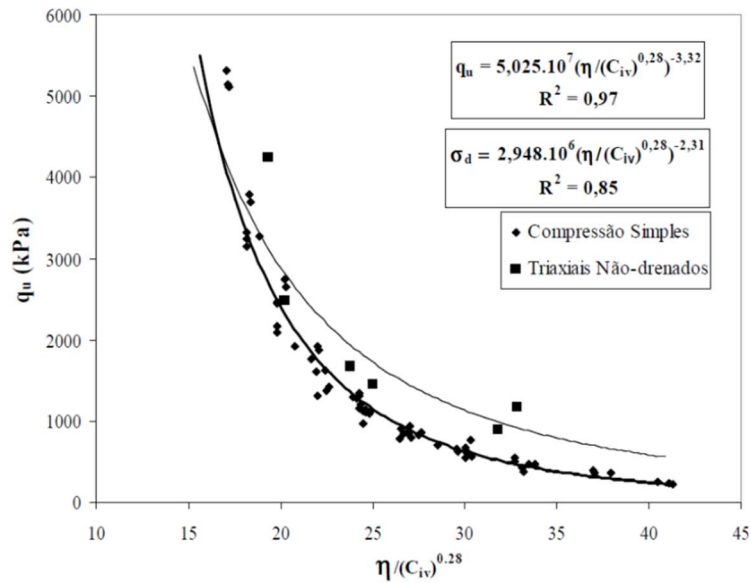


Figura 2.15 – Previsão da tensão desvio por meio da relação vazios/cimento (Consoli et al., 2007b).

Na pesquisa de Consoli et al. (2017), foram analisados os efeitos da porosidade e do teor de cimento na resistência à compressão (q_u) de rejeitos de ouro, tanto com fibras quanto sem fibras. Os resultados foram apresentados em um gráfico que mostrava a relação entre um índice ajustado de porosidade/teor de cimento de $\eta/(C_{iv})^{0,28}$. O gráfico indicou que esse índice foi eficaz para normalizar os resultados de resistência para ambas as misturas de rejeitos de ouro e cimento Portland, conforme ilustrado na Figura 2.16.

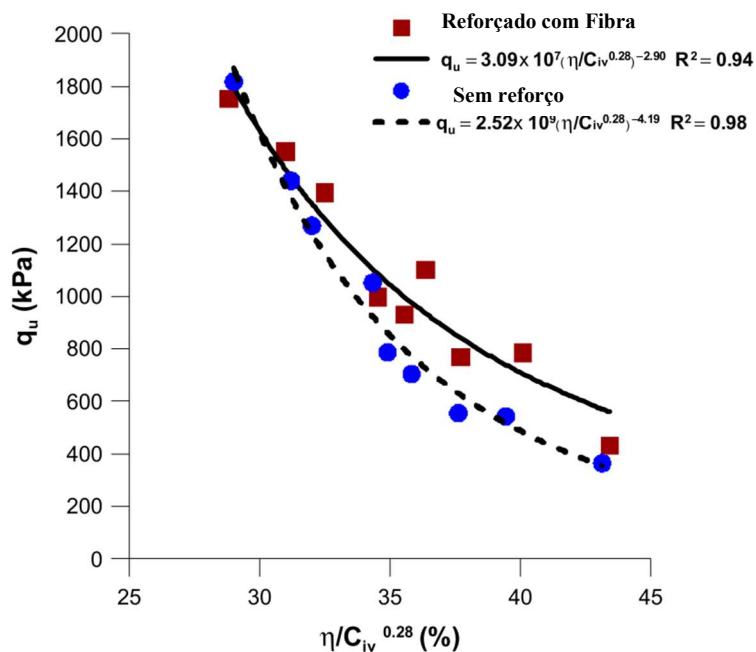


Figura 2.16 – Variação da resistência à compressão simples (q_u) de amostras não reforçadas e reforçadas com fibra em relação ao índice de porosidade/cimento ajustado para rejeito de ouro (Consoli et al., 2017).

Os autores observaram que a adição de fibras não teve um efeito significativo na resistência à compressão para valores reduzidos de $\eta/(Civ)^{0,28}$. Entretanto, quando o valor de $\eta/(Civ)^{0,28}$ foi maior que cerca de 31, houve uma diferença crescente na resistência à compressão entre as misturas reforçadas com fibras e as não reforçadas. Isso sugere que as fibras são mais eficazes para aumentar a resistência de amostras mais fracas, uma tendência que já havia sido observada em estudos anteriores de Consoli et al. (2009) em amostras de areias cimentadas reforçadas com fibras.

Em um estudo realizado por Alelvan (2022), um dos objetivos foi avaliar se um parâmetro-chave controla o comportamento dos compósitos de rejeito-polímero-fibra. Para isso, foram analisados os resultados mecânicos, considerando a relação entre a porosidade e o teor polimérico. Os resultados mostraram que existe uma curva única para obter os valores de resistência à compressão simples para os compósitos de rejeito-polímero-fibra, com um coeficiente R^2 de 0,80 para um período de cura de 28 dias (Figura 2.17).

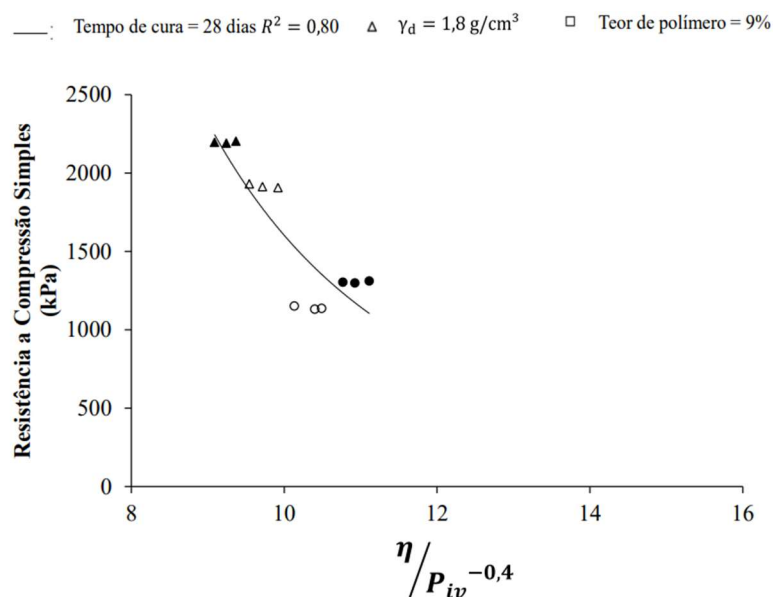


Figura 2.17 – Relação da Resistência a Compressão Simples com o índice de porosidade e teor volumétrico de polímero para os compósitos rejeito-polímero-fibra (Alelvan, 2022).

Por fim, Lopes (2022) também propôs a investigação de um parâmetro-chave que regula o comportamento dos compósitos, utilizando os resultados mecânicos obtidos pela relação entre porosidade e teor polimérico. Os estudos indicaram a existência de uma curva singular para determinar os valores de resistência à compressão do compósito rejeito-polímero após um período de cura de 28 dias ao ar livre, com um R^2 de 0,948. Da mesma forma, foi identificada

uma curva única para os valores absolutos de tensão de deformação do compósito rejeito-polímero após um período de cura de 28 dias ao ar livre, com um R^2 de 0,781.

3. METODOLOGIA

Nesse capítulo, são descritos os materiais que foram investigados na pesquisa, bem como os métodos de ensaios utilizados para alcançar os objetivos propostos na dissertação. Ao apresentar os materiais e métodos, pode-se, então, compreender melhor os processos da pesquisa e validar a veracidade dos resultados obtidos. A metodologia foi desenvolvida por etapas, conforme descrito de forma resumida no fluxograma da Figura 3.1.

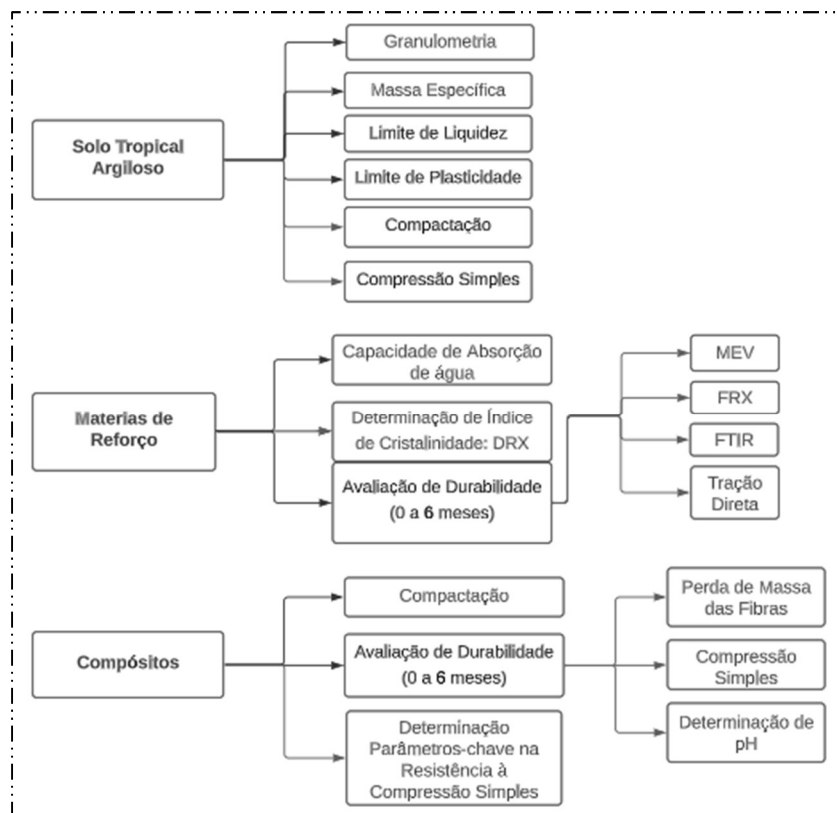


Figura 3.1 – Fluxograma de materiais e métodos propostos na pesquisa.

3.1. MATERIAIS

A seguir são apresentadas as especificações dos materiais relevantes para o tema em questão. Foram abordados os quatro materiais estudados: solo argiloso tropical, serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí. Para cada um desses materiais, foram descritas as informações sobre origem, principais características e especificações relevantes para pesquisa.

O solo argiloso tropical é um tipo de solo encontrado em regiões quentes e úmidas, e possui características peculiares que influenciam diretamente na sua utilização. A serragem de bambu

é um resíduo gerado no processo de transformação do bambu em utensílios ou, até mesmo, na produção de elementos estruturais como vigas de bambu. As fibras de coco são extraídas do coco maduro, e são descartadas de forma inapropriada principalmente em praias. Por fim, as fibras de açaí são um subproduto do processamento da fruta, e seu material fibroso ainda é pouco aproveitado.

3.1.1. SOLO TROPICAL ARGILOSO

A matriz que foi utilizada para o desenvolvimento da pesquisa é um solo tropical argiloso (Figura 3.2) coletado no Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo do Programa de Pós-graduação da Universidade de Brasília (UnB). Esse campo experimental está localizado no Campus Universitário Darcy Ribeiro, na região da Asa Norte do Plano Piloto de Brasília, no Distrito Federal. A área do campo experimental possui uma posição geográfica bem definida, com as coordenadas 15°45'58"S e 47°52'21"O, e está situada a uma altitude média de 1047 m. A sua área total é de cerca de 5000 m² e é delimitada por uma forma quadrangular.



Figura 3.2 – Solo Tropical Argiloso.

A escolha por essa matriz de solo foi principalmente por ser um solo predominante em regiões tropicais e subtropicais, como é o caso do Brasil, e em especial na região de estudo, Brasília/DF. Esse tipo de solo apresenta elevada resistência mecânica ao cisalhamento, o que pode torná-los adequados para aplicações que exijam resistência e durabilidade. Além disso, a presença de argila em sua composição pode conferir plasticidade ao solo, tornando-o mais fácil de moldar.

Outra vantagem de se utilizar um solo argiloso como matriz de compósitos é que ele pode ser mais facilmente encontrado em áreas próximas às obras, reduzindo os custos de transporte e tornando a produção dos compósitos mais sustentável.

Quando combinado com fibras, o solo argiloso pode formar compósitos com características particulares. Por exemplo, o estudo de Lopes & Casagrande, (2022) mostrou que a adição de fibras naturais pode aumentar ainda mais a resistência à tração do compósito, tornando-o mais adequado para aplicações em engenharia civil, como em estruturas de contenção de encostas ou de construções de baixo custo.

3.1.2. SERRAGEM DE BAMBU

As serragens de bambu foram obtidas por meio de uma doação feita pelo Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais (CPAB) da Universidade de Brasília (UnB). Esses resíduos foram gerados durante o processo de laminação dos trechos de colmo da espécie *Dendrocalamus Asper*, uma variedade de bambu.

Ao receber o resíduo de bambu, constatou-se que havia uma grande variação nos tamanhos e diâmetros das partículas. Decidiu-se, então, passar o material recebido em uma peneira com abertura de 2,0 mm (nº 10) para padronizar seu diâmetro e torná-lo adequadamente padronizado. Assim, somente as partículas de serragem passantes foram utilizadas na pesquisa. O comprimento das partículas de serragem variava de 12 mm para menos. É importante destacar que a serragem de bambu consiste em um conjunto de fibras em forma de serragem, conforme mostra a Figura 3.3 e, portanto, apresentou um comportamento diferente dos demais materiais de reforço utilizados.



Figura 3.3 – Serragem de Bambu: material passante na peneira de 2,00 mm.

A utilização desses resíduos como material de estudo é importante, pois permite a sua valorização e contribui para a sustentabilidade ambiental. Além disso, o bambu é um recurso renovável e apresenta diversas propriedades interessantes, o que justifica a sua utilização em diversas áreas, incluindo a geotecnia.

3.1.3. FIBRAS DE COCO

As fibras de coco ilustradas na Figura 3.4(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.



Figura 3.4 – (a) Fibras de Coco antes de cortadas. (b) Fibras de Coco com 15 mm de comprimento.

Essas fibras foram fornecidas em comprimentos consideráveis (cerca de 90 mm), então foi necessário cortá-las em um tamanho previamente determinado, mostrado na Figura 3.4(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.

A escolha pela utilização da fibra de coco como reforço foi baseada em diversos fatores. Em primeiro lugar, a fibra de coco é um material residuário e, portanto, amplamente disponível. Além disso, a utilização desse material permite uma melhor destinação dos resíduos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Por fim, pesquisas anteriores, como mostrado no capítulo anterior, já comprovaram a eficiência de compósitos feitos com fibras de coco como reforço de solo, o que justifica sua escolha como objeto de estudo na pesquisa em questão.

3.1.4. FIBRAS DE AÇAÍ

As fibras de açaí apresentadas na Figura 3.5 e utilizadas como reforço no estudo 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.



Figura 3.5 – Fibras de Açaí.

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.

A escolha das fibras de açaí se deu em virtude da grande disponibilidade e do inadequado descarte desse material, além de apresentarem características mecânicas compatíveis com a necessidade de novos materiais geotécnicos. Essa escolha possibilitou a investigação de novas alternativas para o reforço de solo com fibras naturais e ofereceu perspectivas para o solucionar de problemas relacionados aos resíduos sólidos urbanos.

3.2. MÉTODOS

Nesta seção, apresenta-se o programa experimental utilizado na pesquisa. Os ensaios foram realizados em solo tropical, com o objetivo de avaliar suas características mecânicas e físicas. Além disso, foram realizados ensaios específicos nos materiais vegetais utilizados na pesquisa como reforço, a fim de identificar suas propriedades mecânicas, físicas e químicas com e sem degradação ao longo do tempo de exposição. Também, foram realizados ensaios nos compósitos para avaliar seu desempenho em diferentes contextos e condições, para identificar

possíveis aplicações na geotecnia. E, por fim, estabelecer equações analíticas, conforme a correlação de parâmetros-chave na obtenção da resistência a compressão simples.

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Os ensaios para analisar as características físicas do solo tropical argiloso foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da Universidade de Brasília (UnB), e foram conduzidos de acordo com os métodos descritos na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Caracterização física do solo: normas utilizadas.

| Norma | Descrição |
|----------------------|--|
| ABNT NBR 7181 (2016) | Análise Granulométrica |
| ABNT NBR 6508 (2017) | Determinação da Massa Específica |
| ABNT NBR 6459 (2016) | Solo: Determinação do Limite de Liquidez |
| ABNT NBR 7180 (2016) | Solo: Determinação do Limite de Plasticidade |

3.2.2. CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS MATERIAIS DE REFORÇO

A capacidade de absorção de água das fibras vegetais pode influenciar diretamente o comportamento mecânico desses materiais. Quando as fibras vegetais absorvem água, elas podem sofrer alterações dimensionais, como expansão, e alterações em suas propriedades mecânicas de resistência. Além disso, a absorção de água pode afetar a durabilidade do material, uma vez que a água pode levar à degradação química ou biológica das fibras.

Na ausência de uma norma específica para o ensaio de absorção em fibras, este estudo se baseou no procedimento descrito por Silveira (2018), que determinou a absorção de fibras vegetais de sinal e curauá em intervalos específicos sem secagem prévia e, também descrito por Vieira (2021) que realizou o mesmo ensaio com fibras de PVDF (Fluoreto de Polivinilideno). Dessa maneira, as fibras de açaí, de coco e a serragem de bambu foram imersas em água destilada e após 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 min para medição da capacidade de absorção de água.

Utilizando a Eq. (3.1) presente na NBR 9778 (ABNT, 2009) e complementada por Picanço (2005), foi possível obter uma curva de ganho de massa versus tempo, o que permitiu a

determinação da capacidade de absorção de água desses materiais vegetais estudados nesta pesquisa de dissertação.

$$A = \frac{P_{ht} - P_e}{P_e} * 100(\%) \quad (3.1)$$

Onde:

A = Capacidade de absorção;

P_{ht} = Peso úmido da fibra/serragem;

P_e = Peso seco da fibra/serragem.

Na Figura 3.6 ilustra as etapas envolvidas no teste de capacidade de absorção de água na fibra de coco. Esses mesmos procedimentos foram executados nos outros dois materiais, a serragem de bambu e as fibras de açaí. Inicialmente, para cada material foi separada uma amostra de 1,0g (Figura 3.6(a)), seguida da adição de água destilada (Figura 3.6(b)). Nos intervalos de tempo pré-determinados, mencionados anteriormente, as fibras e a serragem foram colocadas em papel filtro dentro de uma centrífuga manual para remover o excesso de água (Figura 3.6(c)) e, em seguida, eram pesadas em uma balança de alta precisão (Figura 3.6(d)).

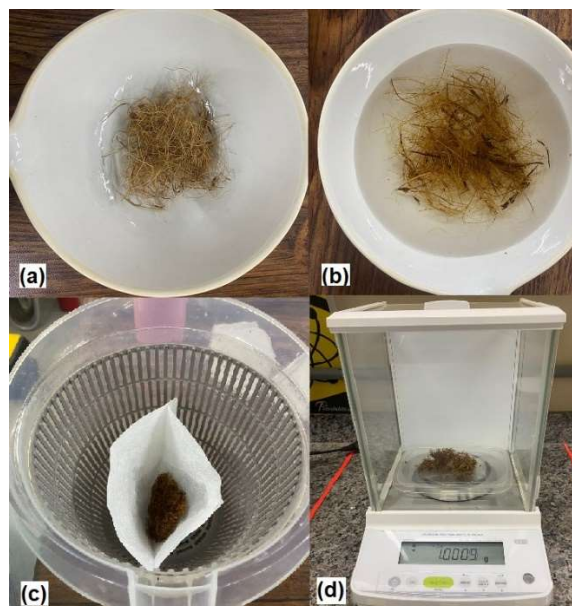


Figura 3.6 – Ensaio de capacidade de absorção de água.

3.2.3. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X NOS MATERIAIS DE REFORÇO

O objetivo principal do ensaio de difração de raios-x (DRX) em material vegetal é a obtenção de informações detalhadas sobre a estrutura cristalina da celulose, que é o principal componente estrutural das fibras. A técnica permite a identificação das fases cristalinas presentes na amostra, bem como a determinação dos parâmetros estruturais dessas fases, como a distância interplanar e o tamanho dos cristalitos.

O índice de cristalinidade (IC) é uma medida da proporção de celulose cristalina presente em uma amostra de fibras vegetais em relação à celulose total. O ensaio de DRX é uma técnica analítica amplamente utilizada para determinar o índice de cristalinidade de fibras vegetais. A fórmula mais comumente utilizada para calcular o valor de IC é apresentada na Eq. (3.2) proposta por Segal et al. (1959):

$$IC = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{am}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Onde:

IC = Índice de cristalinidade;

I_{002} = Intensidade correspondente ao material cristalino (máxima do difratograma);

I_{am} = Intensidade correspondente ao halo amorfo.

Então, foi empregado o equipamento de difração de raios-x da marca Bruker, modelo D8 FOCUS, conforme ilustrado na Figura 3.7, que estava disponível na Central Analítica do Instituto de Química da UnB. Dessa forma para realizar a análise, as amostras foram pulverizadas e acondicionadas em um recipiente com capacidade de 0,25 cm³.



Figura 3.7 – Equipamento de difração de raios-X.

3.2.4. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X NOS MATERIAIS DE REFORÇO

O ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica analítica que permite determinar a composição química de uma amostra por meio da identificação dos elementos químicos presentes nela. Quando aplicada a fibras vegetais, a FRX pode fornecer informações valiosas sobre a composição desses materiais, identificando elementos como cálcio, alumínio, ferro e potássio, entre outros.

Na presente investigação, utilizou-se o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X da marca Shimadzu, modelo 720HS, ilustrado na Figura 3.8, a fim de realizar a análise elementar na faixa de sódio (Na) a urânio (U), na Central Analítica do Instituto de Química da UnB. Para isso, as amostras foram moídas até atingir tamanho inferior a 1 mm e colocadas em um recipiente tipo ZIPLOC para análise subsequente. As análises obtidas foram de caráter semiquantitativa, apresentando valores de intensidade para cada elemento relacionada a um valor de padrão interno ao equipamento.



Figura 3.8 – Equipamento de Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X.

3.2.5. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER NOS MATERIAIS DE REFORÇO

O método de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica que possibilita a avaliação de substâncias orgânicas presentes em amostras. Quando se trata de materiais vegetais, a FTIR pode oferecer informações valiosas sobre a estrutura química desses materiais a depender do seu modo de vibração (Ferreira et al., 2017).

A técnica pode detectar compostos orgânicos comuns em fibras vegetais, tais como celulose, lignina, hemicelulose e pectina cada composto orgânico possui uma banda característica na região entre 400 e 4000 cm^{-1} . Elas estão correlacionadas com grupo Metóxi (CH_3O^-), e grupos de anéis aromáticos ($\text{C}=\text{C}$ e $\text{C}-\text{O}-\text{C}$) (Yang et al., 2007; Sarkanen & Ludwig, 1987). Ademais, esse ensaio pode ser utilizado para analisar a estrutura molecular relacionando à vibração dos átomos e moléculas, permitindo a identificação de possíveis alterações estruturais que possam ocorrer devido a diferentes processos, como a degradação (Chang, 2010).

Para realizar o ensaio foi utilizado o equipamento Varian modelo 640, observado na Figura 3.9, o qual vem equipado com o detector TA DLaTGS e é capaz de detectar medidas espectroscópicas na região do infravermelho (4000 - 400 cm^{-1}). O ensaio foi conduzido na Central Analítica do Instituto de Química da UnB, com amostras previamente trituradas em partículas menores que 1 mm e preparadas na forma de "pastilhas" para serem submetidas à análise.



Figura 3.9 – Equipamento de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.

3.2.6. ANÁLISE MICROESTRUTURAL NOS MATERIAIS DE REFORÇO

Com uma análise microestrutural é possível obter informações detalhadas sobre a estrutura das fibras, como a espessura da parede celular, e possíveis mudanças que podem ocorrer devido a exposição ao tempo. Essas informações são importantes para compreender as propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais, além de avaliar a qualidade e a uniformidade desses materiais.

Sendo assim, para a análise microestrutural de materiais vegetais foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo JEOL JSM-7001F no Laboratório de Microscopia e Microanálise (LMM) do Instituto de Ciências Biológicas. Este microscópio é um FE-SEM (microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo), ilustrado na Figura 3.10, é equipado com um canhão de elétrons quente (Schottky) e dois detectores de raios X (um sistema EDS convencional e um sistema WDS de alta resolução espectral) que é ideal para observar raios X de baixa energia.



Figura 3.10 – Microscópio Eletrônico de Varredura.

Na preparação das amostras para o ensaio, foi realizado o corte da seção transversal com lâmina e revestimento com uma fina camada de metal de ouro 24 h antes da análise, para melhorar a condutividade elétrica. Também foram separadas fibras submetidas a degradação para verificar no comprimento.

3.2.7. TRAÇÃO DIRETA NOS MATERIAIS DE REFORÇO

Para avaliação da resistência dos materiais de reforços foi realizado o ensaio de tração direta que permite determinar a resistência à tração da serragem e das fibras utilizadas no reforço do solo. Além da resistência, esse ensaio permite determinar módulo de elasticidade e alongamento na ruptura, sendo fundamental para explicar o comportamento desses materiais quando utilizados na função de reforço de solo.

Para tanto seguiu-se as recomendações da ASTM C1557 (2020) e foi usada uma prensa universal (Materialprufung 1445, Zwick, Alemanha), do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal da Bahia (UFBA), a uma velocidade de 0,1 mm/min. Para cada material e tempo de observação foram selecionados os 15 melhores ensaios, totalizando 180 corpos de prova submetidos ao ensaio de tração direta.

