



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Felipe Luis Palombini

**DESIGN DE ESTRUTURA BIÔNICA ATRAVÉS DE PROTOTIPAGEM E ANÁLISE
POR ELEMENTOS FINITOS BASEADA EM MICROTOMOGRAFIA DO BAMBU**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2016

FELIPE LUIS PALOMBINI

Design de estrutura biônica através de prototipagem e análise por elementos finitos baseada em microtomografia do bambu

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Ernesto de Araujo Mariath

Porto Alegre

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Palombini, Felipe Luis

Design de estrutura biônica através de
prototipagem e análise por elementos finitos baseada
em microtomografia do bambu / Felipe Luis Palombini.
-- 2016.

106 f.

Orientador: Wilson Kindlein Junior.

Coorientador: Jorge Ernesto de Araujo Mariath.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Design. 2. Bambu. 3. Anatomia vegeta
Microtomografia computadorizada de raios X. 5.
Elementos finitos. I. Kindlein Junior, Wilson,
orient. II. Mariath, Jorge Ernesto de Araujo,
coorient. III. Título.

Felipe Luis Palombini

**DESIGN DE ESTRUTURA BIÔNICA ATRAVÉS DE PROTOTIPAGEM E ANÁLISE
POR ELEMENTOS FINITOS BASEADA EM MICROTOMOGRÁFIA DO BAMBU**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 28 de novembro de 2016.

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior**

Departamento de Engenharia dos Materiais – DEMAT/UFRGS

Co-orientador: **Prof. Dr. Jorge Ernesto de Araujo Mariath**

Departamento de Botânica – DEBOT/UFRGS

Prof.^a Dra. Sofia Aumond Kuhn

Departamento de Botânica – DEBOT/UFRGS – Examinador Externo

Prof.^a Dra. Lauren da Cunha Duarte

Departamento de Engenharia dos Materiais – DEMAT/UFRGS – Examinador Interno

Prof.^a Dra. Branca Freitas de Oliveira

Departamento de Design e Expressão Gráfica – DEG/UFRGS – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lia e Antônio, à Mariana e à toda minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus queridos orientadores Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior e Prof. Dr. Jorge Ernesto de Araujo Mariath, brilhantes e incansáveis, por sempre acreditarem e incentivarem o meu trabalho. Nada seria possível sem a sabedoria, a dedicação e o carinho de vocês.

À Prof.^a Dra. Branca Freitas de Oliveira por seu conhecimento, ideias e suporte intenso durante toda a pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jorge Roberto Lopes dos Santos (DAD/PUC-Rio) e ao Prof. Dr. Sidnei Paciornik (DEQM/PUC-Rio) pela disponibilização e assistência com as análises de microtomografia computadorizada de Raios X.

À Prof.^a Dra. Lauren da Cunha Duarte e à Prof.^a Dra. Liane Roldo pelos ensinamentos, apoio e confiança. Às queridas Juliana, Fernanda e Sofia por me acolherem com carinho e por sempre me ajudarem. Aos demais professores e colegas do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS) e do Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg/UFRGS).

Ao corpo docente e funcionários, em especial à querida Eloísa, do Programa de Pós-Graduação em Design (PGDesign/UFRGS) por propiciarem o desenvolvimento de uma pesquisa multidisciplinar.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte durante este trabalho.

RESUMO

PALOMBINI, F. L. **Design de estrutura biônica através de prototipagem e análise por elementos finitos baseada em microtomografia do bambu.** 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

O bambu é considerado um dos materiais naturais com a melhor relação resistência por peso. Entre as características responsáveis encontram-se os feixes fibrosos do esclerênquima, que protegem os elementos de condução de água e solutos na planta, além de serem preenchidos pelo parênquima. Os feixes estão distribuídos gradualmente, da parte interna à externa do bambu, aumentando a rigidez do colmo. Contudo, a morfologia da seção dos feixes fibrosos e a presença da matriz parenquimática no caule ainda não foram totalmente estudados, quanto à sua importância estrutural, nem aplicados em estruturas biônicas. Esse estudo trata do design de estruturas biônicas baseada na caracterização do bambu, por meio de técnicas não-invasivas, de prototipagem e de análise por elementos finitos. Um protocolo de amolecimento e secagem para secionamento foi seguido em uma amostra de bambu (*Bambusa tuldoides* Munro). A superfície da amostra foi analisada por microtomografia computadorizada de raios X de alta resolução. As imagens resultantes permitiram a segmentação dos tecidos constituintes e caracterização em nível celular. Os modelos 3D do parênquima e do esclerênquima foram discretizados para uma análise por elementos finitos não-linear. Os resultados mostraram que o parênquima é configurado como uma matriz celular de baixa densidade e que distribui as tensões em todos os elementos de reforço na planta, sendo considerado um tecido com importante função estrutural. De mesmo modo, a geometria da seção dos feixes fibrosos apresentou um desempenho mecânico superior às seções referenciais. Ambas características foram aplicadas no desenvolvimento de duas estruturas biônicas, sendo analisadas como mais eficientes em comparação a um modelo da literatura, e impressas em 3D para análise visual.

Palavras-chave: Design. Anatomia vegetal. Materiais. *Bambusa tuldoides*. Microtomografia computadorizada de raios X. Elementos finitos. Impressão 3D. Parênquima.

ABSTRACT

PALOMBINI, F. L. **Design de estrutura biônica através de prototipagem e análise por elementos finitos baseada em microtomografia do bambu.** 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Bamboo is considered one of the natural materials with the best strength-to-weight ratio. Among the features responsible for its properties are the sclerenchyma's fiber bundles that protect the conducting elements of water and solutes in the plant, and are filled by parenchyma. Bamboo fibers are gradually distributed from the inner to the outer side of the plant, thus increasing the culm stiffness. However, the morphology of the section of the fiber bundles and the presence of the parenchymatic matrix in the stem have not been fully studied regarding its structural importance, neither applied in bionic structures. This study addresses the design of bionic structures based on the characterization of bamboo, by means of non-invasive techniques, rapid prototyping and finite element analysis. A bamboo sample (*Bambusa tuldoides* Munro) was collected and softening and drying protocols were followed for proper sectioning. The surface of the sample was analyzed by high-resolution X-ray microcomputed tomography. Resulting images allowed the segmentation of the sample's constituent tissues and the characterization at a cellular level. The 3D models of the parenchyma and sclerenchyma were discretized for a non-linear finite element analysis. The results showed that the parenchyma is set as a low-density cellular matrix by distributing the stresses among all reinforcement elements in the plant, being considered a tissue with great structural importance. Likewise, the shape of the fiber bundles' section showed superior mechanical performance compared to reference sections. Both characteristics were applied in the development of two bionic structures that were analyzed as more efficient than a literature model, and 3D printed for a visual analysis.

Keywords: Design. Plant anatomy. Materials. Bamboo. *Bambusa tuldoides*. X-ray microcomputed tomography. Finite elements. 3D Printing. Parenchyma.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área de uma seção
A_{P_c}	Área da superfície de uma célula
a_{R_i}	Área segmentada de uma região i
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (dispositivo de carga acoplada)
ρ^*	Densidade do material celular
ρ_S	Densidade do sólido
$(\rho^*/\rho_S)_i$	Densidade relativa de uma região i
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i> (imagem e comunicação digitais em medicina)
E	Módulo elástico
$E_{A_{Sc}}$	Módulo elástico axial do esclerênquima
E_P	Módulo elástico do parênquima
E_S	Módulo elástico da parede celular sólida do bambu
$E_{T_{Sc}}$	Módulo elástico transversal do esclerênquima
FAA ₅₀	Formaldeído, ácido acético e etanol
FDM	<i>Fused deposition modeling</i> (modelagem por deposição de material fundido)
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (análise por elementos finitos)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (método de elementos finitos)
φ	Porosidade da região
φ_B^e	Fator de forma para flexão elástica
I	Momento de inércia ou Intensidade da radiação de raios X
I_o	Intensidade original de um feixe de raios X
I_R	Momento de inércia de uma seção referencial quadrada
λ	Resistência à compressão específica de uma estrutura biônica

L_x	Resolução espacial ou tamanho de <i>voxel</i>
m	Massa de uma estrutura biônica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
μCT	Microtomografia Computadorizada de Raios X
ψ_B^e	Fator de forma microscópica para flexão elástica
ROI	<i>Region of Interest</i> (região de interesse)
S	Rigidez à flexão de uma viga
S_R	Rigidez à flexão de uma viga referencial com seção quadrada
STL	<i>Stereolithography</i> (estereolitografia)
σ_A	Resistência à compressão axial de uma estrutura biônica
σ_P	Resistência à compressão axial do parênquima
σ_{Sc}	Resistência à compressão axial do esclerênquima
σ_{fs}	Módulo de ruptura da parede celular sólida do bambu
σ_s	Resistência à compressão da parede celular sólida do bambu
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i> (formato de arquivo de imagem rotulado)
v/v	Fração volumétrica
V_{P_c}	Volume de uma célula do parênquima
V_{R_i}	Volume total de uma região i
V_V	Volume de espaços vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa	15
1.2	Formulação do problema	16
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Design de estruturas bioinspiradas em plantas	18
2.2	Caracterização de estruturas vegetais.....	22
2.2.1	Caracterização de materiais celulares.....	23
2.2.2	Propriedades mecânicas	25
2.2.3	Fatores de forma	28
2.3	Modelos matemáticos para estudo de estruturas	30
2.4	Tecnologias 3D de observação e análise.....	34
2.4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	34
2.4.2	Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ CT)	35
2.4.3	Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)	42
2.5	Bambu: propriedades e anatomia básica	43
2.5.1	Gramíneas (Poaceae)	45
2.5.2	Bambusa tuldoides Munro	47
2.5.3	Anatomia estrutural do bambu	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	Estereoscopia e Microscopia Eletrônica de Varredura.....	55
3.1.1	Preparação da amostra	55
3.1.2	Estereoscopia	56
3.1.3	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	56
3.2	Microtomografia Computadorizada de Raios X	57
3.2.1	Aquisição de microtomografias.....	58
3.2.2	Reconstrução.....	59
3.2.3	Ajustes, segmentação e análise	59

3.3	Análise por Elementos Finitos	60
3.3.1	Exportação de malhas	60
3.3.2	Propriedades mecânicas	61
3.3.3	Condições de contorno	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Caracterização superficial	63
4.2	Caracterização volumétrica	65
4.2.1	Segmentação	67
4.2.2	Análise de formas	69
4.2.3	Análise microestrutural	70
4.3	Análise numérica	71
4.3.1	Limite de resistência à compressão	72
4.3.2	Critérios de falha: esclerênquima e parênquima	73
5	DESIGN DE ESTRUTURAS BIÔNICAS	78
5.1	Modelagem e condições de contorno	79
5.1.1	Impressão FDM.....	81
5.2	Seleção de materiais e propriedades constitutivas.....	82
5.3	Prototipagem e análise por elementos finitos.....	87
5.3.1	Análise de eficiência	92
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
6.1	Preparação de amostra e caracterização.....	94
6.2	Análise estrutural da planta	95
6.3	Aplicação e desenvolvimento de modelos biônicos.....	96
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

O design é uma ciência multidisciplinar voltada para a resolução de problemas projetuais por meio de procedimentos metodológicos (BACK *et al.*, 2008). O designer alia soluções técnico-criativas a ferramentas tecnológicas para encontrar soluções voltadas ao usuário (ASHBY; JOHNSON, 2011; BAXTER, 2000). Desse modo, é importante a interação do design com outras áreas de conhecimento durante a etapa de pesquisa e projeto, para auxiliar na compreensão do objeto de estudo (ASHBY; JOHNSON, 2011).

