CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Leo Maia do Amaral

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS EM BAMBUS DA ESPÉCIE *DENDROCALAMUS ASPER* APÓS APLICAÇÃO DE CICLOS DE SECAGEM E MOLHAGEM

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profª. Drª. Flávia Spitale Jaques Poggiali
Co-orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues

Belo Horizonte

Fevereiro de 2022

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da Instituição, do autor e dos orientadores.

Leo Maia do Amaral

Possui graduação em Engenharia de Produção Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - (2018). Participou do Programa Institucional de Bolsas em Iniciação Científica Voluntária (CEFET-MG) - (2018). Mestrando na área de Construção Sustentável no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (CEFET-MG) - (2019-2021).

Leo Maia do Amaral

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS EM BAMBUS DA ESPÉCIE *DENDROCALAMUS ASPER* APÓS APLICAÇÃO DE CICLOS DE SECAGEM E MOLHAGEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Profª. Drª. Flávia Spitale Jaques Poggiali
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Co-orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Luís Eustáquio Moreira
Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG

Prof. Dr. Daniel Carlos Taissum Cardoso
Departamento de Engenharia de Civil e Ambiental, PUC-RIO

Belo Horizonte, fevereiro de 2022

Amaral, Leo Maia do
A485a Avaliação de propriedades físicas, químicas e mecânicas em bambus da espécie *Dendrocalamus asper* após aplicação de ciclos de secagem e molhagem / Leo Maia do Amaral. – 2022.
85 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Flávia Spitale Jaques Poggiali.
Coorientador: Conrado de Souza Rodrigues.
Bibliografia: f. 82-85.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Bambu – Propriedades físicas – Teses. 2. Bambu – Propriedades químicas – Teses. 3. Bambu – Propriedades mecânicas – Teses. 4. Materiais de construção – Permeabilidade – Teses. 5.Análise estrutural (Engenharia) – Teses. I. Poggiali, Flávia Spitale Jaques. II. Rodrigues, Conrado de Souza. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 691.3

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6º 1592 / Cefet/MG

Dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família: minha mãe, Simone; meu pai, Ivan; e meu irmão Iuri, que sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida. À minha namorada Duda e aos meus amigos pela paciência e por sempre estarem ao meu lado.

Agradeço à Profª. Drª. Flávia Spitale Jaques Poggiali pelo apoio, orientação, disponibilidade e paciência. Ao Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues pelos ensinamentos e cooperação no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também a todos os servidores e funcionários do CEFET-MG e a todos que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo apoio e toda estrutura disponibilizada para meus estudos. Em especial ao técnico de laboratório Ivan Batista, aos doutorandos Laísa Carneiro e Vitor Nunes, à Késsia Drumond, do departamento de Química, e ao professor Dr. Augusto Bezerra, pelo auxílio na realização dos experimentos.

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e estrutura fornecida para que minha pesquisa pudesse ser realizada.

Muito obrigado!

RESUMO

A busca por alternativas sustentáveis na indústria da construção civil vem se tornando cada vez mais necessária, dado o alto impacto ambiental gerado no consumo de recursos naturais não renováveis e produção de materiais como o aço e o cimento. O bambu se apresenta como opção viável para utilização na construção, abrangendo aspectos ambientais como o sequestro de carbono, recuperação de áreas degradadas e reflorestamento. Além disso, impacta aspectos sociais e econômicos, fomentando o desenvolvimento de áreas periféricas, e possui propriedades físicas e mecânicas que o tornam um material de alta eficiência e resistência. Apesar do potencial, o bambu ainda é pouco utilizado no Brasil devido à falta de normas e procedimentos técnicos bem desenvolvidos e, por se tratar de um material natural, necessita de mais estudos relacionados à sua geometria e aos efeitos de agentes naturais, teor de umidade, insolação, dentre outros, para garantir durabilidade e segurança satisfatórias à estrutura. Dada a higroscopicidade do bambu e a diminuição da resistência do colmo quando submetido a um aumento do teor de umidade, a presente pesquisa avaliou os efeitos da hornificação - gerada por meio da aplicação de ciclos de secagem e molhagem - nas propriedades físicas, mecânicas e químicas do colmo, bem como sua capacidade de retenção e absorção de água e variação dimensional após o tratamento. Os resultados indicaram que a aplicação dos ciclos de molhagem e secagem aumentou a estabilidade dimensional do bambu, embora não tenha sido verificada uma redução da capacidade de absorção de água. Houve manutenção do módulo de elasticidade do material e leve redução da resistência à tração. Ensaios químicos e a análise de microscopia não mostraram alterações significativas na composição do bambu após a aplicação de ciclos de molhagem e secagem.

Palavras-chave: Bambu, hornificação, teor de umidade, propriedades físicas, propriedades químicas, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The search for sustainable alternatives in the construction industry is becoming increasingly necessary, given the high environmental impact caused by the consumption of non-renewable resources and the production of materials such as steel and cement. Bamboo can be a viable option for its use in construction, covering environmental aspects such as carbon consumption, recovery of degraded areas and reforestation. In addition, it impacts social and economic aspects, promoting the development of peripheral areas; and has physical and mechanical properties that make it a material of high efficiency and resistance. Despite the potential, bamboo is still not used frequently in Brazil due to the lack of technical standards and construction procedures that guarantee a safe use of it. Also, it requires further studies related to its natural properties and its relation with natural agents, moisture content variation, insolation, among others, to guarantee durability and safety to the structure. Given the hygroscopic nature of bamboo and the decrease of its resistance when its moisture content increases, this research evaluated the effects of hornification on bamboo – generated through application of drying and rewetting cycles – on physical, mechanical and chemical properties of the culm, and also assessed its water retention and absorption capacities after the treatment. It was found that the hornification increased the dimensional stability of bamboo, although a reduction in the water absorption capacity was not verified. There was maintenance of the elastic modulus and a slight reduction in tensile strength. Chemical analysis and microscopy did not show significant changes in bamboo composition after the application of wetting and drying cycles.

Keywords: hornification, moisture content, physical properties, chemical properties, mechanical properties.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo do teor de umidade. 45
Equação 2: Capacidade de absorção de água.....46
Equação 3: Capacidade de retenção de água. 46
Equação 4: Índice de cristalinidade.....54
Equação 5: Variação da absorção de água. 59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes do bambu. 21
Figura 2: Estrutura do bambu: (a) trecho do colmo, (b) seção transversal do nó, (c) região internodal. 22
Figura 3: Características físicas da espécie *Phyllostachys edulis Riv.* 23
Figura 4: Características físicas da espécie *Guadua Angustifolia.* 24
Figura 5: Imagem tridimensional do tecido do colmo. 25
Figura 6: Variação volumétrica das fibras ao longo da espessura do colmo. 25
Figura 7: Orientações das faces no colmo do bambu. 28
Figura 8: Estágios de saturação da madeira. 29
Figura 9: Resistência à tração normalizada de fibras vegetais após hornificação. ... 39
Figura 10: Análise por microscopia eletrônica de fibras de sisal após tratamento. ... 39
Figura 11: Módulo de elasticidade normalizado de fibras vegetais após hornificação. 40
Figura 12: Módulos de elasticidade do bambu após hornificação. 41
Figura 13: Fluxograma dos procedimentos adotados. 44
Figura 14: Obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração. 48
Figura 15: Falha próxima ao mordente em ensaio de tração no bambu. 49
Figura 16: Corpos de prova com espessura de 2 mm após rompimento. 50
Figura 17: Detalhes do ensaio de tração (a) setup utilizado (b) corpo de prova com lixas. 50
Figura 18: Redução da sombra com papel vegetal. 51
Figura 19: Testes no *software ImageJ.* 52
Figura 20: Etapa de *treshold* no software *ImageJ.* 52
Figura 21: Corpos de prova e pesagem da etapa de ajuste (a) antes da imersão (b) após imersão (c) após secagem. 55
Figura 22: Ajuste para definição dos ciclos de secagem e molhagem. 56
Figura 23: Ciclos de imersão e secagem. 57
Figura 24: Variação do teor de umidade após etapas de molhagem. 58
Figura 25: Variação da capacidade de absorção de água durante a aplicação dos ciclos. 60
Figura 26: Linhas de tendência para absorção de água pelo bambu. 62

Figura 27: Gráfico de tensão x deformação para um corpo de prova de bambu sem tratamento. 63
Figura 28: Modos de ruptura do bambu após ensaio de tração. 65
Figura 29: Resistência à tração do bambu após hornificação. 66
Figura 30: Módulo de elasticidade do bambu após hornificação. 68
Figura 31: Variação da seção transversal ao longo do tempo. 69
Figura 32: Boxplots das análises de variação dimensional para diferentes tempos de imersão 70
Figura 33: Imagens de microscopia da seção transversal do bambu. 73
Figura 34: Resultado da análise por MEV em bambus na direção longitudinal. 74
Figura 35: Micro poros no bambu: (a) fibras (LSCM), (b) parênquima (LSCM), (c) parênquima (MEV). 75
Figura 36: Picos de intensidade obtidos por meio do DRX. 77
Figura 37: Espectros obtidos por FT-IR para o bambu. 78
Figura 38: Espectros obtidos por FT-IR entre 1900 e 1300 cm^(-1) 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas ao longo da direção radial. 26
Tabela 2: Propriedades mecânicas de diferentes espécies de bambu. 27
Tabela 3: Tratamentos químicos comerciais para madeira e bambu. 32
Tabela 4: Portfólio bibliográfico sobre hornificação. 35
Tabela 5: Resumo dos ciclos de secagem e molhagem. 36
Tabela 6: Resumo dos parâmetros avaliados após a hornificação. 37
Tabela 7: Posição dos trechos dos colmos. 43
Tabela 8: Análise estatística dos valores médios de absorção ao longo dos ciclos. .57
Tabela 9: Análise estatística dos valores médios da variação de absorção ao longo dos ciclos.....59
Tabela 10: Valores médios de absorção de água após hornificação. 61
Tabela 11: Teste de tração no bambu. 64
Tabela 12: Valores de densidade do bambu tratato e sem tratamento. 72
Tabela 13: Resultados do ensaio de DRX no bambu. 76
Tabela 14: Picos característicos de absorbância na madeira. 77
Tabela 15: Razão entre intensidades de grupos funcionais do bambu. 79

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 5
RESUMO 6
ABSTRACT 7
LISTA DE EQUAÇÕES 8
LISTA DE FIGURAS 9
LISTA DE TABELAS 11
SUMÁRIO 12
1. INTRODUÇÃO 14
1.1 PERGUNTA DE PESQUISA 17
1.2 OBJETIVOS 17
1.2.1 Objetivo geral 17
1.2.2 Objetivos específicos 17
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
2.1 BAMBU 20
2.1.1 Estrutura do bambu 22
2.1.2 Propriedades Mecânicas 26
2.1.3 Bambu e o teor de umidade 28
2.2 MÉTODOS DE TRATAMENTO DO BAMBU 30
2.2.1 Métodos tradicionais 31
2.2.2 Métodos químicos comerciais 32
2.2.3 Óleos vegetais e óleos essenciais 33
2.2.4 Tratamentos químicos alternativos 34
2.3 HORNIFICAÇÃO 34
3. MATERIAIS E MÉTODOS 43
3.1 MATERIAIS 43
3.2 MÉTODOS 43
3.2.1 Ajuste: Determinação dos tempos de secagem e molhagem 44
3.2.2 Determinação das capacidades de absorção e retenção de água 46
3.2.3 Absorção de água - 1, 12, 24, 98 e 268 horas 46
3.2.4 Ensaio de tração 47

3.2.5 Análise da variação dimensional 50
3.2.6 Análise de densidade por picnometria 53
3.2.7 Microscopia eletrônica de varredura 53
3.2.8 Análise por DRX 53
3.2.9 Análise por FT-IR 54
4. RESULTADOS 55
4.1 AJUSTE: DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE SECAGEM E MOLHAGEM 55
4.2 DETERMINAÇÃO DAS CAPACIDADES DE ABSORÇÃO E RETENÇÃO DE ÁGUA 57
4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA – 1, 12, 24, 98 e 268 HORAS 61
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO 63
4.5 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL 68
4.6 ANÁLISE DE DENSIDADE POR PICNOMETRIA 71
4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA 73
4.8 ANÁLISE POR DRX 76
4.9 ANÁLISE POR FT-IR 77
5. CONCLUSÃO 80
6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS 81
REFERÊNCIAS 82

1. INTRODUÇÃO

O mundo vive em constante processo de transformação, e medidas sustentáveis vêm sendo discutidas em diversos setores da sociedade: indústria, agricultura, infraestrutura, transporte, construção civil, dentre outros. Uma remodelação na estrutura de consumo de recursos naturais parte da necessidade de evitar ou atenuar consequências iminentes do uso inadequado e agressivo de bens provenientes da natureza, e da forma como são tratados os resíduos gerados pelas ações humanas durante gerações (BARROS *et al.*, 2020).

As possíveis alterações climáticas geradas pela alta taxa de emissão de gases de efeito estufa são foco de debates e acordos há décadas e foram explicitadas no recente relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2021). Em 2016, o Brasil assinou seu compromisso com o Acordo de Paris, tratado que prioriza a redução da emissão desses gases. Dentre os compromissos firmados pelo país estão: a redução em até 37% da emissão até 2025 (tendo como referência o ano de 2005), redução do desmatamento, restauração de até 12 milhões de hectares de floresta e incentivo à utilização de matrizes energéticas limpas (BRASIL, 2015; BRASIL, 2017).

No Brasil, a emissão de CO_2 na atmosfera chegou a quase dois bilhões de toneladas em 2018, sendo aproximadamente 44% derivadas do manejo indevido de terras e florestas e 5% de processos industriais, onde são contabilizadas as emissões geradas no processo de transformação dos materiais, não incluso o manejo de resíduos, emissões por queima de combustíveis ou transporte de materiais (ANGELO; RITTL, 2019).

Materiais utilizados na construção civil como aço e cimento são produzidos e consumidos em larga escala, sendo a produção de cimento a terceira maior consumidora de energia e segunda maior emissora direta de CO_2 do setor industrial (WBCSD; IEA, 2018) e, apesar da evolução tecnológica e de desempenho desses materiais ao longo do tempo, o processo de produção dos mesmos gera um alto custo ambiental. A produção de cimento Portland no Brasil, por exemplo, foi de 53,3 milhões de toneladas em 2018 (SEEG, 2020). Em 2014, cada tonelada de cimento produzida nacionalmente liberava 564 kg de dióxido de carbono (AECWEB, 2020), o que resultaria na emissão de aproximadamente 30,1 milhões de toneladas na atmosfera.

Em contrapartida, o déficit habitacional estimado no Brasil em 2019 foi de aproximadamente 5,9 milhões de domicílios (SANTOS, ELEONORA CRUZ *et al.*, 2021), e há uma tendência de crescimento populacional e de urbanização nos próximos anos (WBCSD; IEA, 2018), o que indica que os materiais tradicionais, apesar de suas constantes melhorias e alto consumo, são insuficientes para suprir as demandas por moradias e infraestrutura. Portanto, soluções complementares com baixo impacto ambiental devem ser cada vez mais incentivadas, aumentando a disponibilidade de materiais e alternativas para o desenvolvimento social e econômico de áreas rurais e periféricas (DRUMOND; WIEDMAN, 2017).

Nesse contexto, o potencial do bambu como material sustentável na manutenção e recuperação de florestas e cursos d'água (JANSSEN, 2000), no sequestro de carbono (RAO, 2004), além do seu uso na construção civil com função estrutural em andaimes (JANSSEN, 2000), pontes para pedestres (LAROQUE, 2007; PARASKEVA; GRIGOROPOULOS; DIMITRAKOPOULOS, 2017; VAN DER LUGT; VAN DEN DOBBELSTEEN; JANSSEN, 2006), casas e edificações pequenas (XIAO; INOUE; PAUDEL, 2008), elemento espacial em coberturas e telhados (SALCIDO; RAHEEM; RAVI, 2016; SEIXAS *et al.*, 2017) dentre outros, o torna uma opção viável como recurso de baixo custo ambiental.

Apesar do grande potencial do bambu, a utilização do mesmo ainda é bastante restrita no Brasil. Esse fato se deve à falta de tradição e a ausência de protocolos que permitam o uso consciente e seguro do material (DRUMOND; WIEDMAN, 2017). A recente aprovação das normas técnicas de bambu NBR 16828:2020 partes 1 e 2, que correspondem ao projeto e determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu, publicadas em 21/12/2020 (ABNT, 2021), surge como um novo incentivo ao uso desse material, visto que aumentam a disponibilidade de informações sobre a utilização do mesmo, possibilitando maior capacitação de mão-de-obra qualificada. Em contrapartida, as características irregulares do colmo[1] oneram os custos relacionados ao uso do bambu na construção civil (VAN DER LUGT; VAN DEN DOBBELSTEEN; JANSSEN, 2006).

Por se tratar de um material natural com alta capacidade de absorção de água (CLARAMUNT *et al.*, 2011), é importante avaliar o efeito de fatores como umidade, insolação, temperatura e degradação por meio de agentes externos, além do

[1] Colmo é o nome dado ao trecho do caule das plantas que se encontra acima da superfície (DRUMOND; WIEDMAN, 2017).

comportamento mecânico e geometria do colmo (LAKKAD; PATEL, 1981). Esses fatores se inter-relacionam e impactam diretamente na viabilidade de utilização do material. As propriedades mecânicas são fortemente influenciadas pelo teor de umidade (CHUNG; YU, 2002), que também está correlacionado com a suscetibilidade do material ao ataque de fungos e mofo (XIAO; INOUE; PAUDEL, 2008).

Portanto, diversas técnicas são utilizadas para o tratamento da peça, tais como: colheita na época adequada (MAGEL *et al.*, 2005; SULTHONI, 1985), imersão em água (ASHAARI; MAMAT, 2000), secagem por fumaça (JANSSEN, 1995; LIESE, WALTER; TANG, 2015a), tratamentos com substâncias químicas (GAUSS *et al.*, 2021a; LIESE, WALTER; TANG, 2015a; SONTI, 1988; SULTHONI, 1988), dentre outros.

No presente trabalho, o efeito da hornificação na espécie de bambu *Dendrocalamus Asper* como alternativa aos tratamentos supracitados foi investigado por meio de ensaios laboratoriais. Tal efeito se refere à redução da capacidade de absorção e retenção de água, aumento da rigidez do material (FERREIRA *et al.*, 2017) e redução da porosidade (STONE; SCALLAN, 1965), obtido por meio de consecutivos ciclos de secagem e molhagem. O processo é comumente aplicado em fibras vegetais para uso em compósitos de fibrocimento (CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010a) e foi inicialmente observado durante o processo de reciclagem de papel na indústria papeleira (MINOR, 1994).

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

Quais os efeitos da aplicação de ciclos de molhagem e secagem consecutivos nas propriedades mecânicas, físicas e químicas do bambu?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Verificar as alterações físicas, químicas e mecânicas geradas no bambu após a aplicação de ciclos consecutivos de secagem e molhagem.

1.2.2 Objetivos específicos

a) Determinar tempos de imersão e secagem e quantidade de ciclos necessários para produzir o efeito de hornificação no bambu;
b) Comparar resultados da hornificação no bambu em relação aos resultados encontrados em fibras vegetais;
c) Mensurar variações dimensionais após o processo de hornificação;
d) Mensurar capacidades de absorção de água do bambu após o processo de hornificação;
e) Comparar capacidade de absorção de água após aplicação de ciclos com outros tratamentos aplicados ao bambu;
f) Verificar se há alterações na composição química da peça;
g) Medir a variação no módulo de elasticidade do bambu e na resistência à tração.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

As diretrizes da Lei Nº 12.484 de setembro de 2011 (BRASIL, 2011) incentivam o manejo, o cultivo, a utilização e a comercialização do bambu e seus subprodutos. A publicação do livro “Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia” como parte da cooperação de desenvolvimento em ciência e tecnologia do bambu entre Brasil e China, e a recente publicação das normas técnicas de bambu NBR 16828:2020 partes 1 e 2 (ABNT, 2021) corroboram com a intenção de popularizar o uso do material no país. Entretanto, mais pesquisas são necessárias a respeito do seu desempenho na construção civil, de métodos construtivos práticos, de ligações eficientes entre colmos e do estudo da durabilidade do material ao longo da vida útil da edificação para promover o uso seguro e eficiente do material.

Uma análise do ciclo de vida de uma ponte de pedestres na Holanda concluiu que o bambu possui menor custo ambiental e menor custo de compra se comparado a outros materiais mais comumente utilizados (madeira, aço e concreto), apesar da necessidade de maior estruturação da cadeia produtiva de bambus, sendo o custo anual de manutenção o aspecto com menor eficiência do material, com resultado semelhante ao da madeira (VAN DER LUGT; VAN DEN DOBBELSTEEN; JANSSEN, 2006). No Brasil, os custos ambientais e financeiros relacionados à importação do colmo seriam drasticamente reduzidos, visto que há grande potencial para o cultivo local, tornando o material mais acessível.

O comportamento hidrofílico do bambu causa variações dimensionais significativas na direção radial (LIESE, W., 1985) e reduções na resistência da peça à medida que o teor de umidade aumenta principalmente aos esforços de compressão e cisalhamento paralelo à fibra (JIANG *et al.*, 2012).

Portanto, a aplicação de processos que reduzam a variação dimensional e a degradação de propriedades mecânicas do colmo é de grande relevância para garantir maior segurança estrutural da edificação e menores custos em manutenções e troca dos elementos.

A revisão da literatura indica que o tratamento do bambu através de ciclos de molhagem e secagem ainda foi pouco explorado, sendo identificado apenas em dois trabalhos (BETZ, 2018; CID *et al.*, 2020). BETZ (2018) submeteu peças de bambu a ciclos de molhagem e secagem para simular o efeito causado por chuvas em uma ponte e observou que, assim como outras fibras naturais, existe uma tendência da

diminuição de absorção de água pelo material. CID *et al.* (2020), por meio de uma análise experimental mais completa, identificaram a redução da capacidade de absorção e retenção de água ao final de dez ciclos, bem como um aumento linear da rigidez em ripas de bambu. Apesar de observado um pequeno aumento na resistência à flexão, não foi possível determinar um padrão para a variação dessa propriedade. O módulo de elasticidade, por sua vez, não apresentou diferenças significativas até 3 ciclos de molhagem e secagem, sendo observado um aumento de aproximadamente 65% após a aplicação de 5 ciclos e um posterior decréscimo após 10 ciclos.

Portanto, o presente trabalho visa à extensão do conhecimento a respeito dos efeitos do processo de secagem e molhagem no bambu, a fim de verificar a eficiência de tal prática e quais as suas implicações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas da peça.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos apresentados neste capítulo são relativos às propriedades físicas, químicas e mecânicas bambu; aos métodos de tratamento utilizados para aumento da durabilidade do material; e à aplicação dos ciclos de molhagem e secagem e o efeito da hornificação, visando à formação de uma base teórica necessária para melhor entendimento do desenvolvimento da pesquisa.

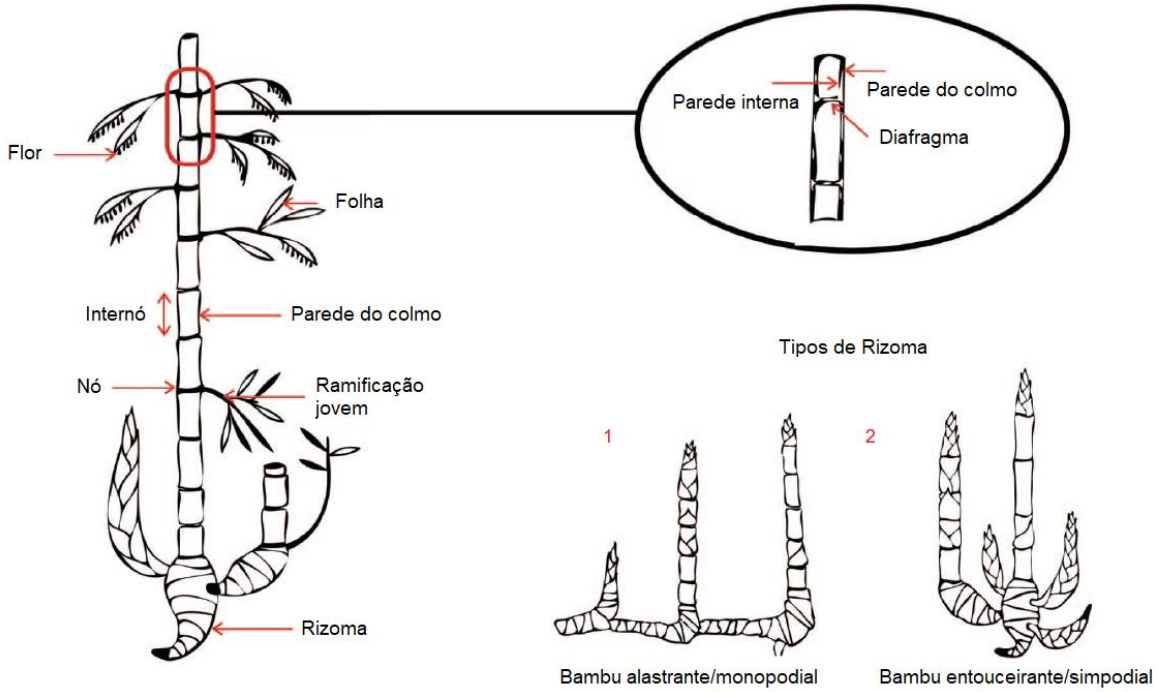
2.1 BAMBU

Pertencente à família das gramíneas, o bambu é uma planta com cerca de 1200 espécies ao redor do mundo (LOBOVIKOV *et al.*, 2007), com a ocorrência de aproximadamente 258 espécies nativas no Brasil (DRUMOND; WIEDMAN, 2017).

Os bambus nativos do Brasil são divididos em duas tribos, *Olyreae* (herbáceos) e *Bambusae* (lenhosos). Sua morfologia pode ser dividida em quatro partes: a parte subterrânea do caule, o rizoma; a parte acima da superfície, denominada de colmo; folhas e inflorescências (DRUMOND; WIEDMAN, 2017).

O bambu consegue se desenvolver em solos pouco nutritivos e se adequa a diversos tipos de clima, tendo sua distribuição ao redor do mundo concentrada em regiões tropicais e próximas à linha do Equador (LOBOVIKOV *et al.*, 2007; RAO, 2004). Suas raízes são fortes e possuem maior densidade nos 30 centímetros superficiais do solo (RAO, 2004), ajudando a diminuir o processo erosivo, recuperar regiões degradadas por cultivo indevido, além de melhorar a qualidade e disponibilidade da água (JANSSEN, 2000). Os dois tipos mais comuns de rizomas são o monopodial (alastrante) e o simpodial (entouceirante), cuja diferença se encontra na forma com a qual novos colmos se desenvolvem. De maneira simplificada, as espécies alastrantes possuem maior espaçamento entre os colmos, e os bambus entouceirantes crescem próximos uns dos outros (Figura 1).

Figura 1: Partes do bambu.



Fonte: (SHARMA *et al.*, 2014) adaptado.

