UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

ADRIANA DOMINIQUE DA COSTA ROCHA DE SÁ

Caracterização das propriedades tecnológicas dos elementos de bambu densificado

Pirassununga
2022

ADRIANA DOMINIQUE DA COSTA ROCHA DE SÁ

Caracterização das propriedades tecnológicas dos elementos de bambu densificado

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciências.

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria.

Orientador: Prof. Dr. Holmer Savastano Júnior.

Pirassununga

2022

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D111c

Dominique da Costa Rocha de Sá, Adriana
Caracterização das propriedades tecnológicas dos elementos de bambu laminado e densificado / Adriana Dominique da Costa Rocha de Sá ; orientador Holmer Savastano Júnior. -- Pirassununga, 2022.
83 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

1. Bambu. 2. Densificação. 3. Caracterização física, mecânica, microestrutural e térmica. 4. Material de construção não convencional. I. Savastano Júnior, Holmer, orient. II. Título.

Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - o autor

Dedicatória

A Deus, por ser primordial em minha vida, à minha família, agora em especial à mais nova integrante, minha sobrinha Ester, para que sirva de exemplo e motivação à sua futura vida acadêmica.

Às vítimas decorrentes da atual pandemia da COVID-19, essencialmente, meu tio Marcos Rocha e tia Edilene Rocha.

Também dedico à minha falecida avó Antônia Santana da Costa, matriarca da família a qual estou tendo a honra de ser a primeira mestra.

AGRADECIMENTOS

Sou grata a CRISTO, meu redentor que vive e reina para sempre, por mais esta benção e por ser suficiente em minha vida.

Agradeço aos meus pais, Maria das Dores da Costa (mainha) e José Adriano Rocha de Sá (painho), meu irmão Júnior, Elaine, Ester, Joana (Tia Dadá), primo Paulo e ao demais integrantes da família, que embora não tivessem conhecimento disto, iluminaram de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos.

Ao prof. Dr. Holmer Savastano Júnior pela orientação, ensinamento, paciência e apoio no desenvolvimento do trabalho.

À Universidade de São Paulo e a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) pela oportunidade.

Ao Programa de Engenharia e Ciência de Materiais e ao Serviço de Pós-Graduação, especialmente a Maria Cécilia, Erica, Kefilin por todo o suporte.

À Universidade Virtual do Estado de São Paulo (UNIVESP) pela oportunidade da bolsa de estudos concedida.

Aos professores Dr. Normando Perazzo Barbosa, Dr. Khosrow Ghavami, Dr. Fernando de Lima Caneppele pela amizade e ensinamento.

Ao professor Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr e à Dra. Maria Fátima do Nascimento do Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM) da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos, por disponibilizarem o laboratório e material necessário para realização da análise de rugosidade superficial.

Ao Laboratório de Construções e Ambiência, aos técnicos Zaqueu, Mariana e Diego pelo suporte. Aos companheiros, amigos e colegas que a FZEA me proporcionou (sem ordem de importância) Adriano, Alda, Arash, Bright, Camila, Camilo, Carlos, Claudio Melo, Fábio, Fábulo, Felipe, Fernando, Gabriela, Gonzalo, Guilherme, Handray, Janaína, Jennifer, Jéssica, Kátia, Letícia, Lorena, Marcia, Maria Júlia, Marzieh, Matheus Napolitano, Nayara, Patrícia, Rafael, Rafaela, Raquel, Rogério, Rômulo, Sheyling, Taís, Tido e Wanley, que de forma direta ou indireta estiveram comigo neste período e contribuíram.

Agradecimento especial ao amigo Christian Gauss, pelo acompanhamento no desenvolvimento do projeto, que foi fundamental para o meu crescimento científico e por todo apoio que me possibilitou expandir meus conhecimentos na área.

Agradeço também aos amigos externos Giovanni Maciel, Marcos Félix, Ecleyse Lisboa, Rafael Oliveira, Carla Aielo, Gilvan Carmo e família, Carol Gurgel, João Lucas, Sérgio Renato, Graciely Coutinho e Thiago Dantas, bem como ao meu namorado Matheus Salusto, que de forma especial me deram incentivo, forças e apoio em momentos de dificuldades.

À Igreja Presbiteriana de Pirassununga e a MEPB pelo acolhimento e suporte na fé.

Grata à minha raiz regional, da qual me orgulho em dizer que sou nordestina “sim sinhô”! Com um trecho de Cordel, eu digo mais:

Meu sotaque é arrastado,
minha identidade forte,
Sou potiguar arretada,
nascida no Rio Grande do Norte.
(Kaká Moura)

A todos que de certa forma fizeram parte dessa caminhada. Que o Eterno possa retribuir a todos.

EPÍGRAFE

“Os justos, porém, florescerão como palmeiras e crescerão como os cedros do Líbano.”

(Salmos 92:12)

RESUMO

SÁ, A.D.C.R. **Caracterização das propriedades tecnológicas dos elementos de bambu laminado e densificado**. 2022. 83f. Dissertação, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2022.

A arquitetura e a engenharia, atualmente se encontram em uma tendência de projetar e construir estruturas mais leves, extensas e com redução na emissão de carbono como jamais visto anteriormente. Isso vem se tornando possível por meio da evolução dos materiais de construção. Dentre os diversos recursos renováveis, o bambu foi redescoberto como um material não convencional, que pode ser utilizado não apenas na sua forma natural, mas também como produto engenheirado. Assim, o objetivo desse trabalho foi caracterizar as propriedades: física, mecânica, microestrutural e térmica dos elementos da espécie *Dendrocalamus asper*. Para isso, foram obtidos elementos de bambu: não densificado (laminado) denominado como (ND), densificado sem casca (DS), e densificado com casca (DC), conforme retificação (processo realizado em marcenaria), e então avaliados por diferentes técnicas. Os resultados da caracterização física envolvendo ciclos de absorção de água e secagem, mostraram que apenas um ciclo é suficiente para as amostras ND e quatro ciclos, para os grupos DS e DC minimizarem as mudanças de dimensão, associadas às variações de umidade e absorção de água. Além disso, uma variação significativa na rugosidade superficial dos grupos após um ciclo úmido-seco foi observada. Na caracterização mecânica, o grupo DC apresentou maior resistência mecânica com módulo de ruptura (MOR) de aproximadamente 312 MPa (47%) e MOE de 31,44 GPa (124%), se comparado ao elemento laminado. Ressalta-se que manter a casca aumenta a condutividade térmica, de modo que, o bambu DC tem condutividade térmica de 0,23 W/mK, que é 16% mais alta do que o bambu DS e 22% mais alta do que o bambu ND. Apesar disso, são considerados como isolante térmico. Por outro lado, manter a casca do bambu tem um impacto positivo no aproveitamento, processamento e desempenho do material. Desse modo, o processo de densificação associado ao método de retificação melhora as propriedades tecnológicas para futura aplicação como elementos componentes de painéis estruturais de bambu, e por consequência, dispor de mais uma opção eficiente para construção civil.

Palavras-chave: Material não convencional, *Dendrocalamus asper*, densificação.

ABSTRACT

SÁ, A.D.C.R. **Tecnologicals properties characterization of laminated and densified bamboo elements.** 2022. 83f. Dissertation, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2022.

Architecture and engineering are currently in a trend to design and build lighter, more extensive, and carbon-emission reducing structures than ever before. This is made possible by the evolution of building materials. Among the various renewable resources, bamboo has been rediscovered as an unconventional material that can be used not only in its natural form, but also as an engineered product. Thus, the objective of this work was to characterize the properties: physical, mechanical, microstructural and thermal of elements of the species *Dendrocalamus asper*. For this, bamboo elements were obtained: un-densified (laminated) called (ND), densified without skin (DS), and densified with skin (DC), according to rectification (process done in joinery), and then evaluated by different techniques. The results of the physical characterization involving cycles of water absorption and drying, showed that only one cycle is enough for the ND samples and four cycles, for the DS and DC groups to minimize the changes in dimension, associated with variations in moisture and water absorption. In addition, a significant variation in the surface roughness of the groups after one wet-dry cycle was observed. In the mechanical characterization, the DC group showed higher mechanical strength with modulus of rupture (MOR) of approximately 312 MPa (47%) and MOE of 31.44 GPa (124%) compared to the laminated element. It is pointed out that keeping the shell increases the thermal conductivity, so that, DC bamboo has thermal conductivity of 0.23 W/mK, which is 16% higher than DS bamboo and 22% higher than ND bamboo. Despite this, they are considered as a thermal insulator. On the other hand, keeping the skin of the bamboo has a positive impact on the utilization, processing and performance of the material. Thus, the densification process associated with the rectification method improves the technological properties for future application as component elements of bamboo structural panels, and consequently, to have another efficient option for civil construction.

Keywords: Non convencional materials, *Dendrocalamus asper, densification.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Visão geral das características morfológicas do colmo do bambu. 29
Figura 3.2. Bambu *D. Asper* não submetido a tratamento preservativo. 31
Figura 3.3. Processos utilizados para modificação da forma do bambu.....33
Figura 3.4. Manufatura do BLC na Colômbia. 35
Figura 3.5. Imagens de MEV da seção transversal do produto de bambu laminado X densificado. 36
Figura 3.6. Processo de densificação com o elemento “meia cana”. 37
Figura 3.7. Densificação com diferentes teores de umidade. 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros de Produção.....39
Tabela 1 Detalhamento das quantidades e dimensões das amostras para os ensaios.....40
Tabela 3- Densidade aparente média de amostras.....42
Tabela 4 O inchamento na direção radial por quatro ciclos consecutivos em condições úmidas e secas.....44
Tabela 5- Ensaio de flexão estática nas posições para cima e para baixo em relação a camada mais externa das amostras não densificadas – laminadas (ND) e densificadas com casca (DC) e sem casca (DS).....45
Tabela 6 - Densidade aparente média dos três grupos de amostras: laminadas, densificadas com e sem casca.....47
Tabela 7 Parâmetro de rugosidade (R_a) ao longo e perpendicular às fibras, antes e depois de um ciclo úmido-seco.....50
Tabela 8 Ensaio de flexão estática nas posições para cima e para baixo em relação a camada mais externa das amostras não densificadas – laminadas (ND) e densificadas com casca (DC) e sem casca (DS).....53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 23
2. OBJETIVOS 26
2.1. Objetivo Geral 26
2.2. Objetivos Específicos 26
3.1. Matéria-prima: Bambu 27
3.1.1. Características anatômicas do bambu 28
3.1.2. Tratamento preservativo 30
3.1.3. Bambu engenheirado 32
3.1.3.1. Bambu laminado 34
3.1.3.2. Bambu densificado 35
4. MATERIAIS E MÉTODOS 39
4.1.1. Bambu 40
4.1.1.1. Processo de laminação 42
4.1.1.2. Processo de densificação 43
4.1.1.3. Preparação dos corpos de prova laminado e densificado 44
4.2.1. Densidade aparente 47
4.2.6. Condutividade térmica 53
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 56
5.1. Densidade aparente 56
5.2. Absorção de água de curto e longo prazo 57
5.2.1. Teste de ciclo úmido-seco 60
5.2.2. Ciclos úmido-seco ..... **Erro! Indicador não definido.**
5.3. Análise da rugosidade superficial 65
5.4. Flexão estática em três pontos 68
5.5. Microscopia eletrônica de varredura 71
5.6. Condutividade térmica 74
6. CONCLUSÃO 76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção, historicamente, faz uso de materiais como tijolos de argila, aço e concreto. No entanto, a busca cada vez maior pela conservação do meio ambiente vem fornecendo o surgimento de novas políticas industriais que resultam na substituição, cada vez mais frequente, de alguns desses materiais citados. Em diversos países predominam as construções pré-fabricadas, que vão desde o piso até à cobertura, proporcionando agilidade na execução e custos menores, além de menor desgaste ambiental.

O bambu como material na indústria da construção civil, é um produto de qualidade que vem sendo aceito e utilizado para aplicações pelo mundo. Seu processamento industrial e, em particular, a laminação das ripas para painéis a serem utilizados na construção civil, começou na China há mais de 20 anos (GANAPATHY et al.,1999). A China continua como o maior produtor industrial de bambu do mundo, fornecendo grandes quantidades de materiais destinados a este ramo na Europa Ocidental (LOBOVIKOV et al., 2007). É uma alternativa de baixo impacto ambiental, crescente e atual, principalmente para a construção civil, que é um ramo que utiliza materiais estruturais em grandes quantidades. Como o bambu é considerado renovável, se encaixa perfeitamente a esta exigência (LONDOÑO, 1998; CASAGRANDE JÚNIOR, 2004; PEREIRA, BERALDO, 2008).

Por ser um material ambientalmente amigável, o bambu, também, apresenta vantagens como: renovabilidade, grande potencial agrícola não requerendo replantio, crescimento rápido, durabilidade, acessibilidade, rápida absorção de grandes quantidades de carbono, trabalhabilidade e altas propriedades mecânicas específicas. Uma particularidade quanto ao plantio, é que o bambu se desenvolve em climas tropicais e subtropicais (SHARMA et al., 2015a; GHAVAMI, 2016; BREDENOORD, 2017).

O bambu tem uma estrutura funcionalmente graduada e sua parede é composta pela casca externa, a casca do meio e a interna. É considerado um material natural com estrutura funcionalmente graduada (FGM), uma vez que a fração do volume da fibra na parede do colmo aumenta gradualmente das camadas internas para as externas, partes constituintes da sua parede com inclusão da camada do meio. Portanto, as camadas interna e externa têm comportamentos diferentes em termos de propriedades físicas e mecânicas. Por meio da densificação, essas diferenças podem

ser minimizadas, aumentando a densidade e melhorando o desempenho mecânico do material (DIXON et al., 2016; KADIVAR et al., 2020).

A utilização do bambu em aplicações estruturais pode ser afetada devido à estrutura geométrica (cilíndrica cônica). A tecnologia em transformar esta matéria-prima em painéis, aproveita melhor as suas propriedades técnicas para diversos fins estruturais através de um material mais versátil (SHARMA et al., 2015a).

Ao contrário da madeira, o bambu não possui raio nas direções radial ou tangencial, sendo o parênquima o principal componente responsável pela resistência à tração do material nessas direções (HIDALGO-LÓPEZ, 2003; DIXON et al., 2016). Pode ser considerado um ponto positivo da trabalhabilidade do bambu, pois facilita o corte do colmo no sentido longitudinal para produzir as ripas de bambu. Tais ripas podem ser usadas para produzir laminados, removendo as partes internas e externas (casca), ou densificadas usando um processo de densificação para produzir elementos de bambu de alta resistência e alta densidade. Inúmeros estudos sobre o desempenho de painéis laminados de bambu têm demonstrado que esses painéis apresentam grande potencial para serem utilizados na indústria da construção (LIESE, 1987; SHARMA et al., 2015b; CHAOWANA; BARBU, 2017; KADIVAR et al., 2020). Podem-se encontrar diversas vantagens para o uso da matéria-prima (bambu), e sua utilização em vários produtos, como os elementos estruturais, e para estes novos processos, estão surgindo e/ou em desenvolvimento para um constante melhoramento qualitativo e energético (SHARMA et al., 2015a). Alguns elementos de bambu, como colmo completo ou materiais engenheirados, podem ser usados em andaimes, construção de pontes, treliças, vigas, colunas e muitos outros tipos de componentes.

A técnica de laminação é uma forma prática mitigar os efeitos indesejáveis da anisotropia dos produtos de bambu, uma vez que é possível posicionar o elemento de acordo com a aplicação desejada e solicitação de esforços, sendo que a direção longitudinal já indica a direção das maiores propriedades mecânicas, no caso, as fibras. Este processo elimina a curvatura natural usando maquinário de marcenaria, que remove as camadas mais externas (casca) e mais internas das ripas de bambu (HIDALGO-LOPÉZ, 2003; SHARMA et al., 2015a).

Enquanto o processo de densificação pode manter a casca e diminuir a heterogeneidade da estrutura da fibra, quando a densificação é acompanhada por um processo de achatamento da “meia-cana” do colmo, ela transforma a curvatura para

a forma plana quadrada. O processo de densificação diminui a espessura, aumenta a densidade e consequentemente as propriedades físicas e mecânicas do material por meio de métodos de beneficiamento não destrutivos. O processo pode ser aplicado em um sistema aberto ou fechado, tendo como parâmetros de controle: a temperatura, pressão e o tempo, por meio de um sistema de prensagem termo hidráulico aberto (KADIVAR et al., 2019a, KADIVAR et al., 2019b; GAUSS, KADIVAR, SAVASTANO, 2019; KADIVAR et al., 2020).

Vários estudos caracterizaram a resistência à flexão do bambu densificado e mostraram que esse processo pode aumentar sua densidade de 20 a 100% e aumentar a sua resistência à flexão em 15 a 100%, dependendo da espécie do bambu e dos parâmetros de processos aplicados, em comparação com o bambu natural (DIXON et al., 2016; KADIVAR et al., 2019a, KADIVAR et al., 2019b). De acordo com esses estudos, quanto maior a densidade, maior o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) do material (ARCHILA-SANTOS, ANSELL, WALKER, 2014). No entanto, análises de estabilidade dimensional, mostram que o processo de densificação tem um efeito negativo com relação a absorção de água e o inchamento do bambu (KADIVAR et al., 2019b), e pode ser considerado o maior obstáculo para a produção do bambu densificado.

Além disso, a manutenção da casca pode diminuir o número de processos que precisam ser empregados durante a fabricação, aumentando assim, a taxa de utilização e desempenho mecânico do material. Até o momento, não existem estudos na literatura quem investigam a influência da casca no desempenho mecânico, e na condutividade térmica do bambu densificado, bem como, sobre a caracterização no que se refere à estabilidade dimensional em contato desse material com a água/umidade.

Nesse sentido, ao se incorporar a densificação no processo de fabricação de elementos de bambu (ripa) é possível agregar valor ao material engenheirado, como por exemplo, em painéis, para aproveitar suas propriedades técnicas de outras formas para diversos fins estruturais, como um material mais versátil na indústria da construção civil.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho foi realizar um estudo experimental abrangente sobre a caracterização física, mecânica, microestrutural e térmica de elementos de bambu da espécie *Dendrocalamus asper* não densificados (laminados) e densificados para futura aplicação como elementos componentes de painéis estruturais.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades físicas e microestruturais de elementos de bambu densificado;
- Investigar a influência da casca (camada mais externa) nas propriedades de flexão e condutividade térmica de elementos de bambu densificado.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Matéria-prima: Bambu

No momento atual, devido aos desgastes no meio ambiente ocasionados pelo homem, estão surgindo cada vez mais artigos com requisitos ambientais utilizando procedimentos mais limpos de fabricação, tais como: matérias-primas renováveis e ciclos de vida mais longos dos produtos (RICHARD, 2013).

A relevância em aprimorar as construções de baixo impacto ambiental, inserindo materiais alternativos, avança juntamente com a tecnologia. Contudo, para efetivar este cenário, se faz necessário o uso de materiais com aspectos ambientalmente amigáveis. O bambu é uma opção interessante, por ser: renovável, perene, ter grande potencial agrícola, não necessitar de replantio, rápido crescimento, rápida absorção de grandes quantidades de carbono e se desenvolver em clima tropical e subtropical. Ele ainda possui diversas aplicações, o que se enquadra satisfatoriamente no desenvolvimento do Brasil, país com clima e área favorável (QISHENG, SHENXUE, YONGYU, 2002; GHAVAMI, 2016).