Os materiais naturais têm sua relação próxima à história do homem, tendo sido fundamentais para o desenvolvimento de civilizações e promovendo inovações tecnológicas em diversas áreas de conhecimento (ASHBY; JOHNSON, 2011; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Dentre os principais materiais naturais com finalidade estrutural ainda explorados pelo homem encontram-se as plantas, como madeiras e bambus (ASHBY; JOHNSON, 2011), apesar de determinados tópicos permanecerem pouco explorados. Na botânica, o termo “estrutura” está relacionado a aspectos funcionais e organizacionais de uma determinada região da planta, não necessariamente vinculado à resistência física do material, propriamente dita (FAHN, 1990). Portanto, nesse estudo, a estrutura das plantas será abordada sob o ponto de vista da rigidez, definida por suas características mecânico-morfológicas.

O estudo de materiais naturais, como as plantas, está diretamente associado com ferramentas de observação e caracterização (HÜBSCHEN *et al.*, 2016; SCHULTZ, 1972). O uso de altas resoluções permite a investigação microestrutural que pode levar a novas descobertas (CALLISTER; RETHWISCH, 2006). Nesse sentido, essa pesquisa relaciona o design com um material natural através de tecnologias tridimensionais de alta resolução, e fundamentado por disciplinas de botânica e engenharia de materiais, com o objetivo de gerar conhecimento científico aplicável a produtos inovadores.

O bambu teve seu uso popularizado nos últimos anos, gerando tal atenção de designers e engenheiros de materiais que tem sido visto como o material para o século XXI (LEFTERI, 2014). Uma das plantas de mais rápido crescimento, possui cerca de 1500 espécies conhecidas, com exemplares atingindo até 35 m de altura (JUDD *et al.*, 2009; OHRNBERGER, 1999). Do ponto de vista do bambu como material, a planta é bem explorada com relação a suas propriedades mecânicas, incluindo resistência à tração e flexão, além de possuir baixa densidade, levando a inúmeras aplicações industriais (ASHBY, 2012; LIESE, 1998). Mecanicamente,

o bambu pode ser considerado um compósito natural, devido à presença de mais de uma fase, com propriedades mecânicas distintas, que se complementam (ASHBY, 2012; NACHTIGALL; WISSER, 2014). Isso pode ser observado através da presença de uma matriz parenquimática¹ mais macia, reforçada com esclerênquima², com paredes celulares mais espessas e, portanto, mais rígidas (SCHULTZ, 1972).

Estudos sobre a anatomia do bambu têm sido realizados desde o século XIX, com relação a suas células, tecidos, órgãos e estruturas (LIESE, 1998). Esse conhecimento é a base para uma compreensão da planta e suas propriedades para uso humano (LIESE, 1998). A compreensão da disposição estrutural, bem como o funcionamento dos tecidos e órgãos, pode contribuir para aplicação em diversas áreas, através da extração e adaptação dessas características. Entretanto, para uma correta utilização de milhões de anos de seleção natural no aprimoramento de sistemas naturais, faz-se necessário seguir uma metodologia apropriada.

Biônica é a ciência multidisciplinar que estuda e aplica elementos naturais na resolução de problemas técnico-projetuais (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). Esses elementos constituem os sistemas estruturais, funcionais, organizacionais e inter-relacionais que podem ser modelados e testados. Também conhecida como biomimética, a biônica se apoia nas soluções naturalmente desenvolvidas e aperfeiçoadas, buscando referências, caracterização e meios de aplicação (BAR-COHEN, 2011). A metodologia de biônica pode ser guiada pela necessidade de resolver um problema já existente ou para adaptar padrões e características no desenvolvimento de produtos e sistemas inovadores (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). O processo inicia com o levantamento informacional sobre a característica desejada, por meio de literatura ou por técnicas de observação. No segundo caso, são coletadas e preparadas amostras para serem caracterizadas apropriadamente. Após identificados, tais atributos são parametrizados, *i.e.*, têm suas variáveis reduzidas às necessárias para serem representados, sendo, portanto, modelados numericamente para a aplicação no design e engenharia.

Uma das principais etapas da metodologia para projeto de produto baseada em biônica, proposta por Kindlein Júnior e Guanabara (2005), é relacionada à análise de sistemas naturais.

¹ Tecido simples, constituído de células vivas de diferentes formas e funções fisiológicas. Suas células podem conter substâncias de reserva, além de possuírem a capacidade de dividir-se mesmo quando maduras e especializar-se, contendo um importante papel na recuperação de feridas e na regeneração (FAHN, 1990).

² Tecido simples, composto por células com paredes secundárias espessadas, cuja principal função é a sustentação. Pode conter lignina, um polímero inerte altamente resistente à ataques químico, físico e biológico nas células, também conferindo, assim, a função de proteção (FAHN, 1990).

Diferentes técnicas de preparação e observação de amostras são utilizadas, as quais podem ser divididas entre invasivas e não-invasivas. As primeiras são consideradas técnicas destrutivas, em que a amostra é danificada na preparação ou durante o ensaio, *e.g.*, microtomias e ensaios termomecânicos (CALLISTER; RETHWISCH, 2006). Já as não-invasivas utilizam-se de amostras inteiras ou que não são destruídas durante o ensaio, *e.g.*, tomografias (GOLDSTEIN *et al.*, 2003; STOCK, 2009).

Atualmente, os materiais são investigados por meio de técnicas que permitem identificar padrões e propriedades com grande precisão (CALLISTER; RETHWISCH, 2006), desde a escala macro- à micrométrica. Os materiais naturais, em especial as plantas, possuem um determinado nível de heterogeneidade, de modo que suas propriedades, como módulo elástico, dureza, densidade, entre outros, costumam possuir variações dependendo da área de observação e análise (ASHBY, 2012). A exemplo, o bambu apresenta tais diferenças devido a diversos fatores naturais (*e.g.*, espécies, períodos de crescimento, graus de diferenciação³, clima) e antrópicos (*e.g.*, cultivo, alterações no ambiente, extração), que podem influenciar os processos de caracterização (LIESE, 1998; McCLURE, 1966; NIKLAS, 1992). Além disso, os métodos de preparação de amostra para cada tipo de análise também podem levar à heterogeneização dos resultados (SCHULTZ, 1972).

Nesse contexto, o presente trabalho visa a aliar conhecimentos da anatomia vegetal, por meio de técnicas de caracterização e ensaios, para uso em projetos, para caracterização e análise das propriedades mecânicas do bambu (*Bambusa tuldoides*), considerando as escalas macro- e micrométrica. O estudo terá foco nos feixes vasculares fibrosos da planta, devido às características do esclerênquima como tecido de proteção e suporte e com ampla resistência estrutural. Além disto busca-se estudar a importância estrutural do parênquima, como uma matriz celular em um compósito. Para isso, serão utilizadas diferentes técnicas de observação e análise, como microscopias de luz e eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia computadorizada de raios X (μ CT). Então, é proposta uma análise por elementos finitos de um modelo 3D virtual da planta, com base nas geometrias em alta definição obtidas pela μ CT. Por fim, o trabalho propõe o desenvolvimento e análise de duas estruturas bioinspiradas.

³ Processo de crescimento e especialização morfofisiológica de células e tecidos em plantas, conferindo funções ou características diferentes às originais (FAHN, 1990).

1.1 Justificativa

Devido às propriedades mecânicas do bambu, a planta tornou-se grande objeto de estudo para compreensão dos melhores meios de utilizá-la como matéria-prima, sendo aplicado em diversas indústrias (LEFTERI, 2014). Individualmente, certas características de sua estrutura anatômica têm sido estudadas e fundamentadas como significativas para sua resistência geral. Isso leva a uma relação direta na seleção da região da planta para utilização como material para fabricação de estruturas, como, por exemplo, andaimes (CHUNG; YU, 2002) e laminados (SHARMA; GATÓO; RAMAGE, 2015).

Uma característica estrutural fundamentalmente associada a determinadas espécies de gramíneas, como o bambu, é a presença de um caule oco com ligações transversais periódicas, regiões chamadas de nós. Essa configuração foi apresentada como sendo eficiente no desenvolvimento de estruturas mais leves (ZHAO *et al.*, 2008), além de possuir maior resistência a solicitações estruturais, como a força específica⁴ (JIAO; ZHANG; CHEN, 2010) e resistência à flexão (DIXON *et al.*, 2015; GOTTRON; HARRIES; XU, 2014).

Os feixes vasculares são composições de tecidos responsáveis pela vascularização da planta, *i.e.*, pelo transporte de água, solutos e produtos fotossintéticos, além de possuírem finalidade estrutural, através dos feixes de fibras. Estes são divididos em 4 tipos principais, conforme seu formato e disposição (LIESE, 1998). Apesar da morfologia dos feixes fibrosos ser estudada e classificada, sua contribuição mecânica para o bom desempenho estrutural da planta ainda não foi investigada. Individualmente, não apenas o comprimento e a estrutura da parede das células das fibras vegetais, como seu formato, são de grande importância para a indústria (FAHN, 1990), como para a fabricação de compósitos (ASHBY; JOHNSON, 2011). Devido à orientação longitudinal, a visualização dos formatos dos feixes vasculares do bambu tem sido realizada por meio de seções transversais. Isso leva a uma limitação na compreensão da morfologia dessas estruturas, ao longo do caule. Desse modo, faz-se necessária uma investigação por meio de técnicas não-destrutivas e de alta resolução, para obtenção de imagens volumétricas e tridimensionais, como a μ CT. Tais imagens permitem a observação do seu formato ao longo da extensão do caule, permitindo a realização de ensaios mecânicos virtuais e

⁴ Razão entre o limite de resistência à tração e a gravidade específica, sendo apresentado por $Pa. (kg. m^{-3})^{-1}$ (CALLISTER; RETHWISCH, 2006).

físicos. Assim, com a compreensão da influência estrutural da morfologia dos feixes fibrosos do bambu, é possível empregá-la no desenvolvimento de estruturas e sistemas mais eficientes (na razão da carga de solicitações por quantidade de material do objeto).

Investigações das propriedades mecânicas do bambu foram realizadas em diversas escalas. Macroscopicamente, a planta foi investigada por ensaios de flexão (DIXON *et al.*, 2015; GOTTRON; HARRIES; XU, 2014; MA *et al.*, 2008), compressão (CHUNG; YU, 2002; LO *et al.*, 2008; LO; CUI; LEUNG, 2004), tração (SHARMA; GATÓO; RAMAGE, 2015), impacto e dureza (LOW; CHE; LATELLA, 2006), além da resistência à fadiga (KEOGH *et al.*, 2015). No ponto de vista microestrutural, o esclerênquima foi estudado por meio de ensaios mecânicos em feixes fibrosos individuais (LI; SHEN, 2011; YU *et al.*, 2011). Por nanoindentação, foram levantadas as propriedades nanoestruturais de regiões dos tecidos da planta (DIXON *et al.*, 2015; HABIBI *et al.*, 2015; PARK *et al.*, 2013; ZOU *et al.*, 2009), com diferentes técnicas e métodos, bem como em várias espécies de bambu, o que dificulta a caracterização e compilação dos resultados para uma única espécie. Ainda, pouca atenção tem sido dada quanto às propriedades estruturais do parênquima, como um material com característica celular e com baixa densidade (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Ao realizar o cruzamento das informações relacionadas às propriedades mecânicas e estruturais da geometria dos feixes vasculares fibrosos e do parênquima, é possível determinar a influência estrutural dos elementos no bambu. Essa análise leva ao conhecimento abrangente do notável desempenho mecânico da planta, de modo a permitir a aplicação de características específicas, individuais ou combinadas, no desenvolvimento de uma variedade de produtos e estruturas.