O bambu deve ter entre 3 e 5 anos desde o seu plantio para uso como elemento estrutural (NURDIAH, 2016), o que implica em um maior impacto econômico se comparado à madeira, a qual algumas espécies podem demorar 35 anos ou mais para serem utilizadas na construção civil com essa função (RAMAGE *et al.*, 2017).

Em análise feita com cinco espécies de bambu plantadas em ambiente controlado, constatou-se que os teores de carbono variaram entre 42,62 e 46,03 % da biomassa seca área (colmo, galhos e folhagem) (DRUMOND; WIEDMAN, 2017), e para otimizar a capacidade de sequestro do bambu, a periodicidade da colheita deve ser observada.

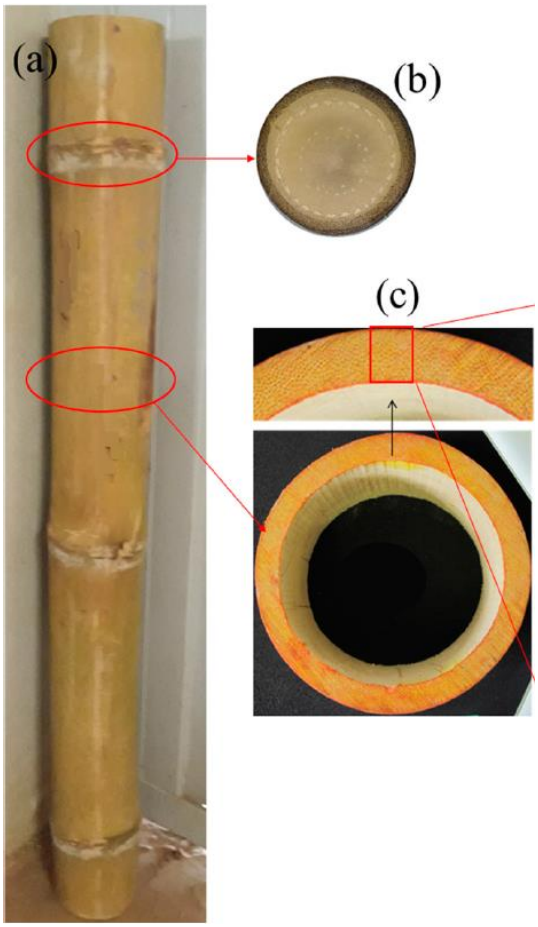
Em estudo comparativo feito entre a espécie de bambu *Phyllostachys pubescens* (mossô) e a espécie de madeira *Cunninghamia lanceolata* (pinhão chinês), que é utilizada para reflorestamento e sequestro de carbono, observou-se que a colheita controlada e regular do bambu é capaz de reter uma maior quantidade de CO_2 em longo prazo (60 anos), sendo a razão entre a estocagem de carbono do bambu e do pinhão de 1,68. Em contrapartida, após 19 anos não há mais acumulação de carbono no bambu quando o mesmo não é colhido periodicamente (KUEHL; LI; HENLEY, 2013).

Portanto, o fomento a atividades que façam uso do bambu como matéria-prima ajuda a manter constante o sequestro de carbono pela planta, o que torna atrativo o cultivo dos pontos de vista socioeconômico e ambiental.

2.1.1 Estrutura do bambu

Os bambus lenhosos possuem seção transversal majoritariamente circular. A estrutura que se desenvolve acima do solo é chamada de colmo e é composta de trechos ocos e nós transversais, como representado na Figura 2. Os bambus são anisotrópicos, dado que o diâmetro do colmo e a espessura da parede diminuem ao longo do comprimento, além da distância entre os nós ser maior na região central do colmo e diminuir nas partes basal e superior (GHAVAMI; MARINHO, 2005).

Figura 2: Estrutura do bambu: (a) trecho do colmo, (b) seção transversal do nó, (c) região internodal.



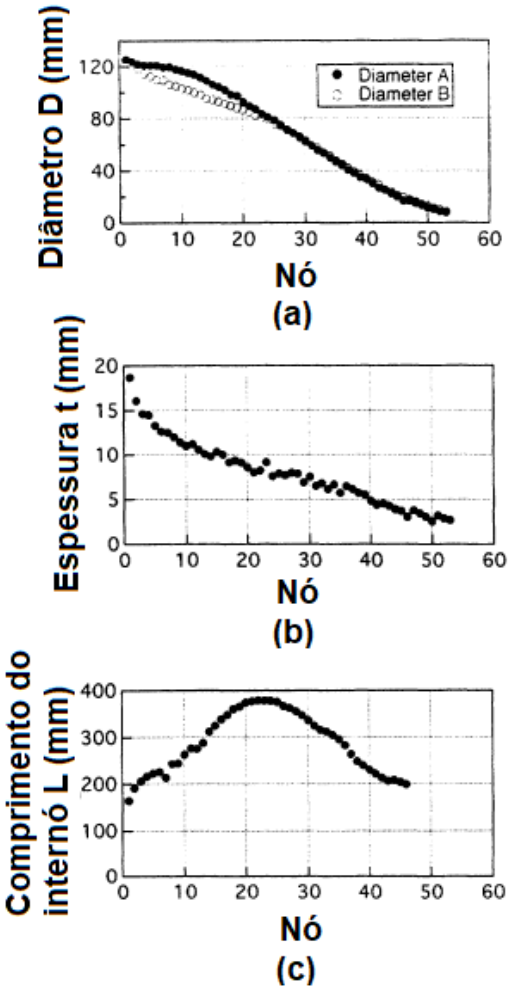
Fonte: (KADIVAR *et al.*, 2020) adaptado.

A geometria do bambu pode ser entendida como uma seção tubular e possui alta eficiência como elemento estrutural, dada a sua baixa densidade relativa e alta resistência. Em uma comparação entre barras de bambu, aço e madeira, com capacidades de carga semelhantes, foi possível verificar que, para suportar uma

mesma carga atuante, a estrutura de bambu é mais leve em relação às outras duas. Em contrapartida, o bambu ocupa um maior volume em relação à barra de aço, para as mesmas condições (MOREIRA; SEIXAS; GHAVAMI, 2019).

A Figura 3 apresenta valores para o diâmetro (a), espessura da parede (b) e distância entre nós (c) da espécie *Phyllostachys edulis Riv.* ao longo do colmo (AMADA *et al.*, 1996). É possível observar que o diâmetro do colmo e a espessura da parede do bambu diminuem gradativamente ao longo do comprimento, enquanto o comprimento internodal tem o seu pico na região central do bambu.

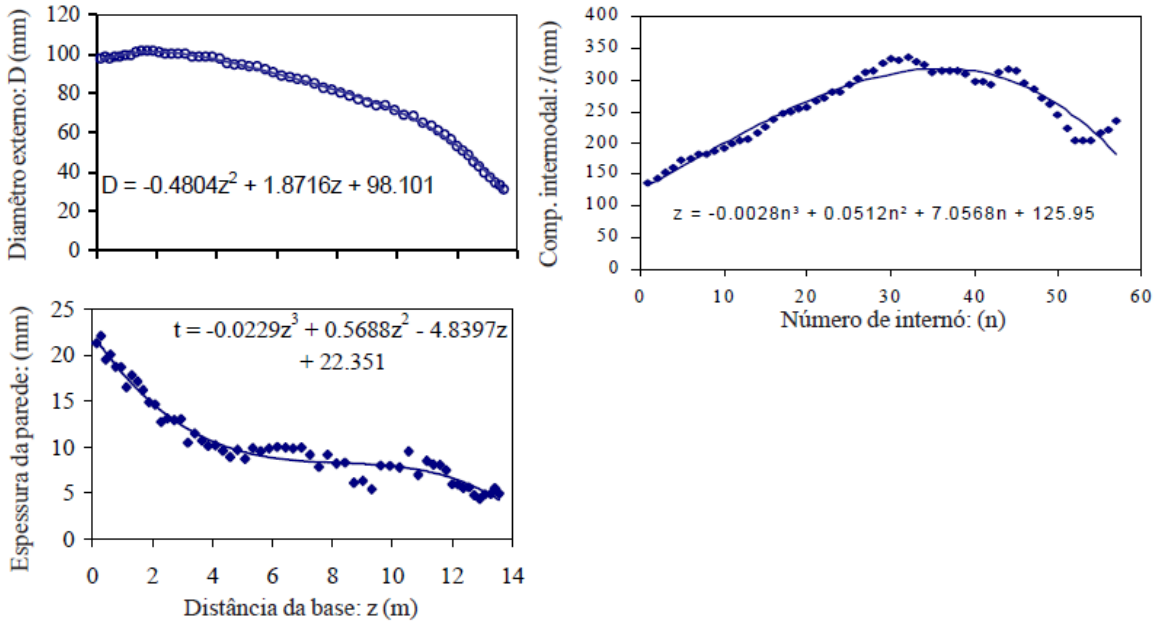
Figura 3: Características físicas da espécie *Phyllostachys edulis Riv.*



Fonte: (AMADA *et al.*, 1996) adaptado.

Um padrão semelhante pode ser observado para a espécie *Guadua Angustifolia*, como exemplificado na Figura 4, apesar da redução da espessura da parede acontecer de forma mais drástica. A maior distância entre os nós dessa espécie também ocorre na região central do colmo, porém, mais próxima do topo (GHAVAMI; MARINHO, 2005).

Figura 4: Características físicas da espécie *Guadua Angustifolia.*

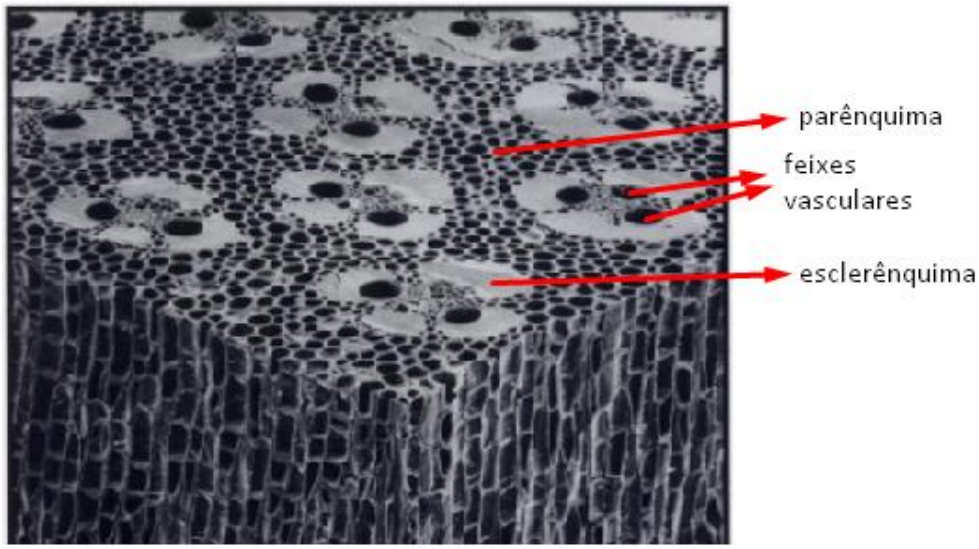


Fonte: (GHAVAMI; MARINHO, 2005).

A diminuição do diâmetro externo e da espessura da parede também foi observada na espécie *Phyllostachys Pubescens* (Mao Jue), com valores de diâmetro externo variando entre 95,4 e 39,4 mm, e valores de espessura de parede entre 11,0 e 4,7 mm. O mesmo não ocorre com a espécie *Bambusa Pervariabilis* (Kao Jue), que apesar de apresentar redução da espessura da parede, possui diâmetro externo quase uniforme ao longo do comprimento do colmo, com valor médio de 45 mm (CHUNG; YU, 2002).

Ao analisar a microestrutura do bambu, é possível observar que o mesmo é composto por tubos de transporte de nutrientes e água envoltos em fibras de celulose (esclerênquima), que estão alinhadas ao longo do comprimento do colmo e imersas em uma matriz de lignina (parênquima), como indicado na Figura 5. Em geral, a proporção dos componentes segue a distribuição de 50% parênquima, 40% fibras e 10% feixes vasculares (LIESE, W., 1985), variando entre espécies.

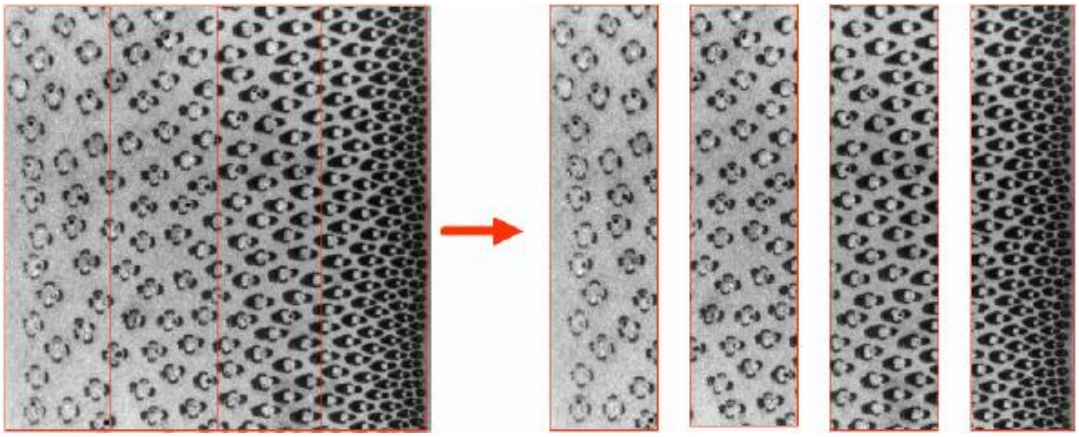
Figura 5: Imagem tridimensional do tecido do colmo.



Fonte: (LIESE, 1998) adaptado.

A densidade de fibras é diferente ao longo da seção transversal, aumentando sua concentração do centro para as extremidades, como indicado na Figura 6 (GHAVAMI; RODRIGUES; PACIORNIK, 2003).

Figura 6: Variação volumétrica das fibras ao longo da espessura do colmo.



Fonte: (GHAVAMI; RODRIGUES; PACIORNIK, 2003).

Também é possível notar alteração na densidade e tamanho dos feixes vasculares ao longo do comprimento do colmo. À medida que a espessura da parede diminui (da base para o topo), os feixes também diminuem de tamanho na direção radial e em quantidade. Porém, observa-se um aumento da densidade de feixes dada a menor área transversal do bambu na região superior (GROSSER; LIESE, 1971).

Já os principais componentes químicos que compõem o bambu são a celulose, a hemicelulose e a lignina. As porcentagens de cada um varia entre espécies, trecho

do colmo e idade, sendo entre 50 e 80% celulose + hemicelulose e 20 a 30% lignina (LIESE; TANG, 2015b). A composição química de trechos centrais da espécie *Dendrocalamus asper* com mais de três anos de idade, por exemplo, é de 54,8% alfa-celulose, 20,2% lignina, 13,7% hemicelulose e 11,3% de outros componentes (GAUSS *et al.*, 2021b).

2.1.2 Propriedades mecânicas

Um ponto importante que deve ser levado em conta ao utilizar o bambu como elemento estrutural é a variabilidade das propriedades físicas e anatômicas das espécies, que impacta diretamente nas características mecânicas do material. Além disso, fatores como a idade, umidade, posição no colmo, presença ou não de nó, local de cultivo, dentre outros, também geram variações nas resistências mecânicas das espécies (LIESE, WALTER; TANG, 2015b; SRIVARO; JAKRANOD, 2016).

Além da variação de propriedades mecânicas causada pelos fatores citados acima, a rigidez do bambu aumenta gradualmente da porção interna para a região externa da parede (GHAVAMI; RODRIGUES; PACIORNIK, 2003), consequentemente a sua resistência à tração. A Tabela 1 apresenta as densidades, resistência à tração, o módulo de elasticidade e relações entre a densidade e as propriedades mecânicas ao longo da direção radial do bambu para corpos de prova retirados da porção central de colmos da espécie *Dendrocalamus giganteus* com seis anos até a colheita, onde f_t e E_t representam a resistência à tração e o módulo de elasticidade, respectivamente.

Tabela 1: Propriedades mecânicas ao longo da direção radial.

Região	Densidade (g/cm³)	f_t (MPa)	E_t (GPa)	f_t/densidade	E_t/densidade
Externa	0,98	326,3	30,7	332,9	31,4
Central	0,83	246,9	27,3	297,5	32,9
Interna	0,69	193,7	17,6	280,7	25,5

Fonte: (KRAUSE *et al.*, 2016).

A Tabela 2 apresenta as resistências à tração e compressão, bem como os respectivos módulos de elasticidade para diferentes espécies e condições, onde é possível observar a variabilidade das propriedades mecânicas.

Tabela 2: Propriedades mecânicas de diferentes espécies de bambu.

Espécie	Idade	T.U. (%)	Trecho	Local	$f_{t,0}$ (MPa)	$E_{t,0}$ (GPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$E_{c,0}$ (GPa)	Método	[Ref]
Dendrocalamus Asper	>3	5,6	Meio	Pirassununga/Brasil	269,4	23,3	-	-	ISO 22157:2019	[1]
		6,4			-	-	97,5	21,4	ASTM D143-14	
Dendrocalamus Asper	>3	-	Meio	Prachinburi/Tailândia	348,0	-	70,0	-	ISO 22157:2004	[2]
Guadua angustifolia	3	-	Base	Guarulhos/Brasil	93,4	16,3	28,4	14,7	INBAR (1999)	[3]
			Meio		95,8	10,1	31,8	12,3		
			Topo		115,8	18,4	25,3	11,7		
			Meio + nó		82,6	11,1	28,4	12,2		
*Guadua angustifolia**	4	11,80-12,50	Meio	Calarcá/Colômbia	-	-	58,9	-	NTC 5525	[4]
		16,50-18,75			-	-	42,4	-		
Sinocalamus affinis	2	-	Base	Yilong/China	-	-	36,6	22,1	ISO 22157:2004	[5]
			Meio		-	-	42,5	16,4		
			Topo		-	-	48,5	25,2		
Bambusa blumeana	>3	-	Meio	Nakhon Ratchasima/Tailândia	353,0	-	68,0	-	ISO 22157:2004	[2]
Phyllostachys pubescens	-	12	-	Franklinton/EUA	197,2	-	61,3	-	GB/T 15780:1995	[6]

*Os corpos de prova foram imunizados com solução de pentaborato e ácido bórico.

Fonte: Tabela – O Autor. Fonte: Dados - [1] - (GAUSS *et al.*, 2021a), [2] - (SOMPOH *et al.*, 2013), [3] - (GHAVAMI; MARINHO, 2005), [4] - (SÁNCHEZ; MORALES, 2019), [5] - (YE; FU, 2018), [6] - (HUANG, XIAO-DONG; HSE; SHUPE, 2015).

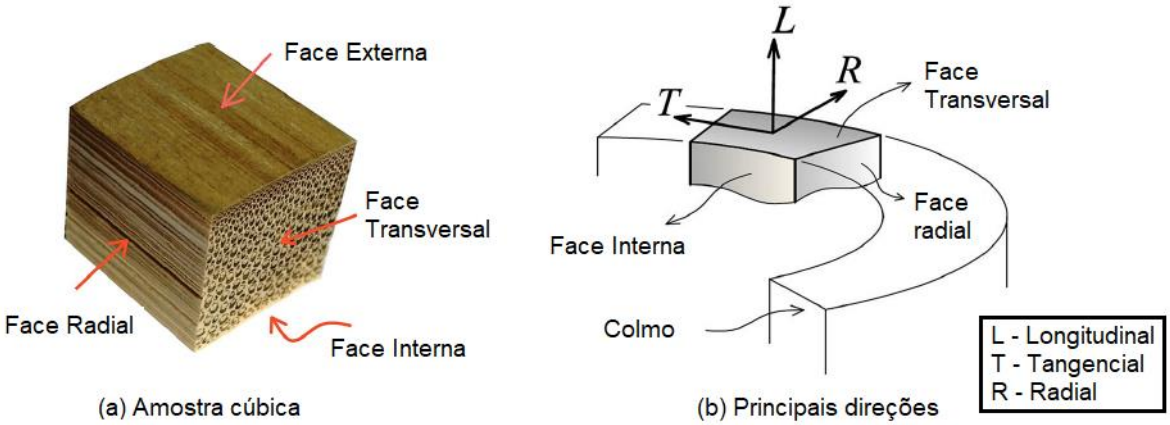
Onde T.U. representa o teor de umidade; $f_{t,0}$ a resistência à tração; $E_{t,0}$ o módulo de elasticidade à tração; $f_{c,0}$ a resistência à compressão e $E_{c,0}$ o módulo de elasticidade à compressão.

2.1.3 Bambu e o teor de umidade

O bambu possui comportamento higroscópico, portanto, quando se encontra em um ambiente com determinada umidade, ele absorve ou perde água para o meio até encontrar o teor de umidade de equilíbrio (HAMDAN *et al.*, 2007).

O teor de umidade presente no bambu altera significativamente suas propriedades mecânicas e volumétricas. Foi constatado que quanto maior o teor de umidade, menor a resistência do elemento a diversos esforços como compressão, cisalhamento, tensão e flexão, variando apenas a taxa de redução de cada uma dessas propriedades (CHUNG; YU, 2002; JIANG *et al.*, 2012; XU *et al.*, 2014). Em relação às alterações dimensionais, a direção radial do bambu varia mais do que as direções tangencial e axial (longitudinal) e a porção externa do colmo é o trecho que apresenta maiores alterações, visto que as fibras de celulose se expandem cerca de cinco vezes mais do que a matriz de lignina e possuem maior concentração na parte externa da parede (Figura 7) (AZADEH; GHAVAMI, 2018; LIESE, 1985).

Figura 7: Orientações das faces no colmo do bambu.



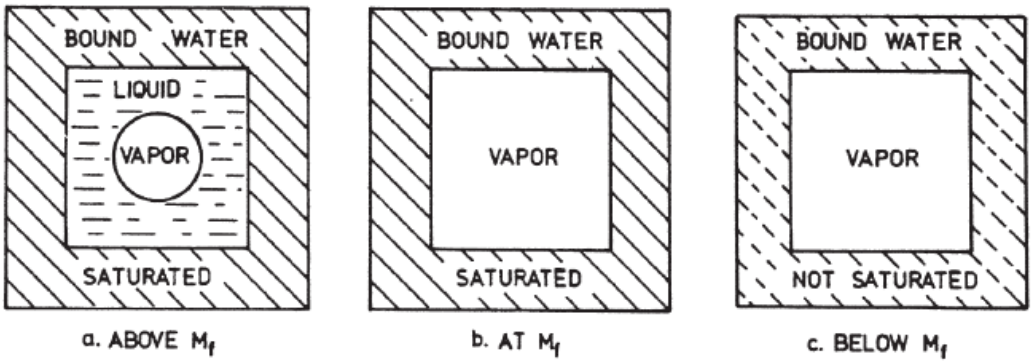
Fonte: (AZADEH; GHAVAMI, 2018) adaptado.

Em um estudo sobre a variação das propriedades mecânicas da espécie *P. pubescens* com diversos teores de umidade, observou-se que os nós e a camada externa do bambu possuem papel importante na redução da absorção de água pelo colmo, sendo a parte interna da parede a maior responsável pela absorção de umidade do meio externo. Portanto, há uma grande diferença de absorção de umidade entre as regiões centrais e os extremos da peça para essa espécie, sendo os extremos mais suscetíveis a variações (XU *et al.*, 2014).

Um conceito importante na avaliação do impacto da variação do teor de umidade do bambu em propriedades físicas e mecânicas é o FSP (*Fiber Saturation Point* ou ponto de saturação da fibra), e diz respeito ao valor limite do teor de umidade em que a umidade absorvida se acumula nas paredes celulares, e a partir desse ponto, os feixes vasculares começam a ser preenchidos pela água (HAMDAN *et al.*, 2007).

A Figura 8 representa três estágios de saturação da madeira, sendo o FSP correspondente ao estágio do meio, onde as paredes celulares estão saturadas, porém os feixes vasculares não.

Figura 8: Estágios de saturação da madeira.



Fonte: (SKAAR, 2012).

O valor do FSP varia ao longo do comprimento do colmo e entre espécies, visto que a concentração de fibras em cada trecho do bambu é diferente, bem como a composição geral de cada espécie (LIESE, 1985).

Para a espécie *Guadua Angustifolia* foram encontrados valores de FSP de 21,26% para o topo, 22,42% para a região central e 24,78% para a base do colmo. Verificou-se que a degradação das propriedades mecânicas do bambu foi maior entre os teores de umidade de 12% e o ponto de saturação da fibra, não havendo alterações significativas para teores de umidade acima do FSP (SÁNCHEZ; MORALES, 2019). Para a espécie *Dendrocalamus Asper*, O FSP encontrado por meio de DSC (varredura diferencial de calorimetria) foi de 29% (SILVIANA; KARETH; PETERMANN, 2014).

Resultado semelhante foi observado para a espécie *P. pubescens*, na qual a redução do desempenho mecânico foi maior até teores de umidade de 30% (próximo ao FSP) em comparação com as alterações observadas em teores de umidade acima de 30% (XU *et al.*, 2014).

Vale ressaltar que, apesar dos valores encontrados de FSP para as espécies de bambu variarem entre 17 e 25%, a dificuldade em manter 100% de umidade relativa durante os períodos de medição do teor de umidade da peça podem reduzir os valores de saturação da fibra. Portanto, é esperado que o valor real do FSP para as espécies de bambu variem entre 28 e 32% (LIESE; TANG, 2015b).

2.2 MÉTODOS DE TRATAMENTO DO BAMBU

A utilização do bambu como elemento estrutural em edificações depende, além das suas características físicas e mecânicas, da durabilidade do material ao longo da sua vida útil. O bambu sem tratamento possui baixa durabilidade, variando de aproximadamente um ano quando exposto ao ambiente externo e contato com o solo, até quatro anos ou mais quando protegido de intempéries (JANSSEN, 1995; LIESE; TANG, 2015a).

Sua durabilidade está relacionada a fatores abióticos e bióticos. Os abióticos correspondem a variações de temperatura, umidade, incidência de raios ultravioleta (YU *et al.*, 2018) e ação do fogo, que podem levar à degradação química do bambu, causar rachaduras e trincas no material, ou até mesmo causar explosões, como nos casos de incêndios.

Fatores bióticos estão relacionados à presença de amido e açúcares no bambu (LIESE; TANG, 2015a), que servem de alimento para insetos, brocas, cupins e fungos (GAUSS *et al.*, 2021a; WATANABE; YANASE; FUJII, 2015; XIAO; INOUE; PAUDEL, 2008), e quando consumidos, comprometem a integridade da peça, reduzindo de forma considerável sua resistência e durabilidade ao longo do tempo (BERALDO, 2016).

Um fator determinante na deterioração do bambu por fungos é o teor de umidade da peça, que quando se encontra acima do FSP (*Fiber Saturation Point*), torna-se muito mais suscetível a ataques por fungos (LIESE; TANG, 2015a).