A localização geográfica geralmente determina a escolha da matéria-prima. No mundo, a distribuição do bambu está da seguinte forma: 62% na Ásia e Oceania, 34% na América e 4% na África. As condições adequadas, em geral, para o crescimento do bambu estão nas zonas tropicais e subtropicais, com umidade relativa adequada, sem frio e geadas severas (PEREIRA, BERALDO, 2008).

De acordo com Hidalgo-López (2003), a classificação taxonômica do bambu segue a ordem: família, gênero, espécie e, para alguns, a variedade. A família é sempre a ‘Graminea’; podem ser alguns dos gêneros, por exemplo: *Dendrocalamus, Phyllostachys, Bambusa*; e espécies, por exemplo: *Giganteus, Asper, Strictus, Aurea, Vulgaris, multiplex* (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

O *Dendrocalamus asper* (*D. asper*), bambu de origem asiática, pode chegar a 40 m de altura e 25 cm de diâmetro. Esta espécie também é cultivada no Brasil onde se adaptou muito bem, principalmente nas regiões sudeste e centro oeste. Por causa do seu rizoma entouceirante (crescimento de colmos muito próximos e não espaçados), tem sua produção anual sempre no verão, no caso do Brasil de janeiro a março. Em relação ao plantio, o bambu apresenta duas distinções de crescimento: a planta e o indivíduo colmo. A planta para se tornar adulta leva cerca de 8 anos, já o indivíduo colmo cresce até 6 meses de idade e torna-se maduro (com propriedades físicas e

mecânicas adequadas) após 3 a 5 anos (PEREIRA, BERALDO, 2008; HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

O bambu se constitui como um material que tem atraído a atenção dos cientistas há décadas, tendo sido relatadas na literatura muitas aplicações de seu uso ao longo dos últimos séculos. Muitas dessas aplicações encontram-se no campo da engenharia civil, onde o bambu é utilizado costumeiramente como elemento estrutural (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

Segundo Lima (2013), os primeiros relatos com caráter técnico-científico, que visavam à utilização do bambu como material de construção civil, ocorreram a partir do início do século XX, na China e nos Estados Unidos. Posteriormente, surgiram alguns trabalhos na Alemanha, Japão, Índia, Filipinas e em outros países. No Brasil, os primeiros estudos científicos relativos ao bambu tiveram início em 1979 (LIMA, 2013).

O bambu é um material cujas propriedades mecânicas adequadas representam grande potencial a ser explorado pela engenharia. No entanto, apesar das suas propriedades físicas e mecânicas, o bambu, por vezes, tem sido pouco utilizado como material constituinte das estruturas. Isso se deve principalmente à sua configuração geométrica particular, pois apresenta várias limitações para seu emprego em construções, já que os colmos possuem espessura das paredes e diâmetro variável ao longo da sua altura. Além disso, possuem muitos nós, os quais representam pontos de menor resistência mecânica, impossibilitando a confecção de peças estruturais usuais como vigas e pilares de seções transversais retangulares (LIMA, 2013).

3.1.1. Características anatômicas do bambu

Pelas crescentes pesquisas e utilizações desde as tradicionais às mais modernas do bambu, torna-se necessário o conhecimento de suas características e propriedades. A sua estrutura anatômica vai desde a disposição de feixes; estruturas das bainhas e folhas incluindo principalmente a morfologia do colmo, como: tamanho, cor, comprimento entre os nós e ramificações (LIESE, 1987; SILVA, WALTERS, PAULINO, 2006).

O bambu é dividido morfologicamente em duas partes, rizoma e colmo (LIESE, 2015). O rizoma é a parte subterrânea do bambu, que é composto da fundação estrutural modificada de um colmo de bambu. A propagação do bambu se dá pelo rizoma, que serve também para a captação, fornecimento, transferência e

armazenamento de água e nutrientes para a planta, além da produção pelo crescimento de novos brotos ou colmos em seus nós (CHAOWANA, BARBU, 2017).

O colmo é a parte superior do bambu, contendo a maior parte do material lenhoso, formado por nós e entrenós. Os entrenós, na maioria das espécies, são ocos por dentro, que formam as cavidades do bambu. No entrenó, os feixes de fibras são orientados axialmente, o que tem grande impacto nas propriedades mecânicas do colmo. A partir de bibliografias, pode-se inferir que a parte média de um colmo de bambu é mais homogênea que a parte superior e inferior (AZADEH, 2018; HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

Para a maior parte das aplicações destinadas ao bambu, a disposição do colmo é fator determinante, uma vez que é sabido que somente os colmos maduros devem ser utilizados na construção civil (*in natura* ou engenheirado), principalmente, devido a sua resistência mecânica, estabilidade dimensional e resistência à degradação, após o tratamento preventivo. Na visão anatômica, o bambu é composto de 40% de fibras, 50% de células parenquimatosas e vasos (10%), como mostra a Figura 3.1 (LIESE, 1987). As fibras são distribuídas de tal forma que, ao longo da espessura, é encontrada maior densidade de fibras na camada externa do que na camada interna. O diâmetro do colmo, a espessura e o comprimento do entrenó também mudam com a posição na altura (GEROTO, 2014; GHAVAMI et al., 2003). Devido a sua morfologia e distribuição otimizada de fibras, o bambu pode ser considerado um material funcional, desenvolvido para resistir às forças de reação do vento e condições climáticas (GHAVAMI, MARINHO, 2005; NOGATA, TAKAHASHI, 1995).

Figura 3.1. Visão geral das características morfológicas do colmo do bambu.

a) Seção longitudinal do colmo do bambu apresentando as partes internas de ambos os entrenós de cada lado do nó.

b) Seção transversal do colmo do bambu próxima ao diafragma do nó.

c) Seção através da parede do colmo

d) Sistema vascular

Fonte: Adaptado de AKINBADE et al., 2019.

Nas células parenquimatosas, encontra-se a maior parte do amido, que é uma forma de armazenamento de energia pela planta. Adicionalmente, o bambu *D. asper*, por exemplo, conta em sua parte superior com 80,5 de holocelulose e 27,5% de lignina, o meio contém 78,4% de holocelulosee 26,9% de lignina e a parte inferior conta com 79,7% de holocelulose e 28,2% de lignina (GROSSER, LIESE, 1971; AKINBADE et al., 2019; GAUSS, 2020).

Como o bambu tem parede espessa e colmo longo, ele pode ser processado em vários tipos de elementos, como pó, partículas, fibras e lascas. Além disso, o bambu pode ser facilmente cortado em elementos finos e longos, por exemplo, fios, tiras e folheados. No entanto, os colmos de bambu afunilam-se em direção ao topo com um diâmetro de colmo decrescente. Posteriormente, um método e uma máquina eficientes devem ser usados para processar o colmo de bambu.

3.1.2. Tratamento preservativo

É sabido que o bambu tem uma infinidade de fatores que podem limitar o seu uso em termos de materiais de construção, principalmente, por ser um material natural, podendo ter diversas alterações em suas propriedades. Dentre estes fatores estão: a espécie, a idade da planta, manejo, teor de umidade e a biodegradação (MING, JYE, AHMAD, 2017; HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

A durabilidade do bambu se faz reduzida, em razão da biodegradação com a exposição às intempéries climáticas e à grande quantidade de amido na parte mais interna; sendo necessárias técnicas e métodos de tratamento para tornar seus produtos mais duráveis e úteis (GAUSS, 2020).

Para que o componente fabricado de bambu tenha seu tempo de vida estendido, é necessário que se dê um tratamento adequado para evitar ataques de insetos xilófagos, como o *Dinoderusminutus* (*D. minutus*), comumente conhecido como broca do bambu. Esse ataque reduz a sua resistência mecânica. Em locais fechados com elevada umidade a durabilidade, decaí para 4 a 6 anos e 15 anos para ambientes de baixa umidade (WATANABE; YANASE; FUJII, 2015; JANSSEN, 2000). Pode-se observar o aspecto do bambu na Figura 3.2, atacado pelo *D. minutus,* onde não foi submetido a nenhum tratamento preservativo.

Figura 3.2. Bambu *D. asper* (15cm de diâmetro) não submetido a tratamento preservativo.

Fonte: Própria autoria.

Os tratamentos preservativos tornam-se necessários para evitar a degradação biológica e aumentar a resistência, estendendo assim o seu tempo de vida útil ou durabilidade. Podem ser utilizados diversos tipos de tratamentos, desde os tradicionais como imersão em água ou fogo, o método avinagrado (maturação), fumigação entre outros (ESPELHO, BERALDO, 2008; LIESE, 2004; SARLO, 2000; HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

Na maturação, depois de cortados, os colmos são deixados na posição vertical em um período de duas semanas para a secagem lenta. No método de imersão em água, durante 1 ou 3 meses os colmos são imersos em água para que aconteça a lixiviação e degradação do amido e posteriormente secos (ESPELHO, BERALDO, 2008). Estes tratamentos objetivam a secagem e fermentação do amido, dos carboidratos e de algumas substâncias solúveis em água. Todos esses tratamentos na sua maioria são voltados para o artesanato e movelaria (HIDALGO-LÓPEZ, 2003; KAUR et al., 2016).

Os tratamentos químicos, que envolvem o uso de preservativos solúveis em água e óleos, são mais eficientes. Nos tratamentos por meio de solução aquosa, são utilizados compostos orgânicos ou inorgânicos, diluídos em água e aplicados sobre pressão ou por outros métodos (BAYSAL et al., 2007; LEVAN, JERROLD,2007; CALDEIRA, 2010; TONDI et al., 2012; SHARMA et al., 2015b).

Os métodos de tratamento com base em preservativos solúveis podem ser por meio de ingredientes ativos fixantes e não fixantes. Os preservativos fixantes, como CCA (arseniato de cobre cromatado) e CCB (borato de cobre cromatado), são resistentes à lixiviação e servem para situações expostas ou em contato com o solo. Os preservativos não fixantes são formados por sais lixiviáveis como os compostos à base de boro (DOT, ácido bórico, bórax) e cloreto de zinco ou sulfato de cobre e devem ser utilizados em ambientes protegidos das intempéries (GAUSS, 2020).

3.1.3. Bambu engenheirado

O bambu é um material de baixo custo, fácil aquisição, leve e flexível para a construção. Em termos estruturais, serve para a fabricação de treliças, por exemplo. Em muitos casos, quando a carga estrutural é atenuada ou removida é capaz de voltar a sua forma natural. Pode ainda ser utilizado como material de reforço na confecção de concretos. O bambu apresenta inúmeras vantagens para ser utilizado na engenharia, além das suas potencialidades é um material de fonte renovável (JANSSEN,1981; LIESE, 1987, SHARMA et al., 2015a).

O campo de pesquisa sobre o bambu na engenharia tende a crescer, de modo a distender o seu uso com fins estruturais. Podem ser vários os métodos de aplicação do bambu como componente estrutural. Os métodos variam com a particularidade do material bem como a praticidade na aplicação. Para maiores entendimentos, alguns métodos como o *scrimber bamboo*; *plybamboo*; Painel particulado; *OSB bamboo*; e o painel laminado, são detalhados na literatura (SHARMA et al., 2015b).

O *scrimber bamboo* e o painel laminado possuem semelhança na forma de processamento. Os colmos são divididos no centro e trabalhados de modo a obterem-se tiras para o bamboo laminado. Já para o *scrimber bamboo* faz-se a trituração dos colmos e prensadas as partes tendo atenção à direção das fibras. Esse material é muito utilizado na China para construção de pontes e moradias (SHARMA et al., 2015b).

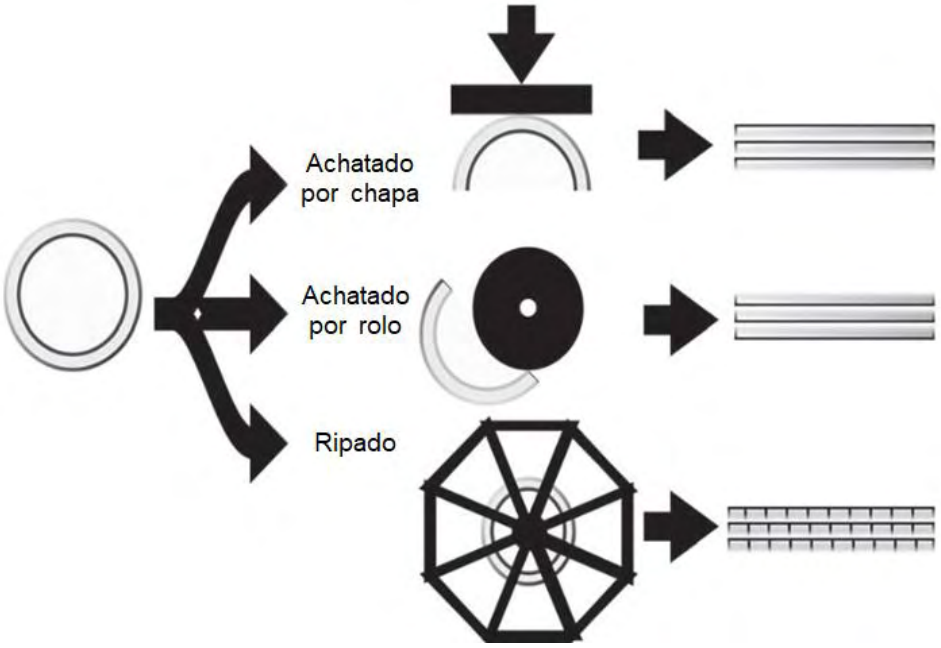
Pelas pesquisas divulgadas, o *scrimber bamboo* possui uma resistência à compressão em torno de 62 MPa e resistência à tração de 138 MPa. A resistência à compressão do bambu laminado varia de 36 a 66 MPa e resistência a tração de 82 a 144 MPa. A tensão de cisalhamento do bambu laminado fica em torno de 9 à 16 MPa. De igual modo os dois materiais possuem excelente resistência a flexão variando de 6 à 15 MPa para o *scrimber bamboo* e 6 a 14 MPa para o bambo laminado. *OSB*

bamboo como compósito pode ser utilizada como viga, em substituição as vigas de madeira (GUAN et al., 2012; SHARMA et al., 2015b; HUANG, SUN, MUSSO, 2017).

O *plybamboo* pode ser usado em painéis com fins estruturas e paredes internas (vedação). Na fabricação deste tipo de material de bambu, assim como os demais é retirado do colmo. É realizado todo o tratamento para a retirada do amido. Por fim formam-se painéis com várias camadas, incluindo camadas com as folhas. Esse material é prensado, no final do procedimento pode-se chegar as resistências de 53 e 32 N/mm^2 de compressão, 15,667 N/mm^2 de módulo de elasticidade e 119,41 N/mm^2 de módulo de ruptura. Consta que os painéis são mais resistentes quando não expostos ao ar livre (ANWAR et al., 2011; CHANG et al., 2018).

A Figura 3.3 mostra três processos para a modificação da geometria natural do bambu para a confecção de painéis. Dois destes processos se dão pelo achatamento da “meia cana” (*half Split*) por chapa e/ou rolo. A outra forma é através de cortes na seção longitudinal dos colmos com faca radial (instrumento adaptado para uso em bambu), formando lâminas (ripas ou taliscas), sendo este o método utilizado neste estudo.

Figura 3.3. Processos utilizados para modificação da forma do bambu.



Fonte: Adaptado de SHARMA et al., 2015a.

3.1.3.1. Bambu laminado

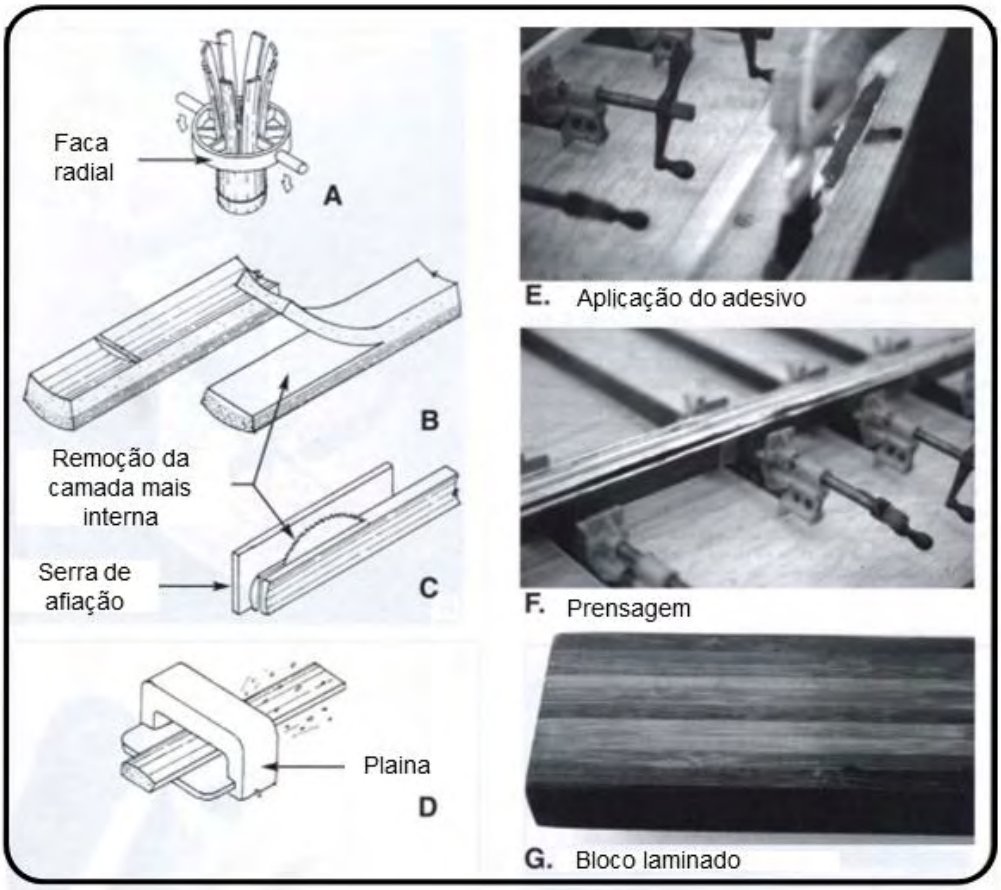
No Brasil, há várias espécies de bambu com potencial adequado para a fabricação de laminados de bambu (KRAUSE, 2015). O fator considerado limitante para a produção do BLC pode ser a inexistência ou a dificuldade de encontrar equipamentos adequados para realizar a laminação das taliscas (NOGUEIRA, 2013).

A ideia de utilização do bambu laminado para fins estruturais no Brasil é recente e ainda necessita do desenvolvimento de pesquisas mais aprofundadas. Neste contexto, observa-se a necessidade de desenvolvimento de equipamentos adequados para a laminação do bambu de modo industrial, além de uma melhor determinação do comportamento desse material quando empregado como elemento estrutural (LIMA, 2013).