1.2 Formulação do problema

Como determinar a influência da morfologia e dos feixes vasculares fibrosos e do parênquima na resistência estrutural do bambu (*B. tuldooides*) com aplicação no design de produto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Compreender os aspectos macro- e microestruturais da morfologia dos feixes vasculares fibrosos e do parênquima de *B. tuldoides*, através da caracterização tridimensional de alta resolução e de análises numéricas, visando a aplicações no design de produto por meio de estruturas bioinspiradas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar a morfologia dos feixes vasculares fibrosos de *B. tuldoides*;
- Caracterizar os tecidos e células constituintes de amostras da espécie por meio de microtomografia computadorizada de raios X;
- Ensaar por meio de análise por elementos finitos um modelo virtual discretizado, baseado nas imagens tridimensionais da microtomografia;
- Parametrizar e analisar a morfologia da seção dos feixes fibrosos;
- Compilar as propriedades mecânicas dos feixes fibrosos e do parênquima que influenciam estruturalmente o bambu, para aplicação no design de produto;
- Desenvolver estruturas bioinspiradas no bambu, com base nos resultados compilados, comparando sua eficiência com um modelo da literatura, através de prototipagem e análise por elementos finitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta tópicos relacionados a estruturas bioinspiradas em plantas, com técnicas de caracterização, modelos matemáticos para estudo de estruturas, tecnologias 3D de observação e análise, bem como propriedades e anatomia básica do bambu. No tópico “design de estruturas bioinspiradas em plantas” são levantados os sistemas de aplicação por meio do estudo de biônica. Em “caracterização de estruturas vegetais” é feita uma revisão dos processos de caracterização de células e tecidos, bem como suas propriedades geométricas e constitutivas. A seguir, em “modelos matemáticos para estudo de estruturas” é introduzido o método de análise por elementos finitos. No tópico “tecnologias 3D de observação e análise” é realizada uma revisão dos métodos e princípios de microtomografia de Raios X e prototipagem rápida. Por fim, no tópico “bambu: propriedades e anatomia básica”, são apresentadas as características gerais da família das gramíneas, e em particular a espécie foco bambu (*Bambusa tuldoides*), incluindo definições da morfologia e anatomia básica da planta, bem como suas propriedades mecânicas.

2.1 Design de estruturas bioinspiradas em plantas

O design está associado a aspectos tecnológicos de produtos, incluindo eficiência, desempenho, funcionalidade, entre outros (FERREIRA *et al.*, 2011). Dentre as novas características do desenvolvimento de produtos está a multidisciplinaridade do design. Esse fator refere-se à capacidade de reunir profissionais de diversas áreas para desenvolver e propor soluções técnico-criativas para problemas projetuais (ASHBY; JOHNSON, 2011; BACK *et al.*, 2008). O desenvolvimento integrado de produto proposto por Back *et al.* (2008), por exemplo, considera que os requisitos e restrições em um projeto sejam avaliados de modo conjunto entre as diversas áreas de conhecimento. Nesse método de design, segundo os autores, é essencial que o projeto seja desenvolvido de uma forma sistematizada, com etapas bem definidas.

A natureza é o resultado de um processo de seleção natural de bilhões de anos para o aperfeiçoamento das características para a melhor adaptação de espécies (BAR-COHEN, 2011; MAUSETH, 2014). Essas características dizem respeito a meios voltados à eficiência energética, locomoção, resistência estrutural, dentre outros. Desse modo, a biologia é considerada abundante em ideias, princípios e soluções que podem ser empregadas em projetos (BACK *et*

al., 2008). Quando aplicadas, podem contribuir para o aprimoramento de projetos, no sentido de inspirarem o emprego e adaptação em soluções criativas desenvolvidas.

Partindo da adaptação e da seleção natural em espécies, tem-se que a natureza desenvolveu, testou e comprovou a eficiência de uma infinidade de características (BAR-COHEN, 2011; BENYUS, 2003). É interessante, então, a busca pelo estudo aprofundado dos sistemas que levam às características naturais para aplicá-las em estruturas, sistemas e produtos. Nesse sentido, a biônica caracteriza-se como uma ciência multidisciplinar que estuda e aplica elementos naturais no desenvolvimento de novos produtos e na resolução de problemas técnicos (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). Tais elementos compreendem os sistemas estruturais, funcionais, organizacionais e inter-relacionais, que podem ser estudados matematicamente e, portanto, ensaiados com redução em suas variáveis. As etapas básicas da metodologia de projeto baseada no estudo de biônica, segundo Kindlein Júnior e Guanabara (2005), encontram-se na figura 1.

Figura 1 – Etapas básicas de identificação, análise e aplicação da metodologia de design de produto baseada no estudo de biônica.



FONTE: Adaptado de Kindlein Júnior e Guanabara (2005).

A etapa de Identificação diz respeito à observação das necessidades de projeto que se deseja buscar alternativas na natureza, bem como na assimilação de características naturais que possam ser aplicadas em projetos (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). As fontes de informação essenciais são levantadas, como referências de pesquisas, dados de materiais, métodos de estudo, entre outros. Essa etapa é seguida no decorrer deste capítulo, em que as informações sobre caracterização, análise numérica e anatomia do bambu são levantadas.

Em Análise, são realizados os estudos com as amostras, incluindo as etapas de coleta,

preparo e observação (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). Após a identificação das características desejadas, ocorre o tratamento das formas geométricas, pelo processo chamado de parametrização (CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015). Esse processo trata da simplificação dos elementos da natureza e se baseia na geometrização de mecanismos, formas e padrões encontrados em uma determinada característica. Neste trabalho, a Análise ocorre no capítulo de Resultados e discussão.

Após extenso estudo e compreensão do funcionamento da característica e dos potenciais ganhos com sua aplicação, é seguida a etapa de Aplicação (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). Nessa etapa projetual são realizados estudos de viabilização de uso do elemento natural (BACK *et al.*, 2008). A aplicação da determinada característica parametrizada está presente em diversos campos da ciência, como design, arquitetura, engenharia mecânica, engenharia civil, entre outros (BAR-COHEN, 2011). Este trabalho inclui o desenvolvimento de estruturas com aplicação das informações estudadas, através do tópico Design de estrutura biônica.

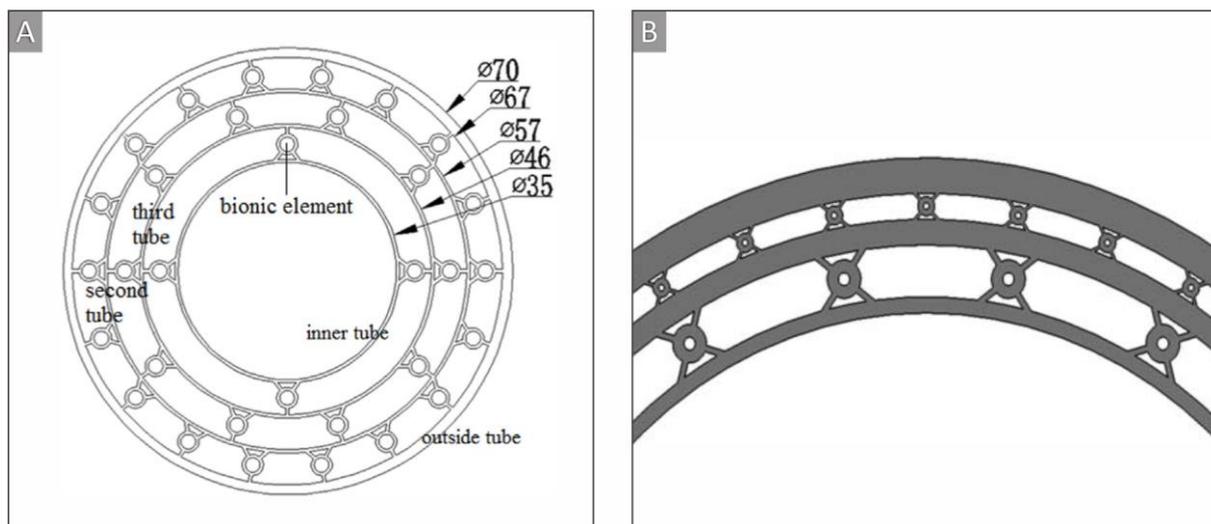
Na botânica, a análise da forma e de padrões de desenvolvimento têm contribuído em estudos de adaptação de elementos naturais na biônica em diversas áreas (NACHTIGALL; WISSER, 2014). Na joalheria contemporânea, por exemplo, é possível a aplicação da estrutura interna dos elementos vasculares do bambu como fonte de inspiração para desenvolvimento de joias (CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015). Os mesmos padrões internos dos elementos vasculares também podem ser aplicados para o desenvolvimento de estruturas cilíndricas com boa resistência à flambagem (MA *et al.*, 2008). A identificação de padrões naturais, portanto, pode contribuir com aplicações no design que variam de fins estéticos a estruturais.

Outro exemplo de aplicação da distribuição dos elementos vasculares foi realizado com relação à folha da vitória amazônica (*Victoria amazonica*), através do design de uma estrutura leve de uma máquina fresadora (ZHAO *et al.*, 2011). O projeto incluiu estudos visuais da planta e comparação numérica da nova estrutura com a alternativa convencional. O mesmo processo de estudo numérico pode ser empregado para avaliar diversas alternativas estruturas de fundações, inspiradas em elementos da natureza (MAIER *et al.*, 2013).

As gramíneas como o bambu, integrantes da família Poaceae, são importantes referências estruturais da natureza. A disposição radial, em plano transversal, de seus feixes vasculares foi estudada numericamente (ESTRADA; LINERO; RAMÍREZ, 2013), e aplicada no

desenvolvimento de torres para estudo de aeronaves (JIAO; ZHANG; CHEN, 2010), máquinas de usinagem (ZHAO, L. *et al.*, 2008), cascas cilíndricas (MA *et al.*, 2008; ZOU *et al.*, 2016) e em estruturas nanométricas (SUN *et al.*, 2015). A figura 2 apresenta dois exemplos de estruturas bioinspiradas no bambu, em que a disposição radial dos feixes foi explorada.

Figura 2 – Seções de estruturas cilíndricas bioinspiradas no bambu, utilizando a distribuição radial dos feixes vasculares.



FONTE: (A) Zou *et al.* (2016) e (B) Ma *et al.* (2008).

Em ambas as estruturas biônicas desenvolvidas, a disposição gradiente no sentido radial dos feixes vasculares do bambu foi explorada. Na figura 2A, os feixes estão dispostos em menor número na região interna da estrutura cilíndrica e em maior na região externa (ZOU *et al.*, 2016). Já na figura 2B os feixes estão, ainda, distribuídos com tamanhos menores entre os mais internos e maiores aos mais externos à estrutura (MA *et al.*, 2008). As duas estruturas mostraram-se mais eficientes que demais perfis utilizados na indústria, ao aproveitar a rigidez estrutural maior quando empregados elementos radialmente gradientes.

Os elementos biônicos utilizados nas estruturas da figura 2 são representativos dos feixes vasculares do bambu. Entretanto, os mesmos são apresentados como possuindo seção totalmente circular, deixando o fator biônico somente associado à distribuição gradiente dos mesmos no caule da planta. A adaptação das formas transversais dos feixes vasculares fibrosos ainda não foi pesquisada, podendo levar a ganhos maiores de desempenho. De forma semelhante, ambas as estruturas da figura 2 não possuem uma estrutura maciça conectando os elementos gradientes, apenas elementos individuais de conexão, o que pode não repre-

sentar o real cenário biológico do bambu. Desse modo, tanto a geometria dos feixes vasculares, como o meio que estão inseridos podem ser estudados e melhor adaptados no design de estruturas mais eficientes.

O estudo de estruturas biônicas aplicadas em plantas pode ser realizado com diversas técnicas, como análise numérica, ou com modelos físicos (ZHAO, L. *et al.*, 2010), para verificar o comportamento mecânico sobre solicitações. Contudo, para maior extração de informações de plantas, é necessário o aprofundamento no estudo dos elementos naturais que compõem as características desejadas, incluindo ambas a morfologia e suas características físicas. Desse modo, em um estudo de biônica com monocotiledôneas⁵, não apenas a disposição dos elementos precisa ser levada em consideração, como sua geometria e propriedades mecânicas.