Dessa forma, para aumentar a vida útil das peças de bambu e preservar suas características físicas e mecânicas, principalmente em elementos portantes, tratamentos devem ser aplicados de maneira correta. A seguir, os tipos mais comuns de tratamentos preservativos aplicados ao bambu serão apresentados, desde os métodos mais tradicionais, até à utilização de produtos químicos e métodos alternativos.

2.2.1 Métodos tradicionais

Os tratamentos tradicionais, sem utilização de substâncias químicas, podem ser facilmente aplicados, não exigem equipamentos especializados e os custos de aplicação são baixos. Boa parte dos métodos objetiva a diminuição da quantidade de açúcares e amido presentes no colmo, reduzindo a possibilidade de ataque por fungos, insetos, brocas e cupins.

O corte dos colmos ao final do período chuvoso e início do período seco é uma prática eficiente para reduzir a quantidade de carboidratos presentes no parênquima (OKAHISA; YOSHIMURA; IMAMURA, 2006). Além disso, há a possibilidade de, após o corte do colmo na região basal, permitir que o bambu consuma o resto dos açúcares e amidos presentes, não retirando imediatamente sua folhagem e galhos. Tal prática é chamada de cura de touceira.

O bambu também pode ser imerso em água parada ou corrente por um intervalo de tempo que varia entre um e três meses, onde a quantidade de açúcares é reduzida por meio de ação de bactérias. Esse método aumenta consideravelmente a resistência ao ataque de fungos se comparado com o bambu sem tratamento, porém não é capaz de garantir uma durabilidade em longo prazo (KAUR *et al.*, 2013; KAUR; PANT; *et al.*, 2016). A imersão em água fervente de 30 a 60 minutos também apresenta resultados positivos quanto à resistência contra fungos e brocas.

O posicionamento de bambus recém-cortados sobre fogueiras ou câmaras com queima de combustíveis orgânicos também é um método conhecido, onde há a redução do teor de umidade das peças e uma fina camada de fuligem é formada ao redor do colmo, o que proporciona uma proteção física e química contra fungos e insetos. Esse tratamento, porém, deixa as peças com um odor forte, reduzindo a aplicabilidade a ambientes externos. Além disso, peças tratadas com esse método apresentaram uma rápida perda de durabilidade após um ano quando expostas a condições de campo (KAUR; PANT; *et al.*, 2016).

Submeter o colmo de bambu a altas temperaturas (acima de 150 °C) produz efeitos positivos em relação à durabilidade do material, reduzindo a capacidade de absorção de água e aumentando a estabilidade dimensional da peça e resistência aos ataques de microrganismos (LIESE; TANG, 2015a).

2.2.2 Métodos químicos comerciais

Diversos tratamentos químicos podem ser aplicados ao bambu para promover uma maior durabilidade, porém, é importante ressaltar que um bom preservativo químico deve possuir as seguintes características: tóxico para o organismo alvo (insetos e fungos), não tóxico para humanos e mamíferos, fixação permanente, alta penetração nos colmos de bambu, fácil disposição do produto após uso ou reciclagem e não alteração das propriedades mecânicas do colmo (KAUR; SATYA; *et al.*, 2016).

A Tabela 3 apresenta um resumo dos métodos químicos comumente utilizados e comercializados.

Tabela 3: Tratamentos químicos comerciais para madeira e bambu.

Solúvel	Fixante	Tipo de Tratamento
Água	Não	Soluções com boro/Solução com ácido bórico + tetraborato de sódio (DOT)
Água	Não	Cloreto de zinco/Sulfato de cobre
Água	Não	PCP-Na
Água	Não	TBP-Na
Água	Sim	CCA (cobre/cromo/arsênico)
Água	Sim	CCB (cobre/cromo/ácido bórico)
Água	Sim	ACA (arsenato de cobre amoniacal)
Óleo	Sim	Creosoto - derivado da manofatura de carvão
Óleo	Sim	TBTO
Óleo	Sim	Naftenato de cobre

Fonte: (JANSSEN, 1995; LIESE; TANG, 2015a; MORESCHI, 2013; MORRELL, 2018; SONTI, 1988; SULTHONI, 1988).

As soluções que contêm boro e ácido bórico não são tóxicas e são efetivas contra fungos, insetos e brocas, porém são facilmente lixiviadas por ação da água, não sendo recomendado o uso para áreas externas. Soluções com cloreto de zinco e sulfato de cobre reduzem a capacidade de absorção de água, possuem ação fungicida e propriedades para redução do efeito de chamas, porém também são passíveis de lixiviação em contato com a água (KAUR; SATYA; *et al.*, 2016; LIESE; TANG, 2015a).

O pentaclorofenato de sódio (PCP-Na) possui características fungicidas e bactericidas. Em contrapartida é tóxico para humanos e diversos organismos não alvo, portanto, vem sendo banido em diversos países. O tribromofenato de sódio (TBP-Na) surgiu como substituto para o PCP-Na dada a menor toxicidade e baixo

custo, porém não possui a mesma eficiência que o pentaclorofenato de sódio (MORESCHI, 2013).

Ambas as soluções químicas CCA e ACA possuem alta fixação, conferindo alta durabilidade à madeira e ao bambu, porém, a presença de arsênico torna os dois preservativos tóxicos aos humanos, visto que, apesar de não serem facilmente lixiviados, há a ocorrência de volatilização do arsênico, contaminando o ar. Como alternativa, a substituição do arsênico por boro vem sendo praticada (CCB), reduzindo a toxicidade da solução. Em contrapartida, há uma redução da fixação pela presença de boro. Vale ressaltar que a presença de cromo pode ser prejudicial à saúde, a depender da quantidade e forma de oxidação (KAUR; SATYA; *et al.*, 2016; MORESCHI, 2013).

Creosoto é um subproduto da produção de gás natural e coque a partir do carvão. Por ser insolúvel em água, reduz a higroscopicidade do bambu, além de ser um repelente para fungos e insetos. Possui alta fixação, porém, o odor forte reduz sua aplicação a ambientes externos e sua utilização é regulada devido a propriedades cancerígenas das substâncias que o compõe (LIESE; TANG, 2015a).

O óxido de bis (tributil-estanho) (TBTO) é um produto alternativo para o aumento da durabilidade. Possui alta fixação, baixa toxicidade aos mamíferos e é mais eficiente se comparado ao PCP e CCA, porém seu alto custo reduz a viabilidade de uso (MORESCHI, 2013).

O naftenato de cobre é obtido por meio da reação entre cobre e ácido naftênico (subproduto do refinamento de petróleo), possui alta fixação e possui propriedades fungicidas. Muitas vezes é utilizado em conjunto com outros tratamentos, creosoto e óleo de nem, por exemplo. É menos efetivo se comparado ao pentaclorofenato e possui custo elevado, porém, é cerca de dez vezes menos tóxico, se tornando uma alternativa mais sustentável (MORRELL, 2018).

2.2.3 Óleos vegetais e óleos essenciais

Óleos essenciais e óleos vegetais são alternativas sustentáveis para aumento da durabilidade do bambu. No caso dos óleos vegetais, há um aumento da durabilidade ao longo do tempo, porém, em condições externas de uso, a proteção dura cerca de dois anos. O tempo reduzido de proteção se dá pela presença de sílica na parte externa da parede do bambu, o que dificulta a penetração da solução preservativa

(KAUR; PANT; *et al.*, 2016). Alguns óleos essenciais possuem características antifúngicas e antibactericidas, além de não serem tóxicos para mamíferos, porém, a durabilidade em condições de uso ainda precisa ser estudada (KAUR; SATYA; *et al.*, 2016).

2.2.4 Tratamentos químicos alternativos

A adição de ácidos orgânicos vem sendo aplicada para aumentar a durabilidade do bambu. Tais tratamentos objetivam reduzir a capacidade de absorção de umidade e aumentar a estabilidade dimensional da peça. Alguns exemplos são o uso de ácido cítrico (GAUSS *et al.*, 2021a), ácido acético, ácido propílico (TANG; SCHMIDT; LIESE, 2012) e tanino (GAUSS *et al.*, 2021b). Tais substâncias também podem ser utilizadas em conjunto com outras soluções químicas, aumentando a eficiência de tratamentos já estabelecidos.

2.3 HORNIFICAÇÃO

O efeito da hornificação acontece após a remoção da água de materiais lignocelulósicos. É caracterizado pelo enrijecimento da estrutura polimérica (DINIZ; GIL; CASTRO, 2004) e por uma redução do volume e da quantidade de poros presentes na parede celular (STONE; SCALLAN, 1965). O termo foi cunhado por G. Jayme em 1944 e observado incialmente na indústria papeleira, durante o processo de reciclagem. Embora as consequências da hornificação sejam indesejadas na indústria do papel (MINOR, 1994), tais mudanças beneficiam o uso de fibras vegetais na construção civil, dado o aumento da estabilidade dimensional e a menor absorção de água. Uma das formas de causar a hornificação é por meio da aplicação de ciclos de imersão em água e secagem do material em estufa.

Para entender melhor o efeito da hornificação, foi utilizado o método de revisão sistêmica ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*) (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020), objetivando identificar os procedimentos adotados para causar a hornificação. A aplicação do método se ateve a artigos publicados entre os anos de 2010 e 2020 e à etapa de imersão apenas em água (sem adições químicas). Portanto, foram coletados dados da quantidade de ciclos aplicados, tempo de secagem e temperatura, e tempo de imersão. As metodologias utilizadas para verificar a ocorrência da hornificação, bem como as alterações causadas por

ela nas propriedades físicas, mecânicas e químicas das fibras também foram investigadas. A Tabela 4 apresenta os artigos selecionados para análise.

Tabela 4: Portfólio bibliográfico sobre hornificação.

#	ARTIGOS
#1	CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J., A. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 1, p. 200-205, 2010.
#2	CLARAMUNT, J., et al. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 586-595, 2011.
#3	FERREIRA, S. R. et al. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 17, n. 2, p. 1024-1034, 2012.
#4	LIMA, P. R. L., et al. Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 812-825, 2014.
#5	FERREIRA, S. R., et al. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730-740, 2015.
#6	BALLESTEROS, J. E. M., et al. Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 100, p. 83-90, 2015.
#7	FERREIRA, S. R., et al. 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**, v. 139, p. 551-561, 2017.
#8	BALLESTEROS, J. E. M., et al. Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications. **Cellulose**, v. 24, n. 5, p. 2275-2286, 2017.
#9	MENDES, S., et al. Influence of Water Amount and Immersion Time on the Sisal Fibers Hornification Process. **Journal of Natural Fibers**, p. 1-10, 2019.
#10	BALLESTEROS, J. E. M., et al. Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 52-60, 2019.
#11	CID, S. C. G., et al. Influence of hornification on the physical and flexural properties of Moso bamboo. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118701, 2020.
#12	FERREIRA, S. R., et al. Effect of sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristics and bending behavior of cement based composites. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2014. p. 421-432.
#13	SANTOS, R. J.; LIMA, P. R. L. Effect of treatment of sisal fiber on morphology, mechanical properties and fiber-cement bond strength. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2015. p. 410-420.
#14	FERREIRA, S. R., et al. Effect of natural fiber hornification on the fiber matrix interface in cement based composite systems. In: **Key engineering materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2016. p. 118-125.

Fonte: O Autor.

De forma a facilitar a apresentação dos dados obtidos por meio da revisão sistemática, os artigos do portfólio serão referenciados de acordo com o número indicado na Tabela 4 (#1, #2, #3...) nos gráficos e tabelas dessa seção.

A Tabela 5 apresenta um resumo das informações coletadas sobre temperatura, tempo de imersão e secagem, e quantidade de ciclos aplicados em cada artigo do portfólio.

Tabela 5: Resumo dos ciclos de secagem e molhagem.

#	Secagem		Molhagem		Número de Ciclos	Fibra
	Duração	Temperatura	Duração	Temperatura		
#1	7 h	60°C	Noite	Ambiente	4	Coníferas/algodão
#2	7 h	60°C	Noite	Ambiente	4	Coníferas/algodão
#3	(16+5)h	80°C	3 h	23°C	10	Sisal
#4	(16+5)h	80°C	3 h	23°C	10 e 20	Sisal/refugo/bucha do campo
#5	(16+5)h	80°C	3 h	22°C	10	Sisal
#6	7 h	60°C	15 h	Ambiente	4	Coníferas*/folhosas*
#7	(16+5)h	80°C	3 h	22°C	5 e 10	Sisal/curauá/juta
#8	7 h	60°C	15 h	Ambiente	4	Coníferas/folhosas
#9	15 h	80°C	(1 – 3)h	22°C	1 e 5	Sisal
#10	7 h	60°C	15 h	Ambiente	4	Folhosas
#11	48 h	50°C	24 h	Ambiente	3, 5 e 10	Bambu
#12	(16+5)h	80°C	3 h	23°C	10	Sisal
#13	(16+5)h	80°C	3 h	23°C	6, 10, 20, 30 e 34	Sisal
#14	(16+5)h	80°C	3 h	22°C	10	Sisal/curauá/juta

*Coníferas = *softwood*; Folhosas = *hardwood*.

Fonte: Tabela – O Autor. Fonte: Dados - (BALLESTEROS *et al.*, 2015, 2017, 2019; CID *et al.*, 2020; CLARAMUNT *et al.*, 2011; CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010; FERREIRA, S. R. *et al.*, 2012, 2014, 2015; FERREIRA, SAULO ROCHA *et al.*, 2017, 2016; LIMA *et al.*, 2014; MENDES *et al.*, 2019; SANTOS, R. J.; LIMA, 2015).

Por meio da Tabela 5 é possível observar que a temperatura de secagem das fibras vegetais está entre 60°C e 80°C. Além disso, a temperatura de imersão se mantém entre 22°C e 23°C, não sendo necessário aquecer a água para realizar o processo. Os ciclos possuem duração de aproximadamente 24 horas, variando os tempos de imersão e secagem. Para fibras longas (sisal, refugo, bucha do campo, curauá e juta) a etapa de secagem dura 16 horas além do tempo de aquecimento e resfriamento da estufa, para prevenir choques térmicos, e o tempo de imersão dura apenas 3 horas. Já as polpas de celulose (madeiras coníferas/folhosas e algodão) possuem tempo de secagem de apenas 7 horas em uma temperatura menor, mas o tempo de imersão dura a noite inteira, ou 15 horas, quando especificado.

A Tabela 6, que se encontra na página seguinte, apresenta de maneira resumida quais análises foram realizadas em cada um dos artigos. Vale ressaltar que boa parte dos artigos do portfólio (#2, #3, #4, #5, #6, #7, #10, #12, #13 e #14) avalia o efeito dos ciclos de secagem e molhagem na aplicação das fibras em compósitos cimentícios, tema que não é abordado no presente estudo. Portanto, os ensaios e

análises referentes aos corpos de prova de fibrocimento não foram incluídos na Tabela 6.

Tabela 6: Resumo dos parâmetros avaliados após a hornificação.

Parâmetros	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	Total
Composição	Sim	-	-	-	-	-	-	-	-	Sim	Sim	-	-	Sim	4
Absorção	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	11
Morfologia	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	Sim	10
Viscosidade	Sim	Sim	-	-	-	Sim	-	Sim	-	-	-	-	-	-	4
Prop. Físicas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim	9
DRX*	Sim	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	-	-	-	7
TGA*	Sim	-	-	-	Sim	-	Sim	-	Sim	-	-	-	-	-	4
FT-IR*	-	-	-	Sim	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-	-	-	Sim	-	6
Tração	-	-	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	8
NMR*	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-	-	-	1
Flexão	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	1
Micromecânica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	1

*DRX: Difratometria por raios-X; TGA: Análise termogravimétrica; FT-IR: Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier; NMR: Ressonância magnética nuclear.

Fonte: O Autor.

A linha “composição” na Tabela 6 corresponde à análise da composição química do material, identificação das porcentagens de lignina, celulose e hemicelulose presentes cada tipo de fibra.

O termo “Absorção” na Tabela 6 corresponde à capacidade da fibra vegetal de absorver água. Este parâmetro foi o mais analisado (11 vezes), visto que a mensuração da capacidade de absorção de água é uma forma de medir a eficácia do tratamento.

O item “morfologia” na Tabela 6 indica que foram feitas análises de características físicas das fibras por meio de um microscópio eletrônico, sendo possível avaliar a aproximação das células, os efeitos da hornificação na matriz de lignina, o fechamento de poros, dentre outros resultados. As “propriedades físicas”, por sua vez, correspondem a medições de comprimento da fibra, diâmetro e índice de curvatura em alguns artigos (BALLESTEROS *et al.*, 2017; CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010a; CLARAMUNT *et al.*, 2011), enquanto em outros, foi obtida somente a seção transversal do material (FERREIRA *et al.*, 2012, 2014, 2015, 2016; LIMA *et al.*, 2014; SANTOS; LIMA, 2015).

Para cálculo da resistência à “tração”, foi realizado o ensaio de tração direta nas fibras. Os artigos que avaliaram o tratamento de imersão e secagem em fibras

obtidas a partir de madeiras lenhosas, coníferas e algodão não realizaram esse ensaio devido ao pequeno comprimento das mesmas, que varia entre 1 e 2 milímetros (#1, #2, #6, #8 e #10). No caso das fibras de sisal, refugo, bucha do campo, juta e curauá, o comprimento utilizado para o teste foi de 50 mm (#3, #4, #5, #7, #9, #12, #13 e #14).

A difratometria por raios-X (DRX) avalia o índice de cristalinidade do material, sendo um meio indireto de medir variações em propriedades mecânicas do material, como resistência à tração e módulo de elasticidade. TGA é a sigla para *Termogravimetric Analysis*, ou análise termogravimétrica, que é uma técnica destrutiva cujo objetivo é analisar a perda de massa do material com o aumento de temperatura.

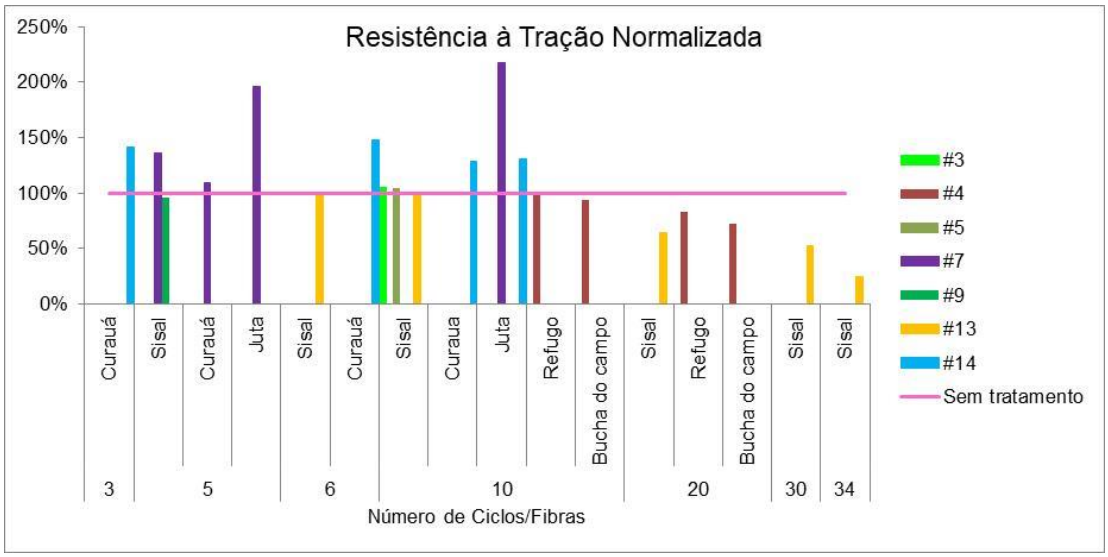
“FT-IR” significa *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, ou espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, onde o resultado do ensaio permite identificar a composição do material por meio dos picos característicos de cada um de seus componentes moleculares (FERREIRA *et al.*, 2015). “NMR” indica ressonância magnética nuclear e foi utilizada para avaliação da rigidez das ligações de hidrogênio presentes no material após aplicação dos ciclos de molhagem e secagem (FERREIRA *et al.*, 2017). A análise de “viscosidade” permite mensurar a degradação da celulose do material e consequente perda de resistência do mesmo (CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010).

A análise “micromecânica” e o ensaio de “flexão” foram aplicados em trechos de bambu e levaram em consideração a característica gradiente do material. Os resultados obtidos neste artigo serão discutidos separadamente, visto que foi o único a aplicar ciclos de molhagem e secagem em amostras de maior escala (CID *et al.*, 2020).

A Figura 9 apresenta os resultados normalizados da resistência à tração de fibras longas. Por meio dela, é possível observar que, até 10 ciclos de imersão e secagem, as fibras mantiveram a resistência à tração ou obtiveram um aumento dessa propriedade. Tal aumento está de acordo com a análise por microscopia eletrônica (Figura 10), que indica um fechamento dos lúmens ao longo da aplicação dos ciclos, reduzindo a seção transversal da fibra e consequentemente aumentando a razão entre força aplicada e área. A partir de 20 ciclos, entretanto, observa-se uma queda de resistência de fibras tratadas em relação às fibras sem tratamento, consequência

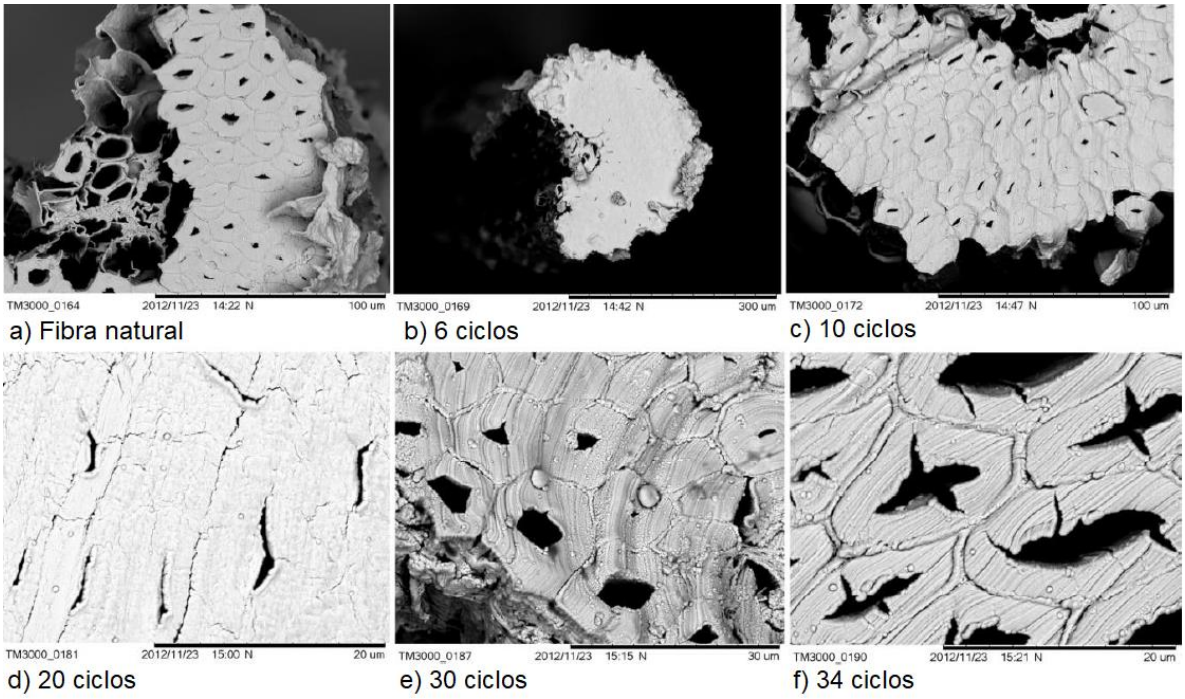
da reabertura dos lúmens, aparecimento de rachaduras e descolamento das fibras por fadiga.

Figura 9: Resistência à tração normalizada de fibras vegetais após hornificação.



Fonte: Gráfico – O Autor. Fonte: Dados – Fonte: Dados - (BALLESTEROS *et al.*, 2015, 2017, 2019; CID *et al.*, 2020; CLARAMUNT *et al.*, 2011; CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010; FERREIRA, S. R. *et al.*, 2012, 2014, 2015; FERREIRA, SAULO ROCHA *et al.*, 2017, 2016; LIMA *et al.*, 2014; MENDES *et al.*, 2019; SANTOS, R. J.; LIMA, 2015).

Figura 10: Análise por microscopia eletrônica de fibras de sisal após tratamento.

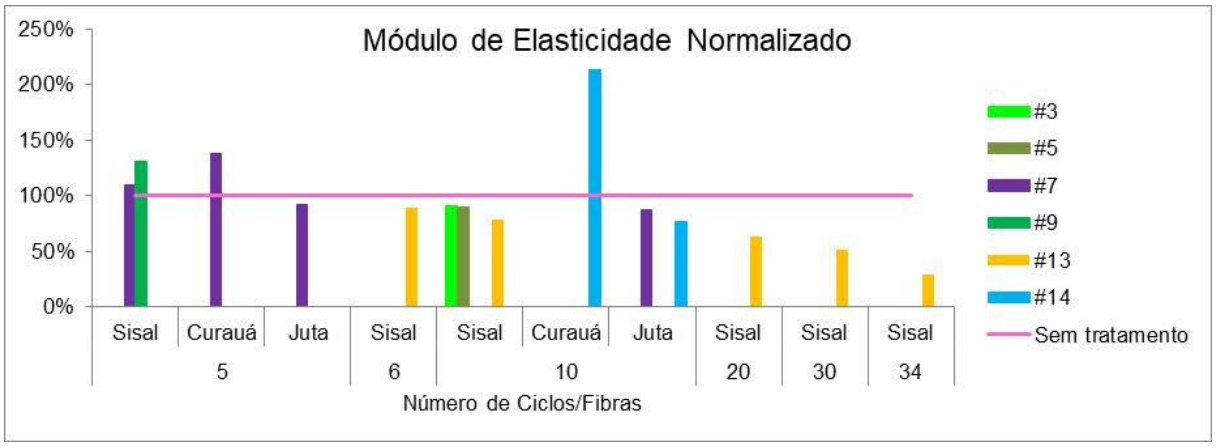


Fonte: (SANTOS, R. J.; LIMA, 2015).

Na Figura 11, se encontram os resultados normalizados para o módulo de elasticidade das fibras. A partir de 20 ciclos se observa uma queda contínua dessa propriedade, efeito causado por repetição excessiva de ciclos e danos observados

por microscopia, como citado anteriormente. Até 10 ciclos foi observado, por meio de FT-IR e NMR, um aumento das ligações de hidrogênio e um maior empacotamento da estrutura (#7). Era esperado, portanto, um aumento de rigidez das fibras, porém tal hipótese não foi confirmada. Embora alguns resultados corroborem com essa ideia, (sisal e curauá após 5 ciclos e curauá após 10 ciclos - #7, #9 e #14), resultados de módulo de elasticidade para sisal após 6 e 10 ciclos (#3, #5 e #13) indicam um decréscimo dos valores em relação ao valor encontrado em fibras sem tratamento, não sendo possível obter uma relação clara entre as alterações químicas e mecânicas.

Figura 11: Módulo de elasticidade normalizado de fibras vegetais após hornificação.



