



Siliani Coradini Gasparini Cid

**Influência da hornificação sobre as propriedades
físicas e de flexão do bambu Moso**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Co-orientador: Prof. Flávio de Andrade Silva

Co-orientador: Dr. João Queiroz Krause

Rio de Janeiro
Abril de 2019



Siliani Coradini Gasparini Cid

**Influência da hornificação sobre as propriedades
físicas e de flexão do bambu Moso**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr. João Queiroz Krause

Co-orientador

Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras

Prof. José Roberto Moraes d’Almeida

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. Otávio da Fonseca Martins Gomes

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM

Rio de Janeiro, 26 de abril de 2019.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Siliani Coradini Gasparini Cid

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo – UFES – em 2010. Principais áreas de interesse: Materiais compósitos, bambu, fibras naturais, hornificação.

Ficha Catalográfica

Cid, Siliani Coradini Gasparini

Influência da hornificação sobre as propriedades físicas e de flexão do bambu Moso/ Siliani Coradini Gasparini Cid; Orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso; coorientador: Flávio de Andrade Silva/ coorientador: João Queiroz Krause – 2019.

98 f.: il. color.; 29,7 cm.

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil e Ambiental – Teses. 2. Bambu Moso. 3. *Phyllostachys pubescens*. 4. Hornificação. 5. Comportamento à flexão. I. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II. Silva, Flávio de Andrade. III. Krause, João Queiroz. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. V. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

É chegado o momento de expressar toda minha gratidão àqueles que me ajudaram imensamente para a concretização deste trabalho, e posso dizer que tive muita sorte, pois grandes anjos apareceram em vários momentos da minha vida nesses dois anos de mestrado. Inclusive, primeiramente não posso deixar de agradecer à Deus, por colocar todos esses anjos em meu caminho e por abrir portas em minha vida que jamais imaginaria alcançar.

Em especial preciso muito agradecer ao meu marido, José Alexandre, meu maior incentivador, que sempre acreditou em meu potencial, muito mais do que eu, inclusive. Além disso, estive sempre ao meu lado me passando paz e tranquilidade, e em meus momentos de angústia e alto nível de estresse sempre teve o melhor remédio, seu abraço carinhoso e aconchegante.

Aos meus amigos do mestrado, em especial aos que tive o prazer de conviver diariamente no LEM DEC, que me proporcionaram deliciosos almoços, acompanhados de muita prosa e risadas, e claro, sempre com aquele café especial ao final.

Agradeço ao meu orientador, professor Daniel, que me apresentou o mundo da pesquisa e dos recursos renováveis, em especial a minha atual paixão, o bambu. Além de grande orientador é um grande exemplo como pessoa, sempre atencioso, paciente e disposto a me ajudar, mesmo em seus momentos mais corridos parava para me ouvir e aconselhar. Agradeço também ao meu coorientador Flávio, que sempre estive à disposição, me ajudando com o todo o seu imenso conhecimento e que sem querer me fez despertar o interesse pelo mundo da microestrutura, o qual tenho grande apreço. Ao meu coorientador João, por toda a paciência e disponibilidade, me ajudando em tudo o que precisei, desde a concepção da ideia inicial do trabalho, até no empréstimo de sua estufa, que foi um equipamento crucial para andamento do meu trabalho, mostrando-se sempre uma pessoa muito generosa.

Não posso deixar de agradecer à toda equipe de funcionários do LEM DEC, por toda experiência e ajuda em meus ensaios, em especial ao Euclides, José Nilson, Brunão, Rogério, Marques.

Agradeço também à equipe de marcenaria da PUC-Rio, por toda a ajuda no preparo e corte dos corpos de prova e ao laboratório de química, pela disponibilização de água destilada.

Agradeço imensamente à Karen, do Departamento de Engenharia Química e Materiais da PUC-Rio, por toda a paciência, disponibilidade e auxílio prestado. Pessoa de coração imenso, sempre disposta a compartilhar todo o seu conhecimento acerca do ImageJ, tornando-se uma grande amiga.

À toda equipe do CETEM, em especial ao professor Otávio por toda a disponibilidade e ajuda na parte de microscopia e análise de imagens. Ao grande mestre da preparação de amostras, Josimar, por todos os ensinamentos.

À PUC-Rio por todo apoio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Coradini Gasparini Cid; Siliani; Taissum Cardoso, Daniel Carlos (orientador); de Andrade Silva, Flávio (coorientador); Queiroz Krause, João (coorientador). **Influência da hornificação sobre as propriedades físicas e de flexão do bambu Moso.** Rio de Janeiro, 2019. 98p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O bambu é um recurso natural, típico de regiões tropicais e subtropicais, cujas fibras vêm atraindo interesse para reforço de materiais compósitos, pelas suas excelentes propriedades mecânicas. Entretanto, como toda fibra vegetal, as fibras de bambu apresentam alto grau de higroscopicidade, inchando quando da presença de água, limitando seu uso devido à perda de durabilidade. Dessa forma, este trabalho visa estudar melhorias nas propriedades de flexão do bambu através do processo de hornificação por ciclos de molhagem e secagem, tratamento muito utilizado em polpas de madeira ou papel, que leva a reduções na capacidade de absorção e retenção de água das fibras, reduzindo seus poros e tornando sua estrutura mais enrijecida. Para isso foram investigados os efeitos de 3, 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem sobre as propriedades físicas e comportamento mecânico (flexão e módulo de elasticidade) do bambu da espécie Moso (*Phyllostachys pubescens*). Com relação às propriedades físicas foram avaliadas as variações na capacidade de absorção e retenção de água do bambu ao longo dos ciclos, incluindo avaliação das variações dimensionais dos feixes vasculares ao final dos ciclos, realizada por meio de análise e processamento de imagens obtidas por microscópio estereoscópico. Ademais, o comportamento à flexão foi estudado por meio de ensaios de flexão a quatro pontos, avaliando possíveis melhorias na resistência à flexão, deflexão e módulo de elasticidade do bambu após os ciclos de molhagem e secagem, incluindo análise da influência do cisalhamento na flexão. As análises físicas demonstraram que com os ciclos ocorreu redução na capacidade de retenção de água do bambu, além de reduções na área superficial de seus feixes de fibras. Na flexão houve ganho de rigidez após os ciclos, chegando a aumentar em 70% o módulo de elasticidade.

Palavras-chave

Bambu Moso; *Phyllostachys pubescens*; hornificação; comportamento à flexão.

Abstract

Coradini Gasparini Cid; Siliani; Taissum Cardoso, Daniel Carlos (advisor); de Andrade Silva, Flávio (co-advisor); Queiroz Krause, João (co-advisor). **Influence of hornification on the physical and flexural properties of Moso bamboo.** Rio de Janeiro, 2019. 98p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Bamboo is a natural resource, typical of tropical and subtropical regions, whose fibers are attracting interest to reinforce composite materials, due to its excellent mechanical properties. However, like all plant fibers, bamboo fibers present a high degree of hygroscopicity, swelling when water is present, limiting its use due to loss of durability. Thus, this work aims to study improvements in the flexural properties of bamboo through the process of hornification by wetting and drying cycles, a treatment that is widely used in pulps of wood or paper, leading to reductions in the water absorption and retention capacity of the fibers, reducing its pores and making its structure stiffer. The effects of 3, 5 and 10 wetting and drying cycles on the physical properties and mechanical behavior (flexure and modulus of elasticity) of the Moso bamboo species (*Phyllostachys pubescens*) were investigated. Regarding the physical properties, the variations in the bamboo water absorption and retention capacity were evaluated along the cycles, including evaluation of the dimensional variations of the vascular bundles at the end of the cycles, performed by means of analysis and processing of images obtained by a stereoscopic microscope. In addition, the flexural behavior was studied by means of four-point flexural tests, evaluating possible improvements in flexural strength, deflection and modulus of elasticity of the bamboo after the wetting and drying cycles, including analysis of the influence of shear on flexion. The physical analyzes showed that with the cycles there was a reduction in the water retention capacity of bamboo, as well as reductions in the surface area of its fiber bundles. In flexion, there was a gain of stiffness after the cycles, increasing the modulus of elasticity by 70%.

Keywords

Moso bamboo; *Phyllostachys pubescens*; hornification; flexural behavior.

Sumário

1 Introdução	17
1.1. Considerações iniciais e motivação	17
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Geral	18
1.2.2. Específicos	18
1.3. Estruturação da Dissertação	19
2 Revisão Bibliográfica	20
2.1. Bambu no Brasil	20
2.2. Macro e microestrutura do bambu	21
2.3. Estrutura da parede celular das fibras do bambu	25
2.4. Composição química do bambu Moso	28
2.5. Propriedades mecânicas do bambu Moso	29
2.6. Influência do teor de umidade, da idade e da temperatura nas propriedades mecânicas do bambu Moso	32
2.7. Hornificação	34
3 Programa experimental	39
3.1. Materiais utilizados e métodos de preparação dos corpos de prova	39
3.1.1. Bambu	39
3.1.2. Cortes nos colmos de bambu para obtenção de hastes	41
3.1.3. Preparação dos corpos de prova para ciclos de molhagem-secagem	43
3.1.4. Preparação das amostras para microscopia	44
3.1.5. Preparação dos corpos de prova para ensaios de flexão	45
3.2. Procedimentos dos ensaios	47

3.2.1. Ensaio de determinação do teor de umidade inicial dos colmos	47
3.2.2. Ensaio de sorção e dessorção	48
3.2.3. Ensaio de determinação do teor de umidade antes dos ciclos de molhagem-secagem e ensaios de flexão	51
3.2.4. Ensaaios de flexão	52
3.2.5. Ensaaios para estudo da influência do cisalhamento na flexão a 4 pontos	55
3.3. Processamento e análise de imagens	57
4 Resultados e discussão	61
4.1. Efeito da hornificação sobre as propriedades físicas do bambu	61
4.1.1. Sorção-Dessorção	61
4.1.2. Imagem da seção transversal	64
4.2. Efeito da hornificação sobre as propriedades de flexão do bambu	70
4.2.1. Modos de falha na flexão	78
4.3. Influência do cisalhamento na flexão	82
5 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros	84
6 Referências	87
Apêndice A - Macros para automação dos procedimentos de processamento e análise de imagens	92
Apêndice B - Teores de umidade após ciclos de molhagem e secagem	94
Apêndice C - Propriedades físicas dos corpos de prova antes dos ensaios	95
Apêndice D - Resumo de média e desvio padrão das resistências e deflexões últimas obtidas no ensaio de flexão a 4 pontos	96
Apêndice E - Curvas momento versus curvatura obtidas no ensaio de flexão a 4 pontos	Erro! Indicador não definido.
Apêndice F - Resultados dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão	98

Lista de Figuras

Figura 1 - Anatomia do colmo do bambu.....	22
Figura 2 – Imagem da seção transversal do entrenó do colmo do bambu.....	22
Figura 3 – Detalhe de um feixe vascular: (a) partes constituintes de um feixe vascular: 1- fibra padrão, 2- células do parênquima, 3- revestimento esclerenquimatoso, 4- floema, 5-vasos de metaxilema, 6- elementos menores de metaxilema, 7- espaço intercelular; (b) diferença dos feixes vasculares conforme a espécie de bambu: I. <i>Phyllostachys edulis</i> , II. <i>Cephalostachyum pergracile</i> , III <i>Oxytonanthra albociliata</i> , IV: <i>Thyrsostachys oliveri</i>	23
Figura 4 – Distribuição dos feixes vasculares com relação a posição radial de um bambu da espécie Moso.....	24
Figura 5 – Detalhes das fibras do bambu no colmo: (a) fibras intercaladas longitudinalmente, (b) seção transversal de uma única fibra mostrando a estrutura polilamelar da parede celular.....	26
Figura 6 - Diagrama esquemático da estrutura da fibra de bambu: (A) seção transversal do entrenó do colmo do bambu mostrando um feixe vascular; (B) seção transversal do feixe de fibras; (C) modelo da estrutura polilamelar da parede celular da fibra; (D) nano-fibrilas unidas com hemicelulose e lignina.	27
Figura 7 - Micrografias da seção transversal da fibra de sisal, mostrando detalhes das fibrocélulas, antes (a-b) e após hornificação (c-d).	36
Figura 8 - Nomenclatura adotada para diferenciação dos colmos e seus entrenós.	39
Figura 9 – Armazenamento dos colmos de bambu Moso.	40
Figura 10 – Cortes para separação das regiões dos entrenós do bambu: (a) colmo de bambu sofrendo corte transversal em serra circular esquadrejadeira; (b) regiões dos entrenós separadas após corte transversal.	41
Figura 11 – Detalhes das hastes extraídas da região do entrenó: (a) representação direções de extração das hastes com relação às direções dos entrenós; (b) separação	

das hastes após corte, para mapeamento conforme posição do entrenó e do colmo.	42
Figura 12 – Serra de fita utilizada nos cortes transversais das hastes.	43
Figura 13 – Representação das três amostras obtidas por cortes transversais realizados na haste de aproximadamente 305 mm de comprimento (dimensões em mm).....	43
Figura 14 – Preparação das amostras para microscopia: (a) amostras de bambu impregnadas com resina epóxi; (b) politriz automática, marca Struers.	45
Figura 15 – Ilustração da preparação para ensaios de flexão: (a) corpos de prova enumerados e com marcações para identificar o meio do vão, os apoios e os pontos de aplicação de carga; (b) dispositivo utilizado no ensaio de flexão para aplicação de carga em dois pontos.....	46
Figura 16 – Instrumentos utilizados no ensaio: (a) Balança eletrônica com precisão de 0,01g; (b) Estufa digital de esterilização e secagem.	47
Figura 17 – Balança digital de precisão de 0,001 g.....	49
Figura 18 – Imersão dos espécimes em água destilada durante ensaio de sorção de água.....	49
Figura 19 – Estufa de esterilização analógica utilizada em ensaio de dessorção..	50
Figura 20 – Curvas de sorção-dessorção das amostras de bambu Moso.....	50
Figura 21 – Orientação dos espécimes para ensaio de flexão em 4 pontos.....	53
Figura 22 – <i>Setup</i> de ensaio de flexão.	54
Figura 23 – <i>Setup</i> de ensaio de flexão sobre pórtico metálico.	56
Figura 24 – Resultados da imagem após procedimentos de processamento: (a) imagem colorida da seção transversal do bambu e fundo preto aplicado; (b) imagem em tons de cinza.	58
Figura 25 – Resultados da imagem após procedimentos de processamento: (a) imagem após segmentação de Phansalkar; (b) imagem com segmentação da matriz do bambu após limpeza de ruídos.....	58

Figura 26 – Imagem com feixes vasculares segmentados.....	59
Figura 27 – Procedimentos de divisão das imagens em faixas e extração de atributos por faixa: (a) imagem com segmentação dos feixes vasculares do bambu, dividida em 5 faixas igualmente distribuídas na largura; (b) tabela com extração de informações de área de feixes vasculares por faixa.....	60
Figura 28 – Curvas dos teores de umidade médios versus ciclos de molhagem e secagem: (a) amostras que sofreram 3 ciclos; (b) amostras que sofreram 5 ciclos; (c) amostras que sofreram 10 ciclos.	62
Figura 29 – Porcentagem de água retida versus ciclos: (a) amostras de 3 ciclos; (b) amostras de 5 ciclos; (c) amostras de 10 ciclos.	63
Figura 30 – Análise de imagens de feixes de fibras para amostras de 3 ciclos: (a) imagem da amostra de controle; (a-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra de controle; (a-2) imagem da amostra de controle, pós-processamento, com feixes de fibras numerados; (b) imagem amostra após 3 ciclos; (b-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra após 3 ciclos; (b-2) imagem da amostra após 3 ciclos, pós-processamento, com feixes de fibras numerados.	67
Figura 31 - Análise de imagens de feixes de fibras para amostras de 5 ciclos: (a) imagem da amostra de controle; (a-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra de controle; (a-2) imagem da amostra de controle, pós-processamento, com feixes de fibras numerados; (b) imagem amostra após 5 ciclos; (b-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra após 5 ciclos; (b-2) imagem da amostra após 5 ciclos, pós-processamento, com feixes de fibras numerados.	68
Figura 32 - Análise de imagens de feixes de fibras para amostras de 10 ciclos: (a) imagem da amostra de controle; (a-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra de controle; (a-2) imagem da amostra de controle, pós-processamento, com feixes de fibras enumerados; (b) imagem amostra após 10 ciclos; (b-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra após 10 ciclos; (b-2) imagem da amostra após 10 ciclos, pós-processamento, com feixes de fibras numerados.	69
Figura 33 - Curvas de carga versus deslocamento vertical dos ensaio de flexão a 4 pontos: (a) corpos de prova de controle; (b) corpos de prova após 3 ciclos de	

molhagem-secagem; (c) corpos de prova após 5 ciclos de molhagem-secagem; (d) corpos de prova após 10 ciclos de molhagem-secagem. 72

Figura 34 - Valores médios das deflexões últimas ($\Delta_{\text{últ}}$) versus ciclos de molhagem-secagem: (a) corpos de prova ensaiados com a região interior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão; (b) corpos de prova ensaiados com a região exterior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão. 73

Figura 35 – Valores médios das resistências à flexão última ($\sigma_{f,\text{últ}}$) versus ciclos de molhagem-secagem: (a) corpos de prova ensaiados com a região interior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão; (b) corpos de prova ensaiados com a região exterior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão. 74

Figura 36 – Intervalo linear adotado para determinação do E na flexão: (a) corpos de prova de controle; (b) corpos de prova após 3 ciclos; (c) corpos de prova após 5 ciclos; (d) corpos de prova após 10 ciclos. 76

Figura 37 - Valores médios dos módulos de elasticidade na flexão (E) versus ciclos de molhagem-secagem: (a) corpos de prova ensaiados com a região interior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão; (b) corpos de prova ensaiados com a região exterior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão. .. 77

Figura 38 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova de controle, com a região interior sob tração: (a) modo de ruptura por tração e cisalhamento da região interior; (b) modo de ruptura por tração da região interior. 78

Figura 39 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova ensaiados após 3 ciclos de molhagem-secagem, com a região interior sob tração. 79

Figura 40 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova ensaiados após 5 ciclos de molhagem-secagem, com a região interior sob tração: (a) modo de ruptura por tração e cisalhamento da região interior; (b) modo de ruptura por tração da região interior. 79

Figura 41 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova ensaiados após 10 ciclos de molhagem-secagem, com a região interior sob tração: (a) modo de ruptura por tração e cisalhamento da região interior; (b) modo de ruptura por tração da região interior. 80

Figura 42 – Ruptura dos corpos de prova ensaiados à tração, com a região exterior sob tração, após sofrerem 3 ciclos de molhagem–secagem.....	81
Figura 43 – Presença de deformação permanente devido à plastificação dos corpos de prova: (a) controle; (b) após 3 ciclos; (c) após 5 ciclos; (d) após 10 ciclos.....	81
Figura 44 – Gráficos δ/P_a versus $3aL-4a^2$: (a) amostras de controle; (b) amostras após 3 ciclos; (c) amostras após 5 ciclos; (d) amostras após 10 ciclos.	82
Figura 45 – Macro com procedimentos de processamento das imagens.....	92
Figura 46 – Macro com procedimentos para divisão da imagem em faixas e extração dos atributos.....	93
Figura 47 – Intervalo linear adotado para determinação do MOE de flexão: (a) corpos de prova de controle; (b) corpos de prova após 3 ciclos; (c) corpos de prova após 5 ciclos; (d) corpos de prova após 10 ciclos.	97

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Variação do teor de lignina conforme idade e posição do colmo de bambu Moso.	28
Tabela 2 – Detalhamento dos entrenós dos colmos de bambu Moso.	41
Tabela 3 – Teores de umidade obtidos para os colmos de bambu Moso.	48
Tabela 4 – Teor de umidade dos colmos antes dos ciclos de molhagem-secagem e assim que os colmos foram recebidos.	52
Tabela 5 - Resumo das frações de área de feixes vasculares e matriz, por faixas distribuídas ao longo da seção transversal das amostras, antes e após os ciclos de molhagem e secagem.	65
Tabela 6 – Área dos feixes de fibras medidos nas imagens antes (inicial) e após os 3 ciclos.	67
Tabela 7 - Área dos feixes de fibras medidos nas imagens antes (inicial) e após os 5 ciclos.	68
Tabela 8 - Área dos feixes de fibras medidos nas imagens antes (inicial) e após 10 ciclos.	69
Tabela 9 – Valores médios das propriedades físicas dos corpos de prova antes dos ensaios de flexão.	71
Tabela 10 – Resultados dos módulos de elasticidade na flexão (E).	76
Tabela 11 – Valores dos módulos de elasticidade e cisalhamento obtidos por ensaio de flexão.	83
Tabela 12 – Teores de umidade obtidos ao final de cada ciclo de molhagem e secagem.	94
Tabela 13 - Propriedades físicas dos corpos de prova obtidas antes do ensaio de flexão.	95

Tabela 14 – Valores de média e desvio padrão das resistências ($\sigma_{f.últ}$) e deflexões ($\Delta_{últ}$) últimas obtidas nos ensaios de flexão.....96

Tabela 15 – Resultados dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão a 4 pontos por gráficos momento versus curvatura.98

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo”.

Martin Luther King

1 Introdução

1.1. Considerações iniciais e motivação

O bambu é uma espécie vegetal pertencente à família das *gramíneas*, composto por vários caules ocos e articulados, chamados de colmos [1]. Muito difundido na Ásia, principalmente na Índia, China e Indonésia, que respondem pelas maiores áreas plantadas de bambu. De acordo com o último relatório da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), há cerca de 11,4 milhões de hectares na Índia, seguida pela China com pouco mais de 5,4 milhões de hectares e por último, Indonésia com 2 milhões de hectares [2].

Além de ser uma planta de crescimento rápido, o bambu se adapta a vários climas, sendo predominante nas regiões de clima tropical. Atualmente, vem sendo utilizado como um grande substituto da madeira, que tem se tornado escassa ao longo dos anos. Seus colmos possuem uma estrutura única, bem diferente das madeiras, constituída por fibras longas de celulose, alinhadas e embutidas em uma matriz de lignina, podendo ser visto como um material compósito [3]. Ademais, também é classificado como um material funcionalmente graduado, com uma distribuição variável de fibras, cuja fração volumétrica aumenta do interior em direção à superfície exterior do colmo e longitudinalmente, da base em direção ao topo, onde atinge seu máximo, compensando a menor espessura e diâmetro do colmo nessa região [4,5].

Essa anatomia única do bambu resulta em boas propriedades mecânicas, o que tem despertado o interesse e o aumento do seu uso na construção civil. Entretanto, para sua aplicabilidade na construção civil são necessários estudos para melhor conhecimento de suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e fatores que afetam e modificam essas propriedades.

Dentre esses fatores que afetam as propriedades do bambu pode-se destacar a umidade. O bambu, como todo material vegetal, apresenta natureza hidrofílica, absorvendo bastante umidade [6]. Pesquisadores como Jiang *et al.* [7], Xu *et al.* [8]

e Wang *et al.* [9] observaram em seus estudos que o aumento no teor de umidade levou à piora das propriedades mecânicas do bambu de forma geral.

Nesse aspecto, ainda são encontrados poucos estudos acerca de tratamentos para melhorar as propriedades mecânicas do bambu e para reduzir sua capacidade de absorção de água, pois a maioria das pesquisas são voltadas para a caracterização e investigação das propriedades do bambu conforme sua espécie.

Entretanto, estudos realizados em fibras vegetais para reforço de matrizes frágeis, em particular as cimentícias, buscando aumentar a durabilidade dos compósitos, demonstraram que através de repetidos processos de molhagem e secagem dessas fibras foi possível melhorar tanto as propriedades mecânicas quanto a durabilidade dos compósitos reforçados por essas fibras tratadas [6]. Ademais, esse processo levou à hornificação das fibras, resultando no aumento da rigidez e na redução da capacidade de absorção e retenção de água das fibras [10,11].

Não há relatos de realização de procedimento semelhante acerca do bambu nem de suas fibras, com exceção de um breve estudo realizado por Betz [12], que conseguiu observar melhorias nas propriedades de flexão do bambu após a realização de ciclos de molhagem e secagem. Nesse sentido, essa pesquisa se propõe a investigar a eficácia desse tratamento sobre o bambu.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O objetivo geral desta pesquisa é disseminar o uso do bambu como material na construção civil, buscando melhorias das suas propriedades mecânicas e físicas por meio de um tratamento barato, mais sustentável e de baixo impacto ambiental.

1.2.2. Específicos

Este trabalho pretende avaliar o fenômeno de hornificação, resultante de ciclos de molhagem e secagem, para bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, também conhecido popularmente como Moso, sobre as propriedades físicas e de flexão do bambu. Essa espécie de bambu foi escolhida por ser facilmente encontrada no mercado brasileiro e pelo seu maior uso na construção civil.

Com relação às propriedades físicas, objetiva-se estudar os efeitos do tratamento sobre a capacidade de absorção e retenção de água do bambu, bem como sobre variações dimensionais na sua microestrutura, de forma global, não sendo, porém, escopo deste estudo a investigação do tratamento sobre a estrutura celular da fibras e matriz do bambu e eventuais variações na composição química.

A respeito das propriedades de flexão, serão avaliados os efeitos do tratamento sobre a resistência, deformabilidade e módulo de elasticidade na flexão a quatro pontos. Além disso, serão estudados esses efeitos para duas orientações da seção transversal durante o ensaio de flexão: (i) orientação com a parede interior do colmo posicionada na região tracionada; (ii) orientação com a parede exterior do colmo posicionada na zona tracionada.

Ainda, na flexão, será investigada a influência do cisalhamento no módulo de elasticidade obtido através de medidas de deflexão em ensaios de flexão a quatro pontos.

1.3. Estruturação da Dissertação

A dissertação inicia-se a partir do Capítulo 2, com uma revisão da literatura, onde são abordados temas para entendimento da macro e microestrutura do bambu Moso, suas propriedades físicas e mecânicas, e fatores que influenciam nessas propriedades. Além disso, relata sobre o processo da hornificação, muito utilizado como tratamento para fibras vegetais e os efeitos desse tratamento sobre as fibras.

O Capítulo 3 descreve de maneira geral todo o programa experimental, como os materiais utilizados, modo de preparo das amostras, procedimentos para análise de imagem, além dos procedimentos dos ensaios realizados.

O Capítulo 4 apresenta todos os resultados obtidos pelos ensaios descritos no Capítulo 3, analisando quantitativamente os resultados com relação aos dados de controle.

O Capítulo 5 traz as conclusões finais do presente trabalho, sugestões e recomendações para trabalhos futuros e complementação do mesmo.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura para melhor compreensão dos conceitos que serão abordados ao longo deste trabalho.

Inicia-se com um breve histórico do bambu no Brasil. Em seguida, passa-se para a caracterização anatômica do colmo do bambu a nível macro e microestrutural, incluindo também a caracterização em nível celular das fibras do bambu e composição química.

Posteriormente, traz as principais propriedades mecânicas do bambu Moso, como as propriedades de tração, de compressão e de flexão, além da influência de fatores como teor de umidade, idade e temperatura, sobre essas propriedades.

Por último, aborda o fenômeno da hornificação e seu efeito sobre as propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais e compósitos reforçados por essas fibras.