Para se determinar as propriedades estruturais de plantas, como o bambu, são necessárias técnicas de caracterização e análise apropriadas. Essas etapas estão relacionadas com a quantificação e comparação da eficiência dos atributos da amostra, para permitir serem posteriormente aplicadas em projetos.

2.2 Caracterização de estruturas vegetais

Exemplos de estruturas eficientes não são apenas encontrados em projetos de design e engenharia, mas principalmente na natureza, como nas plantas. As estruturas vegetais apresentam características híbridas como em compósitos, combinando propriedades mecânicas com arranjos microscópicos (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Nesse sentido, as plantas são consideradas estruturas, e não materiais, de modo que tanto sua forma e quanto seu tamanho contribuem para suas propriedades mecânicas (NIKLAS, 1992). No design de produto e em estruturas bioinspiradas, portanto, é preciso considerar dois fatores principais para aplicação eficiente de materiais em estruturas: as propriedades do material e sua morfologia (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

A forma compreende uma gama de características que podem ser atribuídas a um material, desde simbólico-estéticas a estruturais (ASHBY, 2012). Um material possui propriedades, mas sem forma definida (ASHBY, 2012). As propriedades naturais de um material não

⁵ Um dos dois grandes grupos das angiospermas – plantas em que as sementes nascem a partir de um ovário maduro, ou fruto – que possuem embrião com apenas um cotilédone, *i.e.*, as primeiras folhas desenvolvidas em uma semente (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013)

podem ser aplicadas diretamente em projetos, devendo ser primeiramente considerados seus aspectos morfológicos, de modo que um mesmo material pode apresentar diferentes respostas a solicitações, de acordo com a forma com que é utilizado. Portanto, uma estrutura é essencialmente um material feito com uma forma definida (ASHBY, 2012).

Ashby (2012) afirma que a eficiência de uma estrutura é determinada pela relação da quantidade de solicitações que ele suporta pela quantidade de material, em massa, com que é feita. Além disso, segundo o autor, ambos os fatores estão diretamente associados à forma empregada. Dependendo do tipo de solicitação, diferentes conformações podem proporcionar mais ou menos rigidez e utilizar mais ou menos material para uma mesma situação (ASHBY, 2012). Desse modo, a análise da forma de uma estrutura precisa levar em consideração o tipo de material e os tipos de solicitações em questão.

As monocotiledôneas lignificadas altas, como palmeiras e bambus, comportam-se como cantilêvers, uma estrutura com uma das pontas engastada e a outra livre (NIKLAS, 1992). Desse modo, a principal solicitação a que essas plantas estão sujeitas é a flexão que, por sua vez, leva à aplicação de cargas isoladas de compressão ou tração, em regiões opostas do caule (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; NIKLAS, 1992). Para análise do desempenho da estrutura de plantas, como o bambu, é preciso considerar desde suas propriedades mecânicas a sua forma micro e macrométrica. Contudo, ambas estão diretamente relacionadas às características de seus materiais híbridos constituintes.

2.2.1 Caracterização de materiais celulares

A caracterização de materiais permite a compreensão de suas propriedades mecânicas e previsão de seu comportamento sobre solicitações, com base na observação e análise de sua microestrutura, sob diversos aspectos (CALLISTER; RETHWISCH, 2006; HÜBSCHEN *et al.*, 2016). Dependendo do tipo de microestrutura, seja considerando suas fases, como em materiais compósitos, ou sua geometria interna, como em espumas, os materiais com uma mesma composição podem possuir propriedades totalmente diferentes (ASHBY, 2012).

A principal propriedade mecânica a ser considerada em materiais com uma característica celular, tais como os materiais naturais, é a densidade relativa, segundo Gibson e Ashby (1999). O fator é definido pela relação (ρ^*/ρ_S) , na qual é a densidade de um material celular (ρ^*) dividida pela densidade do sólido (ρ_S) do qual a célula é feita (GIBSON; ASHBY, 1999).

Como tanto em ρ^* quanto em ρ_S as massas são as mesmas, a densidade relativa é considerada a razão entre o volume ocupado somente pelo material das células e o volume do sólido inteiro. Assim, quanto menor a densidade relativa de um material, mais espaço vazio ele possuirá (GIBSON; ASHBY, 1999).

A densidade relativa está diretamente relacionada com a porosidade do material (GIBSON; ASHBY, 1999). Considerando plantas lignificadas, como madeiras e bambus, a porosidade, φ , diz respeito ao volume do lume de cada célula, *i.e.*, ao seu espaço interno vazio, não ocupado por organelas celulares (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). A porosidade diz respeito à quantidade de material vazio presente em uma determinada unidade. Desse modo, a relação entre densidade relativa e porosidade pode ser definida por:

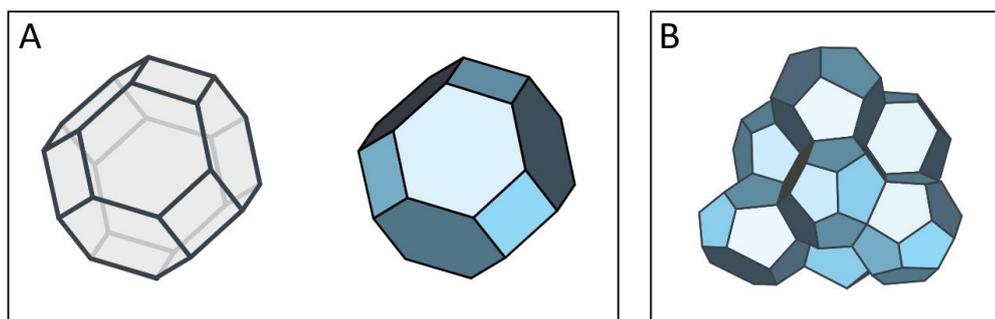
$$\left(\frac{\rho^*}{\rho_S}\right) = 1 - \varphi = 1 - \frac{V_V}{V_R} \quad (1)$$

onde V_V é o volume de espaços vazios e V_R é o volume total de uma determinada região (GIBSON; ASHBY, 1999).

Além da quantidade de material sólido e vazio presente em um tecido como o parênquima, definido pela densidade relativa, é importante considerar como se dá a disposição e geometria de cada célula. O parênquima é considerado uma espuma com células fechadas e relativamente axiais, contudo sua geometria aproximada tem sido definida com base em micrografias de amostras seccionadas (DIXON; GIBSON, 2014; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). A geometria de uma célula unitária do parênquima foi aproximada a um tetracaidecaedro, definido como um poliedro de 14 faces, sendo 6 quadradas e 8 hexágonos, visto na figura 3. A figura é considerada a única capaz de preencher um espaço por repetição enquanto que diminuindo a relação área de superfície por volume (GHYKA, 1977; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

O cálculo da densidade relativa de um material poroso e celular pode auxiliar na determinação da estimativa de suas propriedades, como massa e módulo elástico, e assim prever como ele irá se comportar perante tensões (DIXON; GIBSON, 2014). A caracterização microestrutural de um material, desse modo, contribui para prever como a macroestrutura irá se comportar (NIKLAS, 1992). Para o design e engenharia, principalmente projetos que incluam materiais naturais, como madeiras e bambus, estas propriedades podem auxiliar a melhor definir parâmetros estruturais bem como na seleção de materiais (ASHBY, 2012).

Figura 3 – Representação geométrica de uma célula parenquimática por um tetracaidecaedro: (A) poliedro unitário e (B) poliedro agrupado.



FONTE: Adaptado de Gibson e Ashby (1999).

De modo semelhante, o conhecimento desses dados pode auxiliar no desenvolvimento de estruturas bioinspiradas, uma vez que o processo de obtenção e adaptação das informações do material natural será realizado de forma mais detalhada e precisa (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). A caracterização de plantas para aplicação no design, portanto, precisa levar em consideração não somente os aspectos das macropropriedades, mas das microcaracterísticas do material (BURGERT, 2006).

2.2.2 Propriedades mecânicas

As plantas lenhosas caracterizam-se pela alta presença de lignina em suas estruturas vasculares, conferindo-as propriedades estruturais. A lignina é um composto fenólico depositado nas paredes celulares e com característica polimérica, cuja composição dos monômeros constituintes variam entre gimnospermas e angiospermas (EVERT; EICHHORN, 2006). Sua maior contribuição é a dureza e a resistência à compressão que adiciona à parede celular. Apesar de possuírem boa resistência à tração devido à celulose, as células passaram a possuir maior resistência à ação da gravidade com a adição de lignina em suas paredes (FAHN, 1990). Nesse sentido, a lignificação celular permitiu às plantas terrestres desenvolverem-se verticalmente (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). Do mesmo modo, na área de materiais, a anisotropia causada pelas células fibrosas alongadas confere à madeira propriedades mecânicas de tração e compressão (GIBSON; ASHBY, 1999). A anisotropia é a dependência direcional de propriedades (CALLISTER; RETHWISCH, 2006). Em materiais naturais, como bambu e madeiras, diz respeito à variação de suas propriedades ao longo e através das fibras (GIBSON; ASHBY, 1999).

Em eudicotiledôneas⁶, o cerne é composto de vasos com conhecida função mecânica, mas com perda de sua capacidade condutora (SCHULTZ, 1972). A parede celular de plantas lenhosas consiste na presença de microfibrilas⁷ de celulose envoltas em uma matriz com compostos inorgânicos e orgânicos, como a lignina (KRAUS *et al.*, 2006). Mecanicamente, a madeira pode, portanto, ser considerada um compósito natural devido à presença dessas duas fases (reforço e matriz) com propriedades mecânicas distintas e complementares (GIBSON; ASHBY, 1999).

As monocotiledôneas também possuem tecido esclerenquimático bem lignificado que as confere boas propriedades mecânicas de tração e compressão (FAHN, 1990). As regiões fibrosas distribuídas radialmente de gramíneas lenhosas, como o bambu, envolvem e auxiliam na proteção dos elementos vasculares quanto a estrangulamentos (LIESE, 1998). Nesse modo, as propriedades mecânicas de plantas estão ligadas tanto a escalas macro- quanto em micro-métricas, podendo ser avaliadas sob diferentes métodos.

Do mesmo modo que nas eudicotiledôneas, as monocotiledôneas também se caracterizam por um material com fases distintas, em uma analogia com material compósito (GIBSON; ASHBY, 1999). A exemplo do bambu, o parênquima apresenta-se como uma matriz celular cujas propriedades mecânicas de módulo elástico e resistência à compressão podem ser estimados com base em sua densidade relativa (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Dixon e Gibson (2014) modelaram equações (com base em regressões de resultados de ensaios mecânicos) para determinação dessas propriedades para as duas fases principais do bambu, a matriz parenquimática e os reforços de fibras (esclerênquima), utilizando como base a espécie Mossô (*Phyllostachys pubescens*). As propriedades para ambas as fases levam em consideração a densidade relativa de cada tecido. O módulo elástico do parênquima, E_p , segundo os autores, é baseado em um modelo de espuma de células fechadas e paredes celulares curvas, e é definido como:

$$E_p = \left(\frac{\rho^*}{\rho_S} \right)_P^2 E_S \quad (2)$$

⁶ Junto com as monocotiledôneas, formam um dos grupos das angiospermas. Além de serem caracterizadas por possuírem sementes com dois cotilédones, as eudicotiledôneas apresentam crescimento secundário (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

⁷ Estrutura filamentosa de reforço com 10 a 25 nm de diâmetro e comprimento indeterminado (APPEZZATO-DAGLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2003)

onde $(\rho^*/\rho_S)_P$ é a densidade relativa do parênquima; e E_S é o módulo elástico da parede celular sólida do bambu, a qual foi extrapolada pelos autores em $39,8 \text{ GPa}$ (DIXON; GIBSON, 2014). De modo similar, os autores também modelaram a equação para o módulo elástico axial do esclerênquima, E_{ASc} , de acordo com:

$$E_{ASc} = \left(\frac{\rho^*}{\rho_S} \right)_{Sc} E_S \quad (3)$$

em que $(\rho^*/\rho_S)_{Sc}$ é a densidade relativa do esclerênquima. Considerando que $(\rho^*/\rho_S)_{Sc}$ é muito próxima de 1 em bambus maduros e, portanto, altamente lignificados, E_{ASc} tenderá a se aproximar do módulo da parede celular sólida, E_S (DIXON; GIBSON, 2014).