Fonte: Gráfico – O Autor. Fonte: Dados – Fonte: Dados - (BALLESTEROS *et al.*, 2015, 2017, 2019; CID *et al.*, 2020; CLARAMUNT *et al.*, 2011; CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010; FERREIRA, S. R. *et al.*, 2012, 2014, 2015; FERREIRA, SAULO ROCHA *et al.*, 2017, 2016; LIMA *et al.*, 2014; MENDES *et al.*, 2019; SANTOS, R. J.; LIMA, 2015).

Da mesma forma, embora o ensaio de DRX sirva como indicador de variação ou manutenção de propriedades mecânicas dos materiais (por meio do índice de cristalinidade), não foi possível definir uma conexão entre as variações das propriedades mecânicas em fibras longas após o tratamento e os respectivos índices de cristalinidade (#5 e #7).

Nas fibras coníferas, lenhosas e de algodão, foi considerada uma manutenção das propriedades mecânicas até 4 ciclos, visto que os resultados obtidos por meio do ensaio de DRX e do ensaio de viscosidade para fibras tratadas apresentaram pouca variação em comparação com os valores das fibras sem tratamento (#1, #2, #6, #8 e #10).

Em todos os artigos em que foi mensurada a capacidade de absorção de água, observou-se uma redução dessa propriedade, indicando redução da higroscopia das

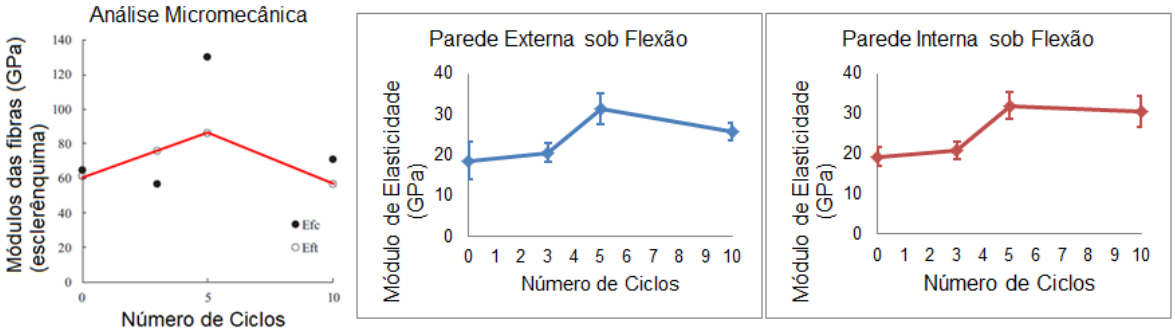
fibras (#1, #2, #3, #5 ao #12). Esse efeito da hornificação é consequência do fechamento e encolhimento de poros, redução das porcentagens de lignina e hemicelulose e redução da área transversal do material.

A hornificação no bambu também causou a redução da capacidade de absorção de água do material após 10 ciclos, porém, após três ciclos, houve um aumento da absorção de água, fato que os autores atribuem à remoção dos carboidratos restantes presentes no colmo (#11).

O ensaio de “flexão” de quatro pontos foi realizado em ripas de bambu e foi aplicado em duas orientações diferentes. Em geral, houve redução da deformação das peças, resultado de um aumento da rigidez. Quando a região externa da parede do colmo estava submetida a esforços de tração, o comportamento observado foi dúctil, já para a região interna, o comportamento foi frágil. Por meio desse ensaio, também foi possível observar um aumento no módulo de elasticidade até o 5° ciclo e posterior decréscimo após 10 ciclos (CID *et al.*, 2020).

Por meio da análise micromecânica, foi feita uma separação da região das fibras (esclerênquima) e da matriz de lignina (parênquima) para avaliação qualitativa dos efeitos da hornificação em ambos os trechos. A região das fibras apresentou aumento dos módulos de elasticidade e compressão até 5 ciclos e posterior queda após 10 ciclos. A região da matriz foi positivamente afetada pela aplicação dos ciclos de molhagem e secagem, apresentando aumento dessa propriedade após 5 e 10 ciclos (CID *et al.*, 2020).

Figura 12: Módulos de elasticidade do bambu após hornificação.



Fonte: (CID *et al.*, 2020) adaptado.

Ao comparar a Figura 11 e a Figura 12 é possível identificar comportamento semelhante entre as fibras vegetais isoladas e o bambu, aumento até o quinto ciclo e posterior redução, principalmente em relação à análise micromecânica do esclerênquima. Tal redução pode estar relacionada a danos causados por fadiga à

região das fibras. Cid *et al.* (2020) indicam que os valores do módulo de elasticidade obtidos por meio do ensaio de flexão sofrem influência do módulo de cisalhamento, visto a baixa razão entre o vão utilizado e a espessura da amostra (aproximadamente 25). Além disso, a redução menos significativa após 5 ciclos de molhagem observada no ensaio de flexão pode ser atribuída a um enrijecimento da matriz (parênquima) que, como citado anteriormente, foi positivamente afetada pelo tratamento após 10 ciclos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

A espécie de bambu que foi utilizada na pesquisa é a *Dendrocalamus asper* visto que é uma espécie disponível em diversas regiões do Brasil e pode ser utilizada como elemento estrutural (GAUSS *et al.*, 2021a).

Foram obtidos trechos de sete colmos de bambu, com comprimento variando entre 2 a 4 metros, a partir de três touceiras distintas, doados pelo Centro de Referência do Bambu e das Tecnologias Sociais (CERBAMBU RAVENA), localizado no distrito de Ravena do município de Sabará (MG), coordenadas (19°48'20.6"S 43°43'04.3"W) (CERBAMBU, 2021). Os colmos foram cortados com quatro anos de idade e ficaram expostos na natureza por quatro meses. Após a doação, ficaram em local coberto até o corte dos corpos de prova. Além disso, não foram submetidos a nenhum tipo de tratamento imunizante. Os bambus não foram embrulhados em papel filme para impedir a variação do teor de umidade durante a estocagem.

Os trechos doados correspondem a regiões diferentes do colmo (base, meio e topo), seguindo a divisão explicitada abaixo na Tabela 7.

Tabela 7: Posição dos trechos dos colmos.

Trecho	Região
1	Base
2	Topo
3	Topo
4	Meio
5	Meio
6	Meio
7	Meio

Fonte: O Autor.

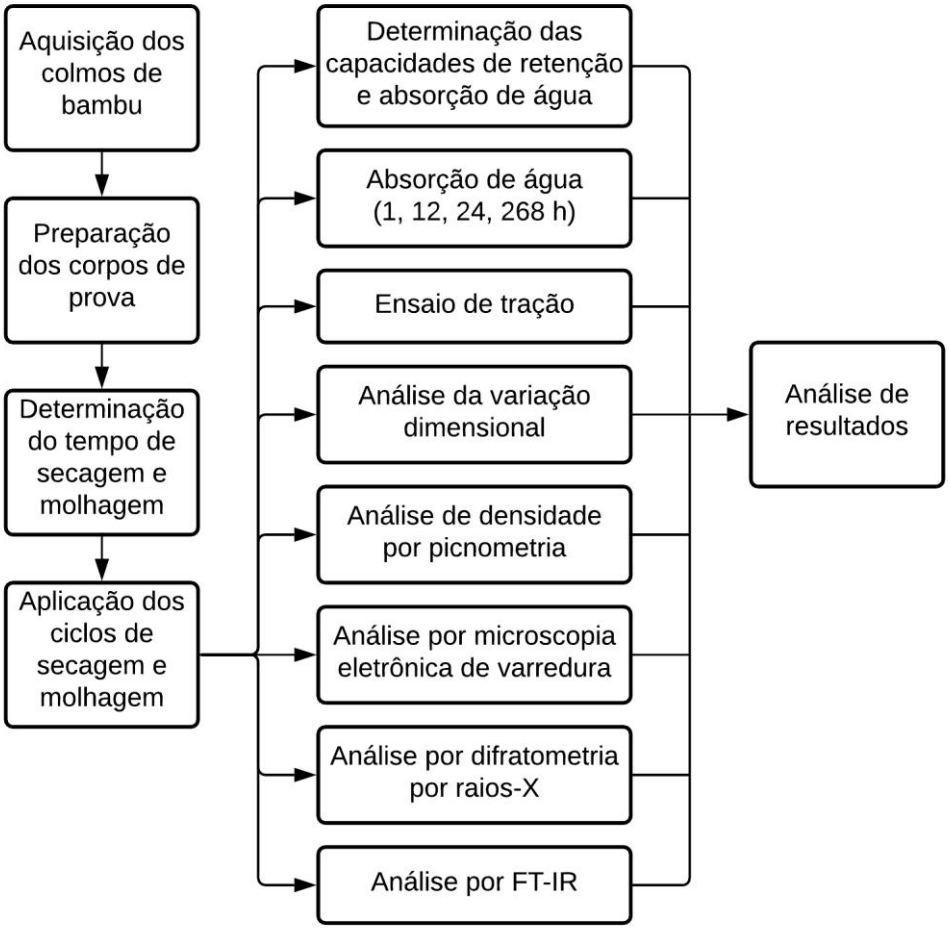
3.2 MÉTODOS

A Figura 13 sumariza todas as etapas desenvolvidas durante a pesquisa. Os corpos de prova foram retirados a partir de um internó de cada colmo. As dimensões dos CPs variam a depender do tipo de análise que será realizada e serão descritas nos respectivos itens. Apenas a etapa de determinação do tempo de secagem e molhagem utilizou amostras de todos os trechos doados. As demais análises se deram em corpos de prova dos trechos que correspondiam à região central do colmo (trechos 4, 5, 6 e 7) de forma a reduzir a variabilidade dos resultados. Em todas as

etapas envolvendo a imersão dos corpos de prova, a água comum de torneira foi utilizada.

Após aquisição dos dados foram feitas análises estatísticas nos testes em que a média ou mediana dos resultados foram obtidas, por meio do *software* “R”, para melhor compreensão e visualização dos efeitos e tendências gerados pelos ciclos de secagem e molhagem no colmo. Os métodos estatísticos foram definidos com base no tipo de dado obtido em cada ensaio e explicitados nos respectivos resultados.

Figura 13: Fluxograma dos procedimentos adotados.



Fonte: O Autor.

3.2.1 Ajuste: Determinação dos tempos de secagem e molhagem

A etapa de Ajuste corresponde à determinação dos tempos de secagem e molhagem que serão aplicados posteriormente para causar o efeito da hornificação, e foi realizada em um corpo de prova de dimensões 10 x 200 mm (largura e comprimento) para cada trecho de colmo. Esta etapa tem como objetivo principal

estabelecer o tempo necessário de imersão em água para atingir teores de umidade acima do FSP e o tempo de secagem que garante uma baixa variação de massa. O limite de 10% foi definido como o valor máximo do teor de umidade que o bambu deverá possuir após cada etapa de secagem em cada ciclo, de forma a garantir que grande parte da água presente nas fibras seja retirada, causando o efeito de hornificação. O limite de 30% representa o valor mínimo esperado após cada etapa de molhagem e foi definido com base nos valores de ponto de saturação da fibra, discutidos no item 2.1.3 da presente pesquisa, no qual foi apresentado o valor de 29% para a espécie *Dendrocalamus Asper* (SILVIANA; KARETH; PETERMANN, 2014) e os valores esperados de FSP entre 28 e 32% para espécies de bambu em geral (LIESE; TANG, 2015b).

O procedimento adotado na presente pesquisa tomou como base as etapas descritas por CID *et al.* (2020) e foi adaptado aos horários de funcionamento do laboratório do CEFET-MG durante a pandemia do COVID-19, sendo elas:

- Imersão da peça de bambu em água a temperatura ambiente;
- Quatro medições de massa da peça espaçadas de 2 h no primeiro dia, e depois duas medições diárias, uma pela manhã (9 h) e outra ao final do dia (17 h) durante oito dias (exceto fins de semana);
- Secagem no forno a 50 ± 5°C e pesagem das amostras seguindo os mesmos intervalos utilizados na etapa de imersão;
- Cálculo do teor de umidade (MC) por meio da Equação 1, obtida na NBR 16828-2: Estruturas de bambu - Parte 2 (ABNT, 2020):

Equação 1: Cálculo do teor de umidade.

$$MC\ (\%) = \frac{m - m_0}{m_0}\ x\ 100$$

Onde m corresponde ao valor de massa da peça em cada medição apurada nas etapas de imersão e secagem. Para obtenção de m_0 a amostra deve ser submetida primeiramente a uma temperatura de 103 ± 2°C durante 24 horas e ter sua massa registrada. Depois, as medições devem ser realizadas de duas em duas horas até variação de massa menor do que 0,01 g entre medições sucessivas.

Após determinação das durações dos ciclos de secagem e molhagem, os corpos de prova serão submetidos aos ciclos propriamente ditos, onde serão imersos em

um tanque com água corrente à temperatura ambiente e logo em seguida à secagem em forno a 50 ± 5°C.

3.2.2 Determinação das capacidades de absorção e retenção de água

A determinação das capacidades de retenção e absorção de água segue as recomendações da ABNT NBR 16828-2 – Estruturas de Bambu Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu (ABNT, 2020) e foi realizada em doze corpos de prova de dimensões 25 x 25 mm por colmo (trechos 4, 5, 6 e 7) a cada ciclo (15 ciclos ao todo). As equações para determinação da capacidade de absorção e retenção do colmo estão discriminadas abaixo e o processo consiste em medir a massa de cada corpo de prova no início e final de cada ciclo (CID *et al.*, 2020):

Equação 2: Capacidade de absorção de água.

$$ABS\ (\%) = \frac{m_{wet} - m_0}{m_0}\ x\ 100$$

Equação 3: Capacidade de retenção de água.

$$RET\ (\%) = \frac{m_{dry} - m_0}{m_0}\ x\ 100$$

Onde m_{wet} representa o peso obtido na balança de precisão após cada etapa de molhagem, m_{dry} o peso após cada etapa de secagem a 50 ± 5°C.

3.2.3 Absorção de água - 1, 12, 24, 98 e 268 horas

Além da análise de retenção e absorção de água ao longo dos ciclos, a capacidade de absorção de água do bambu sem tratamento e após 5, 10 e 15 ciclos foi mensurada de forma a possibilitar a comparação com resultados obtidos por meio de tratamentos químicos (GAUSS *et al.*, 2021a; GAUSS *et al.*, 2021b). Para tal, procedimento semelhante ao adotado na literatura de referência foi executado (GAUSS *et al.*, 2021a; GAUSS *et al.*, 2021b):

- Secagem das amostras a 50 ± 5°C por aproximadamente 68 horas;
- Imersão em água e medição da massa após 1, 12, 24, 98 e 268 horas;
- A capacidade de absorção é calculada em relação à massa medida após secagem inicial (item 1).

As dimensões das amostras são 25 x 25 mm e os trechos utilizados estão limitados aos pertencentes à região central do colmo (4, 5, 6 e 7), totalizando 12 amostras, três de cada trecho.

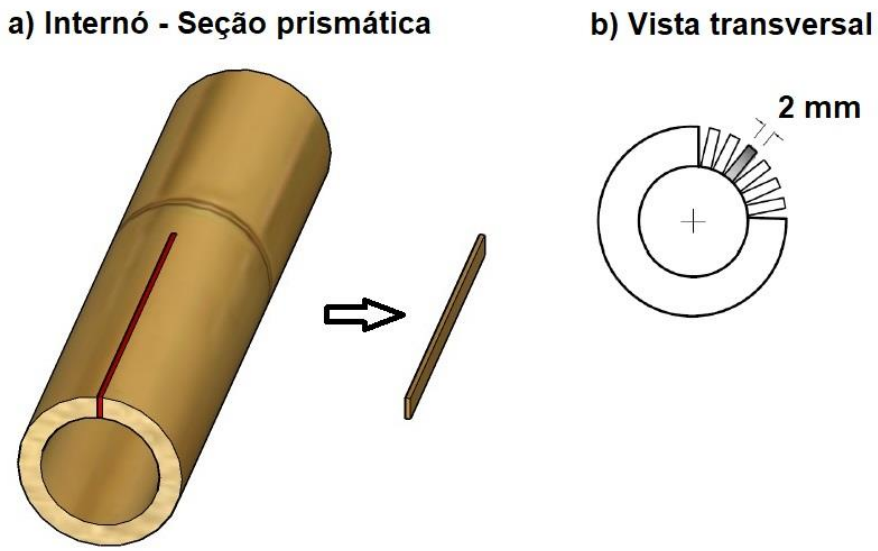
3.2.4 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados na Máquina Universal de Ensaios EMIC 300 kN, a uma velocidade de deslocamento de 1,0 mm/min. Um sensor de deslocamento do tipo *clip gage* (50 ± 0,001 mm de comprimento útil) foi utilizado, permitindo o cálculo do módulo de elasticidade com maior precisão. Para evitar que o *clip gage* fosse danificado no momento de ruptura do bambu, o *script* de ensaio foi modificado para pausar momentaneamente o carregamento em 2500 N, permitindo a retirada do sensor de deslocamento, depois, a carga voltaria a ser aplicada no corpo de prova até ruptura.

Para o cálculo do módulo de elasticidade de cada corpo de prova, um intervalo do gráfico tensão-deformação foi selecionado e, a partir da equação da reta, utilizou-se o coeficiente angular como resultado final. O trecho selecionado corresponde ao intervalo entre 5% e 50% da carga aplicada no corpo de prova antes da retirada do *clip gage*, ou seja, entre 125 e 1250 N aproximadamente.

Para o presente estudo, corpos de prova sem a presença de nós foram obtidos com geometria prismática de forma a obter um trecho central com comprimento (axial) variando entre 50 mm e 100 mm e largura (tangencial) de 2 mm, que corresponde à menos da metade da espessura da parede do colmo, atendendo os requisitos da norma brasileira (ABNT, 2020). Inicialmente, um trecho de 200 mm de comprimento é obtido a partir de um internó; em seguida tiras de bambu são cortadas com uma ferramenta de corte (facão ou formão) com aproximadamente 4 mm; por fim, com o auxílio de uma lixadeira calibradora, a seção transversal das tiras é reduzida a 2 mm (Figura 14).

Figura 14: Obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: a) O Autor; b) (AZADEH, 2018).

Foram ensaiados dois corpos de prova por colmo (trechos 4, 5, 6 e 7) para cada quantidade pré-determinada de ciclos (0, 5, 10 e 15), totalizando 32 corpos de prova, 8 para cada intervalo de ciclos.

Anterior à execução do ensaio, os corpos de prova foram submetidos a pelo menos 72 horas de secagem em estufa a 50 ± 5°C, de forma a reduzir a variabilidade dos teores de umidade. Para a definição do teor de umidade no momento de ensaio, um corpo de prova de 25 x 25 mm para cada tratamento teve sua massa aferida no início do ensaio e após secagem em estufa a 103 ± 2°C por pelo menos 24 horas (ABNT, 2020). A densidade aparente também foi mensurada por meio da medição da massa e das medidas dos CPs nas três direções (DIXON; GIBSON, 2014).

Testes de tração preliminares utilizando placas de alumínio ou de bambu coladas com massa plástica nas extremidades (contato com as garras da prensa) foram realizados, seguindo o procedimento sugerido pela norma brasileira (ABNT, 2020).

Três corpos de prova (3 mm de espessura) com placas de alumínio foram testados em uma primeira tentativa. Observou-se baixa aderência das placas ao bambu (deslizando ao longo do ensaio), rompimento dos corpos de prova próximo ao mordente e resistência à tração incompatível com a literatura (aproximadamente 130 MPa). Em uma segunda tentativa foram utilizadas chapas de bambu, porém os mesmos problemas de aderência e deslizamento ao longo do ensaio foram observados. A Figura 15 apresenta dois corpos de prova após rompimento, na qual

pode ser observado que os CPs apresentaram falhas próximas ao mordente, resultando em valores de resistência à tração abaixo de 100 MPa.

Figura 15: Falha próxima ao mordente em ensaio de tração no bambu.



Fonte: O Autor.

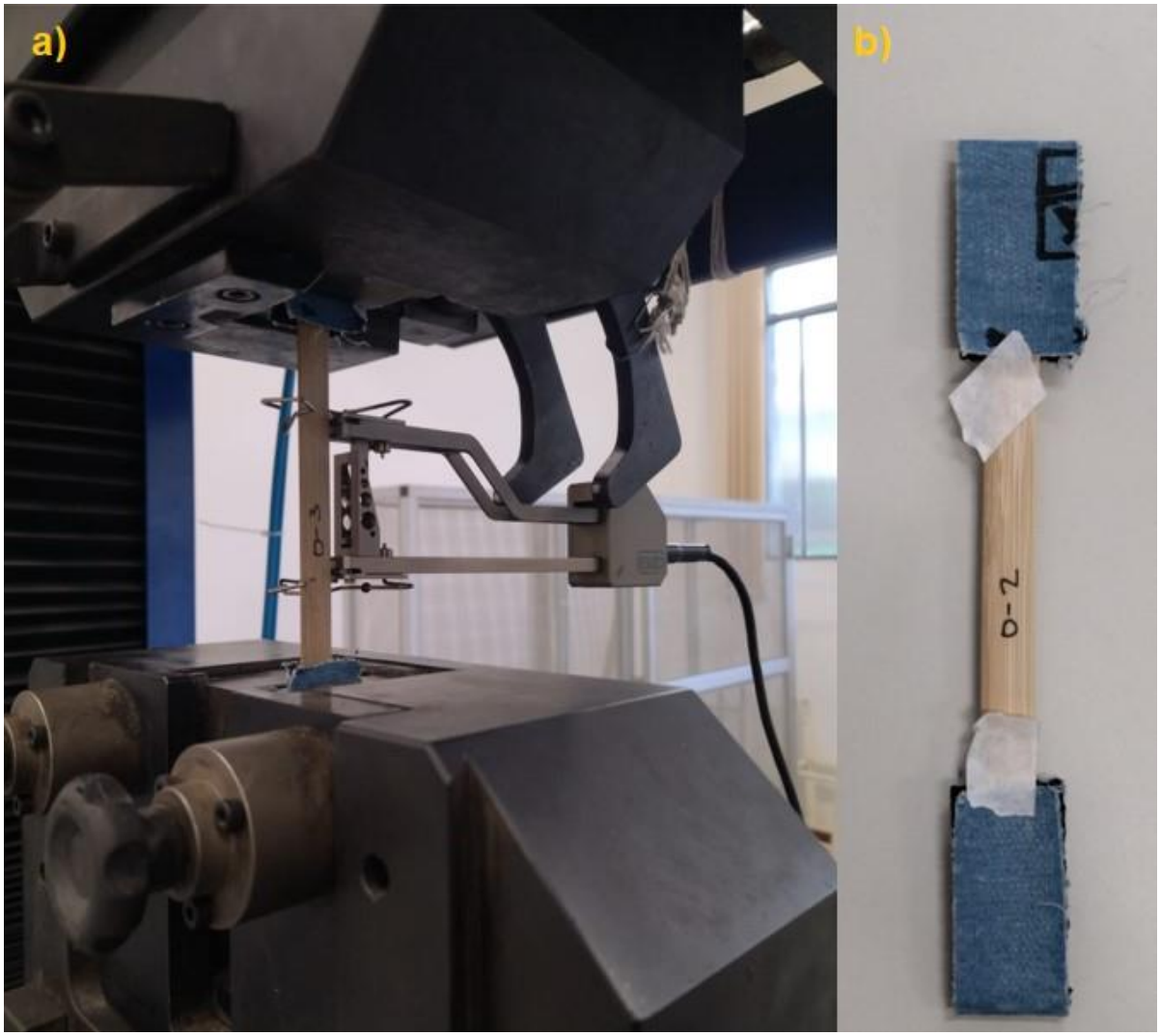
Dada a inadequação de ambos os métodos testados, uma terceira tentativa foi feita com base no método proposto por Azadeh (2018) em sua tese de Doutorado. As dimensões dos corpos de prova foram reduzidas a 2 milímetros na direção tangencial e foram utilizadas lixas nas extremidades do bambu, sem necessidade de colagem com massa plástica. Dois corpos de prova foram testados até a ruptura e obtiveram resistência à tração de 239,0 e 250,7 MPa, valores próximos ao de 269,4 MPa encontrado na literatura (GAUSS *et al.*, 2021a). A Figura 16 apresenta os corpos de prova após rompimento e a Figura 17 representa (a) *setup* utilizado e (b) o corpo de prova com as lixas nas extremidades. Vale observar que as lixas possuem maior largura em comparação ao CP e são posicionadas na máquina com um trecho para fora das garras, evitando esforços adicionais. Esse método foi, portanto, adotado para a determinação da resistência à tração e módulo de elasticidade de bambus após ciclos de molhagem e secagem e sem tratamento.

Figura 16: Corpos de prova com espessura de 2 mm após rompimento.



Fonte: O Autor.

Figura 17: Detalhes do ensaio de tração (a) setup utilizado (b) corpo de prova com lixas.



Fonte: O Autor.

3.2.5 Análise da variação dimensional

Para verificar os efeitos dos ciclos de molhagem e secagem na estabilidade dimensional do bambu, foram medidas as áreas transversais de 12 amostras por condição (sem tratamento, 5, 10 e 15 ciclos) após imersão em água. Anterior ao

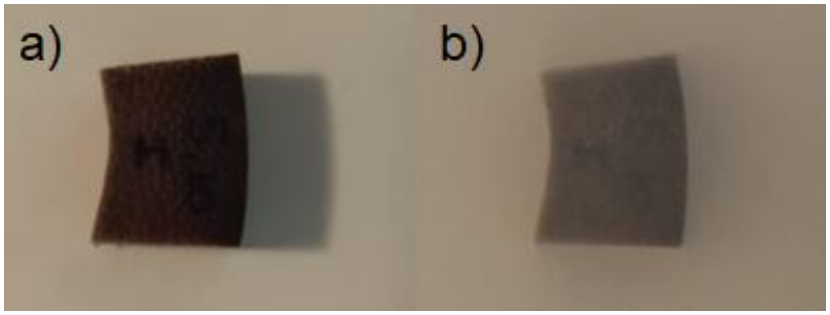
início do ensaio, os corpos de prova foram secos em estufa a 50 ± 5°C durante 72 horas para reduzir a diferença entre o teor de umidade das amostras.

Optou-se por medir a área transversal do bambu dada a sua curvatura natural. Além disso, as maiores variações dimensionais ocorrem na direção radial, e as variações na direção axial (longitudinal) são desprezíveis (GAUSS *et al.*, 2021b). As medições das áreas transversais foram feitas após 12, 24, 96 e 264 horas de imersão e os resultados comparados com a área transversal antes da imersão, para cálculo da variação dimensional.

As dimensões dos corpos de prova foram escolhidas com base em estudo feito por outros autores (GAUSS *et al.*, 2021a; GAUSS *et al.*, 2021b), sendo 20 x 20 mm (comprimento e largura), e a espessura da parede do colmo variável.

A mensuração das áreas foi feita por meio de análise de imagens no *software ImageJ* (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012). Como as imagens obtidas são de amostras 3D (a seção longitudinal não aparece na imagem), a depender da luz, pequenas sombras se formam em volta dos corpos de prova. Para reduzir o efeito da luz e, consequentemente, aumentar o contraste entre o fundo branco e o bambu, optou-se por posicionar um pedaço de papel vegetal em cima das amostras, como pode ser visto na Figura 18, onde a imagem “a” não possui o papel vegetal e a imagem “b” possui.