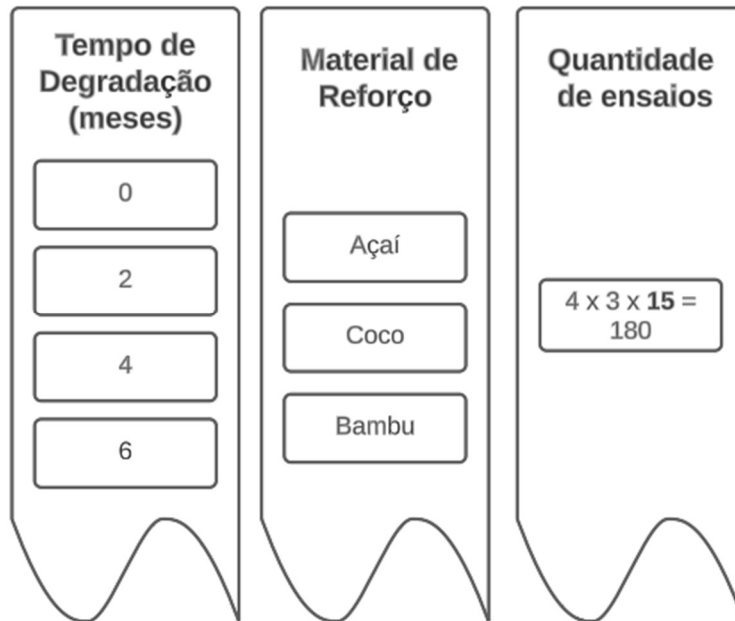


Figura 3.11 - Quantidade de corpos de prova submetidos ao ensaio de tração direta.

Para realizar o ensaio, foram adaptados moldes de papel com uma gramatura de 180 g/m². Esses moldes possuem dimensões de 70 mm x 30 mm externa. Contido de uma abertura central retangular de 8 mm x 5 mm para aqueles que contém fibras de coco. No caso dos moldes contendo serragem de bambu e fibras de açaí, optou-se por fazer uma abertura central circular de 5 mm, utilizando um perfurador de papel. Essa alteração na forma de abertura foi necessária, uma vez que as fibras de bambu e açaí possuem comprimentos variados e inferiores a 12 mm, ao contrário das fibras de coco, que foram padronizadas em 15 mm. Além de facilitar o processo de produção.

Dessa forma, os materiais vegetais foram colados nas aberturas, chamadas de “janelas”, com o auxílio de uma cola instantânea de alta resistência (da marca superbonder), conforme mostrado na Figura 3.12(a). Para reforçar os moldes foi adicionado tiras de EVA em suas extremidades, a fim de evitar o esmagamento dos materiais com a pressão da garra da máquina. A Figura 3.12(b) mostra um corpo de prova de açaí antes de submetido ao ensaio e a Figura 3.12(c) mostra o mesmo corpo de prova após o rompimento.

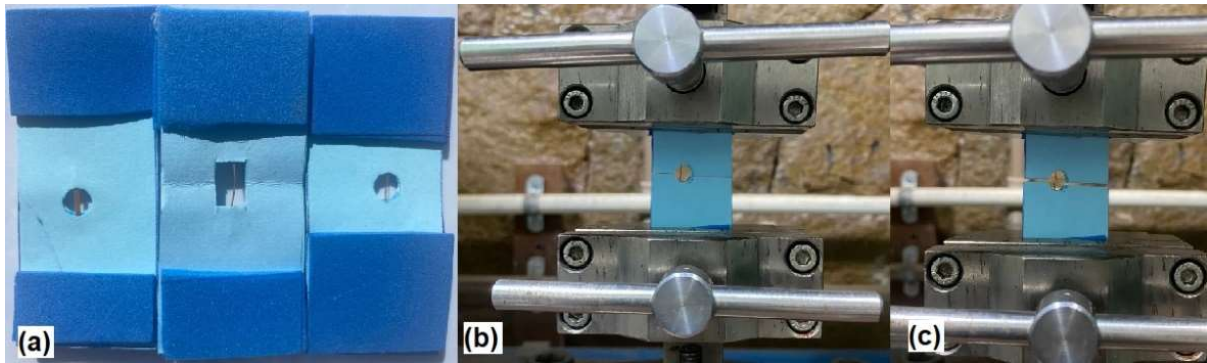


Figura 3.12 – Ensaio de tração direta: (a) Corpos de prova dos materiais naturais; (b) Corpo de prova antes de rompido; (c) Corpo de prova após rompimento.

3.2.8. COMPACTAÇÃO EM EQUIPAMENTO MINIATURA

Conforme a norma DNER-ME 228/94: Solos - Compactação em Equipamento Miniatura, foi realizado um ensaio de compactação utilizando esse equipamento, tanto para o solo sem reforço como também para o solo reforçado com os três materiais vegetais aqui apresentados, nos teores de 1,0% e 2,0% com relação a massa seca do solo.

Esse ensaio relaciona o teor de umidade com a massa específica aparente seca, com uma energia de compactação definida, permitindo a construção da curva de compactação por meio da obtenção de pontos que representem os ramos seco e úmido.

Semelhante aos ensaios da metodologia MCT, este ensaio é aplicável somente em materiais com menos de 10% de material retido na peneira de 2 mm de abertura. O equipamento da Figura 3.13 foi o utilizado para a compactação em equipamento miniatura.



Figura 3.13 – Equipamento de compactação em miniatura.

No presente estudo, foi empregada a energia normal (Procedimento A da norma), utilizando um soquete tipo leve, 2,27 kg, e quatro golpes em cada lado da amostra durante a compactação em equipamento miniatura. A escolha da energia normal se justifica pelo fato da aplicabilidade do solo reforçado em questão que seria voltado para reforço de aterros, base de fundações rasas, estabilidade de taludes entre outros.

A compactação em equipamento miniatura tem vantagens em relação à redução da quantidade de amostra necessária para obter cada ponto da curva, cerca de 400 g, além de uma redução no esforço necessário para aplicar os golpes. Além disso, esse ensaio permite uma medição mais precisa da altura do corpo de prova e uma maior homogeneidade dos corpos de prova ensaiados.

3.2.9. COMPÓSITOS SUBMETIDOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL

Nesta seção são apresentados os procedimentos para a confecção e análise dos corpos de prova de matriz argilosa, que foram reforçados com as serragens de bambu, fibras de coco e fibras de açai. O objetivo principal da confecção desses compósitos foi avaliar o comportamento mecânico do solo reforçado de dois em dois meses durante um total de seis meses de exposição aos agentes climáticos utilizando o ensaio de compressão simples, que será descrito na próxima seção.

Os corpos de prova foram produzidos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, contendo teores de 1,0% e 2,0% de cada material natural de reforço (bambu, coco e açai) e considerando as massas específicas máximas dos compósitos correspondentes, em triplicata para cada tipo de teor e material de reforço.

Vale ressaltar que para a confecção dos compósitos primeiramente a massa de solo era espalhada em bandeja (Figura 3.14(a)), adicionava-se o material de reforço de forma aleatória no solo (Figura 3.14(b)), misturando-as, e então era adicionada a água na mistura (Figura 3.14(c)). Depois que o compósito era homogeneizado (Figura 3.14(d)), pode-se, portanto, compactá-lo formando o corpo de prova de solo reforço (Figura 3.14(e)).

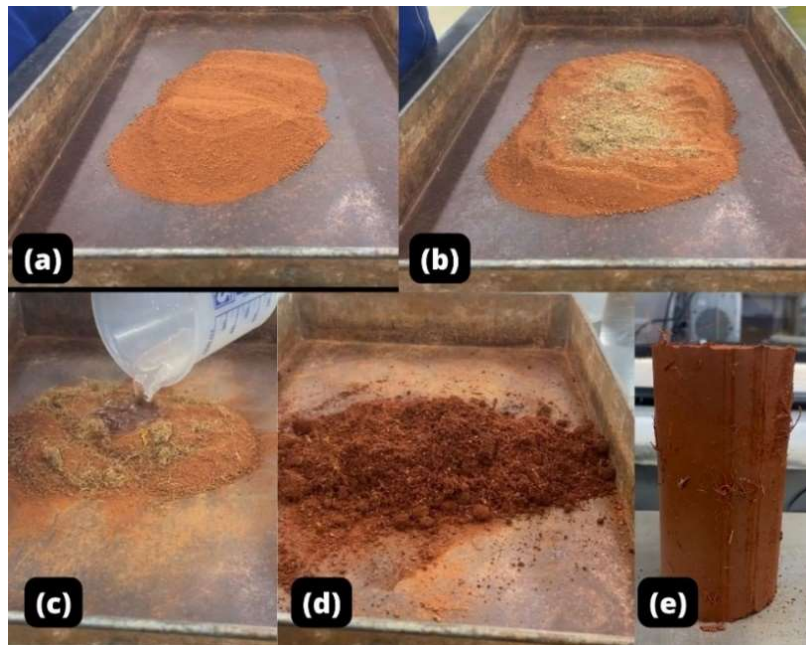


Figura 3.14 – (a) Solo espalhado na bandeja para iniciar a mistura. (b) Adição do material de reforço na mistura. (c) Adição de água na mistura. (d) Homogeneização da mistura. (e) Corpo de prova compactado.

Para expor esses corpos de prova a degradação natural, foram adquiridas caixas perfuradas, (Figura 3.15(a)). O fundo dessas caixas foi revestido com um geotêxtil não tecido (Figura 3.15(b)), permitindo a circulação do ar e impedindo a perda de material do compósito. Os corpos de prova compactados (Figura 3.15(c)) eram embalados em lonas plásticas tecidas com altura 50 mm maior que a dos corpos de prova e identificados, (Figura 3.15(d)), sendo assim, toda a caixa foi preenchida com corpos de prova submetidos a exposição ao clima e tempo (Figura 3.15(e)).



Figura 3.15 – (a) Caixas perfuradas. (b) Geotêxtil não tecido de proteção. (c) Corpo de prova compactado. (d) Corpo de prova embalado em lona plástica tecida. (e) Caixa contendo corpos de prova submetidos para degradação.

A Figura 3.16 mostra, em diferentes escalas, o local escolhido para a exposição dos corpos de prova durante o período de degradação, que foi realizado entre os meses de outubro a abril, levando em consideração o clima e o tempo na cidade de Brasília. Durante esse período, os corpos de prova foram expostos a diversos agentes climáticos, tais como variações de temperatura do solo decorrentes tanto da transição do dia para a noite quanto das mudanças de estação, variações da umidade do solo em função das precipitações e a radiação solar, que influencia no processo de degradação das fibras (Silveira, 2018).

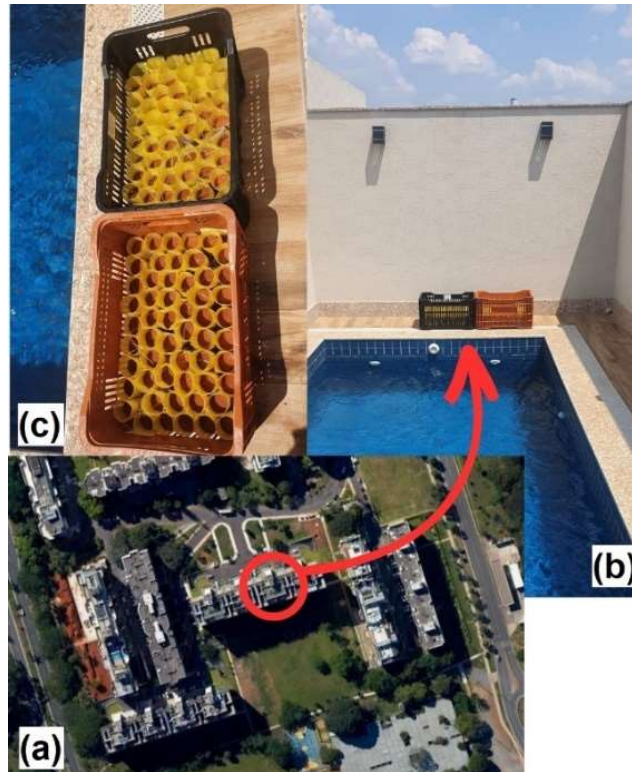


Figura 3.16 – Local de exposição dos corpos de prova à degradação natural.

As variáveis meteorológicas (temperatura, precipitação e umidade relativa do ar) foram obtidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Distrito Federal, estação automática de Brasília (A001) e estão apresentadas na Figura 3.17.

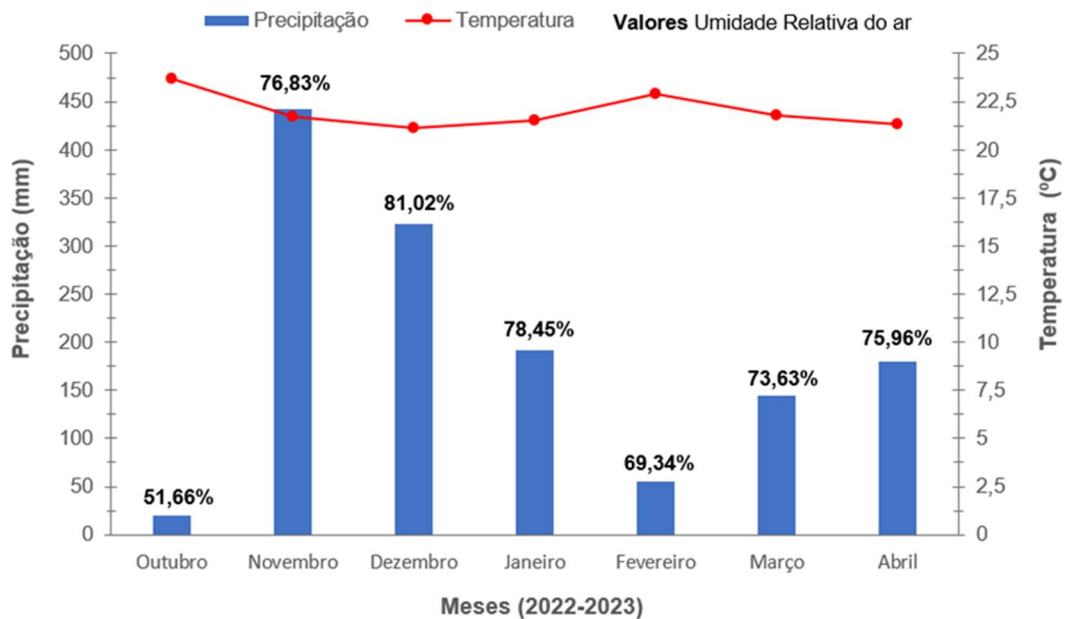


Figura 3.17 – Parâmetros meteorológicos dos meses de exposição dos compósitos: temperatura média, umidade relativa média do ar e precipitação (INMET, 2023).

A cada data previamente determinada (60, 120, 180 dias) corpos de prova eram retirados do local de exposição e encaminhados para o laboratório e retirava-se a lona plástica, conforme apresentado na Figura 3.18. Fazia-se, então, a medição da umidade em alguns dos corpos de prova, e, posteriormente, quando estava em umidade de moldagem inicial, eram submetidos ao ensaio de compressão simples.



Figura 3.18 – Corpos de prova retirados após tempo de degradação.

Após a etapa de rompimento por compressão não confinada, os corpos de prova rompidos foram recolhidos, fotografados, fez-se a medição de pH dos compósitos e, depois foram lavados em peneira para retirar as fibras e a serragem da matriz argilosa. Ressalta-se a importância e delicadeza para que os materiais vegetais não fossem carreados durante a lavagem.

As fibras retidas na peneira foram secas ao ar dentro do laboratório por 7 dias, e posteriormente preparadas para os ensaios e análises de perda de massa (cálculo da massa remanescente do material de reforço), MEV, FTIR, FRX e tração direta. Os equipamentos e métodos de preparo das amostras para os ensaios e análise de MEV, FTIR, FRX e tração direta foram os mesmos adotados para a caracterização dos elementos de reforço apresentados em seções anteriores.

3.2.10. COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples é amplamente utilizado na geotecnia para avaliar a resistência dos solos reforçados. Existem diversas vantagens em se utilizar esse tipo de ensaio, que vão desde a facilidade de execução até a determinação prévia de parâmetros importantes para o dimensionamento de estruturas geotécnicas, como a resistência à compressão, deformabilidade e rigidez do solo.

De acordo com a norma NBR 12770 (ABNT, 2022), o ensaio de compressão simples é realizado em corpos de prova cilíndricos, submetidos a uma carga axial unidirecional, e dessa forma, as deformações e tensões são medidas. A velocidade de deformação adotada foi entre 0,5% e 2,0% da deformação axial específica (ϵ) por minuto, e para todos os testes, a velocidade foi de 1,27 mm/min. O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Ensaio de compressão simples.

Na presente dissertação, inicialmente, o ensaio foi realizado no solo sem reforço como base comparativa. Posteriormente, foram realizados ensaios em solo reforçado, utilizando os três tipos de reforço: fibras de açai, coco e serragem de bambu, cada um com dois teores distintos: 1,0% e 2,0% em relação a massa seca do solo. Completando essa análise, com o estudo de degradação, foram moldados corpos de prova com essas especificações e submetidos ao ensaio nos tempos de: zero, dois, quatro e seis meses após exposição natural.

Vale ressaltar que em todos esses ensaios os corpos de prova foram confeccionados nas suas respectivas densidades máxima encontradas no ensaio de compactação em equipamento miniatura. Bem como, todos os corpos de prova foram fabricados e ensaiados em triplicata, totalizando uma quantidade de 72 corpos de prova de solo reforçado submetidos ao ensaio de compressão simples, conforme resumido na Figura 3.20.

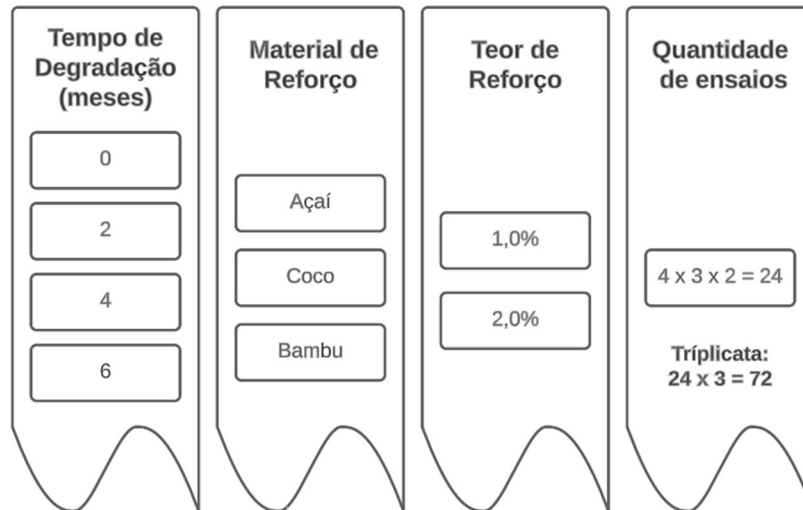


Figura 3.20 – Quantidade de corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão simples para análise de durabilidade dos compósitos.

Os resultados foram plotados em gráficos de Tensão *versus* Deformação Axial Específica. Com esses gráficos, foi possível observar a influência do teor de fibras e serragem na resistência ao cisalhamento do solo, além de avaliar a degradação dessas fibras ao longo de seis meses.

Já para o entendimento sobre parâmetros-chave foram realizados mais desse ensaio, dessa vez sem tempo de degradação, e com massas específicas pré-definidas de: 1,9 g/cm³ e 2,0 g/cm³, segundo esquema da Figura 3.21. De posse dos resultados desses ensaios, foi possível estabelecer equações analíticas conforme a correlação de parâmetros-chave no comportamento do solo reforçado com os materiais naturais.

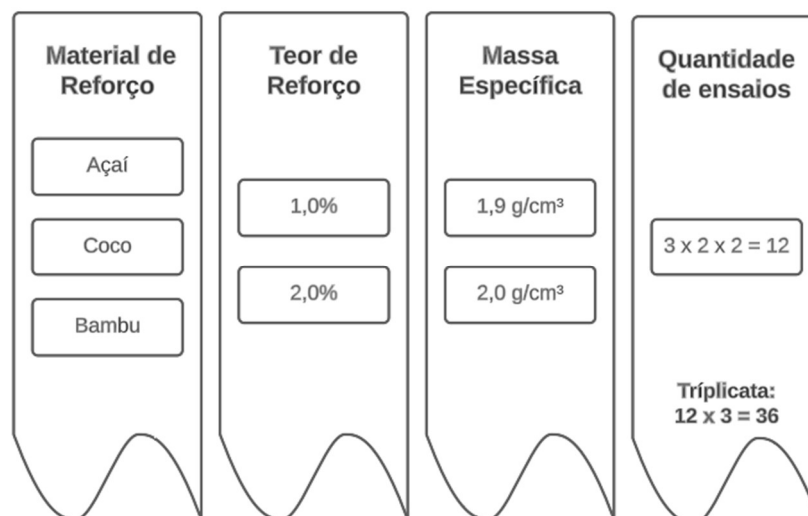


Figura 3.21 – Quantidade de corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão simples para análise de parâmetros-chave nos compósitos.

4. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para o solo em sua forma pura, sem nenhum tipo de material reforço. Posteriormente, foram exibidos os resultados dos ensaios realizados com cada material de reforço utilizado nesta pesquisa: serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açai, respectivamente. Foi exibido também, uma análise global comparativa do comportamento desses materiais vegetais estudados. E, por fim, apresentada a análise matemática dos parâmetros-chave que influenciam a resistência à compressão simples do solo reforçado.

4.1. SOLO TROPICAL ARGILOSO

O valor da densidade relativa dos grãos (Gs) do solo puro obtido no Pentapycnometro foi de 2,69. Já os valores obtidos de Limite de Liquidez (LL) foi de 42%, Limite de Plasticidade (LP) foi 27% e, portanto, e o valor calculado do Índice de Plasticidade (IP) foi de 15, sendo considerado de plasticidade média a alta.

O ensaio de granulometria realizado no solo puro, sem reforço, forneceu a curva granulométrica apresentada na Figura 4.1.

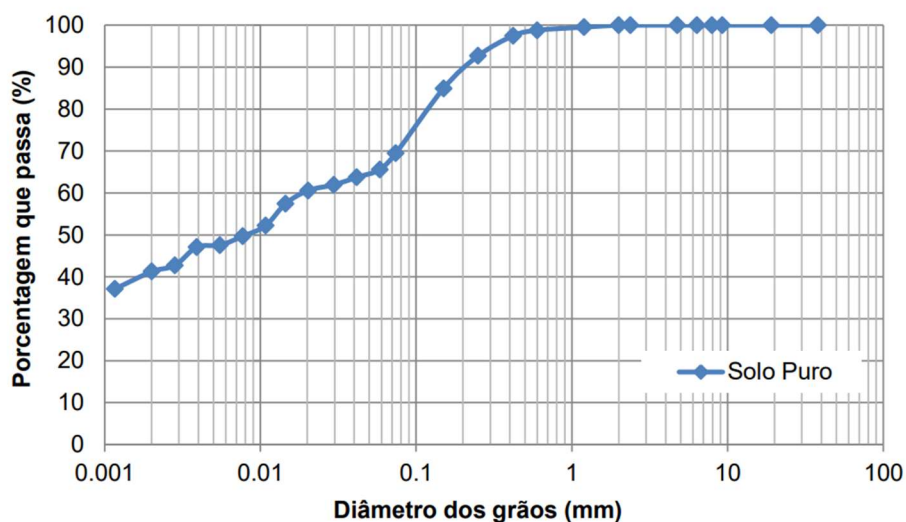


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo puro.

A curva granulométrica que mostra que o solo estudado é composto das seguintes frações: 41,3% de argila, 34,5% de areia e 24,2% de silte. Com base na classificação SUCS, o solo é

categorizado como ML, o que indica ser um tipo de silte com baixa compressibilidade. E segundo a classificação AASHTO, o solo pertence ao grupo A-7-6, cujo comportamento é considerado limitado a inadequado para uso como camada de suporte. Ademais, com base nos estudos desenvolvidos por Carvalho (2019), o solo em questão é classificado como LG', ou seja, solo laterítico argiloso conforme a classificação MCT. Esses solos possuem elevada capacidade de suporte, baixa expansão, média a elevada contração, baixa permeabilidade.

4.2. SERRAGEM DE BAMBU

Abaixo, foram apresentados os resultados do solo não reforçado e o solo reforçado com serragem de bambu em teores de 1,0% e 2,0% nos ensaios de compactação e compressão simples, juntamente com a avaliação da durabilidade desse reforço com o passar do tempo de observação. Além disso, foram abordados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura para análise macroestrutural e ensaio de tração direta para observação do ocorrido com a serragem de bambu após o envelhecimento natural e ação bacteriana.

4.2.1. COMPACTAÇÃO MINI-MCV

Ao analisar os resultados obtidos do ensaio de compactação no solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% da serragem de bambu foi possível plotar as curvas apresentadas na Figura 4.2(a). Nota-se que a adição da serragem ao solo no teor de 1,0% fez com que o compósito apresente peso específico seco aparente um pouco maior. Passou de 19,51 kN/m³ do solo sem reforço para 19,86 kN/m³ do solo reforçado com 1,0% de bambu. Essa mudança não foi considerada tão significativa, bem como o aumento no teor de umidade que passou de 22,54% para 23,62%, ratificando os estudos de Casagrande (2001), que também não encontrou mudanças significativas nos parâmetros ótimos do ensaio de compactação com e sem reforço.

Semelhante ocorreu para os compósitos reforçados com 2,0% da serragem de bambu, que passou de 19,51 kN/m³ para 19,32 kN/m³, onde houve uma redução, porém, mais uma vez, não expressiva. E o teor de umidade ótimo passou de 22,54% para 23,70%. Esses aumentos no teor de umidade, mesmo que pequenos, podem ser explicados pelo fato do bambu ser um material vegetal que absorve água e, portanto, aumenta a quantidade de água em todo o compósito mudando seu comportamento.

Quanto ao índice de vazios, observado na Figura 4.2(b), em consonância com o peso específico, apresentou redução para o solo reforçado com 1,0% e aumento para o solo reforçado com 2,0% de serragem de bambu.