2.1. Bambu no Brasil

Dentro do grupo de plantas das angiospermas encontra-se a família das gramíneas, a cuja espécie vegetal conhecida como bambu¹, pertence [2].

O bambu tem cerca de 90 gêneros com mais de 1200 espécies e é distribuído principalmente em regiões tropicais e subtropicais, comumente encontrado na Ásia, África e Américas Central e do Sul. Algumas espécies podem crescer também em zonas temperadas da Europa e América do Norte, visto que o bambu é uma planta que se adapta facilmente a diferentes condições climáticas e de solo [2].

Na América do Sul, pode-se destacar o Brasil, com 258 espécies de bambus nativos e 35 gêneros [13]. No Brasil, o papel econômico mais notável do bambu está no seu cultivo em pequena escala comercial, limitado a algumas espécies

¹A palavra bambu é de origem malaia. No Brasil, por volta do século XV, falava-se mambu. Posteriormente, já no século XVI, aparecerem mumbum e bambu. Nesse sentido confira: FILGUEIRAS, T. S.; GONÇALVES, A. P. S. Bambus nativos no Brasil: Oportunidades e desafios para seu conhecimento. In: Seminário Nacional do bambu – Estruturação da Rede de Pesquisa e Desenvolvimento, 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2006, v. 4, p. 33-39.

nativas, como *Guadua angustifolia* e *Guadua amplexifolia* e introduzidas, como *Bambusa vulgaris*, *Bambusa tuldoidea* e *Phyllostachys aurea* [2].

Não existem informações confiáveis sobre a extensão total da floresta de bambu no Brasil, entretanto a região sudeste da Amazônia conta com cerca de 9 milhões de hectares de floresta dominada pelo bambu e no Nordeste do Brasil existe uma área privativa de cerca de 30.000 ha de bambu plantado da espécie *Bambusa vulgaris*, matéria-prima para uma fábrica de papel da região [2].

Atualmente, o interesse pelo bambu, em especial na sua utilização industrial, vem crescendo rapidamente no Brasil [2]. Em 2011, o Governo Federal sancionou a lei 12484/2011, que trata do incentivo ao manejo sustentado e ao cultivo do Bambu, cujo objetivo é proporcionar o desenvolvimento da cultura do bambu no Brasil por meio de ações governamentais e de empreendimentos privados [14].

2.2. Macro e microestrutura do bambu

O bambu é constituído por diversos caules, os quais são chamados de colmos. Do ponto de vista anatômico, o colmo do bambu é dividido em duas partes, conhecidas como entrenós e nós, conforme ilustrado na Figura 1 [1].

Pode-se dizer que o colmo do bambu se assemelha a um cilindro oco com vários nós distribuídos ao longo do seu comprimento, que parecem discos inseridos nesse cilindro [4].

Os nós, além de entrelaçarem todas as partes do colmo [1], impedem sua flambagem, o protegem contra a fissuração axial [4] e são vitais para sua rigidez e estabilidade [15]. Essas características como colmo oco e presença de nós permitem que a planta alcance rigidez e estabilidade com menor quantidade de material [15].

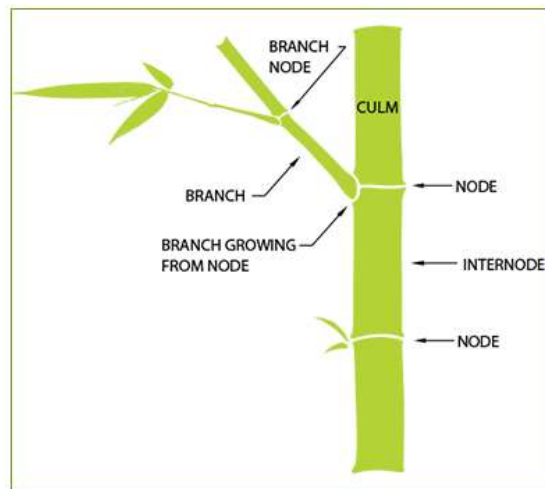


Figura 1 - Anatomia do colmo do bambu [16]. (Observação: as palavras constantes na figura se encontram na língua inglesa sendo seus respectivos significados os seguintes: Culm – colmo; node – nó; internode – entrenó; branch – ramo; branch node – nó de ramificação; branch growing from node – crescimento do ramo a partir do nó.

Analisando a seção transversal do entrenó do colmo do bambu apresentada na Figura 2, é possível identificar pontos mais escuros distribuídos de forma não uniforme ao longo da espessura da parede do colmo, chamados de feixes vasculares (tecido esclerenquimatoso), em contraste com um fundo de coloração mais clara (tecido parenquimatoso) [1,4,5].

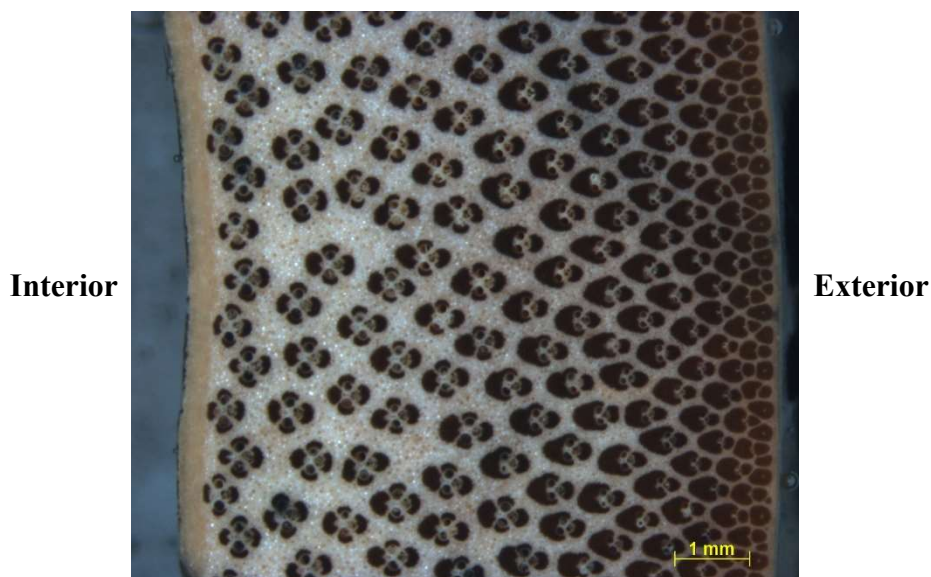


Figura 2 – Imagem da seção transversal do entrenó do colmo do bambu.

Cada feixe vascular é constituído por xilema, floema e fibras [1]. O xilema consiste de um ou dois elementos menores de protoxilema e dois grandes vasos de metaxilema, enquanto o floema possui parede fina, tubos de seiva não lignificados conectados a células companheiras [1]. Os vasos de metaxilema e o floema são

rodeados por um revestimento constituído por células esclerenquimas (Figura 3.a) [1,17]. Esse tecido esclerenquimatoso constitui as fibras e ocorre nos entrenós do colmo como uma cobertura dos feixes vasculares e diferem consideravelmente em tamanho, forma e localização de acordo com a posição do colmo e a espécie de bambu (Figura 3.b) [1].

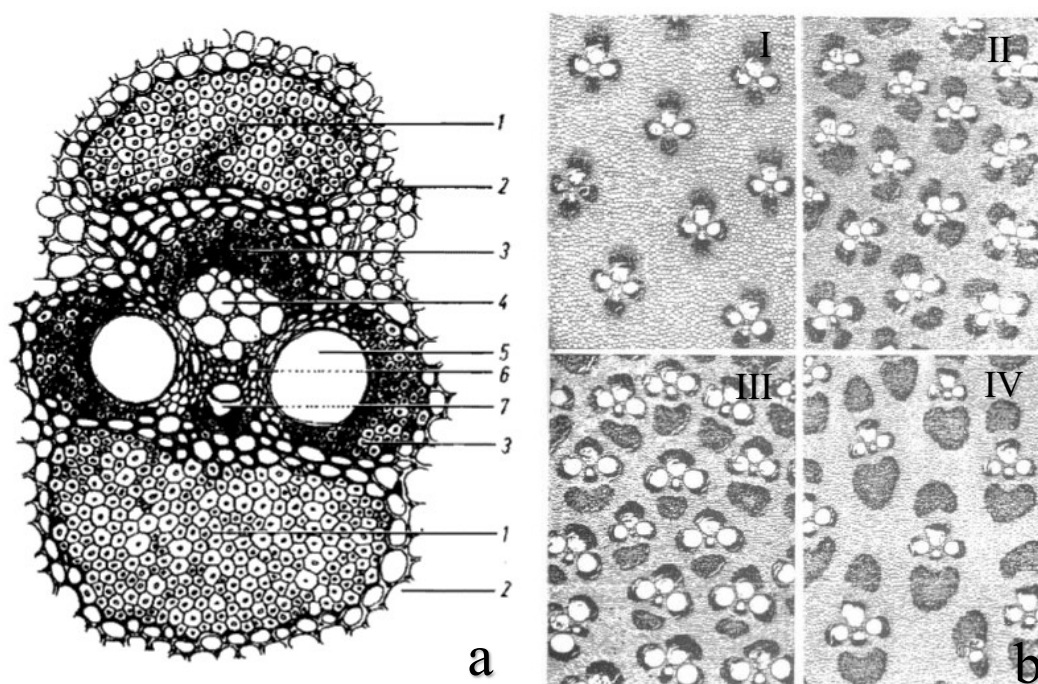


Figura 3 – Detalhe de um feixe vascular: (a) partes constituintes de um feixe vascular: 1- fibra padrão, 2- células do parênquima, 3- revestimento esclerenquimatoso, 4- floema, 5-vasos de metaxilema, 6- elementos menores de metaxilema, 7- espaço intercelular (Adaptado de [18]); (b). diferença dos feixes vasculares conforme a espécie de bambu: I. *Phyllostachys edulis*, II. *Cephalostachyum pergracile*, III *Oxytonanthra albociliata*, IV: *Thyrsostachys oliveri* [1].

Se comparado com madeiras, o bambu tem uma estrutura única e pode ser descrito como um cilindro composto reforçado por fibras e de seção transversal oca [4], onde o tecido parenquimatoso atua como a matriz do composto, ou seja, responsável por receber os carregamentos e transferi-los para as fibras e por dar estabilidade às mesmas, e o tecido esclerenquimatoso desempenha papel semelhante ao das fibras, conferindo resistência ao bambu [3,5,15].

Com relação à posição radial do colmo, não apenas a população dos feixes vasculares (fibras), mas também seu tamanho e formato mudam drasticamente [17]. Os feixes vasculares mais próximos à periferia externa do colmo (casca) são menores e mais numerosos, distribuídos de forma mais densa e, junto à superfície

interna, são maiores e em menor quantidade, estando ainda mais espaçados, conforme ilustrado na Figura 4 [1,3-5,15,17].

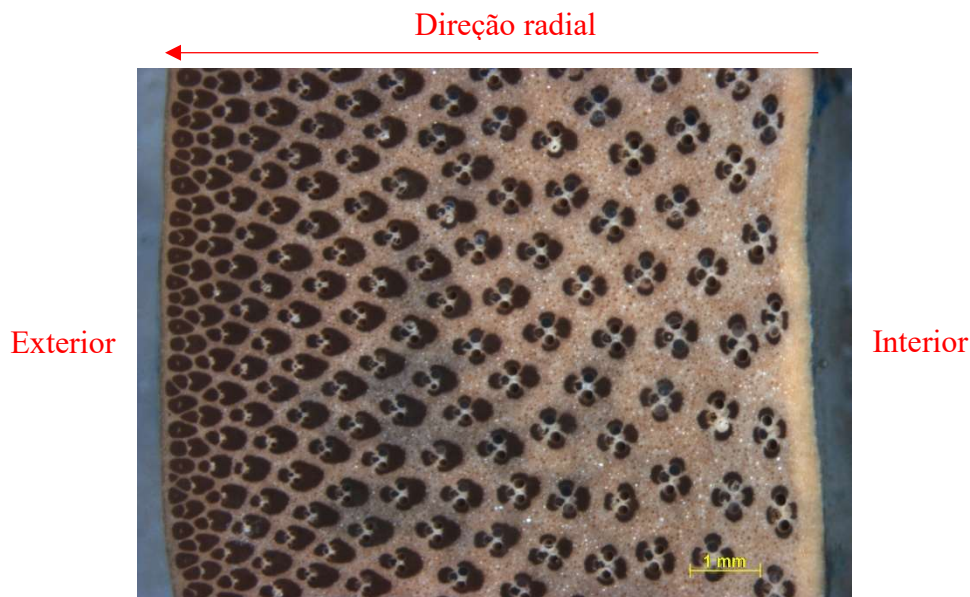


Figura 4 – Distribuição dos feixes vasculares com relação a posição radial de um bambu da espécie Moso.

Ainda com base na Figura 4, que trata de uma imagem da seção transversal da parede (espessura) do colmo de bambu da espécie Moso obtida por microscópio ótico, nota-se claramente que os vasos diminuem do interior para a periferia da parede do colmo e os feixes vasculares mostram uma diferença no formato com a posição radial: na porção interna e central da parede, apresentam quatro regiões de esclerênquima em torno dos vasos, lembrando um formato de trevo, enquanto que na porção externa do colmo apresentam duas regiões de esclerênquima circundantes parecendo com o formato de um crânio [19].

Com relação à altura do colmo, na direção vertical, a fração volumétrica dos feixes vasculares varia da base para o topo do colmo, sendo menor na porção basal e aumentando quase linearmente em direção ao topo, onde atinge valor máximo para a fração volumétrica das fibras [1,5].

Em contrapartida, a fração volumétrica de tecido parenquimatoso diminui da base para o topo do colmo [1]. À medida que se aproxima do topo, o diâmetro e a espessura do colmo diminuem, reduzindo a resistência à flexão, entretanto, a fração volumétrica de fibras é grande nessa região de modo a compensar essa redução da resistência [4].

Amada *et al.* [4,5] classificam a estrutura do bambu como uma estrutura inteligente baseada em um modelo ótimo, sendo um material funcionalmente graduado. Como consequência natural de sua evolução, o bambu desenvolveu uma microestrutura espacialmente variável, com a distribuição de suas fibras conforme a distribuição de tensão gerada por um momento de flexão devido às ações ambientais, principalmente às associadas ao vento.

Nogata e Takahashi [20] mostraram sinais elétricos obtidos de haste de bambu submetida a um momento de flexão, indicando que as células vivas do bambu têm habilidade de sentir informações induzidas por estímulos mecânicos externos. Acredita-se que a planta use esses sinais como um gatilho para organizar seu crescimento adaptativo relacionado às tensões. Portanto, os sinais elétricos e a localização dos feixes vasculares são evidências que sugerem que o bambu tem um sistema de modelagem adaptativa induzida por tensão/deformação, levando à microestrutura engenhosa com sua estrutura graduada.

2.3. Estrutura da parede celular das fibras do bambu

As fibras do bambu estão intercaladas longitudinalmente umas com as outras ao longo do colmo, parecendo com hastes finas e longas, com ambas as extremidades afiladas, conforme ilustrado na Figura 5.b [1,21]. Dentro do colmo do bambu há uma variação considerável do comprimento das fibras. Através da parede do colmo, o comprimento da fibra aumenta frequentemente a partir da periferia, atinge o seu máximo em torno do meio e diminui em direção à parte interna [1].

Essa variação é maior longitudinalmente dentro do entrenó, onde as fibras mais curtas estão sempre próximas aos nós e as fibras mais longas localizadas na parte média do entrenó. Com o aumento da altura do colmo ocorre uma ligeira redução no comprimento da fibra [1].

O comprimento da fibra está fortemente correlacionado com o diâmetro da fibra, espessura da parede celular e o diâmetro do entrenó. O diâmetro da fibra varia entre 11 e 19 μm , o diâmetro do lúmen entre 2-4 μm e a espessura da parede celular entre 4-6 μm [1].

A parede celular da fibra do bambu é caracterizada por uma estrutura polilamelar, sendo a lamela média a camada mais externa, seguida pelas paredes primária e secundária (predominante), e um lúmen no centro (Figura 5.b). Esta

laminação consiste na alternância de camadas espessas e finas com diferentes orientações fibrilares [1,21].

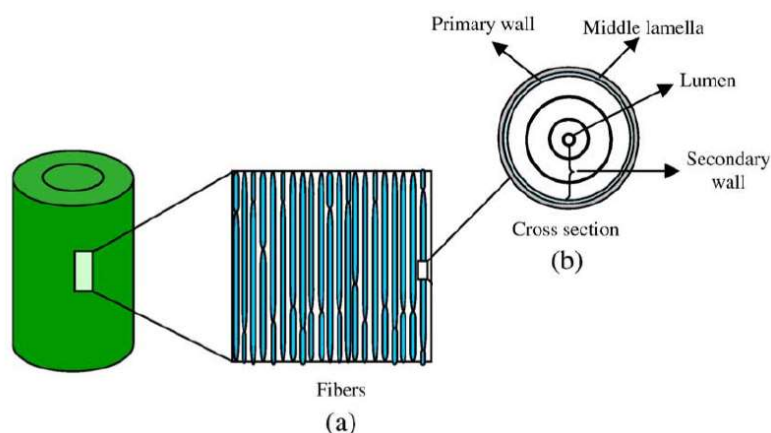


Figura 5 – Detalhes das fibras do bambu no colmo: (a) fibras intercaladas longitudinalmente, (b) seção transversal de uma única fibra mostrando a estrutura polilamelar da parede celular (Adaptado de [21]). Observação: as palavras constantes na figura se encontram na língua inglesa sendo seus respectivos significados os seguintes: primary wall – parede primária; middle lamella – lamela média; lumen – lúmen; secondary wall – parede secundária; cross section – seção transversal; fibers - fibras.

A variabilidade na orientação das fibrilas de celulose com relação aos eixos longitudinais da célula nas diferentes camadas da parede celular é uma característica importante da estrutura da parede das fibras [22]. Nas lamelas finas, as fibrilas de celulose possuem uma orientação quase transversal, enquanto que nas lamelas mais espessas, as fibrilas são orientadas em um pequeno ângulo microfibrilar (Figura 6) [1,22], significando que elas são orientadas basicamente paralelas aos eixos celulares, o que torna a parede celular mais rígida [22]. As lamelas estreitas exibem um conteúdo de lignina maior do que as mais largas. Essa estrutura polilamelar da parede das fibras leva a uma alta resistência à tração [1,22].

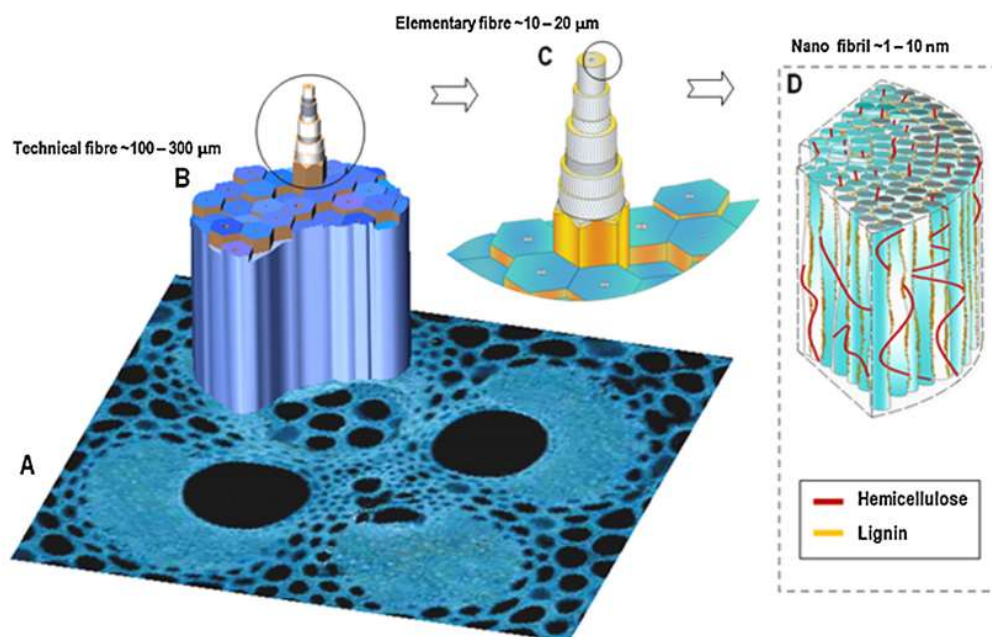


Figura 6 - Diagrama esquemático da estrutura da fibra de bambu: (A) seção transversal do entrenó do colmo do bambu mostrando um feixe vascular; (B) seção transversal do feixe de fibras; (C) modelo da estrutura polilamelar da parede celular da fibra; (D) nano-fibrilas unidas com hemicelulose e lignina [23] (Observação: as palavras constantes na figura se encontram na língua inglesa sendo seus respectivos significados os seguintes: technical fibre – fibra técnica; elementary fibre – fibra elementar; nano fibril – nano fibrila; hemicelulose – hemicelulose; lignin – lignina).

Além disso, a rigidez da parede celular foi maior no meio e menor quanto mais próxima ao lúmen e à lamela média, sendo altamente dependente do ângulo microfibrilar de celulose e do nível de lignina das paredes. Entretanto, o grau de lignificação é menos influente na rigidez da parede das fibras, mas impede a flambagem das fibrilas de celulose sobre cargas de compressão por aumentarem a rigidez transversal [22].

O espessamento, a lignificação e a nanoestrutura da parede celular das fibras do bambu mudam durante o amadurecimento dos colmos [22]. Wang *et al.* [22] observaram que a porção de fibra mais próxima aos vasos de metaxilema é caracterizada por fibras de parede grossa e com maior grau de lignificação, enquanto que na posição mais externa do revestimento, elas possuem parede fina e menor grau de lignificação. Isso indicou que fibras próximas aos vasos e ao floema já terminaram o espessamento da parede celular, enquanto as da periferia do revestimento de fibras ainda estavam em estágio de desenvolvimento, indicado pelas paredes finas das células.

2.4. Composição química do bambu Moso

A proporção dos constituintes químicos do bambu varia conforme diversos fatores como espécie, condições ambientais, idade e posição do colmo [1].

Os principais constituintes químicos dos colmos de bambu são a celulose, hemicelulose e lignina. Além disso, em menor quantidade há presença de resinas, taninos, sais inorgânicos e ceras [1].

A celulose é o constituinte mais abundante no bambu. Li *et al.* [24], analisando colmos de bambu Moso com idades entre 3 a 5 anos secos ao ar, encontraram em média 44,64% desse constituinte, que somado à hemicelulose representaram mais de 65% da constituição. Já para a lignina, a porcentagem média foi de 20,35%.

Com relação ao conteúdo de lignina, há uma variação conforme a idade do bambu. Scurlock *et al.* [25] observaram uma leve tendência de diminuição da lignina com o aumento da idade. Essas mudanças foram verificadas tanto para os nós quanto para os entrenós, sendo levemente mais nítida no seguimento dos entrenós. A título exemplificativo, para entrenós de colmos de bambu da espécie *Phyllostachys bambusoides*, colmos de 1 ano apresentaram 26,2% de teor de lignina, enquanto que para colmos de 4,5 anos esse teor caiu para 24,3%.

De maneira semelhante, Li [26] analisou a variação do teor de lignina com a idade e posição do colmo de bambu Moso, mostrando que o maior teor de lignina, 23,21%, foi obtido para a posição do meio do colmo de 3 anos de idade, conforme apresentado na Tabela 1. Para a mesma posição, entretanto para idade do colmo de 5 anos, esse teor sofreu uma redução, caindo para 22,97%.

Tabela 1 – Variação do teor de lignina conforme idade e posição do colmo de bambu Moso (Adaptado de [26]).

Idade (anos)	Posição	Teor de lignina (%)
1	Base	21,98
	Meio	22,11
	Topo	21,26
3	Base	23,21
	Meio	23,95
	Topo	23,71
5	Base	22,93
	Meio	22,97
	Topo	23,02

Li [26] também investigou a variação de lignina com relação à parede de um colmo de 3 anos, cujo maior teor de lignina (24,30%) foi observado para a camada mais externa do colmo e esse teor foi reduzido no meio da parede do colmo (21,79%), aumentando novamente na porção interior (22,57%).

Além dos fatores descritos anteriormente, alguns tratamentos realizados no bambu também podem influenciar na composição química. Dependendo da temperatura, pode ocorrer degradação dos principais componentes químicos do bambu (celulose, hemicelulose e lignina). Nesse sentido, Zhao *et al.* [27] avaliaram os efeitos da temperatura do tratamento a vapor d'água em bambu Moso de 3 anos de idade, onde o teor de hemicelulose reduziu levemente, 4%, quando a temperatura aumentou de 25 para 160 °C. Essa redução foi bem maior, de 23,8%, quando a temperatura aumentou de 160 para 200 °C, concluindo que esse foi o componente mais sensível termo-quimicamente.

2.5. Propriedades mecânicas do bambu Moso

Em termos das propriedades de tração do bambu Moso, Yu *et al.* [28] estudaram os efeitos de diferentes posições radiais e longitudinais nessas propriedades, para colmos de bambu Moso com 4 a 6 anos. Os resultados obtidos mostraram que tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à tração diminuíram do exterior para o interior da parede do colmo, enquanto que em relação a posição longitudinal não houve mudança significativa. A título de ilustração, os valores médios do módulo de elasticidade e da resistência à tração da camada mais externa da parede do colmo foram de 27,4 GPa e 309,3 MPa, respectivamente, enquanto para a camada mais interna esses valores reduziram para 10,3 GPa e 111,5 MPa, respectivamente. Tal comportamento pode ser explicado pela anatomia do colmo de bambu, que possui uma concentração de fibras que aumenta da porção mais interior em direção à porção exterior da parede do colmo, região com maior fração de fibras [28].

Berndsen *et al.* [29], analisando colmos de bambu Moso com idades de 1, 3 e 5 anos, divididos em base, meio e topo, identificaram uma tendência de aumento da resistência à tração paralela à fibra com o aumento da idade do colmo, em que a maior resistência média à tração paralela à fibra foi para amostras obtidas do colmo de 5 anos (176 MPa). Para o fator posição, as maiores médias obtidas foram para

amostras do meio e topo do colmo, 173 MPa e 175 MPa, respectivamente. As amostras da base do colmo apresentaram a menor resistência à tração, 154 MPa, o que levou os referidos pesquisadores a concluírem que a resistência à tração aumentou com a densidade, idade e altura do colmo.

Shao *et al.* [30] também realizaram testes de tração paralelos às fibras de bambu Moso com 4 anos de idade em dois níveis: à nível macroscópico, em lâminas de bambu contendo matriz parenquimatosa e fibras esclerênquimas; e à nível mesoscópico, em feixes contendo apenas fibras extraídas do bambu.

Nesse sentido, dos resultados dos testes de tração, para as lâminas de bambu, Shao *et al.* [30] estimaram pela regra das misturas: 581,7 MPa e 40,4 GPa para resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra, respectivamente; 19 MPa e 0,22 GPa para a resistência à tração e módulo de elasticidade do tecido parenquimatoso, respectivamente. Por outro lado, dos resultados dos testes de tração em feixes de fibras obtiveram os valores de 482,2 MPa e 33,9 GPa para a resistência à tração e o módulo de elasticidade da fibra, respectivamente. Portanto, os referidos pesquisadores notaram que esses valores foram inferiores àqueles estimados pela regra das misturas e concluíram que essas diferenças possivelmente estão relacionadas à interação entre os componentes do bambu, cujo tecido parenquimatoso pode agir distribuindo as tensões para as fibras.