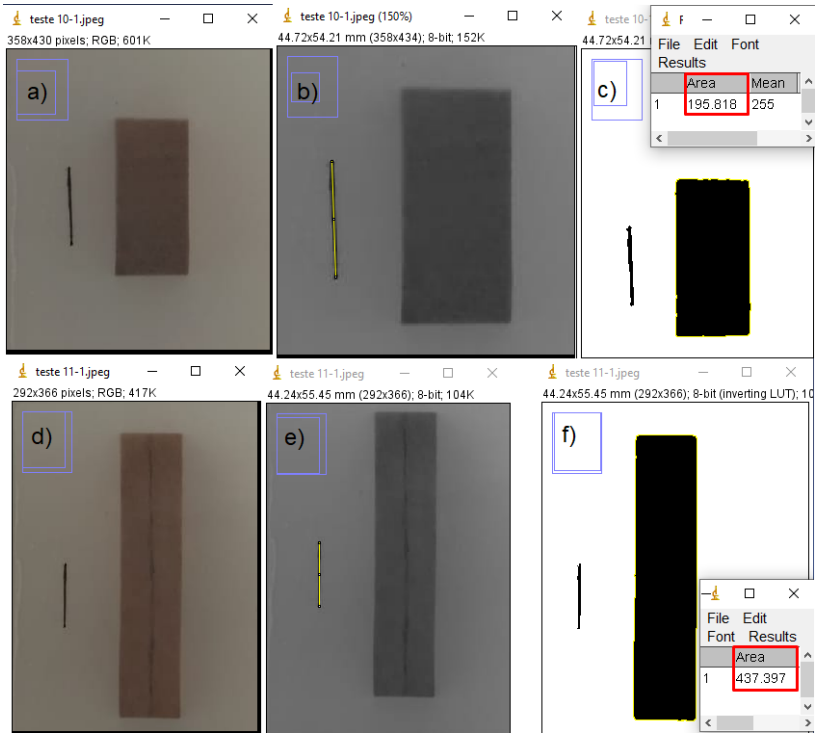
Figura 18: Redução da sombra com papel vegetal.



Fonte: O Autor.

Para confirmação da validade dos resultados obtidos no *software*, foram realizadas duas verificações com amostras retangulares de dimensões 20 x 10 mm (200 mm²) e 45 x 10 mm (450 mm²), respectivamente. A Figura 19 apresenta de forma resumida os resultados obtidos. As áreas de 195,8 mm² e 437,4 mm² correspondem a 97,9% e 97,2% das áreas reais dos retângulos.

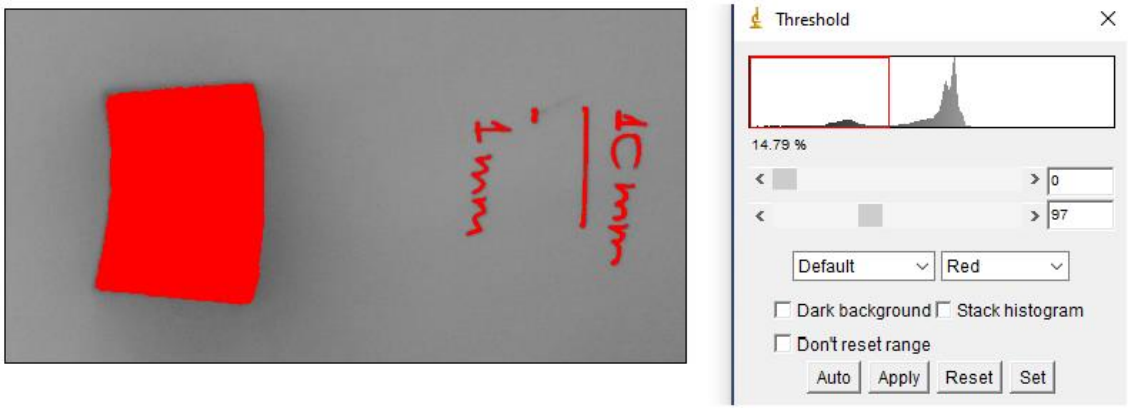
Figura 19: Testes no *software ImageJ.*



Fonte: O Autor.

A pequena diferença encontrada (3%) é atribuída principalmente à etapa de seleção da área a ser medida *"threshold"*, que é realizada de forma manual, ocasionando certa imprecisão quando o contraste de cores não é tão alto. Tal etapa está ilustrada na Figura 20.

Figura 20: Etapa de *treshold* no software *ImageJ.*



Fonte: O Autor.

A etapa de definição da escala (*pixel* para milímetros) foi aprimorada após os testes com objetos retangulares, na qual se garantiu que todas as imagens das seções transversais do colmo possuíssem a mesma quantidade de *pixels* (1200 x

1600), e fossem obtidas sempre a uma mesma distância. Além disso, duas medidas (1 e 10 mm) foram incluídas de forma a conferir a escala aplicada.

3.2.6 Análise de densidade por picnometria

A densidade real foi medida por picnometria de gás hélio com duas amostras representativas da região central do bambu (trecho 6) para peças sem tratamento (0 ciclos) e duas amostras após 10 ciclos.

O objetivo deste ensaio é verificar se as alterações causadas pela hornificação (fechamento e encolhimento de poros) são perceptíveis por meio do teste de densidade. Por este motivo, foram feitas peças com dimensões de 12,5 x 7,0 mm (comprimento x largura).

Posteriormente, amostras moídas de bambu sem tratamento e após 10 ciclos foram submetidas ao ensaio para verificar a diferença entre os valores de densidade obtidos para as peças e o método convencional.

Para que as amostras apresentassem teores de umidade semelhantes, antes da análise por picnometria, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 50 ± 5°C por aproximadamente 70 horas, o que garante teores de umidade abaixo de 10% (ver item 4.1). Entretanto, valores exatos de umidade não foram mensurados.

3.2.7 Microscopia eletrônica de varredura

A análise por microscopia eletrônica de varredura tem por objetivo avaliar os efeitos dos ciclos de secagem e molhagem na direção do comprimento das fibras e foi realizada em dois corpos de prova representativos do trecho 6 (região central do bambu), um sem tratamento e outro após 10 ciclos de molhagem e secagem. As dimensões dos corpos de prova são 20 x 20 mm (comprimento x largura) e as amostras foram ensaiadas sem um preparo específico e sem cobrimento. As imagens foram obtidas por meio do microscópio eletrônico HITACHI TM3000.

3.2.8 Análise por DRX

O ensaio de difratometria por raios-X foi feito em amostras representativas do trecho 6 para o bambu sem tratamento (0 ciclos) e após 15 ciclos. O ensaio consiste na avaliação da cristalinidade do bambu seguindo o método empírico proposto por

Segal *et al*. (1959), que determina o índice de cristalinidade do material por meio da Equação 4 (SEGAL *et al.*, 1959):

Equação 4: Índice de cristalinidade.

$$Cr.I\ (\%) = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}}\ x\ 100$$

Onde I_{002} corresponde à máxima intensidade do plano (002) de reflexão da estrutura da celulose I a aproximadamente 2Θ = 22,7° e I_{am} corresponde à intensidade do plano de reflexão da região amorfa à 2Θ = 18,0°.

Para obtenção das amostras, corpos de prova de 25 x 25 mm foram moídos até passar por uma peneira de 100 *mesh* (GAUSS *et al.*, 2021a). Antes da execução do ensaio, as amostras foram submetidas à secagem a 50°C por aproximadamente 72 horas. O difratômetro por raios-X shimadzu XRD-7000, com voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA foi utilizado para os ensaios. O escaneamento foi feito entre 5 e 65° Θ-2Θ a uma taxa de 10°/min.

3.2.9 Análise por FT-IR

A análise por meio da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier foi realizada em uma amostra representativa (Trecho 6 da Tabela 7) para o bambu sem tratamento, e uma amostra após 15 ciclos, para avaliar possíveis alterações químicas na estrutura do bambu após o tratamento. Para obtenção das amostras, foi adotado o mesmo procedimento realizado para o ensaio de difratometria por raios-X. Antes da execução do ensaio, as amostras foram submetidas à secagem a 50°C por 72 horas. Foram feitos 53 escaneamentos ao longo do espectro 4000-400 cm^{-1} com resolução de 2 cm^{-1}, e o espectrômetro utilizado foi o IRPrestige-21 da Shimadzu.

4. RESULTADOS

4.1 AJUSTE: DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE SECAGEM E MOLHAGEM

Para realização da etapa de ajuste, corpos de prova com aproximadamente 10 mm de largura e 200 mm de comprimento foram submetidos ao procedimento listado no item 3.2.1. O teor de umidade médio antes da imersão em água foi de 13%. A Figura 21 apresenta (a) os corpos de prova antes do início da imersão em água, (b) um exemplo de medição após a imersão e(c) após a secagem.

Figura 21: Corpos de prova e pesagem da etapa de ajuste (a) antes da imersão (b) após imersão (c) após secagem.

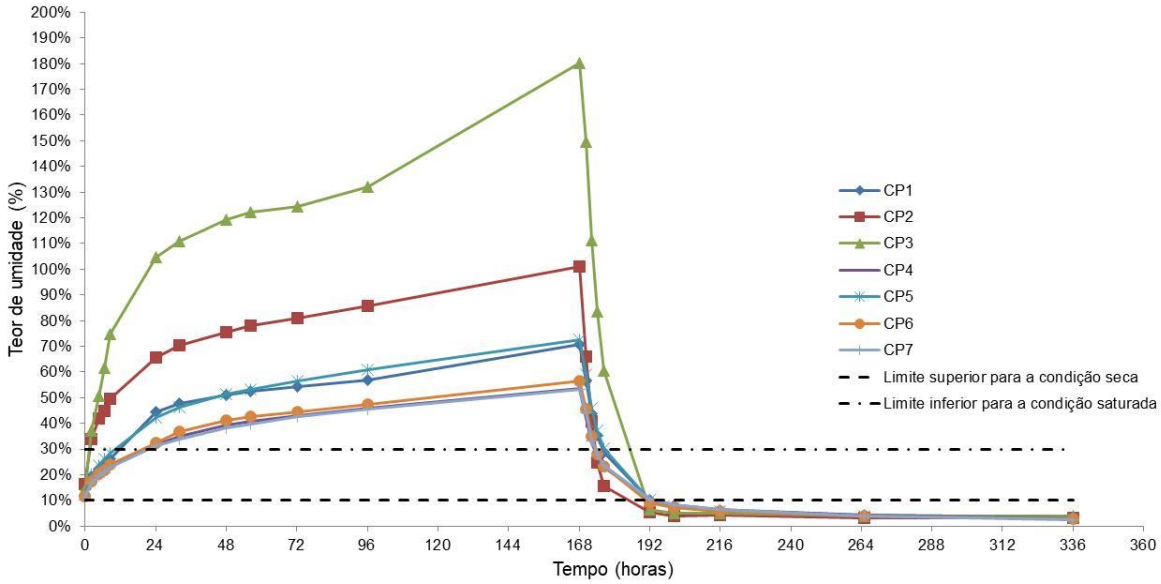


Fonte: O Autor.

Os resultados referentes à absorção e a perda de umidade das peças de bambu, após a medição de massa dos corpos de prova durante duas semanas, estão representados na Figura 22. As linhas tracejadas “limite superior para a condição seca” e “limite inferior para a condição saturada” correspondem aos teores de umidade de 10 e 30%, respectivamente.

É possível observar por meio da Figura 22 que após 24 h de molhagem, todos os corpos de prova (de diferentes regiões do colmo) atingiram teores de umidade acima do limite de 30%, bem como após 24 h de secagem (intervalo aproximado entre 168 e 192 h) as peças atingiram teores de umidade iguais ou abaixo dos 10% estipulados para o limite superior após secagem. O trecho de topo dos colmos (representado por CP2 e CP3) apresentou maior absorção de água ao longo da imersão se comparados ao trecho basal (CP1) e médio (CP4 ao CP7).

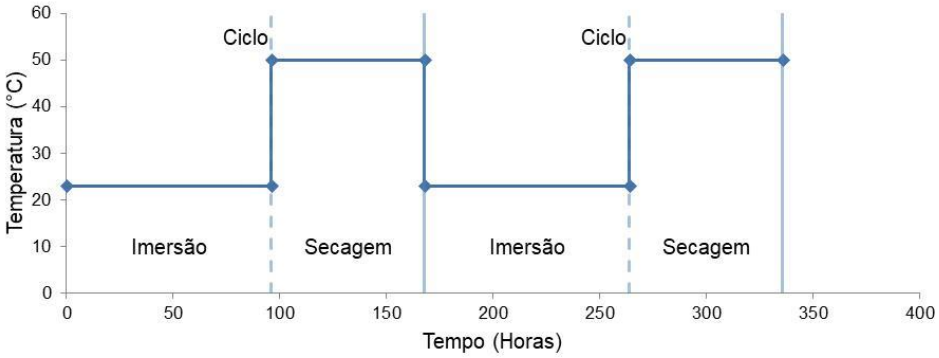
Figura 22: Ajuste para definição dos ciclos de secagem e molhagem.



Fonte: O Autor.

Para a definição dos tempos de molhagem e secagem, foram considerados os tempos mínimos observados para atingir as condições seca e saturada, bem como à necessidade de adequação logística ao protocolo de biossegurança do CEFET-MG vigente durante o período de realização destes ensaios, no qual havia restrições de acesso ao laboratório. As etapas de molhagem e secagem foram definidas para intervalos de 96 e 72 horas, respectivamente, e estão descritas graficamente na Figura 23. Embora tais intervalos possam ser menores, como já foi indicado no artigo publicado por Cid *et al.* (2020), onde foram utilizados intervalos de 24 e 48 h de molhagem e secagem, os tempos definidos na presente pesquisa garantem a obtenção dos teores de umidade necessários após a imersão e a secagem. A etapa de imersão se dá em água comum a temperatura ambiente e a etapa de secagem ocorre a 50 ± 5°C em estufa.

Figura 23: Ciclos de imersão e secagem.



Fonte: O Autor.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS CAPACIDADES DE ABSORÇÃO E RETENÇÃO DE ÁGUA

Para analisar os resultados de absorção ao longo das etapas de imersão, primeiro foi realizado o teste estatístico de ANOVA de medidas repetidas, seguido pelo *post hoc* de *Bonferroni.* A Tabela 8 apresenta os valores de absorção após todas as 15 etapas.

Tabela 8: Análise estatística dos valores médios de absorção ao longo dos ciclos.

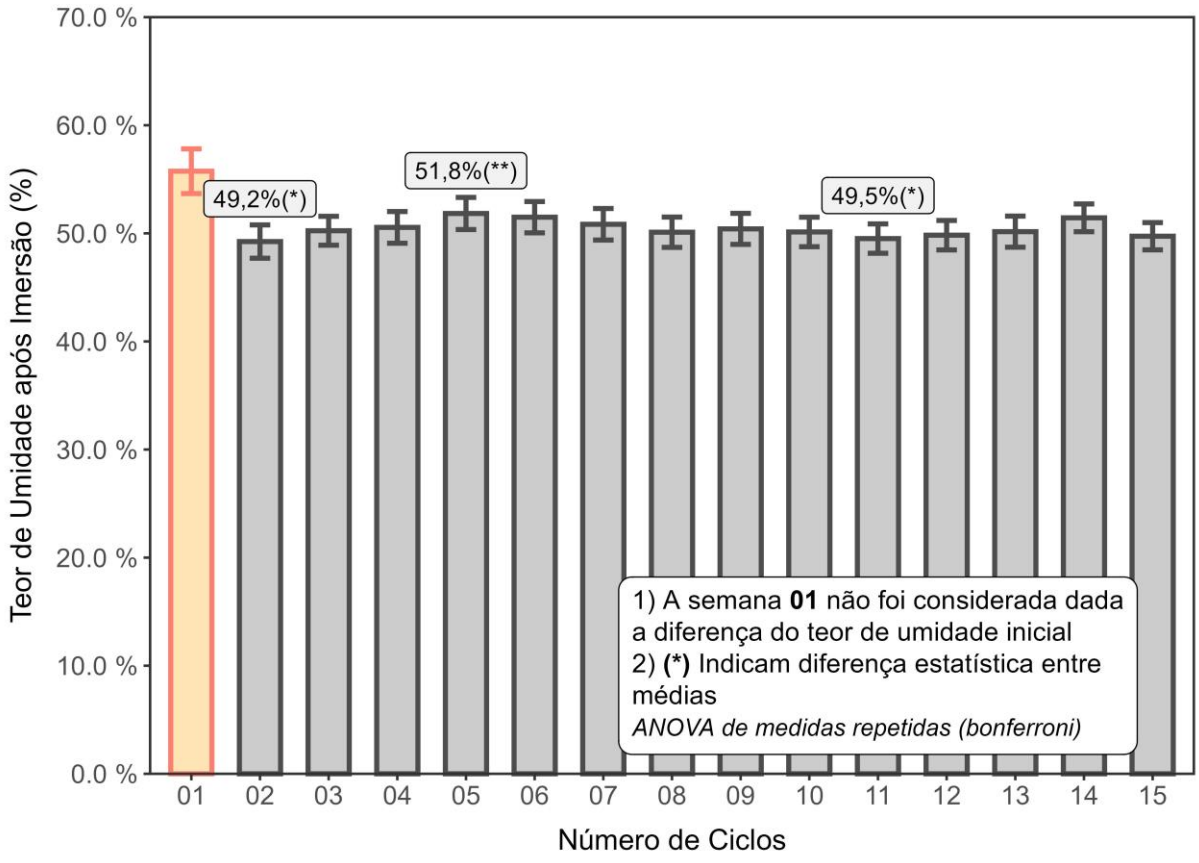
ABS (%)	Ciclo	Diferença Estatística														
Média (DP)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,557 (0,071)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,492 (0,053)	2	sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,502 (0,046)	3	sim	não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,505 (0,051)	4	sim	não	não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,518 (0,051)	5	sim	sim	sim	sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,515 (0,050)	6	sim	sim	sim	sim	não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,508 (0,050)	7	sim	não	não	não	sim	sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,501 (0,048)	8	sim	não	não	não	sim	sim	sim	-	-	-	-	-	-	-	-
0,504 (0,049)	9	sim	não	não	não	sim	sim	não	não	-	-	-	-	-	-	-
0,501 (0,047)	10	sim	não	não	não	sim	sim	sim	não	não	-	-	-	-	-	-
0,495 (0,047)	11	sim	não	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	-	-	-	-	-
0,498 (0,047)	12	sim	não	não	não	sim	sim	sim	não	sim	não	não	-	-	-	-
0,502 (0,050)	13	sim	não	não	não	sim	sim	não	não	não	não	sim	não	-	-	-
0,514 (0,044)	14	sim	sim	sim	não	não	não	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	-	-
0,497 (0,043)	15	sim	não	não	não	sim	sim	sim	não	sim	não	não	não	não	sim	-

“sim” indica que há diferença estatística entre as médias de absorção.

Fonte: O Autor.

Para facilitar a análise dos resultados, ciclos de maior relevância foram destacados. A Figura 24 apresenta os valores de teor de umidade obtidos após os ciclos de molhagem 02, 05 e 11.

Figura 24: Variação do teor de umidade após etapas de molhagem.



Fonte: O Autor.

É possível observar na Figura 24 que o valor do teor de umidade média do primeiro ciclo é superior aos demais ciclos. Tal fato ocorreu devido a não secagem das amostras antes do primeiro ciclo de molhagem, sendo os corpos de prova imersos com teores de umidade próximos a 16%. Portanto, o primeiro ciclo foi desconsiderado da análise de efeito dos ciclos. Para permitir que todos os ciclos possam ser avaliados igualmente, sugere-se que o tratamento se inicie com a secagem dos corpos de prova, ao invés da imersão.

Como indicado na Tabela 8, as diferenças estatísticas foram calculadas para todos os ciclos entre si, porém, apenas os dois menores valores de teor de umidade (T.U%) e o maior valor (com exceção do primeiro ciclo) foram explicitados na Figura 24. O segundo ciclo apresentou o menor valor de absorção dentre todos, sendo estatisticamente igual ao 11° ciclo. Já os resultados do quinto ciclo apresentaram o maior valor de absorção. Houve um aumento gradual no teor de umidade até o quinto ciclo, posterior decréscimo até a 11° e depois um novo aumento.

O mesmo comportamento foi observado por Cid *et al.*, (2020) durante a avaliação dos efeitos de hornificação na espécie de bambu *Phyllostachys pubescens*. Embora

não seja possível comparar os resultados quantitativamente, visto que os intervalos de imersão e secagem utilizados são diferentes, houve um aumento do T.U% até o quarto ciclo de molhagem e secagem, e decréscimo até o décimo ciclo. Segundo os autores, o aumento inicial pode ser atribuído à retirada de extrativos solúveis em água (carboidratos, amido) do bambu, aumentando a quantidade de vazios presentes no colmo e, consequentemente, absorvendo um volume maior de água (CID *et al.*, 2020).

Para confirmar o efeito observado nos teores de umidade após os ciclos de molhagem, a **variação** da absorção de água também foi avaliada e é definida como:

Equação 5: Variação da absorção de água.

$$\Delta ABS_x(\%) = ABS_x - RET_{x-1}$$

Onde ABS_x corresponde à absorção do ciclo em questão e RET_{x-1} à retenção do ciclo anterior (teor de umidade após secagem em estufa). A Tabela 9 apresenta os resultados estatísticos para todos os ciclos.

Tabela 9: Análise estatística dos valores médios da variação de absorção ao longo dos ciclos.

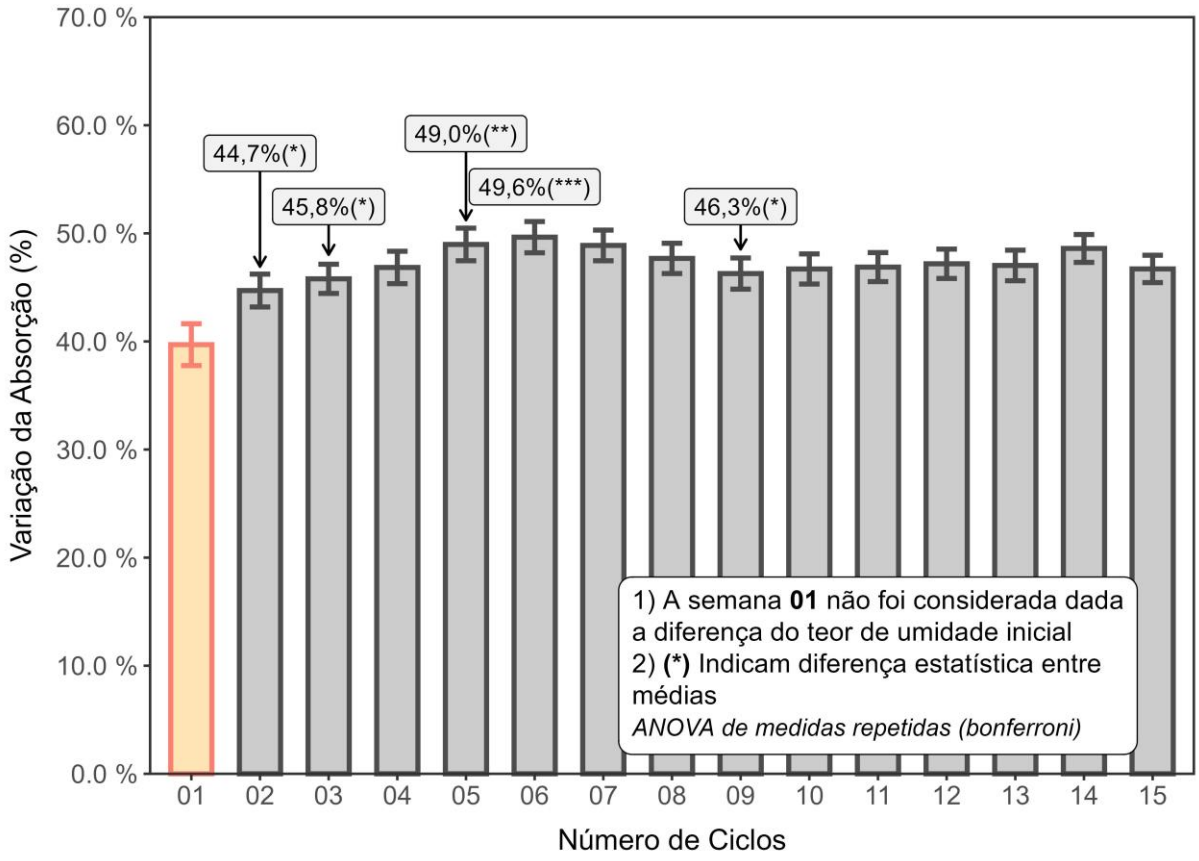
ΔABS (%)	Ciclo	Diferença Estatística														
Média (DP)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,397 (0,067)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,447 (0,052)	2	sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,458 (0,047)	3	sim	não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,468 (0,052)	4	sim	sim	sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,490 (0,052)	5	sim	sim	sim	não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,496 (0,050)	6	sim	sim	sim	não	sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,489 (0,049)	7	sim	sim	sim	não	não	sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,477 (0,048)	8	sim	sim	sim	não	sim	sim	sim	-	-	-	-	-	-	-	-
0,463 (0,050)	9	sim	não	não	sim	sim	sim	sim	sim	-	-	-	-	-	-	-
0,467 (0,048)	10	sim	sim	não	sim	sim	sim	sim	sim	não	-	-	-	-	-	-
0,469 (0,046)	11	sim	sim	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	-	-	-	-	-
0,472 (0,047)	12	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	não	-	-	-	-
0,470 (0,049)	13	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	não	não	-	-	-
0,486 (0,044)	14	sim	sim	sim	não	não	sim	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	-	-
0,467 (0,044)	15	sim	sim	não	sim	sim	sim	sim	sim	não	não	não	não	não	sim	-

"sim" indica que há diferença estatística entre as médias da variação de absorção.

Fonte: O Autor.

A Figura 25 apresenta, de forma gráfica, os resultados da variação da absorção. Novamente, para facilitar a análise dos resultados, na Figura 25 foram destacadas as diferenças mais relevantes.

Figura 25: Variação da capacidade de absorção de água durante a aplicação dos ciclos.



Fonte: O Autor.

Comportamento semelhante ao observado na Figura 24 pode ser visto para a variação da capacidade de absorção de água. O segundo ciclo apresentou a menor variação de absorção, sendo diferente estatisticamente dos ciclos cinco e seis, os quais apresentaram os maiores valores de variação de absorção de água, corroborando com a hipótese de que após cinco ciclos há um aumento da quantidade de vazios no bambu, possibilitando maior absorção de água. Após o sexto ciclo há uma redução da variação até o nono ciclo, o que pode ser justificado pelo fechamento dos poros e redução dos espaços vazios na estrutura do bambu, causados pela repetição dos ciclos de molhagem e secagem.