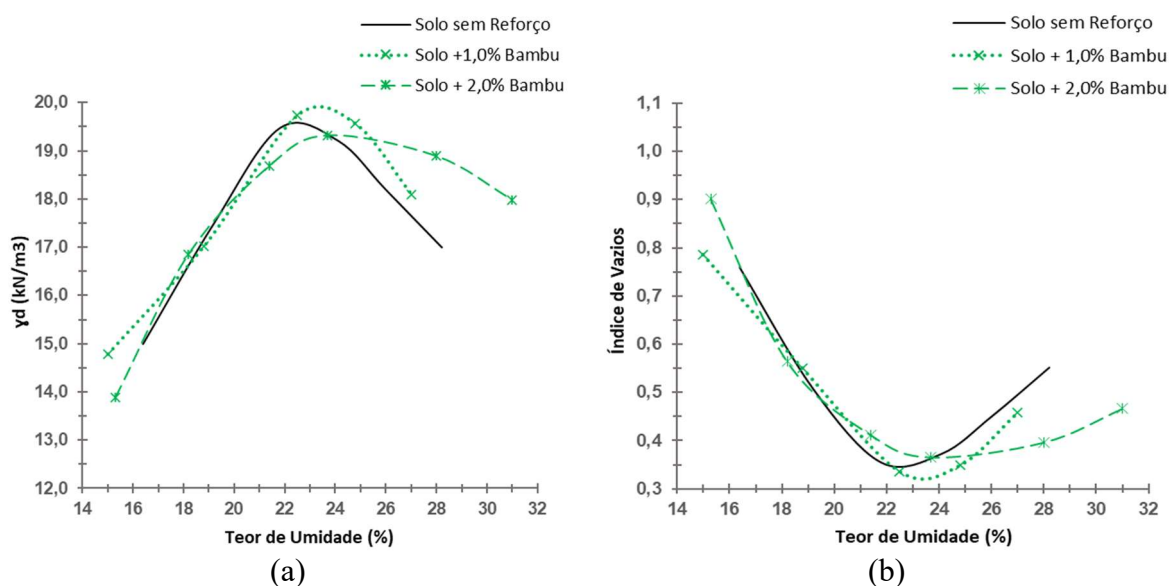


Figura 4.2 - (a) Resultado da compactação do solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu. (b) Índice de vazios do solo sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu.

A seguir, para melhor entendimento, a Tabela 4-1 resume as mudanças ocorridas nos parâmetros de compactação do solo não reforçado e o solo reforçado com a serragem de bambu. Mostra-se, portanto, o aumento da umidade ótima, em ambos os teores de reforço. Mas com relação ao peso específico, não ocorreu conformidade de mudança nos teores analisados, afinal para o teor de 1,0% teve um aumento e o teor de 2,0% redução.

Tabela 4-1 - Resumo dos parâmetros de compactação do solo reforçado sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu.

| Teor de Serragem de Bambu | Umidade Ótima (%) | Varição do teor de umidade ótima em relação ao solo sem reforço (%) | Peso Específico Aparente Seco (kN/m³) | Varição do Peso Específico Aparente Seco em relação ao solo natural (kN/m³) |
|----------------------------------|-------------------|---|---------------------------------------|---|
| Solo sem Reforço | 22,54 | - | 19,51 | - |
| Solo + 1,0% de Serragem de Bambu | 23,62 | + 1,08 | 19,86 | + 0,35 |
| Solo + 2,0% de Serragem de Bambu | 23,70 | + 1,16 | 19,32 | - 0,19 |

4.2.2. COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.3 apresenta os resultados da resistência à compressão obtidos nos ensaios de compressão simples realizados em compósitos reforçados com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu ao longo dos períodos de degradação avaliados. Os períodos de degradação foram observados por um total de 6 meses, com medições realizadas a cada intervalo de 2 meses.

Foi possível observar que, no tempo inicial de 0 meses, a adição de serragem ao solo resultou em um aumento significativo na tensão de pico do solo. A tensão de pico do solo reforçado com 1,0% de serragem passou de 345 kPa para 1400 kPa, enquanto o solo reforçado com 2,0% de serragem atingiu 1392 kPa. Além disso, a deformação de ruptura também se modificou, deixando de ser 1,43% no solo não reforçado para 1,70% no primeiro teor de serragem e 1,86% no segundo teor observado.

No entanto, ao analisar visualmente a curva de tensão versus deformação, nota-se que, diferentemente do comportamento típico das fibras, que apresentam um aumento na resistência pós-pico, a serragem não sustenta altas tensões após o pico. Pelo contrário, ocorreu uma queda na tensão logo após a tensão de ruptura, desempenho também notado por Santos & Casagrande (2023). Esse comportamento pode ser explicado principalmente pelo formato geométrico, composição e área de contato da serragem com a matriz de solo. Afinal, a serragem não consiste em um único filamento, mas sim em uma agregação de fibras de bambu com comprimento pequeno (aproximadamente 10 mm), o que limita sua capacidade de unir os grãos de solo durante o processo de ruptura.

Ao analisar os compósitos de bambu expostos ao natural, foi possível observar graficamente que a tensão máxima de ruptura diminuiu notavelmente ao longo dos meses. No entanto, é importante ressaltar que, mesmo com essa redução, a tensão de ruptura nos compósitos ainda é maior do que a tensão máxima do solo sem reforço. A exceção ocorre nos compósitos com 1,0% de serragem de bambu testados após 6 meses, nos quais houve uma queda de 8 kPa na tensão de pico em relação ao solo não reforçado.

Durante do período de observação, também é evidente uma diminuição na rigidez inicial dos compósitos. Isso pode ser observado pelo deslocamento inicial das curvas, que inicialmente se encontravam mais à esquerda em comparação com a curva do solo sem reforço, mas ao longo

do tempo, passaram a se deslocar para a direita, indicando uma redução na rigidez inicial dos compósitos. Esse comportamento pode ser atribuído à ação de fungos e bactérias que atuam na degradação do bambu durante a exposição de modo que provoca perda de massa do materiais..

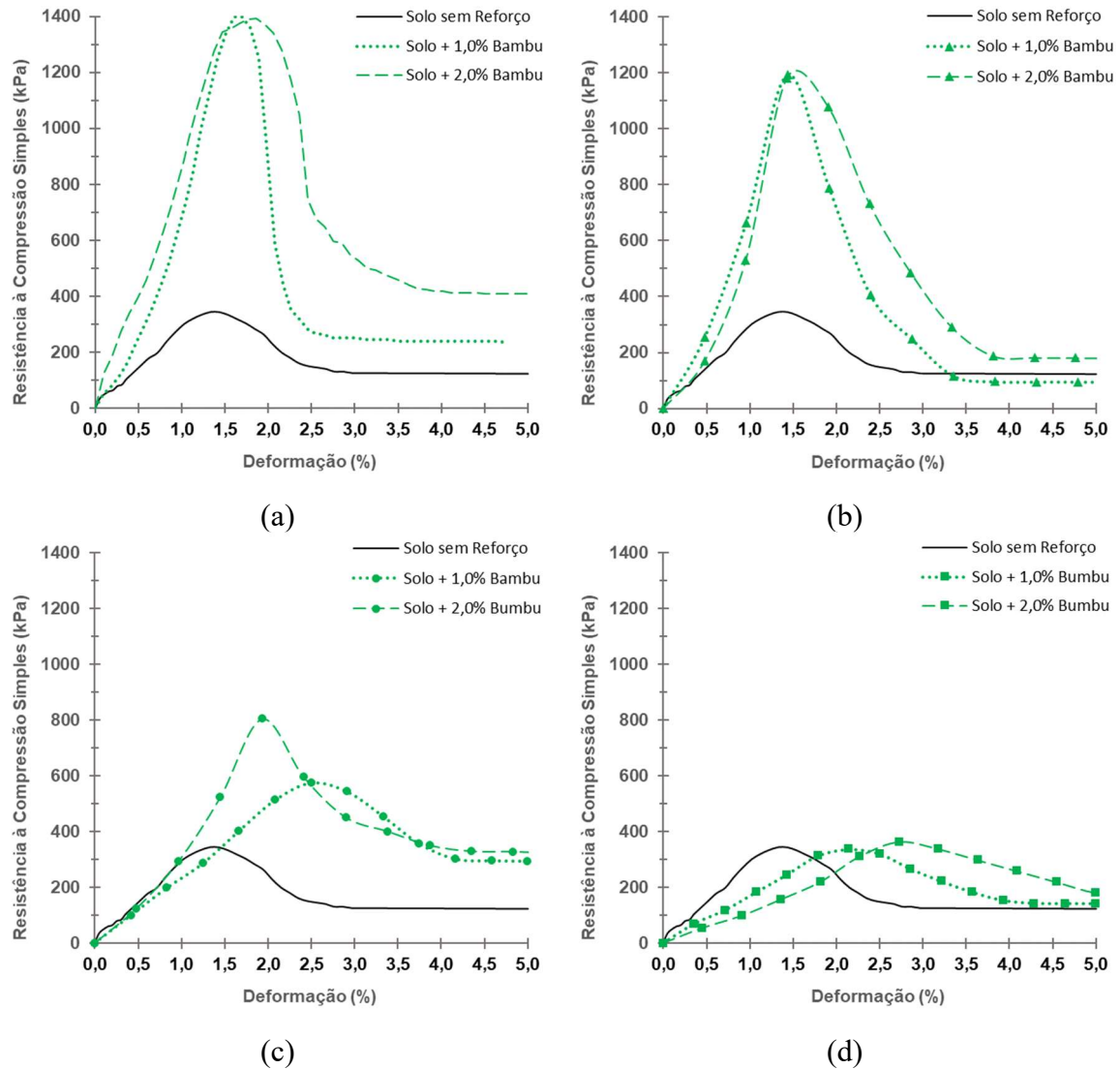


Figura 4.3 – Resultados do ensaio de compressão simples em amostras não reforçadas e reforçadas com serragem de bambu nos tempos de exposição de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses.

De posse das imagens dos corpos de prova rompidos no ensaio de compressão simples, representadas na Figura 4.4, pode-se observar que a adição de serragem de bambu influenciou a forma do plano de ruptura. Essa influência foi evidente tanto nos diferentes teores de serragem utilizados quanto no decorrer do tempo de exposição.

O plano de ruptura inclinado à 45° foi observado nos corpos de prova não reforçados, (Figura 4.4(a)), mas, posteriormente, com a adição da serragem ocorre uma transição para planos de

ruptura do tipo cônico e colunar, (Figura 4.14(b) e Figura 4.1(c)). Essa mudança na forma do plano de ruptura foi associada à interação entre a serragem e o solo. E, posteriormente (Figura 4.1(d) a Figura 4.1(i)) o plano de ruptura dos compósitos passou a ser do tipo colunar nos demais tempos estudados.

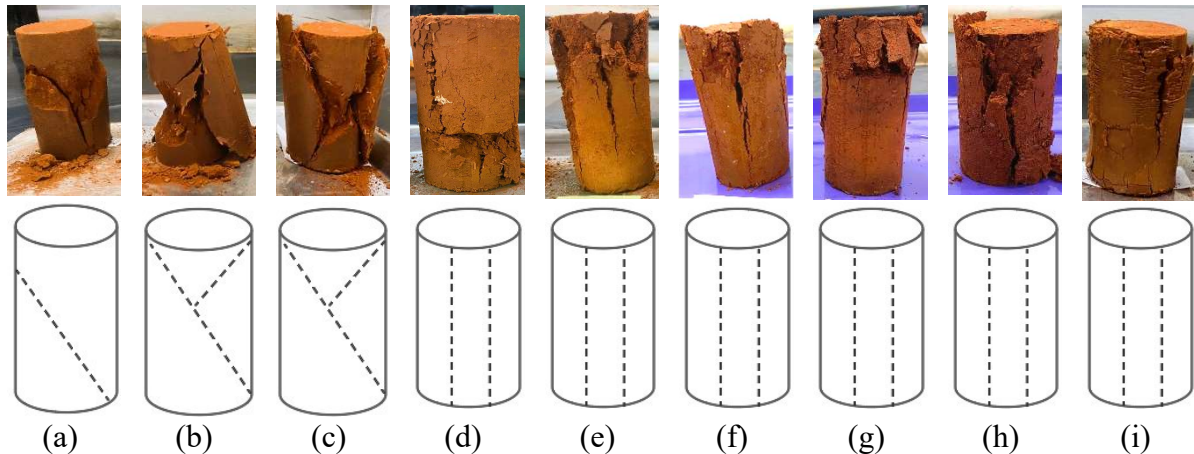


Figura 4.4 – Planos de ruptura dos corpos de prova com serragem de bambu: (a) Solo sem reforço em 0 meses; (b) Solo + 1,0% em 0 meses; (c) Solo + 2,0% em 0 meses; (d) Solo + 1,0% em 2 meses; (e) Solo + 2,0% em 2 meses; (f) Solo + 1,0% em 4 meses; (g) Solo + 2,0% em 4 meses; (h) Solo + 1,0% em 6 meses; (i) Solo + 2,0% em 6 meses.

A Tabela 4-2 permite analisar as tensões máximas, suas respectivas deformações axiais de ruptura ao longo do tempo de exposição das amostras reforçadas com serragem de bambu. Também contém a comparação desses resultados com o solo não reforçado. A fim de compreender melhor o comportamento dos materiais de reforço após o pico, nessa mesma tabela foi estabelecido um valor de deformação de 5%. Isso permitiu observar os valores de tensão correspondentes e avaliar o desempenho dos materiais após a ruptura e, mais uma vez, compará-lo com o valor de tensão na deformação de 5% do solo não reforçado.

Tabela 4-2 - Resultados do ensaio de Compressão simples no solo não reforçado e reforçado com 1,0% e 2,0% de serragem de bambu.

| Tipo de Amostra | Tempo (meses) | Tensão máxima (kPa) | Varição da tensão máxima em relação ao solo sem reforço (kPa) | Deformação de ruptura (%) | Varição da deformação de ruptura em relação ao solo sem reforço (%) | Tensão na deformação fixada em 5% (kPa) | Varição da tensão na deformação fixada em 5% em relação ao solo sem reforço (kPa) |
|----------------------------------|---------------|---------------------|---|---------------------------|---|---|---|
| Solo sem Reforço | 0 | 345 | - | 1,43 | - | 123 | - |
| Solo + 1,0% da Serragem de Bambu | 0 | 1400 | + 1055 | 1,70 | + 0,27 | 238 | + 115 |
| | 2 | 1191 | + 846 | 1,44 | + 0,01 | 95 | - 28 |
| | 4 | 575 | + 230 | 2,50 | + 1,07 | 294 | + 171 |
| | 6 | 337 | - 8 | 2,14 | + 0,71 | 143 | + 20 |
| Solo + 2,0% da Serragem de Bambu | 0 | 1392 | + 1047 | 1,86 | + 0,43 | 408 | + 285 |
| | 2 | 1078 | + 733 | 1,91 | + 0,48 | 180 | + 57 |
| | 4 | 803 | + 458 | 1,93 | + 0,50 | 322 | + 199 |
| | 6 | 364 | + 19 | 2,73 | + 1,30 | 180 | + 57 |

4.2.3. TRAÇÃO DIRETA

Os valores médios de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura, obtidos de 15 amostras de serragem de bambu, foram registrados na Tabela 4-3. Essas amostras foram submetidas a diferentes períodos de exposição analisados, considerando uma área de serragem de 0,30 mm² obtida pelas imagens no MEV. Os desvios-padrões correspondentes a esses valores médios também são apresentados na tabela, indicados entre parênteses.

O valor médio da resistência à tração da serragem de bambu, sem sofrer degradação, foi medido em 129,54 MPa, o que está de acordo com os resultados obtidos por Ghavami & Marinho (2001), que encontraram uma média de resistência de 137,51 MPa. No entanto, em relação ao módulo de elasticidade, os resultados deste estudo mostraram um valor menor, de 2,08 GPa, em contraste com o valor observado pelos autores, que foi de 17,49 GPa. Além disso, os valores de alongamento na ruptura também foram diferentes dos obtidos por eles, que apresentaram aproximadamente 1,0%, enquanto neste estudo o valor foi de 6,51%.

Tabela 4-3 - Resultados médios e desvios-padrões obtidos no ensaio de tração direta na serragem de bambu.

| Tempo de Exposição (meses) | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Alongamento na Ruptura (%) |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 0 | 129,54 (17,97) | 2,08 (0,43) | 6,51 (1,27) |
| 2 | 96,84 (8,06) | 1,84 (0,52) | 5,85 (1,63) |
| 4 | 66,84 (13,58) | 1,97 (0,41) | 3,68 (1,15) |
| 6 | 28,35 (8,17) | 1,84 (0,76) | 1,37 (0,57) |

Analisando os valores ao longo do tempo, ficou evidente que ocorreu uma diminuição na resistência à tração, no módulo de elasticidade e no alongamento na ruptura da serragem de bambu. Em relação à resistência à tração, ocorreu uma perda de 101,19 MPa durante o período total, enquanto o módulo de elasticidade registra uma diminuição de 0,24 GPa, e o alongamento na ruptura apresenta uma perda de 5,14%.

É relevante notar que ocorreram perdas nos parâmetros observados em todos os intervalos de tempo, e essas diminuições aumentaram gradualmente à medida que o tempo avançava. Além disso, as perdas continuaram acontecendo, tal como visto no ensaio de compressão simples, o que justifica o comportamento mecânico desses compósitos.

4.2.4. MEV

A Figura 4.5 apresenta as mudanças morfológicas da serragem de bambu ao longo do tempo de exposição. É importante ressaltar que as serragens analisadas nos períodos de 2, 4 e 6 meses foram retiradas dos corpos de prova, lavadas em peneira para separação do solo, conforme descrito na metodologia mencionada na seção 3.2.9.

Além disso, é relevante destacar que a serragem analisada foi aquela que possivelmente permaneceu no compósito devido a uma área de seção transversal inicialmente maior. Portanto, devido à ampla variedade de dimensões e formatos das serragens, quaisquer conclusões sobre alterações na área da seção transversal só poderiam ser feitas se uma mesma amostra de serragem fosse analisada ao longo desse período.

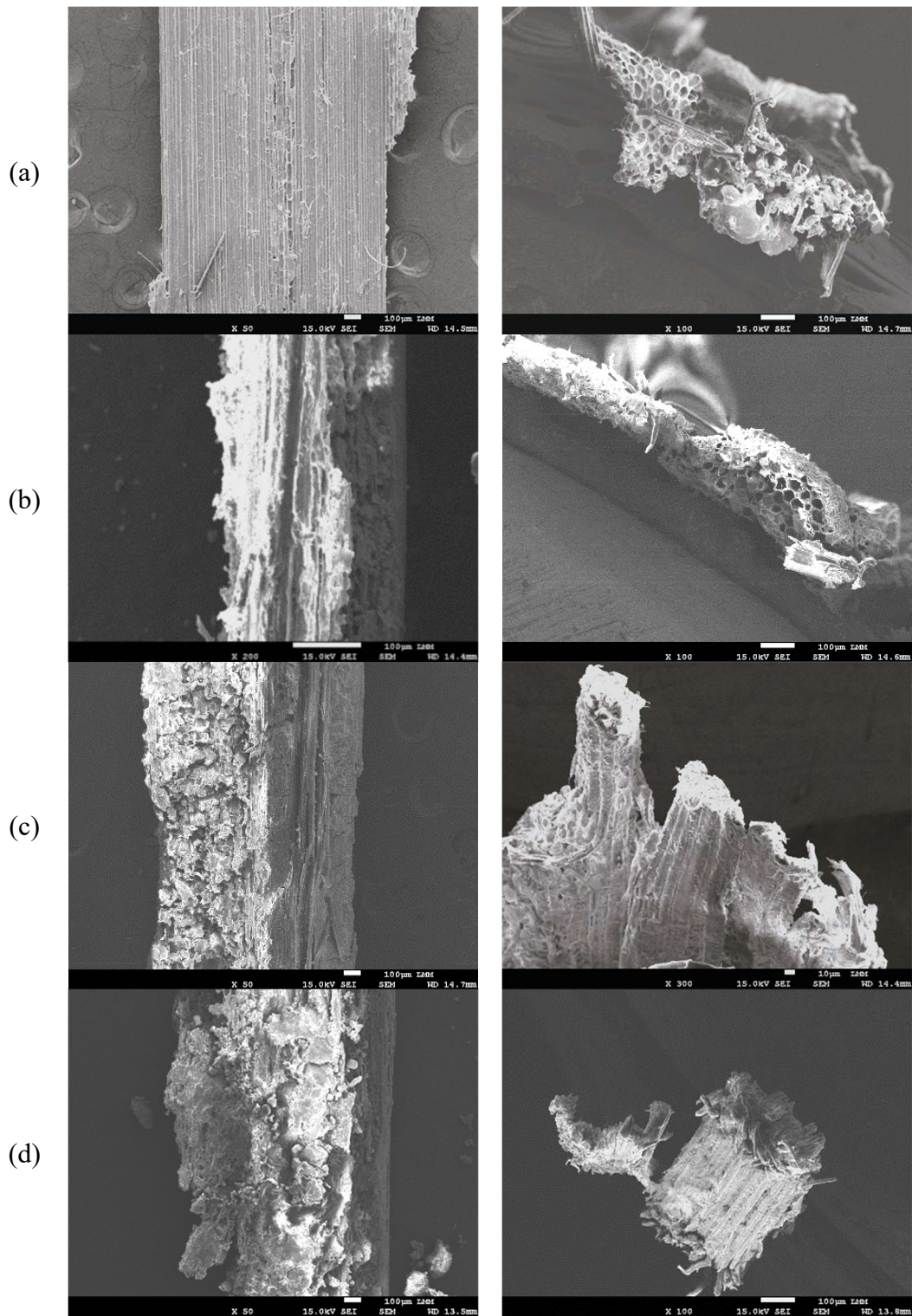


Figura 4.5 - Morfologia da superfície e seção transversal da serragem de bambu ao longo do tempo: (a) 0 meses, (b) 2 meses; (c) 4 meses e (d) 6 meses.

Inicialmente, no tempo de 0 meses é possível observar a formação fibrosa que a serragem é composta. Afinal é um material residual da produção de utensílios de bambu, que não possui uma única fibra, mas sim um conjunto dessas. Percebe-se que esse material não tem geometria

definida, porém se assemelha, a geometria de um paralelepípedo de com espessura de cerca de 0,1 mm a 0,3 mm, conforme informado durante a análise morfológica.

No que se refere à superfície externa longitudinal da serragem, observa-se que inicialmente ela apresentava uma textura lisa, com fibras bem definidas. Entretanto, à medida que o tempo de exposição passou, essa superfície tornou-se rugosa. Essa rugosidade aumentou progressivamente devido à degradação e a possível ação natural de fungos e bactérias. Esses resultados estão em concordância com o que foi relatado por Dichiela et al. (2013), que afirmam que a matriz do solo desempenha o papel de suporte físico para a aderência microbiana, além de proporcionar condições distintas de aeração e disponibilidade de nutrientes, permitindo a coexistência de milhares de microrganismos com habilidades metabólicas diversas.

No que diz respeito à seção transversal, é possível visualizar a forma das fibras que compõem a serragem, e ao longo do tempo, pode-se observar um potencial perda de massa na parede celular. Devido à estrutura da serragem, é desafiador determinar os efeitos decorrentes desse processo de degradação. No entanto, é evidente a perda de massa, especialmente aos 6 meses, como observado por Silveira & Casagrande (2021) em relação às fibras de curauá que constaram perdas mais pronunciadas a partir de 4 meses de exposição.

4.3. FIBRAS DE COCO

A seguir, estão os resultados da análise comparativa entre o solo sem reforço e o solo reforçado com fibras de coco em concentrações de 1,0% e 2,0% nos ensaios de compactação e compressão simples. Além disso, foi realizada uma avaliação da durabilidade ao longo do período de observação. Também estão apresentados os resultados dos testes de microscopia eletrônica de varredura para examinar a estrutura em larga escala e ensaio de tração direta para observar as transformações ocorridas em termos de resistência nas fibras de coco após o envelhecimento natural.

4.3.1. COMPACTAÇÃO MINI-MCV

Com os resultados obtidos do ensaio de compactação no solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% das fibras de coco foi possível plotar as curvas apresentadas na Figura 4.6(a). Nota-se que a adição das fibras 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.

Quanto ao índice de vazios, observado na Figura 4.6 (b), em consonância com o peso específico, apresentou aumento para ambos os teores de reforços com as fibras de coco. Comportamento esperado afinal com adição de fibras, o compósito fica mais poroso e, portanto, com maior quantidade de vazios.

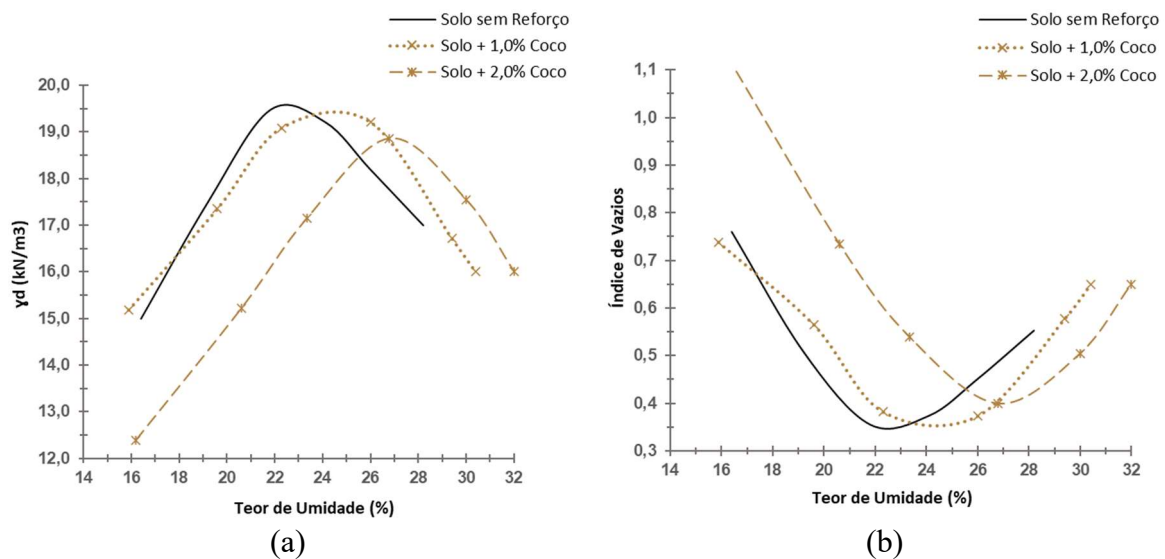


Figura 4.6 - Resultado da compactação do solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco.
(b) Índice de vazios do solo sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco.