De forma semelhante, Li e Shen [31] também mediram as propriedades mecânicas da matriz parenquimatosa de colmos de bambu com 4 anos de idade por testes de tração e obtiveram valores médios para resistência à tração e módulo de elasticidade de 29 MPa e 2,16 GPa, respectivamente.

Por sua vez, Berndsen *et al.* [32] avaliaram os efeitos da idade e posição do colmo de bambu Moso na flexão a 3 pontos. O ensaio foi realizado com vão entre apoios de 56 mm e as flechas no meio do vão foram capturadas por meio de transdutor de deslocamento posicionado na parte inferior do corpo de prova, possibilitando, portanto, a obtenção do módulo de elasticidade na flexão.

Nesse sentido, Berndsen *et al.* [32] observaram uma tendência crescente da resistência na flexão com o aumento da idade do colmo e da base para o topo. A título de exemplificação, os valores médios do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura (resistência) na flexão para o colmo de 1 ano foram de 12,99 GPa e 160 MPa, respectivamente, enquanto que, para aqueles de 3 e 4 anos, os resultados obtidos foram de 13,61 GPa e 166 MPa e 14,54 GPa e 176 MPa, respectivamente.

Com relação à posição no colmo, Berndsen *et al.* [32] notaram que meio e topo apresentaram valores médios muito próximos tanto para o módulo de elasticidade quanto para o módulo de ruptura, 14,31 GPa e 173 MPa para o meio, e 14,59 GPa e 174 MPa para o topo, respectivamente. Já na base foram obtidas as menores médias para os módulos de elasticidade e de ruptura, 12,29 GPa e 154 MPa, respectivamente. Todos esses dados levaram à conclusão de que, quanto maior a densidade aparente dos colmos, maior a resistência mecânica.

Ainda com relação às características de flexão do bambu, Obataya *et al.* [33] realizaram testes de flexão a 4 pontos em hastes de bambu Moso com 3 anos de idade e vão efetivo de 170 mm, medindo as deformações superiores e inferiores no meio do vão das hastes através de extensômetros, obtendo, portanto, o módulo de elasticidade na flexão por relações entre o momento e a curvatura. Ademais, os corpos de prova foram carregados de duas diferentes maneiras: i) com a parte mais densa, com maior concentração de fibras (região mais externa) localizada na zona tracionada; e ii) com a parte interna, com menor fração de fibras, na zona tracionada. Os resultados mostraram que o módulo de elasticidade na flexão variou de 15 a 16 GPa, independentemente da configuração do ensaio de flexão, entretanto, a curvatura na ruptura para a condição com a parte externa tracionada foi duas vezes maior do que com a parte interna tracionada, o que demonstrou que a configuração do ensaio afetou a ductilidade à flexão do bambu em vez de sua rigidez. Foi verificado, portanto, que a ductilidade à flexão do bambu aumenta quando a parte mais externa do bambu é tracionada, enquanto a parte mais interna é comprimida.

Ainda com relação ao estudo de Obataya *et al.* [33], o modo de falha das hastes flexionadas com a parte mais externa tracionada foi caracterizado por arrancamento dos feixes de fibra, de forma similar ao que ocorre em compósitos reforçados por fibras uniaxialmente. A falha na flexão com a parte interna tracionada sempre se iniciou com o rompimento da superfície inferior logo abaixo do ponto de carga.

Passando para a avaliação das propriedades de compressão paralela à fibra do bambu, Berndsen *et al.* [32] analisaram essas propriedades em várias posições de colmos de bambu Moso com 1, 3 e 5 anos. Nesse sentido, obtiveram resultados para a resistência média e módulo de elasticidade médio à compressão que indicaram menor resistência mecânica para colmo de 1 ano de idade, quais sejam, resistência à compressão de 36 MPa e módulo de elasticidade de 3,63 GPa. Já as médias para

3 e 5 anos não diferiram muito e houve estabilização a partir de 3 anos, havendo uma tendência à diminuição da resistência à compressão paralela às fibras aos 5 anos de idade do colmo (41,7 MPa). Com relação à posição, a resistência média a compressão aumentou da base para o topo e o módulo de elasticidade médio na compressão foi maior no topo do colmo (4,52 GPa), diminuindo do meio (3,85 GPa) em direção à base (3,65 GPa).

2.6. Influência do teor de umidade, da idade e da temperatura nas propriedades mecânicas do bambu Moso

O teor de umidade e a idade dos colmos influenciam nas propriedades mecânicas do bambu. Jiang *et al.* [7] analisaram as mudanças nas propriedades mecânicas de colmos de bambu da espécie Moso, com idades de 0,5, 1,5, 2,5 e 4,5 anos sob diferentes teores de umidade e observaram que a resistência à compressão e ao cisalhamento paralelo às fibras foram as propriedades mais afetadas com as mudanças no teor de umidade, seguidas pelos módulos de tração e flexão. Nesses dois últimos, a idade do colmo teve pouco efeito com as mudanças no teor de umidade. No módulo de flexão houve uma tendência geral de decréscimo com o aumento do teor de umidade até o ponto de saturação.

Xu *et al.* [8], a fim de avaliar os efeitos das chuvas na degradação das propriedades mecânicas de andaimes feitos de bambu, realizaram seguidas imersões em água (1 e 7 dias) de colmos de bambu Moso, para simular os efeitos de eventos de chuva nas propriedades mecânicas. Observaram que, com o aumento do teor de umidade, a resistência média à compressão dos colmos diminuiu. Assim, com 1 dia de imersão a resistência média à compressão reduziu 27,9% e, com 7 dias de imersão, tal diminuição foi de 28,6% com relação à resistência média das amostras de controle (sem imersão). Pelas curvas de tensão-deformação na compressão, o módulo de elasticidade na compressão também reduziu com o aumento do teor de umidade, caindo 26,2% e 22,9% para 1 e 7 dias de imersão, respectivamente, com relação às amostras de controle. Contudo, observaram o fato de que as amostras mudaram de um comportamento frágil (amostras de controle), para um comportamento mais dúctil quando o teor de umidade aumentou, mostrando que um andaime de bambu saturado pode ter a capacidade de carga

reduzida, mas provavelmente fornecerá maiores avisos antes da falha devido ao comportamento mais dúctil.

Por sua vez, Xu *et al.* [8] também constataram que a resistência ao cisalhamento longitudinal e a resistência à tração transversal foram reduzidas com o aumento do teor de umidade. Para amostras de controle a resistência média ao cisalhamento foi de 10,6 MPa, enquanto que para amostras com 1 e 7 dias de imersão esses valores foram reduzidos para 9,8 MPa e 7,0 MPa, respectivamente. Com relação à resistência à tração transversal, as amostras de controle apresentaram valores médios de 2,71 MPa, reduzindo para 2,33 MPa e 2,49 MPa, com 1 e 7 dias de imersão, respectivamente. Entretanto, o comportamento à compressão foi o que exibiu maior degradação, seguido pelo cisalhamento longitudinal e, por último, pela tração transversal, o que levou os respectivos pesquisadores a conclusão de que o aumento do teor de umidade teve um efeito mais significativo nas fibras de celulose do que na lignina, já que a resistência à compressão e rigidez estão principalmente associadas ao comportamento das fibras, enquanto as propriedades transversais são principalmente uma função da lignina.

Outra conclusão obtida por meio do estudo de Xu *et al.* [8] é que, quando o ponto de saturação da fibra é excedido, a degradação das propriedades mecânicas é reduzida significativamente com o aumento do teor de umidade.

Nesse sentido, Wang *et al.* [9], também estudando o efeito do teor de umidade em amostras de bambu Moso, constataram que o módulo de elasticidade na compressão do bambu diminuiu linearmente em aproximadamente 51% quando o teor de umidade aumentou de 0,44% para 23%. Quando o teor de umidade ultrapassou o ponto de saturação da fibra, aquele módulo permaneceu praticamente inalterado.

Yang *et al.* [34], investigando os efeitos dos tratamentos térmicos (temperaturas de 150-210 °C e duração de 1-4 h) sobre as propriedades de flexão à 3 pontos no bambu Moso de 4 anos de idade, observaram que houve degradação dos componentes químicos, perda de massa e mudanças na densidade com o aumento da temperatura. Assim, o tratamento térmico em ar a 170 °C mostrou uma considerável perda de massa, indicando que os componentes químicos do bambu, como a hemicelulose, tinham começado a se degradar. Já em menores temperaturas, o bambu secou sem nenhuma degradação óbvia, mas a resistência à flexão aumentou com a diminuição do teor de umidade. Por sua vez, quando a temperatura

aumentou para 210 °C, a perda de massa ocorreu em maior escala, indicando provável degradação das regiões amorfas de celulose e hemicelulose, mudando a estrutura da fibrila, resultando em menores resistências à flexão para o bambu. O mesmo efeito foi observado para o módulo de elasticidade e de ruptura (resistência) na flexão, que tenderam a diminuir após o tratamento térmico, onde a temperatura foi mais significativa nessa diminuição do que a duração do tratamento. A título exemplificativo, para 1 hora de tratamento térmico à 210 °C, o módulo de elasticidade na flexão foi de 10,96 GPa, reduzindo para 10,63 GPa em 4 horas de tratamento, cujas amostras não tratadas (controle) apresentaram o valor de 11,04 GPa.

De maneira similar, Zhang *et al.* [35] também investigaram os efeitos de tratamento térmico (temperatura de 100-220 °C e duração de 1-4 h) sobre as propriedades de flexão a 3 pontos de bambu Moso com 5 anos de idade, mais precisamente sobre os módulos de elasticidade e módulos de ruptura (resistência à flexão). Eles observaram que, abaixo de 160 °C, o bambu permaneceu sem perda de massa e, acima dessa temperatura, a perda de massa aumentou significativamente com o aumento da temperatura e duração do tratamento térmico. Dos resultados obtidos, constataram que o módulo de ruptura primeiramente aumentou e posteriormente diminuiu quando as amostras foram tratadas termicamente, alcançando o maior valor na temperatura de 120 °C, concluindo que o módulo de ruptura (resistência à flexão) aumenta com a redução do teor de umidade.

Já com relação ao módulo de elasticidade, Zhang *et al.* [35] relataram que o valor máximo ocorreu para tratamento em temperatura de 140 °C e o menor módulo para 200 °C. Assim, foi observado um leve aumento do módulo de elasticidade em amostras tratadas em temperaturas de 100-140 °C, de 3,8 a 8,8% quando comparado às amostras de controle não tratadas, também tendo sido correlacionado à diminuição do teor de umidade. Já acima de 200 °C, a redução no módulo de elasticidade foi máxima, de 20,1%.

2.7. Hornificação

O fenômeno de hornificação, muito utilizado em polpas de madeira ou papel, está associado à formação de irreversíveis ou parcialmente reversíveis pontes de

hidrogênio interfibrilares por secagem ou remoção de água em materiais lignocelulósicos [36], enrijecendo sua estrutura polimérica.

Quando as fibrilas úmidas são submetidas a ciclos de molhagem e secagem, suas cadeias de polissacarídeos de celulose tornam-se mais próximas e as microfibrilas mais unidas. A secagem fecha os vazios capilares e a parede celular hornificada torna-se menos dilatada e menos flexível se comparada ao estado antes da secagem, levando a uma redução da área superficial da fibra a ser acessada pela água [36], ou seja, o volume interno da fibra diminui [37]. Em uma etapa adicional, quando a fibra entra em contato com a água, seu inchamento é reduzido se comparado ao estado original e o estado original não é mais recuperado [36,37].

O mecanismo de hornificação aumenta o grau de reticulação entre microfibrilas [36,37], diminui a higroscopicidade da fibra vegetal e por consequência a variação dimensional, tornando a fibra mais resistente [36,38].

Devido às melhorias obtidas nas fibras vegetais com a hornificação, esse mecanismo tem sido largamente utilizado como pré-tratamento das fibras para serem utilizadas como reforços de matrizes frágeis, tais como as constituídas por argamassa cimentícia ou concreto [6,38].

Em matrizes cimentícias, quando sujeitas a vários ciclos de molhagem e secagem, ocorre a migração do hidróxido de cálcio, que se precipita na superfície e no lúmen das fibras vegetais, levando à densificação e à fragilização dessas fibras [6]. Mohr *et al.* [39] perceberam que após 25 ciclos de molhagem-secagem em compósito cimentício reforçado por fibra de polpa de madeira o modo de falha predominante no compósito foi a fratura da fibra, concluindo que após os ciclos as fibras tornaram-se frágeis devido à mineralização. Entretanto, é possível melhorar a durabilidade desses compósitos cimentícios reforçados por fibras vegetais através da hornificação preliminar das fibras, pois a redução de retenção de água nas fibras hornificadas leva a uma estabilidade dimensional maior dessas fibras, podendo gerar uma melhor aderência fibra-matriz e uma redução na deposição de hidróxido de cálcio na superfície e lúmen das fibras, reduzindo assim a degradação da celulose nesses compósitos [6].

Nesse sentido, Claramunt *et al.* [6], ao realizarem preliminarmente hornificação em fibras de linter de algodão e polpa kraft de madeira de *Pinus insignis*, através de quatro ciclos de secagem e molhagem (7 horas de secagem em estufa a 60 °C e imersão em água durante a noite), observaram que as propriedades

mecânicas dos compósitos reforçados por essas fibras foram superiores e a durabilidade dos compósitos foi melhorada. Por exemplo, em termos de resistência à flexão, nos compósitos reforçados por polpas kraft hornificadas ocorreu um aumento de 8% com relação aos compósitos reforçados com essas fibras não tratadas, enquanto que para os compósitos reforçados por fibras de linter de algodão hornificadas o aumento foi de 16% em comparação às fibras não tratadas. A mesma tendência foi seguida pelos módulos de elasticidade.

Ferreira *et al.* [10], analisando a influência da hornificação em fibras de sisal na aderência com a matriz cimentícia, observaram uma redução de 30% no índice de absorção de água das fibras após a realização de 10 ciclos (1 ciclo equivalendo a 3 horas de imersão em água a 23 °C, seguido por 16 horas de secagem em estufa a 80 °C), constatando por meio de microscopia eletrônica de varredura um maior empacotamento das fibrocélulas e uma redução no lúmen (Figura 7). Em adição, observaram que ocorreu uma redução na variação da seção transversal da fibra ao variar a umidade e constataram que a hornificação tornou a fibra mais resistente e deformável, aumentando sua resistência à tração, devido a uma seção transversal mais densa das fibras com a redução dos lúmens. Ainda, com a hornificação das fibras, na interface fibra-matriz ocorreu pequena deposição de compostos hidratados do cimento, aumentando a capacidade de ancoragem da fibra à matriz cimentícia.

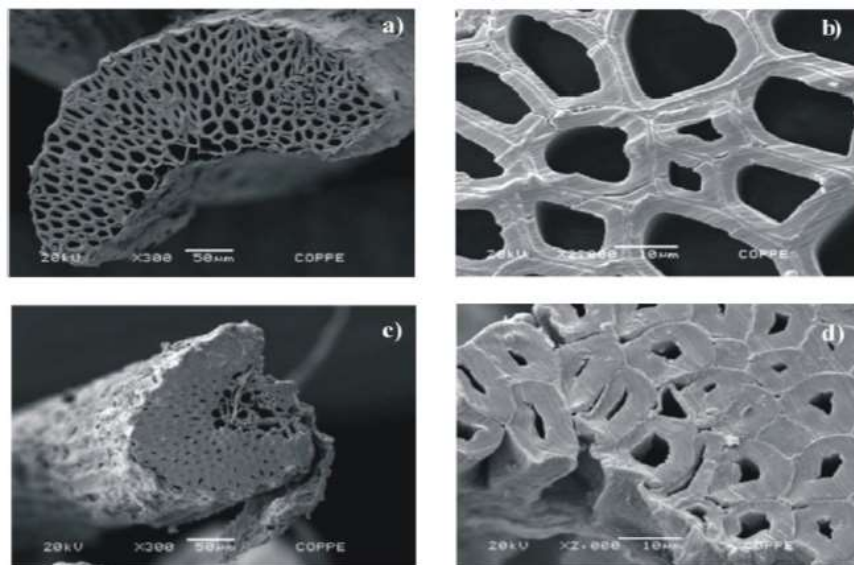


Figura 7 - Micrografias da seção transversal da fibra de sisal, mostrando detalhes das fibrocélulas, antes (a-b) e após hornificação (c-d) [10].

Por sua vez, Ballesteros *et al.* [38] e Claramunt *et al.* [40] realizaram hornificação por ciclos de molhagem-secagem em fibras de polpa de madeira, submetidas a processos de branqueamento e não branqueadas. Observaram que os valores de retenção de água, medidos nas polpas, diminuíram com o número de ciclos, tendo sido mais significativa para as polpas branqueadas, pois o processo de branqueamento leva à perda de hemicelulose, substituindo as ligações flexíveis entre celulose e hemicelulose por ligações mais rígidas de celulose-celulose, o que torna a acessibilidade da água mais difícil. Além disso, a hornificação não afetou a integridade das polpas e não houve mudanças significativas no comprimento e largura das fibras com os ciclos.

Santos *et al.* [11] analisaram fibras de juta submetidas à hornificação alcalina com hidróxido de cálcio com o intuito de compreender a modificação da estrutura da fibra pelo hidróxido de cálcio. Perceberam que a hornificação alcalina reduziu a quantidade de lignina e hemicelulose da fibra, deixando a celulose, que é mais resistente mecanicamente, e ainda, levou a um aumento da espessura da parede secundária da fibra, causando uma redução do lúmen. Ademais, o tratamento por hornificação elevou a resistência mecânica das fibras de juta, levando a um aumento de 176% no limite de resistência à tração, 133% na deformação e 9% no módulo de Young.

Em se tratando de fibras de bambu, poucas pesquisas envolvendo o tratamento por hornificação das fibras foram encontradas. Betz [12], a fim de avaliar os efeitos da chuva com relação à durabilidade do bambu da espécie *Guadua Angustifolia Kunth*, submeteu amostras, extraídas da base, meio e topo do colmo, à quatro ciclos de molhagem-secagem (1 ciclo equivalendo a 24 horas de imersão em água seguido de secagem em uma estufa a temperatura de 37°C por 24 horas). Analisando os resultados, notou uma perda na capacidade de absorção de água e uma tendência de diminuição do peso seco, além de um aumento substancial dos valores de rigidez e resistência das amostras após os ciclos em relação às amostras de controle. Além disso, em seu estudo constatou que o aumento de rigidez devido ao processo de hornificação afetou mais as amostras extraídas do meio e topo do colmo do bambu, existindo um leve decréscimo em relação às amostras extraídas da base, justificado por uma maior proporção da matriz de lignina nas amostras da base, levando a uma diminuição dos efeitos de enrijecimento das fibras. Já os testes de flexão a quatro pontos realizados, mostraram que as amostras hornificadas,

extraídas tanto da base quanto do meio e topo do colmo do bambu apresentaram um aumento com relação aos valores médios do módulo de Young, podendo-se destacar, como exemplo, as amostras extraídas do meio do colmo que apresentaram módulo de Young médio de 19,8 GPa para as de controle e de 23 GPa para as amostras hornificadas, concluindo que a hornificação levou a um aumento de aproximadamente 16% para o módulo de Young.

3 Programa experimental

Este capítulo traz o detalhamento de toda a parte experimental deste trabalho. Inicia-se pela descrição dos materiais utilizados e procedimentos para extração de hastes dos colmos de bambu, e depois detalha os processos para obtenção e preparação dos corpos de prova a serem utilizados para os ciclos de molhagem e secagem, microscopia e ensaios de flexão. Em seguida, aborda os ensaios realizados, descrevendo seus procedimentos. Por último, retrata todo procedimento adotado na análise e processamento das imagens obtidas por microscopia.

3.1. Materiais utilizados e métodos de preparação dos corpos de prova

3.1.1. Bambu

Para o estudo experimental foram utilizados bambus da espécie *Phyllostachys pubescens*, conhecido popularmente como Moso.

Dois colmos de bambu Moso foram adquiridos da Escola de Bioarquitetura e Centro de Pesquisa e Tecnologia Experimental em Bambu (EBIOBAMBU), cujo bambuzal está localizado no Vale da Grama, Visconde de Mauá – Itatiaia – RJ.

A EBIOBAMBU informou que os bambus foram colhidos em agosto de 2017, com aproximadamente três anos de idade. Os colmos foram secos naturalmente no ambiente, por aproximadamente sete meses e não passaram por nenhum tipo de tratamento. Para o presente estudo, utilizou-se apenas a região do meio dos colmos, já fornecidos cortados em março de 2018.

Para distinguir os colmos, a nomenclatura apresentada na Figura 8 foi criada, de modo que os entrenós de cada colmo foram nomeados por letras em ordem alfabética:

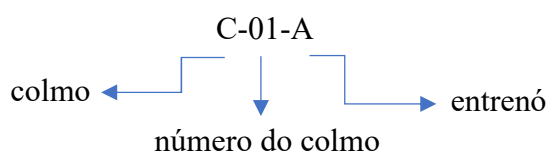


Figura 8 - Nomenclatura adotada para diferenciação dos colmos e seus entrenós.

Por conseguinte, os entrenós dos colmos foram devidamente etiquetados utilizando-se essa nomenclatura e posteriormente foram envolvidos por plástico filme para preservação da umidade e proteção contra possíveis ataques de agentes biológicos. A Figura 9 mostra os colmos armazenados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (LEM DEC) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), após passarem por todo esse procedimento inicial.



Figura 9 – Armazenamento dos colmos de bambu Moso.

Desta forma, o colmo C-01, com comprimento total e diâmetro externo médio de aproximadamente 220 cm e 85 mm, respectivamente, teve entrenós nomeados de A a F. Por outro lado, o colmo C-02, com cerca de 260,5 cm de comprimento e diâmetro externo médio de 80 mm, ficou com entrenós nomeados de G a M, como pode ser observado na Tabela 2 seguinte, que detalha os entrenós, nós e comprimento médio dos entrenós dos colmos.

Tabela 2 – Detalhamento dos entrenós dos colmos de bambu Moso.

Colmo	Entrenós	Nó Inicial	Nó Final	Comprimento médio entrenós (cm)
C-01	A	1	2	32,7
	B	2	3	33,5
	C	3	4	35,2
	D	4	5	37,3
	E	5	6	38,6
	F	6	7	39,1
C-02	G	1	2	41,4
	H	2	3	40,4
	I	3	4	39,1
	J	4	5	36,6
	K	5	6	34,8
	L	6	7	33,1
	M	7	8	31,1

3.1.2. Cortes nos colmos de bambu para obtenção de hastes

Os corpos de prova para os ensaios foram preliminarmente confeccionados na marcenaria da PUC-Rio. Primeiramente, foram feitos cortes transversais nos colmos com auxílio de uma serra circular esquadrejadeira da marca Baldan, modelo Sec-3 (Figura 10.a), a fim de separar as regiões dos entrenós (Figura 10.b).

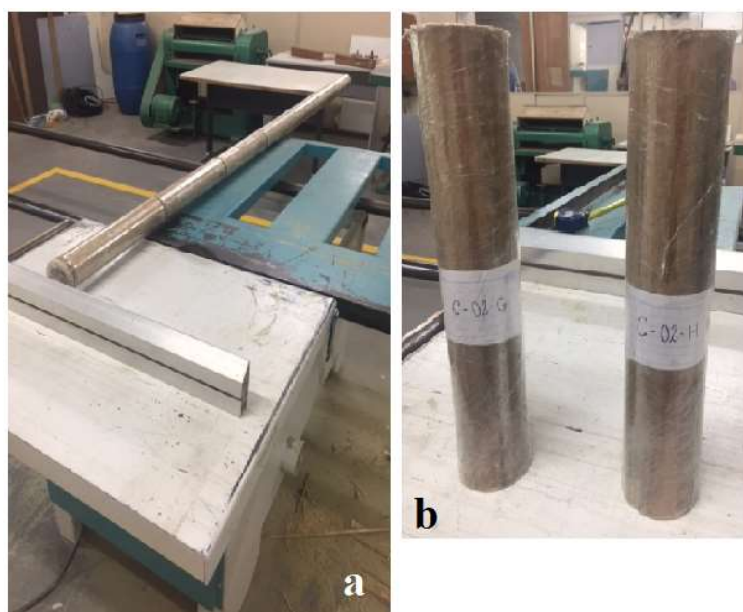


Figura 10 – Cortes para separação das regiões dos entrenós do bambu: (a) colmo de bambu sofrendo corte transversal em serra circular esquadrejadeira; (b) regiões dos entrenós separadas após corte transversal.

Em seguida, ainda utilizando a serra circular esquadrejadeira e também uma plaina manual para madeira, os entrenós foram cortados longitudinalmente, ao longo de toda a sua direção radial, obtendo hastes com comprimento de 305-307 mm (L, longitudinalmente ao entrenó), largura de 8,5-10,5 mm (T, tangencialmente ao entrenó), espessura de 7,5-9,0 mm (R, radialmente ao entrenó), conforme apresentado na Figura 11.a. Após corte as hastes foram separadas sobre uma bancada conforme o colmo e a posição do entrenó, a fim de obter um mapeamento futuro dos espécimes ao longo do respectivo colmo (Figura 11.b).

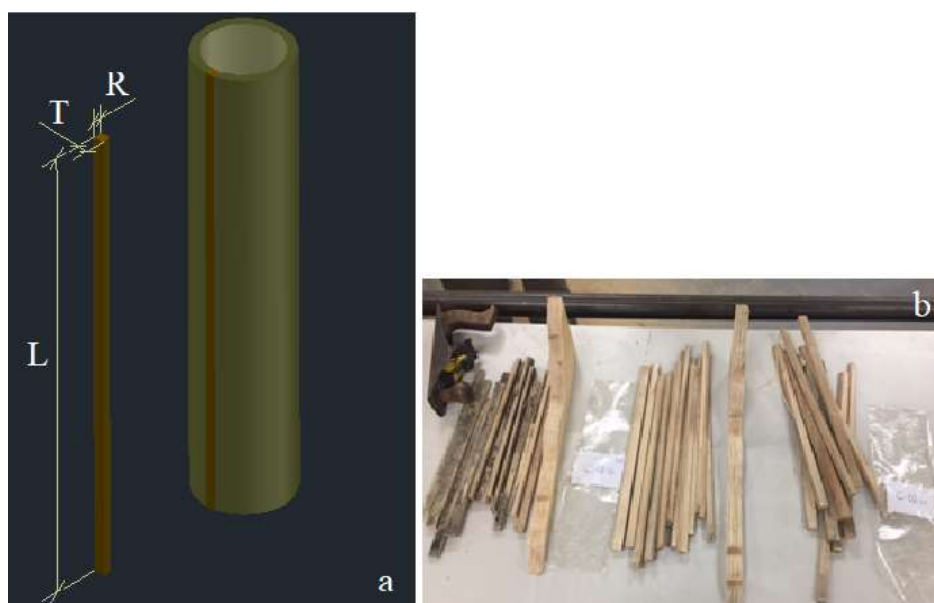


Figura 11 – Detalhes das hastes extraídas da região do entrenó: (a) representação direções de extração das hastes com relação às direções dos entrenós; (b) separação das hastes após corte, para mapeamento conforme posição do entrenó e do colmo.