Para fibras vegetais (item 2.3), há a constante redução da capacidade de absorção de água após a aplicação de ciclos, mesmo nos ciclos iniciais (até 4 ciclos) (BALLESTEROS *et al.*, 2015; CLARAMUNT; ARDANUY; GARCÍA-HORTAL, 2010; FERREIRA, S. R. *et al.*, 2012). Tal diferença se dá pela presença de amido e outros carboidratos no floema (LIESE, W., 1987) e no parênquima (AZZINI *et al.*, 1981), e não no esclerênquima do bambu (fibras de celulose).

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA – 1, 12, 24, 98 E 268 HORAS

Os valores de absorção de água mensurados após imersão dos corpos de prova durante 1, 12, 24, 98 e 268 horas se encontram na Tabela 10, bem como os valores estimados para 288 horas (por meio de equação obtida após regressão) e dados obtidos por outros autores e tratamentos, todos expressos em porcentagem.

Tabela 10: Valores médios de absorção de água após hornificação.

Tratamento	Médias (Desvio Padrão)					
	1 hora	12 horas	24 horas	98 horas	268 horas	288 horas
0 Ciclos	$6{,}5^{a}$ (0,7)	$22{,}4^{a}$ (3,2)	$33{,}3^{a}$ (4,7)	$42{,}6^{a}$ (5,7)	$59{,}7^{a}$ (10,4)	64,0
5 Ciclos	$9{,}8^{b}$ (1,9)	$31{,}6^{b}$ (4,0)	$38{,}3^{b}$ (4,1)	$50{,}2^{b}$ (4,9)	$58{,}1^{a}$ (6,6)	56,5
10 Ciclos	$10{,}4^{b}$ (1,2)	$30{,}4^{b}$ (3,3)	$36{,}9^{a,b}$ (3,9)	$46{,}8^{a,b}$ (6,0)	$54{,}0^{a}$ (8,2)	59,2
15 Ciclos	$10{,}4^{b}$ (2,1)	$30{,}3^{b}$ (4,3)	$36{,}8^{a,b}$ (4,7)	$46{,}0^{a,b}$ (5,9)	$53{,}8^{a}$ (7,7)	59,5
Letras diferentes (a, b) indicam diferença estatística na mesma coluna *(Tukey)*.						
Bibliografia sobre a mesma Espécie						
Tratamento	Fonte	12 horas	24 horas	98 horas	268 horas	288 horas
Referência	(GAUSS *et al.*, 2021a)	$28{,}93^{a}$	$41{,}17^{a}$	-	-	$79{,}87^{a}$
DOT 5%		$32{,}83^{b}$	$44{,}16^{a}$	-	-	$81{,}06^{a}$
CA 10%		$22{,}64^{c}$	$29{,}26^{b}$	-	-	$59{,}10^{b}$
DOT+CA		$24{,}68^{c}$	$33{,}17^{c}$	-	-	$66{,}96^{c}$
Letras diferentes (a, b, c) indicam diferença estatística na mesma coluna *(Tukey)*.						
Referência	(GAUSS *et al.*, 2021b)	$28{,}96^{a,b}$	$39{,}72^{a}$	-	-	$67{,}43^{a}$
DOT 5%		$27{,}67^{b}$	$36{,}09^{b}$	-	-	$59{,}18^{b}$
T10H		$30{,}23^{a,b}$	$38{,}56^{a,b}$	-	-	$61{,}96^{b}$
T10H+DOT		$29{,}37^{a}$	$37{,}61^{a,b}$	-	-	$59{,}62^{b}$
Letras diferentes (a, b, c) indicam diferença estatística na mesma coluna *(Tukey)*.						

Fonte: O Autor.

Até 98 horas de imersão, os bambus sem tratamento absorveram menos água que os demais. Após 268 horas apresentaram a maior média de absorção, entretanto, sem diferença estatística (Tabela 10).

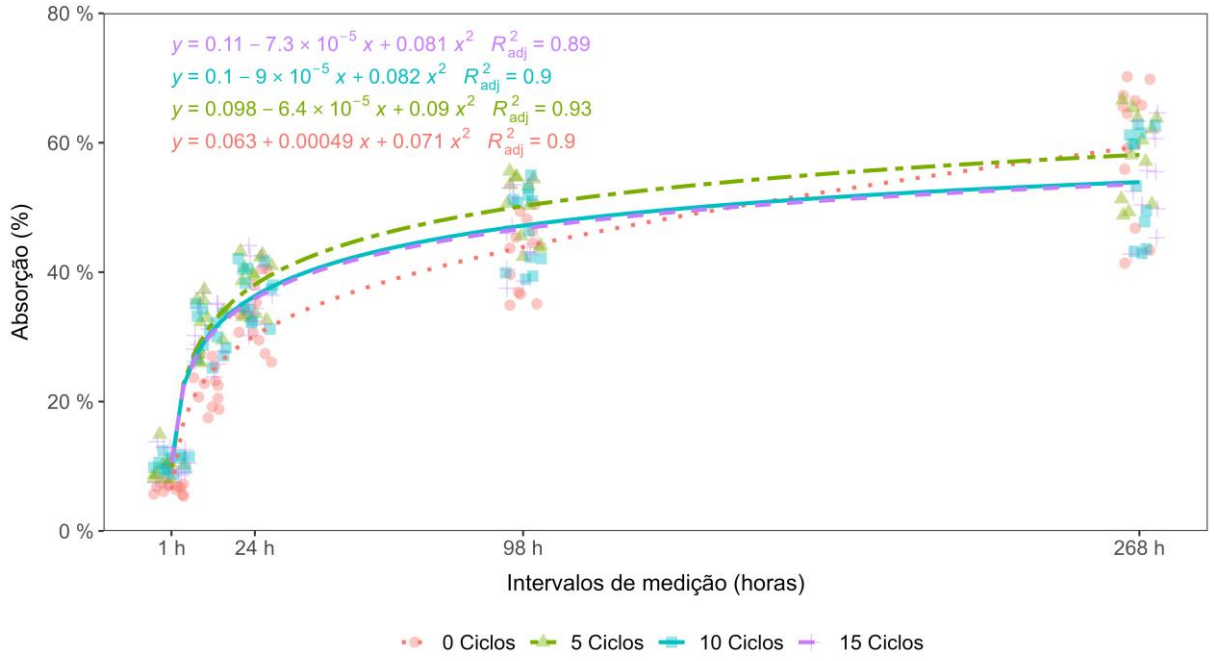
A maior taxa de absorção dos bambus tratados até 98 horas, principalmente após 5 ciclos, pode ser explicada pelo aumento de vazios após a remoção de carboidratos durante os ciclos iniciais de molhagem e secagem (Tabela 10).

Ao comparar os valores de absorção até 24 horas entre as amostras de referência (sem tratamentos), observa-se uma diferença entre os valores obtidos na presente pesquisa (22,4 e 33,3% para 12 e 24 horas), e os valores de referência obtidos na literatura (28,93; 28,96 e 41,17; 39,72% para 12 e 24 horas), tal fato pode ser atribuído à variabilidade do bambu por ser um material natural, e a diferenças na etapa de preparação das amostras (em ambos os estudos citados, as amostras

foram secas em estufa por 48 horas a 60°C). Os valores encontrados para um mesmo tratamento químico (DOT 5%), após aplicação do mesmo procedimento, também apresentam grandes variações, o que corrobora com a hipótese de variabilidade do material (Tabela 10).

A Figura 26 apresenta linhas de tendência de absorção obtidas a partir de modelos de regressão linear polinomial. É possível identificar que, apesar de uma maior absorção nas primeiras horas de imersão em água, os bambus tratados tendem a absorver menos ao longo do tempo, principalmente as amostras submetidas a 10 e 15 ciclos.

Figura 26: Linhas de tendência para absorção de água pelo bambu.



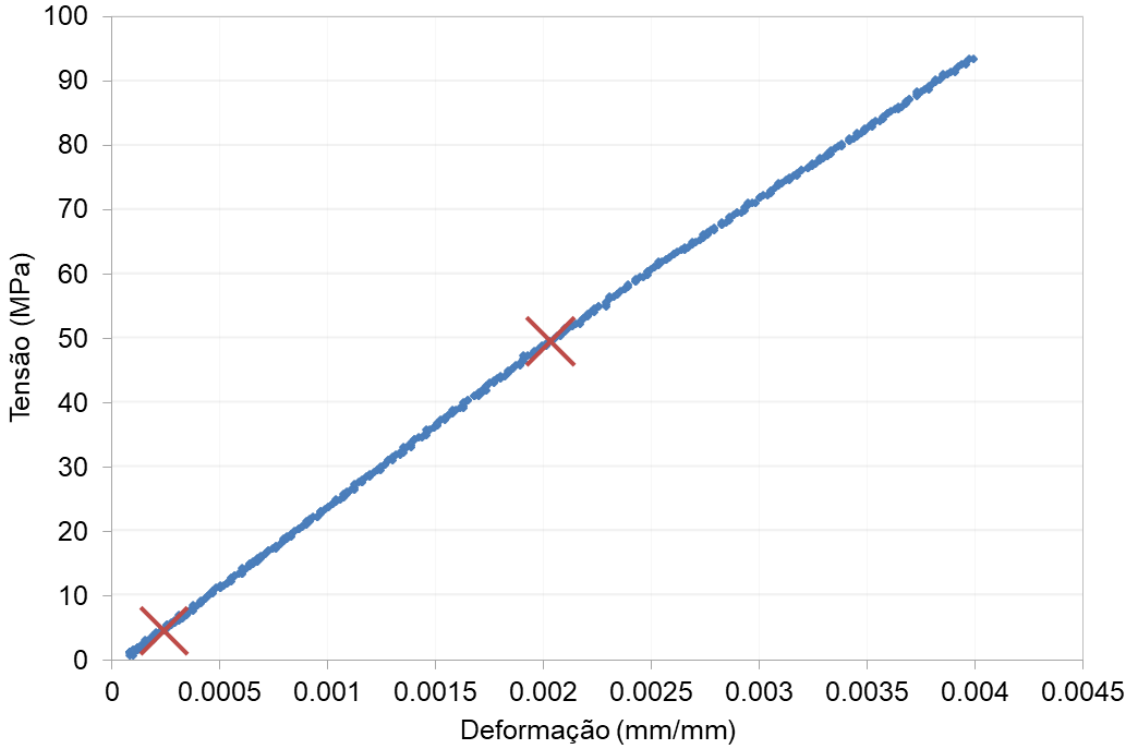
Fonte: O Autor.

Por meio das equações obtidas (Figura 26) foi possível estimar os valores de teor de umidade para 288 horas. Percebe-se que o valor de absorção sem tratamento tende a aumentar mais após um período de tempo maior se comparado aos valores de absorção das amostras após tratamento. Os valores de absorção mensurados após 288 horas pelos artigos de referência não são comparáveis aos valores da presente pesquisa, pois, após 24 horas de imersão, houve a aplicação de vácuo para penetração completa da água no bambu, aumentando a porcentagem absorvida em relação ao método convencional (sem aplicação de vácuo).

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

A Figura 27 apresenta o gráfico de tensão e deformação obtido para o CP 0-7 (sem tratamento), onde o intervalo marcado pelo símbolo “X” representa o trecho escolhido para o cálculo do módulo de elasticidade dos corpos de prova. O mesmo procedimento foi realizado para os outros corpos de prova e tratamentos. Vale ressaltar que a coleta de dados de deslocamento por meio do *clip gage* foi feita até 2500 N, não sendo possível observar a tensão de ruptura do bambu.

Figura 27: Gráfico de tensão x deformação para um corpo de prova de bambu sem tratamento.



Fonte: O Autor.

A Tabela 11 sumariza os resultados obtidos por meio do teste de tração, bem como os teores de umidade no momento do ensaio e a densidade aparente média por tratamento. Para a mesma espécie e trechos centrais, a um teor de umidade de aproximadamente 7,5%, foram encontrados valores de densidade aparente entre 0,85 e 0,98 g/cm³ (GAUSS *et al.*, 2021b). Em outros dois estudos, os valores médios de densidade aparente foram de 0,774 g/cm³ (teor de umidade de 10%) (GAUSS *et al.*, 2021a) e 0,79 g/cm³ (MARASIGAN; RAZAL; ALIPON, 2020), valores mais próximos ao obtido na presente pesquisa para o bambu sem tratamento. Para trechos da parte basal e superior do bambu foram encontrados valores de 0,706 e

0,896 g/cm³ respectivamente, para um teor de umidade de 12% (SRIVARO; JAKRANOD, 2016).

Tabela 11: Teste de tração no bambu.

Tratamento	$f_{t,0}$ (MPa)	$E_{t,0}$ (GPa)	T.U (%)	Densidade Aparente (g/cm³)
0 Ciclos	$258{,}6^{a}$ $(\pm 19{,}6)$	$23{,}0^{a}$ $(\pm 3{,}79)$	3,8%	0,78
5 Ciclos	$217{,}9^{b}$ $(\pm 22{,}7)$	$23{,}7^{a}$ $(\pm 6{,}52)$	3,7%	0,70
10 Ciclos	$215{,}6^{b}$ $(\pm 13{,}5)$	$23{,}6^{a}$ $(\pm 6{,}55)$	4,0%	0,69
15 Ciclos	$207{,}5^{b}$ $(\pm 22{,}4)$	$25{,}2^{a}$ $(\pm 4{,}81)$	4,8%	0,72

Letras diferentes (a, b) indicam diferença estatística na mesma coluna *(Tukey)*.

Fonte: O Autor.

Os resultados indicam que os bambus sem tratamento obtiveram maior resistência à tração ($f_{t,0}$) em comparação com os bambus tratados, nos quais a redução foi de até 20% aproximadamente (15 ciclos). O valor médio de 258,6 MPa para o bambu sem tratamento é próximo ao valor de 269,4 MPa obtido para trechos centrais da mesma espécie (GAUSS *et al.*, 2021a). Embora as médias indiquem uma redução gradual após a aplicação de 5 ciclos, não pode ser comprovada diferença estatística entre as médias de resistência à tração das amostras submetidas a 5, 10 e 15 ciclos. A Figura 28 apresenta os CPs após o ensaio de tração, bem como os valores de resistência para cada um. É possível observar em alguns casos, a ruptura perto da extremidade do corpo de prova (5-1, 5-8, 10-1, 10-2, 10-6, 15-1, 15-4). Entretanto, os valores calculados para a resistência à tração desses CPs não indica uma variação relevante em relação às médias obtidas para cada grupo.

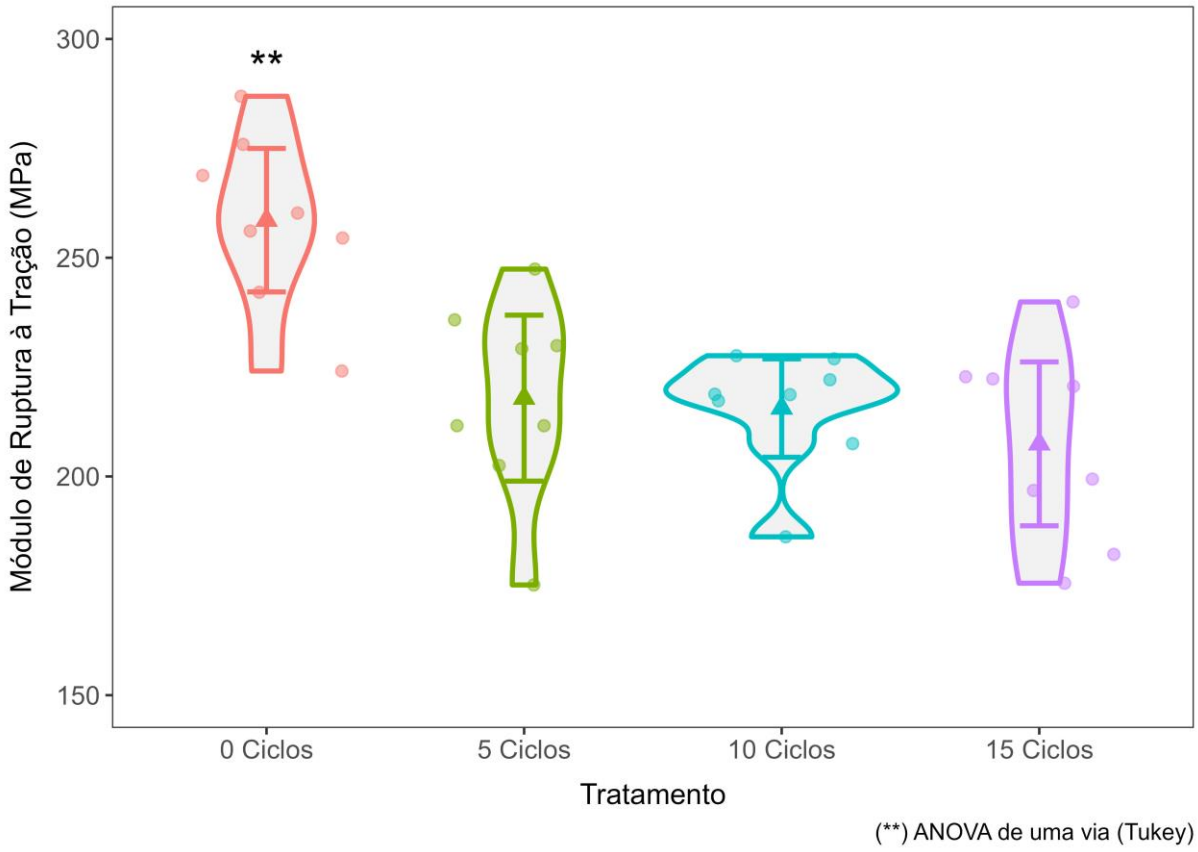
Figura 28: Modos de ruptura do bambu após ensaio de tração.



Fonte: O Autor.

A Figura 29 apresenta de forma mais detalhada a distribuição dos resultados obtidos. Por meio dela, nota-se que até mesmo os maiores valores de resistência à tração encontrados para os bambus tratados (247,4; 227,6 e 239,9 MPa), são menores do que o valor médio das amostras sem tratamento. Além disso, a utilização do *violin plot* ajuda a visualizar a distribuição dos resultados. Por exemplo, os valores médios encontrados para 5 e 10 ciclos foram muito próximos, porém, há uma maior variação da resistência à tração após 5 ciclos, e uma maior probabilidade de um valor próximo da média obtida para 10 ciclos se repetir.

Figura 29: Resistência à tração do bambu após hornificação.



Fonte: O Autor.

Tratamentos químicos com a utilização de ácido cítrico também causam reduções na resistência à tração do bambu de aproximadamente 29%. A utilização de soluções a base de boro, entretanto, promoveu manutenção dessa propriedade mecânica (GAUSS *et al.*, 2021a; GAUSS *et al.*, 2021b).

Resultados obtidos para fibras vegetais submetidas ao processo de secagem e molhagem (Figura 9) apresentaram um aumento ou manutenção da resistência à tração em relação às fibras não tratadas, o oposto do observado para o bambu. Tal diferença pode ser explicada visto que não há uma redução significativa da seção transversal do bambu após a hornificação. Em contrapartida, para fibras isoladas, o fechamento dos lúmens até 10 ciclos é significativo na redução da seção transversal e posterior cálculo de tensão de ruptura à tração.

Em relação ao módulo de elasticidade ($E_{t,0}$), maiores valores médios foram obtidos para bambus tratados (aumento de 3,0; 2,6 e 9,6%), porém, as diferenças não são significativas estatisticamente. Em um estudo sobre os efeitos da hornificação no bambu, realizado por Cid *et al.*, (2020), e por meio do ensaio de flexão de quatro pontos nas duas direções (parede externa ou parede interna

tracionada), observou-se um aumento considerável do módulo de elasticidade após cinco ciclos de molhagem e secagem (70 e 65% para parede externa e interna tracionada, respectivamente) e leve decréscimo após 10 ciclos (40 e 57%, parede externa e interna tracionada, respectivamente). Os autores afirmam que, dado o pequeno comprimento do vão útil da peça, a deflexão mensurada sofre influência de ambos os módulos de elasticidade e cisalhamento. O deslocamento foi mensurado por extensômetros posicionados nas faces superior e inferior do bambu e não houve verificação estatística dos resultados. O pequeno decréscimo do módulo de elasticidade após 10 ciclos, segundo os autores, se deu por danos causados às fibras após excesso de ciclos, porém tal efeito não foi confirmado no presente estudo por meio do ensaio de tração, visto que houve uma manutenção dos valores encontrados após tratamento (sem diferença estatística).

Os valores de módulo de elasticidade para 0, 5 e 10 ciclos são próximos ao valor de 23,34 GPa encontrado para a mesma espécie de bambu (GAUSS *et al.*, 2021a). Por meio da Figura 30 é possível observar que as amostras de bambu após a aplicação de ciclos apresentam maior variação nos valores de módulo de elasticidade, em comparação com os resultados obtidos para o bambu sem tratamento.

Para bambus sem a aplicação de ciclos de molhagem e secagem, houve uma diferença de aproximadamente 65% entre o maior e o menor valor de módulo de elasticidade mensurado. Para 5, 10 e 15 ciclos, as diferenças foram cerca de 98, 96 e 63%, indicando uma alta variabilidade na obtenção desse parâmetro. Para fibras vegetais (Figura 11), também não foi possível determinar com clareza o efeito da hornificação no módulo de elasticidade até 10 ciclos. Após 20 ciclos, entretanto observou-se um decréscimo dessa propriedade.

Figura 30: Módulo de elasticidade do bambu após hornificação.



Fonte: O Autor.

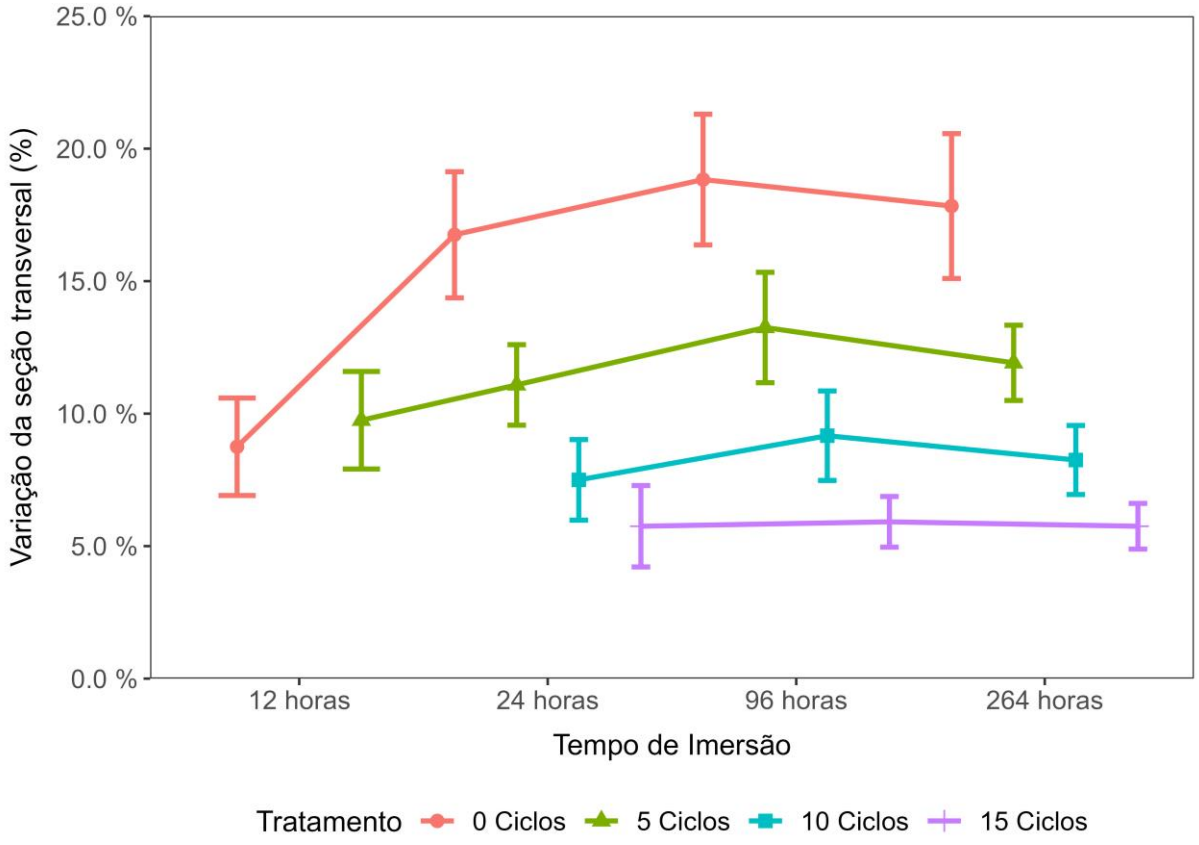
4.5 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL

A Figura 31 apresenta de maneira resumida o comportamento das peças de bambu após imersão em água e aferições de área transversal após 12, 24, 96 e 264 horas, na qual as barras verticais representam o intervalo de confiança (95%) da média. Apenas amostras de bambus sem tratamento (0 ciclos) e após 5 ciclos foram avaliadas com 12 horas de imersão. Tal fato se deu pela dificuldade observada pelo autor em ajustar a luz do ambiente para obtenção das imagens (fotos tiradas na parte da noite), portanto, o processo não foi repetido para 10 e 15 ciclos.

Bambus sem tratamento apresentaram maior variação da seção transversal ao longo do tempo, estabilizando após 264 horas. Embora as amostras com 5 ciclos tenham apresentado comportamento semelhante aos corpos de prova sem tratamento após 12 horas, não houve o grande aumento após um dia (24 horas), como observado para as amostras sem tratamento. As amostras tratadas com 10 e 15 ciclos de molhagem e secagem apresentaram menores variações ao longo do

tempo, com médias de variação de (7,5%, 9,2%, 8,2%) e (5,8%, 5,9%, 5,8%) em relação aos corpos de prova antes da imersão em água, respectivamente.

Figura 31: Variação da seção transversal ao longo do tempo.



Fonte: O Autor.