O esclerênquima, por ser composto por fibras alongadas e dispostas longitudinalmente no caule da planta, apresenta um caráter ortotrópico de suas propriedades mecânicas. Isso significa que o módulo para a direção axial é superior ao das direções transversais, E_{TSc} , seguindo a relação aproximada de:

$$\frac{E_{ASc}}{E_{TSc}} \approx 3,5 \quad (4)$$

A relação é definida com base no material sólido da parede celular de plantas lignificadas, como em madeiras e em bambu, graças à orientação das microfibrilas (CAVE, 1968; DIXON; GIBSON, 2014).

Assim como para o módulo elástico, as propriedades de resistência à compressão axial de cada fase do bambu também foram modeladas por Dixon e Gibson (2014). Para o parênquima, a resistência à compressão, σ_P , também é baseada considerando um modelo de espuma de célula fechada com paredes celulares curvas:

$$\sigma_P = 0.3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_S} \right)_P^{3/2} \sigma_{fS} \quad (5)$$

em que σ_{fS} é o módulo de ruptura do material sólido da parede celular, e extrapolado pelos autores em 472 MPa (DIXON; GIBSON, 2014). Com a modelagem análoga a um material celular, o σ_{fS} é utilizado para o parênquima devido à flexão da parede celular e falha por rótulas plásticas⁸ sob tensões uniaxiais. Já a resistência à compressão do esclerênquima, σ_{Sc} , similar ao seu módulo elástico pela eq. 3, é definida por:

⁸ Rótulas ou dobradiças plásticas são deformações que ocorrem nas seções de estruturas durante flexão plástica (ASHBY, 2012).

$$\sigma_{Sc} = \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)_{Sc} \sigma_s \quad (6)$$

Contudo, uma vez que o esclerênquima não segue o mesmo modelo de espuma de célula fechada, os autores utilizam a resistência à compressão axial do material sólido da parede celular, σ_s , extrapolado em 248 MPa (DIXON; GIBSON, 2014).

Com as equações 2 e 3 é possível estimar o módulo elástico axial do caule do bambu através de uma regra das misturas simples (DIXON; GIBSON, 2014). O processo, utilizado em materiais compósitos, determina as propriedades mecânicas com base na média aritmética das propriedades das duas fases (matriz e reforço), ponderadas por suas frações de volume (ASHBY, 2012). Contudo, a estimativa de resistência à compressão em materiais compósitos tende a ser mais difícil de ser realizada pelo mesmo método (MALLICK, 1997). Isso se deve aos diversos tipos de falha que a estrutura pode estar sujeita. Em materiais naturais, como o bambu, a complexidade própria da organização de seus tecidos evidencia a necessidade de se considerar também outros tipos de relações, como a geometria e forma de seus elementos constituintes.

2.2.3 Fatores de forma

Os materiais naturais são arranjos híbridos de compostos simples, os quais conferem propriedades estruturais de modo eficiente (*i.e.*, com economia). Entretanto, segundo Ashby (2012), se consideradas apenas as propriedades mecânicas individuais de cada fase, como as fibrilas de celulose e a matriz lignina-hemicelulose⁹, existem alternativas sintéticas muito mais resistentes. Desse modo, é a “configuração dos componentes que dá origem à notável eficiência dos materiais naturais”, segundo o autor. A configuração dos componentes está relacionada tanto às morfologias individuais quanto às suas distribuições (ASHBY, 2012).

Conforme o tipo de solicitação, determinadas áreas de seções transversais são mais eficientes. Com tração axial, *e.g.*, todas as seções com mesma área terão o mesmo desempenho, independentemente da sua forma (ASHBY, 2012). Já para a compressão axial ou flexão, tanto a área da seção quanto sua forma precisam ser ponderadas. Para avaliar a eficiência da forma

⁹ Junto com a lignina, a hemicelulose forma a matriz básica das paredes celulares das plantas, agindo como um ligante para as fibrilas de celulose; considerado um polímero amorfo, com cadeias mais curtas e com menor resistência em comparação à celulose (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

de uma seção pode ser utilizado o índice φ , que representa a razão entre a rigidez, ou resistência da seção conformada, pela rigidez de uma seção quadrada de referência (ASHBY, 2012). Para avaliar a rigidez à flexão (S) de uma viga, tem-se a relação de proporção:

$$S \propto \frac{EI}{L^3} \quad (7)$$

onde E é o módulo elástico do material, I é o momento de segunda ordem da área, ou momento de inércia, da seção de uma viga com comprimento L (ASHBY, 2012; BUDYNAS; NISBETT, 2014). O momento de inércia está relacionado com a resistência em rotacionar uma estrutura, com uma determinada área de seção, em um eixo. Desse modo, I é a soma dos produtos de uma unidade de área com o quadrado da distância ao eixo em que é movimentada (HIBBELER, 2005).

Para uma seção quadrada de referência, o momento de inércia (I_R) é determinado pela razão do quadrado da área por 12 (ASHBY, 2012). Desse modo, o fator φ_B^e , denominado *fator de forma para flexão elástica*, é determinado pela relação entre a rigidez de flexão da forma avaliada (S) com a seção quadrada de referência (S_R), segundo Ashby (2012):

$$\varphi_B^e = \frac{S}{S_R} = \frac{EI}{EI_R} = \frac{12I}{A^2} \quad (8)$$

Para o fator φ_B^e , não são consideradas as propriedades do material, nem sua escala, mas sim apenas as propriedades estruturais da geometria da seção. O fator é adimensional, uma vez que tanto I quanto A^2 apresenta unidades dimensionais na quarta potência (ASHBY, 2012). Se uma seção quadrada, de referência, apresenta $\varphi_B^e = 1$, para uma seção circular cilíndrica e oca, como o caso de gramíneas como o bambu, trigo e arroz, este fator tende a ser de 2 a 6 vezes maior (ASHBY, 2012). Isto significa que mantendo a massa de uma estrutura e apenas alterando sua geometria, é possível obter um ganho relativo considerável de rigidez à flexão.

Além da influência da forma externa da seção para a rigidez em solicitações de flexão, é possível considerar a influência da microforma que a compõe. Em estruturas celulares complexas, como em caules de plantas, os tecidos estão dispostos de modo arranjado e organizado (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). O índice ψ_B^e representa o *fator de forma microscópica para flexão elástica* (ASHBY, 2012) e está relacionado com a distribuição celular de um material poroso. Desse modo, quanto maior for a porosidade de uma forma, mais eficiente ela será. No caso da seção circular e oca do bambu, se considerada também a

gradação radial de fibras na planta, o índice ψ_B^e pode aumentar cerca de 1,6 vezes a rigidez da estrutura. Portanto, com a multiplicação dos fatores de forma φ_B^e e ψ_B^e para o bambu é possível aumentar a rigidez de uma estrutura em até 10 vezes, em comparação com a seção de referência de mesma massa (ASHBY, 2012; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

A complexidade formal de plantas possui influência nas suas propriedades mecânicas, de modo que poderiam ser exploradas para um projeto biônico de estruturas mais eficientes (GIBSON, 2012). Este fator contribui diretamente para a dissipação de tensões no corpo da planta, ainda que sua geometria receba pouca atenção em estudos projetuais (NIKLAS, 1992). Cabe ser estudado, portanto, o arranjo de formas externas e internas de plantas com propriedades estruturais reconhecidas, de modo a auxiliar em projetos biônicos. A complexidade formal das micro e macroestruturas de materiais naturais pode, então, beneficiar-se de métodos computacionais para análise.

2.3 Modelos matemáticos para estudo de estruturas

A análise de projeto é um processo de investigação de determinadas propriedades de uma peça, montagem ou estrutura (KUROWSKI, 2004). A análise pode ser conduzida em objetos reais ou em um modelo representativo das características do objeto. Esse processo auxilia tanto na compreensão do sistema a ser trabalhado quanto na prevenção de falhas que possam ocorrer. Quando aplicada em modelos representativos, a análise é realizada por meio de modelos matemáticos (KUROWSKI, 2004).

Como visto, os materiais naturais, como as plantas, são considerados híbridos devido ao arranjo de elementos de diversas escalas. Assim, suas propriedades estruturais são um resultado da multiplicação de diversos fatores, como as características das células constituintes dos seus tecidos, das macro- e micropropriedades mecânicas, bem como de fatores de forma e da disposição dos elementos de sua microestrutura ou anatomia. A complexidade da combinação dessas variáveis corresponde às variações de propriedades que podem ser encontradas em ensaios.

O estudo de estruturas complexas e variáveis pode levar à necessidade de simplificar suas características. Para avaliar sistemas complexos, uma das soluções adotadas é a subdivisão em componentes individuais ou elementos, cujo comportamento pode ser mais facil-

mente compreendido (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). A análise dos elementos dessa subdivisão auxilia na reconstrução do sistema complexo original. Essa divisão leva a problemas discretos¹⁰ que podem ser computados de maneira rápida, mesmo com um grande número de elementos, ou contínuos¹¹, em que a solução depende de manipulação matemática (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

Problemas discretos estão, por exemplo, relacionados com um número conhecido de subdivisões, chamados de *elementos finitos*. A análise por elementos finitos (*finite element analysis* ou FEA) utiliza diversos métodos para resolução de problemas discretos (KUROWSKI, 2004). Com advento da computação digital, foi desenvolvido o método dos elementos finitos (*finite element method* ou FEM), inicialmente voltado para problemas de mecânica estrutural (BATHE, 1996). Com sua popularização, o método passou a ser empregado em etapas projetuais de produtos diversos, auxiliando na simulação de sistemas complexos (BATHE, 1996).

Uma das vantagens do uso da FEA é a previsão do comportamento de sistemas e estruturas frente às condições de contorno¹² (KUROWSKI, 2004). No design de produto, seu uso pode auxiliar na redução dos custos de fabricação de modelos e protótipos para ensaios físicos, além de auxiliar na otimização de geometrias para estruturas mais eficientes, bem como na seleção dos materiais mais apropriados (ASHBY, 2012). Do mesmo modo, a técnica pode ser empregada para estudo de formas complexas, as quais seriam difíceis de serem replicadas fisicamente.

Em plantas, o FEM foi empregado para análises em escala microscópica, como na parede celular da epiderme da cebola (QIAN *et al.*, 2010); na comparação com ensaios físicos com células individuais (WANG; JIAO; WEI, 2006) e em pólenes (BOLDUC *et al.*, 2006); e para a previsão de desenvolvimento de células em *Arabidopsis* (HAMANT *et al.*, 2008). O método também pode ser utilizado para análise do desempenho mecânico de modelos matemáticos de tecidos vegetais, ao verificar as propriedades elásticas e mecânicas frente a solicitações de cargas (FAISAL *et al.*, 2014; HORBENS *et al.*, 2015). Por exemplo, uma região do caule do bambu foi modelada para ensaio via FEM em ensaios de flexão e tração (CHAND; SHUKLA;

¹⁰ A discretização é o processo de divisão do modelo complexo em um número finito de elementos ou malha (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

¹¹ Um problema contínuo é aquele cuja divisão resulta em um número infinito de elementos (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

¹² Condições de contorno são as propriedades delimitantes de um modelo matemático que dizem respeito às cargas, restrições de movimento, temperatura, etc. (KUROWSKI, 2004).