Finalizado o procedimento de corte, as hastes foram enumeradas com caneta de tinta permanente para retroprojektor, em ordem crescente, começando pelas hastes extraídas do colmo C-01, seguidas pelas do colmo C-02. Posteriormente, foram armazenadas em sacolas a vácuo, etiquetadas conforme o número do colmo e a posição do entrenó.

Do total de hastes obtidas, quatro foram reservadas para o ensaio de determinação do teor de umidade inicial dos colmos do bambu Moso, com objetivo de conhecer o teor de umidade dos colmos como entregues pela EBIOBAMBU. As demais hastes passaram por novos processos de preparo para obtenção de corpos de prova para os ensaios de ciclos de molhagem-secagem e ensaios de flexão.

3.1.3. Preparação dos corpos de prova para ciclos de molhagem-secagem

Após a obtenção das hastes do bambu Moso, procedeu-se à preparação dos corpos de prova para os ensaios de ciclos de molhagem-secagem. Para isso, as hastes passaram por novos cortes, desta vez realizados no LEM DEC da PUC-Rio, com o auxílio de uma serra de fita (Figura 12).



Figura 12 – Serra de fita utilizada nos cortes transversais das hastes.

Foram realizados dois cortes transversais à haste, conforme ilustrado na Figura 13 a seguir, resultando em três pedaços, cujas destinações distintas são descritas nos parágrafos seguintes.



Figura 13 – Representação das três amostras obtidas por cortes transversais realizados na haste de aproximadamente 305 mm de comprimento (dimensões em mm).

Do primeiro corte extraiu-se a amostra 1, representada na Figura 13, com aproximadamente 25 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R), que recebeu a mesma numeração da haste e foi reservada e destinada para o ensaio de determinação do teor de umidade dos corpos de prova, realizado antes dos ciclos de molhagem-secagem.

Posteriormente, extraiu-se da haste restante a amostra 2, com aproximadamente 20 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R), representada na Figura 13, também numerada conforme a haste principal. Essa segunda amostra foi reservada para preparação específica para observação em microscópio ótico, conforme será retratado posteriormente. Essas amostras, destinadas à análise em microscópio, têm o objetivo de verificar as proporções dos feixes vasculares e matriz, da seção transversal do bambu, no estado anterior aos ciclos de molhagem e secagem.

Portanto, dos dois cortes transversais realizados, resultou a amostra 3 com aproximadamente 260 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R) (Figura 13). Esses são os corpos de prova destinados aos ensaios de ciclos de molhagem-secagem.

3.1.4. Preparação das amostras para microscopia

A análise da seção transversal das amostras de bambu foi realizada em duas etapas:

- a. Antes dos ciclos de molhagem e secagem: as amostras foram obtidas conforme relatado no subitem anterior, com dimensões de 20 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R);
- b. Após os ciclos de molhagem e secagem: as amostras foram extraídas das hastes de dimensões aproximadas de 260 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R), após sofrerem os ciclos.

Após os ciclos, realizaram-se cortes transversais nas hastes com auxílio de uma serra de fita, extraindo-se as amostras de aproximadamente 20 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R), destinadas à observação em microscópio. Após o corte, as hastes resultantes apresentavam as seguintes medidas aproximadas: 240 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R), configurando os corpos de prova destinados aos ensaios de flexão e preparados conforme subitem posterior 3.1.5.

As amostras destinadas à observação em microscópio foram levadas até o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), onde foram realizados processos para embutimento e preparação superficial. Ao todo foram embutidas 14 amostras do bambu Moso, das quais duas de controle (sem sofrer ciclos) e duas para cada ciclo, sendo uma anterior e uma posterior aos ciclos.

A preparação das amostras consistiu em impregnação a frio com resina epóxi da marca *Epoxy Fiber* (Figura 14.a). Após período de cura da resina, as amostras embutidas foram lixadas em politriz automática da marca Struers, modelo Tegramin-20 (Figura 14.b), iniciando por disco metálico diamantado com granulometria de 125 μm até 6 μm , passando posteriormente para polimento em pano com suspensão de diamante de 3 μm . Após a realização do polimento as amostras embutidas ficaram prontas para visualização e captura de imagens no microscópio.

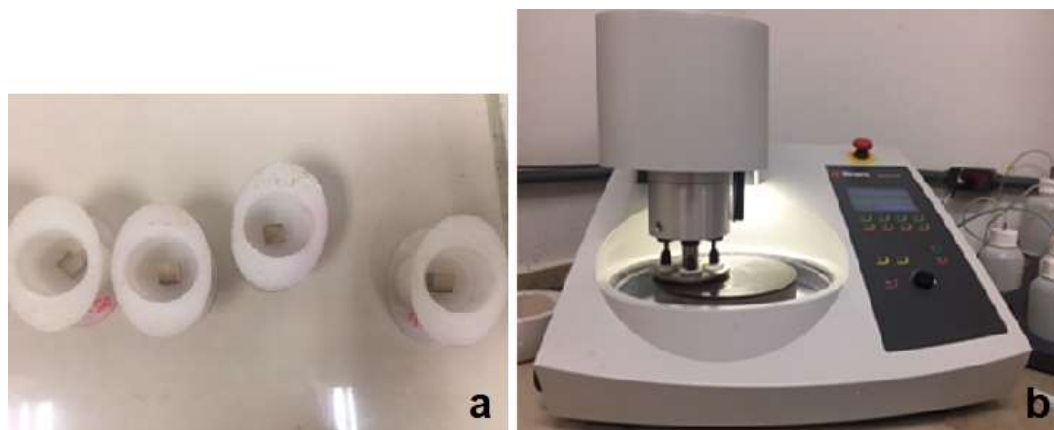


Figura 14 – Preparação das amostras para microscopia: (a) amostras de bambu impregnadas com resina epóxi; (b) politriz automática, marca Struers.

3.1.5. Preparação dos corpos de prova para ensaios de flexão

Conforme explicitado anteriormente, os corpos de prova a serem ensaiados à flexão mediam aproximadamente 240 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R).

Primeiramente, o meio do vão dos corpos de prova foi lixado suavemente, a fim de eliminar impurezas e melhorar a aderência com a cola a ser utilizada para a fixação dos extensômetros. Posteriormente, foram marcados ao longo do comprimento com caneta de tinta permanente para retroprojektor. As duas primeiras marcações identificam o vão entre apoios para o ensaio de flexão, de 210 mm, isto é, a aproximadamente 15 mm de cada borda (Figura 15.a). A segunda marcação identifica o meio do vão, onde devem ser fixados os extensômetros (Figura 15.a). A terceira marcação define a posição correta do dispositivo a ser utilizado no ensaio de flexão para a aplicação do carregamento em dois pontos, distando 48 mm entre os cilindros, ilustrado na Figura 15.b a seguir.

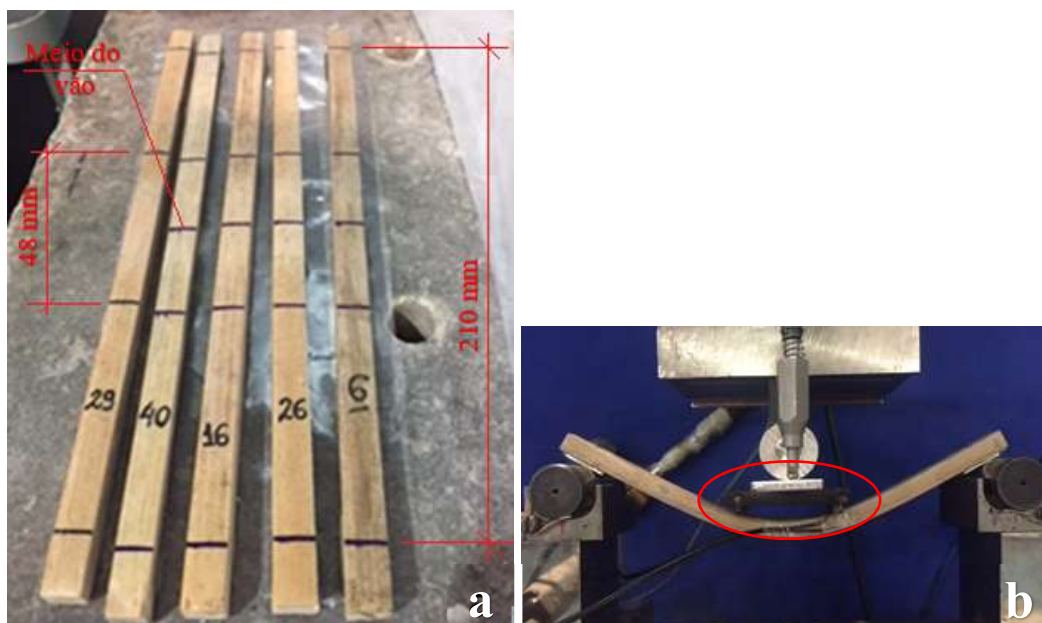


Figura 15 – Ilustração da preparação para ensaios de flexão: (a) corpos de prova enumerados e com marcações para identificar o meio do vão, os apoios e os pontos de aplicação de carga; (b) dispositivo utilizado no ensaio de flexão para aplicação de carga em dois pontos.

Após as devidas marcações, foram colados extensômetros elétricos de resistência, marca Excel Sensores - tipo PA-06-250BA-120-L, no meio do vão dos corpos de prova, tanto na face superior, quanto na inferior. Na colagem utilizou-se cola epóxi Araldite® Hobby, marca Tek Bond Saint-Gobain.

Para os ensaios de flexão, os corpos de prova foram divididos em dois grupos, conforme a orientação seguinte:

- a. Com a parte externa do bambu, maior concentração de fibras, voltada para baixo, isto é, tracionada quando submetida à flexão;
- b. Com a parte interna do bambu, menor concentração de fibras, voltada para baixo, tracionada quando submetida à flexão.

Para a finalização da preparação dos corpos de prova de flexão, chapas metálicas foram coladas com cola epóxi, nos pontos de apoio, respeitando a orientação descrita anteriormente, no intuito de regularizar a superfície e minimizar a torção dos corpos de prova durante os ensaios. Após a colagem, respeitou-se o prazo de 24 horas para cura completa da cola epóxi.

A caracterização física dos corpos de prova, como comprimento, largura, espessura, massa e densidade (massa por volume) foi realizada antes do início de cada ensaio, obedecendo às recomendações da norma ISO 22157-1:2004 [41].

3.2. Procedimentos dos ensaios

3.2.1. Ensaio de determinação do teor de umidade inicial dos colmos

Os teores de umidade inicial dos colmos do bambu Moso estudado foram medidos conforme recomendações da norma ISO 22157 [41]. Para o ensaio em questão, utilizaram-se quatro amostras obtidas durante a preparação preliminar, conforme descrito anteriormente, sendo duas provenientes de cada colmo, C-01 e C-02.

Os segmentos, em temperatura ambiente, foram pesados em balança eletrônica de precisão de 0,01 g, Ohaus – modelo ARD110 (Figura 16.a), disponível no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da PUC-Rio, para a determinação da sua massa antes da secagem.

Medidas de largura e espessura foram obtidas por paquímetro digital profissional com precisão de 0,1 mm, Black Bull - modelo 5234 e medidas de comprimento obtidas por trena manual, com precisão de 1 mm. Tais procedimentos de medição foram realizados ao longo de todo o ensaio.



Figura 16 – Instrumentos utilizados no ensaio: (a) Balança eletrônica com precisão de 0,01g; (b) Estufa digital de esterilização e secagem.

Inicialmente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa digital de esterilização e secagem, marca Nova Ética (Figura 16.b), também disponível no LGMA da PUC-Rio, em temperatura de $100 \pm 2^\circ \text{C}$ por período de 24 horas, seguido do procedimento de medição mencionado anteriormente. Após esse período os segmentos foram novamente levados à estufa e as medições passaram a ser realizadas a cada período de 2 horas até constância de massa, ou seja, até que a

diferença entre medidas sucessivas de massa não excedesse 0,01 g, determinando dessa forma sua massa seca, m_0 .

O teor de umidade (MC_0), em termos de porcentagem, foi determinado por:

$$MC_0(\%) = \frac{(m - m_0)}{m_0} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Os teores de umidade inicial obtidos para cada colmo estão relatados na Tabela 3 seguinte.

Tabela 3 – Teores de umidade obtidos para os colmos de bambu Moso.

Colmo	Entrenó	Nº amostra	Densidade média* (g/cm³)	m (g)	m_0 (g)	MC_0 (%)	$MC_{0.médio}$ (%)	Desvio Padrão (%)
C-01	A	1	0,81	23,90	19,37	23,39	21,85	1,53
	B	17	0,81	24,04	19,98	20,32		
C-02	G	25	0,80	25,78	20,14	28,00	23,71	4,30
	H	37	0,73	20,67	17,31	19,41		

*Densidade do corpo de prova determinada através da massa por volume.

O ensaio objetivou o conhecimento do teor de umidade dos colmos, assim que entregues pela EBIOBAMBU. Calculando uma média dos teores de umidade pode-se dizer que o colmo C-01 apresentava inicialmente um teor de umidade médio de 22%, enquanto o colmo C-02 de 24%.

3.2.2. Ensaio de sorção e dessorção

Para analisar o comportamento do bambu com relação à sorção e dessorção de água, realizou-se ensaio para obtenção dessas curvas. Para esse ensaio utilizaram-se quatro amostras, preparadas conforme descrito no subitem 3.1.3 e antes de começar o ensaio foram extraídas informações de comprimento, largura média, espessura média e massa de todos os espécimes. Medidas de comprimento foram obtidas por meio de trena manual, com precisão de 1 mm, medidas de largura e espessura foram obtidas por paquímetro digital profissional com precisão de 0,1 mm, Black Bull - modelo 5234 e a massa por balança eletrônica de precisão 0,001 g, Marte - modelo AL500C (Figura 17), disponível no LEM DEC da PUC-Rio.

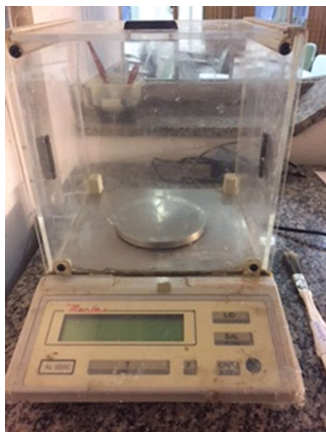


Figura 17 – Balança digital de precisão de 0,001 g.

Inicialmente foi realizado o ensaio de sorção de água, onde as amostras foram imersas em água destilada em temperatura ambiente, fornecida pelo Laboratório de Química da PUC-Rio.

Para imersão em água, utilizou-se um recipiente plástico com tampa para vedação e um artefato cilíndrico de argamassa envolto em um plástico, funcionando como um peso. A esse artefato cilíndrico amarrou-se uma corda que envolveu todas as amostras, a fim de garantir que ficassem totalmente no fundo do recipiente, isto é, totalmente submersas, conforme ilustrado na Figura 18.

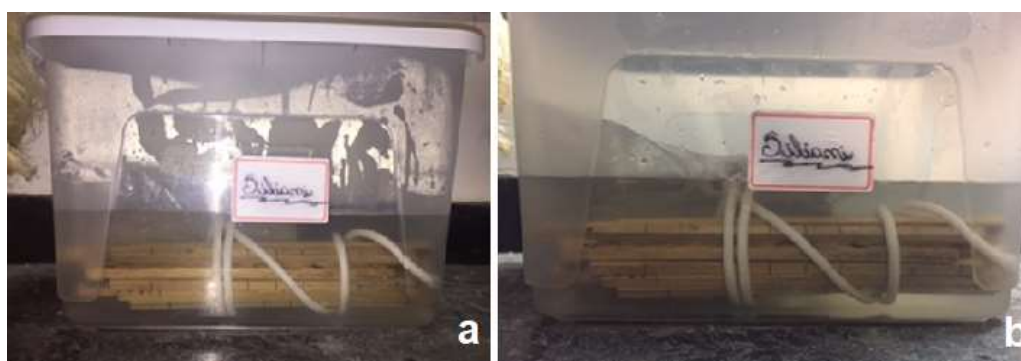


Figura 18 – Imersão dos espécimes em água destilada durante ensaio de sorção de água.

Ao longo do dia, em intervalos regulares de 2 horas, foram tomadas medidas de comprimento, largura média, espessura média e massa das amostras. Ao final do dia, o intervalo de medição passava para 16 horas, pois as medições só eram realizadas até as 16:00 horas de cada dia, devido ao horário de fechamento do LEM DEC da PUC-Rio. Completado o ensaio de sorção de água, deu-se início ao ensaio de dessorção de água.

No ensaio de dessorção, optou-se por secar as amostras em estufa em temperatura de 50° C, pois nessa temperatura estaria assegurada a não degradação do bambu. Nesse ensaio utilizou-se estufa de esterilização analógica, marca Famo, com precisão de 5° C (Figura 19).



Figura 19 – Estufa de esterilização analógica utilizada em ensaio de dessorção.

Todas as medidas de comprimento, largura, espessura e massa foram realizadas no mesmo intervalo de tempo adotado para o ensaio de sorção de água.

De posse de todos os dados obtidos no ensaio traçou-se a curva de sorção-dessorção das amostras de bambu, conforme apresentado na Figura 20.

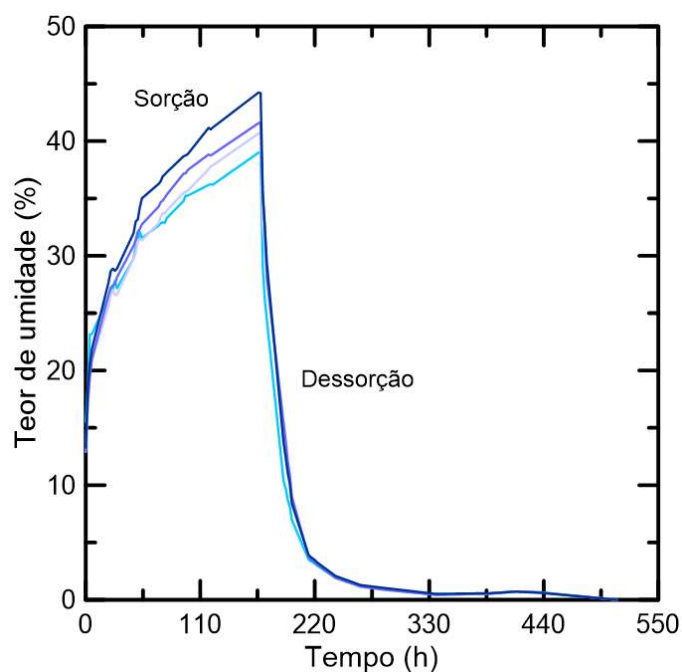


Figura 20 – Curvas de sorção-dessorção das amostras de bambu Moso.

Vale destacar que não foi alcançado o patamar de saturação completa das amostras nas curvas de sorção, pois demandaria um tempo bem maior de ensaio. Portanto, o objetivo desses ensaios foi conhecer tanto o tempo médio aproximado para saturação das amostras, quanto o tempo médio para secagem completa.

Com base nesses tempos, definiu-se a duração dos ciclos de molhagem e secagem. Adotou-se para a molhagem um período de 24 horas, pois pelas curvas de sorção percebe-se que nesse período ocorreu a maior absorção de água pelas amostras. Para a secagem, através das curvas de dessorção observa-se que nas primeiras 55 horas de dessorção houve a maior perda de umidade, portanto determinou-se um período de 48 horas para a secagem. Dessa forma, um ciclo completo de molhagem e secagem teria duração de 3 dias (72 horas).

3.2.3. Ensaio de determinação do teor de umidade antes dos ciclos de molhagem-secagem e ensaios de flexão

Antes da realização dos ciclos de molhagem-secagem e ensaios de flexão, foi realizado um novo ensaio para conhecer o teor de umidade dos corpos de prova, já que haviam-se passado três meses desde a realização do ensaio para determinação do teor de umidade inicial (assim que os colmos foram entregues) e se queria conhecer a variação ocorrida nesse espaço de tempo. Para isso, foram utilizados os corpos de prova de dimensões 25 mm x 8,5-10,5 mm x 7,5-9,0 mm, extraídos das mesmas hastes a serem ensaiadas em ciclos de molhagem-secagem e flexão, conforme já descrito anteriormente.

O ensaio de determinação do teor de umidade seguiu os mesmos procedimentos do ensaio realizado no recebimento dos colmos para determinação do teor de umidade inicial. A Tabela 4 adiante, traz os valores médios dos teores de umidade encontrados após 3 meses do recebimento dos colmos, MC_3 , separados pelo respectivo colmo e entrenó, obtidos antes dos corpos de prova sofrerem os ciclos. Ainda, a título de comparação, consta nessa tabela os valores dos teores de umidade obtidos no recebimento dos colmos, MC_0 .

Tabela 4 – Teor de umidade dos colmos antes dos ciclos de molhagem-secagem e assim que os colmos foram recebidos.

Colmo	Entrenó	MC ₃ (%)	Desvio Padrão	MC ₀ (%)
C-01	A	16,40	0,24	23,39
	B	16,45	0,12	20,32
C-02	G	16,28	0,22	28,00
	H	16,23	0,24	19,41

Comparando os teores de umidade, percebe-se que no período de três meses houve uma perda média de umidade dos corpos de prova extraídos dos colmos C-01 e C-02, de aproximadamente 25% e 30%, respectivamente, quando comparados aos teores médios dos respectivos colmos quando recebidos. Ainda, pode-se notar uma estabilização da umidade dos corpos de prova, girando em torno de 16%.

Conhecendo os teores de umidade e as massas dos corpos de prova antes dos ciclos, foi possível prever a massa totalmente seca dos corpos de prova e, assim, obter as variações dos teores de umidade ao longo dos ciclos de molhagem e secagem.

3.2.4. Ensaio de flexão

Para realização dos ensaios de flexão, todos os corpos de prova passaram inicialmente pelo processo de molhagem e secagem. Esse processo seguiu os mesmos procedimentos do ensaio de sorção e dessorção, com imersão em água destilada em temperatura ambiente por 24 horas e secagem em estufa de esterilização analógica em 50° C por período de 48 horas.

Antes dos ciclos, todos os corpos de prova foram pesados em balança de precisão e tiveram suas dimensões de comprimento, largura e espessura registradas. Todos esses parâmetros foram novamente medidos após a conclusão da molhagem e da secagem para cada ciclo.

A fim de analisar o comportamento mecânico dos corpos de prova após os ciclos, optou-se por realizar 3 ciclos (9 dias), 5 ciclos (15 dias) e 10 ciclos (30 dias). Para isso, foram ensaiados 10 corpos de prova para cada situação, dos quais 8 foram destinados aos ensaios de flexão a 4 pontos e 2 foram reservados para estudo da influência do cisalhamento na flexão.

Portanto, após a finalização dos ciclos passou-se aos ensaios de flexão a 4 pontos. Esses ensaios foram realizados com os corpos de prova de dimensões aproximadas de 240 mm (L) x 8,5-10,5 mm (T) x 7,5-9,0 mm (R), em que foram ensaiados 8 corpos de prova para cada situação: controle (não sofreram ciclos), após 3, 5 e 10 ciclos de molhagem-secagem. Dos 8 corpos de prova, 4 foram preparados para serem ensaiados com a zona de maior concentração de fibras – camada mais externa do bambu (epiderme) – sendo tracionada durante a flexão (Caso I da Figura 21) e 4 preparados para serem ensaiados com a camada interna sofrendo tração durante o ensaio (Caso II da Figura 21).

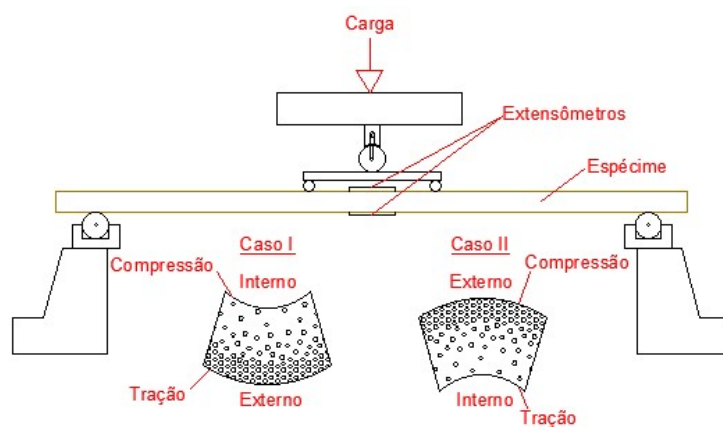


Figura 21 – Orientação dos espécimes para ensaio de flexão em 4 pontos (Adaptado de [33]).

Os ensaios de flexão a 4 pontos foram executados em uma máquina de ensaios universal com atuador servo hidráulico MTS modelo 204.63 com capacidade de 100 kN de carregamento. Os ensaios foram realizados por controle de deslocamento a uma taxa de 2 mm/min e foi utilizado um *setup* constituído de uma base com dois roletes afastados 210 mm entre si. Foi acoplada à máquina de ensaio uma célula de carga com capacidade de 250 kgf (2,5 kN), para melhor precisão do carregamento, e a essa célula de carga foi acoplado um terceiro rolete para aplicação de carga no centro do vão. Para a distribuição da carga em dois pontos dos corpos de prova de bambu, foi utilizado um dispositivo metálico com dois cilindros distando 48 mm entre seus eixos, de modo que a distância do apoio ao ponto de aplicação da carga (vão de cisalhamento) foi de 81 mm (Figura 22.a).

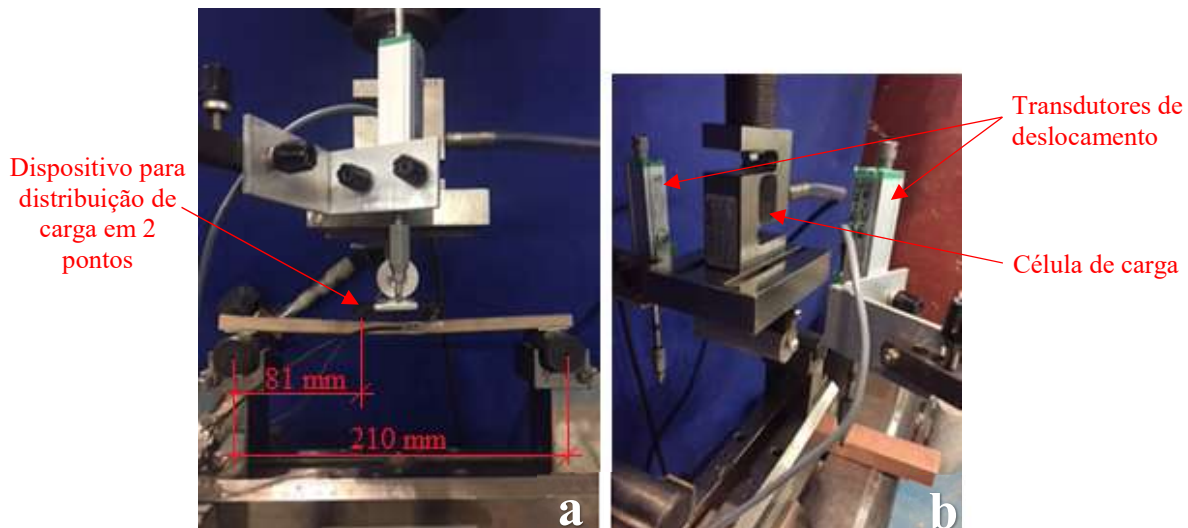


Figura 22 – Setup de ensaio de flexão.