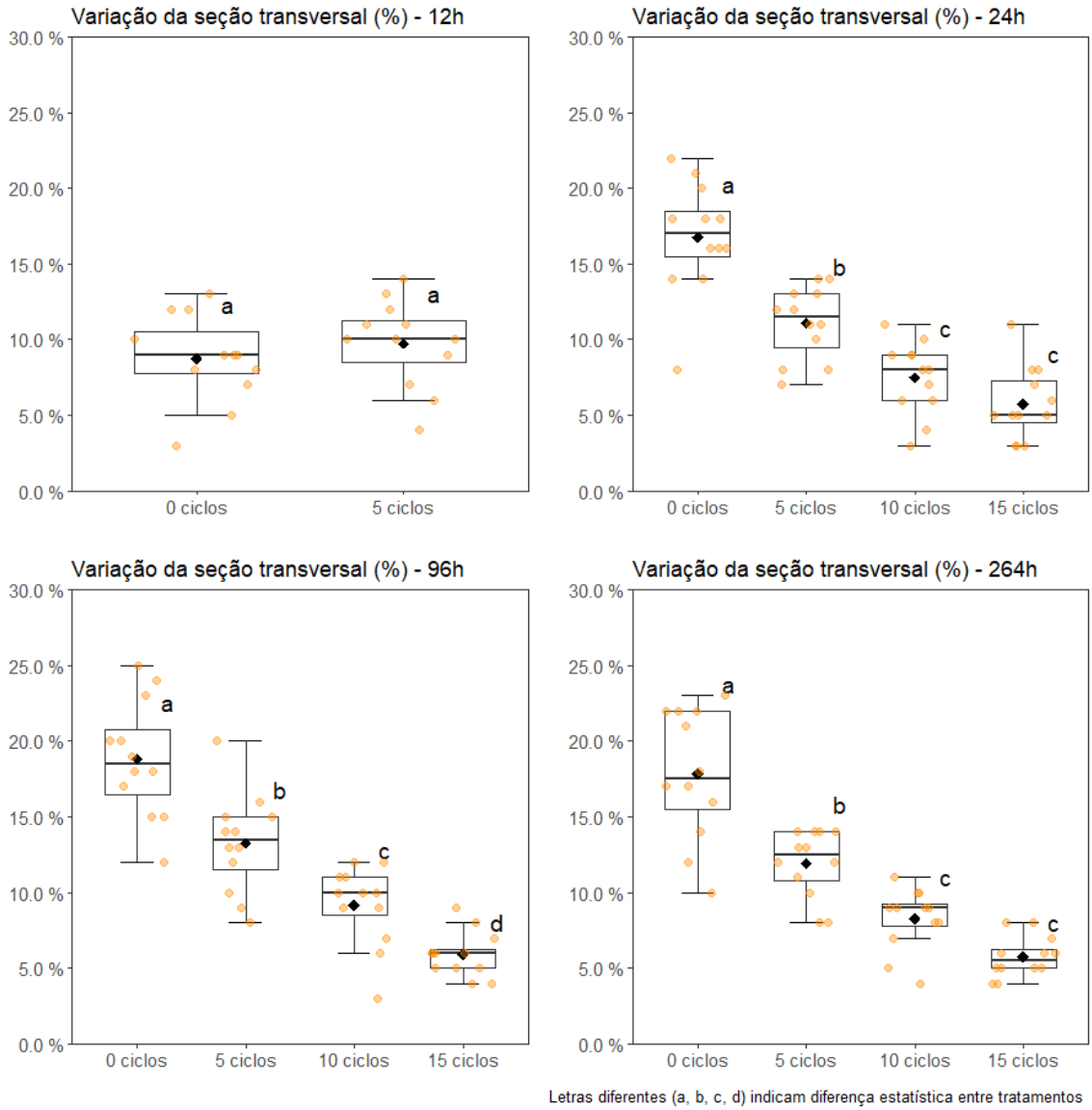
Os gráficos dispostos na Figura 32 apresentam as variações dimensionais para cada tratamento, agora isoladas por tempo de imersão (12, 24, 96 e 268 horas). Além disso, a diferença estatística entre os valores encontrados foi calculada por meio da ANOVA de uma via e teste de Tukey. Cada medida está representada pelo círculo laranja e o símbolo em forma de diamante representa a média dos valores.

A análise estatística indicou que, a partir de 24 horas, as amostras com 5, 10 e 15 ciclos apresentaram maior estabilidade dimensional em comparação com as amostras sem tratamento, e que as amostras com 10 e 15 ciclos obtiveram menor variação se comparadas às amostras com 5 ciclos, indicando que, até 15 ciclos de molhagem e secagem, há um aumento gradual da estabilidade dimensional do bambu (Figura 32).

Embora não tenham sido verificadas as diferenças estatísticas entre diferentes tempos de imersão, é possível observar por meio da Figura 32 que as médias de

variação da seção de bambus tratados com 10 e 15 ciclos após 264 horas se assemelham ou são menores do que as médias de absorção de 0 e 5 ciclos após 12 horas. Além disso, quanto mais ciclos aplicados, menor é o intervalo de obtenção dos dados para a área transversal, corroborando com a hipótese do aumento da estabilidade dimensional.

Figura 32: Boxplots das análises de variação dimensional para diferentes tempos de imersão.



Fonte: O Autor.

Apesar dos bambus com tratamento absorverem quantidades semelhantes de água em comparação com as amostras de referência, os mesmos apresentaram maior estabilidade dimensional. Tal fato pode ser justificado pela retirada dos carboidratos e amidos até o quinto ciclo (CID *et al.*, 2020).

4.6 ANÁLISE DE DENSIDADE POR PICNOMETRIA

A execução da análise de densidade por picnometria possibilitou avaliar os valores de densidade do bambu sem tratamento e após 10 ciclos de molhagem e secagem. Foram escolhidas amostras após 10 ciclos por terem demonstrado valores menores de absorção no ensaio de absorção e retenção de água (item 4.2) e, para análise estatística, foram consideradas oito medições em cada amostra.

A diferença estatística para as médias das amostras (CP-01, CP-02, CP-11, CP-12 e CP-13) foi comprovada por ANOVA de uma via e teste de Tukey para intervalo de confiança de 95% (os pressupostos para execução do teste paramétrico foram cumpridos integralmente).

A comparação entre diferentes tratamentos (0 ciclos e 10 ciclos) foi feita por meio do Teste-t, somente amostras não moídas foram levadas em consideração nessa etapa e parâmetros como normalidade e homogeneidade foram verificados. Observou-se que os dados coletados para 10 ciclos cumpriram ambos os requisitos de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (teste de Levene), já os dados para o bambu sem tratamento (16 valores no total) não apresentaram normalidade (*p-valor* = 0,026), porém o pressuposto de homogeneidade de variâncias foi cumprido. Embora o não cumprimento do pressuposto de normalidade, é possível observar que os valores da média e da mediana para o bambu após 0 ciclos são iguais, portanto, não julgou-se necessária a utilização de um teste não paramétrico.

Durante a coleta de dados se observou uma diferença significativa no tempo necessário para estabilização da pressão de gás hélio entre as amostras de bambu inteira e outros materiais em pó, portanto, definiu-se um tempo médio entre 3:00 e 3:20 minutos para cada medição. Os resultados estão descritos na Tabela 12.

As médias obtidas para cada amostra indicam a alta variabilidade presente nos valores de densidade obtidos por meio da picnometria por gás hélio ao utilizar o bambu em seu estado natural (sem moer). Tal efeito pode ser justificado pela variabilidade inerente ao material natural, embora amostras de um mesmo trecho de bambu tenham sido selecionadas para o ensaio, e ao preenchimento incompleto dos vazios por gás hélio. Comparando os valores de densidade real obtidos para o bambu sem tratamento (1,26 e 1,14 g/cm^3) com o valor de referência encontrado na literatura (1,303 g/cm^3) (GAUSS *et al.*, 2021b), e com o valor obtido para a amostra

moída sem aplicação de ciclos (1,55 g/cm^3), é possível identificar que o gás hélio não ocupou todos os espaços disponíveis (devido a uma barreira física imposta pelo próprio material), resultando em um valor de densidade menor. O mesmo se aplica à amostra CP-12, em que a densidade encontrada (1,45 g/cm^3) é menor se comparada à densidade do bambu após 10 ciclos e moído (1,57 g/cm^3).

Tabela 12: Valores de densidade do bambu tratato e sem tratamento.

Ciclos	Amostra	Densidade (g/cm^3)			
		Média (DV)	Média/Ciclo (DV)	Mediana (Iqr)	Mediana/Ciclo (Iqr)
0	CP-01	$1{,}26^a$ (0,019)	$1{,}20^a$ (0,069)	1,27 (0,024)	1,20 (0,118)
	CP-02	$1{,}14^b$ (0,024)		1,15 (0,031)	
10	CP-11	$1{,}57^c$ (0,037)	$1{,}51^b$ (0,07)	1,57 (0,039)	1,51 (0,114)
	CP-12	$1{,}45^d$ (0,035)		1,45 (0,038)	
0 (amostra moída)		$1{,}55^c$ (0,013)	-	1,56 (0,012)	-
10 (amostra moída)		$1{,}57^c$ (0,010)	-	1,57 (0,009)	-
(GAUSS *et al.*, 2021b)		1,303	-		

Letras diferentes indicam diferença estatística significativa entre valores da mesma coluna.

Fonte: O Autor.

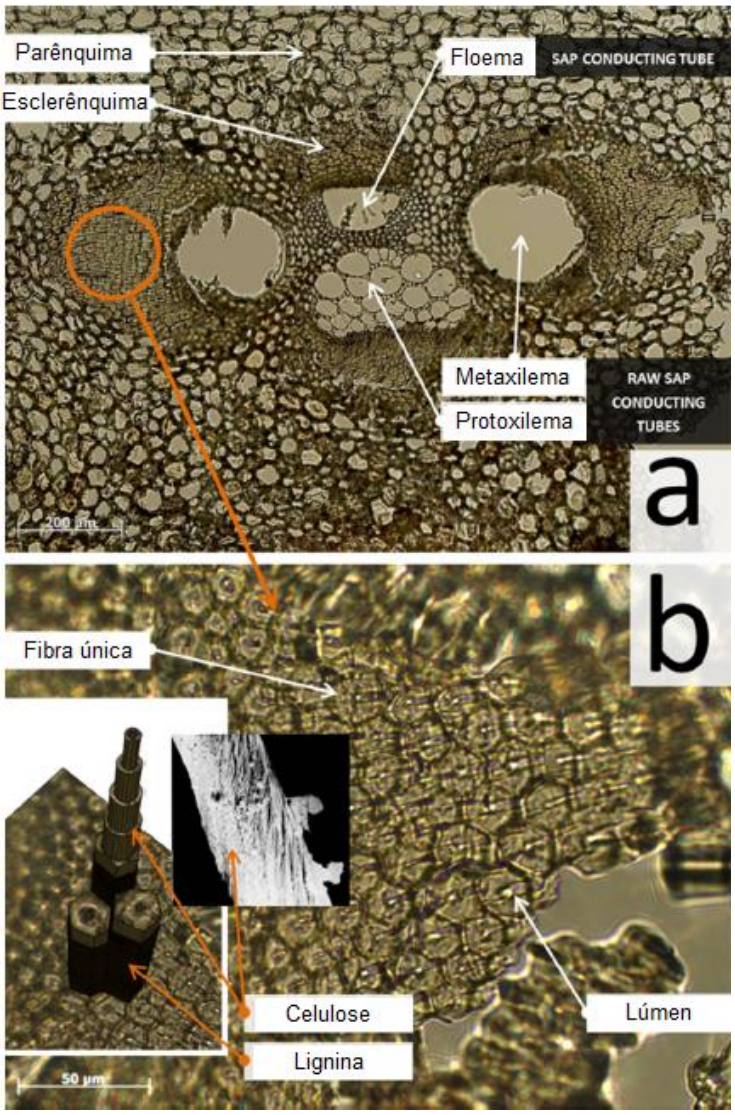
Por meio dos valores obtidos para 0 e 10 ciclos, (médias de 1,20 e 1,51 g/cm^3 respectivamente), nota-se um aumento da densidade após o tratamento. O aumento variou entre 15 e 38%, comparando valores entre amostras, e pode ser relacionado com o fechamento dos poros (lúmens) após a hornificação, e um encolhimento dos feixes vasculares após o quinto ciclo (no item 4.2 discutiu-se o aumento de espaços vazios após retirada dos carboidratos do floema) (Tabela 12).

As densidades encontradas para amostras moídas de bambu sem tratamento e o bambu após 10 ciclos de molhagem e secagem não são diferentes significativamente entre si, resultado diferente do observado para amostras inteiras.

As amostras moídas apresentam valores maiores de densidade, dada a não presença de vazios (feixes vasculares), e as amostras após a hornificação apresentaram valores próximos aos das amostras moídas, o que pode ser justificado pelo fechamento dos poros presentes nas fibras e encolhimento dos feixes vasculares.

A Figura 33 indica os tubos condutores, o parênquima e esclerênquima (a), bem como onde se encontram os lúmens na estrutura do bambu (b), por meio de microscopia óptica de luz transmitida, de forma a facilitar a visualização do que foi discutido anteriormente (KRAUSE *et al.*, 2016).

Figura 33: Imagens de microscopia da seção transversal do bambu.



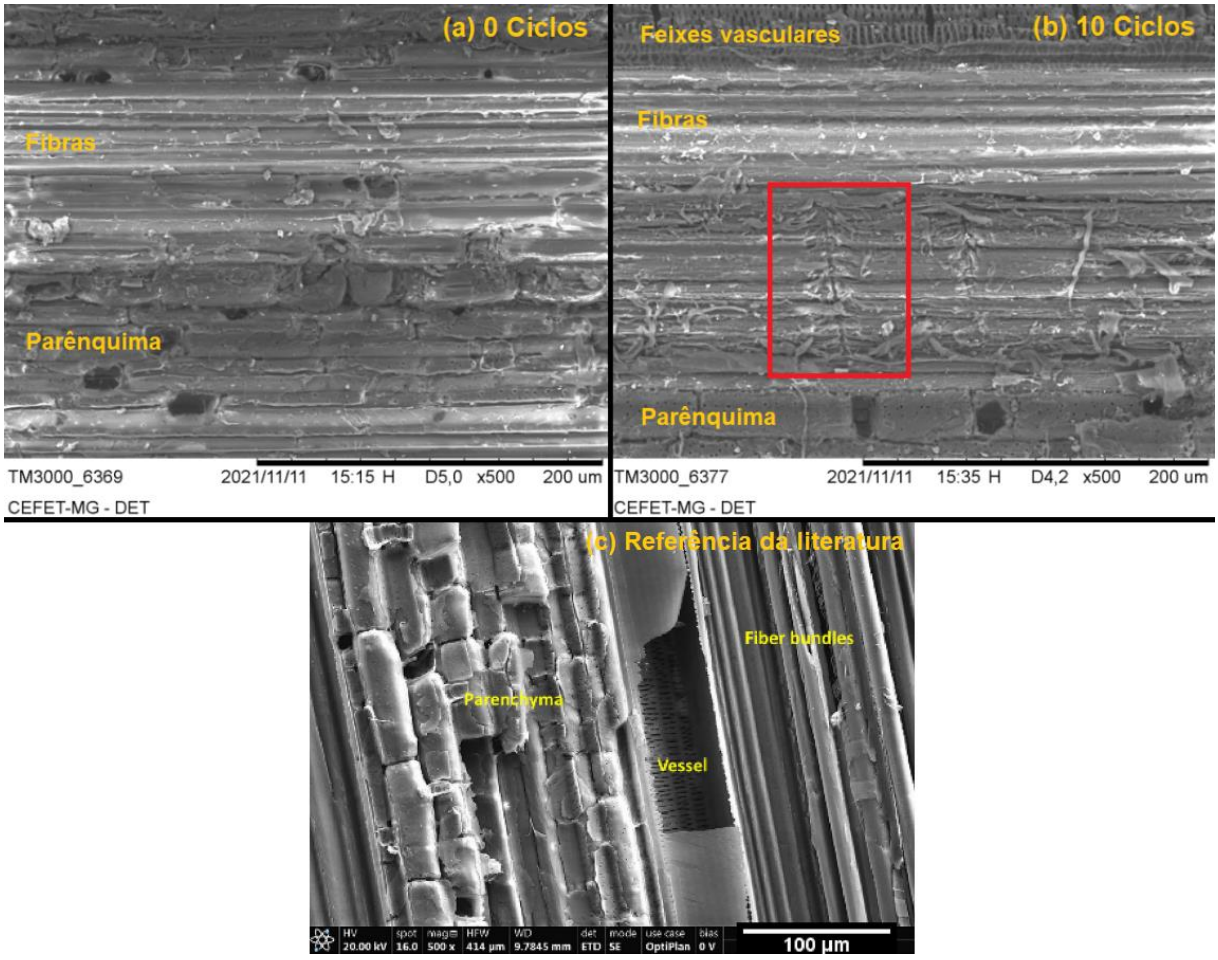
Fonte: (KRAUSE *et al.*, 2016) adaptado.

4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Imagens obtidas da seção longitudinal do bambu sem tratamento e após 10 ciclos de secagem e molhagem serão apresentadas a seguir.

A Figura 34 apresenta um exemplo de identificação dos componentes do bambu na direção longitudinal realizada via microscopia eletrônica de varredura (MEV) (c) (GAUSS *et al.*, 2020), e as imagens obtidas na presente pesquisa para bambus sem tratamento e após 10 ciclos (‘a’ e ‘b’).

Figura 34: Resultado da análise por MEV em bambus na direção longitudinal.



Fonte: (a) e (b) – O Autor; (c) – (GAUSS *et al.*, 2020).

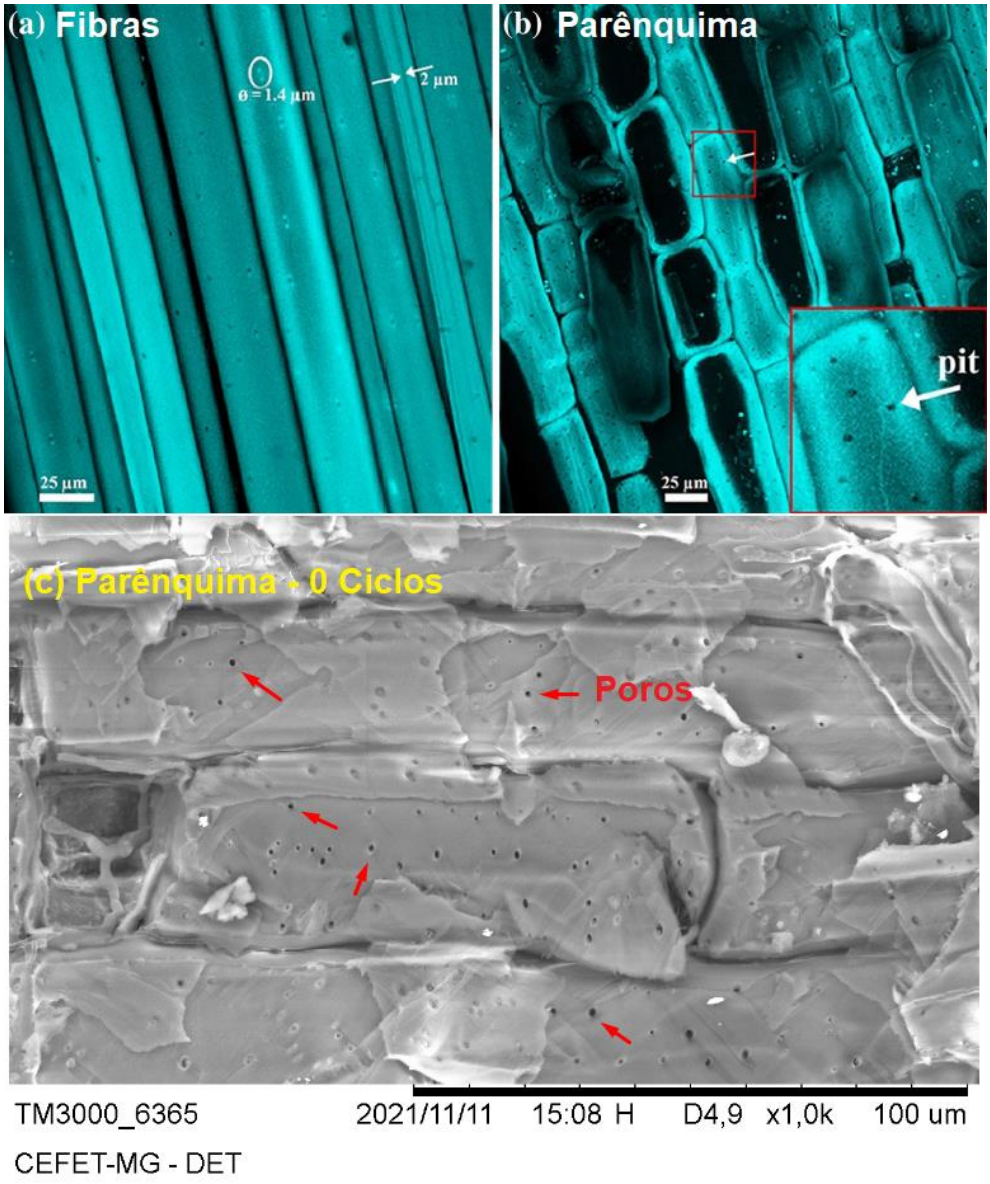
Embora uma diferença possa ser observada no centro da imagem de 10 ciclos (b) na região das fibras (retângulo vermelho), a mesma não pode ser atribuída à aplicação de ciclos de molhagem e secagem visto que o efeito não foi observado em outros trechos do esclerênquima.

Em outras imagens com diferentes amplificações e em diferentes posições da seção longitudinal do corpo de prova, o mesmo foi observado. Os componentes do bambu puderam ser identificados, entretanto, não foram localizadas alterações que pudessem ser atribuídas à hornificação, como pequenas rachaduras e imperfeições observadas em fibras de bucha do campo e refugo após 10 ciclos de molhagem e secagem (LIMA *et al.*, 2014), ou superfícies mais enrugadas observadas em fibras de madeiras folhosas e coníferas após 4 ciclos (BALLESTEROS *et al.*, 2017).

Também foi possível observar micro poros presentes nas células parenquimáticas, que contribuem para o fluxo de nutrientes por toda a matriz do bambu (PANDOLI *et al.*, 2019). Na Figura 35, os micro poros foram identificados no

esclerênquima (a) e no parênquima (b) em imagens obtidas por meio de microscopia confocal a laser, e no parênquima (c) em imagem obtida na presente pesquisa (MEV).

Figura 35: Micro poros no bambu: (a) fibras (LSCM), (b) parênquima (LSCM), (c) parênquima (MEV).



Fonte: (a) e (b) - (PANDOLI *et al.*, 2019) adaptado, (c) – O Autor.

4.8 ANÁLISE POR DRX

A Tabela 13 apresenta os índices de cristalinidade calculados por meio da Equação 4 para uma amostra de bambu sem tratamento e uma amostra após 15 ciclos de secagem e molhagem.

Tabela 13: Resultados do ensaio de DRX no bambu.

Tratamento	Índice de Cristalinidade (%)
0 Ciclos	30,9%
15 Ciclos	46,3%
Variação	49,8%

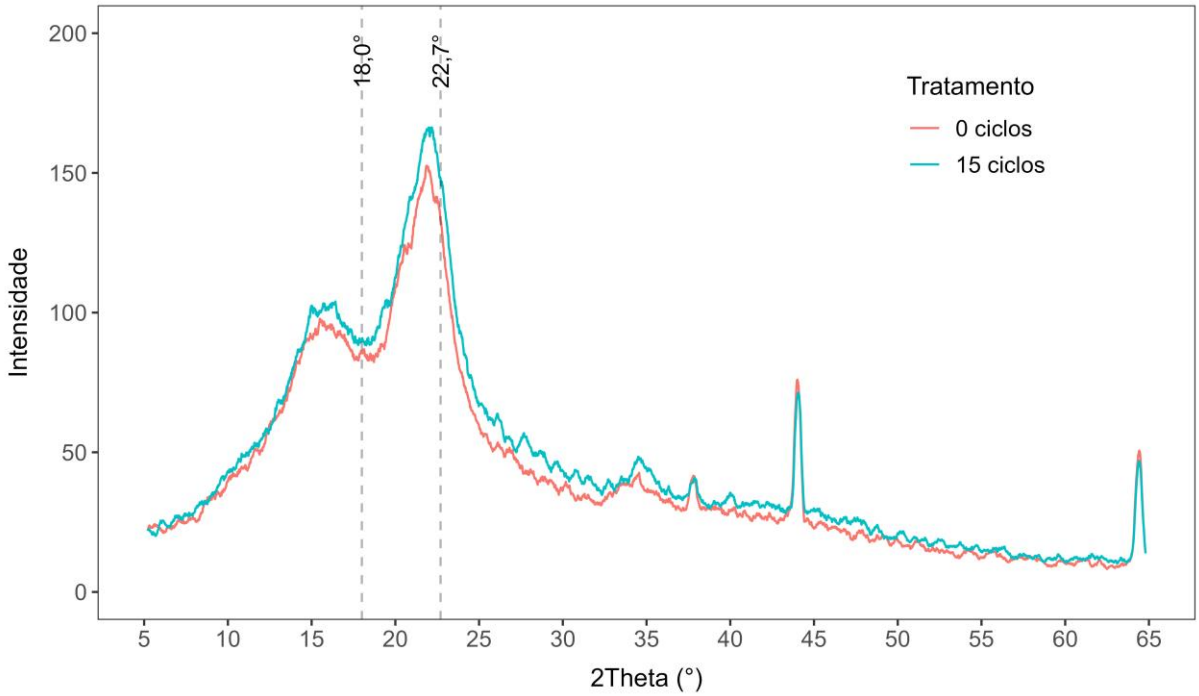
Fonte: O Autor.

Houve uma variação significativa no índice de cristalinidade do bambu após o efeito da hornificação (aumento de 49,8%). Embora o ensaio de DRX seja um meio indireto de avaliar as propriedades mecânicas do material, o aumento no índice não resultou em aumento do módulo de elasticidade e na resistência à tração do bambu após a aplicação de ciclos de molhagem e secagem. Em relação ao módulo de elasticidade, houve um aumento de aproximadamente 10% após 15 ciclos, porém sem diferença estatística em relação aos outros tratamentos. A resistência à tração apresentou reduções de até 20% em comparação com o bambu sem tratamento.

Em um estudo realizado em diferentes tipos de celulose, obtidos por meio da fibra de rami (planta nativa da Ásia Oriental), observou-se que, além de parâmetros relacionados à cristalinidade do material, informações sobre a densidade da região amorfa também influenciam no módulo de elasticidade (ISHIKAWA; OKANO; SUGIYAMA, 1997).

Na Figura 36 estão plotadas as curvas de intensidade obtidas no ensaio de difratometria, bem como os picos de intensidade utilizados para o cálculo do índice de cristalinidade. A variação da intensidade foi suavizada por meio da função "*rollmean"* do *software R*, no qual cada valor de intensidade (para cada ângulo) foi substituído pela média dos 20 valores adjacentes, de forma a facilitar a visualização dos picos de ambas as amostras. Picos característicos associados à celulose, 14,8° (101) e 22,6° (002) (LIN; BRUZZESE; DUFRESNE, 2012), foram observados para ambas as amostras. Além disso, após a aplicação de 15 ciclos houve um aumento de intensidade nos dois picos característicos.

Figura 36: Picos de intensidade obtidos por meio do DRX.



Fonte: O Autor.

4.9 ANÁLISE POR FT-IR

A análise de espectroscopia por infravermelho foi utilizada para avaliar os grupos funcionais do bambu, além de verificar se há alteração ou não após a aplicação de ciclos de molhagem e secagem. A Tabela 14 apresenta picos característicos presentes em madeira (HUANG, XIANAI *et al.*, 2012).

Tabela 14: Picos característicos de absorbância na madeira.