Aqui vale destacar a dificuldade encontrada na compactação dos solos reforçados com 2,0% de fibra de coco. Devido à quantidade relativamente alta de material de reforço, a trabalhabilidade da mistura fica limitada, tornando por vezes desafiadora a obtenção de uma homogeneização regular. Em contraste, essa dificuldade não é tão expressiva nos compósitos com um teor de 1,0% de fibra de coco. Essa limitação já foi abordada na literatura por Pinto (2007), que também observou que as amostras com adição de fibras vegetais requerem um esforço maior na compactação em comparação com as amostras sem fibras. Bem como, na pesquisa

desenvolvida por Reis (2022), o autor relata que já no teor de 1,5% houve dificuldade de homogeneização e as fibras se aglomeraram em alguns pontos. Isso confirma a influência das fibras durante a confecção dos corpos de prova, indicando que elas absorvem parte da energia aplicada durante a compactação.

A Tabela 4-4 resume as mudanças ocorridas nos parâmetros de compactação do solo não reforçado e o solo reforçado com fibra de coco. Mostra-se, portanto, o aumento da umidade ótima, em ambos os teores de reforço. E com relação ao peso específico, uma redução gradual conforme aumento da quantidade de fibra.

Tabela 4-4 - Resumo dos parâmetros de compactação do solo reforçado sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco.

| Teor de Fibra de Coco | Umidade Ótima (%) | Variação em relação ao solo sem reforço do teor de umidade ótima (%) | Peso Específico Aparente Seco (kN/m³) | Variação em relação ao solo natural Peso Específico Aparente Seco (kN/m³) |
|------------------------------|--------------------------|---|---|---|
| Solo sem Reforço | 22,54 | - | 19,51 | - |
| Solo + 1,0% de Fibra de Coco | 24,82 | + 2,28 | 19,21 | - 0,30 |
| Solo + 2,0% de Fibra de Coco | 26,80 | + 4,26 | 18,86 | - 0,65 |

4.3.2. COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.7 apresenta, em organização semelhante as apresentadas para a serragem de bambu, as curvas dos resultados da resistência à compressão simples do solo sem reforço e dos compósitos reforçados com 1,0% e 2,0% de fibras de coco ao longo dos períodos de degradação avaliados.

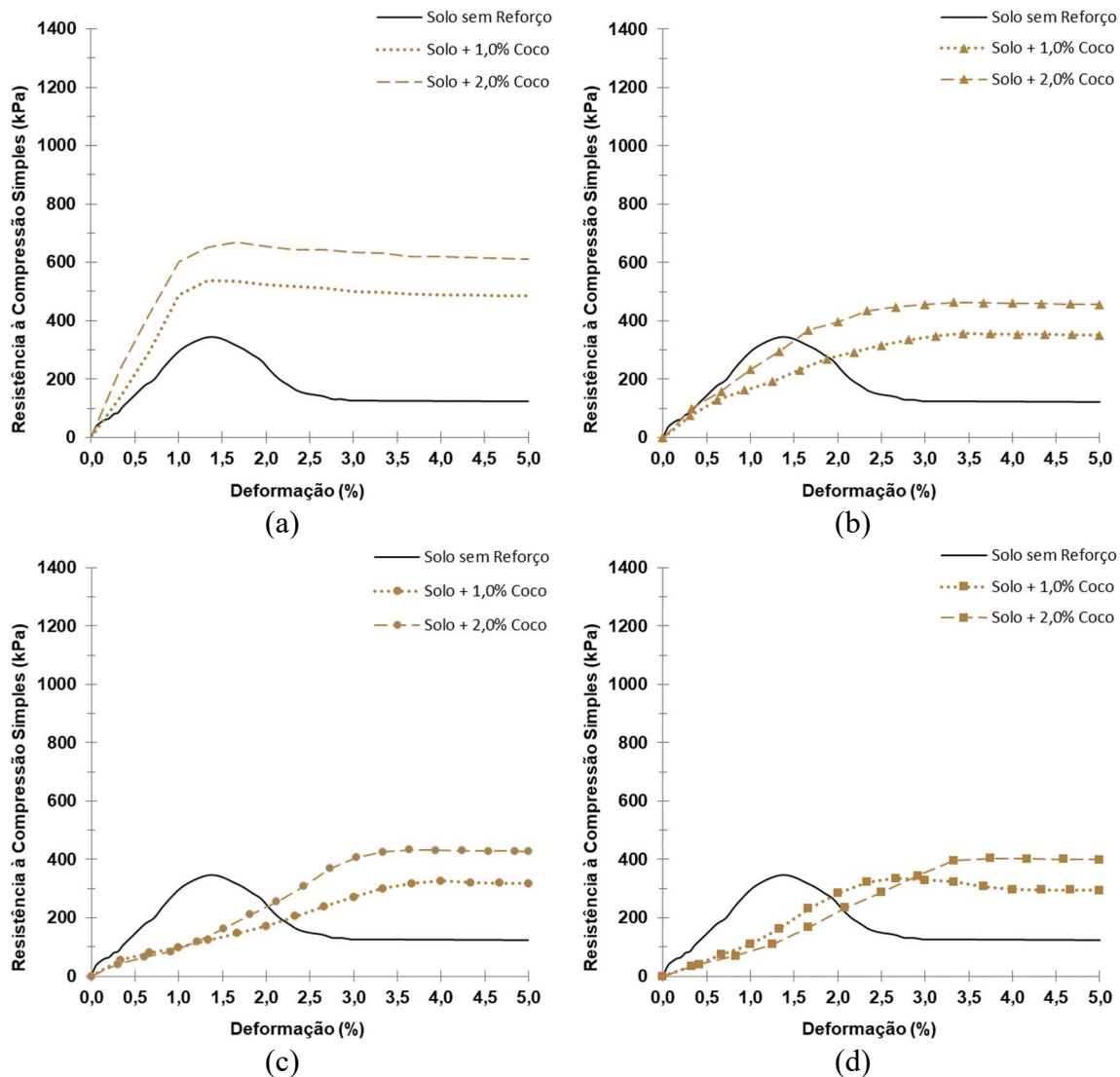


Figura 4.7 - Resultados do ensaio de compressão simples em amostras não reforçadas e reforçadas com fibras de coco nos tempos de exposição de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses.

Nota-se que, no tempo inicial de 0 meses, a adição das fibras de coco ao solo 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.

Quanto ao comportamento na exposição ao longo do tempo, foi notável que gradualmente ocorreu uma perda de tensão máxima nos compósitos reforçados com coco. Porém, mesmo com essa redução, a tensão de ruptura nos compósitos degradados ainda foi maior do que a tensão máxima do solo sem reforço. A exceção ocorre nos compósitos com 1,0% de fibras de coco testados após 4 e 6 meses, nos quais houve uma queda de 19 kPa e 10 kPa, respectivamente, com relação ao solo não reforçado.

É possível notar que a maior redução na resistência ocorre nos primeiros 2 meses de degradação, onde a diminuição na resistência foi mais significativa. No caso do solo reforçado com 1,0% de coco, a resistência cai de 537 kPa no tempo inicial para 357 kPa após 2 meses. Já para o solo reforçado com 2,0% de fibras de coco, a resistência diminui de 668 kPa para 464 kPa no mesmo período. Após esse período, continuou havendo degradação, mas de forma menos expressiva. Esses resultados estão em consonância com a pesquisa realizada por Silveira (2018), que comparou compósitos reforçados com duas fibras vegetais diferentes (curauá e sisal) e observou que a perda de comportamento endurecimento foi mais acentuada no compósito reforçado com fibras de curauá, registrando uma grande redução já nos primeiros 2 meses de análise.

As imagens dos compósitos com as fibras de coco rompidos no ensaio de compressão simples foram apresentadas na Figura 4.8. Além de modificar o plano de cisalhamento também se verificou que a inclusão de fibras conteve o estilhaçamento do solo antes observado quando não havia material de reforço. Os corpos de prova não reforçados, foi observado um plano de ruptura inclinado, como ilustrado na Figura 4.8(a).

No entanto, com a adição da fibra de coco, ocorreu uma transição para planos de ruptura cônicos e colunares, conforme mostrado nas Figura 4.8(b) a (e). Essa mudança na forma do plano de ruptura está relacionada à interação entre a fibra e o solo. Posteriormente, nos demais tempos estudados, as Figura 4.8(f) a (i) mostram que o plano de ruptura nos compósitos passou a ser do tipo colunar.

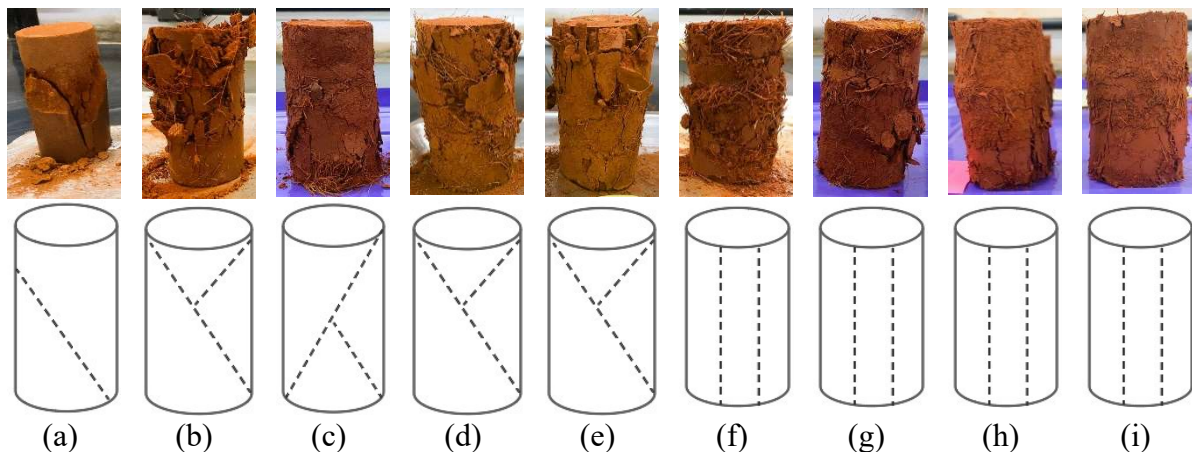


Figura 4.8 - Planos de ruptura dos corpos de prova com fibras de coco: (a) Solo sem reforço em 0 meses; (b) Solo + 1,0% em 0 meses; (c) Solo + 2,0% em 0 meses; (d) Solo + 1,0% em 2 meses; (e) Solo + 2,0% em 2 meses; (f) Solo + 1,0% em 4 meses; (g) Solo + 2,0% em 4 meses; (h) Solo + 1,0% em 6 meses; (i) Solo + 2,0% em 6 meses.

A Tabela 4-5 exibe numericamente um resumo do comportamento à compressão não confinada do solo reforçado com fibras de coco. Assim como na tabela resumo dos compósitos reforçados com serragem de bambu, foi possível analisar as tensões máximas, a deformações axiais de ruptura, a tensão na deformação de 5%, conforme a evolução do tempo e comparando esses resultados com o solo sem reforço.

Tabela 4-5 - Resultados do ensaio de Compressão simples no solo não reforçado e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de coco.

| Tipo de Amostra | Tempo (meses) | Tensão máxima (kPa) | Varição da tensão máxima em relação ao solo sem reforço (kPa) | Deformação de ruptura (%) | Varição da deformação de ruptura em relação ao solo sem reforço (%) | Tensão na deformação fixada em 5% (kPa) | Varição da tensão na deformação fixada em 5% em relação ao solo sem reforço (kPa) |
|--------------------------------------|---------------|---------------------|---|---------------------------|---|---|---|
| Solo sem Reforço | 0 | 345 | - | 1,43 | - | 123 | - |
| Solo + 1,0% de Fibras de Coco | 0 | 537 | + 192 | 1,67 | + 0,24 | 484 | + 361 |
| | 2 | 357 | + 12 | 3,44 | + 2,01 | 351 | + 228 |
| | 4 | 326 | - 19 | 4,00 | + 2,57 | 318 | + 195 |
| | 6 | 335 | - 10 | 2,67 | + 1,24 | 294 | + 171 |
| Solo + 2,0% de Fibras de Coco | 0 | 668 | + 323 | 1,67 | + 0,24 | 612 | + 489 |
| | 2 | 464 | + 119 | 3,33 | + 1,90 | 456 | + 333 |
| | 4 | 433 | + 88 | 3,64 | + 2,21 | 427 | +304 |
| | 6 | 404 | + 59 | 3,75 | + 2,32 | 399 | + 276 |

4.3.3. TRAÇÃO DIRETA

Na Tabela 4-6 estão registrados os valores médios de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura, obtidos a partir de 15 amostras de fibras de coco que foram submetidas aos diferentes períodos de exposição analisados, sendo a área das fibras adotada de 0,071 mm² obtida no MEV. Junto a esses valores médios, são apresentados os desvios-padrões correspondentes (expressos entre parênteses).

O valor médio da resistência à tração das fibras de coco, no tempo 0, 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%.

Tabela 4-6 – Resultados médios e desvios-padrões obtidos no ensaio de tração direta em fibras de coco.

| Tempo de Exposição (meses) | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Alongamento na Ruptura (%) |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 0 | 130,23 (34,53) | 0,78 (0,42) | 21,94 (5,54) |
| 2 | 87,43 (7,33) | 0,46 (0,10) | 20,01 (4,30) |
| 4 | 72,05 (7,01) | 0,45 (0,08) | 16,84 (4,53) |
| 6 | 74,23 (2,22) | 0,44 (0,10) | 17,39 (2,82) |

Analisando os valores ao longo do tempo, ficou evidente que ocorreu uma diminuição na resistência à tração, no módulo de elasticidade e no alongamento na ruptura das fibras de coco. Em relação à resistência à tração, ocorreu uma perda de 56 MPa durante o período total, enquanto o módulo de elasticidade registrou uma diminuição de 0,34 GPa, e o alongamento na ruptura apresentou uma perda de 4,55%.

No entanto, da mesma forma para o bambu, é importante ressaltar que as perdas mais significativas são observadas nos primeiros meses. Essa tendência é consistente com os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples, onde o mesmo comportamento foi constatado.

4.3.4. MEV

Assim como feito para a serragem de bambu, também foram obtidas imagens da estrutura microscópica das fibras de coco conforme o passar dos 6 meses, (Figura 4.9). Porém, agora o zoom das imagens foi maior, afinal trata-se de um único finamento e não de um conjunto como era o caso da serragem. Anteriormente o zoom foi menor justamente para poder observar todo o conjunto do material de reforço.

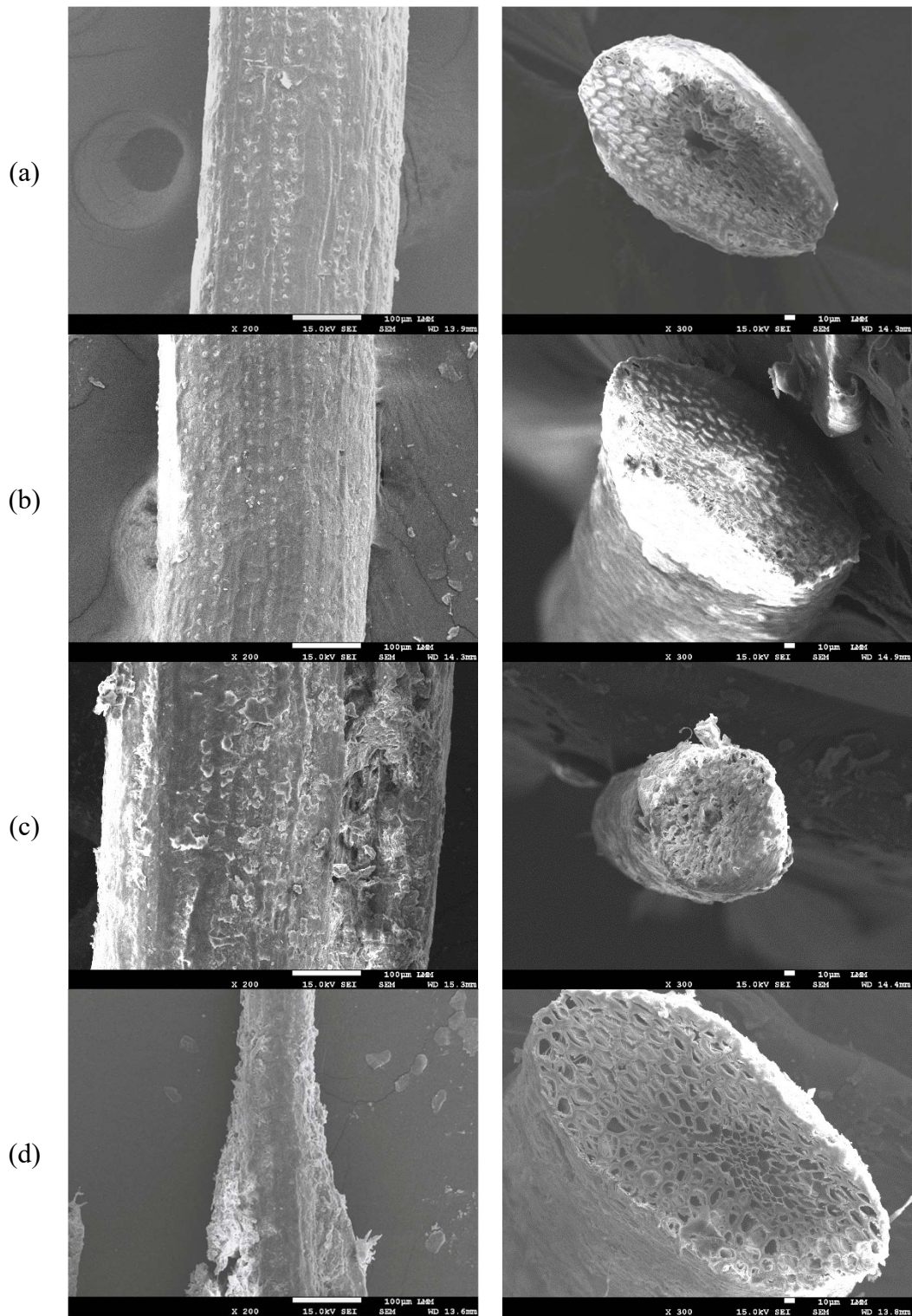


Figura 4.9 - Morfologia da superfície e seção transversal da fibra de coco ao longo do tempo: (a) 0 meses, (b) 2 meses; (c) 4 meses e (d) 6 meses.

Nas imagens das fibras de coco, foi possível observar claramente a sua morfologia, incluindo as fibrocélulas formadas pelas paredes celulares e o lúmen. Essas imagens são consistentes com as descritas no estudo de Anggraini et al. (2015), onde segundo os autores os pontos brancos ordenados encontrados na superfície da fibra foram identificados como material rico em sílica.

Além disso, de acordo com as imagens MEV do mesmo estudo, as fibras de coco, devido à sua superfície enrugada, fortalecem o solo por meio do atrito entre a fibra e as partículas do solo. Essa característica pode explicar a maior resistência proporcionada pelas fibras de coco ao solo tropical estudado.

Foi interessante notar que, com o passar do tempo, há pouca perda de massa e poucas alterações na estrutura da fibra, tanto na superfície longitudinal quanto na seção transversal. No entanto, a partir de 4 meses, algumas mudanças começam a se tornar mais evidentes. Por exemplo, a superfície da fibra começa a apresentar sinais de deterioração, com a perda de massa na parede celular secundária se tornando mais significativa. De acordo com Silveira & Casagrande (2021), essa é a parte mais afetada pelos efeitos do envelhecimento natural, sendo que o ataque de fungos e bactérias é o principal responsável pela degradação da fibra, uma vez que a celulose é o componente principal dessa estrutura. A perda da parede secundária, que desempenha um papel crucial no comportamento mecânico da fibra, pode ter possíveis consequências nas propriedades mecânicas da fibra.

4.4. FIBRAS DE AÇAÍ

A seguir, são apresentados os resultados da análise comparativa entre o solo sem reforço e o solo reforçado com fibras de açaí em concentrações de 1,0% e 2,0% nos ensaios de compactação e compressão simples. Bem como a avaliação da durabilidade ao longo do período de 6 meses, os resultados dos testes de microscopia eletrônica de varredura e os resultados do ensaio de tração direta nas fibras.

4.4.1. COMPACTAÇÃO MINI- MCV

Ao analisar os resultados obtidos a partir do ensaio de compactação no solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% das fibras de açaí foi possível plotar as curvas apresentadas na Figura 4.10. Nota-se que a adição dessas fibras 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 a 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.

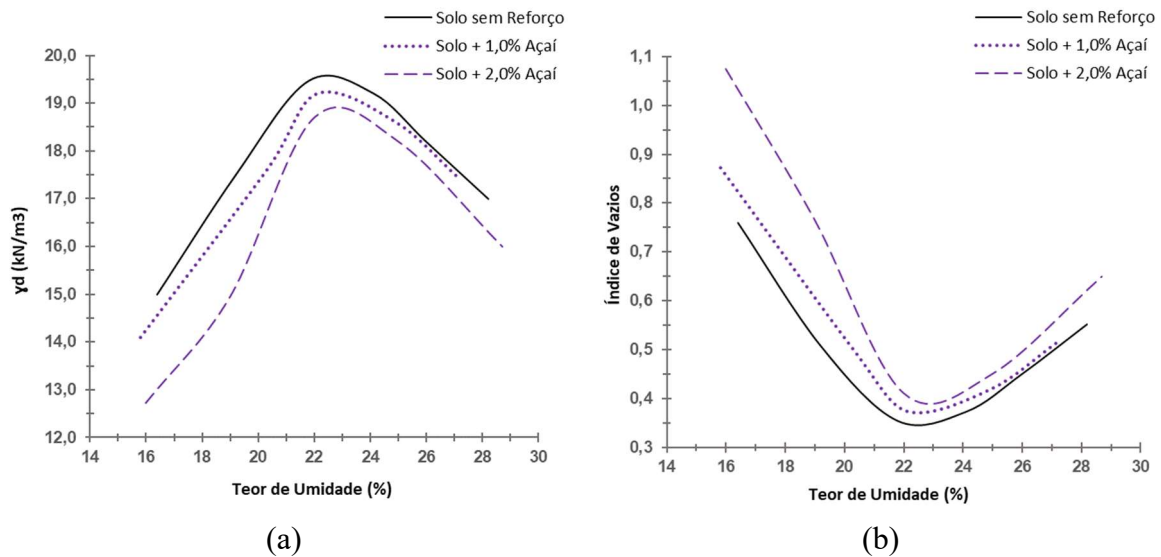


Figura 4.10 - Resultado da compactação do solo sem reforço e solo reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de açaí.
(b) Índice de vazios do solo sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de açaí.

Observa-se um aumento no índice de vazios do solo com a adição de fibras, sendo de 0,36 para o solo argiloso tropical, 0,380 para o solo + 1,0% de açaí e 0,41 para o solo + 2,0% de fibra. Suave incremento ocasionado pela diferença entre o diâmetro das fibras e o diâmetro médio das partículas do solo. As fibras, por possuírem um diâmetro superior às partículas do solo, geram uma desorganização na estrutura do compósito solo-fibra, aumentando os vazios existentes. Em resumo a Tabela 4-7 apresenta os parâmetros de compactação do solo reforçado com fibras de açaí e a variação em relação ao solo sem reforço.

Tabela 4-7 - Resumo dos parâmetros de compactação do solo reforçado sem reforço e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibras de aço

| Teor de Fibra de Açaí | Umidade Ótima (%) | Varição em relação ao solo sem reforço do teor de umidade ótima (%) | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Varição em relação ao solo natural Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) |
|------------------------------|-------------------|---|--|---|
| Solo sem Reforço | 22,54 | - | 19,51 | - |
| Solo + 1,0% de Fibra de Açaí | 22,63 | + 0,09 | 19,20 | - 0,31 |
| Solo + 2,0% de Fibra de Açaí | 23,02 | + 0,48 | 18,78 | - 0,73 |

4.4.2. COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.11 mostra as curvas que representam os resultados da resistência à compressão simples do solo sem reforço e dos compósitos reforçados com 1,0% e 2,0% de fibras de aço durante os diferentes períodos de degradação analisados.

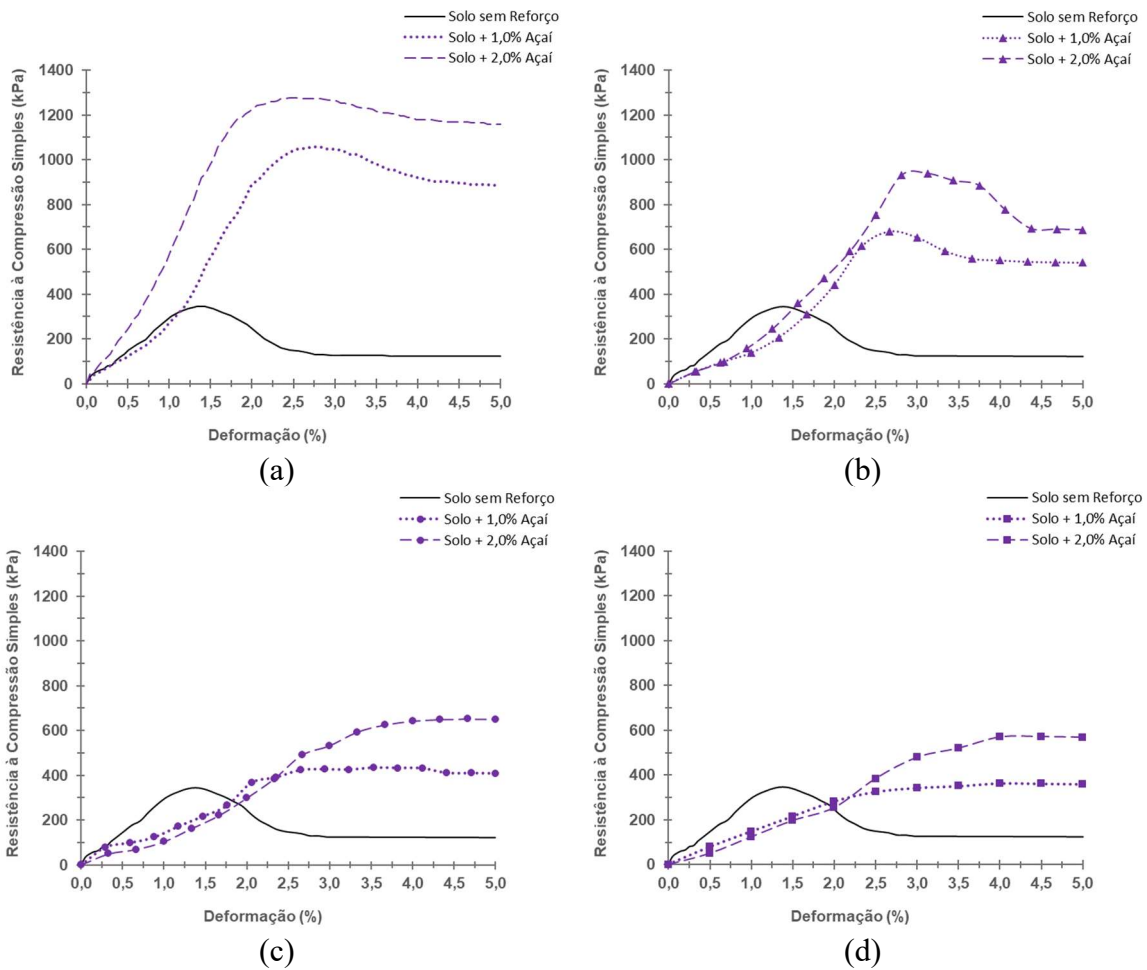


Figura 4.11 - Resultados do ensaio de compressão simples em amostras não reforçadas e reforçadas com fibras de açaí nos tempos de exposição de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses.