Para aquisição de dados utilizaram-se dois transdutores de deslocamento (Figura 22.b), marca Gefran, posicionados em paralelo sobre uma pequena chapa metálica fixada ao dispositivo de aplicação de carga e dois extensômetros, um na face superior e outro na face inferior do corpo de prova.

No ensaio de flexão mediram-se as deflexões ($\Delta_{\text{flexão}}$) dos pontos de aplicação de carga na viga de bambu, a 81 mm dos apoios, conforme o carregamento.

Devido ao comportamento não linear, o módulo de elasticidade na flexão, E , foi obtido da região linear do gráfico momento versus curvatura. Através dos extensômetros, foram lidas as deformações superiores e inferiores no meio do vão do corpo de prova em função do carregamento, obtendo a curvatura ($1/r$), e, através das medições da célula de carga, o momento fletor no meio do vão da viga pode ser obtido. Extraindo o coeficiente angular (m) da região linear do gráfico momento versus curvatura obteve-se o módulo de elasticidade na flexão. Pela teoria de vigas sabe-se que:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad (3.2)$$

onde I é o momento de inércia, calculado com base nas dimensões dos corpos de prova. Isolando o módulo de elasticidade e reescrevendo a equação 3.2 tem-se:

$$E = \frac{m}{I} \quad (3.3)$$

Vale salientar que foi considerado o mesmo intervalo da região linear para obtenção dos módulos de elasticidade dos corpos de prova ensaiados à flexão, cujo intervalo abrange momento fletor de 0 a 3,26 kN.mm, com respectivas curvaturas variando entre 0 a 3,26 1/mm.

3.2.5. Ensaios para estudo da influência do cisalhamento na flexão a 4 pontos

Inicialmente, vale ressaltar que a presente análise da influência do cisalhamento na flexão a 4 pontos está sendo realizada por meio da adaptação ao caso da metodologia adotada por Bank [42] sobre o efeito do cisalhamento em vigas pultrudadas reforçadas por fibras, ensaiadas à flexão a 3 pontos, sendo o referido estudo de Bank relevante em materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras unidirecionalmente devido ao baixo módulo de cisalhamento do material quando comparado com seu módulo de elasticidade.

Nesse sentido, realizou-se ensaios de flexão a 4 pontos em dois corpos de prova de cada situação: controle, 3, 5 e 10 ciclos de molhagem-secagem. Sendo um corpo de prova ensaiado com a parede interna do colmo do bambu sob tração e o outro com a parede externa sob tração.

O ensaio de flexão foi realizado em *setup* montado sobre um pequeno pórtico metálico, apoiado no chão. Utilizou-se duas bases metálicas com parafuso na parte inferior para regulagem do vão livre (Figura 23.a), configurando os apoios dos corpos de prova. Esse ensaio foi conduzido variando o vão livre dos corpos de prova, iniciando por 210 mm, passando para 180 mm, 150 mm e por último 120 mm.

O carregamento dos corpos de prova foi efetuado por composições de pequenos pesos padronizados em 5 N, 10 N e 20 N, inseridos manualmente em um gancho metálico pesando 1 N (Figura 23.b), soldado no dispositivo utilizado para distribuição do carregamento em dois pontos. Após a aplicação de cada peso foram realizadas leituras dos dados em computador com software específico para aquisição dos dados.

Para aquisição de dados utilizou-se um transdutor de deslocamento (Figura 23.a) da marca Gefran, posicionado sobre o centro do dispositivo de distribuição do carregamento, obtendo leituras das deflexões no ponto de aplicação de carga. Além disso, utilizou-se dois extensômetros, um colado na face superior e outro na face inferior no meio do vão dos corpos de prova.

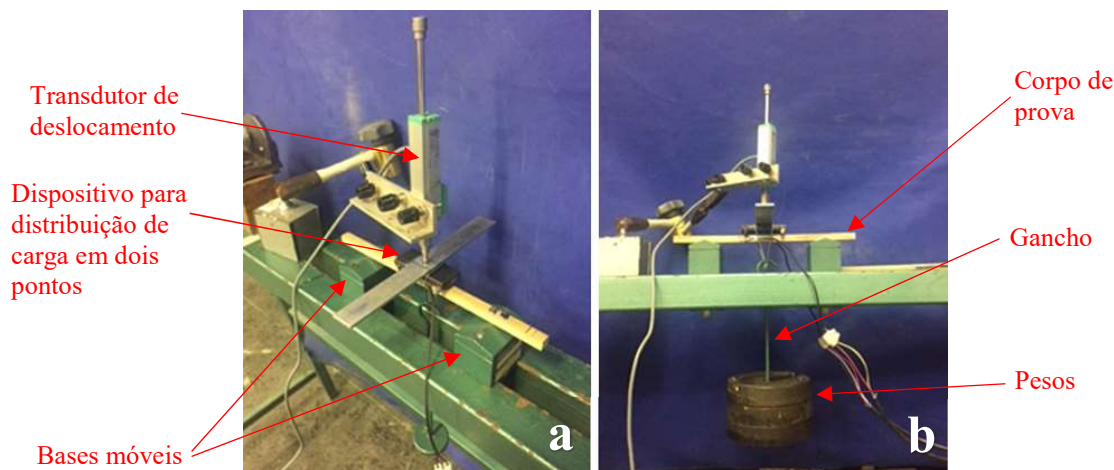


Figura 23 – Setup de ensaio de flexão sobre pórtico metálico.

Com as leituras dos carregamentos e respectivas deflexões para cada vão ensaiado foi possível empregar os conceitos adotados por Bank [42] para obtenção dos módulos de elasticidade e de cisalhamento na flexão, o qual adota o modelo de vigas de Timoshenko, considerando uma deflexão adicional produzida pela força cortante durante a flexão da viga. Logo:

$$\delta = \delta_{flexão} + \delta_{cisalhamento} \quad (3.4)$$

onde δ é a deflexão total da viga; $\delta_{flexão}$ é a parcela da deflexão produzida pelo momento fletor proveniente da teoria de vigas de Euler e $\delta_{cisalhamento}$ é a parcela da deflexão produzida pelo cortante.

Dessa forma, a expressão (3.4) da deflexão total no ponto de aplicação de carga para uma viga em flexão a 4 pontos fica como:

$$\delta = \frac{Pa}{6EI} (3aL - 4a^2) + \frac{kPa}{AG} \quad (3.5)$$

onde P é o carregamento aplicado; a é a distância do apoio ao ponto de aplicação de carga; L é o vão livre da viga; E é o módulo de elasticidade; I é o momento de inércia da seção; k é uma constante de cisalhamento que depende da forma da seção transversal; A é a área da seção transversal e G é o módulo de cisalhamento.

A critério de simplificação, considerou-se a seção transversal do bambu como sendo retangular, adotando-se $k = 3/2$. Portanto, isolando δ/Pa na expressão (3.5), tem-se:

$$\frac{\delta}{Pa} = \frac{1}{6EI} (3aL - 4a^2) + \frac{k}{AG} \quad (3.6)$$

Traçando um gráfico de δ/Pa versus $3aL - 4a^2$ e extraindo os coeficientes angular (m) e linear (n) da reta tem-se:

$$m = \frac{1}{6E} \quad (3.7)$$

$$n = \frac{k}{AG} \quad (3.8)$$

Portanto, isolando E e G nas expressões 3,7 e 3,8, respectivamente, obtêm-se simultaneamente seus valores. Ademais, para comparação, também foram obtidos os módulos de elasticidade pelas curvas de momento versus curvatura e pela equação da linha elástica.

3.3. Processamento e análise de imagens

Para aquisição das imagens foi utilizado microscópio estereoscópico Zeiss SteREO Discovery V8 com câmera Zeiss AxioCam ICc1.

As amostras foram observadas com 1x de magnificação no microscópio com intuito de abranger toda a área da amostra na imagem e então foram capturadas imagens para as condições de controle e após 3, 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem.

As imagens foram então processadas e analisadas usando o software livre Fiji [43], uma distribuição do popular software livre de processamento de imagens ImageJ [44]. O objetivo do processamento e análise das imagens é de medir a proporção de feixes vasculares e de matriz, constituintes de cada amostra, a fim de observar possíveis variações ocorridas após os ciclos. Para isso criou-se uma macro no Fiji [43] para automação da rotina de processamento e análise das imagens, que consta no Apêndice A.

Inicialmente foi necessário delimitar a área de interesse na imagem, a fim de excluir a imagem de fundo da resina do embutimento e obter apenas a imagem da seção transversal do bambu. Para isso criou-se uma seleção poligonal, cortou-se a imagem selecionada e ao fundo restante aplicaram-se pixels iguais a zero, gerando um fundo completamente preto, externo à seção do bambu (Figura 24.a). Em seguida, converteu-se a imagem para tons de cinza, 8-bit (Figura 24.b).

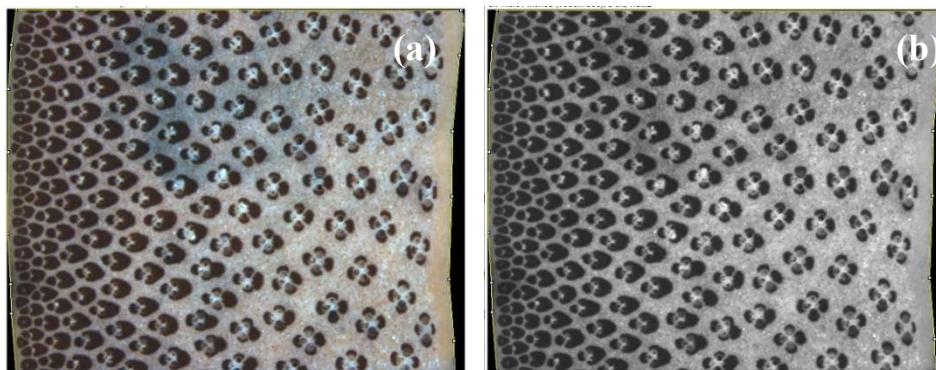


Figura 24 – Resultados da imagem após procedimentos de processamento: (a) imagem colorida da seção transversal do bambu e fundo preto aplicado; (b) imagem em tons de cinza.

Posteriormente, procedeu-se à etapa de segmentação da matriz parenquimatosa. Realizou-se uma segmentação utilizando o método de limiarização adaptativa de Phansalkar *et al.* [45], gerando uma imagem ainda com alguns ruídos no fundo (Figura 25.a). Para limpeza desses ruídos, foram realizadas as seguintes sequências de operações morfológicas: fechamento dos buracos, duas dilatações seguidas por duas erosões, gerando a imagem da Figura 25.b. Nessa imagem aparece em cor branca o tecido parenquimatoso, matriz do bambu, após segmentação.

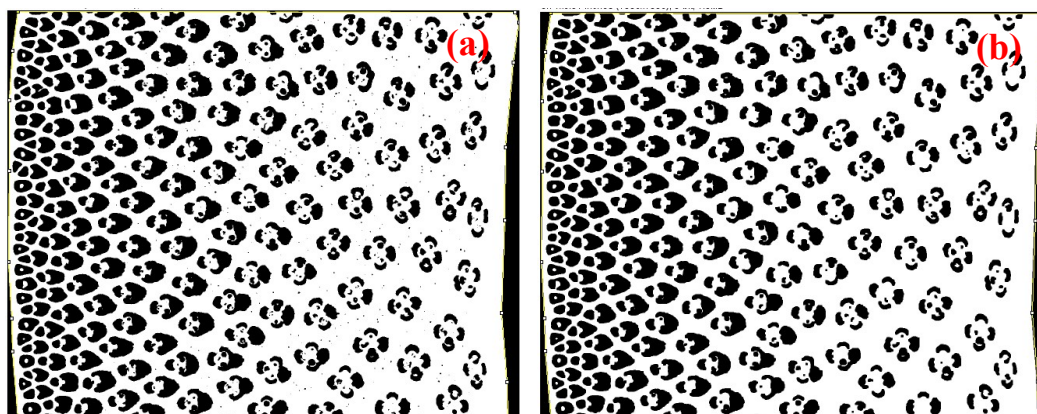


Figura 25 – Resultados da imagem após procedimentos de processamento: (a) imagem após segmentação de Phansalkar; (b) imagem com segmentação da matriz do bambu após limpeza de ruídos.

Em seguida, procedeu-se à segmentação dos feixes vasculares. Aplicando uma inversão na imagem da Figura 25.b, obteve-se a imagem segmentada dos feixes vasculares, mostrada na Figura 26.

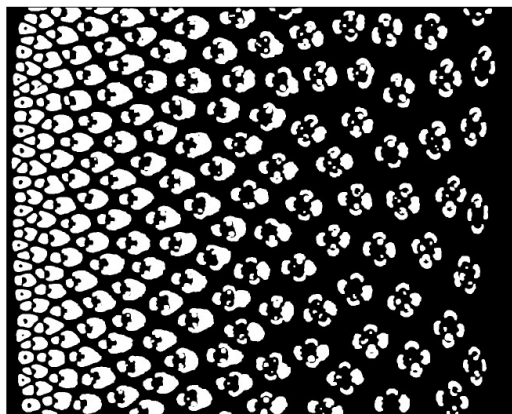


Figura 26 – Imagem com feixes vasculares segmentados.

Com as imagens segmentadas da matriz e dos feixes vasculares passou-se à etapa seguinte. Essa etapa iniciou-se com a divisão da largura da imagem em 5 faixas igualmente espaçadas, logo, todas as faixas possuindo mesma largura e com altura igual à altura total da imagem segmentada. As faixas foram então numeradas de 1 a 5. Posteriormente, prosseguiu-se à extração de atributos, onde foram extraídas informações de área de segmentos por faixa, gerando ao final uma tabela contendo todas essas informações de área de segmentos, em mm², ordenadas em ordem crescente, da faixa 1 a 5. Todos esses procedimentos foram realizados tanto na imagem com segmentação de matriz quanto na imagem com segmentação dos feixes vasculares do bambu. Dessa forma foi possível caracterizar a fração de feixes vasculares e de matriz ao longo da espessura do bambu (largura da imagem). Para automação de todos esses procedimentos foi criada uma nova macro, detalhada no Apêndice A.

A título de ilustração dos procedimentos descritos anteriormente, a Figura 27, mostrada a seguir, apresenta a divisão em faixas de uma imagem com segmentação dos feixes vasculares do bambu, mostrando as 5 faixas (Figura 27.a) e a tabela gerada ao final dos procedimentos, reunindo todas as áreas de segmentos, feixes vasculares, por faixa (Figura 27.b).

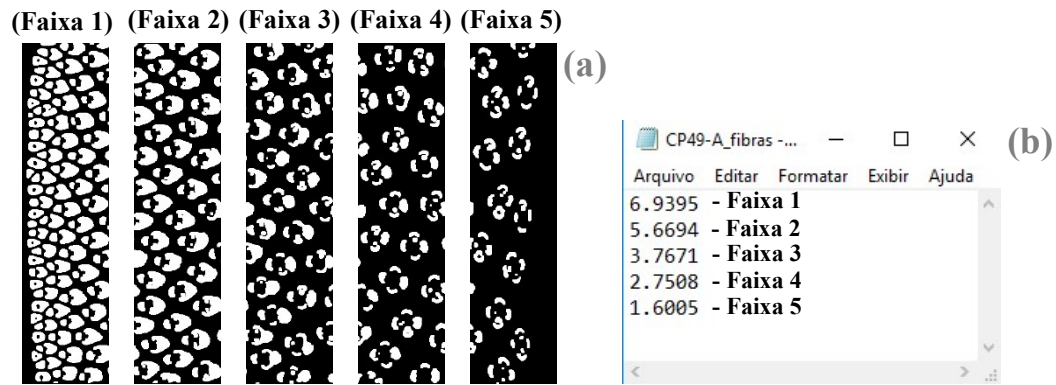


Figura 27 – Procedimentos de divisão das imagens em faixas e extração de atributos por faixa: (a) imagem com segmentação dos feixes vasculares do bambu, dividida em 5 faixas igualmente distribuídas na largura; (b) tabela com extração de informações de área de feixes vasculares (mm²) por faixa.

4

Resultados e discussão

Nesse item serão avaliados os resultados dos ciclos de molhagem-secagem sobre as propriedades físicas e mecânicas do bambu Moso estudado.

Primeiramente serão avaliados os efeitos de hornificação, através dos ciclos de molhagem-secagem, sobre as propriedades físicas do bambu por meio de análises das variações na capacidade de absorção e retenção de água ao longo dos ciclos de molhagem e secagem e, também, através de possíveis variações dimensionais dos revestimentos de fibras, ocorridas na seção transversal do bambu após a realização dos ciclos, por análise de imagens obtidas antes e ao final dos ciclos.

Posteriormente, será discutido o impacto da hornificação através dos ciclos de molhagem-secagem sobre as propriedades mecânicas do bambu, mais especificamente sobre as propriedades de flexão do bambu, como resistência à flexão, deformabilidade, módulo de elasticidade e modos de falha na flexão.

Por último será apresentada uma pequena análise do efeito do cisalhamento na flexão a 4 pontos.

4.1. Efeito da hornificação sobre as propriedades físicas do bambu

4.1.1. Sorção-Dessorção

Estudando os efeitos da hornificação, pelos ciclos de molhagem e secagem, sobre as propriedades físicas do bambu, inicia-se a análise pela variação do teor de umidade nos corpos de prova ao final de cada ciclo, representada na Figura 28.a-c, que ilustra os pontos de média dos teores de umidade dos corpos de prova ao longo de 3, 5 e 10 ciclos.

Nas Figura 28.a-c, os pontos situados acima da linha de teor de umidade natural, estado inicial, representam os teores de umidade após os ciclos de molhagem e os pontos situados abaixo dessa linha representam os teores de

umidade após os respectivos ciclos de secagem. Os dados completos de umidade com os ciclos são reportados no Apêndice B.

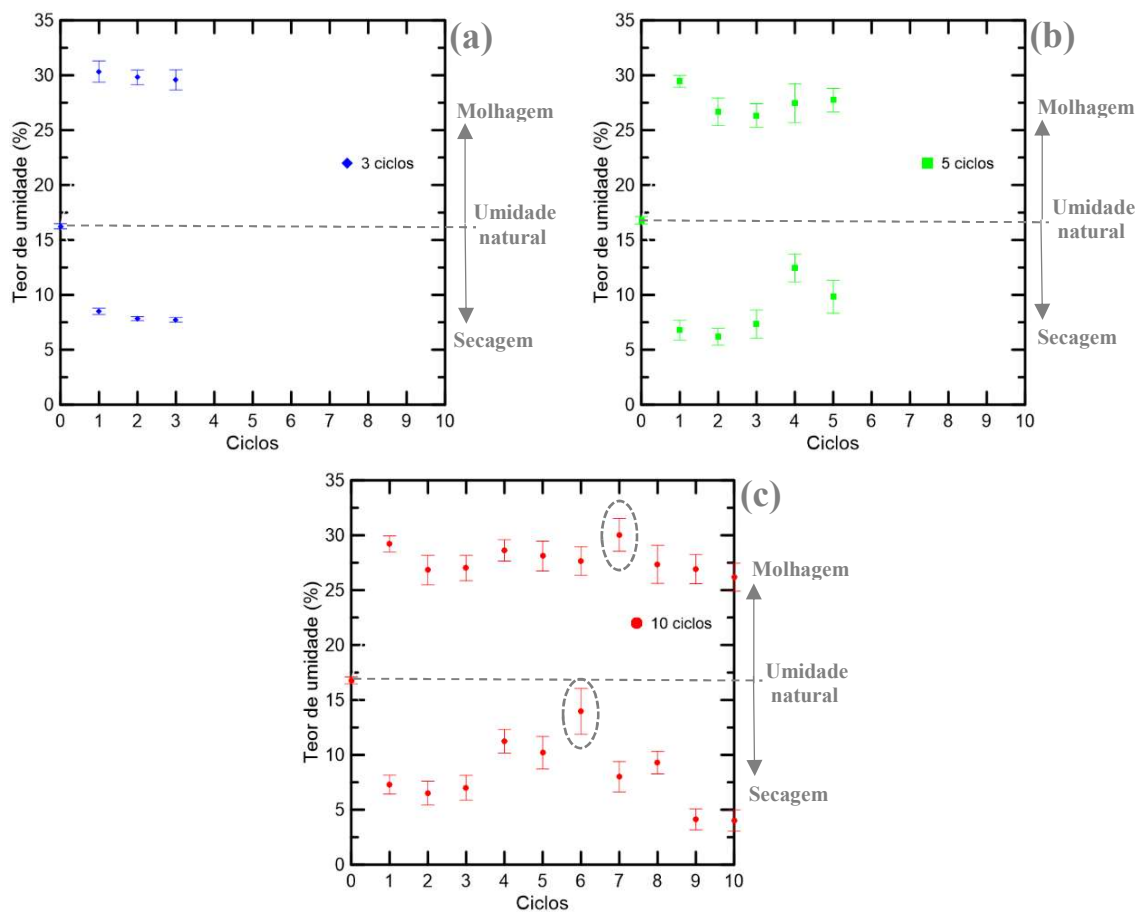


Figura 28 – Curvas dos teores de umidade médios versus ciclos de molhagem e secagem: (a) amostras que sofreram 3 ciclos; (b) amostras que sofreram 5 ciclos; (c) amostras que sofreram 10 ciclos.

Pela análise das Figura 28.a-c, percebe-se que as amostras partiram de uma condição inicial homogênea de teor de umidade, cerca de 16%, e, com o primeiro ciclo de molhagem, o comportamento de absorção de água foi semelhante, apresentando teores de umidade ao final do ciclo de molhagem próximos de 30%, quase atingindo o dobro do teor de umidade inicial.

Até o final do terceiro ciclo pode-se dizer que houve semelhança nos comportamentos de absorção e perda de umidade de todas as amostras, com diminuição de absorção e aumento da perda de umidade com o aumento dos ciclos.

Do quarto ao sexto ciclo, as amostras começaram a apresentar um aumento no teor de umidade após o ciclo de molhagem, proveniente de uma menor perda de umidade durante o ciclo de secagem precedente.

Vale ser feita uma observação a respeito do sexto ciclo de secagem, cujos corpos de prova apresentaram a menor perda de umidade, em comparação aos demais ciclos de secagem (pontos fora da curva - circulados na Figura 28.c). Tal fato ocorreu pois as amostras foram secas somente por 30 h em estufa a 50 °C e não 48 h conforme determinado para os ciclos de secagem. Foi necessária a antecipação do sétimo ensaio de molhagem devido a fatores externos que impediriam entrada na universidade no dia correto em que se iniciaria o sétimo ciclo. Portanto, os corpos de prova, após o sétimo ciclo de molhagem, apresentaram o maior teor de umidade.

Do oitavo ao décimo ciclo, as amostras voltaram a exibir redução da sua capacidade de absorção de água após a molhagem e aumento da perda de umidade com a secagem.

De forma geral, pelas curvas apresentadas na Figura 28 não é possível afirmar que houve redução da capacidade de absorção de água com os ciclos de molhagem e secagem por influência da hornificação das fibras pelos ciclos. Portanto, passa-se à análise do comportamento de retenção de água das amostras ao final de cada ciclo, ilustrada na Figura 29.a-c, que apresenta a porcentagem de água retida ao final de cada ciclo, obtida em relação à massa seca das amostras.

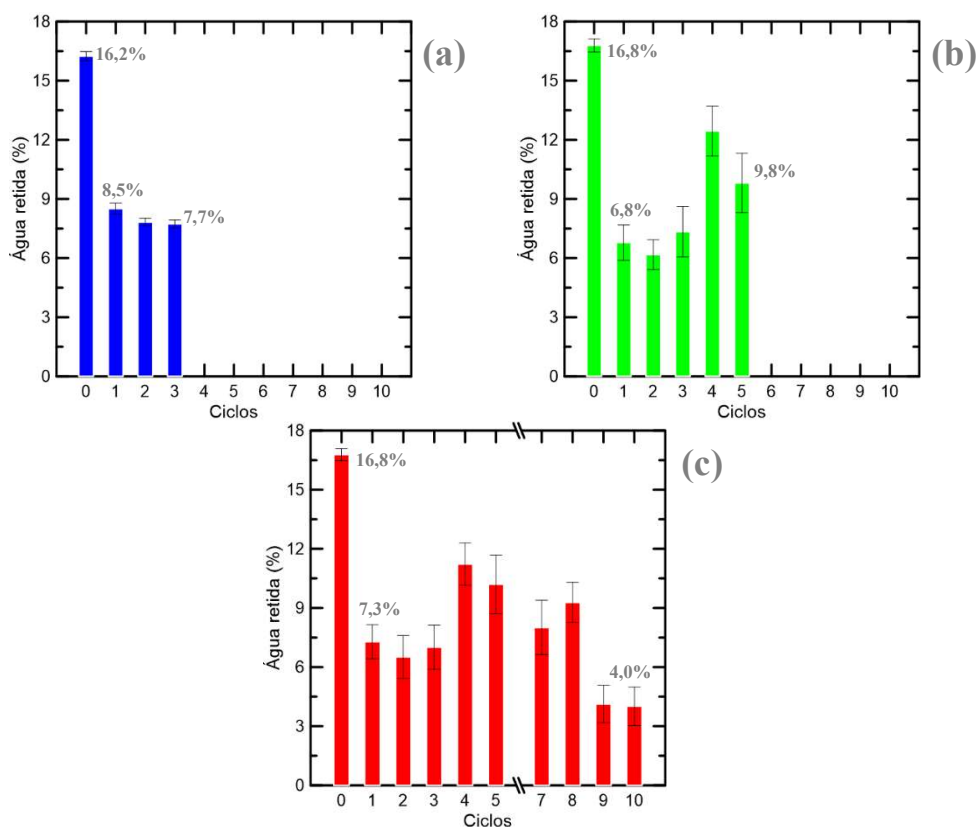


Figura 29 – Porcentagem de água retida versus ciclos: (a) amostras de 3 ciclos; (b) amostras de 5 ciclos; (c) amostras de 10 ciclos, com exclusão do 6º ciclo (ponto fora da curva).

Observa-se que, tanto para as amostras que sofreram um total de 3 ciclos (Figura 29.a), quanto para as de 10 ciclos (Figura 29.c), ocorreram reduções na capacidade de retenção de água entre o primeiro e último ciclo, sendo que a maior redução ocorreu ao final dos 10 ciclos. No caso dos 10 ciclos, a retenção de água passou de 7,3% para 4%, uma redução de 45%. Enquanto que com 3 ciclos, a retenção de água foi de 8,5% para 7,7%, uma redução de apenas 9,4%.

As Figura 29.b e Figura 29.c mostram uma tendência de comportamento semelhante até o quinto ciclo, onde houve um aumento na porcentagem de água retida em relação ao primeiro ciclo, tanto para os corpos de prova que sofreram um total de 5 ciclos quanto para os que sofreram um total de 10 ciclos.

Percebe-se, portanto, que após 3 e 10 ciclos de molhagem e secagem houve uma redução na capacidade de retenção de água das amostras, contudo, tal capacidade não foi observada após 5 ciclos.