SHARMA, 2008) e de cisalhamento (FU *et al.*, 2013), onde foi demonstrado a superioridade estrutural de um material com gradiente funcional (*functionally graded material* ou FGM). O caule completo da planta também foi modelado de maneira simplificada para análise numérica em ensaios de tração, torção e flexão, comparando propriedades mecânicas homogeneizadas, ortotrópicas e de um FGM por Silva, Walters e Paulino (2006). Foi verificado pelos autores que para análises estruturais em escala micro, a utilização de propriedades gradientes é extremamente importante.

Para realização de uma análise em um modelo numérico por FEM são basicamente necessárias a adição da geometria, a atribuição das propriedades dos materiais constituintes e a determinação das condições de contorno do sistema (KUROWSKI, 2004). Com a discretização do modelo, é criada uma malha poligonal que preenche a geometria a ser analisada. Esta malha pode ser mais ou menos refinada de modo que o número de elementos seja maior ou menor. Quanto maior o número de elementos, mais precisa será a aproximação, porém tenderá a consumir mais processamento, tornando a análise mais demorada e menos econômica (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

A malha criada na discretização da geometria substitui o modelo contínuo (composto por elementos de tamanho infinitesimal) por um número finito de polígonos, cujos vértices são chamados de nós. O FEM trata da representação de variáveis, como deslocamento, através de funções polinomiais compatíveis com as condições de contorno aplicadas (KUROWSKI, 2004). Se o modelo avaliado não for discretizado, as equações polinomiais teriam de ser muito complexas para a resolução do problema. Com a divisão da geometria, dos carregamentos e das restrições, é possível utilizar polinômios mais simplificados para determinar o deslocamento em cada nó (KUROWSKI, 2004).

No método por elementos finitos é realizada a simulação de uma determinada força a ser aplicada em um determinado corpo com propriedades mecânicas e restrições conhecidas (KUROWSKI, 2004). Essa força apresenta uma energia potencial a ser aplicada, no modelo, e atenuada com o deslocamento do mesmo. A rigidez do modelo é definida pelo conjunto da geometria com as propriedades mecânicas a ela atribuídas, definindo, portanto, qual será o deslocamento de cada região. O deslocamento, por sua vez, leva à dispersão da energia aplicada, levando a um estado de equilíbrio. Com a discretização, apenas um determinado conjunto de nós deslocados minimiza a energia potencial total do modelo. A determinação desse conjunto corresponde à dissipação da energia potencial e leva ao estado de equilíbrio

do modelo. Desse modo, segundo Zienkiewicz, Taylor e Zhu (2013), a equação fundamental do método dos elementos finitos que apresenta o estado de equilíbrio é dada por:

$$[F] = [K] * [d] \quad (9)$$

onde $[F]$ é o vetor conhecido dos carregamentos em um nó; $[K]$ é a matriz conhecida da rigidez; e $[d]$ é o vetor desconhecido dos deslocamentos do nó. As condições de contorno estão divididas entre os vetores $[F]$, representando os carregamentos; e $[K]$ sendo uma função da geometria do modelo, das propriedades do material e das restrições de deslocamento. A partir de $[d]$ podem ser derivados os valores de tensão e deformação de cada nó (KUROWSKI, 2004).

Uma divisão geral dos métodos de elementos finitos é entre análises lineares e não-lineares (KUROWSKI, 2004; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). A primeira diz respeito a situações em que não há alteração nas condições de rigidez do modelo ou das solicitações sob o qual está sujeito (BATHE, 1996). Para as análises não-lineares, o ensaio pode ser modificado em três tipos básicos de não-linearidade (REDDY, 2004): (1) geométrica, quando modificações na geometria da estrutura afetam sua rigidez; (2) material, quando suas propriedades constitutivas não são constantes; e (3) nas condições de contorno, quando as cargas ou restrições são alteradas durante a análise.

Para análise mais realista de estruturas vegetais, por exemplo, é interessante que as não-linearidades geométrica e material sejam incluídas no modelo. Na não-linearidade material, as relações constitutivas¹³ do modelo podem se manter constantes até uma determinada tensão, como para materiais elastoplásticos (REDDY, 2004). A relação linear da tensão-deformação, portanto, é interrompida com a inclusão de relações constitutivas para deformação plástica, como por exemplo limite de escoamento (BATHE, 1996). Como determinados tecidos vegetais (parênquima e esclerênquima) possuem condições de falha individuais – como, por exemplo, pelas equações 5 e 6 – esses limites precisam ser incluídos no modelo analisado.

Já na não-linearidade geométrica, a cada modificação da rigidez da estrutura, a equação de equilíbrio 9 tem que ser novamente determinada para novos deslocamentos (KUROWSKI, 2004). Desse modo, em estruturas com características geométricas complexas, como os tecidos vegetais, o uso de modelos simplificados pode levar a uma maior imprecisão da

¹³ A relação constitutiva diz respeito à relação entre a tensão-deformação de um material quando sujeito a determinadas condições de contorno (KUROWSKI, 2004).

análise. Assim para resultados mais próximos aos oriundos de ensaios experimentais, novas formas de obtenção de geometrias 3D podem ser exploradas para serem empregadas em análises por elementos finitos.

2.4 Tecnologias 3D de observação e análise

Estudos de anatomia vegetal sempre estiveram ligados à necessidade de utilizar ferramentas de seccionamento e observação de qualidade (SCHULTZ, 1972). Em ciências dependentes do estudo e descrição visual de amostras, o uso de equipamentos tecnológicos de grande resolução contribui para descoberta de novas características estruturais, bem como na reavaliação de observações anteriores, em escalas cada vez menores (FAHN, 1990). Da mesma forma para as ciências dos materiais, tais tecnologias de caracterização podem levar a resultados inovadores (CALLISTER; RETHWISCH, 2006; HÜBSCHEN *et al.*, 2016).

Com o avanço das tecnologias de observação, diversas técnicas têm sido empregadas para a observação de amostras vegetais. A partir do desenvolvimento da microscopia ótica por Robert Hooke no século XVII, foi possível observar o felema¹⁴ (cortiça), o qual era constituído por células (do latim *cellula*), nome derivado da semelhança com as celas de mosteiros (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2003). Desde então, a microscopia e demais técnicas de observação por elétrons têm aumentado de resolução e levado a novas descobertas.

2.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Considerada uma das técnicas mais utilizadas e importantes na caracterização de materiais, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite a visualização da superfície em ampliações em dezenas de milhares de vezes (INKSON, 2016). Em ciência dos materiais, por exemplo, a aplicação de MEV na visualização da microestrutura de materiais permite a compreensão de suas propriedades (CALLISTER; RETHWISCH, 2006). Já na anatomia vegetal,

¹⁴ Tecido protetor secundário, com lamelas preenchidas por suberina, que toma a função da epiderme devido ao aumento no espessamento da madeira. O espessamento leva a uma pressão imposta na epiderme e no córtex, que eventualmente se rompem (FAHN, 1990).

o uso de da técnica permitiu grandes avanços no estudo da ontogenia¹⁵ de flores e em demais estruturas (FAHN, 1990).

Como o estereoscópio, a MEV permite a observação tridimensional de amostra, na caracterização de materiais heterogêneos orgânicos e inorgânicos (GOLDSTEIN *et al.*, 2003). Entretanto, seus níveis de observação permitem escalas em níveis micro ou nanométricas. Sua operação consiste na varredura superfície da amostra pela emissão de feixes de elétrons, os quais são refletidos (retroespalhados) e coletados (CALLISTER; RETHWISCH, 2006). As imagens geradas possuem grande profundidade de campo, permitindo análises quantitativas e qualitativas (GOLDSTEIN *et al.*, 2003).

2.4.2 Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ CT)

A Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ CT) é considerada uma das principais técnicas de observação tridimensional de estruturas internas e externas de amostras, da atualidade (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009). A análise utiliza feixes colimados de Raios X para mapear regiões específicas de uma amostra com relação à sua densidade. O resultado é uma série de projeções radiográficas que, quando reconstruídas, geram um modelo volumétrico da amostra. Diferentemente da tomografia hospitalar, é possível obter valores de resolução espacial¹⁶ na escala micrométrica, permitindo observação de tecidos a células, sem que haja a necessidade de seccionar a amostra. Na μ CT, portanto, quanto maior for a resolução com que o equipamento permite trabalhar, menor será o valor da resolução espacial final e o tamanho do *voxel*¹⁷ (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009).

Diversos fatores influenciam o valor da resolução espacial, como por exemplo o tamanho e resolução do sensor, bem como os tipos de magnificação do equipamento (GLEASON; PAULUS; OSBORNE, 2010; HANKE *et al.*, 2016). Os microtomógrafos possuem, em geral, dois tipos de magnificação da amostra, por meio geométrico, com o afastamento da

¹⁵ Ontogenia é o estudo do desenvolvimento de tecidos, órgãos ou organismos, permeando das fases de divisão celular à forma plena (FAHN, 1990).

¹⁶ Resolução espacial (L_x), com unidade μm , é a menor separação na qual dois pontos podem ser percebidos como entidades discretas, definido dentro de um *pixel* na imagem final obtida (GOLDSTEIN *et al.*, 2003; STOCK, 2009).

¹⁷ *Voxel* é uma unidade volumétrica de um *pixel* em 3 dimensões (STOCK, 2009). O tamanho de um *voxel* está relacionado com a resolução espacial nas direções X, Y e Z, de modo que, *e.g.*, em uma microtomografia de resolução espacial de $5\ \mu\text{m}$, o seu modelo 3D reconstruído possuirá um *voxel* com $5\ (\text{L}) \times 5\ (\text{A}) \times 5\ (\text{C})\ \mu\text{m}$, na escala real.

mesma do detector, e por meio óptico, com o uso de objetivas.

A análise volumétrica por μ CT necessita de conhecimentos sobre o material da amostra, relativos à densidade e escala dos detalhes a serem visualizados, juntamente com as propriedades do feixe de Raios X, como a energia da radiação e tempo de exposição (STOCK, 2009). Nesse sentido, para entendimento do processo de μ CT é importante conhecer os princípios básicos da interação física da radiação com a matéria a ser observada (LANDIS; KEANE, 2010).

Quando um feixe de Raios X passa pela amostra, parte dos fótons é absorvida nas regiões mais densas, em um processo chamado de atenuação (STOCK, 2009). O princípio básico de tomografia computadorizada consiste na quantificação dessa atenuação, resultando em diferenças de contraste nas imagens finais obtidas (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009). Como nas radiografias hospitalares convencionais, as regiões mais densas absorvem maior radiação, resultando em áreas mais claras nas projeções finais. Já no caso das regiões com menor densidade, menos radiação é absorvida e, assim, a imagem torna-se mais escura. O contraste, portanto, entre as regiões escuras e claras das projeções permite a identificação visual da microestrutura da amostra e posterior tratamento, tanto para análises qualitativas quanto para quantitativas (STOCK, 2009).

A atenuação depende da energia dos Raios X e da composição e tamanho da amostra. De acordo com Stock (2009), a interação da radiação com a matéria é determinada a partir da atenuação da intensidade original do feixe I_o , conforme a Lei de Beer-Lambert (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000):

$$I = I_o e^{-\mu x} \quad (10)$$

onde I é a intensidade da radiação após atravessar um objeto com um *coeficiente de atenuação linear* μ , expresso em cm^{-1} , e com espessura x . O coeficiente μ descreve a propriedade de atenuação de um material específico sobre uma, também específica, energia de Raios X, dependendo linearmente da densidade do material (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000). Devido à colimação do feixe de Raios X, quase perpendicular à matéria, a atenuação é relacionada com a espessura da amostra.