Ao analisar o período inicial de 0 meses, foi 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 1059 kPa 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.

Quanto ao comportamento ao longo do tempo de exposição, foi evidente que ocorreu uma redução gradual na tensão máxima nos compósitos reforçados com fibras de açaí. No entanto, mesmo com essa diminuição, a tensão de ruptura nos compósitos degradados ainda é maior do que a tensão máxima do solo sem reforço, para ambos os teores analisados e em todos os períodos de análise considerados. Assim como nas fibras de coco, foi possível notar que a maior redução na resistência ocorre nos primeiros 2 meses de degradação, onde a diminuição na resistência é mais significativa. A partir de 4 meses até 6 meses, as mudanças foram menos acentuadas.

No caso do solo reforçado com 1,0% de fibras de açaí, observou-se uma redução na resistência de pico ao longo do tempo. Após 2 meses, a resistência diminuiu de 1059 kPa, no início, para 681 kPa. Da mesma forma, para o solo reforçado com 2,0% de fibras de açaí, a resistência inicial de 1275 kPa diminuiu para 939 kPa após 2 meses. Posteriormente, a degradação continua, mas de maneira menos acentuada. Após 4 meses, os compósitos com 1,0% apresentam uma resistência máxima de 432 kPa, enquanto aqueles com 2,0% possuem uma resistência de pico de 652 kPa. Após 6 meses, a resistência diminuiu para 364 kPa no caso do primeiro teor e para 572 kPa no caso do segundo teor.

Esses resultados estão em concordância com o estudo conduzido por Lopes (2019), que investigou as fibras de açaí expostas a condições climáticas e ao tempo por até 5 meses. O estudo constatou a perda das propriedades mecânicas das fibras e, conseqüentemente, uma redução na resistência dos compósitos solo-fibra. No entanto, as perdas de resistência não foram significativas, alcançando uma redução máxima de 30%.

As imagens abaixo mostram alguns dos compósitos reforçados com fibras de açaí após o ensaio de compressão simples, Figura 4.12. Assim como observado para as fibras de coco, foi possível constatar que a inclusão das fibras de açaí impediu o estilhaçamento do solo que era observado quando não havia reforço. Com a adição das fibras de açaí e o aumento do tempo, ocorreu uma transição para planos de ruptura cônicos e colunares, seguidos por uma ruptura do tipo colunar.

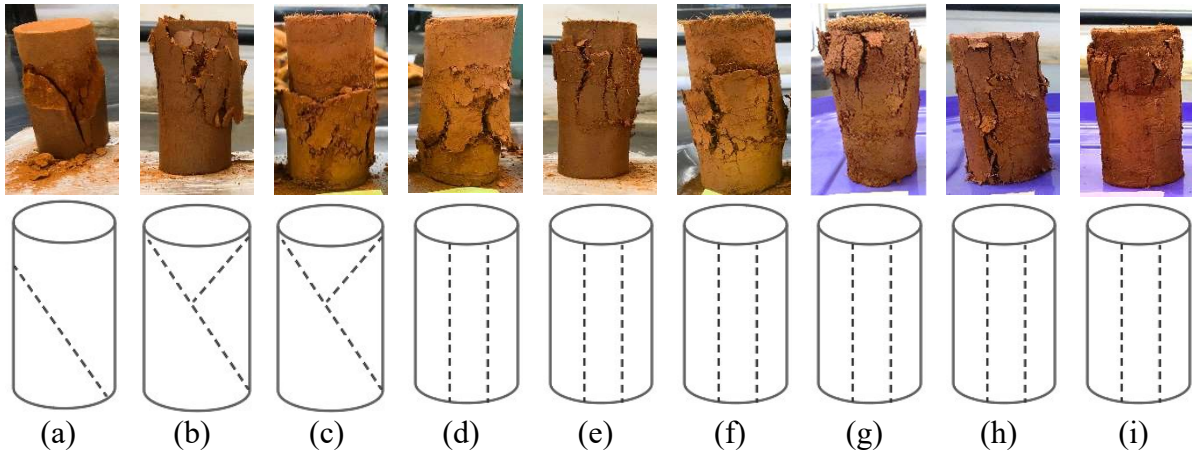


Figura 4.12 - Planos de ruptura dos corpos de prova com fibras de açaí: (a) Solo sem reforço em 0 meses; (b) Solo + 1,0% em 0 meses; (c) Solo + 2,0% em 0 meses; (d) Solo + 1,0% em 2 meses; (e) Solo + 2,0% em 2 meses; (f) Solo + 1,0% em 4 meses; (g) Solo + 2,0% em 4 meses; (h) Solo + 1,0% em 6 meses; (i) Solo + 2,0% em 6 meses.

Com base na Tabela 4-8 foi possível realizar uma análise quantitativa do comportamento de compressão não confinada do solo reforçado com fibras de açaí. A tabela fornece informações sobre as tensões máximas alcançadas, as deformações axiais de ruptura e as tensões correspondentes a uma deformação de 5%, ao longo do tempo. Esses resultados podem ser comparados com os obtidos para o solo sem reforço, permitindo uma avaliação do impacto do reforço com fibras de açaí.

Tabela 4-8 - Resultados do ensaio de Compressão simples no solo não reforçado e reforçado com 1,0% e 2,0% de fibra de açaí.

| Tipo de Amostra | Tempo (meses) | Tensão máxima (kPa) | Varição da tensão máxima em relação ao solo sem reforço (kPa) | Deformação de ruptura (%) | Varição da deformação de ruptura em relação ao solo sem reforço (%) | Tensão na deformação fixada em 5% (kPa) | Varição da tensão na deformação fixada em 5% em relação ao solo sem reforço (kPa) |
|--------------------------------------|---------------|---------------------|---|---------------------------|---|---|---|
| Solo sem Reforço | 0 | 345 | - | 1,43 | - | 123 | - |
| Solo + 1,0% de Fibras de Açaí | 0 | 1059 | + 714 | 2,82 | + 1,39 | 887 | + 764 |
| | 2 | 681 | + 336 | 2,67 | + 1,24 | 541 | + 418 |
| | 4 | 432 | + 87 | 3,82 | + 2,39 | 408 | + 285 |
| | 6 | 364 | + 19 | 4,00 | + 2,57 | 361 | + 238 |
| Solo + 2,0% de Fibras de Açaí | 0 | 1275 | + 930 | 2,54 | + 1,11 | 1158 | + 1035 |
| | 2 | 939 | + 594 | 3,13 | + 1,70 | 688 | + 565 |
| | 4 | 652 | + 307 | 4,33 | + 2,90 | 650 | + 527 |
| | 6 | 572 | + 227 | 4,50 | + 3,07 | 569 | + 446 |

4.4.3. TRAÇÃO DIRETA

Da mesma maneira que nos materiais anteriores, os valores médios de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura das fibras de açaí foram registrados na Tabela 4-9. Esses valores foram obtidos a partir de 15 amostras das fibras de açaí de cada um dos diferentes períodos de exposição analisados, e a área das fibras considerada foi de 0,007 mm² obtidas no MEV. Os desvios-padrões correspondentes a esses valores médios também foram apresentados, indicados entre parênteses.

No tempo inicial, 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.

Tabela 4-9 - Resultados médios e desvios-padrões obtidos no ensaio de tração direta em fibras de açaí.

| Tempo de Exposição (meses) | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Alongamento na Ruptura (%) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 249,72 (13,73) | 3,73 (1,28) | 7,83 (2,72) |
| 2 | 211,64 (17,48) | 3,22 (0,88) | 7,06 (1,72) |
| 4 | 151,50 (16,79) | 2,66 (1,14) | 6,98 (2,41) |
| 6 | 127,41 (8,49) | 2,08 (0,46) | 6,49 (1,13) |

Ao analisar os dados ao longo do tempo, foi notório que as fibras de açaí, assim como os demais materiais, sofreram uma redução em sua resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura. Em relação à resistência à tração, observou-se uma perda de 122,31 MPa ao longo do período total de análise. Quanto ao módulo de elasticidade, houve uma diminuição de 1,65 GPa, e o alongamento na ruptura apresentou uma perda de 1,34%.

É importante mencionar que as comparações realizadas consideraram outras fibras naturais, uma vez que esses parâmetros nas fibras de açaí ainda não foram extensivamente explorados em estudos anteriores. Isso ressalta a relevância das análises realizadas para melhor compreender as características das fibras de açaí em relação a outras fibras naturais.

4.4.4. MEV

Na Figura 4.13 mostra as imagens que retratam a evolução e mudanças da estrutura microscópica das fibras de açaí ao longo de um período de seis meses de envelhecimento natural.

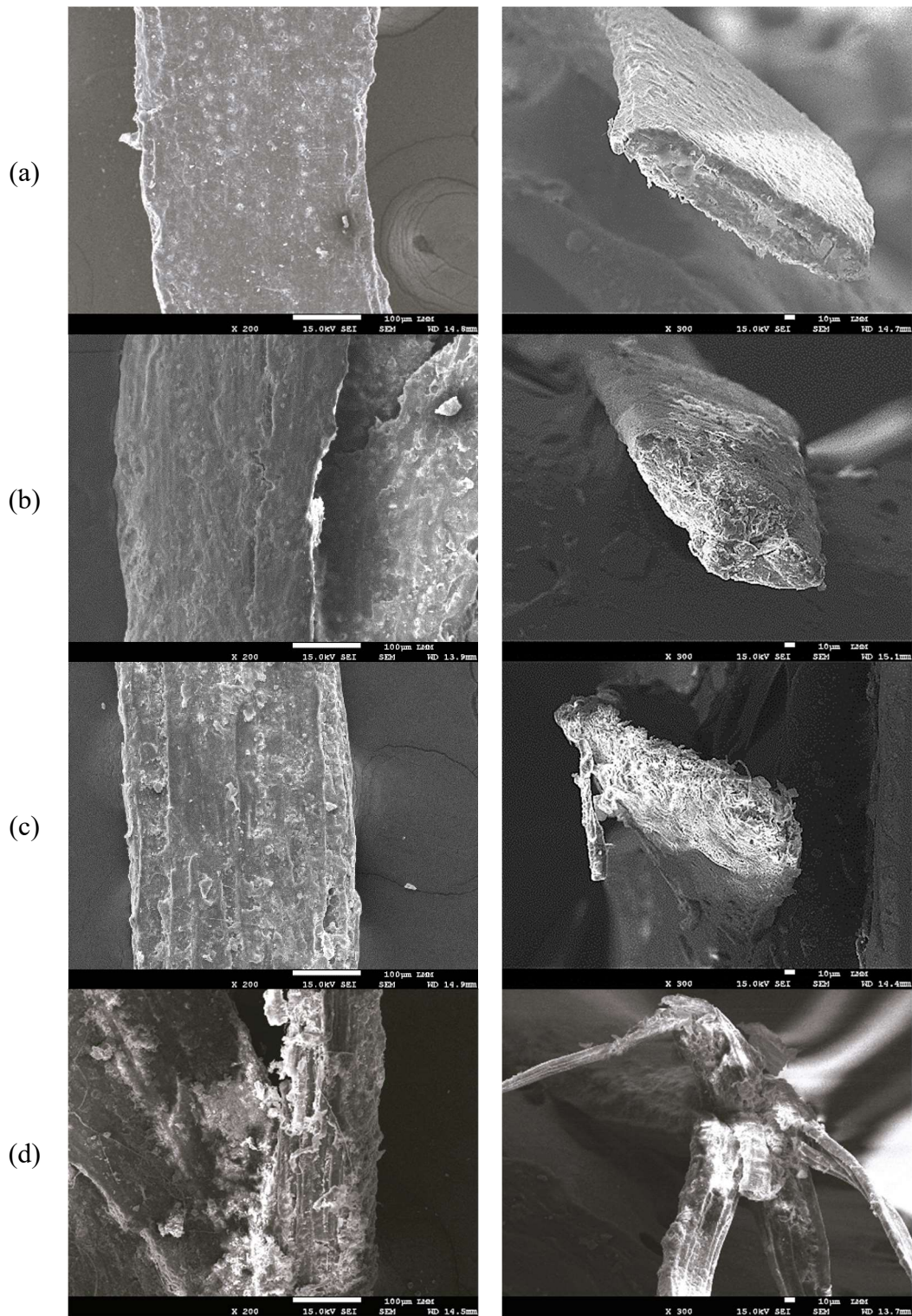


Figura 4.13- Morfologia da superfície e seção transversal da fibra de açaí ao longo do tempo: (a) 0 meses, (b) 2 meses; (c) 4 meses e (d) 6 meses.

Assim como nas fibras de coco, são observados pequenos vazios que podem estar associados aos canais de lúmen, responsáveis pelo transporte de água e nutrientes ao longo da fibra. De acordo com Garcia Filho et al. (2019), esses vazios podem contribuir para certas propriedades

dos compósitos, como uma menor densidade de massa, o que é vantajoso para aplicações na construção civil.

Também foi observado o surgimento de asperezas nas fibras desde o início da análise. De acordo com Azevedo et al. (2021b), essas protuberâncias podem estar associadas a cadeias de compostos presentes em fibras naturais, as quais diferem das encontradas em outras fibras, como as de piaçava.

Ao longo do período de exposição, foi constatado um aumento na rugosidade das fibras, uma espécie de “corrosão”, principalmente no 6 mês, tanto em seu comprimento quanto em sua seção transversal. Verificou-se uma perda significativa de massa, indicando uma degradação das fibras de dentro para fora. Essa degradação pode ser atribuída à ação de microrganismos presentes, que afetam sua estrutura e conseqüente desempenho como material de reforço.

4.5. ANÁLISE GLOBAL DOS MATERIAIS DE REFORÇO

Nesta seção, são relatados os resultados dos ensaios complementares executados nos materiais de reforço, com o intuito de investigar e compreender seu comportamento mecânico. Os ensaios foram realizados de acordo com as metodologias descritas anteriormente. Ao analisar esses resultados, foi possível obter uma compreensão mais clara do comportamento mecânico dos materiais quando utilizados como reforço, bem como sua resistência e durabilidade.

4.5.1. CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Figura 4.14 exibe os gráficos de ganho de massa em relação ao tempo para os vegetais investigados. De maneira geral, as curvas de absorção do bambu e açaí mostraram uma tendência em que o máximo de massa é alcançado em cerca de 30 minutos. Já a curva da fibra de coco atingiu seu valor máximo em aproximadamente 120 minutos. Além disso, observou-se que, após esse período, não houve um aumento significativo de massa em todas as amostras analisadas.

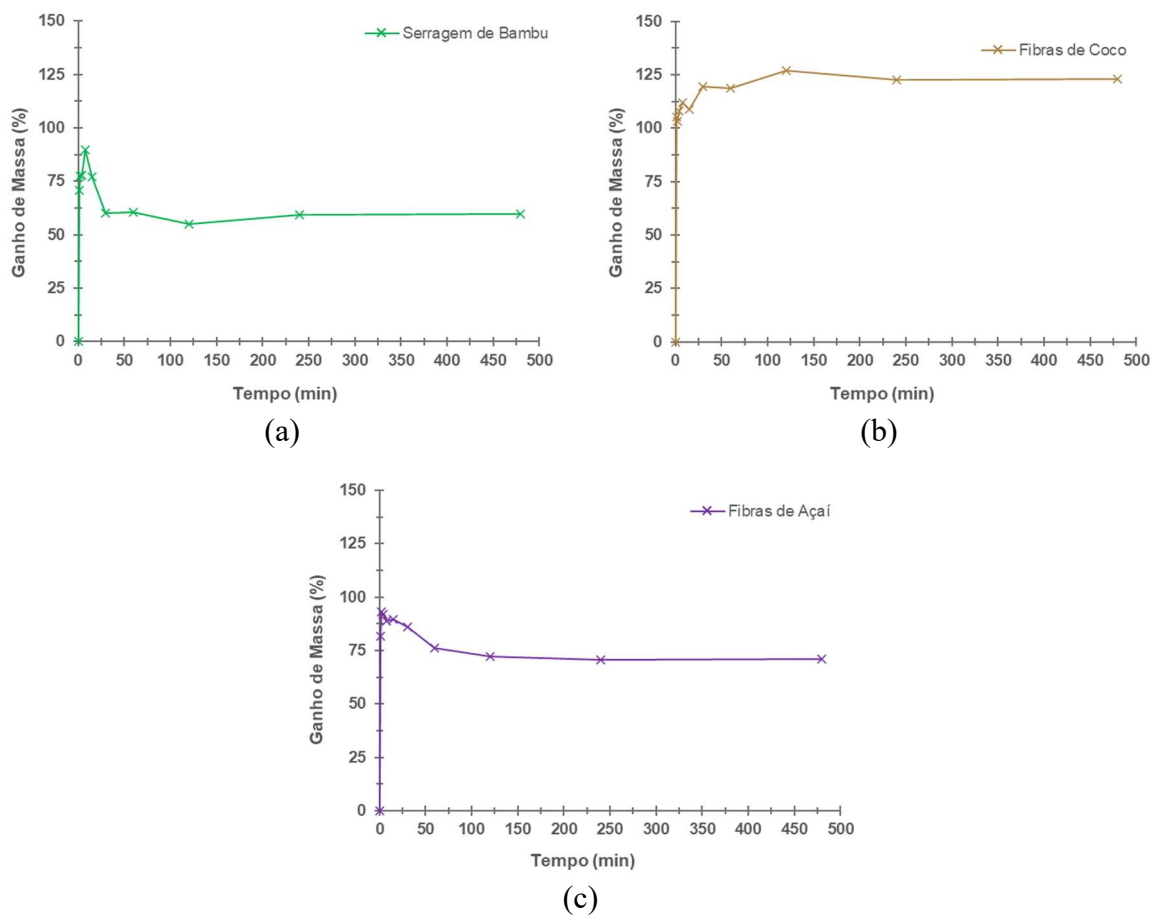


Figura 4.14 – Resultados ensaio de absorção de água.

A serragem de bambu apresentou a menor capacidade de absorção em comparação com os outros materiais. Em um período de 8 minutos, atingiu um valor máximo de absorção de 89,97%. Observa-se um comportamento peculiar nesse material, onde, logo após atingir o pico de capacidade, ocorre uma diminuição seguida de estabilização em aproximadamente 30 minutos. Esse fenômeno possivelmente ocorre devido à presença de uma umidade intrínseca na serragem, que permite sua absorção máxima inicial, mas que é rapidamente perdida.

Ao examinar as duas fibras que foram testadas, foi possível notar que a fibra de coco absorveu uma quantidade maior de água, atingindo um pico de absorção de 127,03%, enquanto a fibra de açaí alcançou 92,99%. A capacidade de absorção de água observada na fibra de coco foi próxima aos resultados obtidos por Reis (2022), que relatou valores máximos de 147% para essa mesma fibra. Por outro lado, as fibras de açaí se comportam de maneira semelhante às fibras de curauá, que apresentaram uma capacidade máxima de absorção de 110%, como constatado por Silveira (2018).

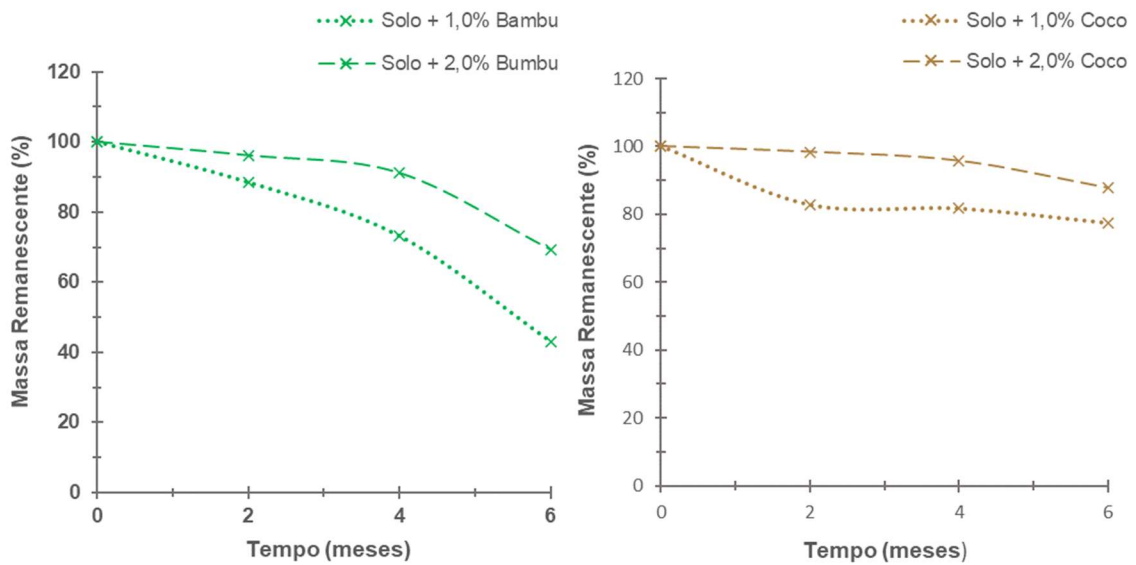
Essa absorção mais significativa da fibra de coco pode ser atribuída a diversos fatores. Primeiramente, semelhante a serragem de bambu, como as fibras não foram previamente secas, é possível que a fibra de coco possua uma umidade intrínseca maior do que a fibra de açai. Além disso, como evidenciado nas imagens de MEV apresentadas anteriormente, as fibras de coco apresentaram uma maior quantidade de poros, lúmen, que constituem a parte interna das fibras e permitem a passagem da água, aumentando assim a sua capacidade de absorção (Tolêdo Filho, 1997).

Adicionalmente, vale ressaltar que as fibras de coco foram cortadas e padronizadas com um comprimento de 15 mm, ao contrário das fibras de açai, que possuem comprimentos aleatórios e menores que 15 mm. Isso significa que a superfície de contato das fibras de coco com a água foi maior, o que conseqüentemente favorece uma maior absorção.

Esse resultado de capacidade de absorção de água atribuído para a fibra de coco corrobora com o observado nos ensaios de compactação onde o aumento no teor de umidade ótimo foi mais expressivo quando foi adicionado os teores de fibras de coco. Afinal, elas têm uma maior capacidade de absorção de água quando comparado com os demais materiais estudados.

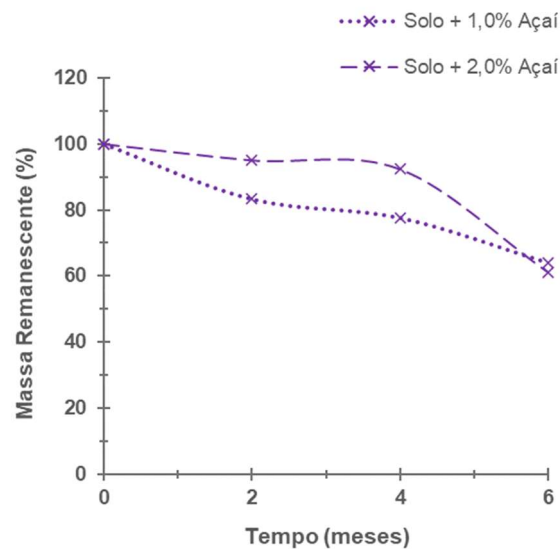
4.5.2. PERDA DE MASSA

Os resultados dos valores de massa remanescente das fibras para todos os compósitos sujeitos ao envelhecimento natural são representados na Figura 4.15. Ao analisar esses resultados, pode-se observar que nos compósitos reforçados com serragem de bambu, a perda de massa foi mais acentuada, totalizando 56,97% nos compósitos com 1,0% de reforço e 30,64% nos compósitos com 2,0% de reforço. No caso das fibras de coco, verificou-se uma perda de massa de 22,42% e 12,27% para os respectivos teores utilizados. Quanto às fibras de açai, as perdas de massa foram de 35,97% (1,0% de teor) e 38,98% (2,0% de teor). Essas porcentagens são calculadas em relação ao último mês de exposição, que corresponde a um período de 6 meses.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.15 – Massa remanescente dos materiais vegetais expostos a degradação no solo.

A maior perda de massa observada na serragem de bambu pode ser atribuída a algumas razões. Um deles é a sua forma geométrica variada, o que contribui para o arraste do material durante a exposição, especialmente em dias chuvosos. Além disso, durante o processo de lavagem do material para separação e execução dos ensaios, mesmo com precauções tomadas para evitar perdas, pode ter ocorrido alguma perda de material.

De acordo com Silveira & Casagrande, (2021), o ataque de microrganismos presentes no solo é apontado como responsável pelo processo de biodegradação das fibras vegetais, resultando

em sua rápida deterioração. Nesse sentido, observa-se que a serragem possui uma maior superfície de contato em comparação com as fibras, tornando-a mais exposta e suscetível ao ataque desses fungos e bactérias.

Outro fator de relevância a ser considerado, conforme mencionado por Passos (2005) é o teor de lignina como principal elemento na determinação da taxa de degradação da fibra. Além de possuir resistência à degradação, a lignina também reduz a degradação dos demais componentes celulares. De posse das informações mencionadas durante a revisão bibliográfica, voltando para a Tabela 2-1 na seção 2.4, que apresentou os teores de lignina de diferentes materiais vegetais, pode-se observar que o bambu possui o menor teor de lignina em comparação aos outros dois vegetais (varia entre 20% e 25%).