4.1.2. Imagem da seção transversal

A fim de avaliar possíveis alterações dimensionais ocorridas nos feixes vasculares e matriz das amostras de bambu, resultantes dos ciclos de molhagem e secagem, foram analisadas imagens das seções transversais de amostras previamente selecionadas, obtidas anterior e posteriormente aos ciclos. Utilizando as técnicas de processamento e análise de imagens, foi construída a Tabela 5, onde estão apresentadas as frações de feixes vasculares e frações de matriz, ao longo de faixas igualmente distribuídas através da seção transversal das amostras. As respectivas frações de área foram obtidas com relação à área total da amostra.

A faixa de número 1 representa a parte mais exterior da parede do colmo, onde a concentração de feixes vasculares é maior e há uma menor quantidade de matriz, e a faixa de número 5, a porção mais interior da parede do colmo, cuja concentração de feixes é bem menor se comparada com a porção exterior. A Tabela 5 também traz as frações totais obtidas antes e após os ciclos.

Tabela 5 - Resumo das frações de área de feixes vasculares e matriz, por faixas distribuídas ao longo da seção transversal das amostras, antes e após os ciclos de molhagem e secagem.

Ciclos	N° CP	Faixa	Anterior aos ciclos		Posterior aos ciclos	
			Fração de matriz (%)	Fração de feixe (%)	Fração de matriz (%)	Fração de feixe (%)
3	38	1*	10,03	9,30	8,71	10,51
		2	12,93	7,95	11,86	8,80
		3	14,78	6,09	14,35	6,30
		4	16,10	4,77	16,00	4,64
		5**	15,50	2,56	16,14	2,70
		Total (%)	69,34	30,66	67,05	32,95
	41	1*	11,14	8,43	9,83	9,96
		2	12,86	7,41	12,70	7,80
		3	14,24	6,03	14,37	6,13
		4	15,93	4,33	16,02	4,48
		5**	16,62	3,00	15,62	3,08
		Total (%)	70,80	29,20	68,55	31,45
5	47	1*	9,98	10,18	7,63	11,54
		2	12,33	8,32	11,35	9,54
		3	14,64	6,00	13,99	6,87
		4	16,53	4,12	15,63	5,20
		5**	15,37	2,54	14,88	3,36
		Total (%)	68,84	31,16	63,49	36,51
	49	1*	10,21	9,68	9,70	10,10
		2	12,65	7,91	12,18	8,34
		3	15,31	5,25	14,34	6,16
		4	16,73	3,84	16,02	4,47
		5**	16,19	2,23	15,97	2,72
		Total (%)	71,09	28,91	68,21	31,79
10	54	1*	7,92	11,55	8,39	11,55
		2	10,73	9,87	10,57	10,16
		3	13,37	7,21	13,55	7,18
		4	15,61	4,94	15,78	4,95
		5**	16,12	2,67	15,25	2,61
		Total (%)	63,76	36,24	63,54	36,46
	55	1*	8,55	10,86	8,52	11,03
		2	11,37	9,00	11,44	9,07
		3	13,89	6,49	13,91	6,62
		4	15,63	4,74	15,74	4,81
		5**	16,31	3,15	15,78	3,08
		Total (%)	65,75	34,25	65,39	34,61

*Região interior da parede do colmo

**Região exterior da parede do colmo

Pelos dados apresentados na Tabela 5, percebe-se que após 3 e 5 ciclos de molhagem e secagem ocorreu uma variação dimensional dos feixes vasculares entre o estado natural, antes dos ciclos, e o estado após os ciclos, identificada através do aumento da fração de área dos feixes, que após 3 e 5 ciclos foram em média de 7% e 13%, respectivamente. Entretanto, após os 10 ciclos de molhagem e secagem, a variação dimensional dos feixes vasculares entre o estado inicial e o estado após os 10 ciclos foi muito pequena, mostrando ligeiro aumento menor do que 1%.

Com relação à fração de área de matriz, ocorreram reduções após os ciclos, de cerca de 3% e 6%, após 3 e 5 ciclos, respectivamente, e redução quase insignificante após 10 ciclos, cerca de 0,5%.

Investigando de forma mais minuciosa essa variação dimensional, fez-se uma análise visual dos feixes de fibras após os ciclos, a fim de selecionar regiões semelhantes de feixes de fibras, entre a imagem obtida da amostra de controle (sem sofrer ciclos) e a imagem da amostra após sofrer os ciclos de molhagem e secagem.

As imagens contendo os mesmos feixes de fibras, previamente escolhidos para essas duas situações, antes e após os ciclos, foram analisadas e processadas através do software Fiji [43], com seus revestimentos semelhantes igualmente enumerados e suas áreas medidas para comparação.

Iniciando a análise pelas amostras que sofreram 3 ciclos de molhagem e secagem, a Figura 30 traz a imagem obtida para a amostra de controle (Figura 30.a) e para a amostra após 3 ciclos (Figura 30.b).

O retângulo de cor vermelha em cada imagem destaca as regiões com os mesmos feixes vasculares. Essas regiões são mostradas de forma mais ampliada abaixo das respectivas imagens (Figura 30.a-1 e Figura 30.b-1), juntamente com as imagens após processamento, contendo as numerações adotadas para os feixes de fibras (Figura 30.a-2 e Figura 30.b-2).

Na Tabela 6 estão apresentadas as áreas medidas dos feixes de fibras no estado inicial e no estado após os 3 ciclos de molhagem e secagem. Procedimento semelhante ao das amostras que sofreram 3 ciclos foi realizado para as amostras que sofreram 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem, com imagens de suas amostras ilustradas nas Figura 31 e Figura 32, respectivamente, e nas Tabela 7 e Tabela 8, trazendo as respectivas áreas dos feixes de fibras.

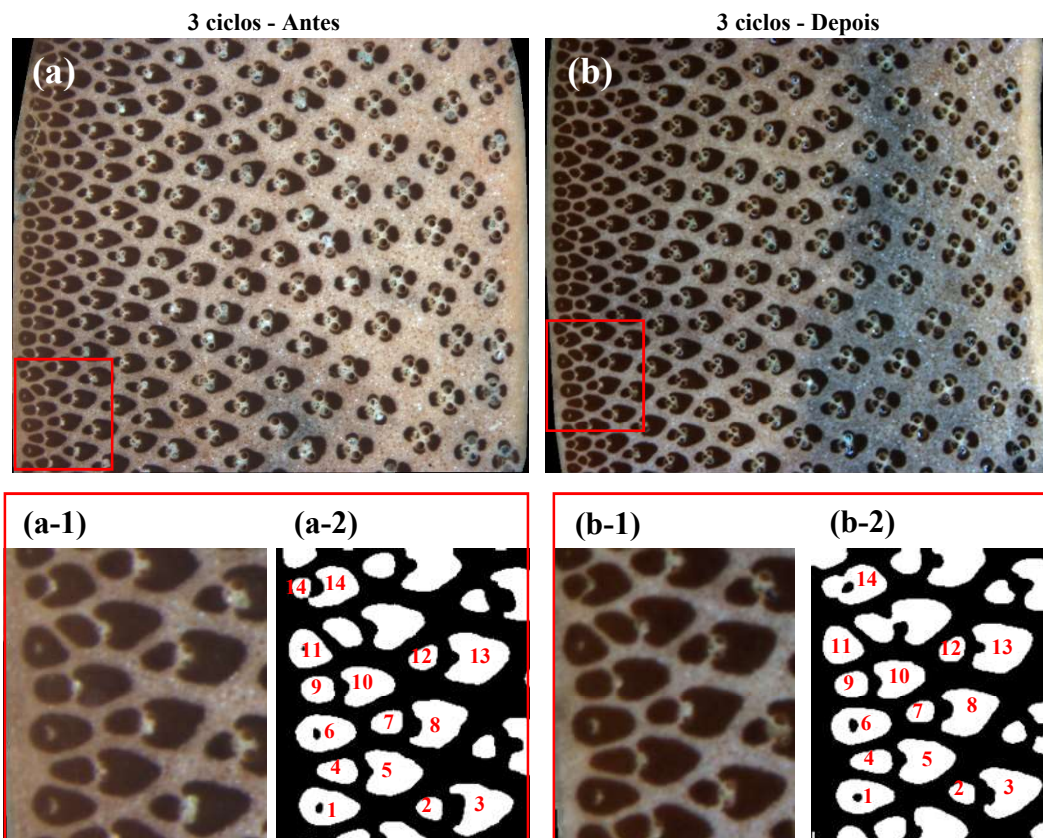


Figura 30 – Análise de imagens de feixes de fibras para amostras de 3 ciclos: (a) imagem da amostra de controle; (a-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra de controle; (a-2) imagem da amostra de controle, pós-processamento, com feixes de fibras numerados; (b) imagem amostra após 3 ciclos; (b-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra após 3 ciclos; (b-2) imagem da amostra após 3 ciclos, pós-processamento, com feixes de fibras numerados.

Tabela 6 – Área dos feixes de fibras medidos nas imagens antes (inicial) e após os 3 ciclos.

Nº do feixe de fibras	Área inicial (mm ²)	Área após 3 ciclos (mm ²)	Redução de área após ciclos (%)
1	0,061	0,056*	8
2	0,018	0,017*	5
3	0,076	0,078	-
4	0,029	0,030	-
5	0,072	0,073	-
6	0,062	0,063	-
7	0,023	0,019*	17
8	0,072	0,076	-
9	0,029	0,028*	3
10	0,059	0,058*	2
11	0,045	0,045	-
12	0,020	0,020	-
13	0,089	0,088*	1
14	0,062	0,064	-

*Área do feixe de fibras reduzida após os ciclos.

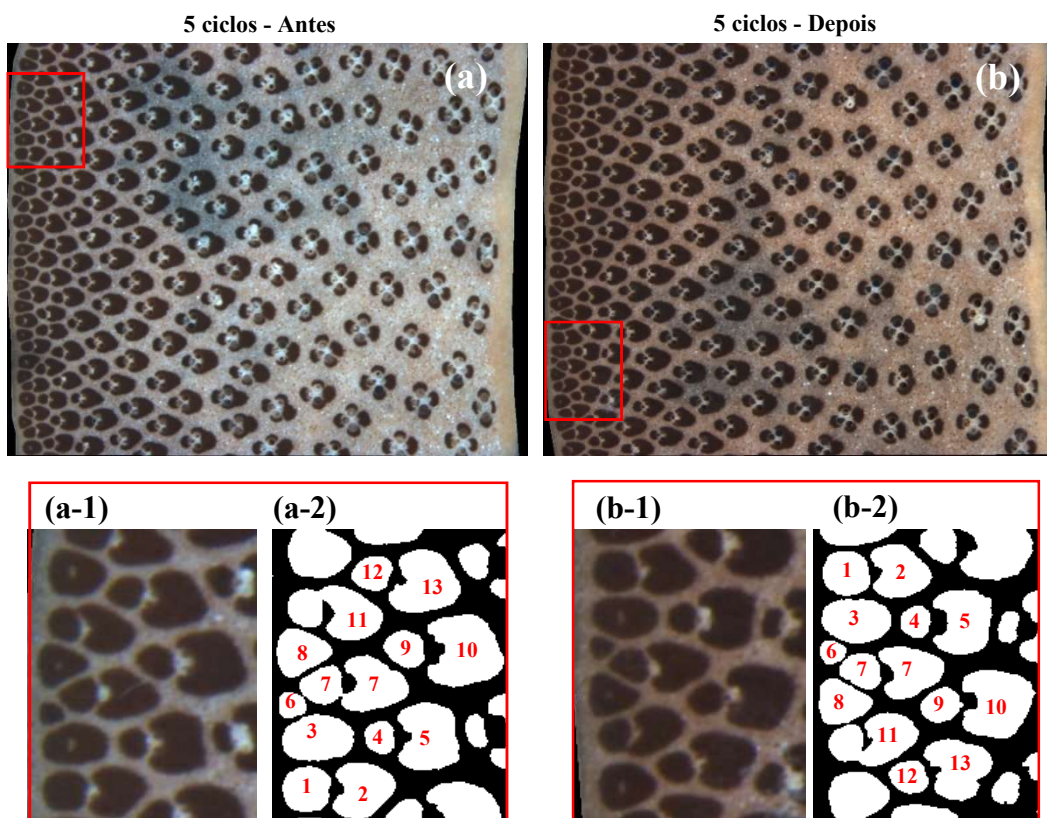


Figura 31 - Análise de imagens de feixes de fibras para amostras de 5 ciclos: (a) imagem da amostra de controle; (a-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra de controle; (a-2) imagem da amostra de controle, pós-processamento, com feixes de fibras numerados; (b) imagem amostra após 5 ciclos; (b-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra após 5 ciclos; (b-2) imagem da amostra após 5 ciclos, pós-processamento, com feixes de fibras numerados.

Tabela 7 - Área dos feixes de fibras medidos nas imagens antes (inicial) e após os 5 ciclos.

Nº do feixe de fibras	Área inicial (mm ²)	Área após 5 ciclos (mm ²)	Redução de área após ciclos (%)
1	0,047	0,048	-
2	0,068	0,067*	1
3	0,070	0,069*	1
4	0,021	0,022	-
5	0,087	0,083*	5
6	0,015	0,014*	7
7	0,102	0,099*	3
8	0,050	0,050	-
9	0,031	0,030*	3
10	0,108	0,106*	2
11	0,091	0,089*	2
12	0,029	0,028*	3
13	0,086	0,081*	6

*Área do feixe de fibras reduzida após os ciclos.

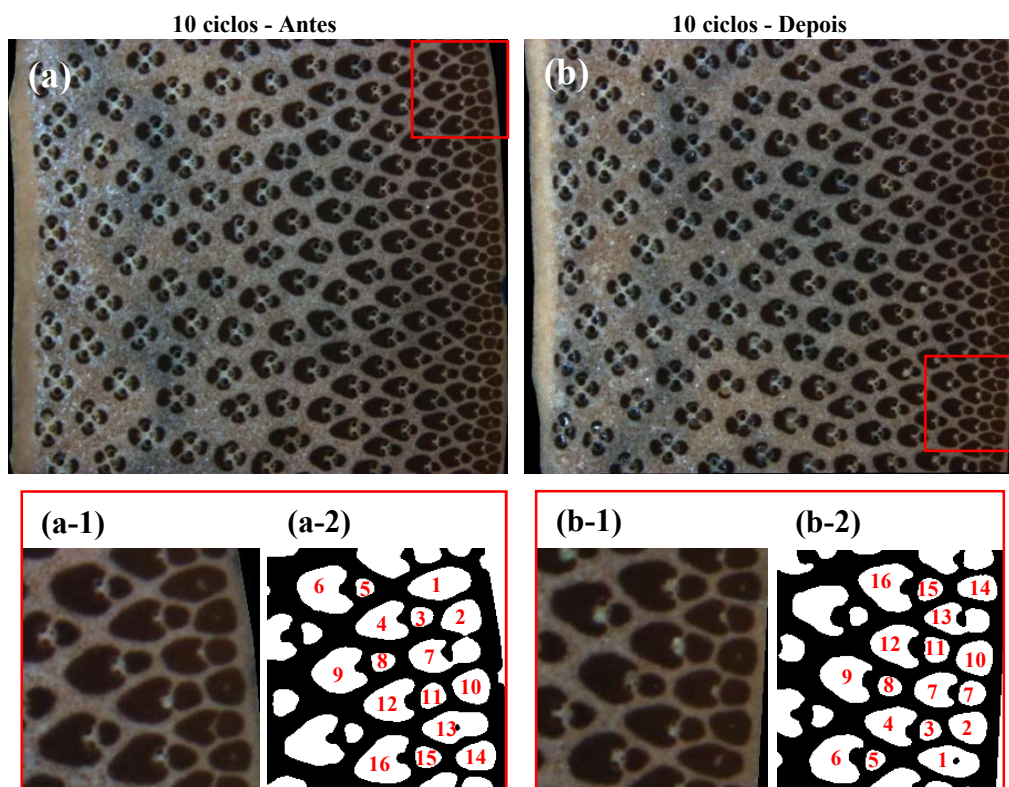


Figura 32 - Análise de imagens de feixes de fibras para amostras de 10 ciclos: (a) imagem da amostra de controle; (a-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra de controle; (a-2) imagem da amostra de controle, pós-processamento, com feixes de fibras enumerados; (b) imagem amostra após 10 ciclos; (b-1) imagem ampliada da área selecionada na amostra após 10 ciclos; (b-2) imagem da amostra após 10 ciclos, pós-processamento, com feixes de fibras numerados.

Tabela 8 - Área dos feixes de fibras medidos nas imagens antes (inicial) e após 10 ciclos.

Nº do feixe de fibras	Área inicial (mm ²)	Área após 10 ciclos (mm ²)	Redução de área após ciclos (%)
1	0,068	0,061*	10
2	0,049	0,044*	10
3	0,017	0,017	-
4	0,064	0,061*	5
5	0,012	0,014	-
6	0,087	0,083*	5
7	0,074	0,073*	1
8	0,017	0,017	-
9	0,081	0,077*	5
10	0,047	0,046*	2
11	0,023	0,023	-
12	0,068	0,064*	6
13	0,069	0,060*	13
14	0,042	0,036*	14
15	0,020	0,020	-
16	0,086	0,080*	7

*Área do feixe de fibras reduzida após os ciclos.

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentadas anteriormente mostram tendências aparente de reduções na área superficial dos feixes de fibras das amostras de bambu após os ciclos. Esse comportamento pode ser explicado pelo processo de hornificação devido aos ciclos de molhagem e secagem. De acordo com Diniz *et al.* [36], o processo de hornificação leva a um arranjo mais unido das microfibrilas após a secagem, reduzindo os vazios capilares das fibras e sua área superficial. Nesse sentido, Ferreira *et al.* [10], através de imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, também constataram um maior empacotamento das fibrocélulas de sisal, com redução de seus lúmens, após ciclos de molhagem e secagem, e uma redução da área superficial das fibras.

Portanto, é possível constatar a ocorrência do processo de hornificação sobre as fibras do bambu através dos ciclos de molhagem e secagem, o qual resultou em reduções nas capacidades de absorção e retenção de água, seguido por reduções na área superficial dos feixes de fibras. Todavia, seriam necessárias análises de imagens com maior magnificação, para obtenção de maiores detalhes do efeito da hornificação pelos ciclos sobre as fibrocélulas do bambu, inspecionando suas seções transversais a fim de observar variações ocorridas nas paredes e lúmen das fibrocélulas decorrentes dos ciclos.

4.2. Efeito da hornificação sobre as propriedades de flexão do bambu

A Tabela 9 traz os valores médios das propriedades físicas dos corpos de prova antes da realização dos ensaios de flexão. Mais detalhes são fornecidos no Apêndice C.

Tabela 9 – Valores médios das propriedades físicas dos corpos de prova antes dos ensaios de flexão.

Ciclos	Posição no ensaio de flexão	Largura		Espessura		Densidade		Teor de umidade natural	
		Média (mm)	Desv. pad. (mm)	Média (mm)	Desv. pad. (mm)	Média (g/cm ³)	Desv. pad. (g/cm ³)	Média (%)	Desv. pad. (%)
0	região exterior tracionada	10,0	0,1	8,2	0,3	0,90	0,03	16,5	0,1
3		9,6	0,1	7,7	0,2	0,91	0,04	16,2	0,2
5		9,2	0,3	8,4	0,4	0,88	0,01	16,8	0,3
10		8,9	0,2	8,6	0,4	0,86	0,01	16,6	0,1
0	região interior tracionada	9,9	0,1	8,2	0,3	0,89	0,01	16,4	0,2
3		10,0	0,2	7,9	0,3	0,89	0,01	16,3	0,2
5		9,4	0,3	8,3	0,5	0,85	0,03	16,8	0,4
10		9,1	0,2	8,0	0,0	0,85	0,02	17,0	0,3

Inicia-se a discussão dos resultados dos ensaios de flexão pelas curvas de carga versus deslocamento vertical (deflexão) no ponto de aplicação de carga, ilustradas na Figura 33, para as amostras de controle, 3, 5 e 10 ciclos, mostrando tanto as curvas obtidas no ensaio de flexão com a região interior da parede do colmo sob tração, quanto as curvas obtidas dos ensaios com a região exterior da parede do colmo sob tração.

Pelas curvas apresentadas na Figura 33, é possível perceber que em todos os casos, tanto para controle quanto após os ciclos, os corpos de prova ensaiados com a porção interior da parede do colmo sob tração (curvas de cor cinza), apresentaram um comportamento frágil e romperam durante o ensaio de flexão. Enquanto isso, os corpos de prova ensaiados com a porção exterior da parede do colmo sob tração (curvas em preto) apresentaram um comportamento mais dúctil, com uma deflexão muito superior. Muitos corpos de prova ensaiados nessa condição não chegaram a apresentar uma ruptura clara, tendo sido o ensaio interrompido após grandes deflexões terem sido obtidas (> 40 mm).

A explicação para essas diferenças de comportamento está na anatomia do colmo do bambu, ou seja, na diferença de concentração de fibras, cuja porção mais interior da parede do colmo apresenta uma baixa concentração de fibras, o que leva a uma ruptura brusca dos corpos de prova, sem muitos avisos. Por outro lado, a porção exterior da parede do colmo possui uma densa concentração de fibras, tornando-se uma região com maior deformabilidade.

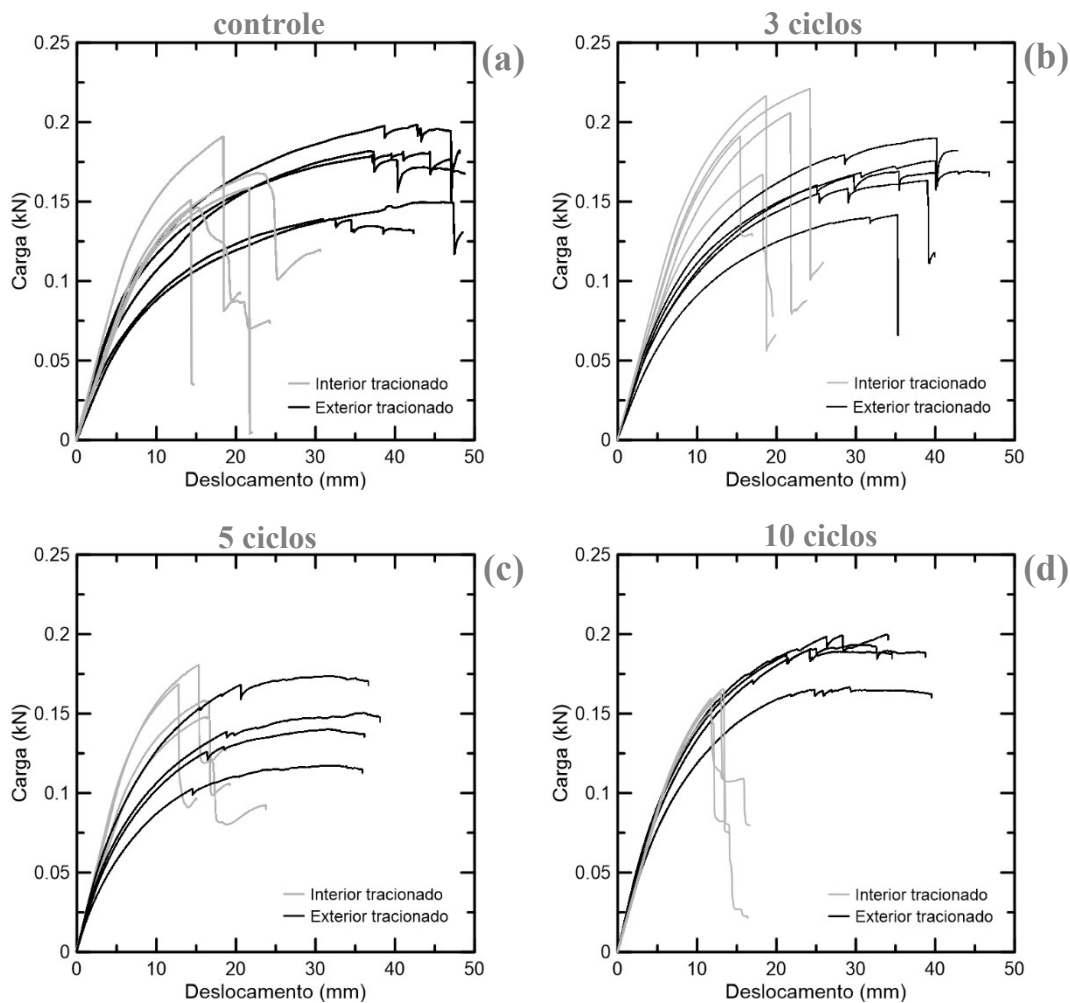


Figura 33 - Curvas de carga versus deslocamento vertical dos ensaio de flexão à 4 pontos: (a) corpos de prova de controle; (b) corpos de prova após 3 ciclos de molhagem-secagem; (c) corpos de prova após 5 ciclos de molhagem-secagem; (d) corpos de prova após 10 ciclos de molhagem-secagem.

De modo a melhor visualizar os efeitos dos ciclos e da posição da parede do colmo do bambu, durante ensaio de flexão, sobre a deformabilidade dos corpos de prova, apresenta-se na Figura 34 os valores médios das deflexões últimas ($\Delta_{\text{últ}}$) versus número de ciclos de molhagem e secagem, obtidos para os corpos de prova ensaiados com a parede interior do colmo sob tração (Figura 34.a) durante ensaio de flexão, e para os corpos de prova ensaiados com a parede exterior sob tração (Figura 34.b). Nesse último caso, para os corpos de prova que não apresentaram ruptura clara, foi adotado como deflexão última a média das máximas deflexões atingidas.

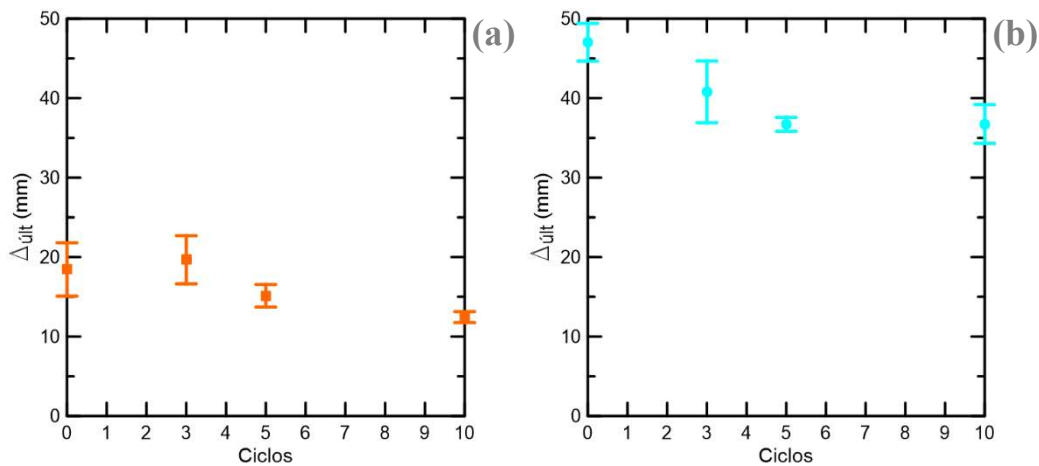


Figura 34 - Valores médios das deflexões últimas ($\Delta_{últ}$) versus ciclos de molhagem-secagem: (a) corpos de prova ensaiados com a região interior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão; (b) corpos de prova ensaiados com a região exterior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão.