A laminação é uma forma prática de controle das propriedades dos produtos de bambu, uma vez que é possível posicionar o elemento conforme a solicitação de esforços da aplicação requerida (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

Hidalgo-López (2003), apresenta na Figura 3.4 um método bastante utilizado para obtenção do elemento “ripa”, principalmente, na Colômbia. O método utiliza uma faca radial, a qual já faz o corte em todo o colmo do bambu, deixando-o ripado com dimensões similares. Depois, cada talisca tem sua camada mais interna, onde a sua concentração de fibras é menor, removida por meio de uma serra de disco (maquinário de marcenaria). A curvatura é eliminada mediante o uso de uma plaina desengrossadeira.

Figura 3.4. Manufatura do BLC na Colômbia.



Fonte: Adaptado de Hidalgo-López, 2003.

3.1.3.2. Bambu densificado

O processo de densificação tem como característica primordial aumentar a densidade do elemento a ser submetido neste, em consequência, uniformizar a estrutura e melhorar o desempenho mecânico. Tal processo é executado, sobretudo, pelo tratamento termo-hidro-mecânico (THM), provoca um colapso nas paredes dos vazios para a aproximação das fibras. Não é um processo usual, dado que o bambu densificado ainda não é considerado um produto (DIXON et al., 2016).

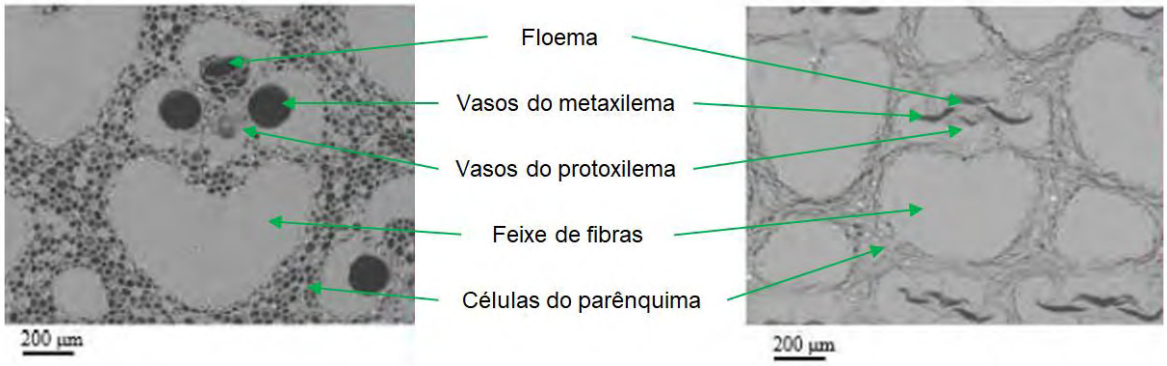
O bambu, como visto no subitem 3.1.1, possui estrutura anatômica mais heterogênea que a da madeira, o que faz com ele se densifique de forma diferente, e as propriedades do bambu se alterem de forma distinta às da madeira após submissão a este processo (DIXON et al., 2016).

Archila-Santos et al. (2014), estudaram a viabilidade do processo semelhante ao já utilizado na madeira, utilizando um processo UTH, para o bambu na forma de elemento “ripa”. A espécie utilizada foi a *Guadua angustifoliakunth* e com os

parâmetros de densificação: 20 min., 150 ºC, 6,20 MPa, obteve como resultado um aumento de 200% no MOE longitudinal em relação às fibras, resultando em um perfil densificado com melhores propriedades mecânicas.

No processo de densificação, ocorre um colapso das cavidades vazias, observado na Figura 3.5: os vasos do metaxilema, protoxilema e floema. Há uma redução do volume espaços vazios devido à flambagem de células do parênquima, enquanto os feixes de fibras ficam mais próximos. A densidade aumentou de 0,54 g/cm³ (das amostras naturais) para cerca de 0,85 g/cm³ (para as amostras densificadas).

Figura 3.5. Imagens de MEV da seção transversal do produto de bambu laminado X densificado.



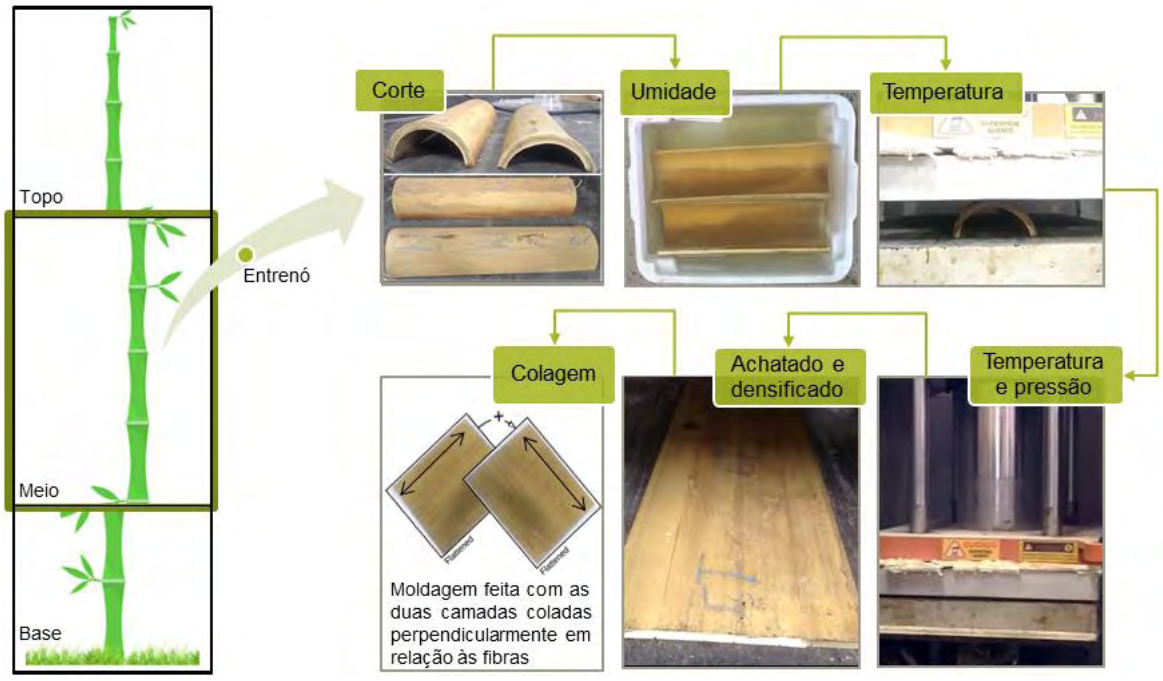
Fonte: Adaptado de KADIVAR et al. (2019a).

Pode-se proceder com este processo não apenas com o elemento em forma de “taliscas”, mas também, com o elemento “meia cana”, como detalhado no resumo gráfico da Figura 3.7. Kadivar et al. (2019a) fez uso deste método com o *D. Asper* e os seguintes parâmetros para o achatamento seguido da densificação, respectivamente: 2 e 10 MPa de pressão, 5 e 20 min de duração e temperatura de 140ºC. Os resultados obtidos apenas para o bambu achatado densificado foram: um aumento de 32,5% na densidade, um efeito alto de inchamento em espessura e absorção de água. Foi concluído que o achatamento com a densificação, também, melhora algumas propriedades físicas (uniformidade da estrutura com o aumento da densidade).

Kadivar et al. (2019b) também aplicaram o processo da Figura 3.6 apenas para as camadas externas de um painel sanduíche de bambu com o núcleo particulado, para fazer uso do colmo como um todo, não apenas o meio. As camadas individuais

de bambu achatado e densificado apresentaram valores médios de MOR e MOE de 349,20 MPa e 30,41 GPa, respectivamente.

Figura 3.6. Processo de densificação com o elemento “meia cana”.

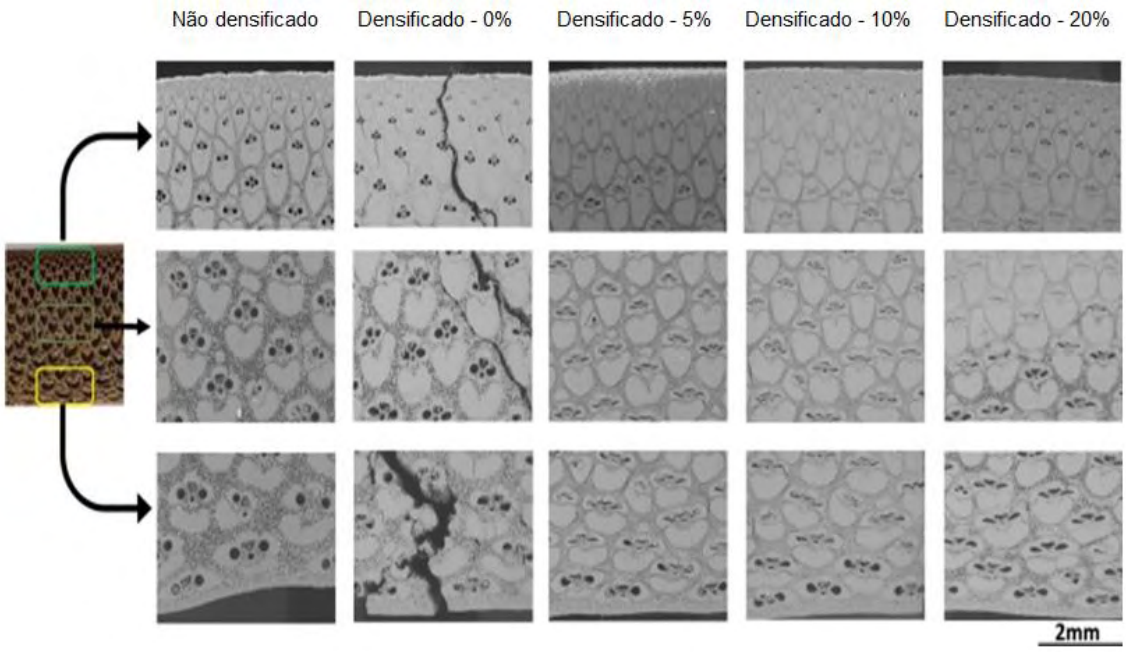


Fonte: Própria autoria.

O processo de densificação no bambu ainda não foi totalmente investigado, atualmente continuam sendo investigadas as variáveis em cada etapa deste processo, como o pré-tratamento das amostras, temperatura e tempo para a densificação e a reversibilidade do material (*Spring-back*).

Uma pesquisa sobre tratamento prévio das amostras de bambu avaliou o teor de umidade ideal do material antes de ser submetido ao processo de densificação. Para tal foram comparadas as amostras com 0%, 5%, 10% e 20% de água (Figura 3.7), em termos de microestrutura, grau de densificação, número de trincas, efeito de retorno, absorção de água e inchamento. Através da análise comparativa dos resultados observou-se que o teor de umidade ideal do material para efetuar o processo de densificação está entre 5 e 10% (KADIVAR et al., 2019b).

Figura 3.7. Densificação com diferentes teores de umidade.



Fonte: Adaptado de KADIVAR et al. (2019b).

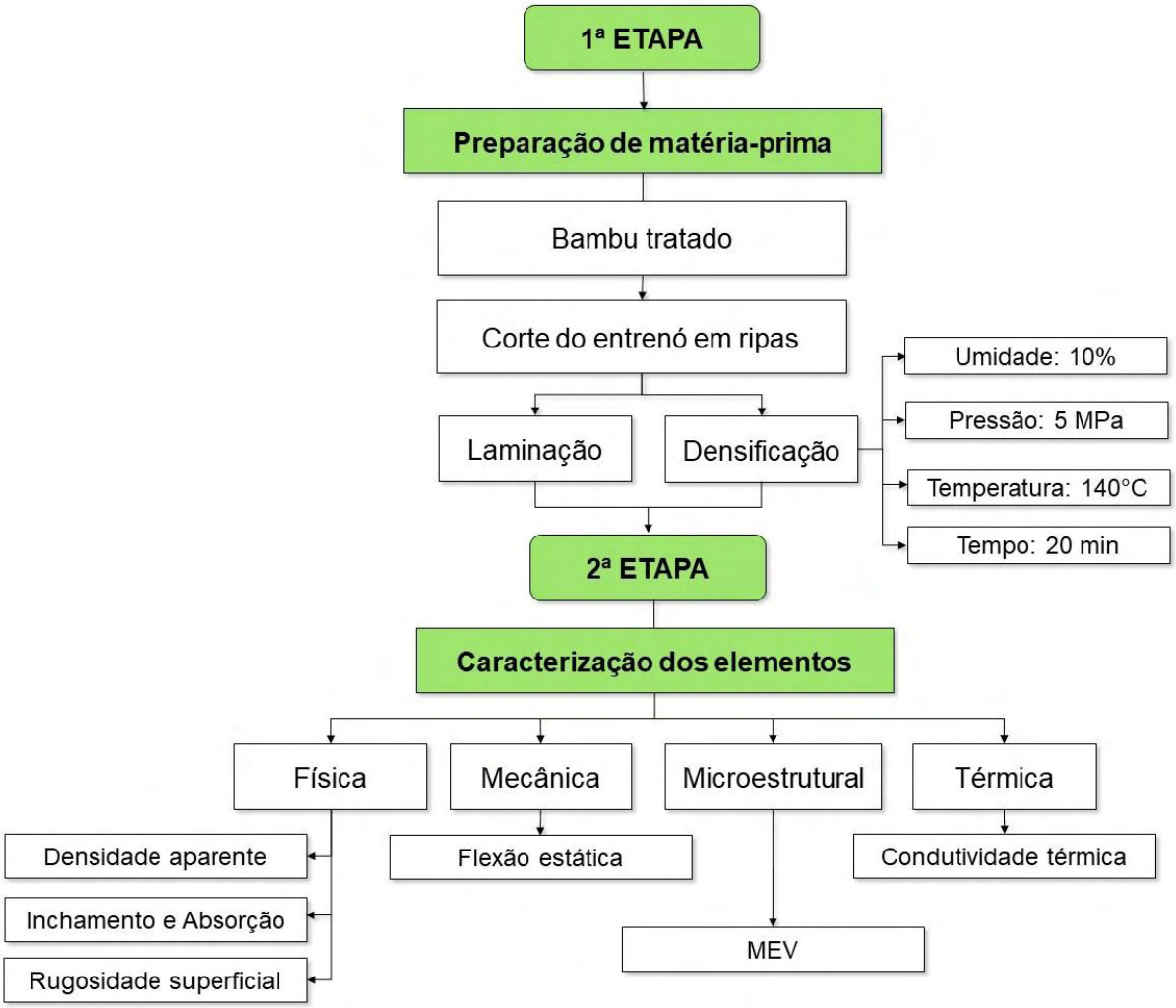
O processo aplicado no bambu melhora algumas das suas propriedades físicas, por exemplo: aumenta a densidade e uniformiza a estrutura. No entanto, causa maior inchamento da espessura e absorção de água (KADIVAR et al., 2019a, KADIVAR et al., 2019b, 2020).

Os resultados obtidos após o processo de densificação para o bambu *D. asper* em comparação com outra espécie, como: *Moso*, apresentaram melhor desempenho mecânico (KADIVAR et al., 2019a).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4.1 apresenta de forma resumida um fluxograma dos métodos utilizados na preparação dos elementos de bambu laminado (não densificado) e densificados (sem e com casca), e produção dos seus respectivos corpos de prova.

Figura 4.1. Fluxograma dos métodos utilizados no decorrer do trabalho.



Fonte: Própria autoria.

4.1. OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E PREPARAÇÃO DO MATERIAL

4.1.1. Bambu

Os bambus utilizados são da espécie *D. asper* (Figura 4.2) que foram retirados de touceiras que se encontram no Campus Fernando Costa da Universidade de São Paulo (USP), localizado no município de Pirassununga (São Paulo, Brasil). As touceiras foram manejadas por componentes do grupo de pesquisa do Laboratório de Construções Rurais e Ambiência (CONSTRAMBI) do mesmo campus. Somente colmos maduros (com idade entre 3 a 5 anos) foram colhidos.

Figura 4.2. Touceira do bambu *D. asper* no Campus Fernando Costa da USP em Pirassununga/SP.

Fonte: Própria autoria.

Os colmos recém cortados foram submetidos ao tratamento preservativo, tanto contra a biodegradação quanto contra os insetos xilófagos. Para isso, o método utilizado foi o de imersão prolongada em um tanque como mostrado na Figura 4.3,

com uma solução de 8 % de octaborato de sódio tetrahidratado ($Na_2B_8O_{13}$. $4H_2O$) durante o período de 7 a 10 dias (GAUSS, 2020; GAUSS, KADIVAR, SAVASTANO JÚNIOR, 2019).

O bambu tratado foi armazenado por 3 anos em ambiente coberto e protegido de intemperes, além de não estar apoiado diretamente no piso, e não houve evidências de ataques de *D. minutus*. O tratamento é benéfico para uso do bambu onde se faz necessário maior estabilidade, resistência e confiabilidade do material, ou seja, para aplicações estruturais.

Figura 4.3. Tanque utilizado no tratamento por imersão prolongada.

Fonte: GAUSS, 2020.

Após o tratamento por imersão, os colmos foram postos para secagem. A parte da região do meio dos colmos (Figura 4.4) foi selecionada para este projeto, utilizando os entrenós com um comprimento médio de 50 cm. Cada entrenó ainda foi cortado em duas partes iguais conforme as representações de produção dos elementos apresentados nas Figuras 4.5 e 4.7, respectivamente. Cada metade foi destinada a um dos processos (laminação e densificação).

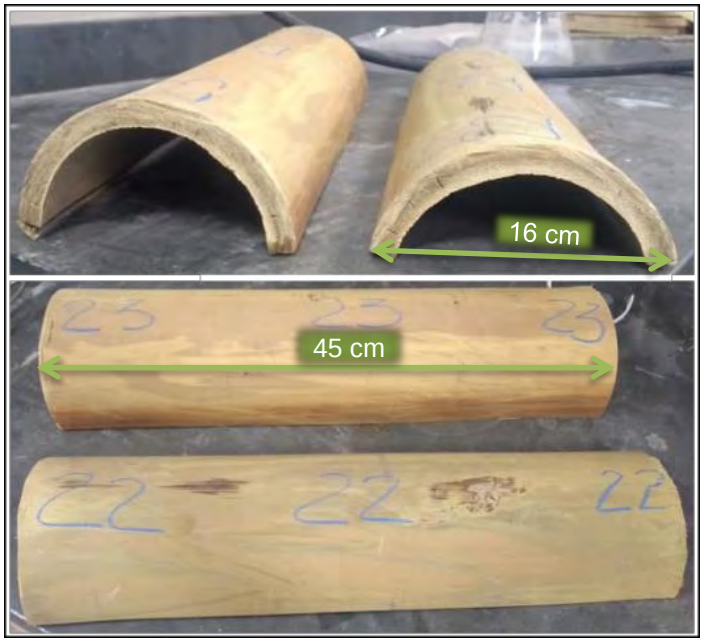
Figura 4.4. Ilustração das partes da conicidade do colmo do bambu.

Fonte: Própria autoria.