Ao comparar as duas fibras estudadas, notou-se uma maior perda de massa nos compósitos reforçados com as fibras de açaí. Essa perda pode ser atribuída, principalmente, ao fato de as fibras de açaí possuírem um diâmetro menor em comparação às fibras de coco. Nesse contexto, os teores de lignina não seria um fator determinante para explicar a degradabilidade das fibras de açaí frente às fibras de coco, uma vez que os materiais apresentam composição química semelhante.

Provavelmente, a principal causa das mudanças observadas no comportamento mecânico dos solos reforçados com material vegetal é o potencial desgaste do reforço natural devido à exposição ao solo, condições climáticas e passar do tempo (Silveira, 2018).

4.5.3. ASPECTO DOS COMPÓSITOS EXPOSTOS AO ENVELHECIMENTO NATURAL E AVALIAÇÃO DE pH

A Figura 4.16 apresenta alguns dos compósitos que foram expostos aos elementos climáticos e ao longo de períodos de 2, 4 e 6 meses. Por meio de uma análise visual, é possível constatar a presença de fungos e/ou bactérias na superfície externa dos compósitos já a partir do primeiro mês de observação. Além disso, nota-se o clareamento dos três materiais vegetais e uma fragilidade ao toque, indicando um processo natural de envelhecimento.

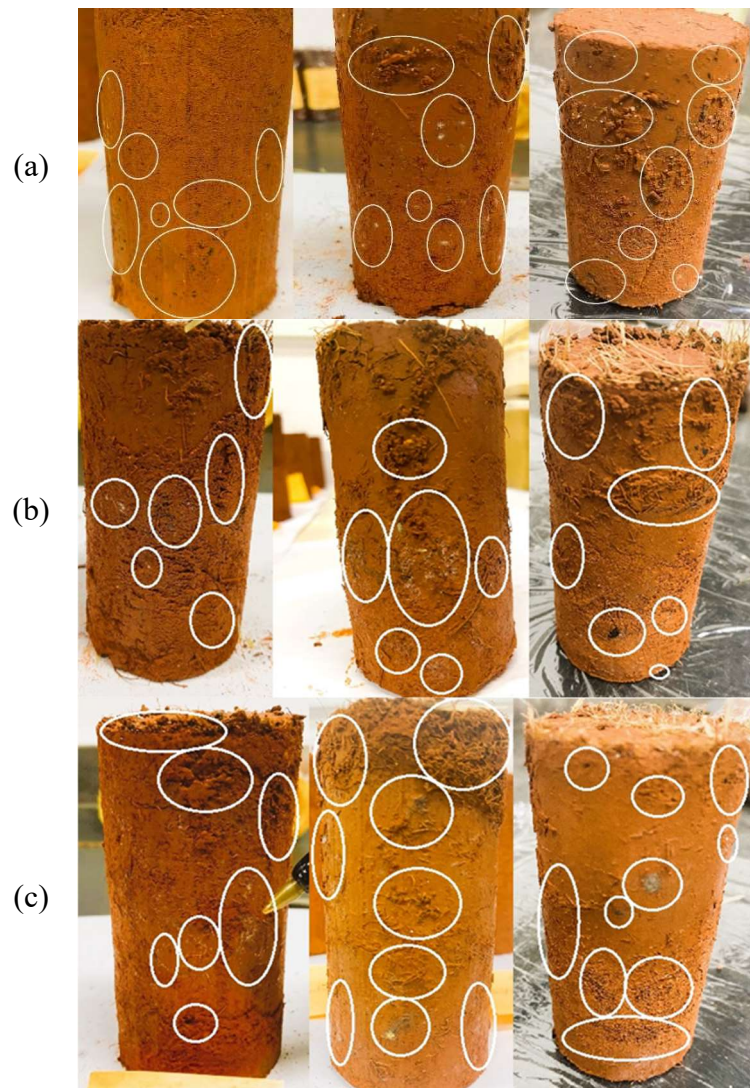


Figura 4.16 – Aspecto visual em 2, 4 e 6 meses dos compósitos com: (a) Serragem de bambu; (b) Fibra de coco; (c) Fibra de açaí.

O aparecimento desses microrganismos no solo reforçado está intimamente relacionado com o pH em que se encontra os corpos de prova durante o período de exposição, por isso a importância de manter o controle e observação desse potencial Hidrogeniônico. A

Tabela 4-10 exibe os valores de pH encontrado nos compósitos ao longo do tempo de análise.

De acordo com Sait et al. (2006), a presença de Acidobactéria está diretamente associada ao pH do solo, o que significa que quando o solo possui um pH menor que 6, existe a possibilidade de ocorrer a presença desse filo bacteriano. Já Moreira (2006), afirma que os fungos são considerados mais adaptados a ambientes com pH inferior a 5, enquanto as bactérias, actinomicetos e cianobactérias são associados a faixas de pH entre 6 e 8.

Tabela 4-10 – Resultados dos ensaios de pH nos compósitos.

| Material de Reforço | Valores de pH | | | |
|---------------------|---------------|---------|---------|---------|
| | 0 meses | 2 meses | 4 meses | 6 meses |
| Serragem de Bambu | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Fibra de Coco | 4 | 6 | 5 | 5 |
| Fibra de Açaí | 4 | 5 | 5 | 5 |

Dessa maneira, a partir dos valores de pH encontrados, todos abaixo de 7, é possível inferir que a degradação de materiais vegetais no solo seria mais direcionada ao ataque de fungos. No entanto, isso não descarta a presença de bactérias envolvidas nesse processo de decomposição. É importante ressaltar que tanto fungos quanto bactérias desempenham papéis essenciais na decomposição da matéria orgânica.

4.5.4. DRX

Na Figura 4.17 é apresentada a representação gráfica do difratograma da serragem de bambu, das fibras de coco e açaí, sem sofrerem degradação. Foi possível observar que, no caso da serragem de bambu, o pico de maior intensidade correspondente à cristalinidade ocorreu quando o ângulo de difração 2θ foi igual a $22,25^\circ$, enquanto o pico de intensidade da região amorfa foi observado em $2\theta = 18,6^\circ$.

Quanto às fibras de coco, o ângulo de difração de máxima intensidade é de $21,90^\circ$, enquanto o valor de $2\theta = 18,50^\circ$ representou a intensidade da região amorfa. Por fim, para as fibras de açaí, os ângulos de difração foram de $2\theta = 22,55^\circ$ e $2\theta = 18,60^\circ$, respectivamente. Característico de forma cristalina tipo Celulose I e, de acordo com Ferreira et al. (2017), as características do plano cristalino de materiais lignocelulósicos encontram-se em: 15° , 23° e 34° .

Esses tipos de materiais apresentaram uma forte dependência do índice de cristalinidade (IC), uma vez que propriedades como resistência à tração e módulo de elasticidade estão relacionadas a esse índice (Martin et al., 2010). Em outras palavras, a quantidade de celulose presente nas fibras é determinante para tais propriedades, já que a celulose é o único componente que se cristaliza nas fibras.

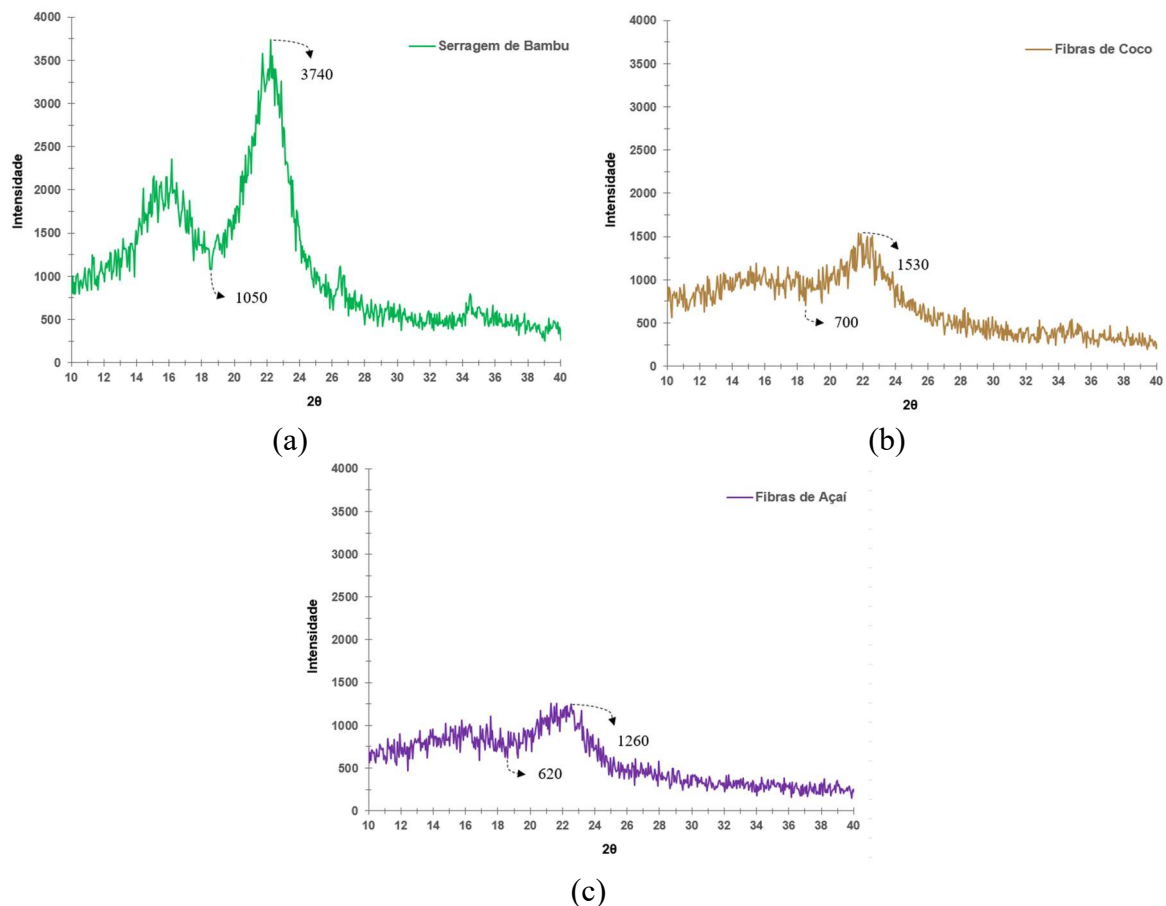


Figura 4.17 – Resultados dos ensaios de DRX: (a) Serragem de Bambu; (b) Fibras de Coco; (c) Fibras de Açaí.

Portanto, os valores do grau de IC, de acordo com a Eq. (3.2) foi de 71,93% para a serragem de bambu, 54,25% para a fibra de coco e 50,79% para a fibra de açaí. Conforme mencionado por Chen et al. (2011) e Khan & Khan (2015), a resistência mecânica, rigidez e melhor eficiência do reforço aumenta à medida que o índice de cristalinidade aumenta. Corobando, portanto, com os resultados apresentados de compressão simples nos compósitos sem degradação.

4.5.5. FRX

As Tabela 4-12 e Tabela 4-13 apresentam os resultados obtidos na análise de Fluorescência de Raio-X na serragem de bambu, na fibra de coco e de açaí, respectivamente. Nessas tabelas estão listados os elementos mais expressivos das amostras, sendo que o equipamento utilizado só consegue detectar elementos cujos números atômicos estejam compreendidos entre o sódio (Na) e o urânio (U) na tabela periódica.

Tabela 4-11 – Resultado do ensaio de FRX na Serragem Bambu.

| Elementos | Tempo | | | | Variação de 0 a 6 meses (%) |
|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------|
| | 0 meses | 2 meses | 4 meses | 6 meses | |
| Si (%) | 7,906 | 16,376 | 17,976 | 15,87 | + 7,964 |
| Al (%) | 9,952 | 43,371 | 46,054 | 43,028 | + 33,076 |
| K (%) | 18,429 | 0,604 | 0,494 | 0,459 | - 17,97 |
| Fe (%) | 22,617 | 31,948 | 29,783 | 35,141 | + 12,524 |
| Ca (%) | 21,267 | 4,329 | 2,520 | 1,173 | - 20,094 |
| Mn (%) | 0,381 | 0,152 | 0,092 | 0,080 | - 0,301 |
| S (%) | 1,638 | 0,313 | 0,225 | 0,157 | - 1,481 |
| Ti (%) | 4,193 | 2,906 | 2,717 | 2,622 | - 1,571 |

Tabela 4-12 – Resultado do ensaio de FRX nas Fibras de Coco.

| Elementos | Tempo | | | | Variação de 0 a 6 meses (%) |
|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------|
| | 0 meses | 2 meses | 4 meses | 6 meses | |
| Si (%) | 9,925 | 21,859 | 19,577 | 19,377 | + 9,452 |
| Al (%) | 5,492 | 39,251 | 39,708 | 41,509 | + 36,017 |
| K (%) | 35,035 | 0,487 | 0,488 | 0,466 | - 34,569 |
| Fe (%) | 12,285 | 30,091 | 30,632 | 30,469 | + 18,184 |
| Ca (%) | 6,255 | 5,171 | 5,859 | 4,531 | - 1,724 |
| Mn (%) | 0,196 | 0,161 | 0,119 | 0,097 | - 0,097 |
| S (%) | 1,050 | 0,611 | 0,461 | 0,476 | - 0,574 |
| Ti (%) | 1,397 | 2,370 | 2,337 | 2,572 | + 1,175 |

Tabela 4-13 – Resultado do ensaio de FRX nas Fibras de Açaí.

| Elementos | Tempo | | | | Variação de 0 a 6 meses (%) |
|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------|
| | 0 meses | 2 meses | 4 meses | 6 meses | |
| Si (%) | 29,620 | 39,013 | 32,937 | 35,313 | + 5,693 |
| Al (%) | 2,324 | 38,028 | 36,298 | 40,060 | + 37,736 |
| K (%) | 26,178 | 0,445 | 0,763 | 0,520 | - 25,658 |
| Fe (%) | 10,547 | 15,32 | 18,995 | 15,856 | + 5,309 |
| Ca (%) | 14,135 | 3,294 | 6,193 | 4,652 | - 9,483 |
| Mn (%) | 5,454 | 0,225 | 0,599 | 0,220 | -5,234 |
| S (%) | 5,008 | 1,491 | 1,253 | 1,420 | - 3,588 |
| Ti (%) | 2,956 | 2,184 | 2,360 | 1,958 | - 0,998 |

É possível notar um aumento considerável tanto no teor de alumínio (Al) quanto no de ferro (Fe) à medida que os meses de degradação avançam, abrangendo todos os tipos de reforços estudados. Esses resultados estão intimamente ligados à composição do solo utilizado nas

matrizes dos compósitos, uma vez que se trata de um solo tropical conhecido por apresentar uma presença marcante de óxidos de alumínio e ferro. Além disso, segundo Moreira (2006), altos níveis de alumínio estão diretamente associados à acidez do solo. Essa acidez, por sua vez, está relacionada à proliferação de fungos e bactérias, como mencionado anteriormente.

De acordo com Nascimento (2018), os resultados obtidos neste experimento refletem uma realidade que não pode ser generalizada devido a diversos fatores específicos associados a cada material vegetal analisado. Esses fatores incluem variações quantitativas de elementos detectados, que são influenciadas pelas características específicas da celulose e pela geometria das células, por exemplo, as quais, por sua vez, afetam as propriedades físicas.

4.5.6. FTIR

As análises espectroscópicas no infravermelho (FTIR) apresentadas na Figura 4.18 foram realizadas para identificar os grupos funcionais químicos característicos dos materiais vegetais. Observou-se que na região de 3400 cm^{-1} , aparece uma banda alargada, característica do estiramento de grupos hidroxílicos (OH) de celulose e da presença de água. A região em 2900 cm^{-1} é atribuída ao estiramento do C-H e CH₂, ambos característicos de materiais orgânicos (Sgriccia, 2008; Corrêa, 2010).

De acordo Cardoso (2013) a banda em 1750 cm^{-1} corresponde aos grupos acetil e ligações C=O, característicos da hemicelulose. As bandas devidas ao estiramento assimétrico do CO, em 1200 cm^{-1} . As bandas em 1110 cm^{-1} são características de vibrações de deformação, flexão ou estiramento de CH e CO de muitos grupos em lignina e hidratos de carbono (Ferreira et al., 2017).

Já a celulose é evidenciada por pico na região de 1050 cm^{-1} (Corrêa, 2010). As duas bandas características atribuídas aos dois alomorfos de celulose cristalina, celulose I α e celulose I β , também ocorrem em picos na região de 3220 entre 3280 cm^{-1} (Popescu et al., 2011).

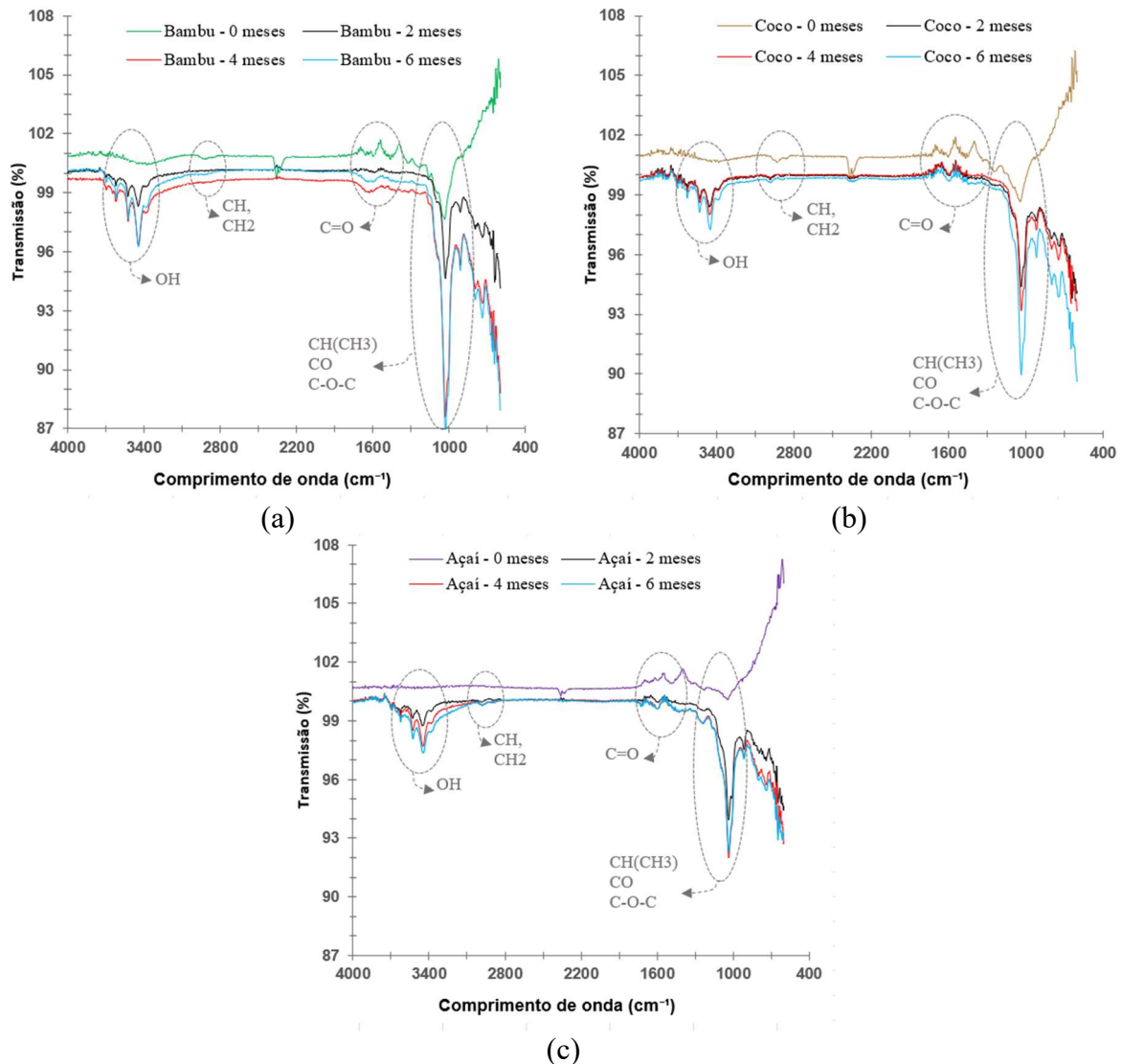


Figura 4.18 – Resultados do ensaio de FTIR nas: (a) Serragem de Bambu; (b) Fibras de Coco; (c) Fibras de Açaí.

É importante ressaltar que, segundo Silveira (2018), relacionar as informações fornecidas pelo espectroscópio com as observações visuais pode ser desafiador, pois os espectros revelam as características dos modos de vibração das fibras lignocelulósicas, mas não necessariamente indicam que as fibras estejam intactas. Dessa maneira, deve-se considerar que a degradação física das fibras, como perda de massa ou alterações nas dimensões. Em suma, os espectros fornecem informações valiosas sobre as propriedades vibracionais dos materiais vegetais que está relacionado com sua composição química, mas eles não são necessariamente indicativos do estado físico das fibras.

4.5.7. COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.19 apresenta uma comparação global da resistência a compressão simples dos compósitos reforçados com bambu, coco e açaí, conforme o avanço do tempo de exposição.

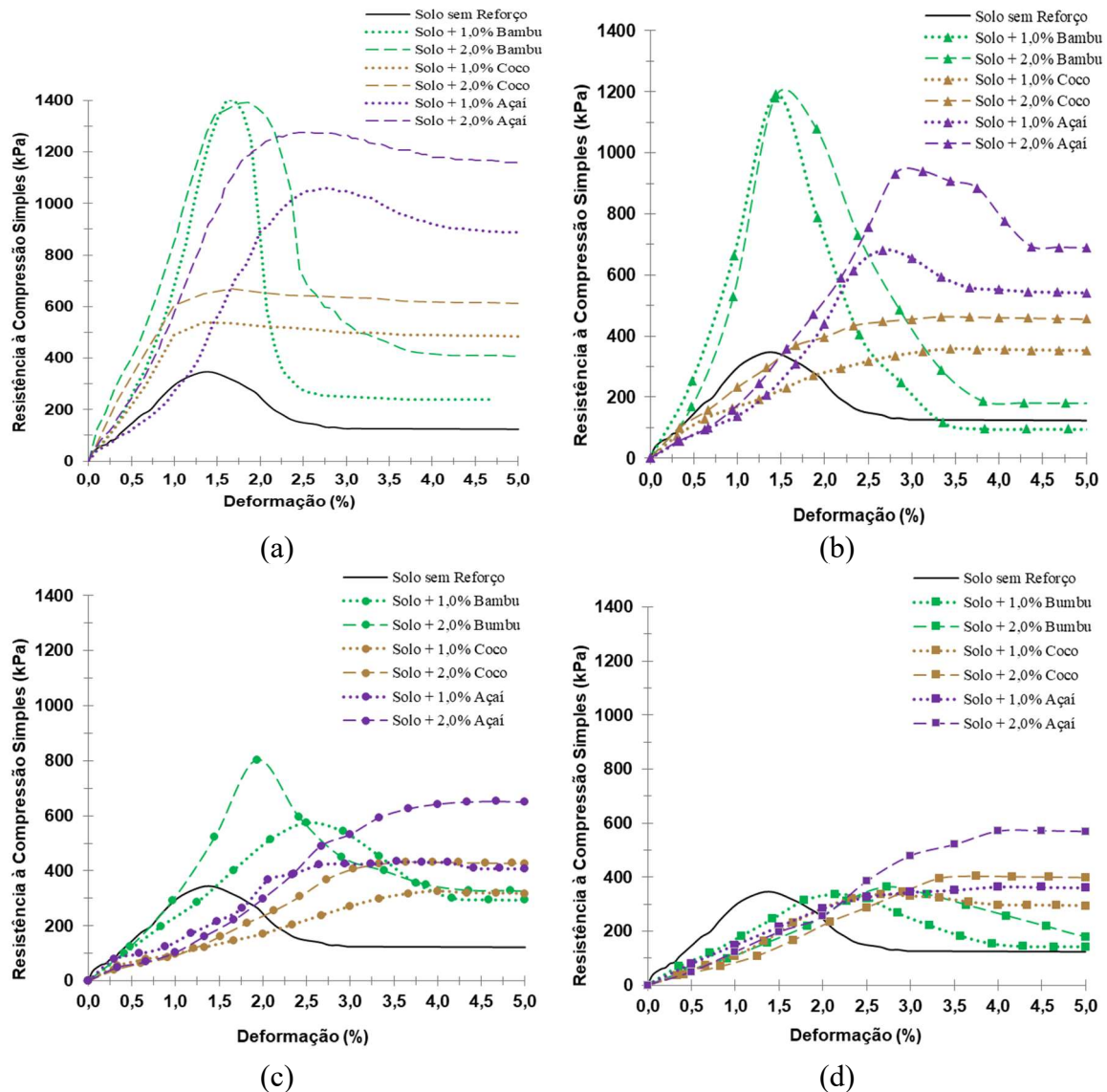


Figura 4.19 – Análise comparativa dos resultados de compressão simples nos tempos de: (a) 0 meses; (b) 2 meses; (c) 4 meses; (d) 6 meses.

Percebeu-se que, inicialmente, sem a degradação, a serragem de bambu apresentou um pico de resistência bastante pronunciado, superando o coco em 160,71% e o açai em 32,20% para os compósitos reforçados com um teor de 1,0%. Já para os compósitos reforçados com 2,0%, o bambu superou o coco em 108,38% e o açai em 9,18%. Portanto, pode-se inferir que, em termos de ganho de resistência sem exposição ao natural, a serragem de bambu mostra-se mais eficiente do que as fibras analisadas.

No entanto, ao observar o comportamento no pós-pico, nota-se uma "queda brusca" de resistência para a serragem de bambu, diferente das fibras que mantêm valores elevados nessa fase. Além disso, os valores de resistência observados para o bambu e o açaí não foram tão discrepantes. Assim, admitindo-se que a necessidade seria manter uma resistência pós-ruptura, a fibra de açaí mostra-se mais competente nesse sentido.

Ainda sem considerar o tempo de exposição, ao comparar as duas fibras estudadas, verifica-se que a fibra de açaí supera a fibra de coco em termos de resistência máxima e resistência após o pico. Para o primeiro teor, a fibra de açaí apresentou um aumento de resistência de 97,21% em relação à fibra de coco, enquanto para o segundo teor, o aumento foi de 90,87%. Esse fato é interessante, uma vez que as fibras de açaí ainda são pouco conhecidas e estudadas para aplicações geotécnicas, ao contrário das fibras de coco, que já possuem um maior volume de pesquisa e são comercializadas.