Comparando os valores médios das deflexões últimas, apresentados na Figura 34.a com os da Figura 34.b, percebe-se claramente que o ensaio de flexão realizado nos corpos de prova com a porção exterior da parede do colmo sob tração (Figura 34.b), apresentaram as maiores deflexões. Entretanto, com os ciclos de molhagem-secagem, houve uma redução dos valores médios das deflexões últimas com os ciclos. Essas reduções foram de aproximadamente 13% após 3 ciclos e cerca de 22% após ambos 5 e 10 ciclos, todas com relação aos valores médios de deflexão das amostras de controle.

Comportamento semelhante ocorreu após 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem para as amostras ensaiadas com a porção interior da parede do colmo sob tração, apresentando reduções nas deflexões últimas de cerca de 18% e 32%, respectivamente, quando comparadas às de controle. Para as amostras ensaiadas com a parede interior do colmo sob tração, após 3 ciclos houve um leve aumento da deflexão última, cerca de 6%, em relação às amostras de controle. Mais detalhes sobre os ensaios são apresentados no Apêndice D.

Diante disso, conforme constatado por Obataya *et al.* [33], pode-se dizer que o tipo de orientação da seção transversal do colmo do bambu no ensaio de flexão, alterou a ductilidade do bambu, mostrando melhor comportamento a orientação de ensaio com a maior concentração de fibras, parede exterior do colmo, sob tração durante o ensaio, onde consegue-se alcançar uma maior deformabilidade do material. Por outro lado, os ciclos de molhagem e secagem, de modo geral, afetaram a deformabilidade do bambu, com reduções nas deflexões, em ambas orientações

de ensaio. Provavelmente, o aumento na rigidez com os ciclos, no regime linear do ensaio, pode ter tido impacto na redução das flechas. Esse ganho de rigidez será investigado em detalhes mais adiante.

Também vale destacar que as cargas últimas obtidas no ensaio de flexão com a parede exterior do colmo sob tração, foram bem inferiores àsquelas obtidas pelo ensaio com a parede interior do colmo posicionada na zona tracionada, com exceção das amostras ensaiadas após 10 ciclos, as quais alcançaram maiores cargas de flexão, conforme ilustrado anteriormente na Figura 33.

Nesse sentido, a fim de eliminar possíveis efeitos da geometria, são avaliados os efeitos dos ciclos sobre a resistência última à flexão ($\sigma_{f,ult}$) das amostras, através do traçado dos valores médios de resistência à flexão versus ciclos de molhagem e secagem, ilustrados na Figura 35.

A Figura 35.a contempla as médias da resistência à flexão para os corpos de prova ensaiados com a região interior da parede do colmo sob tração durante ensaio e a Figura 35.b, as resistências à flexão para os corpos de prova com a região exterior sob tração.

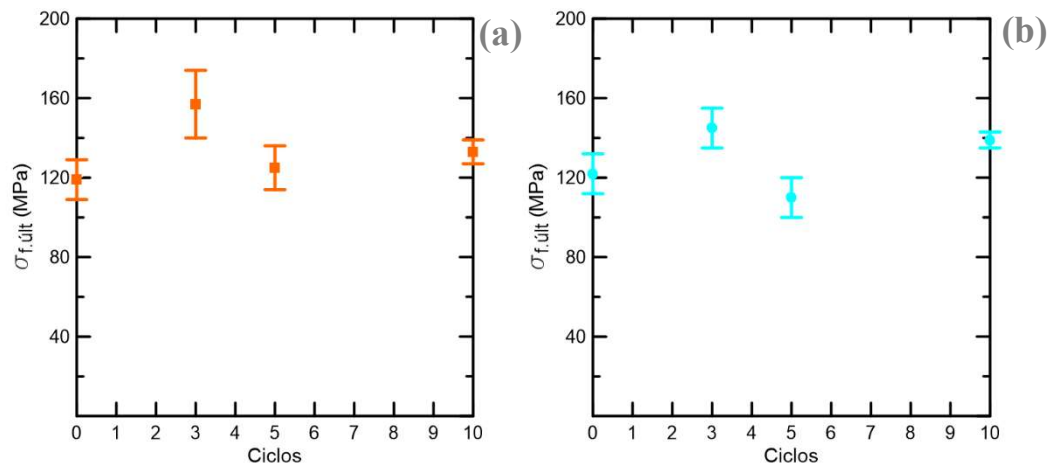


Figura 35 – Valores médios das resistências à flexão última ($\sigma_{f,ult}$) versus ciclos de molhagem-secagem: (a) corpos de prova ensaiados com a região interior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão; (b) corpos de prova ensaiados com a região exterior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão.

Pela Figura 35, verifica-se que houve um ganho de resistência médio para as amostras após 3 ciclos de molhagem e secagem em comparação às amostras de controle, com ganho de aproximadamente 30% para as amostras ensaiadas com a parede interior sob tração e de cerca de 18% para as amostras ensaiadas com a parede exterior sob tração.

Com 5 ciclos, houve uma redução da resistência última para as amostras ensaiadas com a parede exterior sob tração (Figura 35.b), as quais apresentaram uma resistência média à flexão bem abaixo da resistência média das amostras de controle, com uma redução de cerca 10% da resistência após os 5 ciclos. Por outro lado, as amostras ensaiadas com a parede interior sob tração (Figura 35.a), mostraram um discreto aumento da resistência após os 5 ciclos de molhagem e secagem, cerca de 5%, quando comparadas às de controle.

Ao final dos 10 ciclos o melhor comportamento apresentado foi das amostras ensaiadas com a parede exterior sob tração, alcançando cerca de 14% de ganho de resistência, contra um ganho de 12% das amostras ensaiadas com a parede interior sob tração. Todos esses valores são apresentados em detalhes no Apêndice D.

Essas ocorrências mostram que, após 3 e 10 ciclos de molhagem e secagem, foi possível melhorar a resistência à flexão do bambu, fruto dos prováveis efeitos de hornificação das fibras com os ciclos.

Passando agora à última análise, dos efeitos dos ciclos de molhagem e secagem sobre o comportamento à flexão do bambu, investiga-se possíveis variações no módulo de elasticidade à flexão do bambu, E , após os ciclos.

Na Figura 36 estão representadas as curvas típicas de momento versus curvatura para o corpos de prova de controle, 3, 5 e 10 ciclos, tanto os ensaiados à flexão com a parede exterior do colmo sob tração, quanto os ensaiados com a parede interior do colmo sob tração, identificados pelas cores laranja e azul claro, respectivamente. As curvas de cada um dos ensaios são reportadas no Apêndice E.

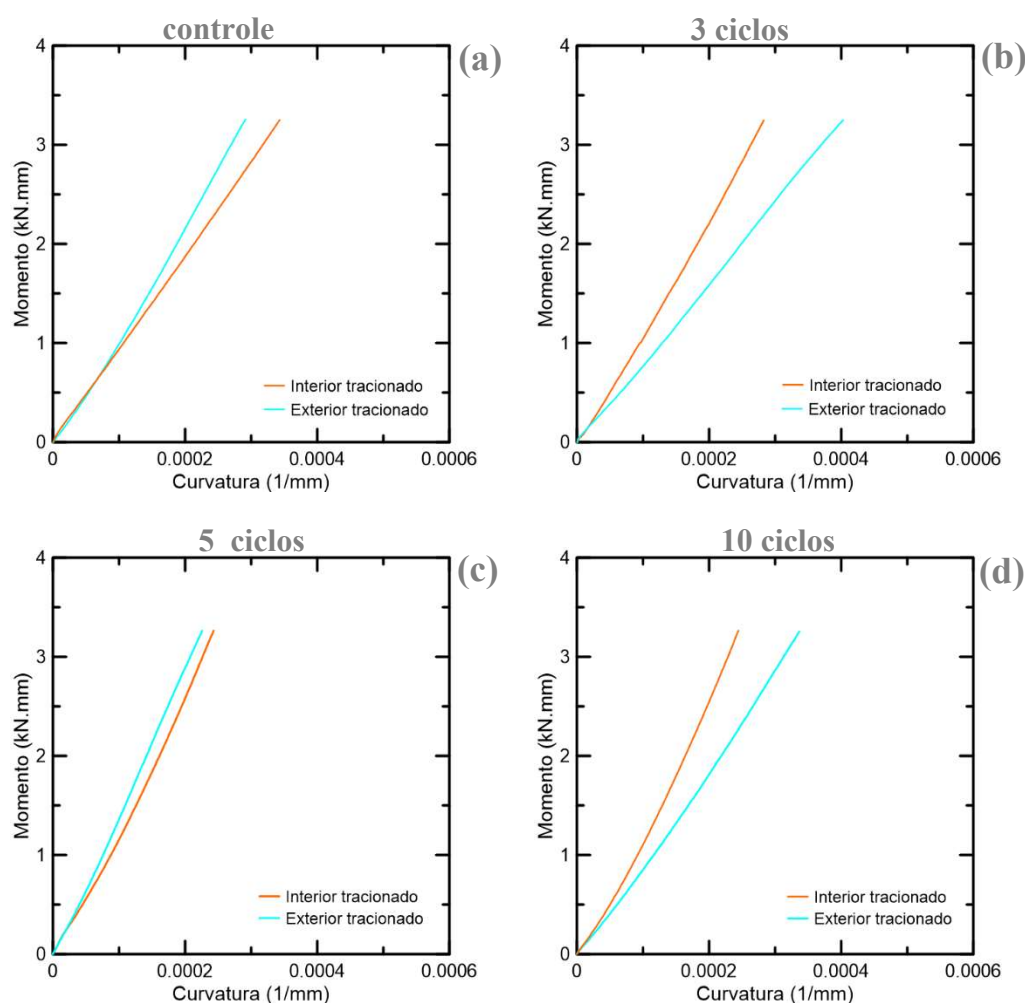


Figura 36 – Intervalo linear adotado para determinação do E na flexão: (a) corpos de prova de controle; (b) corpos de prova após 3 ciclos; (c) corpos de prova após 5 ciclos; (d) corpos de prova após 10 ciclos.

A partir dos coeficientes angulares extraídos da região linear dos gráficos de momento versus curvatura dos corpos de prova, foram obtidos valores de E na flexão, mostrados em resumo na Tabela 10, com seus valores médios para cada condição de ensaio e ciclo. Para detalhes ver Apêndice F.

Tabela 10 – Resultados dos módulos de elasticidade na flexão (E).

Ciclos	Posição no ensaio de flexão	Média E (GPa)	Desvio Padrão E (GPa)
0	região exterior tracionada	18,46	4,68
3		20,43	2,34
5		31,35	3,81
10		25,74	2,06
0	região interior tracionada	19,31	2,27
3		20,75	2,12
5		32,01	3,21
10		30,44	3,90

Para melhor interpretação do efeito dos ciclos sobre o E , estão representados na Figura 37 os valores médios dos módulos de elasticidade com relação aos ciclos.

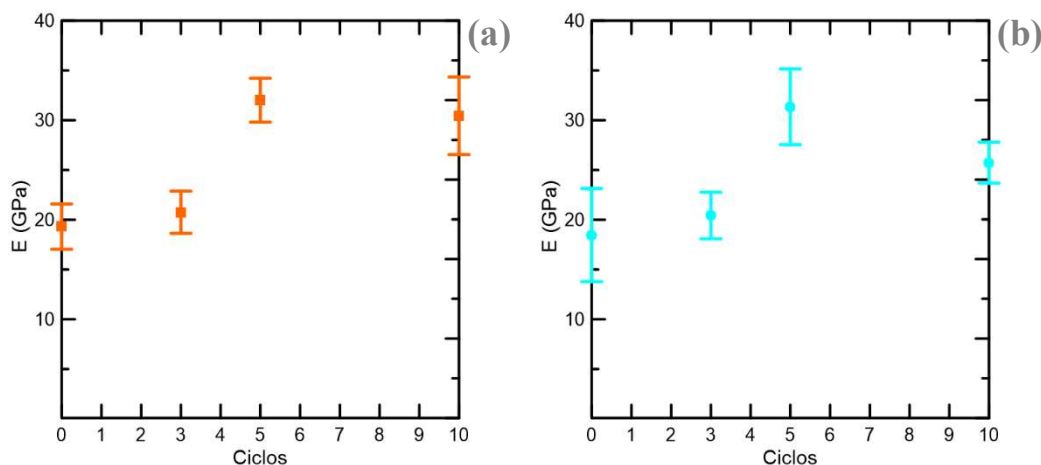


Figura 37 - Valores médios dos módulos de elasticidade na flexão (E) versus ciclos de molhagem-secagem: (a) corpos de prova ensaiados com a região interior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão; (b) corpos de prova ensaiados com a região exterior da parede do colmo sob tração durante ensaio de flexão.

Inicialmente, para as amostras de controle (sem ciclos), as duas condições de ensaio de flexão, parede interior e exterior do colmo posicionadas na zona tracionada, apresentaram valores médios dos módulos de elasticidade muito próximos, 19,3 GPa e 18,5 GPa, respectivamente.

Entretanto, esses valores foram maiores do que os obtidos nos estudos de Obataya *et al.* [33], que encontraram módulos de elasticidade entre 15 e 16 GPa para o bambu Moso, obtidos também por curvas de momento versus curvatura. Essas diferenças encontradas podem ocorrer devido a grande variabilidade do material natural, com fatores como a idade, a posição do colmo, o teor de umidade e o local de crescimento da espécie, os quais contribuem para essa variabilidade.

Com 3 ciclos houve um leve aumento dos módulos, subindo para 20,7 GPa no ensaio com a parede interior do colmo posicionada na zona tracionada e 20,4 GPa para ensaio com a parede exterior na zona tracionada, aumentos respectivos de aproximadamente 7% e 10% em relação às amostras de controle.

Após 5 ciclos foram alcançados os maiores ganhos nos módulos de elasticidade, cerca de 65% no ensaio de flexão com a parede interior tracionada, contra quase 70% no ensaio com a parede exterior tracionada, quando comparados às amostras de controle.

Entre 5 e 10 ciclos ocorreu uma queda nos valores médios do módulo de elasticidade, mas ainda alcançando aumentos de cerca de 57% e 40% para ensaios com a parede interior e exterior tracionadas, respectivamente, em comparação às amostras de controle.

Diante dos resultados dos efeitos da hornificação sobre o comportamento à flexão do bambu, pode-se concluir que os ciclos de molhagem e secagem proporcionaram aumento da rigidez do material, principalmente após 5 e 10 ciclos, onde foram alcançados os maiores módulos de elasticidade na flexão, tanto para ensaios de flexão realizados com a porção mais interior da parede do colmo sob tração, quanto com a porção mais exterior da parede do colmo sob tração.

4.2.1. Modos de falha na flexão

Iniciando a abordagem dos modos de falha típicos, observados para os corpos de prova de controle e após 3, 5 e 10 ciclos de molhagem-secagem, durante ensaio de flexão com a parede interior do colmo (menor presença de fibras) sob tração, pode-se destacar os seguintes modos de falha:

- Controle:
 - (a) ruptura no ponto de aplicação de carga, na zona tracionada, onde momento fletor e esforço cortante são máximos, portanto, ruptura por tração e cisalhamento da região interior da parede do colmo (Figura 38.a);
 - (b) ruptura próxima ao vão central, por tração da região interior da parede do colmo (Figura 38.b).

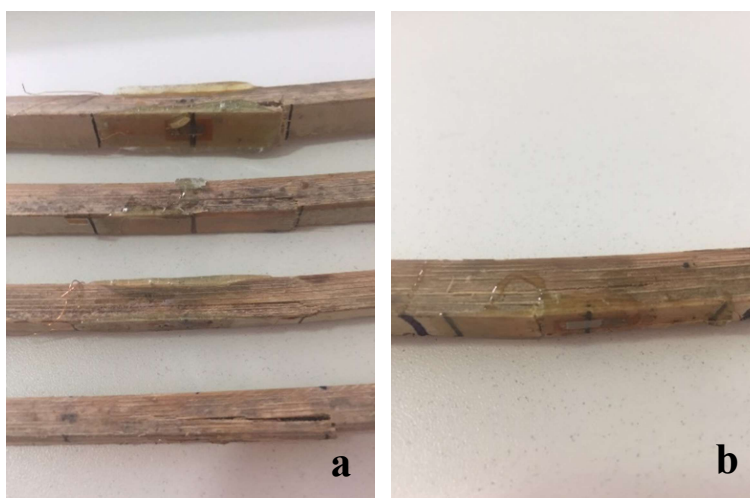


Figura 38 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova de controle, com a região interior sob tração: (a) modo de ruptura por tração e cisalhamento da região interior; (b) modo de ruptura por tração da região interior.

- 3 ciclos: ruptura na região tracionada, entre os pontos de aplicação de carga, onde o momento fletor atinge valor máximo, logo, ruptura por tração da região interior da parede do colmo (Figura 39).



Figura 39 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova ensaiados após 3 ciclos de molhagem-secagem, com a região interior sob tração.

- 5 ciclos:
 - (a) ruptura da zona tracionada, no ponto de aplicação de carga, onde momento fletor e esforço cortante são máximos, portanto, ruptura por tração e cisalhamento da região interior da parede do colmo (Figura 40.a);
 - (b) ruptura da zona tracionada, próxima ao vão central, portanto, ruptura por tração da zona interior (Figura 40.b).

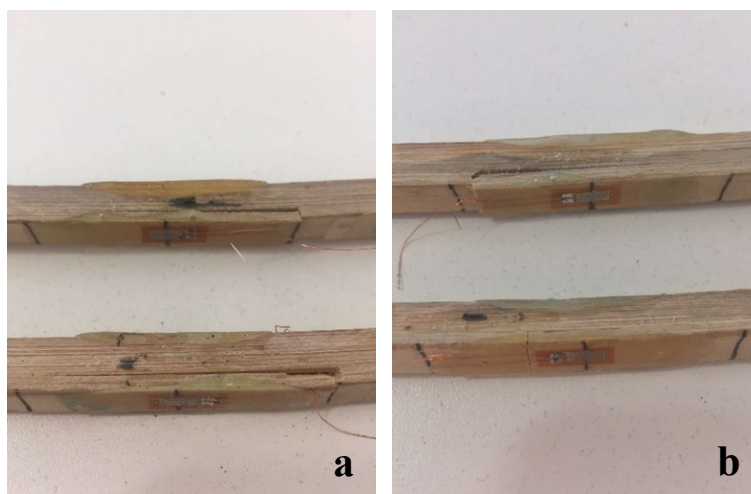


Figura 40 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova ensaiados após 5 ciclos de molhagem-secagem, com a região interior sob tração: (a) modo de ruptura por tração e cisalhamento da região interior; (b) modo de ruptura por tração da região interior.

- 10 ciclos:

(a) ruptura da zona tracionada, no ponto de aplicação de carga, onde momento fletor e esforço cortante são máximos, portanto, ruptura por tração e cisalhamento da região interior da parede do colmo (Figura 41.a);

(b) ruptura da zona tracionada, no vão entre aplicação de cargas, portanto, ruptura por tração da região interior da parede do colmo (Figura 41.b).

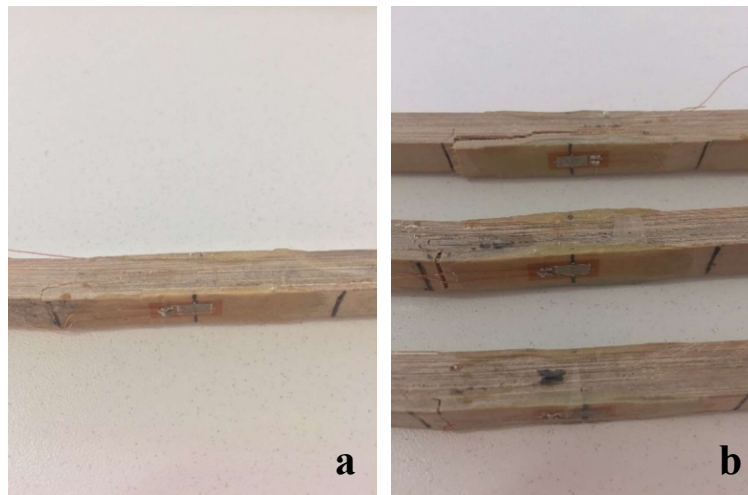


Figura 41 - Ruptura em ensaio de flexão para corpos de prova ensaiados após 10 ciclos de molhagem-secagem, com a região interior sob tração: (a) modo de ruptura por tração e cisalhamento da região interior; (b) modo de ruptura por tração da região interior.

Passando para a análise dos modos de falha nos corpos de prova ensaiados com a porção exterior da parede do colmo tracionada, porção com maior concentração de fibras, tem-se:

- Controle, 5 e 10 ciclos: ruptura não foi perceptível;
- 3 ciclos: em três corpos de prova a ruptura não foi perceptível, entretanto, dois corpos de prova apresentaram ruptura perceptível, por tração com pontos de delaminação da camada mais exterior (Figura 42).



Figura 42 – Ruptura dos corpos de prova ensaiados à tração, com a região exterior sob tração, após sofrerem 3 ciclos de molhagem–secagem.

Vale ressaltar que nos ensaios de flexão com a região mais exterior da parede do colmo sob tração, a maioria dos corpos de prova não apresentou ruptura perceptível, além disso, entraram em estado plástico, apresentando deformação permanente (Figura 43.a-d). Em muitos casos o ensaio de flexão foi paralisado antes mesmo de ocorrer a falha, devido a grandes deflexões dos corpos de prova, levando ao deslizamento desses sobre o setup de flexão.

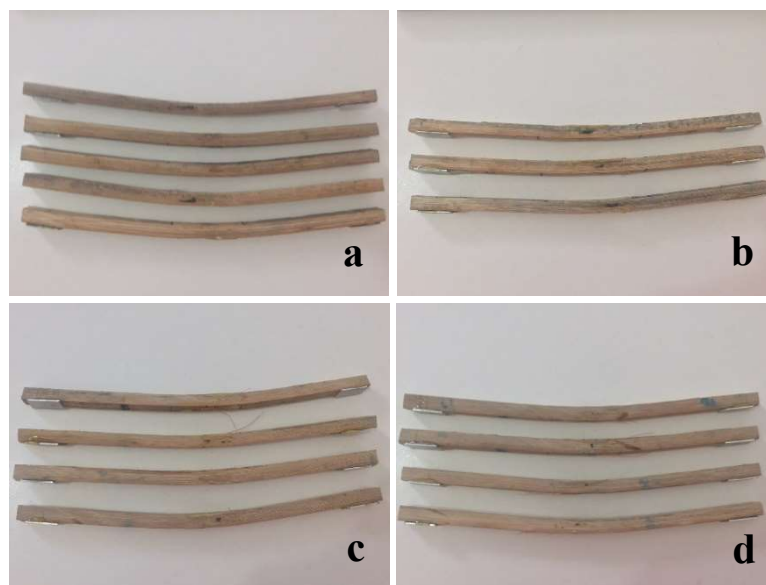


Figura 43 – Presença de deformação permanente devido à plastificação dos corpos de prova: (a) controle; (b) após 3 ciclos; (c) após 5 ciclos; (d) após 10 ciclos.

4.3. Influência do cisalhamento na flexão

Dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos, realizado em diferentes vãos, traçou-se os gráficos de δ/Pa versus $3aL-4a^2$, ilustrados na Figura 44 a seguir, para amostras de controle, após 3, 5 e 10 ciclos de molhagem-secagem, incluindo equação das linhas de tendência para extração dos coeficientes angulares e lineares.

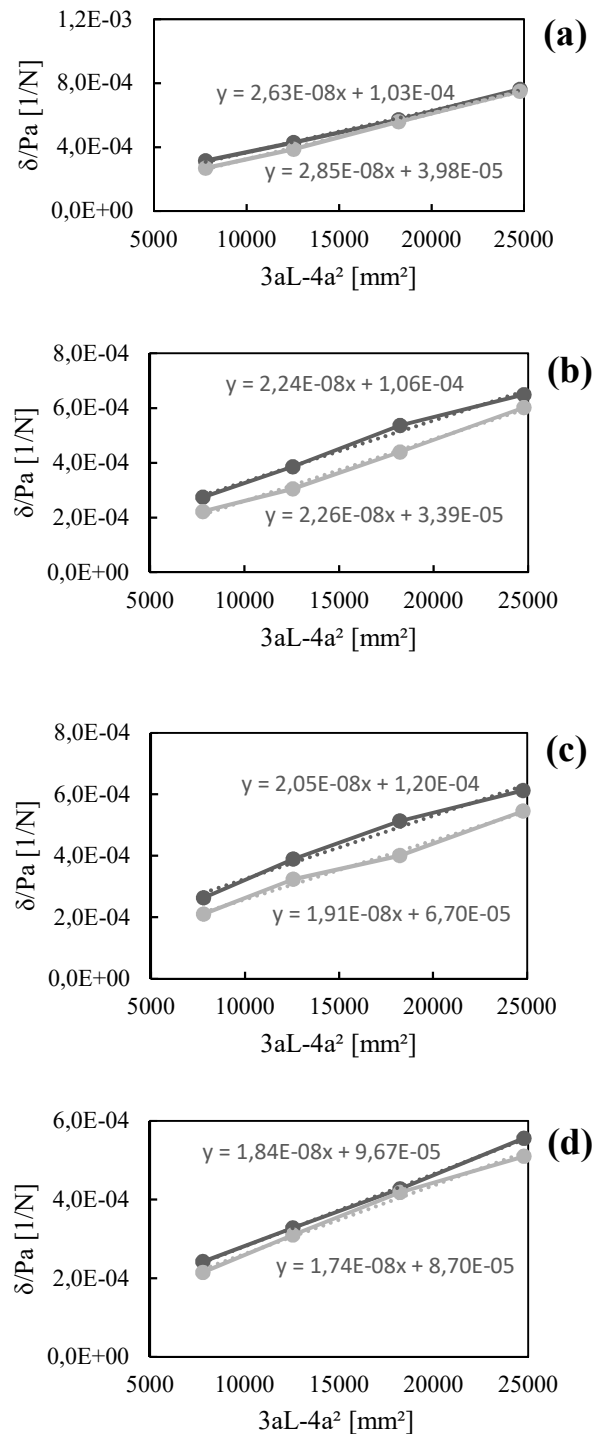


Figura 44 – Gráficos δ/Pa versus $3aL-4a^2$: (a) amostras de controle; (b) amostras após 3 ciclos; (c) amostras após 5 ciclos; (d) amostras após 10 ciclos.

Com as informações dos coeficientes angulares e lineares, e utilizando as expressões 3.7 e 3.8, mostradas anteriormente no subitem 3.2.5, foram obtidos simultaneamente os módulos de elasticidade (E) e de cisalhamento (G) na flexão, apresentados na Tabela 11. Constam também nessa tabela os módulos de elasticidade obtidos por meio de curvas de momento versus curvatura ($E_{Mx1/r}$) e pela equação da linha elástica ($E_{P-\delta}$), resultantes desse mesmo ensaio de flexão.

Tabela 11 – Valores dos módulos de elasticidade e cisalhamento obtidos por ensaio de flexão.