4.1.1.1. Processo de laminação

Para a obtenção do elemento “ripa” ou lâminas a partir dos entrenós de comprimento mínimo de 40 cm, foram realizados cortes ortogonais ao eixo radial do bambu, em que se faz necessário o uso de ferramentas comuns de marcenaria, como serra circular de bancada e uma plaina desengrossadeira, conforme mostrado na Figura 4.5. Nessa figura, é possível observar que o entrenó foi partido ao meio, sendo que uma seção foi destinada ao processo de laminação e a outra ao processo de densificação.

Figura 4.5. Corte do entrenó em duas seções.



Fonte: Própria autoria.

4.1.1.2. Processo de densificação

O processo de densificação foi realizado em uma prensa termo hidráulica Hidral-MAC com capacidade de 300 t (Figura 4.6). Os corpos de prova foram densificados e apresentam teor de umidade entre 5 e 10%, seguindo as recomendações de Kadivar et al. 2019 (KADIVAR et al., 2019b).

As seções obtidas como descrito no item 4.1.1.1 e observado na Figura 4.5, também foram repartidas em lâminas com largura maior que 4 cm, porém, para a neutralização da sua curvatura, as taliscas foram comprimidas na direção radial pela prensa termo hidráulica. Antes de se iniciar o procedimento, as amostras ficaram em contato com as chapas aquecidas da prensa (140°C) por cinco minutos. Após esse intervalo, se iniciou a aplicação da pressão (5 MPa) por 15 min. Em seguida, os corpos de prova resultantes da chapa térmica da máquina apresentada na Figura 4.6 tiveram a sua espessura reduzida, eliminando-se a parte a parede mais interna do bambu, onde existe maior concentração de amido e menor quantidade de fibra, esse procedimento teve como objetivo otimizar a homogeneização das fibras no elemento, além de equiparar a espessura do elemento de bambu densificado ao elemento laminado.

Figura 4.6. Prensa hidráulica utilizada para a densificação dos elementos “ripas de bambu.

Fonte: Própria autoria.

O cálculo do grau de densificação será realizado segundo a Equação 4.1.

$$GD = \frac{(t_0 - t_1)}{t_0} * 100 \quad (4.1)$$

Onde:

GD = grau de densificação (%);

t_0 = espessura inicial ou antes do processo de densificação (mm);

t_1 = espessura final ou exatamente após o processo de densificação (mm).

4.1.1.3. Preparação dos corpos de prova laminado e densificado

Foram considerados para esta investigação três grupos de elemento de bambu, laminado (não densificado) denominado como (ND), densificado sem casca (DS) e densificado com casca (DC). Para isso, os corpos de prova foram extraídos apenas

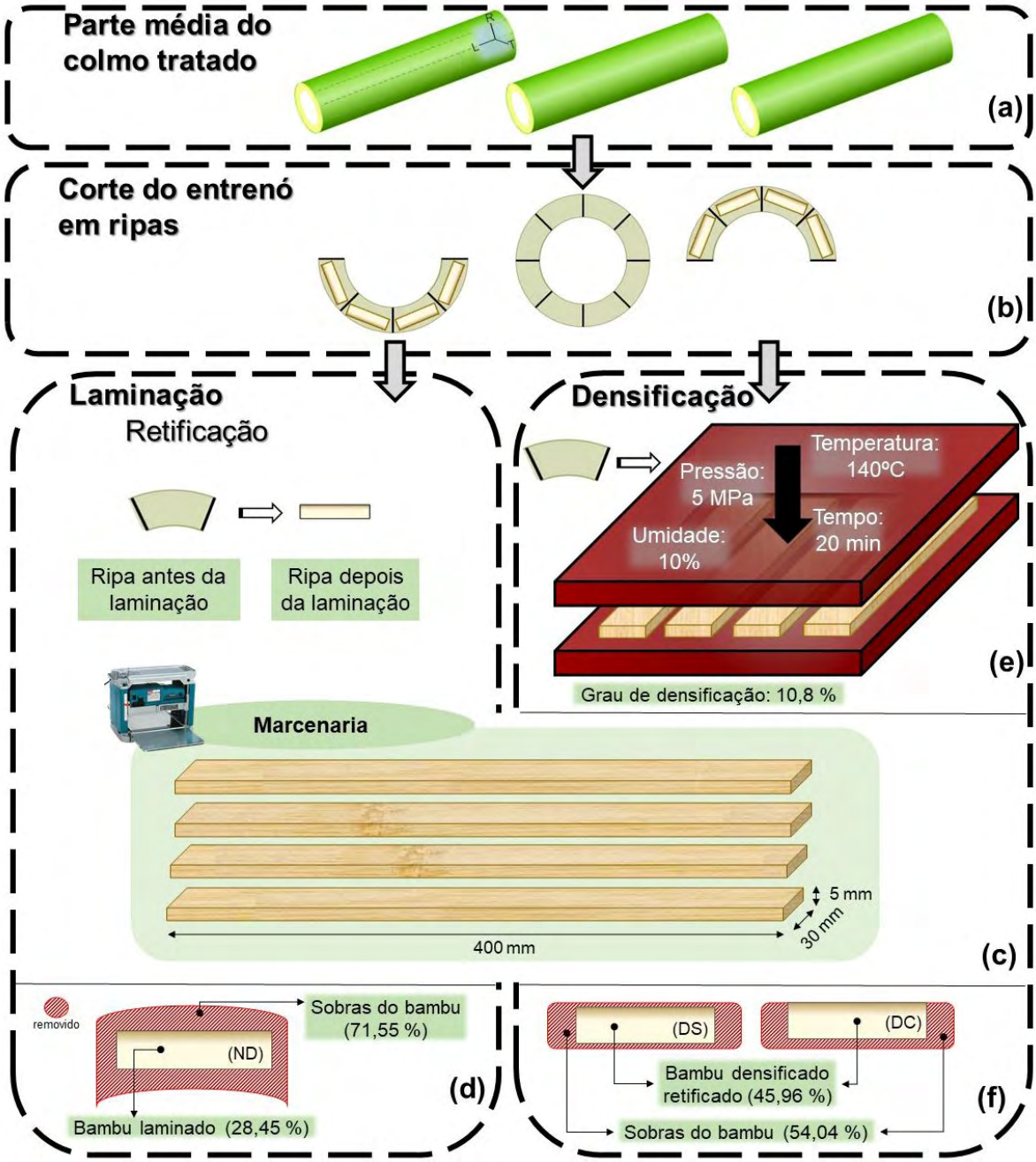
das partes internodais do colmo de bambu, com espessura média de parede de cerca de (12 ± 1) mm, sendo estas partes divididas longitudinalmente para produzir as ripas.

Na produção dos corpos de prova ND, foi utilizada uma plaina para remoção das faces internas e externas igualmente, visando eliminar a curvatura natural do bambu, deixando com uma ripa com 5 mm de espessura. Para os demais corpos de prova DS e DC, as fendas foram posicionadas inicialmente em prensagem térmica.

Para a preparação dos corpos de prova DS, ambas as faces interna e externa foram removidas igualmente para fazer a retificação da ripa com espessura de 5 mm. Enquanto que, para o grupo DC, apenas a face interna com menor fração de volume da fibra foi removida para a retificação das ripas de mesma espessura (5 mm). Três corpos de prova de cada grupo avaliado (ND, DS e DC) foram testados.

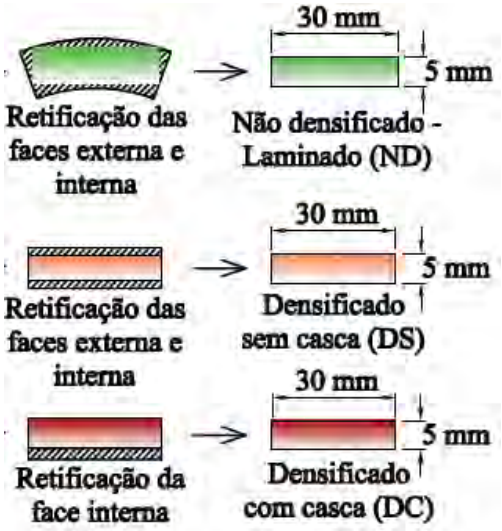
As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam, respectivamente, a representação esquemática dos procedimentos utilizados na preparação dos corpos de prova dos elementos de bambu laminado e densificado.

Figura 4.7. Representação esquemática da produção dos elementos de bambu laminado e densificado.



Fonte: Própria autoria.

Figura 4.8. Representação esquemática dos cortes de bambu usados na preparação dos elementos de bambu laminado e densificado.



Fonte: Própria autoria.

No processo de laminação, os corpos de prova ND foram extraídos da superfície longitudinal dos elementos de bambu com diâmetro de 5 cm. No processo de densificação, a seção achatada foi retificada de duas maneiras. Para uma, apenas a face interna com menor volume de fibras foi removida, resultando num laminado densificado com casca, DC. E para a outra, tanto a face interna como a externa foram removidas igualmente para fazer um laminado densificado sem casca, DS, com 5 mm de espessura. Para os grupos DS e DC, os corpos de prova também foram obtidos da superfície longitudinal com um diâmetro igual a 5 cm.

4.2. Caracterizações física, mecânica, microestrutural e térmica

4.2.1. Densidade aparente

Para densidade aparente os corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC, foram pesados em uma balança analítica, e o seu volume medido com um paquímetro digital.

Na preparação dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC foi realizada a sua estabilização em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de (65 ± 5)% de umidade relativa e (20 ± 3)°C, sendo que a umidade de equilíbrio é considerada quando o resultado das duas pesagens seguidas dos

corpos de prova, com intervalo de 24 h, não diferir mais do que 0,1% da massa do corpo de prova.

A densidade aparente dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC foi calculada de acordo com a Equação 4.2 (ASTM D2395-17, 2017) segundo o Princípio de Arquimedes.

$$DA = \left(\frac{M}{M_{AS} - M_1}\right) * \rho \quad (4.2)$$

Onde:

ρ = densidade aparente da água (kg/m³);

M = massa do corpo de prova (g);

M_{AS} = massa saturada em água (g);

M_1 = massa imersa em água (g).

O peso de todos os corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC foi medido em condição seca (tero de umidade = 0%).

4.2.2. Inchamento em espessura e absorção de água

A absorção e variação do inchamento da espessura em 24 h dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC imersos em água foi calculada de acordo com a ASTM D1037-12 (2016).

Na preparação dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC, também foi realizada a sua estabilização, até atingir a umidade de equilíbrio, em câmara climática nas condições de (65 ± 5)% de umidade relativa e (20 ± 3)°C.

A espessura dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC foi medida em seu centro, como também em suas extremidades (aproximadamente 30,0 x 30,0 x 5,0 mm), e o seu peso registrado, antes da imersão em água, conforme a norma ASTM D1037-12 (2016). Para isso, um recipiente foi preenchido com água destilada, de modo que, o corpo de prova ficou submerso, em um nível de água com cerca de 25 mm acima da sua superfície superior. Uma peneira foi utilizada como dispositivo para manter os corpos de prova submersos no interior do recipiente. Durante o período do ensaio, a água permaneceu a 20°C, após 2 h iniciais e as 24 h ± 36 min de imersão, os corpos de prova foram retirados da água e seu excesso enxugado com um papel absorvente, e medidas usando um paquímetro digital e balança de precisão.

A variação do inchamento da espessura (IE) e a absorção (AA), foram calculadas de acordo com as Equações 4.3 e 4.4 (ASTM D1037-12, 2016) respectivamente.

$$IE = \frac{E1-E0}{E0} * 100 \quad (4.3)$$

$$AA = \frac{M_{SA}-M_S}{M_S} * 100 \quad (4.4)$$

Onde:

IE= inchamento em espessura dos corpos de prova (%);

E_1 =espessura do corpo de prova após o período de imersão (mm);

E_0 = espessura do corpo de prova antes da imersão (mm);

AA = absorção de água do corpo de prova (%);

M_{SA} = massa saturada em água (g);

M_S = massa seca (g).

4.2.3. Ciclo úmido-seco

O teste de ciclos úmido-seco foi realizado para encontrar as alterações do comportamento do material submerso em água deionizada, resultando em seu inchamento e retorno às suas dimensões iniciais (*spring back*), ou de dimensão permanente devido aos ciclos de molhagem e secagem. Para este fim, aos corpos de prova foram secos a 103 ± 2°C durante 3 dias. Depois de retiradas da estufa, o peso e as dimensões foram registrados. Após isto, foram colocados em água deionizada e o peso e as dimensões registados após o período de 1h, 3h, 8h, e 24 horas. Em seguida, os corpos de prova foram colocados no forno durante 4 dias. Este procedimento foi repetido por mais três vezes até à convergência dos resultados.

4.2.4. Rugosidade média superficial

A rugosidade média superficial dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC foi medida usando um rugosímetro modelo TR-100, pertencente ao Laboratório de Madeira e Estrutura de Madeiras (LAMEM, USP São Carlos), de acordo com a Figura 4.9 (a), seguindo as normas BS EN ISO 4287-2000 e BS EN ISO 4288-1998.

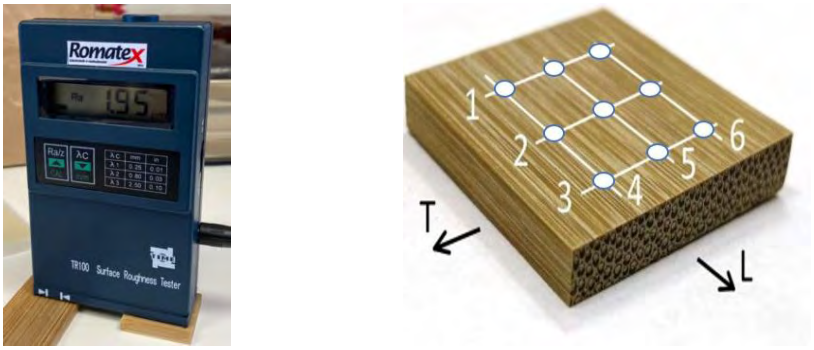
Os corpos de prova empregados na análise, possuíam dimensões de: 30 mm de comprimento, 30 mm de largura e 5 mm de espessura.

Para cada grupo, três corpos de prova (n = 03) foram utilizados. O teste de rugosidade foi realizado inicialmente na condição seca, antes do ciclo úmido seco, nas superfícies ao longo e perpendicularmente às fibras, ou seja, nas direções longitudinal e transversal, respectivamente. Mais adiante, os corpos de prova foram submersos em água deionizada pelo período de uma semana. Após isto, os corpos de prova foram levados a uma estufa a 103 ± 2°C para o processo de secagem. Por fim, a rugosidade superficial antes e depois de um ciclo úmido e seco, dos mesmos pontos inicialmente verificados, foi medida e comparada.

Os valores de rugosidade média superficial foram medidos em triplicata para cada grupo, e para cada réplica foram consideradas três linhas ao longo e três linhas perpendiculares às fibras totalizando 27 pontos de cada corpo de prova, conforme mostrado na Figura 4.9 (b).

Figura 4.9. Equipamento utilizado para medir a rugosidade média superficial dos corpos de prova dos elementos de bambu laminado e densificado.

(a) (b)



Fonte: Própria autoria.

Os testes primários mostraram um elevado valor para os coeficientes de variação CV de mais de 50%, o que exigiram repetições para cada superfície.

Dos parâmetros de rugosidade existentes, o R_a (rugosidade média), está presente na maioria dos equipamentos (rugosímetros) e, particularmente, o equipamento apresentado na Figura 4.9 (a) dispõe. O R_a é muito utilizado em processos de fabricação, em linha de produção, quando requer um acabamento estético da peça. Além de ser o parâmetro mais utilizado no mundo, os riscos

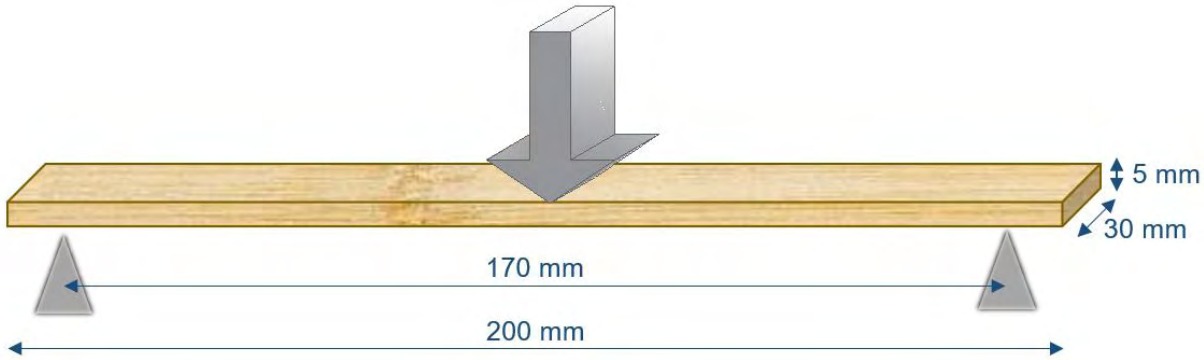
superficiais não afetam tanto o seu valor, já que não faz distinção entre picos e vales, o que é inadequado para peças sinterizadas e evidencia os altos valores de CV.

4.2.5. Flexão estática em três pontos

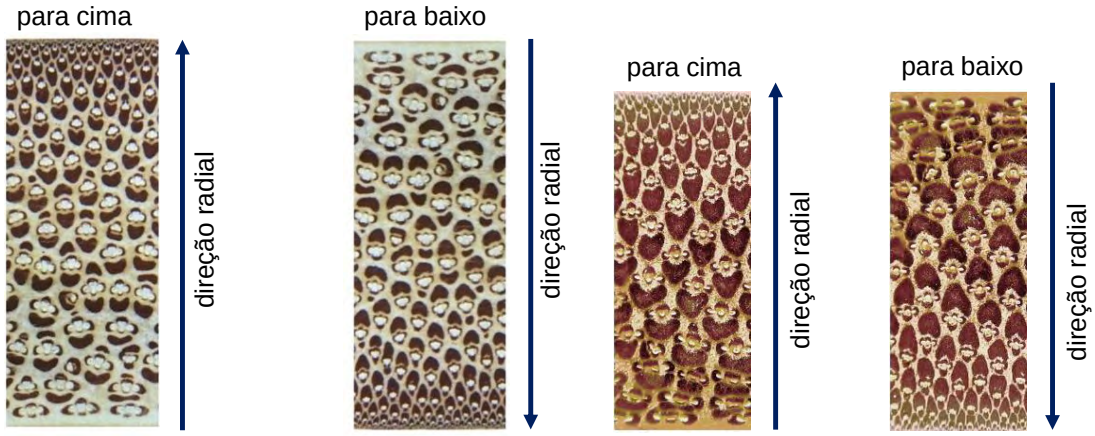
A caracterização mecânica dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC foi realizada por meio do ensaio de flexão estática em três pontos, e em duas posições distintas dos corpos de prova: para cima e para baixo, conforme representação esquemática apresentada nas Figuras 4.10 (a) e (b) respectivamente.

Figura 4.10. Representação esquemática dos procedimentos usados na preparação dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC para o ensaio de flexão estática em três pontos em posições distintas: para cima e para baixo.

(a)



(b)



Fonte: Própria autoria.