Ao analisar o comportamento durante a degradação ao longo dos meses, foi evidente que todos os materiais de reforço utilizados apresentaram perda de resistência, o que é esperado, uma vez que são materiais naturais. No entanto, no caso das fibras de coco e açaí, essas perdas ocorrem de maneira acentuada até os 2 meses de exposição, mantendo resistência próximas, ou seja, pouca variação, até os 6 meses.

Mesmo com sua durabilidade afetada pela exposição aos elementos climáticos por 6 meses, os compósitos solo-fibras vegetais mantiveram uma resistência e capacidade de absorção de energia de deformação maiores do que a amostra sem reforço. Apenas a serragem de bambu continua a perder resistência progressivamente ao longo do tempo. Esse fato pode ser explicado pela geometria e pela degradação mais acentuada do material vegetal do bambu quando não submetido a um processo de tratamento superficial prévio.

A diminuição da resistência dos compósitos ao longo do tempo tornou-se notório quantitativamente ao analisar os dados apresentados na

Tabela 4-14. Foi perceptível que as fibras de coco, embora apresentem valores inferiores em relação à fibra de açaí, demonstraram uma porcentagem de perda consideravelmente reduzida em comparação com os outros materiais. Isso confirma a eficiente resistência dessas fibras à

degradação causada por microrganismos e ação tempo, mesmo sem um tratamento. A composição química das fibras de coco desempenha um papel crucial na sua durabilidade.

Tabela 4-14 – Perda de resistência dos compósitos submetidos a exposição.

| Material de reforço | Teor de reforço (%) | Tensão máxima em 0 meses (kPa) | Tensão máxima em 6 meses (kPa) | Perda de resistência (%) |
|---------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Bambu | 1,0 | 1400 | 337 | 315,43 |
| | 2,0 | 1392 | 364 | 282,41 |
| Coco | 1,0 | 537 | 335 | 60,30 |
| | 2,0 | 668 | 404 | 65,35 |
| Açaí | 1,0 | 1059 | 364 | 190,93 |
| | 2,0 | 1275 | 572 | 122,90 |

Foi importante notar que tanto a serragem de bambu quanto as fibras de açaí mostraram uma maior perda de resistência nos compósitos com um teor de reforço de 1,0% em comparação com os compósitos contendo 2,0%. Isso ocorreu porque esses dois materiais têm uma geometria muito pequena. Especificamente, as fibras de açaí são extremamente curtas em comprimento e finas, quando comparadas com as fibras de coco. O que resulta em aglomeração significativa e aumento do contato fibra-fibras. Essa maior proximidade entre as fibras reduz a área de contato com o solo e expõe menos o material natural aos agentes de degradação.

Em contrapartida, as fibras de coco possuem um comprimento e espessura maiores em comparação com as fibras de açaí e serragem de bambu. Isso faz com que as fibras de coco se separem facilmente, espalhando-se de maneira mais eficiente na massa de solo e estabelecendo um maior contato solo-fibra. Nesse caso, um teor de reforço maior torna as fibras de coco mais suscetíveis à degradação.

Em geral, ambos os teores estudados aumentaram a resistência do solo tropical pesquisado. Portanto, ao considerar a maior destinação desses materiais naturais residuários, a quantidade com o teor mais elevado é a opção mais viável, visto que destina uma maior quantidade de resíduo sólido que poderia ser um material prejudicial para a sustentabilidade.

No entanto, a trabalhabilidade da mistura é afetada quando o maior teor é utilizado, podendo resultar em uma homogeneização uniforme não controlada em alguns corpos de prova. Sendo também um desafio quanto a aplicabilidade em campo. Dessa forma, caminhões betoneira seria

uma solução provável para a realizar mistura e homogeneização para posterior lançamento no local de obra.

4.5.8. COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS MATERIAS DE REFORÇO

Na Figura 4.20 mostra um gráfico de barras que faz uma comparação das médias das resistências à tração dos materiais de reforço estudados. Além disso, por meio de um gráfico linear, são apresentadas as médias de alongamento máximo na ruptura ao longo do tempo.

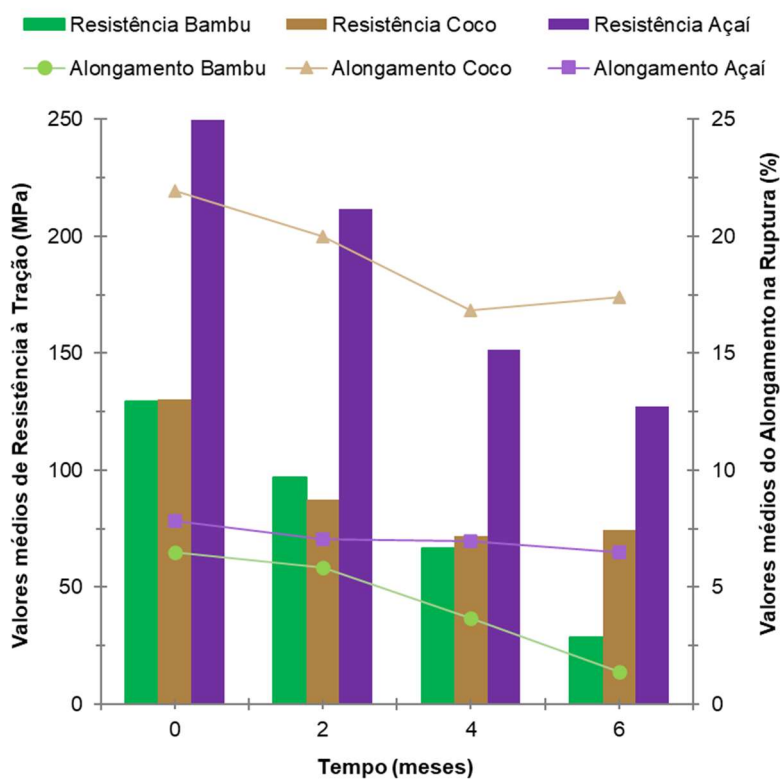


Figura 4.20 - Análise comparativa dos resultados de resistência à tração e alongamento na ruptura da serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí.

A análise desses resultados proporcionou algumas informações sobre o comportamento mecânico dos compósitos. Em relação à serragem de bambu, assim como nos resultados de resistência à compressão simples, também foi possível observar uma rápida diminuição na resistência à tração e no alongamento com o decorrer do tempo. Isso indicou que sua capacidade de absorção de energia tendeu a diminuir à medida que ocorreu a degradação e a ação de microrganismos presentes no solo.

De forma similar, os resultados de tração com as fibras de coco apresentaram um comportamento consistente com os dados obtidos na compressão simples. De fato, tanto os valores de tração como os de alongamento mostraram variações ao longo do tempo, mas após os primeiros 2 meses, foi possível observar uma estabilização dos parâmetros.

Ao analisar o comportamento das fibras de açai na tração, ficou evidente que essas fibras apresentaram uma notável resistência e capacidade de absorção de energia, assim como observado nos ensaios de compressão simples. Embora essa resistência diminua ao longo do tempo, é importante destacar que, após os 6 meses, a resistência à tração do açai foi bastante semelhante à das fibras de coco no tempo inicial (tempo 0). Da mesma forma, os resultados de compressão simples também se aproximaram consideravelmente após o período de 6 meses. Esses resultados e semelhanças indicam a eficiência das fibras de açai como material de reforço no solo. Enquanto as fibras de coco já eram bem estabelecidas na literatura, os achados em termos de resultados sobre as fibras de açai, pouco estudadas até então, demonstram sua capacidade e eficácia igualmente notáveis.

Por fim, vale destacar que em diversos estudos, pesquisadores têm investigado o comportamento de tração das fibras e, como resultado, têm sido encontradas grandes disparidades nos valores de resistência à tração e módulo de Yang relatados na literatura. Essas discrepâncias podem ser atribuídas a uma série de fatores, como diâmetros variáveis e irregulares das fibras vegetais, diferentes distâncias entre as garras do equipamento de teste, velocidade de ensaio utilizada, método de fixação dos corpos de prova no equipamento, bem como a resolução e precisão da célula de carga e do atuador empregados (Fidelis, 2014; Silveira, 2018).

4.5.9. COMPARATIVO DAS IMAGENS EM MEV

A Figura 4.21 apresenta uma comparação da superfície longitudinal observadas nas imagens em MEV da serragem de bambu, fibra de coco e fibra de açai no tempo inicial, sem exposição aos agentes climáticos, e as imagens com exposição após os 6 meses.

Observou-se que as três estruturas foram afetadas devido à degradação natural dos materiais. No entanto, é evidente que tanto o bambu como o açai apresentaram uma perda de massa mais significativa em suas laterais em relação a fibra de coco. Essa observação está de acordo com

os resultados obtidos na compressão simples, onde as perdas de resistência foram mais pronunciadas nesses materiais. Portanto, uma possível explicação para esse comportamento mecânico é a degradação acentuada, principalmente nas áreas externas da serragem de bambu e das fibras de açaí.

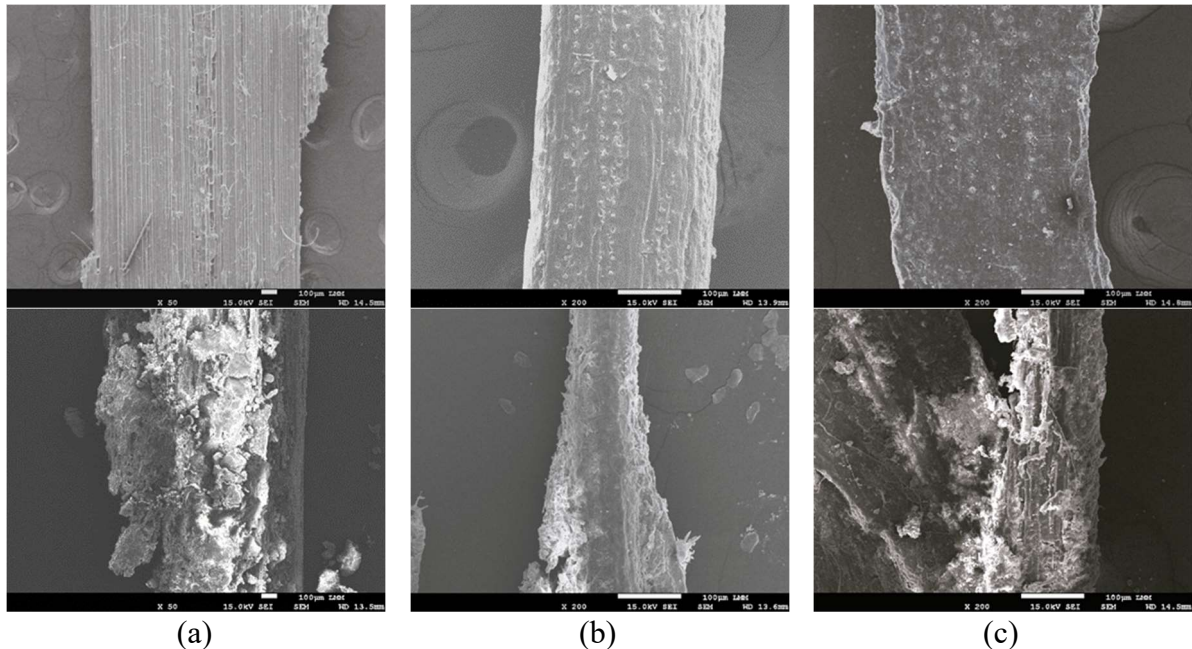


Figura 4.21 - Análise comparativa das superfícies longitudinais no tempo 0 e 6 meses de: (a) Bambu; (b) Coco; (c) Açaí.

Já no que se diz respeito a seção transversal, vale observar que inicialmente a fibra de coco se mostrava espessa e maciça, de modo que apenas o lúmen era visível como uma abertura central. No entanto, após os 6 meses, pequenos e espaçados poros tornaram-se evidentes, indicando que houve um processo de deterioração e perda de massa na parte interna da fibra. Conforme mostra a Figura 4.22 de análise comparativa dos reforços naturais estudados.

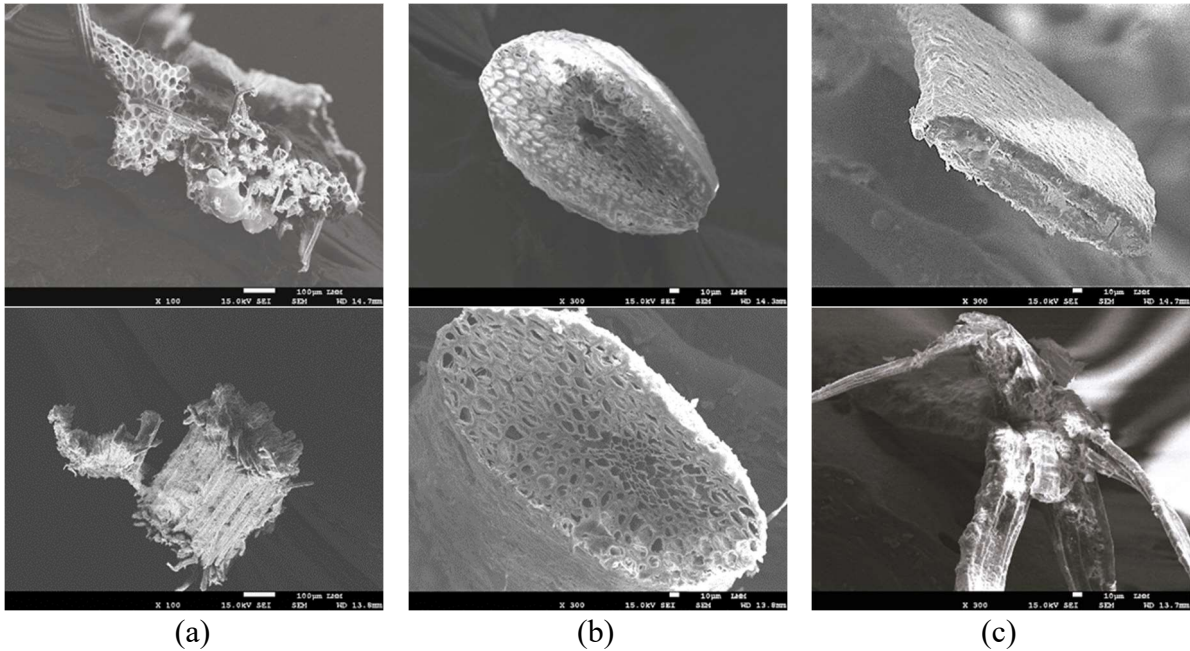


Figura 4.22 - Análise comparativa das seções transversais no tempo 0 e 6 meses de: (a) Bambu; (b) Coco; (c) Açai.

4.6. PARÂMETROS-CHAVE

Foi realizado um estudo do parâmetro chave para melhor compreender o comportamento dos reforços vegetais em questão. O objetivo era estabelecer uma previsão matemática da resistência à compressão simples ao variar alguns parâmetros essenciais no comportamento do solo.

Para o cálculo de porosidade (η) admitiu-se a contribuição do teor de fibras/serragem e do solo de acordo com a Eq. (4.1):

$$\eta = 100 - 100 * \frac{\left\{ \left[\frac{F \cdot \rho_d \cdot V_t}{(1 + F)} \cdot \frac{1}{d_f} \right] + \left[\frac{\rho_d \cdot V_t}{(1 + F)} \cdot \frac{1}{\rho_s} \right] \right\}}{V_t} \quad (4.1)$$

Onde F é o teor de fibra/serragem na amostra; ρ_d a massa específica da amostra; V_t o volume total da amostra; d_f densidade do reforço; ρ_s a massa específica dos grãos de solo.

Para avaliar a influência do teor de reforço vegetal em um único índice, foi proposto um novo índice chamado de teor volumétrico de reforço vegetal (F_{iv}), conforme a Eq. (4.2):

$$F_{iv} = \frac{V_f}{V_t} = \frac{m_f/d_f}{V_t} \quad (4.2)$$

Onde V_f é o volume de fibras/serragem; V_t é o volume total da amostra; m_f é a massa de fibras/serragem; d_f é a densidade das fibras/serragem.

Na Figura 4.23 são apresentadas as curvas que mostram a relação entre a resistência à compressão simples e a porosidade por teor de fibras/serragem nos compósitos reforçados. É importante destacar que essa análise não levou em consideração o tempo de exposição.

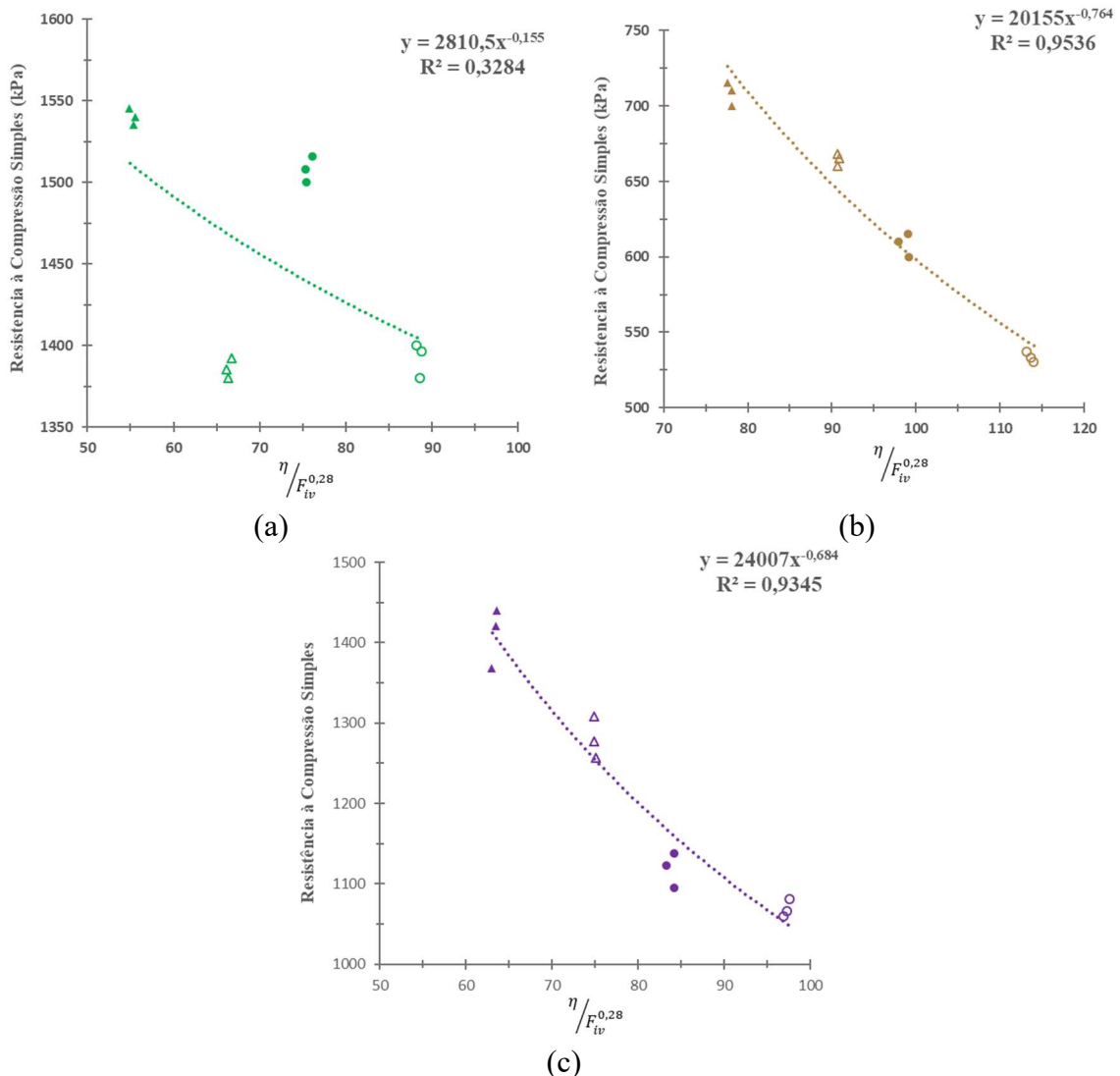


Figura 4.23: Curvas de Parâmetros-chave solo reforçado com: (a) Serragem de Bambu; (b) Fibra de Coco; (c) Fibra de Açaí.

Observa-se que a curva dos compósitos reforçados com serragem de bambu não apresentou resultados satisfatórios, evidenciado pelo coeficiente de determinação R^2 foi de 0,328, um valor muito baixo. Indicando uma correlação pouco confiável. Por outro lado, para o solo reforçado com fibras de coco o R^2 foi de 0,954 e para fibras de açaí um R^2 de 0,935. Esses valores são bastante consistentes, sugerindo a viabilidade do uso desse índice para prever a resistência à compressão simples nos compósitos solo-fibra.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo final, são expostas as conclusões provenientes dos ensaios conduzidos neste estudo experimental. Foi possível verificar a atuação, de maneira global, da inclusão de serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí como reforço em novos materiais geotécnicos, que mesmo tendo características distintas e próprias, promoveram melhorias nos parâmetros de resistência à compressão simples e deformação da matriz do solo tropical. Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico dos compósitos reforçados com matérias naturais provenientes de resíduo, distribuídas aleatoriamente, submetido ao envelhecimento natural por seis meses.

O programa experimental incluiu a realização de ensaios de compactação e compressão simples em amostras de solo argiloso e solo reforçado no tempo inicial (grupo de controle). Para obter informações sobre a durabilidade dos reforços naturais, foram realizados ensaios de compressão simples em corpos de prova expostos por até seis meses. Além disso, foram conduzidos ensaios de compactação e DXR, no primeiro momento para conhecer a cristalinidade e ensaios de tração direta, MEV, FTIR, FRX, análise de perda de massa, análise visual e determinação do pH em cada período de exposição (60, 120 e 180 dias).

As conclusões a seguir destacam a importância e a originalidade da pesquisa, com base nos resultados apresentados e analisados nos capítulos anteriores:

- O acréscimo da serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí promoveram o aumento da resistência à compressão simples do solo tropical;
- A exposição dos compósitos reforçados aos diversos agentes climáticos e ao tempo causou perda no comportamento mecânico. Houve redução da tensão máxima, da capacidade de energia de absorção, e a taxa de redução foi diferente entre os compósitos;
- A serragem de bambu demonstrou um comportamento distinto o dos outros materiais no estado pós-pico de tensão. Diferentemente das fibras, a serragem de bambu não possui essa característica. Além disso, ela apresenta uma significativa perda de resistência ao longo do tempo de exposição. Os compósitos reforçados com 1,0% de serragem de bambu mostraram uma perda de resistência de 315,43%, enquanto os reforçados com 2,0% apresentaram uma perda de resistência de 282,41%.

- As fibras de coco, conforme previsto, elevaram a resistência máxima e mantiveram essa resistência de pós-pico, além de apresentarem uma baixa taxa de degradação. Houve uma perda de resistência de aproximadamente 60,30% nos compósitos contendo 1,0% de fibras de coco e uma perda de resistência de cerca de 65,35% nos compósitos com 2,0% de fibras de coco.
- As fibras de açaí, que ainda foram pouco estudadas anteriormente, desempenharam um comportamento esperado por uma fibra, aumentando a resistência máxima e mantendo essa resistência de pós-pico. No entanto, observou-se uma taxa considerável de degradação nas fibras de açaí. Os compósitos contendo 1,0% de fibras de açaí mostraram uma perda de resistência de aproximadamente 190,93%, enquanto os compósitos com 2,0% de fibras de açaí apresentaram uma perda de resistência de cerca de 122,90%.
- A degradação dos materiais naturais é atribuída principalmente ao ataque de fungos e bactérias presentes no solo, conforme indicado pela análise de pH e pelas imagens obtidas por MEV;
- Com o ensaio de DRX foi obtido os IC: 71,93% para a serragem de bambu, 54,25% para a fibra de coco e 50,79% para a fibra de açaí.
- No ensaio de FRX foi possível notar um aumento considerável tanto no teor de alumínio (Al) quanto no de ferro (Fe) à medida que os meses de degradação avançam, abrangendo todos os tipos de reforços estudados;
- Os resultados das curvas de Parâmetros-chave mostram que a serragem de bambu não apresentou resultados satisfatórios para a correlação estabelecida, com um coeficiente de determinação muito baixo de 0,328. Por outro lado, as fibras de coco e açaí mostraram resultados consistentes, com R^2 de 0,954 e 0,935, respectivamente.

Em suma, a reutilização de resíduos de bambu, coco e açaí para reforçar solos emerge como uma opção viável e amplamente vantajosa em termos ambientais e econômicos. Ao adotar essa técnica de reforço de solo com matérias naturais, não somente se previne o acúmulo prejudicial desses resíduos, reduzindo sua presença em aterros, rios e praias, e minimizando a necessidade de novas matérias-primas, mas também se oferece uma maneira eficaz de aprimorar as características geotécnicas do solo.

Durante a progressão dos ensaios no desenvolvimento do trabalho, surgiram novas ideias e a necessidade de mais ensaios especiais. No entanto, devido às restrições do laboratório e tempo, não foi viável implementar essas novas ideias e desenvolver mais ensaios. Portanto, a seguir serão mencionadas algumas sugestões para pesquisas futuras, com o objetivo de aprofundar o conhecimento e dar continuidade aos estudos sobre o uso de materiais naturais como reforço de solo:

- Avaliar os efeitos do envelhecimento natural em outros tipos de resíduos de vegetais;
- Mapear uma maior quantidade de teores de reforço para determinação de teor ótimo de material natural;
- Estudar a durabilidade a longo prazo (mais de 6 meses) para avaliar o desempenho sustentado dos compósitos em várias condições climáticas.
- Avaliar a influência do envelhecimento natural das fibras vegetais em diferentes tipos de solos;
- Desenvolver métodos otimizados para incorporar esses reforços no solo e garantir uma distribuição uniforme.
- Investigar o uso de tratamentos superficiais a serem aplicados nas fibras vegetais, buscando melhorar sua durabilidade;
- Realizar ensaios triaxiais nos compósitos reforçados.