Como um mesmo material pode possuir um μ diferente, como água, gelo e vapor, é possível relacioná-lo diretamente com suas respectivas densidades, também linearmente dependentes, resultando no *coeficiente de atenuação de massa*, ou μ/ρ (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000). Desse modo, a eq. 10 pode ser reescrita como:

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x} \quad (11)$$

onde ρx é o produto da densidade do material por sua espessura, conhecido como *espessura de massa* e expresso por g/cm^2 (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000). Devido a ρ ser definido por g/cm^3 , a unidade de μ/ρ é cm^2/g .

A quantidade de atenuação da radiação relaciona-se diretamente com o número de átomos da amostra que a intensidade do feixe de Raios X encontra, ao atravessá-la (STOCK, 2009). Portanto, o coeficiente de atenuação de massa depende tanto do número atômico Z do material, quanto da energia E_R (em keV) da radiação, ou do seu comprimento de onda λ (expresso em nm)¹⁸. Para o número atômico do material, essa relação é de $\mu/\rho = Z^\alpha$, $\alpha \approx 3$, enquanto que, para a energia, a relação é de $\mu/\rho = E_R^{-3}$ (SATTLE, 2013). Assim, quanto maior o Z e, conseqüentemente, a densidade da amostra, maior será a atenuação da radiação, resultando em regiões com tonalidade mais claras. Nessas situações, é possível utilizar feixes com intensidade I_0 e, conseqüentemente, energia E maiores. Isso permite que mais radiação atravesse a amostra, aumentando os detalhes das projeções. Entretanto, o aumento da intensidade pode fazer com que sejam perdidos os detalhes de áreas menos densas da amostra, com imagens mais saturadas e menor contraste (HANKE *et al.*, 2016).

Em amostras vegetais, devido à anatomia com elementos de densidades baixas, e conseqüentemente menores atenuações (MARASHDEH *et al.*, 2012, 2015) na microtomografia faz-se necessário o uso de potências mais baixas. Além disto, com a diminuição da presença de fases com densidades distintas, como tecidos ósseo e adiposo, as tomografias finais tendem a apresentar baixo contraste, dificultando a análise. Uma alternativa encontra-se no uso de protocolos de contraste, em que a amostra é submersa em substâncias variadas para aumentar a densidade de determinadas regiões (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009). Entretanto, tal metodologia pode levar desde à concentração parcial da substância de contraste até à degradação das amostras.

Nesse sentido, outra importante variável para uma análise de μCT é o tempo de exposição (STOCK, 2009). Tal como em fotografia, quanto maior o tempo de exposição, mais fótons serão recebidos pelo detector, resultando em mais detalhes (contraste). Em amostras muito densas, além de ajustar a intensidade E do feixe de Raios X, pode ser necessário

¹⁸ Para Raios X, a relação entre energia (E) e comprimento de onda (λ) é expressa por $\lambda = 1.256 E$ (SVERGUN *et al.*, 2013).

umentar o tempo de exposição. Desse modo, é possível conseguir detalhes e resolução tanto nas regiões de maior densidade quanto nas de menor. O ponto negativo é que ao aumentar o tempo de exposição em cada projeção, aumenta-se também o tempo total da aquisição das imagens. Isso se deve ao fato de que, para cada análise, são realizadas de centenas a milhares de projeções.

Como visto, a microtomografia funciona com a determinação da atenuação da I_0 conhecida do feixe de Raios X. Entretanto, para ser detectada e comparada com a intensidade original, a radiação precisa anteriormente ser convertida em luz visível. Isto é realizado através dos efeitos de cintiladores, ou detectores de cintilação (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009). Os cintiladores são manufaturados com diferentes composições químicas. De modo geral, caracterizam-se por serem de um material transparente com a propriedade de emitir luz visível ao serem atingidos por fótons de alta intensidade, como os de Raio X (STOCK, 2009).

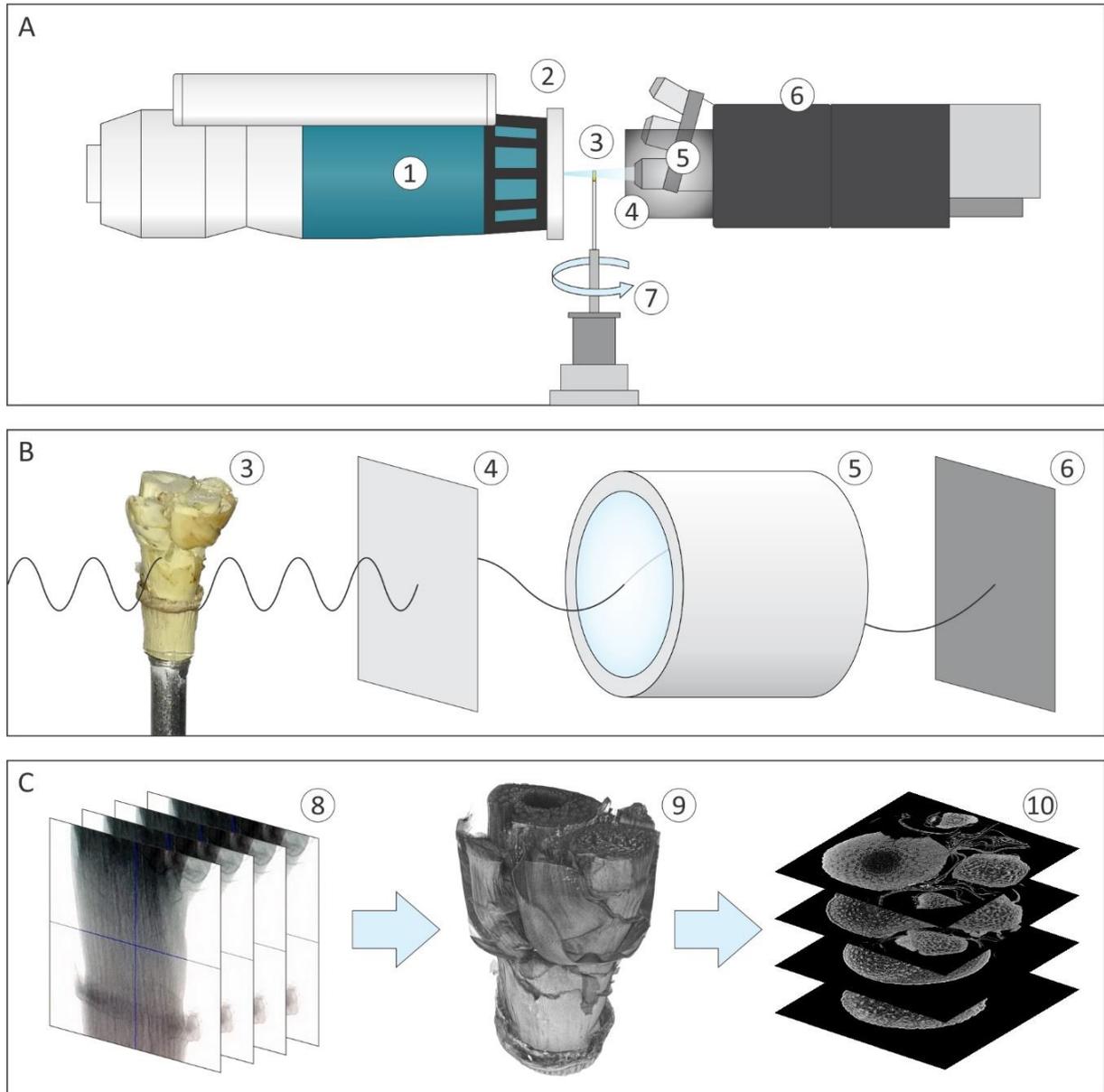
O sinal analógico da luz emitida pelo cintilador é, então, detectado por um chip CCD¹⁹ e comparado com a intensidade da radiação original, já conhecida. Com base na diferença entre I e I_0 , o conjunto cintilador-CCD determina a intensidade para cada região, através de sinais elétricos. Por fim, um conversor analógico-digital transforma essas informações em sinais digitais para cada elemento da imagem, ou *pixel*. Assim, cada *pixel* representa a quantidade de Raios X que uma região, com determinada resolução espacial, recebeu durante o tempo de exposição determinado (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009).

A partir da compreensão dos princípios e das variáveis básicas do processo de aquisição de imagens por μ CT, é possível acompanhar o funcionamento do equipamento, mostrado na figura 4. Basicamente, o processo constitui-se de duas etapas: a de aquisição de imagens tomográficas e a de reconstrução. Conforme visto na figura 4A, na etapa de aquisição de tomografias, a fonte de Raios X (1) emite um feixe que passa primeiramente por um filtro (2), à escolha do operador, conforme a amostra. O filtro remove determinados fótons com baixa ou alta energia, respectivamente chamados de Raios X *moles* e *duros*, o que diminui a gama de energias de Raios X presente no feixe (STOCK, 2009). Como os coeficientes de atenuação dependem do comprimento de onda dos Raios X, a presença de mais de um λ pode dificultar a análise, segundo Stock (2009). Sem a presença de filtro para baixas energias, a radiação

¹⁹ CCD ou *Charge-Coupled Device* (dispositivo de carga acoplada) é um sensor que acumula fótons como sinais elétricos, que podem ser lidos (SATTTLER, 2013).

mole, mesmo que atenuada pelas regiões mais densas da amostra, pode saturar o detector nas demais áreas, diminuindo o contraste das projeções.

Figura 4 – Funcionamento da análise de μ CT: (A) etapa de aquisição de tomografias; (B) detalhe da obtenção de projeções tomográficas; (C) etapa de reconstrução. Onde: (1) fonte de raios X; (2) filtros de raios X; (3) amostra; (4) cintilador; (5) objetivas; (6) detector analógico CCD e conversor analógico-digital; (7) câmara de suporte e rotação de amostra; (8) série de projeções tomográficas; (9) reconstrução 3D e; (10) série de seções transversais.



FONTE: Autor (2016).

Ao atravessar a amostra (3) e ser atenuada, a radiação passa pelo cintilador (4), localizado em frente às objetivas (5), na figura 4A. Após transformado em luz visível, a radiação é magnificada para aumentar sua resolução, diminuindo o valor da resolução espacial, na

reconstrução da amostra. Quanto mais próximo o detector encontra-se da amostra, a região projetada tende a se aproximar do seu tamanho real – como a sombra de um objeto próximo a uma parede. Se o objeto for afastado da parede, como analogia da magnificação do tipo geométrica, a sombra tende a aumentar de dimensão, permitindo examinar mais detalhes, ao passo que tanto a qualidade quanto a definição são sacrificadas (LANGFORD, 2000). Desse modo, alguns equipamentos permitem a possibilidade de emprego de um conjunto de objetivas (5), para a magnificação do tipo óptica, entre o cintilador (4) e o sensor CCD (6), vistos na figura 4B. Assim, para diminuição das dimensões da ROI²⁰ da amostra, *i.e.*, para valores menores de resolução espacial, não é necessário afastar o detector da mesma. Desse modo, o uso de magnificação óptica permite bons níveis de contraste nas projeções finais, mesmo com resoluções espaciais menores.

Com a aquisição de uma projeção, a amostra é rotacionada em sua câmara de suporte (7), da figura 4A. De acordo com o número n de projeções na análise, a amostra é rotacionada com ângulo θ , determinado por $\theta = 360/n$. O operador define o valor de n nas configurações do equipamento, gerando a série de projeções (8), durante a etapa de reconstrução (figura 4B). No total, a amostra dá uma volta completa, em divisões de θ° . Todas as projeções geradas possuem, em comum, o mesmo eixo Y, relativo ao eixo de rotação da câmara da amostra (7). Devido às projeções possuírem o mesmo centro, o volume resultante possui um formato cilíndrico e, conseqüentemente, suas seções são circulares (STOCK, 2009).