Na posição para cima, a camada externa da parede dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC (n = 6) está sob compressão e, na posição descendente, a camada externa está sob tensão. O ensaio de flexão estática em três pontos foi realizado usando máquina de ensaio universal EMIC modelo DL30000, utilizando célula de carga de 10 kN com taxa de deslocamento de 5 mm/min e vão livre de 220 mm. As dimensões dos corpos de prova foram 200 ± 1 mm de comprimento, (30 ± 0,5) mm de largura e (5 ± 0,3) mm de espessura. Os valores dos módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) foram calculados segundo as Equações 4.5 e 4.6 (ASTM D1037, 2016) respectivamente.

$$MOR = \frac{1{,}5*(P*D)}{B*(E)^2} \tag{4.5}$$

$$MOE = \frac{P1*D^3}{d*4*B*E^3} \tag{4.6}$$

Onde:

MOR = módulo de ruptura (N/mm²);

P = carga de ruptura disponibilizada no leitor da máquina (N);

D = distância entre os apoios (mm);

B = largura do corpo de prova (mm);

E = espessura do corpo de prova (mm);

MOE = módulo de elasticidade (N/mm²);

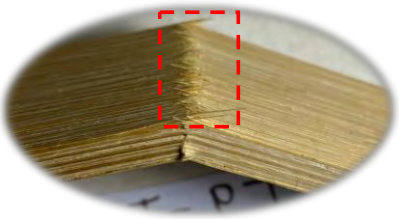
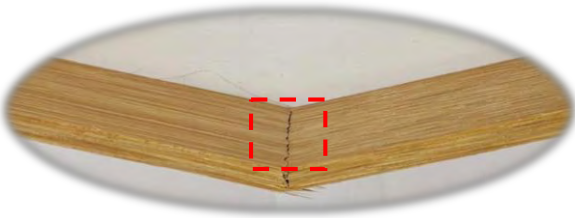
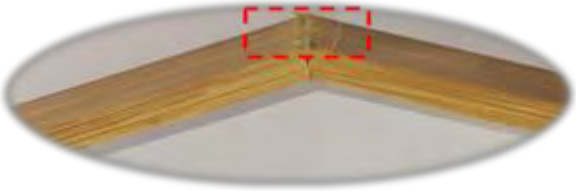
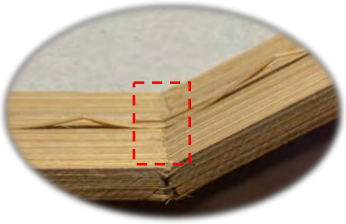
P1 = carga no limite proporcional disponibilizada no leitor da máquina (N);

d = deflexão, conforme a P1 (mm).

4.2.6. Microscopia eletrônica de varredura

A caracterização microestrutural dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC foi realizada por meio de um equipamento de bancada modelo HITACHI TM3000. Para isso, foram avaliadas as microestruturas das duas superfícies diferentes em dois lados dos três grupos investigados, após a ruptura destes corpos de prova no ensaio de flexão estática, conforme mostrado na Figura 4.11. A caracterização foi realizada na seção longitudinal dos corpos de prova investigados, de forma ascendente e descendente, submetidos aos esforços de tração e compressão.

Figura 4.11. Região de fratura da superfície longitudinal após ter sido submetida ao ensaio de flexão dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

Laminado - não densificado (ND)	
Tração	Compressão
	
Densificado sem casca (DS)	
Tração	Compressão
	
Densificado com casca (DC)	
Tração	Compressão

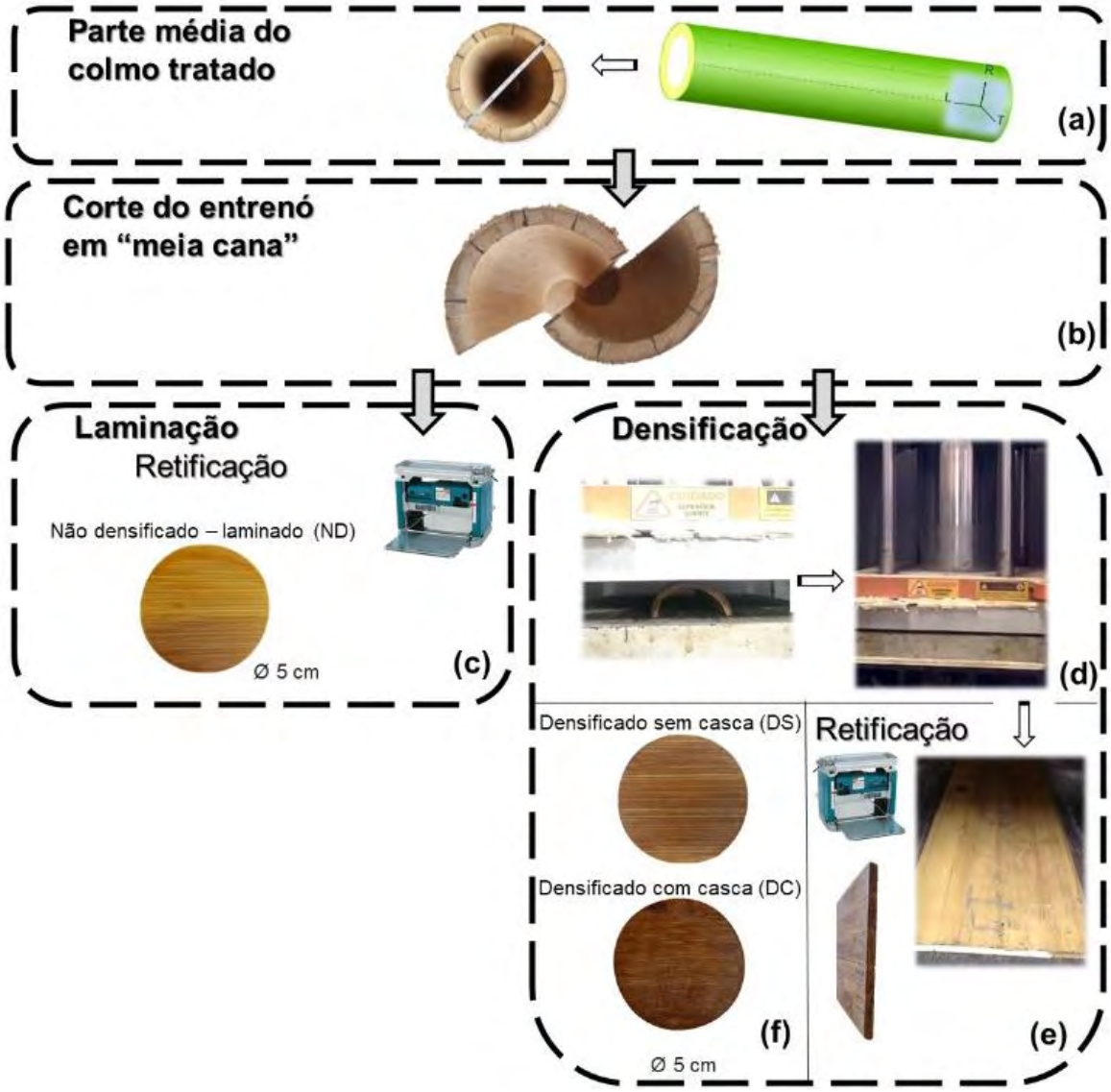
A linha retangular tracejada na superfície das amostras, vistas em perspectiva, mostra a região onde foram submetidas a tensões de tração e compressão durante o ensaio de flexão.
Fonte: Própria autoria.

4.2.7. Condutividade térmica

Para a preparação dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC para o teste de condutividade térmica, foram utilizadas as partes internodais do colmo de bambu. Para isso, os entrenós foram cortados ao meio em formato "*half split*", conforme mostrado na Figura 4.5, com uma seção separada para o processo de laminação e a outra seção para o processo de densificação (Figura 4.12a) (KADIVAR et al., 2019b). Posteriormente, a partir das seções destinadas ao processo de laminação (Figura 4.12b), os corpos de prova do bambu ND foram extraídos da

superfície longitudinal com um diâmetro de 5 cm. Enquanto que a outra seção foi sujeita ao processo de densificação (Figura 4.12c e 4.12d). Depois disso, a seção achatada (Figura 4.12e) foi retificada (Figura 4.12f) de duas maneiras: para uma, apenas a face interna com menor volume de fibra foi removida, resultando num laminado densificado (DC). Para o grupo DS, tanto a face interna como a externa foram removidas igualmente para fazer um laminado de 5 mm de espessura. Para os grupos DS e DC, os corpos de prova foram também obtidos da superfície longitudinal com um diâmetro igual a 5 cm.

Figura 4.12. Representação esquemática dos procedimentos usados na preparação dos corpos de prova dos elementos de bambu para o teste de condutividade térmica.



Fonte: Própria autoria.

4.3. Análises estatísticas

Com o objetivo de estudar se existe influência significativa do processo de densificação nos elementos de bambu, foram utilizados dois métodos distintos de análise estatística: médias aritméticas como medida de tendência central e coeficientes de variação como medida de dispersão. Posteriormente à análise descritiva, os dados foram inseridos numa análise inferencial para diagnosticar a existência de uma diferença significativa entre os tratamentos estudados. Foi utilizado um desenho completamente aleatório e os dados comparados pelo teste *Tukey* quando a ANOVA era significativa, ambos foram testados com significância estatística menor que 0,05, com suporte do Software R versão 2.11.1 (R Development Core Team - 2010).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos métodos detalhados no tópico anterior, tem-se a seguir os resultados dos ensaios físicos, mecânico, microestrutural e térmico.

O conjunto dessas caracterizações visam a indicação das propriedades tecnológicas dos elementos “ripas” de bambu para uma possível aplicação em painéis estruturais multicamadas.

5.1. Densidade aparente

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os valores médios de densidade aparente dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC. O peso de todos os corpos de prova foi medido em condição seca (MC = 0%). A análise estatística ANOVA mostrou uma diferença significativa entre os corpos de prova dos elementos de bambu DS e DC, e ND. Porém, não é observada diferença significativa entre as amostras DS e DC. Os corpos de prova densificados (DS e DC) apresentaram grau de densificação médio igual a 10,8% (Coeficiente de variação - CV igual a 3,45%).

Tabela 5.1. Densidade aparente média dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

Tipos de amostras	Densidade aparente (g/cm^3)	*CV (%)
Laminado não densificado - ND	0,79	2,29
Densificado sem casca - DS	0,92	3,29
Densificado com casca - DC	0,99	3,59

*CV = Coeficiente de variação (%).

Fonte: Própria autoria.

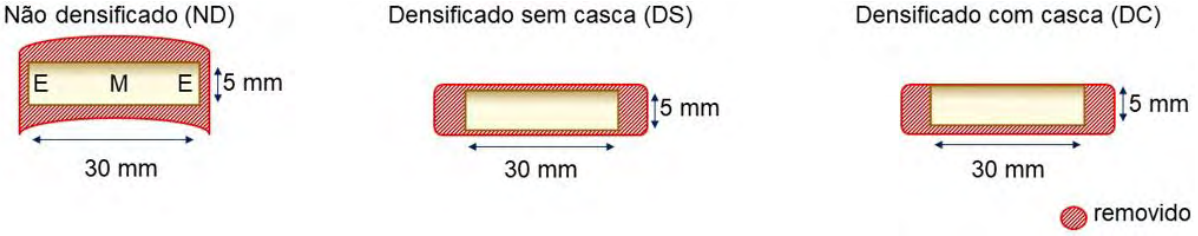
Observa-se um valor superior de densidade aparente para o corpo de prova DC em relação aos demais, devido à presença neste, de um maior aglomerado de fibras por conter a camada mais externa do bambu, além de ter sido submetido ao processo de densificação.

O CPs densificados, por terem seus vasos condutores colapsados, quando submersos, tendem a aumentar o seu tamanho inicial, ou seja, um maior inchamento

quando comparado com o ND. Por consequência, tem-se uma maior variabilidade do volume, o que elucida os valores obtidos para o CV.

O valor da densidade dos corpos de prova ND não está relacionado a toda a seção de bambu. Na Figura 5.1, a fração de volume da fibra no meio (ponto M) é menor que a dos dois pontos da extremidade (E) que estão mais próximos da face externa e torna a densidade média superior ao valor esperado. Deve-se considerar que para os corpos de prova ND, a retificação (procedimento de remoção das camadas com uma plaina desengrossadeira), remove a curvatura natural da parede de bambu, por consequência, há uma diminuição da densidade aparente obtida devido ao menor aglomerado de fibras residual. Mas para o bambu densificado, a retificação é feita após o procedimento de densificação, quando a seção foi retificada com antecedência, como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 5.1, onde as áreas hachuradas são as áreas removidas.

Figura 5.1. Representação esquemática do procedimento utilizado na preparação dos elementos de bambu laminado e densificado com e sem casca.



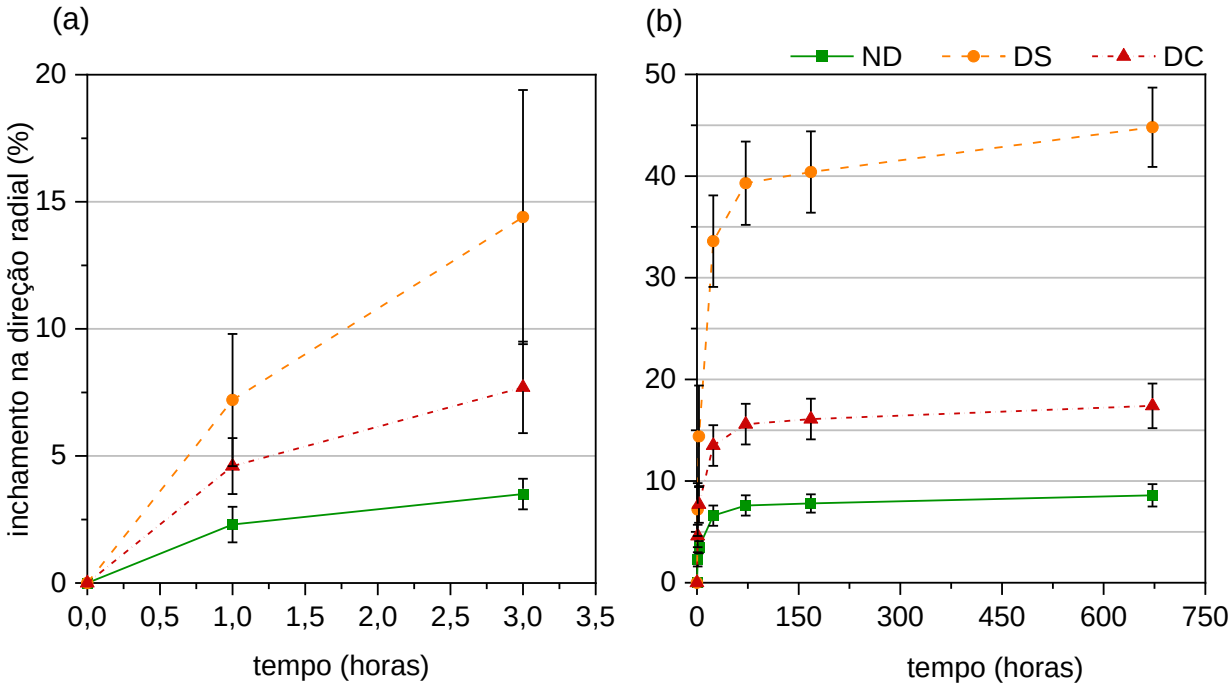
Extremidade (E); Ponto médio (M).

Fonte: Própria autoria.

5.2. Absorção de água de curto e longo prazo

As Figura 5.2 (a) e (b), 5.3 (a) e (b) e 5.4 (a) e (b) apresentam, respectivamente, o inchamento radial e tangencial e as mudanças de peso devido à absorção de água por até quatro semanas dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

Figura 5.2. Inchamento na direção radial dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC (a) curto período de tempo e (b) longo período de tempo.



Fonte: Própria autoria.

Observa-se que, o resultado da absorção de água a curto prazo, durante um período de 3 horas, no sentido radial, evidencia que o inchamento máximo para amostras densificadas sem casca (DS) é cerca de 14%, enquanto que para as amostras não densificado (ND) e densificado com casca (DC), a absorção de água é de aproximadamente 4% e 8% respectivamente, como observado na Figura 5.2 (a).

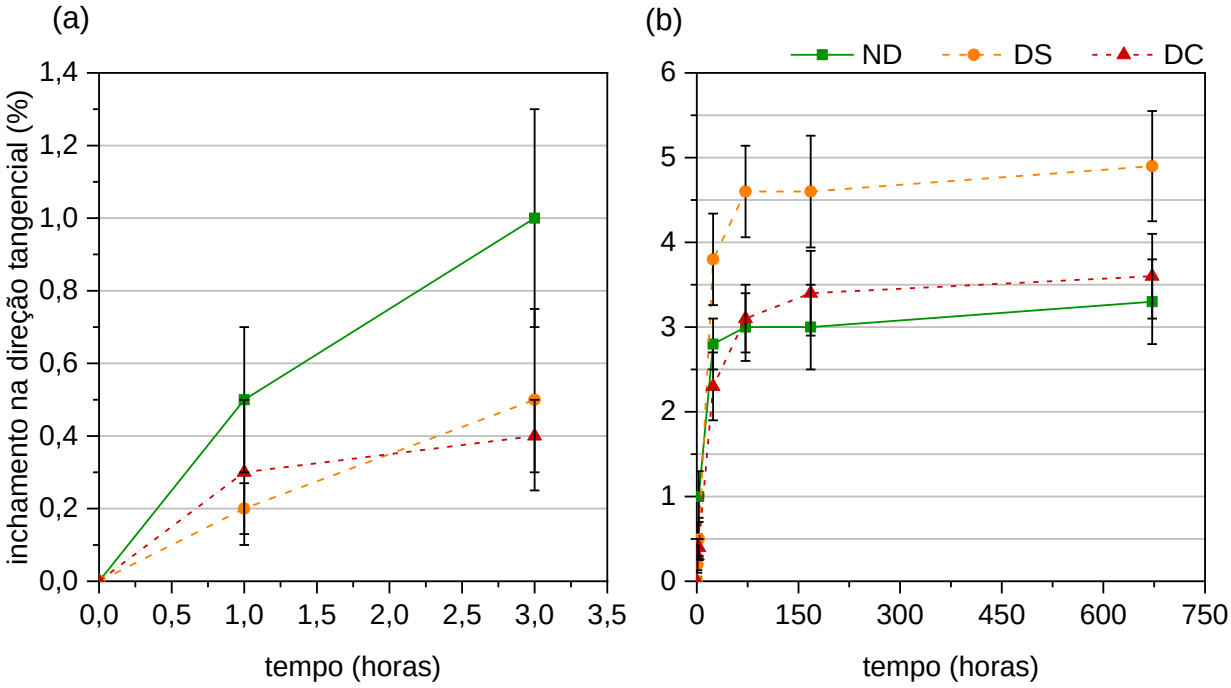
Por outro lado, o resultado da absorção de água a longo prazo e inchamento na direção radial após quatro semanas, mostra que o inchamento máximo para as amostras DS é de quase 45%, mas os valores observados para as amostras ND e DC são de aproximadamente 9% e 17,5%, respectivamente, conforme Figura 5.2 (b).