Ciclos	Posição durante ensaio	E [GPa]	G [GPa]	$E_{P-\delta}$ (GPa)	$E_{Mx1/r}$ [GPa]
0	região exterior sobre tração	14,0	0,17	10,9	19,8
3		18,5	0,19	13,7	29,8
5		14,9	0,27	11,9	17,2
10		19,5	0,22	14,2	20,0
0	região interior sobre tração	13,5	0,44	12,1	24,2
3		15,6	0,55	13,9	25,2
5		19,2	0,17	13,4	25,8
10		18,5	0,20	13,4	25,6

Observa-se que o módulo de elasticidade (E) obtido pela metodologia de Bank [42] aproximou-se mais do módulo obtido pelo momento-curvatura ($E_{Mx1/r}$), o qual é mais real. Por outro lado, o módulo obtido pela equação da linha elástica ($E_{P-\delta}$), mostrou-se bem inferior ao obtido pelo momento-curvatura. A explicação para essa diferença é que ao se utilizar a equação da linha elástica para determinação do módulo de elasticidade na flexão, usa-se o modelo de vigas de Euler-Bernoulli, o qual despreza o efeito do cisalhamento, e com isso são obtidos módulos de elasticidade bem mais baixos. Além disso, pela equação da linha elástica, alguns erros podem estar embutidos, como pequenas deformações locais nos pontos de cargas concentradas.

Portanto, conclui-se que a caracterização do módulo de elasticidade pela flecha pode subestimar significativamente o módulo na flexão.

5 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

O presente trabalho teve o objetivo de verificar os efeitos do processo de hornificação sobre as propriedades físicas e de flexão do bambu Moso. Para tanto, foram realizados ensaios que consistiam basicamente em submeter amostras do bambu a repetidos ciclos de molhagem e secagem, avaliar seu comportamento físico e de flexão ao término dos ciclos, e comparar esse comportamento ao de amostras não tratadas. Através de tais ensaios foi constatado que:

- houve redução na capacidade de retenção de água do bambu ao final do tratamento, entretanto não foi possível estabelecer um padrão para essas reduções em virtude da grande variabilidade do material natural. As maiores reduções na capacidade de retenção de água aconteceram ao final de 10 ciclos de molhagem e secagem, reduzindo em cerca de 45% em relação ao ciclo inicial;
- as amostras apresentaram uma variabilidade nas frações de área dos feixes vasculares e de matriz ao fim do tratamento, com reduções na fração de área de matriz e aumento na fração de área dos feixes vasculares. Ademais, essas reduções e aumentos foram mais significativas após 3 e 5 ciclos de molhagem e secagem, cujas reduções na fração de área de matriz foram de cerca de 3% e 5%, respectivamente, e os aumentos na fração de área dos feixes vasculares foram de aproximadamente 7% e 13%, respectivamente;
- foram observadas tendências de reduções nas áreas superficiais de vários feixes de fibra após o tratamento;
- obteve-se maiores resistências últimas na flexão do bambu tratado. Em ensaio com a orientação da parede interior do colmo posicionada na zona tracionada, os aumentos ocorreram com o tratamento por 3 e 10 ciclos de molhagem e secagem, cujos ganhos de resistência foram de cerca de 30% e 12%, respectivamente. O mesmo ocorreu para ensaio orientado com a parede exterior sob tração, com ganhos de resistência de 18% e 14%, para 3 e 10 ciclos, respectivamente;

- o tratamento pelos ciclos resultou em maiores módulos de elasticidade na flexão, levando a ganhos de rigidez do bambu;
- os maiores valores obtidos para o módulo de elasticidade na flexão ocorreram para tratamento por 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem, cujos respectivos aumentos foram de aproximadamente 65% e 57% para ensaio de flexão com a parede interior do colmo posicionada na zona tracionada, e de cerca de 70% e 40%, respectivamente, para ensaio com a parede exterior posicionada na zona tracionada;
- os modos de ruptura do bambu tratado foram em sua maioria por falha na seção tracionada;
- a caracterização do módulo de elasticidade na flexão pela equação da linha elástica (flecha), leva a obtenção de módulos inferiores, subestimando significativamente o módulo de flexão.

Nesse sentido, verifica-se que o processo de hornificação das fibras do bambu gerado pelo tratamento por ciclos de molhagem e secagem trouxe benefícios ao referido material, pois aumentou sua rigidez na flexão. Entretanto, percebe-se que houve uma provável degradação das fibras com os ciclos, gerando oscilações no comportamento à flexão do bambu ao longo dos ciclos.

Assim, espera-se que os presentes dados obtidos contribuam e auxiliem futuros trabalhos para uma melhor compreensão do comportamento do bambu submetido a processo de hornificação.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma investigação mais minuciosa dos efeitos da hornificação sobre as fibrocélulas do bambu, a fim de inspecionar as variações ocorridas em suas paredes e lúmens devido ao tratamento. Além disso, seria interessante a observação do efeito da hornificação na interface fibra-matriz do bambu.

Sugere-se ainda, a extração das fibras do bambu para realização de tratamento pelos ciclos de molhagem-secagem, a fim de desenvolver um modelo teórico, válido para o regime linear, que possibilite estimar de forma indireta o impacto dos ciclos sobre a matriz e fibras, avaliando se a hornificação aumentou mais a rigidez na matriz ou nas fibras e se o efeito foi melhor para tração ou para a compressão.

Ainda, para uma melhor visualização e diferenciação dos vasos condutores dos feixes vasculares, recomenda-se que na fase de preparação das amostras para

microscopia seja utilizada uma resina mais fluida do que a resina epóxi, capaz de penetrar nesses vasos, a fim de realçá-los quando observados em microscópio, facilitando a contabilização exata de suas áreas.

6 Referências

- 1 LIESE, W. **Anatomy and Properties of bamboo**. In: Proceedings of the International Bamboo Workshop, p. 196-208, 1985.
- 2 LOBOVIKOV, M.; PAUDEL, S.; PIAZZA, M.; REN, H.; WU, J. **World bamboo resources: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007. p. 1-18. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a1243e/a1243e00.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- 3 GHAVAMI, K.; RODRIGUES, C. S.; PACIORNIK, S. **Bamboo: Functionally graded composite material**. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), v. 4, n. 1, p. 1-10, 2003.
- 4 AMADA, S.; ICHIKAWA, Y.; MUNEKATA, T.; NAGASE, Y.; SHIMIZU, H. **Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo**. Composites Part B, v. 28, p. 13-20, 1997.
- 5 AMADA, S.; MUNEKATA, T.; NAGASE, Y.; ICHIKAWA, Y.; KIRIGAI, A.; ZHIFEI, Y. **The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradiente and composite materials**. Journal of Composite Materials, v. 30, n. 7, p. 800-819, 1996.
- 6 CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; TOLÊDO FILHO, R. D. **The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites**. Cement and Concrete Composites, v. 33, p. 586-595, 2011.
- 7 JIANG, Z.; WANG, H.; TIAN, G.; LIU, X.; YU, Y. **Sensitivity of serveral selected mechanical properties of moso bamboo to moisture contente change under the fibre saturation ponit**. BioResources, v. 7, n. 4, p. 5048-5058, 2012.
- 8 XU, Q.; HARRIES, K.; LI, X.; LIU, Q.; GOTTRON, J. **Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water**. Engineering Structures, v. 81, p. 230-239, 2014.

- 9 WANG, H.; WANG, H.; LI, W.; REN, D.; YU, Y. **Effects of moisture content on the mechanical properties of moso bamboo at the macroscopic and cellular levels**. BioResources, v. 8, n. 4, p. 5475-5484, 2013.
- 10 FERREIRA, S. R.; LIMA, P. R. L.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. **Influência de ciclos de molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland**. Revista Matéria, v. 17, n. 2, p. 1024-1034, 2012.
- 11 SANTOS, R. D.; FERREIRA, S. R.; OLIVEIRA, G. E.; SILVA, F. A.; SOUZA, F. G., TOLEDO FILHO, R. D. **Impacto of alkaline hornification in jute fibers on the tensile strength**. MOJ Polymer Science, v. 1, n. 5, p. 169-172, 2017.
- 12 BETZ, Marcelo Fonseca. **Desenvolvimento de uma ponte dobrável de bambu de rápida montagem para situações emergenciais**. 2018. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- 13 FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. **Bambus no Brasil: Da biologia à tecnologia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2017. p. 10-27.
- 14 Brasil. Lei nº 12.484, de 8 de setembro de 2011. Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 set. 2011. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Lei/L12484.htm>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- 15 SHAO, ZP.; ZHOU, L.; LIU, YM.; WU, ZM.; ARNAUD, C. **Differences in structure and strength between internode and node sections of Moso bamboo**. Journal of Tropical Forest Science, v. 22, n. 2, p. 133-138, 2010.
- 16 BAMBOO ANATOMY AND GROWTH HABITS: Bamboo Culm. Bamboo Botanicals. 2019. Disponível em: <<http://www.bamboobotanicals.ca/html/about-bamboo/bamboo-growth-habits.html>>. Acesso em: 04 fev. 2019.
- 17 RAY, A. K.; DAS, S. K.; MONDAL, S.; RAMACHANDRARAO, P. **Microstructural characterization of bamboo**. Journal of Materials Science, v. 39, p. 1055-1060, 2004.

- 18 JANSSEN, J. J. A. **Bamboo in building structures**. 1981. Tese de Doutorado - Technical Sciences at the Eindhoven University, Eindhoven.
- 19 DIXON, P. G.; GIBSON, L. J. **The structure and mechanics of Moso bamboo material**. Journal of the Royal Society Interface, v. 11, p. 1-11, 2014.
- 20 NOGATA, F.; TAKAHASHI, H. **Intelligent functionally graded material: Bamboo**. Composites Engineering, v. 5, n. 7, p. 743-751, 1995.
- 21 ZOU, L.; JIN, H.; LU, W.; LI, X. **Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers**. Materials Science and Engineering C, v. 29, p. 1375-1379, 2009.
- 22 WANG, X.; REN, H.; ZHANG, B.; FEI, B.; BURGERT, I. **Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance**. Journal of the Royal Society Interface, v. 9, p. 988-996, 2011.
- 23 FUENTES, C. A.; TRAN, L. Q. N.; DUPONT-GILLAIN, C.; VANDERLINDEN, S. F.; VAN VUURE, A. W.; VERPOEST, I. **Wetting behaviour and surface properties of technical bamboo fibres**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 380, p. 89-99, 2011.
- 24 LI, X.; SUN, C.; ZHOU, B.; HE, Y. **Determination of hemicellulose, cellulose and lignina in moso bamboo by near infrared spectroscopy**. Scientific Reports, v. 5, n. 17210, p. 1-11, 2015.
- 25 SCURLOCK, J. M. O.; DAYTON, D. C.; HAMES, B. **Bamboo: an overlooked biomass resource**. Biomass and Bioenergy, v. 19, p. 229-244, 2000.
- 26 LI, Xiaobo. **Physical, chemical and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing**. 2004. Dissertação de Mestrado – Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana.
- 27 ZHAO, R. J.; JIANG, Z. H.; HSE, C. Y.; SHUPE, T. F. **Effects of steam treatment on bending properties and chemical composition of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*)**. Journal of Tropical Forest Science, v. 22, n. 2, p. 197-201, 2010.
- 28 YU, H. Q.; JIANG, Z. H.; HSE, C. Y.; SHUPE, T. F. **Selected physical and mechanical properties of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*)**. Journal of Tropical Forest Science, v. 20, n. 4, p. 258-263, 2008.

- 29 BERNDSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M. do. OSTAPIV, F. **Mechanical resistance of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Parte 2: Axial tensile strength, hardness and wear resistance.** Revista Floresta, Curitiba, v. 44, n. 3, p. 505-514, 2014.
- 30 SHAO, Z. P.; FANG, C. H.; HUANG, S. X.; TIAN, G. L. **Tensile properties of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its componentes with respect to its fiber-reinforced composite structure.** Wood Sci Technol, v. 44, p. 655-666, 2010.
- 31 LI, H.; SHEN, S. **The mechanical properties of bamboo and vascular bundles.** Materials Research Society, v. 26, n. 21, p. 2749-2756, 2011.
- 32 BERNDSEN, R. S.; KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C.; NASCIMENTO, E. M. do. OSTAPIV, F. **Resistência à flexão estática e à compressão paralela do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens*).** Revista Floresta, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 485-494, 2013.
- 33 OBATAYA, E.; KITIN, P.; YAMAUCHI, H. **Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure.** Wood Sci Technol, v. 41, p. 385-400, 2007.
- 34 YANG, T. H.; LEE, C. H.; LEE, C. J.; CHENG, Y. W. **Effects of different thermal modification media on physical and mechanical porperties of moso bamboo.** Construction and Building Materials, v. 119, p. 251-259, 2016.
- 35 ZHANG, Y. M.; YU, Y. L.; YU, W. J. **Effects of thermal treatment on the physical and mechanical properties of *phyllostachys pubescen* bamboo.** European Journal of Wood and Wood Products, v. 71, p. 61-67, 2013.
- 36 DINIZ, J. M. B. F.; GIL, M. H.; CASTRO J. A. A. M. **Hornification – its origin and interpretation in wood pulps.** Wood Sci Technol, v. 37, p. 489-494, 2004.
- 37 MINOR, J. L. **Hornification – its origin and meaning.** Progress in Paper Recycling, v. 3, n. 2, p. 93-95, 1994.
- 38 BALLESTEROS, J. E. M.; SANTOS, V. dos; MÁRMOL, G.; FRÍAS, M.; FIORELLI, J. **Pontencial of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications.** Cellulose, v. 24, p. 2275-2286, 2017.
- 39 MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. **Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling.** Cement and Concrete Composites, v. 27, p. 435-448, 2005.

- 40 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, p. 200-205, 2010.
- 41 INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 22157-1: Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1: Requirements.** Switzerland, 2004.
- 42 BANK, L. C. **Flexural and shear moduli of full section fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams.** Journal of Testing and Evaluation, v. 17, n.1, p. 40-45, 1989.
- 43 SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I.; FRISE, E.; KAYNIG, V.; LONGAIR, M.; PIETZSH, T.; PREIBISCH, S.; RUEDEN, C.; SAALFELD, S.; SCHMID, B.; TINEVEZ, J. Y.; WHITE, D. J.; HARTENSTEIN, V.; ELICEIRI, K.; TOMANCAK, P.; CARDONA, A. **Fiji: an open-source platform for biological-image analysis.** Nature methods, v. 9, n. 7, p. 676-682, 2012, doi:10.1038/nmeth.2019.
- 44 SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. **NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis.** Nature methods, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.
- 45 PHANSALKAR, N; MORE, S; SABALE, A.; JOSHI, M. **Adaptive local thresholding for detection of nuclei in diversity stained cytology images.** International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP), p. 218-220, 2011, doi:10.1109/ICCSP.2011.5739305.

Apêndice A – Macros para automação dos procedimentos de processamento e análise de imagens

Neste apêndice estão detalhadas duas macros desenvolvidas especialmente para automação das etapas de processamento e análise de imagens. Primeiro, apresenta-se a macro desenvolvida para processamento das imagens. Posteriormente, encontra-se a macro desenvolvida para divisão das imagens em faixas e extração dos atributos.

```

1 //inicialmente e manualmente setTool("polygon");
2 run("Crop");
3 setBackgroundColor(0, 0, 0);
4 run("Clear Outside");
5 run("Duplicate...", " ");
6 run("8-bit");
7 run("Auto Local Threshold", "method=Phansalkar radius=15 parameter_1=0 parameter_2=0 white");
8 run("Close-");
9 run("Options...", "iterations=2 count=1 black pad");
10 run("Dilate");
11 run("Erode");
12 selectWindow("CP49_5-A-1.tif");
13 run("Duplicate...", " ");
14 run("Invert");
15 saveAs("Tiff", "C:/Users/silig/Documents/Dissertação/Ciclos/5 Ciclos/Antes/CP49-A_fibras.tif");
16 close();
17 selectWindow("CP49_5-A-1.tif");
18 saveAs("Tiff", "C:/Users/silig/Documents/Dissertação/Ciclos/5 Ciclos/Antes/CP49-A_matriz.tif");
19 close();
20 selectWindow("CP49_5-A.tif");
21 saveAs("Tiff", "C:/Users/silig/Documents/Dissertação/Ciclos/5 Ciclos/Antes/CP49-A_original.tif");
22 close();

```

Figura 45 – Macro com procedimentos de processamento das imagens.

```

1  setBatchMode(true);
2
3  run("Open...");
4
5  dir = File.directory;
6  amostra = File.nameWithoutExtension;
7
8  run("Set Scale...", "distance=1 known=0.00738 pixel=1 unit=mm");
9
10 getDimensions(width, height, channels, slices, frames);
11 tiles = 5;
12 step = 0;
13
14 if (isOpen("Log")) {
15     selectWindow("Log");
16     print("\\Clear");
17 }
18
19 for(n=1; n<=tiles; n++) {
20     selectWindow(amostra+".tif");
21     makeRectangle(step, 0, width/5, height);
22     run("Duplicate...", "title=tile");
23     saveAs("TIF", dir+amostra+"_tile"+n+".tif");
24
25     run("Analyze Particles...", "clear summarize");
26     selectWindow("Summary");
27     IJ.renameResults("Results");
28
29     totalarea_tile = getResult("Total Area", 0);
30     print(totalarea_tile);
31     run("Clear Results");
32     run("Select None");
33     step = step + width/5;
34 }
35
36
37 selectWindow("Log");
38 saveAs("Text", dir+amostra+".txt");
39
40 setBatchMode(false);
41

```

Figura 46 – Macro com procedimentos para divisão da imagem em faixas e extração dos atributos.

Apêndice B – Teores de umidade após ciclos de molhagem e secagem

Tabela 12 – Teores de umidade obtidos ao final de cada ciclo de molhagem e secagem.

3 Ciclos				
Ciclo	Teor de umidade após molhagem (%)		Teor de umidade após secagem (%)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	16,25	0,23	16,25	0,23
1	30,33	0,98	8,50	0,28
2	29,81	0,68	7,83	0,19
3	29,58	0,92	7,73	0,20
5 Ciclos				
Ciclo	Teor de umidade após molhagem (%)		Teor de umidade após secagem (%)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	16,79	0,33	16,79	0,33
1	29,44	0,55	6,79	0,90
2	26,66	1,26	6,18	0,76
3	26,33	1,07	7,34	1,29
4	27,45	1,76	12,45	1,27
5	27,73	1,07	9,81	1,51
10 Ciclos				
Ciclo	Teor de umidade após molhagem (%)		Teor de umidade após secagem (%)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	16,78	0,31	16,78	0,31
1	29,23	0,72	7,28	0,86
2	26,83	1,34	6,52	1,08
3	27,01	1,15	7,01	1,12
4	28,61	0,97	11,22	1,08
5	28,10	1,36	10,20	1,48
6	27,65	1,30	13,97	2,09
7	30,04	1,50	8,01	1,38
8	27,34	1,73	9,28	1,02
9	26,92	1,34	4,12	0,94
10	26,18	1,27	4,01	0,98

Apêndice C – Propriedades físicas dos corpos de prova antes dos ensaios de flexão

Tabela 13 - Propriedades físicas dos corpos de prova obtidas antes do ensaio de flexão.

Ciclos	Corpo de prova	Posição no ensaio de flexão	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Teor de umidade natural (%)
0	5	região exterior tracionada	10,2	8,4	18,66	20,56	0,91	16,63
	14		10,0	8,2	18,31	19,68	0,93	16,42
	19		9,9	8,0	18,02	19,01	0,95	16,40
	23		10,0	7,9	16,14	18,96	0,85	16,31
	31		9,8	8,6	17,88	20,23	0,88	16,53
	33	região interior tracionada	10,0	7,9	16,68	18,96	0,88	16,58
	35		9,7	8,1	16,98	18,86	0,90	16,05
	39		10,0	8,4	17,48	20,16	0,87	16,33
	42		9,8	8,7	18,41	20,46	0,90	16,22
	43		9,9	8,0	17,23	19,01	0,91	16,61
3	15	região exterior tracionada	9,6	7,4	16,72	17,12	0,98	16,39
	18		9,8	7,6	16,10	17,88	0,90	16,46
	30		9,7	7,9	16,57	18,39	0,90	16,23
	36		9,5	7,6	14,96	17,29	0,87	16,28
	41		9,5	7,8	16,43	17,78	0,92	15,81
	7	região interior tracionada	10,2	7,9	17,38	19,38	0,90	16,16
	13		9,9	7,6	16,40	18,10	0,91	16,69
	28		9,8	7,5	15,57	17,31	0,90	16,28
	27		9,8	8,3	17,08	19,56	0,87	16,01
	38		10,1	8,3	17,54	20,12	0,87	16,14
5	49	região exterior tracionada	9,1	8,9	16,93	19,52	0,87	17,11
	50		9,5	7,8	15,68	17,82	0,88	16,86
	62		8,8	8,3	15,78	17,60	0,90	16,62
	63		9,2	8,5	16,75	18,77	0,89	16,43
	47	região interior tracionada	9,3	7,8	15,27	17,48	0,87	17,24
	48		9,1	7,8	15,06	17,11	0,88	17,02
	51		9,2	9,1	16,29	20,09	0,81	16,19
	61		9,8	8,5	17,08	19,99	0,85	16,82
10	53	região exterior tracionada	9,2	8,6	16,41	19,11	0,86	16,47
	55		8,6	8,1	14,77	16,79	0,88	16,62
	56		9,0	8,6	16,11	18,73	0,86	16,69
	67		8,7	9,1	16,34	19,16	0,85	16,44
	54	região interior tracionada	9,1	8,0	15,30	17,58	0,87	17,08
	65		9,1	8,0	14,53	17,62	0,82	16,73
	66		9,3	8,0	15,04	18,00	0,84	17,43
	68		8,8	8,1	15,07	17,25	0,87	16,77

Apêndice D – Resumo de média e desvio padrão das resistências e deflexões últimas obtidas no ensaio de flexão a 4 pontos

Tabela 14 – Valores de média e desvio padrão das resistências ($\sigma_{f,últ}$) e deflexões ($\Delta_{últ}$) últimas obtidas nos ensaios de flexão.

Ciclos	Posição no ensaio de flexão	$\sigma_{f,últ}$ (kN/mm ²)		$\Delta_{últ}$ (mm)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	região exterior tracionada	0,122	0,010	47,04	2,4
3		0,145	0,010	40,79	3,9
5		0,110	0,010	36,71	0,9
10		0,139	0,004	36,74	2,4
0	região interior tracionada	0,119	0,010	18,45	3,4
3		0,157	0,017	19,66	3,0
5		0,125	0,011	15,12	1,4
10		0,133	0,006	12,44	0,7

Apêndice E – Curvas momento versus curvatura obtidas no ensaio de flexão a 4 pontos

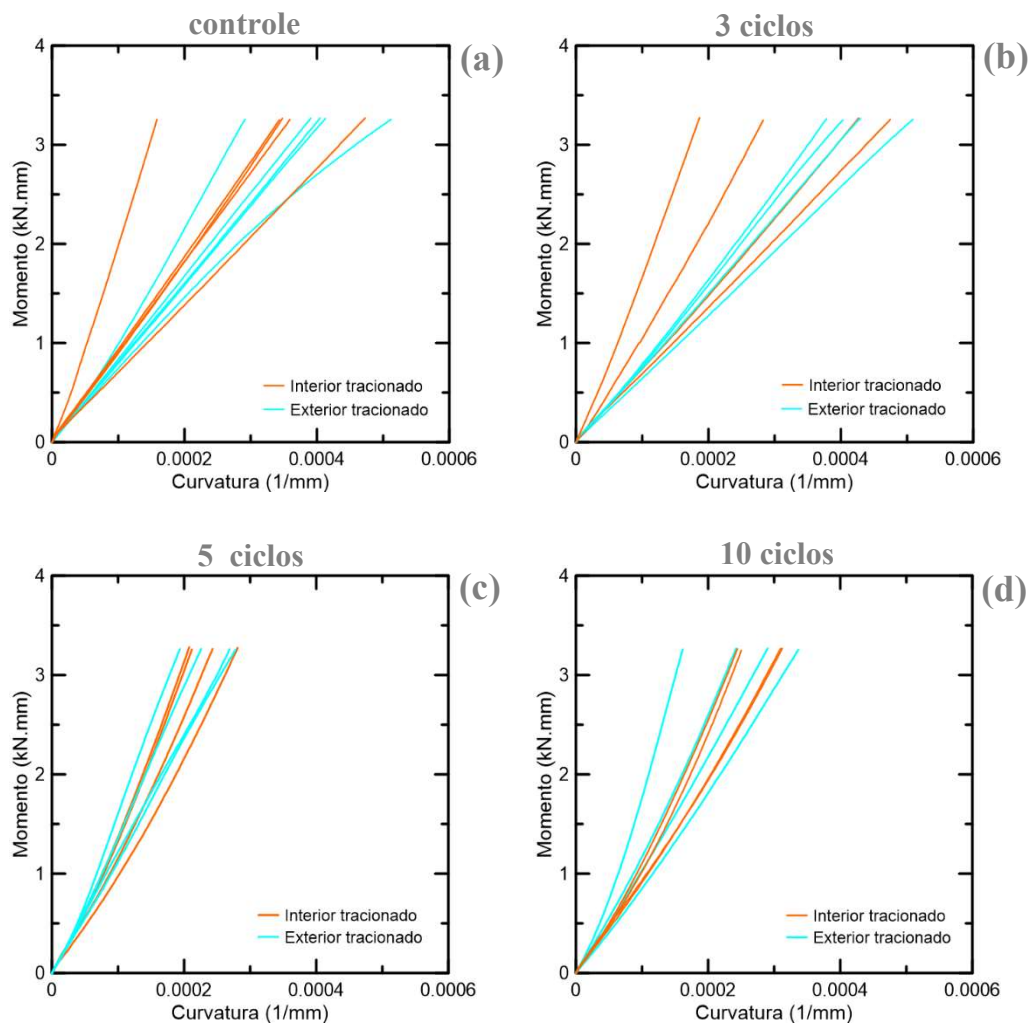


Figura 47 – Intervalo linear adotado para determinação do MOE de flexão: (a) corpos de prova de controle; (b) corpos de prova após 3 ciclos; (c) corpos de prova após 5 ciclos; (d) corpos de prova após 10 ciclos.

Apêndice F – Resultados dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão

Tabela 15 – Resultados dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão a 4 pontos por gráficos momento versus curvatura.

Ciclos	Corpo de prova	Posição no ensaio de flexão	E (GPa)	Média E (GPa)	Desvio Padrão E (GPa)
0	5	região exterior tracionada	16,63	18,46	4,68
	14		17,54		
	19		15,24		
	23		27,66		
	31		15,24		
	33	região interior tracionada	16,66	19,31	2,27
	35		21,76		
	39		42,07*		
	42		17,47		
	43		21,36		
3	15	região exterior tracionada	19,82	20,43	2,34
	18		24,13		
	30		19,13		
	36		17,32		
	41		21,77		
	7	região interior tracionada	41,70*	20,75	2,12
	13		21,02		
	28		19,76		
	27		18,22		
	38		23,99		
5	49	região exterior tracionada	27,61	31,35	3,81
	50		31,78		
	62		28,62		
	63		37,40		
	47	região interior tracionada	36,74	32,01	3,21
	48		32,40		
	51		27,77		
	61		31,11		
10	53	região exterior tracionada	23,29	25,74	2,06
	55		25,58		
	56		28,34		
	67		38,31*		
	54	região interior tracionada	27,13	30,44	3,90
	65		34,91		
	66		26,03		
	68		33,70		

*Valor excluído do cálculo das médias e desvios padrões devido à grande disparidade de comportamento em relação aos demais.