Número de Onda (cm^{-1})	Grupo Funcional	Atribuição
3500-3420	$-OH$	Presente na água e em componentes da madeira
2900	$C-H, -CH_2-$	Alongamento dos grupos metil e metileno, cadeias de hidrocarboneto
1740-1730	$-COOH(C=O)$	Grupos carbonila, alongamento do ácido acetílico ou carboxílico (hemicelulose)
1640-1660	$C=O$	Quininas ou metetos de quinino, água adsorvida
1600	$C=C$	Anél aromático (lignina)
1510	$C=C$	Anél aromático (lignina)
1465	$C-H$	Flexão assimétrica em CH3 (lignina)
1426	$-CH_2-$	Vibrações esqueléticas aromáticas (lignina) e deformação C-H no plano (celulose)
1373	$C-H$	Flexão de C-H, ligações de complexos de carboidratos de lignina
1335-1330	$O-H$	Grupo fenol (celulose)
1316	$-CH_2-$	Celulose I de alta cristalinidade

Continuação da Tabela 14: Picos característicos de absorbância na madeira.

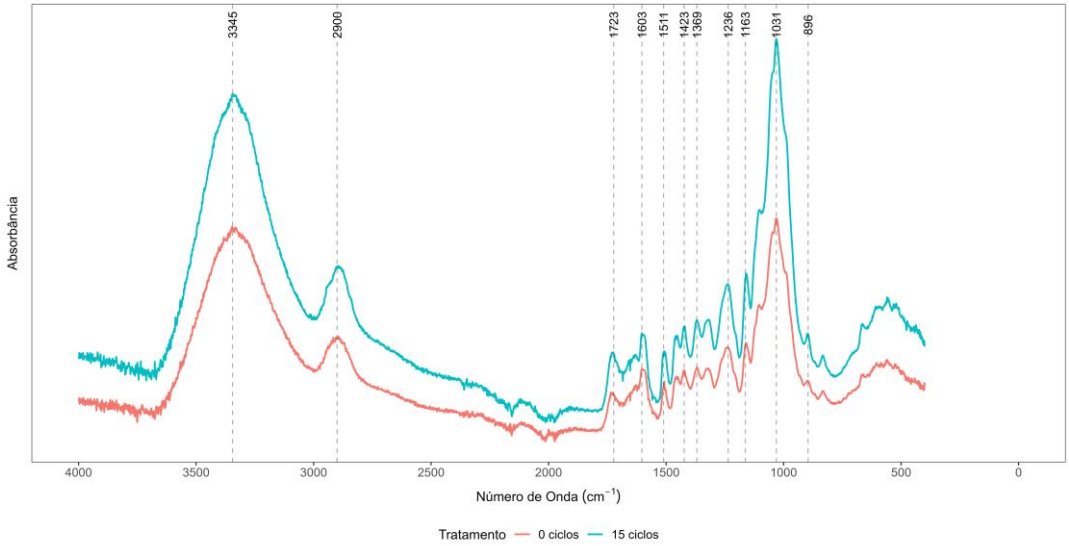
Número de Onda (cm^{-1})	Grupo Funcional	Atribuição
1267-1270	CO	Lignina e hemicelulose, ésteres
1158	$C-O-C$	Carboidrato
1103	$C-H$	Guaiacil e siringil (lignina)
1030-1050	$C-O$, $C-H$	Álcool primário, guaiacil (lignina)
896		Carbono-C1 em anél de piranose (celulose e hemicelulose)

Fonte: (HUANG, XIANAI *et al.*, 2012) adaptado.

Boa parte dos picos característicos foi identificada graficamente no bambu sem tratamento e após 15 ciclos de molhagem (Figura 37). Em geral, a hornificação não causou mudanças significativas em nenhum grupo funcional do bambu.

Observou-se, em contrapartida, uma maior intensidade nos picos de absorbância 3400 e 1750 cm^{-1} após a aplicação de 10 ciclos de molhagem e secagem em fibras de sisal, curauá e juta. O primeiro (3400 cm^{-1}) é relacionado ao aumento das ligações de hidrogênio, e ao segundo (1750 cm^{-1}) se atribui um aumento da hidrofobicidade da lignina (FERREIRA, S. R. *et al.*, 2015; FERREIRA, SAULO ROCHA *et al.*, 2017).

Figura 37: Espectros obtidos por FT-IR para o bambu.

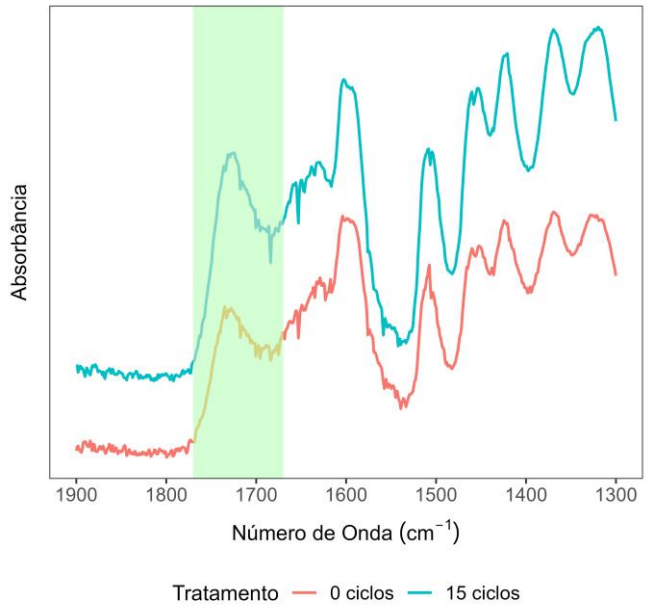


Fonte: O Autor.

Visto que a região entre 1900 e 1300 cm^{-1} apresenta uma grande quantidade de picos relacionados à celulose, lignina e hemicelulose, um gráfico apenas desse trecho foi feito (Figura 38). Novamente não foi possível identificar mudanças significativas entre os grupos funcionais após a aplicação de ciclos de molhagem e secagem. O trecho destacado próximo ao pico 1723 cm^{-1} é relacionado aos grupos

hidroxila presentes no bambu (OH), portanto, um aumento nesse pico sugeriria uma redução dos grupos hidroxila livres e consequente redução da capacidade de absorção de água do material. Tal efeito foi observado após a impregnação do bambu por ácido cítrico (GAUSS *et al.*, 2021a).

Figura 38: Espectros obtidos por FT-IR entre 1900 e 1300 cm^(-1).



Fonte: O Autor.

Para confirmar a não variação dos grupos funcionais do bambu após a aplicação de ciclos de molhagem e secagem, a razão entre determinados picos de interesse, que possuem relação com os componentes do bambu e a capacidade de absorver água (celulose, hemicelulose, lignina, hidroxila), se encontra na Tabela 15.

Tabela 15: Razão entre intensidades de grupos funcionais do bambu.

Tratamento	Razão entre absorbância de diferentes grupos funcionais				
	$I_{1723/3345}$	$I_{1723/2900}$	$I_{1723/1317}$	$I_{1369/1317}$	$I_{896/1317}$
0 Ciclos	0,28	0,54	0,72	1,02	0,88
15 Ciclos	0,29	0,55	0,76	1,00	0,90

Fonte: O Autor.

Graficamente (Figura 37), o pico 3345 cm^{-1} apresentou leve aumento após 15 ciclos, porém, tal aumento não foi confirmado por meio da razão entre os picos I_{1723} e I_{3345}. As razões entre outros picos de interesse apresentaram pouca variação entre bambus sem tratamento e após a hornificação, sendo as razões $I_{1369/1317}$ e $I_{896/1317}$ relacionadas à celulose, hemicelulose e lignina. Conclui-se, portanto, que não houve alteração estrutural desses compostos durante o tratamento.

5. CONCLUSÃO

Os efeitos da aplicação de ciclos de molhagem e secagem no bambu da espécie *Dendrocalamus asper* foram mensurados por meio de ensaios laboratoriais.

Dentro dos parâmetros físicos avaliados, foi observada uma tendência de aumento da absorção de água após seis ciclos de molhagem e secagem e posterior decréscimo da capacidade de absorção até o 10° ciclo, o que foi atribuído a um possível aumento de vazios nos feixes vasculares pela remoção de carboidratos e posterior fechamento dos poros.

O aumento de absorção de água após tratamento também foi observado no item 3.2.3 até 98 horas de imersão. Entretanto, a análise de variação dimensional demonstrou uma crescente estabilidade dimensional após o efeito da hornificação, na qual as amostras submetidas a 15 ciclos de molhagem e secagem apresentaram os resultados mais satisfatórios.

Em relação às propriedades mecânicas, houve uma redução da resistência à tração do bambu (máximo de 20%, aproximadamente) após a aplicação de cinco ciclos e posterior estabilização dessa propriedade. O efeito observado foi contrário aos resultados encontrados para fibras vegetais, nas quais a redução da seção transversal é mais significativa. O aumento do módulo de elasticidade observado na literatura (ensaio de flexão de 4 pontos) após a hornificação não foi confirmado na presente pesquisa, na qual os valores de módulo de elasticidade após tratamento, apesar de apresentarem aumentos de 3,0; 2,6 e 9,6% para 5, 10 e 15 ciclos, foram semelhantes aos do bambu sem tratamento (sem diferença estatística).

O ensaio de densidade por picnometria com amostras de bambu sem moer indicou um aumento da densidade do material após a aplicação de 10 ciclos de molhagem e secagem. Embora a remoção de carboidratos até o 5° ciclo cause o aumento dos espaços vazios nos feixes vasculares, o posterior fechamento dos poros (lúmens) até o 10° ciclo foi significativo. Em amostras de bambu moídas, não foi possível identificar diferenças entre as densidades.

A análise de difratometria por raios-X indicou um aumento do índice de cristalinidade do bambu após quinze ciclos de molhagem e secagem, porém, não foi possível relacionar esse resultado às propriedades mecânicas encontradas após a hornificação. O ensaio de FT-IR permitiu identificar os grupos funcionais presentes no bambu, porém, não houve alteração química relevante após o tratamento.

Não foi possível observar alterações significativas geradas pela hornificação por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura na direção longitudinal (direção das fibras).

Em suma, conclui-se que a aplicação de ciclos de molhagem e secagem no bambu foi capaz de aumentar a estabilidade dimensional do material, embora não tenha reduzido a sua capacidade de absorção de água. Além disso, o tratamento não foi capaz de aumentar a rigidez do bambu e causou uma leve redução da resistência à tração da peça. A análise química não indicou mudanças significativas nos componentes presentes no bambu após tratamento (aumento de grupos funcionais relacionados à celulose, aumento das ligações de hidrogênio, dentre outros).

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir se encontram sugestões para pesquisas futuras:

- Análise microscópica na seção transversal do colmo após tratamento;
- Verificação da remoção dos carboidratos presentes no bambu até o 5° ciclo;
- Aplicar ciclos de secagem e molhagem em fibras de bambu para incorporação em compósitos cimentícios;
- Submeter o colmo do bambu ao processo de envelhecimento em laboratório para comparar a durabilidade do material sem o tratamento de secagem e molhagem e após o efeito de hornificação;
- Submeter bambus tratados com ciclos de molhagem e secagem à ação de fungos;
- Utilização da hornificação em conjunto com outros tratamentos;
- Estudo da viabilidade de aplicação da hornificação em colmos inteiros.

REFERÊNCIAS

ABNT. *Catálogo ABNT*. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>. Acesso em: 4 mar. 2021.

ABNT. *NBR 16828-2 - Estruturas de bambu Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu*. Rio de Janeiro, 2020.

AECWEB. *Estudo Roadmap Tecnológico do Cimento pretende reduzir emissões de CO2*. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/ent/cont/n/estudo-roadmap-tecnologico-do-cimento-pretende-reduzir-emissoes-de-co2_80_19797>. Acesso em: 8 mar. 2021.

AMADA, Shigeyasu *et al.* The Mechanical Structures of Bamboos in Viewpoint of Functionally Gradient and Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, v. 30, n. 7, 1996.

ANGELO, Claudio; RITTL, Carlos. *Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas do Brasil: 1970-2018*. Observatório do Clima, 2019.

ASHAARI, Zaidon; MAMAT, Nazri. Traditional Treatment of Malaysian Bamboos: Resistance Towards White Rot Fungus and Durability in Service. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, v. 3, n. 9, p. 1453–1458, 2000.

AZADEH, Arash. *Heat influence on Physical and Mechanical Properties of Dendrocalamus Giganteus Bamboo*. PUC-Rio, 2018.

AZADEH, Arash; GHAVAMI, Khosrow. The influence of heat on shrinkage and water absorption of Dendrocalamus giganteus bamboo as a functionally graded material. *Construction and Building Materials*, v. 186, p. 145–154, 2018.

AZEVEDO, Rogério Cabral; ENSSLIN, Leonardo. *Metodologia da pesquisa para engenharias*. Belo Horizonte: PPGEC/CEFET-MG, 2020.

AZZINI, Anísio *et al.* Obtenção de amido a partir do colmo de bambu. *Bragantia*, v. 40, n. 1, p. 211–216, 1981.

BALLESTEROS, Julian Eduardo Mejia *et al.* Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 100, p. 83–90, 2015.

BALLESTEROS, Julian Eduardo Mejia *et al.* Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications. *Cellulose*, v. 24, n. 5, p. 2275–2286, 2017.

BALLESTEROS, Julian Eduardo Mejia *et al.* Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials*, v. 205, p. 52–60, 2019.

BARROS, Ana Cristina *et al. Uma nova economia para uma nova era: elementos para a construção de uma economia mais eficiente e resiliente para o Brasil*. 2020.

BERALDO, Antonio Ludovico. Bamboo housing – evaluation of the component's decay after 17 years of exposure. *6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference*, 2016.

BETZ, Marcelo Fonseca. *Desenvolvimento de uma Ponte Dobrável de Bambu de Rápida Montagem para Situações Emergenciais*. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, 2018.

BRASIL. *Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília, 2017.

BRASIL. *Lei nº12.484, de 8 de setembro de 2011. Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu*. Brasília, 2011.

BRASIL. *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília, 2015.

CERBAMBU. *CERBAMBU RAVENA - Centro de Referência do Bambu e das Tecnologias Sociais*. Disponível em: <https://www.cerbambu.org.br/quem-somos>. Acesso em: 20 ago. 2021.

CHUNG, K. F.; YU, W. K. Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. *Engineering Structures*, v. 24, n. 4, p. 429–442, 2002.

CID, Siliani Coradini Gasparini *et al.* Influence of hornification on the physical and flexural properties of Moso bamboo. *Construction and Building Materials*, v. 248, 2020.

CLARAMUNT, Josep *et al.* The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 5, p. 586–595, 2011.

CLARAMUNT, Josep; ARDANUY, Monica; GARCÍA-HORTAL, José Antonio. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, v. 79, n. 1, p. 200–205, 2010.

DIXON, P. G.; GIBSON, L. J. The structure and mechanics of Moso bamboo material. *Journal of the Royal Society Interface*, v. 11, n. 99, 2014.

DRUMOND, Patrícia Maria; WIEDMAN, Guilherme. *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*.

Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2017.

FERNANDES DINIZ, J. M. B.; GIL, M. H.; CASTRO, J. A .A. M. Hornification - Its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Science and Technology*, v. 37, n. 6, p. 489–494, 2004.

FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber-matrix bond in cement based systems. *Construction and Building Materials*, v. 101, n. 1, p. 730–740, 2015.

FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristcs and bending behavior of cement based composites. *Key Engineering Materials*, v. 600, p. 421–432, 2014.

FERREIRA, S. R. *et al.* Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. *Revista Materia*, v. 17, n. 2, p. 1024–1034, 2012.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al.* 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*, v. 139, p. 551–561, 2017.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al.* Effect of natural fiber hornification on the fiber matrix interface in cement based composite systems. *Key Engineering Materials*, v. 668, p. 118–125, 2016.

GAUSS, Christian; KADIVAR, Marzieh; PEREIRA, Ricardo G.F.; *et al.* Assessment of dendrocalamus asper (Schult and schult f.) (Poaceae) bamboo treated with tannin-boron preservatives. *Construction and Building Materials*, v. 282, p. 122723, 2021.

GAUSS, Christian; KADIVAR, Marzieh; HARRIES, Kent A.; *et al.* Chemical modification of Dendrocalamus asper bamboo with citric acid and boron compounds: Effects on the physical-chemical, mechanical and thermal properties. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123871, 2021.

GAUSS, Christian *et al.* Quality assessment and mechanical characterization of preservative-treated Moso bamboo (P. edulis). *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 78, n. 2, p. 257–270, 2020.

GHAVAMI, Khosrow; MARINHO, Albanise B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifolia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 1, p. 107–114, 2005.

GHAVAMI, Khosrow; RODRIGUES, Conrado de Souza; PACIORNIK, Sidnei. Bamboo: Fuctionally Graded Composite Material. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and housing)*, v. 4, n. 1, p. 1–10, 2003.

GROSSER, Dietger; LIESE, Walter. On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles. *Wood Science and Technology*, v. 5, n. 4, p. 290–312, 1971.

HAMDAN, H. *et al.* Equilibrium moisture content and volumetric changes of Gigantochloa scortechinii. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 19, n. 1, p. 18–24, 2007.

HUANG, Xianai *et al.* Study of the degradation behavior of heat-treated jack pine (Pinus banksiana) under artificial sunlight irradiation. *Polymer Degradation and Stability*, v. 97, n. 7, p. 1197–1214, 2012.

HUANG, Xiao-dong; HSE, Chung-Yun; SHUPE, Todd F. Study of moso bamboo's permeability and mechanical properties. *Emerging Materials Research*, v. 4, n. 1, p. 130–138, 2015.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Cambridge University Press, 2021.

ISHIKAWA, Atsuko; OKANO, Takeshi; SUGIYAMA, Junji. Fine structure and tensile properties of ramie fibres in the crystalline form of cellulose I, II, IIII and IVI. *Polymer*, v. 38, n. 2, p. 463–468, 1997.

JANSSEN, J. J. A. Bamboo Preservation. *Building with Bamboo: A handbook*. Practical Action Publishing, 1995.

JANSSEN, J. J. A. *Designing and Building with Bamboo*. Eindhoven: International Network for Bamboo and Rattan, 2000.

JIANG, Zehui *et al.* Sensitivity of several selected mechanical properties of moso bamboo to moisture content change under the fibre saturation point. *BioResources*, v. 7, p. 5048–5058, 2012.

KADIVAR, Marzieh *et al.* Densification of bamboo: State of the art. *Materials*, v. 13, n. 19, p. 1–25, 2020.

KAUR, Perminder Jit; SATYA, Santosh; *et al.* Eco-Friendly Preservation of Bamboo Species: Traditional to Modern Techniques. *BioResources*, v. 11, n. 4, p. 10604–10624, 2016.

KAUR, Perminder Jit; PANT, K. K.; *et al.* Field investigations of selectively treated bamboo species. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 74, n. 5, p. 771–773, 2016.

KAUR, Perminder Jit *et al.* Scientific Investigation of Water Leaching Method of Bamboo Preservation. *The Journal of the American bamboo Society*, v. 26, n. 1, p. 27–32, 2013.

KRAUSE, João Queiroz *et al.* On the influence of Dendrocalamus giganteus bamboo microstructure on its mechanical behavior. *Construction and Building Materials*, v. 127, p. 199–209, 2016.

KUEHL, Y.; LI, Y.; HENLEY, G. Impacts of selective harvest on the carbon sequestration potential

in Moso bamboo (Phyllostachys pubescens) plantations. *Forests Trees and Livelihoods*, v. 22, n. 1, p. 1–18, 2013.

LAKKAD, S. C.; PATEL, J. M. Mechanical properties of bamboo, a natural composite. *Fibre Science and Technology*, v. 14, n. 4, p. 319–322, 1981.

LAROQUE, Paul. *Design of a low-cost bamboo footbridge*. 2007. Dissertação de Mestrado. Massachusetts Institute of Technology, 2007.

LIESE, W. Anatomy and Properties of Bamboo. Hangzhou, 1985.

LIESE, W. Research on bamboo. *Wood Science and Technology*, v. 21, n. 3, p. 189–209, 1987.

LIESE, W. *The anatomy of bamboo culms*. INBAR, 1998.

LIESE, Walter; TANG, Thi Kim Hong. Preservation and Drying of Bamboo. In: LIESE, WALTER; KÖHL, MICHAEL (Org.). *Bamboo*, 2015a. p. 257–297.

LIESE, Walter; TANG, Thi Kim Hong. Properties of the Bamboo Culm. In: LIESE, WALTER; KÖHL, MICHAEL (Org.). *Bamboo*, 2015b. p. 227–256.

LIMA, P. R. L. *et al.* Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 5, p. 812–825, 2014.

LIN, Ning; BRUZZESE, Cécile; DUFRESNE, Alain. TEMPO-oxidized nanocellulose participating as crosslinking aid for alginate-based sponges. *ACS Applied Materials and Interfaces*, v. 4, n. 9, p. 4948–4959, 2012.

LOBOVIKOV, Maxim *et al.* World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. Rome, 2007.

MAGEL, E *et al.* Soluble carbohydrates and acid invertases involved in the rapid growth of developing culms in Sasa palmata (Bean) Camus. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society*, v. 19, n. 1, p. 23–29, 2005.

MARASIGAN, O. S.; RAZAL, R. A.; ALIPON, M. A. Effect of thermal treatment on the wettability of giant bamboo (dendrocalamus asper) and Kawayan tinik (Bambusa Blumeana) in the Philippines. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 32, n. 4, p. 369–378, 2020.

MENDES, Sophia *et al.* Influence of Water Amount and Immersion Time on the Sisal Fibers Hornification Process. *JOURNAL OF NATURAL FIBERS*, 2019.

MINOR, James L. Hornification -Its origin and meaning. *Progrress in Paper Recycling*, v. 3, n. 2, p. 93–95, 1994.

MOREIRA, L. E.; SEIXAS, M; GHAVAMI, K. Lightness and efficiency of structural bars: comparison of bamboo, steel and wood bars under compression. *18th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies*, 2019.

MORESCHI, João Carlos. Preservativos de Madeira. *Biodegradação e Preservação da Madeira*. V. II, 2013.

MORRELL, Jeffrey J. Protection of wood-based materials. *Handbook of Environmental Degradation Of Materials*. Third Edition, 2018. p. 343–368.

NURDIAH, Esti Asih. The Potential of Bamboo as Building Material in Organic Shaped Buildings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 216, p. 30–38, 2016.

OKAHISA, Yoko; YOSHIMURA, Tsuyoshi; IMAMURA, Yuji. Seasonal and height-dependent fluctuation of starch and free glucose contents in moso bamboo (Phyllostachys pubescens) and its relation to attack by termites and decay fungi. *Journal of Wood Science*, v. 52, n. 5, p. 445–451, 2006.

PANDOLI, Omar Ginoble *et al.* A regioselective coating onto microarray channels of bamboo with chitosan-based silver nanoparticles. *Journal of Coatings Technology and Research*, v. 16, n. 4, p. 999–1011, 2019.

PARASKEVA, T. S.; GRIGOROPOULOS, G.; DIMITRAKOPOULOS, E. G. Design and experimental verification of easily constructible bamboo footbridges for rural areas. *Engineering Structures*, v. 143, p. 540–548, 2017.

RAMAGE, Michael H. *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 333–359, 2017.

RAO, Ramanuja. Bamboos and their Role in Ecosystem Rehabilitation. Beijing, China, 2004. p. 1011–1017.

SALCIDO, Juan C.; RAHEEM, Adeeba Abdul; RAVI, Srinivasan. Comparison of embodied energy and environmental impact of alternative materials used in reticulated dome construction. *Building and Environment*, v. 96, p. 22–34, 2016.

SÁNCHEZ, Martha L.; MORALES, Luz Y. Influence of moisture content on the mechanical properties of Guadua Culms. *Inge Cuc*, v. 15, n. 1, p. 99–108, 2019.

SANTOS, Eleonora Cruz *et al. Deficit Habitacional no Brasil: 2016-2019*. Belo Horizonte, 2021.

SANTOS, R. J.; LIMA, P. R. L. Effect of treatment of sisal fiber on morphology, mechanical properties and fiber-cement bond strength. *Key Engineering Materials*, v. 634, p. 410–420, 2015.

SCHNEIDER, Caroline A.; RASBAND, Wayne S.; ELICEIRI, Kevin W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012.

SEEG. *Processos Industriais*, 2020.

SEGAL, L. *et al.* An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal*, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.

SEIXAS, Mario *et al.* Active bending and tensile pantographic bamboo hybrid amphitheater structure. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, v. 58, n. 3, p. 239–252, 2017.

SHARMA, Bhavna *et al.* Engineered bamboo: State of the art. *Construction Materials*, v. 168, n. 2, p. 57–67, 2014.

SILVIANA; KARETH, S.; PETERMANN, M. Durability Assessment and Physical Properties Investigation of Modified Petung Bamboo (Dendrocalamus asper) as Resulted on Acetylation, Assisted by Supercritical CO2. *Procedia Chemistry*, v. 9, p. 273–283, 2014.

SKAAR, Christen. *Wood-Water Relations*. Springer Science & Business Media, 2012.

SOMPOH, Bounsong *et al.* Physical and Mechanical Properties of Some Thai Bamboos for House Construction. *Forest Research and Development Bureau*, 2013.

SONTI, V. R. A workable solution for preserving round bamboo with ascu (cca type salts). *Proceedings of the International Bamboo Workshop*, p. 207–208, 1988.

SRIVARO, Suthon; JAKRANOD, Woravit. Comparison of physical and mechanical properties of Dendrocalamus asper Backer specimens with and without nodes. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 74, n. 6, p. 893–899, 2016.

STONE, J. E.; SCALLAN, A. M. Influence of drying on the pore structures of the cell wall. *Consolidation of the paper web: Transactions of the symposium held at Cambridge*, v. 1, p. 145–74, 1965.

SULTHONI, A. A simple and cheap method of bamboo preservation. *Proceedings of the International Bamboo Workshop*, p. 209–211, 1988.

SULTHONI, A. Traditional Preservation of Bamboo in Java, Indonesia. *Proceedings of the International Bamboo Workshop*, p. 349–358, 1985.

TANG, T. K. H.; SCHMIDT, O.; LIESE, W. Protection of bamboo against mould using environment-friendly chemicals. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 24, n. 2, p. 285–290, 2012.

VAN DER LUGT, P.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. A. J. F.; JANSSEN, J. J. A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 9, p. 648–656, 2006.

WATANABE, Hiroki; YANASE, Yoshiyuki; FUJII, Yoshihisa. Evaluation of larval growth process and bamboo consumption of the bamboo powder-post beetle Dinoderus minutus using X-ray computed tomography. *Journal of Wood Science*, v. 61, n. 2, p. 171–177, 2015.

WBCSD; IEA. *Technology Roadmap for Cement*, 2018.

XIAO, Yan; INOUE, Masafumi; PAUDEL, Shyam. Modern Bamboo Structures. Changsha, China, 2008.

XU, Qingfeng *et al.* Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water. *Engineering Structures*, v. 81, p. 230–239, 2014.

YE, Fei; FU, Wenxi. Physical and Mechanical Characterization of Fresh Bamboo for Infrastructure Projects. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 2, 2018.

YU, Hai xia *et al.* Surface chemical changes analysis of UV-light irradiated Moso bamboo (Phyllostachys pubescens Mazel). *Royal Society Open Science*, v. 5, n. 6, 2018.