Quanto às alterações dimensionais, as amostras ND apresentaram os valores mais baixos de inchamento ao longo de 4 semanas de imersão. Nota-se que a influência da densificação é claramente observada no inchamento radial. No entanto, ao manter a camada mais externa (casca) após a densificação, este efeito é menos evidente.

De fato, o processo de densificação, se a casca for mantida, reduz a absorção de água se comparado com o bambu laminado não densificado. O inchamento a longo

prazo na direção tangencial para ND, DS e DC, mostrado na Figura 5.3 (a) e Figura 5.3 (b), é entre 3% a 5%, notadamente inferior ao do inchamento na direção radial.

Figura 5.3. Inchamento na direção tangencial dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC (a) curto período de tempo e (b) longo período de tempo.

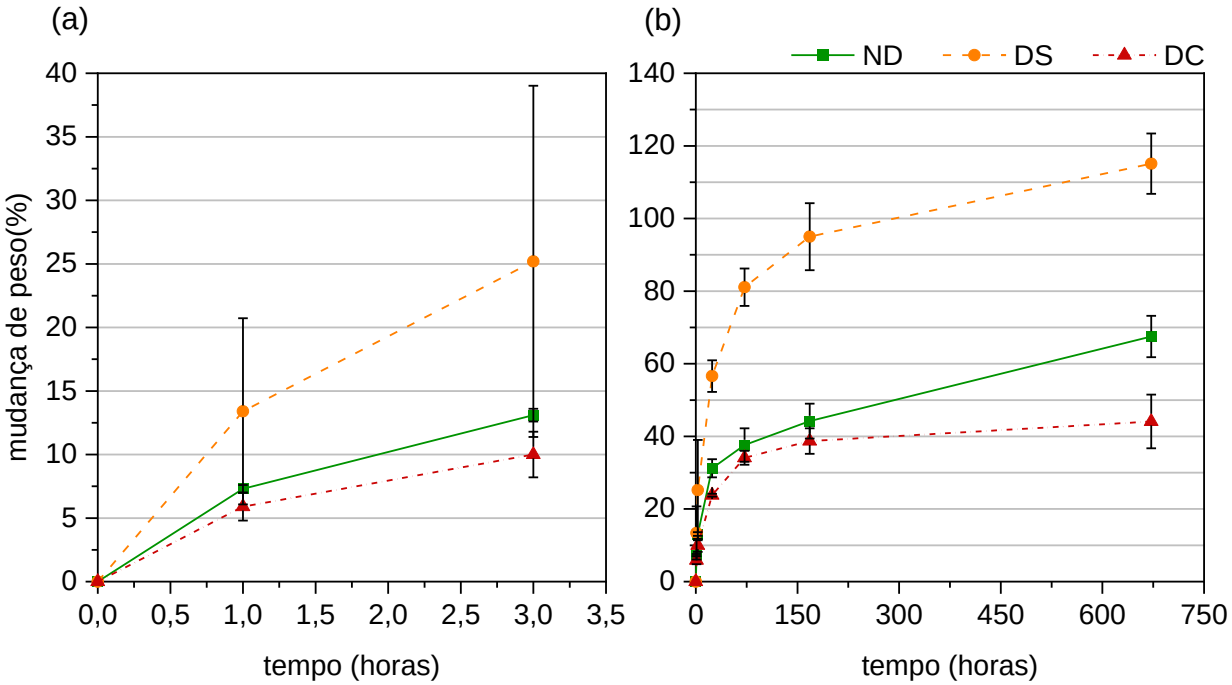


Fonte: Própria autoria.

Para os corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção de água de curto prazo, é possível verificar um aumento de peso em DS de cerca de 25%, ao mesmo tempo que ND e DC apresentam valores entre 10% e 13%, no período de 3 horas, conforme Figura 5.4 (a).

Por outro lado, quando submetidos ao ensaio de longo prazo, verifica-se que as alterações de peso devidas à absorção de água para amostras ND e DC, durante uma semana, são relativamente próximas, chegando a cerca de 40%. Mas, após este período, o laminado não densificado continua a ganhar peso (até 67%), enquanto o DC vai até um máximo de 44%, conforme pode ser verificado na Figura 5.4 (b). Para as amostras DS, a variação de peso é de cerca de 115%. Entre a primeira e quarta semana de imersão, as amostras DS ganharam quase 20% de peso, resultado semelhante ao da amostra ND.

Figura 5.4. Mudança de peso para dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC (a) curto período de tempo e (b) longo período de tempo.



Fonte: Própria autoria.

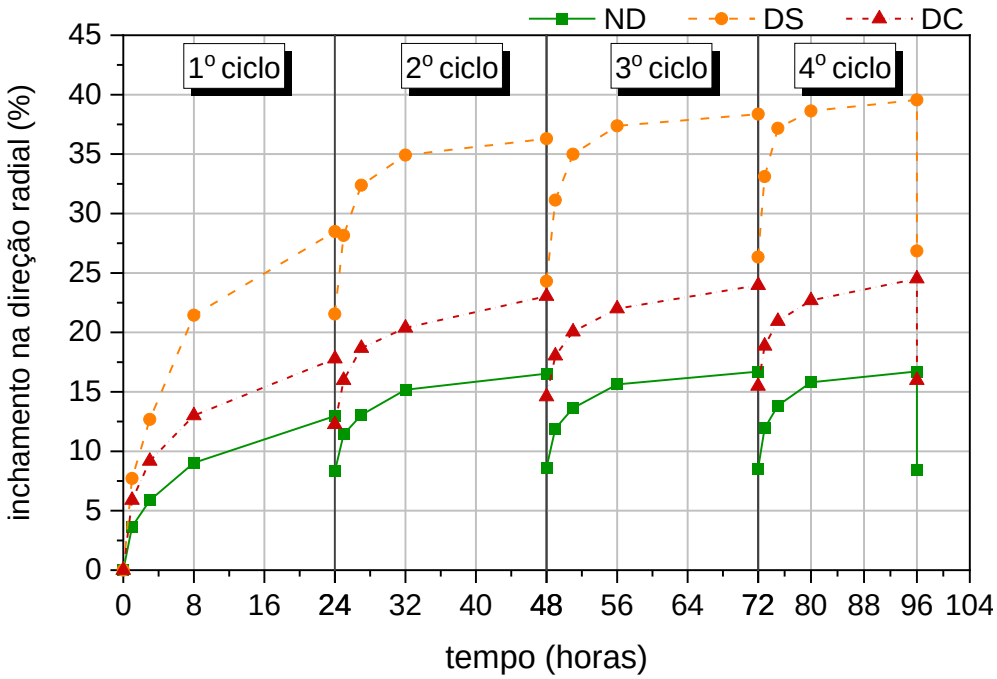
Antes do ensaio, os corpos de prova foram estabilizados em umidade relativa ambiente e temperatura de (70 ± 5)% e (25 ± 2)°C, respectivamente. O teor de umidade dos corpos de prova ND, DC e DS mediram 10,5%, 6,8% e 7,6%, respectivamente. As mudanças de dimensão medidas na direção radial e tangencial não mostraram uma diferença significativa entre as condições secas e úmidas.

5.2.1. Teste de ciclo úmido-seco

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam, respectivamente, o efeito dos ciclos úmido-seco sobre o inchamento radial, tangencial e a absorção de água dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

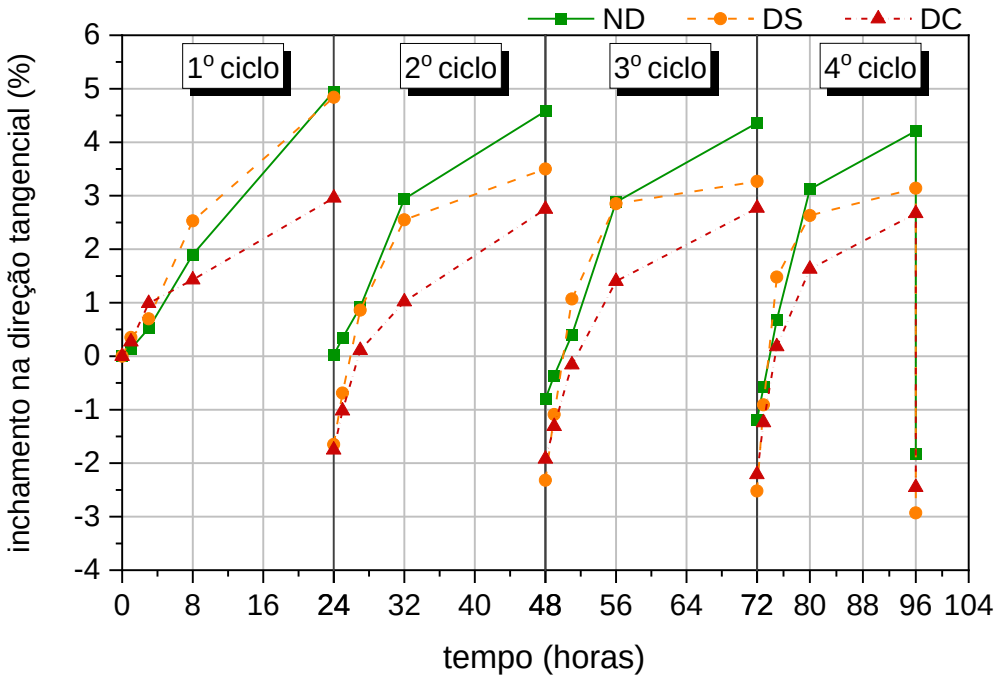
Adotou-se um período de secagem de 4 dias entre cada período de 24h, no qual os corpos de prova permaneciam submersos em água.2

Figura 5.5. Inchamento na direção radial para quatro ciclos úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.



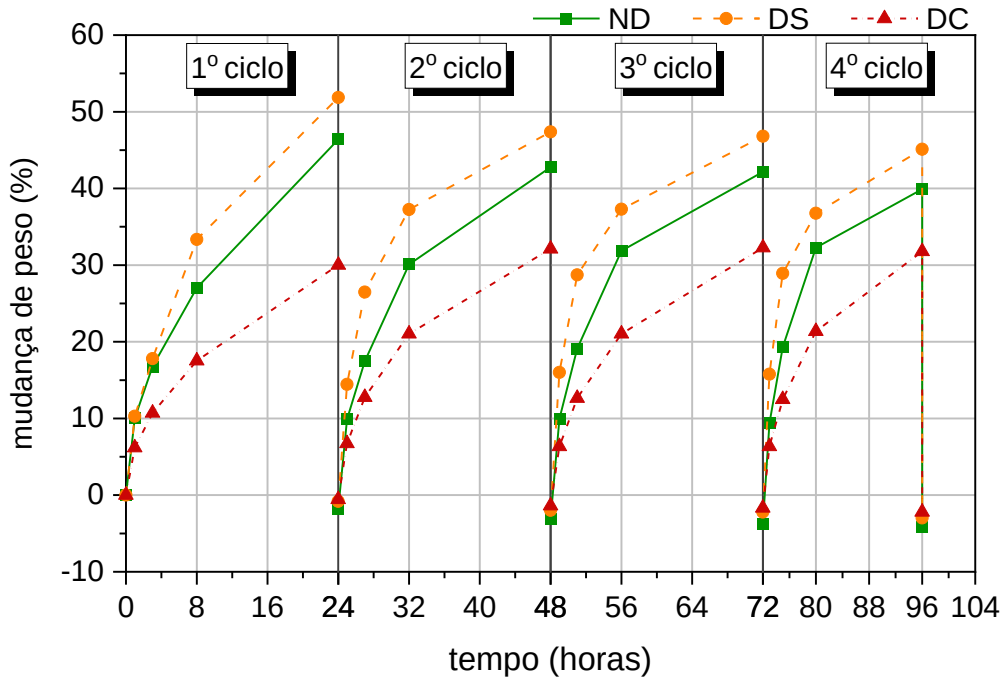
Fonte: Própria autoria.

Figura 5.6. Inchamento na direção tangencial para os quatro ciclos úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.



Fonte: Própria autoria.

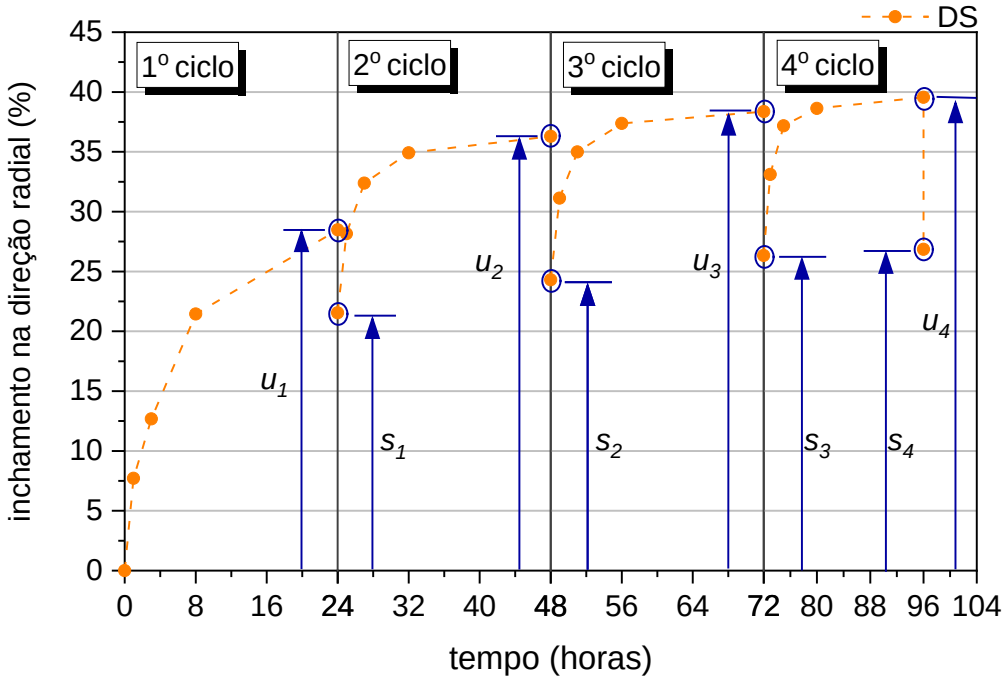
Figura 5.7. Mudanças de peso para os quatro ciclos úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.



Fonte: Própria autoria.

A Figura 5.8 apresenta os quatro ciclos úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu DS, no qual é possível observar que os resultados são convergentes. Além disso, são mostradas as mudanças de dimensão irreversíveis na direção radial após cada ciclo úmido-seco, onde s_1 a s_4 são os inchamentos na direção radial na condição seca, e u_1 a u_4 são os inchamentos na direção radial na condição úmida para o primeiro até o quarto ciclo úmido-seco.

Figura 5.8. Dimensão irreversível muda na direção radial em condições úmidas e secas para quatro ciclos úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu densificados sem casca (DS).



Fonte: Própria autoria.

A Tabela 5.2 apresenta os valores numéricos relacionados ao inchamento na direção radial para os quatro ciclos consecutivos em condições úmidas e secas dos corpos de prova dos elementos de bambu DS (Figura 5.8). Nessa Tabela, é possível observar que somente após um ciclo úmido-seco, um inchamento irreversível próximo a 8,31% ocorre para os corpos de prova dos elementos de bambu ND na condição seca. Nos demais ciclos úmido-seco (até quatro vezes) esse valor permanece quase o mesmo, atingindo o máximo de 8,41%. Para os corpos de prova DC, a primeira lavagem irreversível é observada após o primeiro ciclo, 12,26% e 17,78% para condições secas e úmidas, respectivamente. Após quatro ciclos, aumenta para 15,98% e 24,52% para condições secas e úmidas, respectivamente. Para os corpos de prova DS, a diferença entre o primeiro e o quarto ciclos na condição seca, como pode ser visto na Tabela 5.2 é maior do que aquele DC e ND.

Tabela 5.2. Inchamento na direção radial para os quatro ciclos consecutivos em condições úmidas (*u)* e secas (*s)* dos corpos de prova dos elementos de bambu densificados sem casca (DS).

Ciclo	Condição	Inchamento (%)		
		Não densificado (ND)	Densificado com casca (DC)	Densificado sem casca (DS)
Primeiro	s_1	8,31	12,26	21,55
	u_1	12,97	17,78	28,48
Segundo	s_2	8,64	14,60	24,31
	u_2	16,53	23,05	36,29
Terceiro	s_3	8,55	15,49	26,34
	u_3	16,70	23,97	38,37
Quarto	s_4	8,41	15,98	26,85
	u_4	16,72	24,52	39,56
	$s_4 - s_3$	-0,10	0,50	0,50
	$s_4 - s_1$	0,10	3,70	5,30
	u_4-u_3	0,00	0,60	1,20
	u_4-u_1	3,80	6,70	11,10
	u_4-u_4	8,31	8,54	12,71

Fonte: Própria autoria.

A retração parcial na direção tangencial, cerca de 2% a 3%, é observada após quatro ciclos úmido-seco para os corpos de prova laminados e densificados, como observado na

Figura 5.6. Além disso, como mostrado na Figura 5.7, cada ciclo úmido-seco causa uma redução parcial de peso devido à liberação de extrativos de bambu na água deionizada. A variação das mudanças de peso devido à absorção de água para cada ciclo, para cada CP não densificado e densificado com e sem casca de bambu densificado não é significativa.

5.3. Análise da rugosidade superficial

Para analisar a diferença entre a rugosidade média das superfícies ao longo e perpendicularmente às fibras, inicialmente, foi realizado o ensaio de rugosidade superficial, a fim de estudar, também, a mudança de rugosidade antes e depois de um ciclo úmido e seco.

Na Tabela 5.3, são apresentados os valores médios, os menores e os maiores valores da rugosidade obtidos para cada uma das superfícies avaliadas, tanto antes, quanto depois do ciclo úmido-seco, além do coeficiente de variação entre os grupos em cada posição e situação.

Tabela 5.3. Valores de rugosidade média superficial (R_a) das superfícies delineadas dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC

Grupo	Situação	Posições					
		Perpendicular às fibras			Ao longo das fibras		
		Média (μm)	Valor Mínimo (μm)	Valor Máximo (μm)	Média (μm)	Valor Mínimo (μm)	Valor Máximo (μm)
ND	antes	1,76	0,36	3,37	1,31	0,39	3,34
	depois	3,13	0,5	4,93	2,12	0,41	3,50
DS	antes	1,34	0,55	3,13	0,61	0,34	1,06
	depois	1,84	0,60	3,16	1,00	0,33	2,17
(DC) superfície mais interna	antes	1,69	0,57	3,74	1,47	0,52	3,06
	depois	6,96	5,08	9,33	2,01	0,59	3,74
(DC) superfície mais externa	antes	2,30	0,52	4,82	2,67	1,22	4,09
	depois	3,48	0,63	5,68	3,25	2,18	5,01
CV (%)	antes		43,78			31,59	
	depois		25,98			24,61	

*DP = Desvio padrão.

Fonte: Própria autoria.

Os resultados dos coeficientes de variação são altos e variam, pois os elementos fibrosos (ripas de bambu) não são retilíneos.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de rugosidade média superficial dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC antes e depois de um ciclo úmido-seco.