REFERÊNCIAS

- Abbaspour, M., Aflaki, E., & Moghadas Nejad, F. (2019). Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1059–1071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.253>
- ABNT. (2009). Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. NBR ISSO 9778. Rio de Janeiro, 4p, Versão corrigida.
- ABNT. (2016). Solo - Determinação do Limite de Liquidez - Método de Ensaio. NBR ISSO. 6459. Rio de Janeiro, 54.
- ABNT. (2016). Solo - Determinação do Limite de plasticidade - Método de Ensaio. NBR ISSO. 7180. Rio de Janeiro, 54.
- ABNT. (2016). Solo - Análise granulométrica de solos. NBR ISSO 7181. Rio de Janeiro, 7 p.
- ABNT. (2017). Grãos que passam na peneira 4,88mm - Determinação da Massa específica - Método de ensaio. NBR ISSO 6508. Rio de Janeiro, 54.
- ABNT. (2022). Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. NBR ISSO 12770. Rio de Janeiro.
- Aguilar, J. R. T. (2015). Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 114 p. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.25737>
- Alelvan, G. M. (2022). Análise Mecânica e Microestrutural de Rejeito de Minério de Ouro Estabilizado com Solução Polimérica. Tese de Doutorado, Publicação G.DM – 343/2022 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 171 p.
- Almeida, M. D; Almeida J. G; & Santos, A. C. (2015). Produtividade de colmos para a produção industrial de bambu laminado colado. III Seminário Nacional do Bambu, Goiânia.
- Alves, A. L., Ferrero, G. C., Dos Santos, G. F., Valarelli, I. D. & Barata, T. Q. F. (2015). Sustainable Use Of Bamboo In Design Case Sousplat Prototypes Study With Use Of Bamboo Residue. *Projética Revista Científica de Design*, Londrina, 6 (2), 98-109.
- Alves Fidelis, M. E., Pereira, T. V. C., Gomes, O. D. F. M., De Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>
- 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.
- Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B. B. K., & Nahazanan, H. (2015). Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*, 59, 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.059>
- Anokye, R., Bakar, E. S., Ratnansingam, J. & Awang, K. B. (2016). Bamboo Properties and Suitability as a Replacement for Wood. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, Malásia, 2 (1), 64-80.
- Araújo, J. R.; Waldman, W. R.; De Paoli, M. A. (2008). *Polym. Degrad. Stab*93, 1770.
- Azevedo, A., De Matos, P., Marvila, M., Sakata, R., Silvestro, L., Gleize, P., & Brito, J. D. (2021a). Rheology, Hydration, and Microstructure of Portland Cement Pastes Produced with Ground Açai Fibers. *Applied Sciences*, 11(7), 3036. <https://doi.org/10.3390/app11073036>
- Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., Tayeh, B. A., Cecchin, D., Pereira, A. C., & Monteiro, S. N. (2021b). Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars. *Journal of Building Engineering*, 33, 101675. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101675>
- 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>
- Bawadi, N. F., AlHamidi, M. A. A., Mansor, A. F., & Anuar, S. A. (2020). Influence of Banana Fiber on Shear Strength of Clay Soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 864(1), 012099. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012099>
- Bazzetto, J. T. L., Bortoletto Junior, G. & Brito, F. M. S. (2019) Effect of particle size on bamboo particle board properties. *Floresta e Ambiente*, 26 (2), 1-8.
- Bernardina, F.; Casagrande, M. (2018). Avaliação da Degradação de Fibras (Natural e Sintética) e sua Influência no Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, II, 1, 1–10.
- 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>
- Bolaños, R. E. Z. (2013). Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 143 p. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.23442>
- Brasil, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). European Commission, (1996).

- Buckeridge, M. S., Santos, W. D., & Souza, A. P. (2022). Rotas para o etanol celulósico no Brasil. <https://fapesp.br/chamadas/bioen/apresentacoes/20080703-MBuck.pdf>
- Budinski, K. (1996). *Engineering materials, properties and selection* (5. Ed). New Jersey: Prentice Hall International, 653 p.
- Bueno, B. S. (1996). Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: *International Symposium Environmental Geotechnology*, v. 3, 878–884.
- Cabral, M. M. S., Abud, A. K. de S., Rocha, M. S. R. S., Almeida, R. M. R. G & Gomes, M. A (2017) Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. *ENGEVISTA*, 19 (1), 99-108.
- Canilha, L., Milagres, A.M.F., Silva, S.S., Silva, J.B.A., Felipe, M.G.A., Rocha, G.J.M., Ferraz, A., & Carvalho, W. (2010). Sacarificação da biomassa lignocelulósica através de pré-hidrólise ácida seguida por hidrólise enzimática: uma estratégia de “desconstrução” da fibra vegetal. *Revista Analytica*, São Paulo, 44, 48-54.
- Cardoso, A. J. de M. S. (1987). A técnica das pregagens em solos aplicada em escavações: métodos de análise e dimensionamento. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 496 p.
- Carvalho, L. M. de C. (2019). Comportamento Mecânico De Um Solo Arenoso Reforçado Com Fibras Naturais Submetido A Ensaio De Cisalhamento Direto Em Média Escala. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 105 p.
- 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.
- Chang, R. (2010) *Físico-Química: Para as Ciências Químicas e Biológicas*. 2(3), AMGH Editora São Paulo.
- Chen, W. S., Yu, H., Liu, Hai, Y., Zhang, M., & Chen, P. (2011). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from four plant cellulose fibers using a chemical-ultrasonic process. *Cellulose* 18. (2):433–42. doi:10.1007/s10570-011- 9497-z
- Cheng-Wei, C. (2010). Triaxial compression and extension test for fiber-reinforced silty sand. *GeoShanghai*, International Conference ASCE. Geotechnical Special Publication n° 207, 367-375.
- Chesson, A. (1997). *Plant degradation by ruminants: parallels with litter decomposition in soils. Driven by nature: plant litter quality and decomposition*, Wallingford: CAB International
- Claria, J. J., & Vettorelo, P. V. (2016). Mechanical Behavior of Loose Sand Reinforced with Synthetic Fibers. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 53(1), 12–18. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9357-9>

- Coelho De Carvalho, L. M., & Dal Toé Casagrande, M. (2019). Mechanical Behaviour of Reinforced Sand with Natural Curauá Fibers through Full Scale Direct Shear Tests. *E3S Web of Conferences*, 92, 12003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199212003>
- Conceição, M. (2021). Análise do comportamento tensão - deformação de um solo reforçado com fibra. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- Consoli, N. C.; Prietto, P. D. M.; Ulbrich, L. A. (1999). The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. *Ground Improvement*, London, 3(1), 21–30.
- Consoli, N. C., Casagrande, M. D. T., & Coop, M. R. (2007a). Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. *Géotechnique*, 57(9), 751–756. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.9.751>
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., & Heineck, K. S. (2007b). Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 197–205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197))
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D. M., & Pasa, G. S. (2002). Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), 462–472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:6\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462))
- Consoli, N. C., Nierwinski, H. P., Peccin Da Silva, A., & Sosnoski, J. (2017). Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2), 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.01.001>
- Consoli, N. C., Rosa, F. D., & Fonini, A. (2009). Plate Load Tests on Cemented Soil Layers Overlaying Weaker Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1846–1856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000158)
- Corrêa, A. C. (2010). Preparação de nanofibras de celulose a partir de fibras de curauá para desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos com EVA. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, UFSCar, São Carlos, 153 p.
- Correal, F. F. (2020). Bamboo design and construction. Em *Nonconventional and Vernacular Construction Materials* (p. 521–559). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00019-6>
- Costa, J. E. G. (2013). Estudo da degradação de geotêxteis em fibra natural. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 111 p.
- Coutts, R. S. P. (1986). High yield wood pulps as reinforcement for cement products. *Appita Journal*, 39(1), 31-35.
- Curcio, D. S. (2008). Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRJ, Rio de Janeiro, 149 p.
- Defoirdt, N., Biswas, S., Vriese, L. D., Tran, L. Q. N., Acker, J. V., Ahsan, Q., Gorbatiikh, L., Vuure, A. V., & Verpoest, I. (2010). Assessment of the tensile properties of coir, bamboo

- and jute fibre. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(5), 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.005>
- Devi, D., & Jempen, B. (2016). Shear Strength Behaviour of Bamboo Fiber Reinforced Soil. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Arunachal Pradesh, India, 3 (8), 433-437.
- Dittember, D. B., & Gangarao, H. V. S. (2012). Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), p. 1419-1429.
- DNER – Departamanto Nacional De Estradas E Rodagem (1994). DNER-ME 228/94 “Solos – compactação em equipamento miniatura”.
- Donato, M., Foppa, D., Pereira, J. A., & Consoli, N. (2004). Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS/ABGE, 27(2), 161–179.
- Endo, T.; & Tsuruta, T. (1969). The effect of tree roots upon the shearing strength of soil. Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experimental Station, v. 18, p. 167–182.
- FAO. Food Agriculture Organization. World production of the natural foods. Disponível em: www.faostat.org/family-farming-2014/pt/
- Ferreira, S. R., Silva, F. D. A., Lima, P. R. L., & Toledo Filho, R. D. (2017). Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. *Construction and Building Materials*, 139, 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>
- Festugato, L. (2008). Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS., Porto Alegre, 145 p.
- Feuerharmel, M. (2000). Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS., Porto Alegre, 133 p.
- Fidelis, M. (2014). Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- Garcia Filho, F. D. C., Demosthenes, L. C. D. C., Souza, M. O., Pereira, A. C., Luz, F. S. D., Braga, F. O., & Monteiro, S. N. (2019). Desempenho de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava como blindagem individual contra munições de alta energia. *ABM Proceedings*, 902–911. <https://doi.org/10.5151/1516-392X-31529>
- Gehlen, L.R. (2014). Efeito da Utilização de Fibras Lignocelulósticas (Açaí e Curauá) em Compósitos com Matriz de Resina Poliéster Insaturado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 104 p.

- Ghavami, K., Toledo Filho, R. D., & Barbosa, N. P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 39–48. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X)
- Ghavami, K.; Barbosa, N. P. Capítulo 48: Bambu. Isaia, G. C. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. (3 Ed). IBRACON. São Paulo.
- Graça, V. L. (1988). *Bambu: Técnicas para o cultivo e suas aplicações* (2 Ed). Icone. São Paulo.
- Gondim, L. M.; Casagrande, M. D. T.; & Barroso, S. H. de A. (2008) Influência da Adição de Fibras de Polipropileno em Solos da Região do Baixo Jaguaribe do Ceará Visando Aplicação em Solos de Base para Pavimentação. *Anais do IX COBRAMSEG*. p. 2122–2129.
- Gray, D.; Ohashi, H. (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, 109(3), 335–353.
- Guedes, E. S. R., Lima, I. S & Santos, M. L. J. (2019). Estudo Do Uso Do Bambu Como Alternativa De Reforço De Solo. XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul - GEOSUL. Joinville-SC
- Hannant, L. (1994). *Polymers and polymers composities. Construction materials: their nature and behavior* (2 Ed). JM Illston/E & FN Spon, 19, 359–403.
- Heineck, K. S. (2002). Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais. Tese de Doutorado, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, 251 p.
- 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>
- Hidalgo López, O. (2003). *Bamboo: the gift of the gods* (1st ed). O. Hidalgo-López.
- Hollaway, L. (1994). *Polymers and polymers composities. Construction Materials; their nature and behavior* (2 Ed), London: J. M. Illston/E & FN Spon, 584 p.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), *Produção da extração vegetal e silvicultura - PEVS*, Rio de Janeiro.
- Janssen, J. J. A. (2000). *Designing and building with bamboo*.
- John, M. J., & Anandjiwala, R. D. (2008). Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, 29(2), 187–207. <https://doi.org/10.1002/pc.20461>
- Johnston, C. (1994). *Advances in Concrete Technology*. Ottawa: National Resources Canada, Fiber-Reinforced Cement and Concrete.
- Jones, C. J. F. P. (2010). *Earth reinforcement and soil structures* (3rd ed). T. Telford, ASCE Press, 400 p.

- Judziewicz, E. J. (Org.). (1999). American bamboos. Smithsonian Institution Press.
- Kalkan, E., Kartal, H. O., & Kalkan, O. F. (2022). Experimental Study on the Effect of Hemp Fiber on Mechanical Properties of Stabilized Clayey Soil. *Journal of Natural Fibers*, 19(16), 14678–14693. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2068725>
- Kaul, R. (1965) The influence of roots on certain mechanical properties of an uncompacted soil. PhD Thesis, University of North Carolina, North Carolina.
- Khan, J. A., & M. A. Khan. (2015). The use of jute fibers as reinforcements in composites. In *Biofiber reinforcements in composite material*. O. Faruk and M. Sain, 3–34. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Khatri, V. N., Dutta, R. K., Venkataraman, G., & Shrivastava, R. (2015). Shear Strength Behaviour of Clay Reinforced with Treated Coir Fibres. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.7917>
- Kutanaei, S. S., & Choobbasti, A. J. (2016). Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(6), 579–593. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1110073>
- Lacerda, M. S., & Leitão, F. (2021). O coco verde no contexto da economia circular: Uma revisão sistemática da literatura. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 14(3), 1–16. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n3e8092>
- Leocádio, G. (2005). Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 84 p.
- Lima Júnior, U. M. (2007). Fibras da Semente do Açaizeiro (*Euterpe Oleracea* Mart.): Avaliação Quanto ao Uso como Reforço de Compósitos Fibrocimentícios. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 113 p.
- Lirer, S., Flora, A., & Consoli, N. C. (2012). Experimental Evidences of the Effect of Fibres in Reinforcing a Sandy Gravel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(1), 75–83. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9450-9>
- 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>
- Lopes, M.M. (2019). Estudo do comportamento físico-mecânico de solos reforçados com fibras de açaí (*Euterpe oleracea*). Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 108 p.
- Lopes, M.M. (2022). Análise Mecânica e Microestrutural de um Rejeito de Ferro Ultrafino Estabilizado com Solução Polimérica. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 p.
- Marçal, V. H. S. (2018). Análise comparativa de normas técnicas internacionais para o emprego do bambu - colmo em estruturas prediais. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, DF, 102 p.

- Maher, M. H., & Ho, Y. C. (1994). Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8), 1381–1393. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:8\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:8(1381))
- Martin, A. R., Martins, M. A., Da Silva, O. R. R. F., & Mattoso, L. H. C. (2010). Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. *Thermochimica Acta*, 506(1–2), 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.04.008>
- Martins, A. (2014). Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Martins, G. (2021). A Industrialização Do Bambu E A Sustentabilidade: Análise Da Potencialidade Técnica Do Laminado Colado Na Produção De Componentes Da Construção Civil No Brasil. Dissertação de Mestrado, PPG/FAU, UnB, Brasília, 120 p.
- McGown, A., Andrawes, K. Z., Hytiris, N., & Mercer, F. B. (1985). Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 11, 1735–1738.
- Menezes, L. C. P. D., Sousa, D. B. D., Sukar, S. F., & Ferreira, S. R. D. M. (2019). Analysis of the Physical-Mechanical Behavior of Clayey Sand Soil Improved with Coir Fiber. *Soils and Rocks*, 42(1), 31–42. <https://doi.org/10.28927/SR.421031>
- Mesquita, A. de L. (2013). Estudos De Processos De Extração E Caracterização De Fibras Do Fruto Do Açaí (Euterpe Oleracea Mart.) Da Amazônia Para Produção De Ecopainel De Partículas De Média Densidade. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA, UFP, Pará, 189 p.
- Michalowski, R. L., & Čermák, J. (2003). Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(2), 125–136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:2(125))
- Miranda, B. D., Francisco, C. da C., Bardi, M. F & Freitas, P. B. M. (2019). Estudo de viabilidade técnica de melhoramento de resistência de solos moles através do uso de fibra de bambu para rodovias. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade presbiteriana Makenzie, São Paulo, 22 p.
- Mirzababaei, M., MirafTAB, M., Mohamed, M., & McMahan, 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](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792)
- Mohammed, H. Z., Assefa, E. & Shantveerayya, K. (2022). Utilization of Sisal Fiber as a Subgrade Soil Reinforcement: a Case Study of Alem Tena Town Along Modjo-Meki Expressway. *International Journal of Mechanical Engineering*, 7(1).
- Moreira, F. M. S. (2006). Microbiologia e bioquímica do solo. 2. ed. Lavras: Ed. UFLA, 626 p.
- Motta, L. A. de C., & Agopyan, V. (2007). Caracterização de fibras curtas empregadas na construção civil. São Paulo: EPUSP.

- Mustapha, A. M. (2008). Bamboo as Soil Reinforcement: A Laboratory Trial. *Leonardo Journal of Sciences*. Minna. 13, 69-77.
- Nataraj, M., Addula, H., & Mcmanis, K. (1996). Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: International Symposium on Environmental Geotechnology, 1996. v. 3, 826–835.
- Nascimento, C. M. (2018). Compósito De Gesso Reforçado Com Fibra De Coco E Cortiça Triturada. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica, UFRN, Natal, 93 p.
- Oliveira, G., Lima, A. & Oliveira, W. (2018). Contenção de talude em área de preservação permanente – (APP) com aplicação de biomanta de fibra de coco. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 1(1), 1–5
- Oliveira, A. (2018). Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco. Tese de Doutorado, Departamento De Engenharia Civil E Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 112 p.
- Oliveira, E. S. (2021). Análise Da Incorporação Da Fibra De Bambu (*B. Vulgaris* ‘Vittata’) Em Matriz Geopolimérica. Dissertação de Mestrado, PPGEC, UFAM, Manaus, 84 p.
- Palacios, M. A. P., Casagrande, M. D. T., Folle, D., & Anversa, J. (2015). Estudo do Comportamento de Um Compósito Areia-Fibra em Extensão Axial. *Revista de Engenharia Civil IMED*, 2(1), 33–39. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v2n1p33-39>
- Palmeira, E. (1992). Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. Associação Brasileira De Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica. 1º Simpósio Brasileiro Sobre Geossintéticos, Geossintéticos’92, Brasília, 1–20 p.
- Passos, E. E. M., Castro, C.P., Fontes, H. R., & Cardoso. B. T. (2018). Ecofisiologia. In: Ferreira, J. M. S.; Warwick, D. R. N.; Siqueira, L. A. A cultura do coqueiro no Brasil. 2. ed. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 81-100.
- Passos, P. R. A. (2005). Destinação sustentável de cascas de coco (*Cocos nucifera*) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 186 p.
- Perissotto, D. (2005). Estudo Comparativo das Propriedades Químicas de Polpas Kraft Convencionais e MCC de Eucalipto. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 113 p.
- Pessoa, F. (2004). Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 151 p.
- Peter, L., Jayasree, P. K., Balan, K., & Raj, S. A. (2016). Laboratory Investigation in the Improvement of Subgrade Characteristics of Expansive Soil Stabilised with Coir Waste. *Transportation Research Procedia*, 17, 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.110>

- Picanço, M. S. (2005). Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 101 p.
- Pinto, A. R. A. G. (2021). Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 98 p.
- Pinto, C. M. T. (2021). Estudo do comportamento mecânico de uma areia aluvionar reforçada com fibras. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia.
- Pires, J.S.C. (2009). Fibras naturais: Características químicas e potenciais aplicações. Trabalho de conclusão de curso. Ciências Biológicas. Campus Botucatu. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, Brasil. 60 p.
- Plé, O., Lê, H., & Gotteland, P. (2009). A mechanical approach for fibre-reinforced clay in landfill caps cover application. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(1), 53–69. <https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693085>
- Popescu, M.-C., Popescu, C.-M., Lisa, G., & Sakata, Y. (2011). Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and thermal methods. *Journal of Molecular Structure*, 988(1–3), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.12.004>
- Reis, A. F. de S. M. (2022). Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 111 p.
- Sait, M., Davis, K. E. R., & Janssen, P. H. (2006). Effect of pH on isolation and distribution of members of subdivision 1 of the phylum Acidobacteria occurring in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(03), 1852–1857.
- Santiago, G. A. (2011). Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 130 p.
- Santos, A. C. (2018). Estudo Do Comportamento Higrotérmico De Sistema Construtivo Composto De Painel De Aglomerado De Partículas De Bambu Por Meio Do Software Wufi. Dissertação de Mestrado, PPG/FAU, UnB, Brasília, 108 p.
- Santos, M., & Casagrande, M. (2023). Avaliação de resíduos de bambu como material de reforço de solo tropical. 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. <https://doi.org/10.55449/conresol.6.23.I-027>
- Santos, M. L. D. J., & Guedes, E. D. S. R. (2022). Análise numérica de geogrelhas aplicadas como reforço de base de fundações rasa. *Brazilian Journal of Development*, 8(7), 49327–49344. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n7-044>
- Santos, M. L. J; Machado, M.; & Casagrande, M. (2022). Desempenho de Solo Tropical Reforçado com Fibras de Açaí para a Aplicabilidade na Estabilização de Taludes, In: COBRAE - VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Porto de Galinhas – PE.

- Santos, N. S., Silva, M. R., & Alves, J. L. (2017). Reinforcement of a biopolymer matrix by lignocellulosic agro-waste. *Procedia Engineering*, 200, 422–427. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.059>
- Sarkanen, K. V., & Ludwig, C. H. (1971). Liguins. Occurrence, formation, structure, and reactions. New York., Wiley-Interscience.
- Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E., & Conrad, C.M. (1959). An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. *Textile Research Journal*, 29(10), 786-794.
- Sgriccia, N., Hawley, M. C., & Misra, M. (2008). Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(10), 1632–1637. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.07.007>
- Shewbridge, S. E., & Sitar, N. (1990). Deformation-Based Model for Reinforced Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(7), 1153–1170. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:7\(1153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:7(1153))
- Silva, E. J. D., Marques, M. L., Velasco, F. G., Fornari Junior, C., Luzardo, F. M., & Tashima, M. M. (2017). A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex/pozzolanic materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 12, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.04.003>
- Silva, F., Chawla, N., & Filho, R. D. T. (2010). Mechanical Behavior of Natural Sisal Fibers. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 4(2), 106–113. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2010.1074>
- Silva, F. (2009). Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 243 p.
- Silveira, M. V., & Casagrande, M. D. T. (2021). Effects of Degradation of Vegetal Fibers on the Mechanical Behavior of Reinforced Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(5), 3875–3887. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01733-y>
- Silveira, M., 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004237)
- 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.
- Singh, H. P., & Bagra, M. (2007). Improvement in CBR value of soil reinforced with jute fiber. 2(8).
- Sotomayor, J. M. G. (2014). Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 137 p

- Sotomayor, J. M. G., & Casagrande, M. (2018). The Performance of a Sand Reinforced with Coconut Fibers Through Plate Load Tests on a True Scale Physical Model. *Soils and Rocks*, 41(3), 361–368. <https://doi.org/10.28927/SR.413361>
- Sotomayor, J. M. G., Monique, G., & Casagrande, M. D. (2021). Influence of Polypropylene Fiber-Reinforcement on the Mechanical Behavior of Gold Ore Tailings through Direct Shear Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(10), 04021256. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003878](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003878)
- Souza, W; Toffoli, C. M.; Mutzenberg, D.; & Casagrande, M. (2022). Variable Significance Determination Utilizing Extended CHAID Method in Fiber Improvement of Fine Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 148 p.
- Specht, L. (2000). Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 132 p.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>
- Tang, C.-S., Wang, D.-Y., Cui, Y.-J., Shi, B., & Li, J. (2016). Tensile Strength of Fiber-Reinforced Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546)
- Taylor, G. D. (2013). *Materials in Construction: An Introduction* (3^o ed). Routledge, 334 p. <https://doi.org/10.4324/9781315839158>
- Teixeira, A. A. (2006). Painéis de Bambu para Habitações Econômicas: Avaliação do desempenho de painéis revestidos com argamassa. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 177 p.
- Teodoro, J.; Bueno, B. (1998). Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, v. 11, 1093–1100.
- Teodoro, J. (1999). Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas. Dissertação de Mestrado, Escola de São Carlos, USP, São Paulo, 113 p.
- Thomas, S., Paul, S.A., Pothan, L.A., Deepa, B. (2011). Natural Fibres: Structure, Properties and Applications. In: Kalia, S., Kaith, B., Kaur, I. (eds) *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_1
- Tolêdo Filho, R. (1997). Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.2144>
- Tomczak, D. S. (2011). Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPR, Paraná, 160 p.

- Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. *Transportation Geotechnics*, 16, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>
- Trindade, T. P. D., Iasbik, I., Lima, D. C. D., Minette, E., Silva, C. H. D. C., Carvalho, C. A. B. D., Bueno, B. D. S., & Machado, C. C. (2006). Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. *Revista Árvore*, 30(2), 215–222. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000200008>
- Ulbrich, L. (1997). Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 122 p.
- Vendruscolo, M. A. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos Fibrosos para Aplicação como Reforço de Base de Fundações Superficiais. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 224 p.
- Vidal, H. (1969). The principle of reinforced earth. Highway Research Record, 282 p.
- Vieira, G. M. D. (2021). Avaliação do potencial de adsorção de atrazina em solo pela inserção de fibras de PVDF (Fluoreto de Polivinilideno). Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-354/2021, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89 p.
- Wei, L., Chai, S. X., Zhang, H. Y., & Shi, Q. (2018). Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Construction and Building Materials*, 172, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248>
- Widyorini, R. (2016) Manufacture and properties of citric acid-bonded particleboard made from bamboo materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(1), 57-65.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yixian, W., Panpan, G., Shengbiao, S., Haiping, Y., & Binxiang, Y. (2016). Study on Strength Influence Mechanism of Fiber-Reinforced Expansive Soil Using Jute. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(4), 1079–1088. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0028-4>
- Zainudin, E., Sapuan, S. & Ismail, H. (2018). Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites Development, Characterization and Applications, London: Elsevier.
- Zakikhani, P., Zahari, R., Sultan, M. T. H., & Majid, D. L. (2014). Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites. *Materials & Design*, 63, 820–828. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.058>
- Zena Hadi Alqaissi, Madhat Shakir Al-Soud, Zina Mikhael Dawood, Jinan Marzooq Faleeh, & Aisha Arkan Ahmed. (2023). Assessment Of Geotechnical Properties Of Clay Stabilized With Jute Fiber. *Journal of Applied Science and Engineering*, 26(1), 61–68. [https://doi.org/10.6180/jase.202301_26\(1\).0007](https://doi.org/10.6180/jase.202301_26(1).0007)

Zhou, G., Sun, Q., Meng, Z., Li, D., Peng, Y., Zeng, D., & Su, X. (2021). Experimental investigation on the effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors of carbon/epoxy woven composites. *Composite Structures*, 257, 113366. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113366>