Tabela 5.4. Valores médios e desvio padrão (DP) de rugosidade média superficial (R_a) perpendicular e ao longo das fibras, antes e depois de um ciclo úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

Grupo	Situação	n*	R_a (μm)			
			Perpendicular às fibras		Ao longo das fibras	
			Rugosidade	DP	Rugosidade	DP
ND	antes	27	1,76	0,92	1,31	0,71
	depois	27	3,13	1,29	2,12	0,71
DS	antes	27	1,37	0,66	0,62	0,22
	depois	27	1,84	0,74	1,00	0,54
(DC) superfície mais interna	antes	27	1,69	0,93	1,15	0,78
	depois	27	6,96	1,28	2,01	0,73
(DC) superfície mais externa	antes	27	2,30	1,36	2,66	0,87
	depois	27	3,48	1,93	3,25	0,80

Fonte: Própria autoria.

Com base resultados dos testes mencionados na Tabela 5.4, foi feita a análise ANOVA da rugosidade da superfície perpendicular às fibras é significativamente mais elevada do que aquela ao longo do fibras para ambas as situações, antes e após ser submetido a um ciclo úmido e seco.

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, a análise estatística ANOVA dos valores de rugosidade média superficial dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC antes e depois de um ciclo úmido-seco.

Tabela 5.5. Análise estatística dos valores de rugosidade média superficial (R_a) perpendicular e ao longo das fibras, antes e depois de um ciclo úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

Grupo	Situação	ANOVA	
		$F_{critico}$	F
ND	antes	4,03	4,08*
	depois	4,03	12,75*
DS	antes	4,03	31,76*
	depois	4,03	22,94*
(DC) superfície mais interna	antes	4,03	5,47*
	depois	4,03	306,00*
(DC) superfície mais externa	antes	4,03	1,36
	depois	4,03	0,31

* = significativo;
Fonte: Própria autoria.

Tabela 5.6. Análise estatística dos valores de rugosidade média superficial (R_a) perpendicular e ao longo das fibras, antes e depois de um ciclo úmido-seco dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

Grupo	Situação	ANOVA	
		$F_{critico}$	F
ND	perpendicular às fibras	6,84	4,03*
	ao longo das fibras	17,62	4,03*
DS	perpendicular às fibras	6,10	4,03*
	ao longo das fibras	11,45	4,03*
(DC) superfície mais interna	perpendicular às fibras	301,40	4,03*
	ao longo das fibras	17,89	4,03*
(DC) superfície mais externa	perpendicular às fibras	6,76	4,03*
	ao longo das fibras	6,84	4,03*

* = significativo;
Fonte: Própria autoria.

Na análise, observou-se que a superfície mais externa da amostra DC, apresentou resultados sem diferença significativa na rugosidade da superfície ao longo e perpendicular às fibras. É apresentado com os parâmetros relacionados da ANOVA na Tabela 5.5. Para estudar o efeito do ciclo úmido e seco na rugosidade da superfície, os valores ao longo e perpendicularmente às fibras antes do ciclo úmido e seco são comparados com os mesmos valores depois ciclo úmido-seco. O resultado é apresentado na Tabela 5.6.

5.4. Flexão estática em três pontos

Os três grupos de amostras foram analisados em duas orientações, de acordo com a posição da pele. De acordo com os resultados de módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR), o limite de proporcionalidade (LOP) e a energia específica (EE) dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC, nas posições para cima e para baixo, apresentados na Tabela 5.4, a densificação aumenta o desempenho da flexão e a permanência da casca melhora estes parâmetros de flexão, em comparação com o bambu natural e o bambu densificado.

Tabela 5.4. Ensaio de flexão estática em três pontos dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC, nas posições para cima e para baixo em relação a camada mais externa.

Tipo	Posição	MOR (MPa)	CV (%)	MOE (GPa)	CV (%)	LOP (Mpa)	CV (%)	SE (kJ/m^2)	CV (%)
Não densificado (ND)	para cima (NDc)	184,10[b]	3,38	23,03[a]	10,8	136,50[a,b]	7,75	61,31[a]	1,40
	para baixo (NDb)	156,00[a]	5,20	23,18[a]	6,73	116,00[a]	5,94	54,89[a]	6,20
	Média	170,10	9,80	23,11	8,06	126,20	10,90	58,10	7,15
Densificado sem casca (DS)	para cima (DSc)	241,50[b]	7,79	26,79[a,b]	1,64	157,70[a,b]	13,20	82,11[b]	4,32
	para baixo (DSb)	241,20[b]	6,67	27,46[b,c]	5,13	161,40[b]	5,83	79,61[b]	8,78
	Média	241,30	6,34	27,13	3,69	159,50	9,140	80,86	6,36
Densificado com casca (DC)	para cima (DCu)	343,80[c]	2,14	31,15[c,d]	0,77	219,70[c]	2,220	127,60[c]	7,99
	para baixo (DCd)	279,80[b]	10,10	31,72[d]	5,74	152,20[a,b]	17,50	102,20[b,c]	21,60
	Média	311,80	12,70	31,44	3,82	185,90	21,90	114,90	18,00

Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na coluna diferem significativamente a 5% pelo Teste de Tukey;
*CV - coeficiente de variação (%).

Fonte: Própria autoria.

A partir da Tabela 5.4, foi possível observar que os valores MOR para as amostras DS, não apresentam uma diferença estatisticamente significativa em relação às posições ascendentes (DCu) ou descendentes (DCd).

Apenas as amostras DC em ambas as posições, apresentaram diferença estatisticamente significativa quando comparadas com as amostras ND e DS.

É possível observar que os valores apresentam diferenças estatísticas entre eles. As amostras não densificadas (ND) e densificadas sem casca (DS), apresentaram uma diferença estatística considerável em relação às amostras densificadas com casca (DC). Assim, a orientação mais adequada para a aplicação da flexão é com a casca numa posição ascendente, uma vez que a casca nesta posição apresenta uma boa resistência à compressão.

Verifica-se, a partir do resultado do ensaio apresentado na Tabela 5.4, que a análise ANOVA para os valores de MOR demonstram diferença significativa entre o posicionamento ascendente e descendente das amostras ND e DC, enquanto que para DS não foi observada uma diferença significativa. Para os corpos de prova não densificados, esta diferença ocorre devido à variação da fração de volume de fibra entre as paredes internas e externas na direção radial (Azadeh et al. 2021). Por outro lado, para DC, a diferença advém do encurvamento das fibras nas camadas internas quando estas se encontram em compressão (posição descendente).

Como se pode observar, para as amostras DC na posição ascendente na Figura 5.9 não há encurvadura das fibras na área de compressão, embora na posição descendente a encurvadura das fibras pode ser observada, conforme Figura 5.9. Este efeito justifica a diferença entre os valores de MOR nas posições ascendente e descendente.

Não se verificou diferença significativa entre os valores de MOE dos corpos de prova posicionados em orientações ascendentes e descendentes. Para a média de posicionamento ascendente e descendente de cada grupo do teste, os resultados da análise ANOVA demonstraram uma diferença significativa entre cada grupo, seja para MOR ou para MOE.

O processo de densificação aumenta o MOR das amostras DC e DS em cerca de 41,9% e 81,3%, respectivamente, e MOE em 17,4% e 36,1%, respectivamente, em comparação com as amostras ND. Resultados de uma pesquisa sobre as propriedades mecânicas do bambu densificado (Kadivar et al. 2019b), para a mesma espécie de bambu, mostram 56% e 42% de incremento em MOR e MOE, respectivamente. Embora, o LOP para os corpos de prova ND seja significativamente inferior ao dos corpos de prova DC e DS, a proporção de LOP para MOR para os corpos de prova ND é significativamente superior ao dos corpos de prova DS e DC.

Para o ensaio de flexão de três pontos, a ruptura de todas as amostras ocorre no meio do vão, conforme Figura 4.10 (a), sendo classificados como falhas de tensão

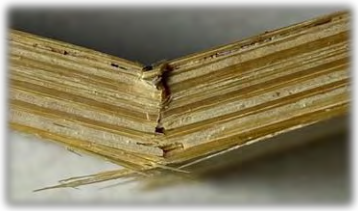
fragmentação, de acordo com a norma ASTM D143-94. Os padrões de falha para os corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC nas posições para cima e para baixo são apresentados na Figura 5.9.

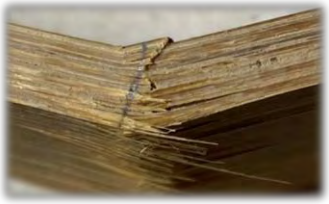
Figura 5.9. Região da superfície longitudinal dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC submetidas ao ensaio de flexão de três pontos.

Não densificado (ND) na posição “para cima” em relação à camada mais externa

Densificado sem casca (DS) na posição “para cima” em relação à camada mais externa

Densificado (DC) na posição “para cima” em relação à camada mais externa



Não densificado (ND) na posição “para baixo” em relação à camada mais externa

Não densificado sem casca (DS) na posição “para baixo” em relação à camada mais externa

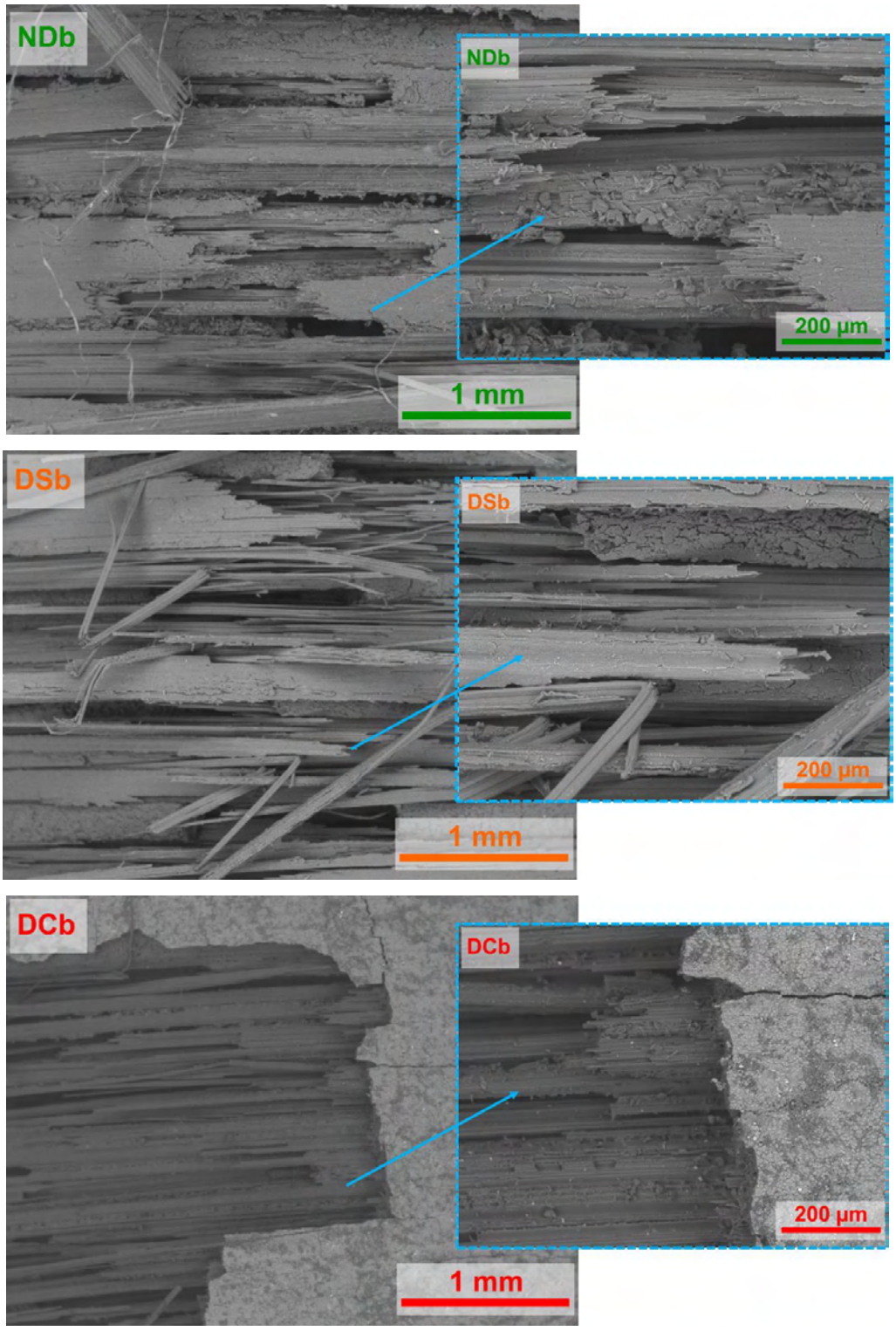
Densificado com casca (DC) na posição “para baixo” em relação à camada mais externa

Fonte: Própria autoria.

5.5. Microscopia eletrônica de varredura

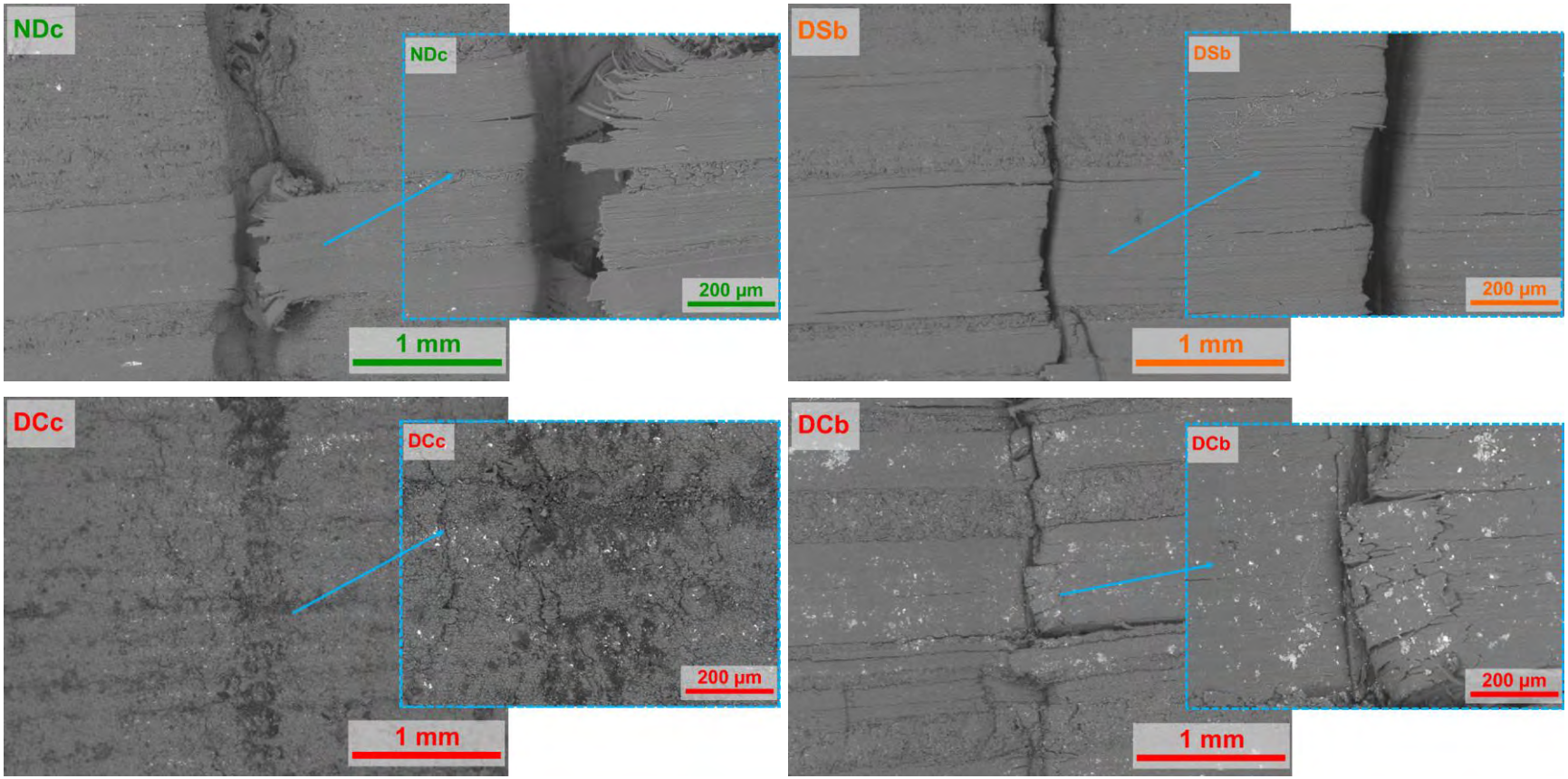
As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam, respectivamente, as micrografias obtidas por MEV da superfície longitudinal dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC, nas posições para cima e para baixo, submetidas aos esforços de tração e compressão durante o teste de flexão.

Figura 5.10. Micrografias obtidas por MEV da superfície longitudinal, na região tracionada, dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC submetidos aos esforços de flexão, nas posições para cima e para baixo em relação à camada mais externa.



Fonte: Própria autoria.

Figura 5.11. Micrografias obtidas por MEV da superfície longitudinal, na região comprimida, dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC submetidos aos esforços de flexão, nas posições para cima e para baixo em relação à camada mais externa.



Fonte: Própria autoria.

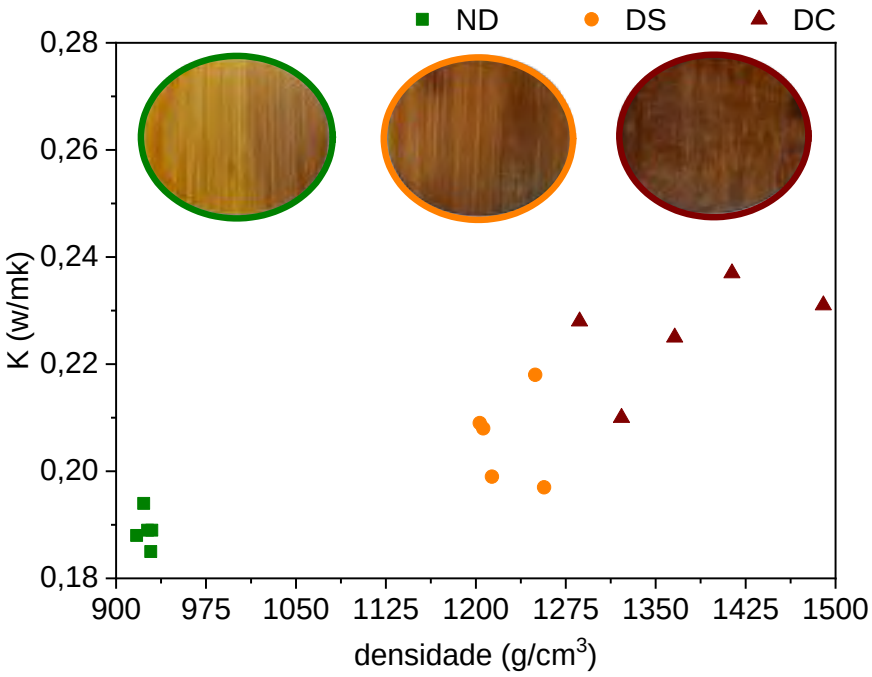
De maneira geral, é possível observar que quando a casca é removida (Figura 5.10), as fibras são separadas e quebradas, o que indica que as fibras estão sob tensão. A casca exterior de bambu (Figura 5.10) é quebradiça, e a comparação das micrografias com os resultados do teste de flexão mostra a fraqueza da camada exterior em tensão, que pode ser devido à falta de fibra nesta camada.

No caso de compressão (Figura 5.11), nos corpos de prova sem casca, as micrografias mostram as fraturas das fibras, o que significa que as rupturas ocorrem nas fibras. Contudo, no caso dos corpos de prova em que a casca está sob pressão, não se observa qualquer ruptura, o que indica a elevada resistência da pele exterior de bambu à compressão. Estes resultados são também totalmente consistentes com os resultados dos testes de flexão.

5.6. Condutividade térmica

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam, respectivamente, os valores de condutividade térmica dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

Figura 5.12. Valores de condutividade térmica e densidade dos corpos de prova corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.

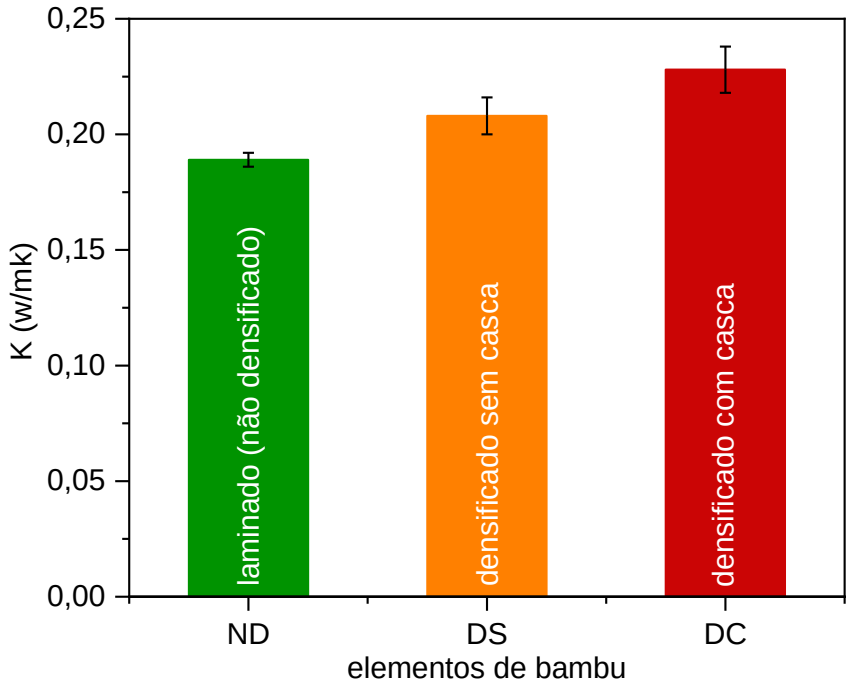


Fonte: Própria autoria.

A condutividade térmica para os corpos de prova dos elementos de bambu laminado e densificado avaliados está de acordo com o observado por (WANG, 1988). Segundo esse autor, um material é considerado isolante térmico quando apresenta um coeficiente de condutividade (K) inferior a 0,25 w/mk (WANG, 1988). A condutividade térmica estima a rapidez com que o calor viaja através de um material por condução, que é a principal forma de transferência de calor através de isolamento (DESHMUKH et al., 2017).

Além disso, a densidade dos materiais pode influenciar significativamente a transferência de calor. Nos corpos de prova investigados, observou-se que a densidade foi menor nos grupos ND (926,335 g/cm^3) se comparados aos grupos DS (1213,486 g/cm^3) e DC (1365,872 g/cm^3). Este fato sugere que a propriedade térmica dos corpos de prova DS e DC submetidos ao processo de densificação foi afetada, conforme é possível observado na razão K (w/mk) versus densidade (g/cm^3) apresentado na Figura 5.12.

Figura 5.13. Valores de condutividade térmica e densidade dos corpos de prova corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC.



Fonte: Própria autoria.

Ressalta-se ainda que os valores observados na Figura 5.12 complementam aos valores da Figura 5.13, indicando que o aumento da densidade promove o aumento

da condutividade térmica. Além disso, foi possível observar que nos corpos de prova ND, os valores de condutividade térmica variaram entre 0,185 e 0,194 ± 0,003 w/mk. Enquanto que os corpos de prova DS apresentaram valores entre 0,197 e 0,218 ± 0,008 w/mk. Por fim, nos corpos de prova DC os valores foram entre 0,210 e 0,237 ± 0,010 w/mk. Nesse sentido, sugere-se que o processo de densificação não melhora a condutividade térmica do material e a casca também tem efeitos negativos. No entanto, embora esta influência seja baixa, ainda é possível classificar o bambu densificado como um material isolante, uma vez que o valor ainda é inferior a 0,25 w/mk.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados deste estudo, observou-se que no processo de densificação dos elementos “ripas” de bambu *Dendrocalamus asper*, mesmo associado ao processo de retificação, tem-se um aproveitamento de 46% da matéria-prima em relação às sobras, enquanto no processo de laminação o aproveitamento é de apenas 28%.

Outrossim, o processo de densificação promoveu uma redução média da espessura do elemento de bambu em aproximadamente 34%, além de melhorar a densidade aparente do material em 25%.

Este estudo constatou, ainda, que para o teor de umidade dos corpos de prova dos elementos de bambu ND, DC e DS, (10,5%, 6,8% e 7,6% respectivamente), o processo de densificação dos corpos de prova DC e DS promoveu a redução na capacidade de absorção de umidade em quase 30%.

Se tratando do inchamento na direção radial, para os corpos de prova DS, foi observado um inchaço de 5 vezes em relação ao tamanho inicial, e para os corpos de prova DC foi 2 vezes mais do que os corpos de prova ND, mostrando a sensibilidade do DS ao inchamento na direção radial.

Para o inchamento de longo prazo na direção tangencial, constatou-se que, para os 3 tipos de corpos de prova (ND, DS e DC), ele foi, notavelmente, menor do que o inchamento na direção radial. Além disso, as mudanças de peso devido à absorção de água a longo e curto prazo para os corpos de prova DS são muito maiores do que aquelas não densificadas e densificadas com casca.

De modo geral, na direção radial, ocorreram mudanças significativas de dimensão irreversível. Já na direção tangencial a mudança de dimensão devida a

quatro ciclos de molhagem-secagem foi inferior a 3%, podendo, assim, ser considerada sem significância.

Para os corpos de prova dos elementos de bambu ND, apenas um ciclo de secagem e umedecimento por 24 h é suficiente para estancar os corpos de prova e prevenir a deformação irreversível. Enquanto que para os corpos de prova dos elementos de bambu DS e DC faz-se necessário a realização de quatro ciclos úmido-seco para estabilizar a dimensão deles.

Quanto à rugosidade média superficial medida para os corpos de prova dos elementos de bambu ND, DS e DC (para o lado interno), a rugosidade da superfície perpendicular às fibras foi significativamente maior do que ao longo das fibras.

Na análise da casca externa, não foi identificada diferença significativa entre a rugosidade perpendicular ao longo das fibras antes dos corpos de prova dos elementos de bambu serem submetidos aos ciclos úmido-seco.

Por meio deste estudo, foi possível notar, ainda, que o processo de densificação melhorou a resistência mecânica dos elementos de bambu DS em 26,71 % e em 44,80 % nos elementos de bambu DC quando comparados aos elementos de bambu ND. Foi identificado, também, que a diferença no posicionamento das amostras densificadas com pele promoveu um aumento de 19,01% do módulo de ruptura, quando se comparam as posições: para cima e para baixo, respectivamente.

Quanto ao módulo de elasticidade, este foi maior nos elementos de bambu DC (26,20%) em comparação com os elementos de bambu ND. Frisando-se que não foi observada qualquer diferença significativa entre as posições para cima e para baixo, respectivamente.

Ressalta-se que, durante o estudo, manter a casca do bambu promoveu uma redução nos processos aplicados, além de aumentar o desempenho mecânico, e melhorar o percentual de utilização do material.

Por fim, destaca-se que realizando a densificação e mantendo a casca do bambu no processo de retificação, houve uma redução nas propriedades térmicas do material, contudo, os valores observados se mantiveram dentro das normas de isolamento térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINBADE, Y.; HARRIES, K.A.; FLOWER, C.V.; NETTLESHIP, I.; PAPADOPOULOS, S.P. Through-culm wall mechanical behaviour of bamboo. **Construction and Building Materials**, v.216, p.485–495, 2019.

ANWAR, U.M.K.; HIZIROGLU, S.; HUSAIN, H.; MOHMOD, A.L. Effect of outdoor exposure on some properties of resin- treated plybamboo. **Industrial Crops and Products**, v.33, n.1, p.140–145, 2011.

ARCHILA-SANTOS, H.F.; ANSELL, M.P.; WALKER, P. Elastic properties of thermo-hydro-mechanically modified bamboo (Guadua angustifolia Kunth) measured in tension. **Key Engineering Materials**, v.600, p.111–120, 2014.

ASTM D1037-12 (2012), Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, in: 2012: 1-32.

ASTM E1530-11 (2011), Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique, in: 2011, p.1–9.

AZADEH, A. Heat Influence on physical and mechanical properties of *Dendrocalamus Giganteus* bamboo. 2018. 224p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontificia Universidade Católica, PUC, Rio de Janeiro, 2018.

AZADEH, A.; GHAVAMI, K.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; TOLEDO-FILHO, R.D.; BARBOSA, N.D. Static flexural behavior of bamboo as a functionally graded material and the effect of heat on dynamic flexural modulus. **Journal of Building Engineering**, v.34 –101949, p.1–10, 2021.

BAYSAL, E.; ALTINOK, M.; COLAK, M.; KIYOKA OZAKI, S.; TOKER, H. Fire resistance of Douglas fir (Pseudotsuga menzieesi) treated with borates and natural extractives. **Bioresource**, v.98, n.5, p.1101–1105, 2007.

BREDENOORD, J. Sustainable building materials for low-cost housing and the challenges facing their technological developments: Examples and lessons regarding bamboo, earth-block technologies, building blocks of recycled materials, and improved concrete panels, *Journal of Architectural Engineering Technology*, v.6, n.1, p.1–10, 2017.

BS EN ISO 4288-1998 (1998), Geometrical product specification—surface texture: profile method—rules and procedures for the assessment of surface texture. British Standards Institution, in:1998.

BS EN ISO 4287-2000 (2000), Geometrical product specification—surface texture: profile method—terms, definitions and surface texture parameters. British Standards Institution, in: 2000.

CALDEIRA, F. Boron in Wood Preservation: A Review in its Physico-Chemical Aspects. **Silva Lusitana**, v.18, n.2, p.179–196, 2010.

CASAGRANDE JÚNIOR, E. F. Inovação tecnológica e sustentabilidade: possíveis ferramentas para uma necessária interface. **Educação & Tecnologia**, Curitiba, v.8, p.97–109, 2004.

CHANG, F.C.; CHEN, K-S.; YANG, P-Y.; KO, C-H. Environmental benefit of utilizing bamboo material based on life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.204, p.60–69, 2018.

CHAOWANA, P.; BARBU, M.C. Bamboo: Potential material for biocomposites, **Elsevier Ltd.**, 2017.

DESHMUKH, G.; BIRWAL, P.; DATIR, R.; PATEL, S. Thermal Insulation Materials: A Tool for Energy Conservation. **Journal of Food Processing & Technology**, v.08, n.04, p1–4, 2017.

DIXON, P.G.; SEMPLE, K.E.; KUTNAR, A.; KAMKE, F.A.; SMITH, G.D.; GIBSON, L.J. Comparison of the flexural behavior of natural and termo-hydro-mechanically densified *Moso* bamboo. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.74, n.5, p.633–642, 2016.

ESPELHO, J.C.C.; BERALDO, A.L. Avaliação físico-mecânica de colmos de bambu tratados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p.645–652, 2008.

GANAPATHY, P. M.; HUAN-MING, Z.; ZOOLAGUD, S. S.; TURCKE, D.; ESPILOY, Z. B. **Bamboo Panel Boards a State-of-the-Art Review**. International Network for Bamboo and Rattan, Beijing, China, Technical Report No. 12, 1999.

GAUSS, C.; KADIVAR, M.; SAVASTANO, H. Effect of disodium octaborate tetrahydrate on the mechanical properties of *Dendrocalamus asper* bamboo treated by vacuum/pressure method. **Journal of Wood Science**, v.65, n.1, 2019.

GAUSS, C. Preservative treatment and chemical modification of bamboo for structural purposes. 2020. 287p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, USP/FZEA, Pirassununga, 2020.

GEROTO, P.G. Caracterização anatômica e física – por densitometria de raios-X de colmos de *Dendrocalamus asper Backer, Dendrocalamus latiflours Munro e Guadua angustifólia Kunth*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP/ESALQ, Piracicaba, 2014.

GHAVAMI, K. Introduction to nonconventional materials and an historic retrospective of the field. **Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications**, p.37–61, 2016.

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

GHAVAMI, 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.

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

GUAN, M.; YONG, C.; WANG, L.; QISHENG, Z. Selected properties of bamboo scrimber flooring made of India Melocanna baccifera. **Proceedings of the 55th International Convention of Society of Wood Science and Technology**, August, p.1–7, 2012.

HIDALGO-LÓPEZ, O. Bamboo - The Gift of the GODS. **Bogotá, Colômbia: D'Vinni Ltda**, 2003.

HUANG, Z.; SUN, Y.; MUSSO, F. Assessment of bamboo application in building envelope by comparison with reference timber. **Construction and Building Materials**, v.156, p.844–860, 2017.

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

JANSSEN, J.J.A. Bamboo in building structures. **Technische Hogeschool Eindhoven**, 1981.

KADIVAR, M.; GAUSS, C; MARMOL, G.; FIORONI, C.; SÁ, A.D.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Evaluation of an optimized bamboo sandwich panel using layers of two different bamboo functional elements. **Conference: XVIII Brazil MRS Meeting - Proceedings**, p.2756–2758, September, 2019a.

KADIVAR, M.; GAUSS, C.; MÁRMOL, G.; SÁ, A.D; FIORONI, C.; GHAVAMI, K.; SAVASTANO JÚNIOR, H. The influence of the initial moisture content on densification process of D. asper bamboo: Physical-chemical and bending characterization. **Construction and Building Materials**, v.229 – 116896, p.1-12, 2019b.

KADIVAR, M.; GAUSS, C.; GHAVAMI, K.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Densification of bamboo: State of the art. **Materials**, v.13, n.19, p.1–25, 2020.

KADIVAR, M.; GAUSS, C.; TOMAZELLO-FILHO, M.; AHRAR, A.M.; GHAVAMI, K.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Optimization of thermo-mechanical densification of bamboo. **Construction and Building Materials**, v.298 – 123860, p.1–14, 2021.

KAUR, P.J.; SATYA, S.; PANT, K.K.; NAIK, S.N. Eco-Friendly preservation of bamboo species: Traditional to modern techniques. **BioResources**, v.11, n.4, p.10604–10624, 2016.

KRAUSE, J. Q. **Micro e macromecânica de lâminas de bambu Dendrocalamus**

giganteus para aplicações estruturais. 2015. 201p.Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontificia Universidade Católica, PUC, Rio de Janeiro, 2015.

LEVAN, S.L.; JERROLD. E.W. Effects of fire-retardant treatments on wood strength: a review. **Wood and Fiber Science**, v.22, n.1, p.113–131, 2007.

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

LIESE, W. A preservação do colmo de bambu com relação à sua estrutura. Texto de Conferência apresentada durante o Simpósio Internacional Guadua, realizado em 2004, em Pereira, Colômbia. Tradução do Prof. Antonio L. Beraldo, Feagri – Unicamp, mediante autorização do autor, 2004.

LIESE, W.; KÖHL, M. Bamboo: The plant and its uses. Switzerland, **Springer Nature**, 2015.

LI, H.; SHEN, S. The mechanical properties of bamboo and vascular bundles. **Journal of Materials Research**, v.26, n.21, p.2749–2756, 2011.

LIMA, D.M. Bambu laminado colado (*Dendrocalamus giganteus*) aplicado à treliça plana tipo *Howe* e à viga retangular. 2013. 234p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Caruaru, 2013.

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. **Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations**, Rome, Italy, 2007.

MING, C.Y.T, JYE, W.R., AHMAD, H.A.I. Mechanical properties of bamboo and bamboo composites: A Review. **Journal of Advanced Research in Materials Science**. v.8, n.35, p.7–26, 2017.

NASCIMENTO, M.F.; CHRISTOFORO, A.L.; CAMPOS, C.I.; ALMEIDA, D.H.; LAHR, F.A.R. Efeitos das intempéries na rugosidade de painéis de partículas de Pinus sp. **Ambiente Construído.** v.18, n.3, p.227–238, 2018.

NOGATA, F.; TAKAHASHI, H. Intelligent functionally graded material: Bamboo. **Composites Engineering**, v.5, n.7, p.743-751, 1995.

NOGUEIRA, C.L. Ciência do material bambu e tecnologia de sua aplicação em vigas laminadas coladas de seção transversal composta. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP/ESALQ, Piracicaba, 2013.

PEREIRA, M.A.R.; BERALDO, A.L. Bambu de corpo e alma. 1. ed. **Bauru, SP: Canal6**, 2008.

QISHENG, Z.; SHENXUE, J.; YONGYU, T. Industrial Utilization on Bamboo. Technal Report n.26, **International Bamboo and Rattan Organization (INBAR)**, 2002.

RICHARD, M.J. Assessing the Performance of Bamboo Structural Components. 2013. 288p. Tese (Doctor of Science) – University of Pittsburgh, Graduate Faculty of The Swanson School of Engineering, Pittsburgh, 2013.

SARLO, H.B. Influência das fases da lua, da época de corte e dasespécies de bambus sobre o ataque de dinoderus minutus (fabr.) (Coleoptera: Bostrichidae). 2000. 63p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Viçosa, UFS, Viçosa, 2000.

SHARMA, B.; GATOO, A.; BOCK, M.; MULLIGAN, H.; RAMAGE, M. Engineered bamboo: State of the art. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v. 168, n. 2, p. 57–67, 2015a.

SHARMA, N.K.; VERMA, C.S.; CHARIAR, V.M.; PRASAD, R. Eco-friendly flameretardant treatments for cellulosic green building materials. **Indoor and Built Environment**, v.24, n.3, p.422–432, 2015b.

SILVA, E.C.N.; WALTERS, M.C.; PAULINO, G.H. Modeling bamboo as a functionally graded material: Lessons for the analysis of affordable materials. **Journal of Materials Science**, v.41, n.21, p.6991–7004, 2006.

TONDI, G.; WIELAND, S.; WIMMER, T.; THEVENON, M.F.; PIZZI, A.; PETUTSCHNIGG, A. Tannin-boron preservatives for wood buildings: Mechanical and fire properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.70, n.5, p.689–696, 2012.

WANG, S.H. Construction Materials Science. **Beijing: China Construction Industry Publisher**, 1988.

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