O *software* utiliza um algoritmo para combinar as projeções baseando-se em regiões com dados semelhantes, levando à reconstrução 3D (9). A combinação baseia-se na divisão das imagens em pontos mínimos, os quais são comparados com as respectivas regiões nas projeções seguintes (STOCK, 2009). Cada ponto de uma projeção possui uma intensidade e coordenada conhecida, relacionada à distância total percorrida pelo feixe de raios X. Em seguida, os pontos com valores de intensidade e posição são interpretados por componentes Fourier, determinados a partir de valores de amplitudes e frequências (STOCK, 2009). Por fim, a partir da reconstrução, é gerada a série de seções transversais ou fatias (10) do modelo analisado, permitindo ser exportada para formatos de arquivos de imagem, como TIFF²¹ e

²⁰ ROI ou *Region of Interest* (região de interesse) é a região da amostra escolhida para a análise na μ CT.

²¹ TIFF ou *Tagged Image File Format* (formato de arquivo de imagem rotulado) é uma extensão de imagem que permite salvar todas as informações da imagem, em compressão sem perdas (HERTRICH, 2005).

DICOM²². Os arquivos das fatias podem ser importados em *softwares* específicos de análise de tomografias, para a análise quantitativa.

A etapa da análise quantitativa é realizada com o processo chamado de *binarização*, *i.e.*, reconstruir arquivos tridimensionais baseando-se em uma série de imagens bidimensionais. A binarização inicia-se a criação de máscaras específicas para cada tecido. As máscaras são definidas manualmente, com base em *threshold* (limites) máximos e mínimos para os níveis de cinza das imagens. Em amostras vegetais, como os valores de densidade e atenuação possuem pouca variação, as imagens das seções transversais podem possuir pouco contraste, dificultando a seleção de máscaras. Nesse modo, determinados recursos de *softwares* podem auxiliar na criação manual de máscaras, ao selecionar regiões em um determinado número de fatias e interpolar as regiões nas demais máscaras.

Para equipamentos que operem com magnificação óptica, o valor da resolução espacial tenderá a ser o mesmo do tamanho do *voxel*. Isso se deve por não haver a necessidade de aumentar a projeção da amostra geometricamente, levando à perda de qualidade e, consequentemente, *voxels* com tamanhos virtualmente menores à resolução espacial verdadeira (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009; STOCK, 2009).

Após a segmentação de cada região, é possível exportar arquivos separados para formatos 3D específicos, como STL²³, os quais podem ser utilizados para visualização virtual ou em prototipagem rápida. A segmentação em arquivos tridimensionais permite ainda a discretização do modelo em malhas específicas para uso em análise numérica, mantendo as geometrias com alto nível de detalhamento (AKHTAR; EICHHORN; MUMMERY, 2006). O processo também possibilita a caracterização 3D da amostra tomografada, como para determinação das densidades relativas de cada tecido (eq. 1). Por consequência, é possível determinar as propriedades mecânicas de cada material, com base nos resultados da caracterização (eqs. 2 e 3).

Ainda que essa abordagem tenha sido utilizada para materiais cerâmicos e metálicos (AKHTAR; EICHHORN, S. J.; MUMMERY, 2006; HOSOKAWA *et al.*, 2016; HUANG, R.; LI, P.; LIU,

²² DICOM ou *Digital Imaging and Communications in Medicine* (imagem e comunicação digitais em medicina) é um formato com capacidade de guardar informações sobre os dados da tomografia, como resolução, número de seções, entre outros (SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009).

²³ Extensão *stereolithography* (estereolitografia) é considerado um formato universal para arquivos tridimensionais, voltado para desde edição virtual ou prototipagem rápida, sendo constituído de malhas formadas por triângulos planos (SILVA, 2011).

T., 2016; LU, Y; CHIU; JONES, I. P., 2016; SILVA, L. F. *et al.*, 2015; SINGH, S. S. *et al.*, 2016; WICKE *et al.*, 2016), pouco tem sido explorado em amostras vegetais. A complexidade da microestrutura do bambu foi pouco estudada por μ CT (PENG *et al.*, 2014), representando uma nova possibilidade de investigação em alta resolução. Do mesmo modo, em plantas com características estruturais reconhecidas, como o bambu, a abordagem de união das técnicas de μ CT e FEM pode levar a novas informações sobre o desempenho dos seus tecidos constituintes. As informações obtidas por essas técnicas podem ser adaptadas para aplicação em projetos de produtos com base na metodologia de biônica (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005).

2.4.3 Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)

Para o desenvolvimento de estruturas biônicas, além da análise numérica e da posterior aplicação das informações, é interessante o uso conjunto de técnicas de modelagem. Da mesma forma, para a investigação tridimensional de um projeto de design é importante a fabricação de modelos físicos, também chamados de *mock-ups*. Estes são representações volumétricas preliminares de um projeto, com característica de estudo de suas formas, ao invés do estudo de suas funcionalidades, como em um protótipo (BAXTER, 2000). Os *mock-ups* podem ser fabricados de diversos materiais desde que seja respeitada sua organização morfológica, em termos de proporção e de geometrias.

A fabricação de modelos pode ser dividida entre dois sistemas básicos, caracterizados por métodos de subtração e adição (ASHBY; JOHNSON, 2011). A manufatura subtrativa é baseada na remoção de material a partir de um sólido volumétrico inicial, até a obtenção da geometria final desejada, em processos que levam à geração de resíduos (ou cavacos). As técnicas mais comuns encontram-se nos processos de usinagem, como por torneamento, furação e fresamento, além de processos por comando numérico computadorizado (CNC) por meios mecânicos ou a laser (LEFTERI, 2013). Já a manufatura aditiva engloba os processos de fabricação em que a matéria-prima é incluída em camadas, de modo a gerar a geometria final. Essas técnicas também são conhecidas como prototipagem rápida, tendo ganhado bastante popularidade por meio de técnicas de impressão 3D (LEFTERI, 2013).

Uma das principais técnicas de prototipagem é a modelagem por deposição de material fundido, ou FDM (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). O processo utiliza os dados provenientes

da malha²⁴ de um modelo 3D virtual, em extensão STL, para a deposição de um insumo polimérico, geralmente uma resina ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) em uma base. Para isso, o equipamento divide a malha do arquivo a ser impresso em camadas horizontais, paralelas à base, iniciando o processo de deposição do filamento polimérico extrudado (LEFTERI, 2013). Conforme os filamentos são impressos em uma camada, a plataforma em que o modelo está apoiado desce e a camada seguinte é depositada, repetindo-se até o término do modelo.

Quando a geometria do modelo possui ângulos positivos, ou seja, cada camada depositada pode se apoiar sobre a inferior (como, por exemplo, na impressão de um modelo em formato de pirâmide), o processo não necessita de demais tipos de materiais. Entretanto, para estruturas em que o modelo a ser impresso possui regiões suspensas no ar, as respectivas camadas não possuem suporte de camadas inferiores (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Desse modo, faz-se necessária a deposição alternada de camadas temporárias, com um material de suporte, com a finalidade de apoiar as camadas do modelo. O material de suporte é considerado temporário, uma vez que, ao término da impressão FDM, ele pode ser removido através de dissolução em água. Portanto, a técnica permite a manufatura de modelos físicos com grande precisão geométrica, de modo ser uma alternativa para a fabricação de *mock-ups*, como para a observação das formas de uma estrutura.

Para o desenvolvimento de projetos por meio de biônica em que uma das principais propriedades aplicadas é a eficiência geométrica, a impressão FDM representa um importante meio de se observar essas características, em um modelo físico. Juntamente com a microtomografia computadorizada, as técnicas possibilitam melhor compreensão visual das propriedades a serem aplicadas do bambu. Contudo, para melhor aplicação das mesmas, é importante um conhecimento sobre a anatomia da planta, de modo a auxiliar na interpretação dos resultados obtidos.

2.5 Bambu: propriedades e anatomia básica

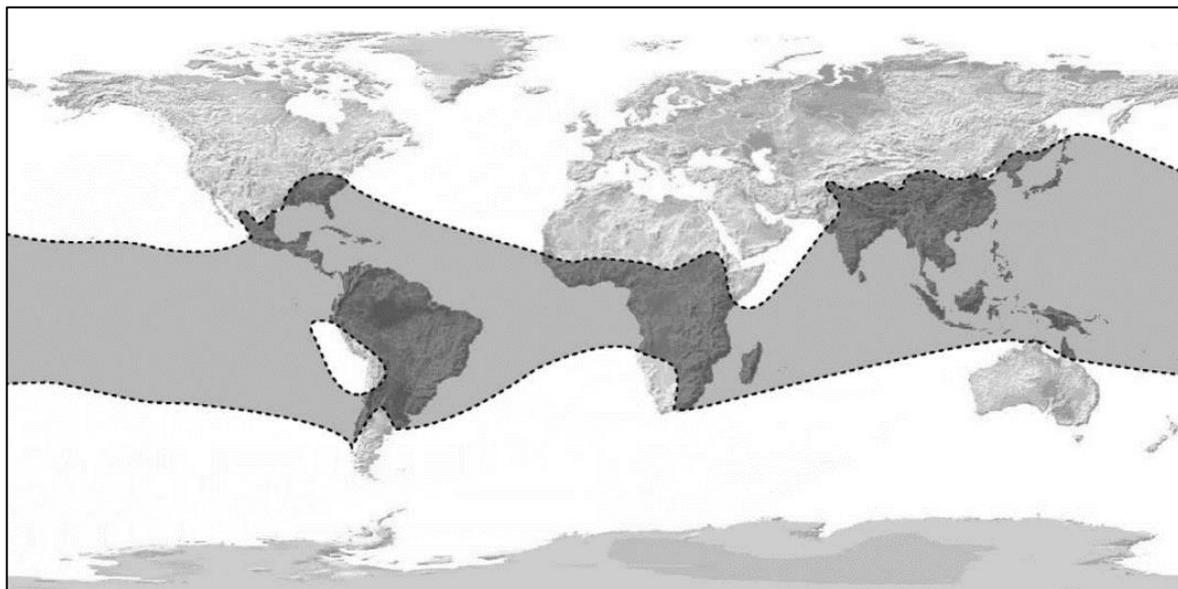
O bambu é um material milenar com diversas aplicações industriais como na construção

²⁴ Conjunto de triângulos formados pelas coordenadas de 3 pontos, os quais formam a geometria de um modelo 3D virtual (SILVA, 2011).

civil, na fabricação de papel, na indústria de mobiliário, entre outros (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2012; PEREIRA; BARATA, 2014). Sua relação transcende o mundo dos objetos, desde antigas conexões com a pesca, jardinagem e artesanato até relações simbólicas (McCLURE, 1966). Estima-se que mais de 1 bilhão de pessoas tenha sua subsistência graças a esta planta (PEREIRA; BERALDO, 2008).

Com boa rigidez e com densidade muito baixa, o bambu é o material perfeito para uso em aplicações em que se necessita melhorar a relação resistência/peso. Segundo Ashby e Johnson (2011), é a “dádiva da natureza para a indústria da construção”, sendo considerado o mais versátil dos materiais, para uso desde assoalhos a venezianas. Contudo, a razão biomecânica para suas propriedades mecânicas ainda não foi totalmente explorada e, desse modo, compreendida. Encontrado de maneira natural ou antrópica em todos os continentes, à exceção da Antártica e Europa (MACNAB, 2011; PEREIRA; BERALDO, 2008), como mostra a figura 5, o bambu surge como um dos maiores exemplos de materiais naturais que podem servir de fonte de inspiração para uso na biônica.

Figura 5 – Ocorrência de bambu no mundo, representada pela área hachurada.



FONTE: Adaptado de Macnab (2011).

A história do bambu remonta ao começo das civilizações asiáticas, possuindo uma considerável importância social, devido aos seus aspectos de matéria-prima de baixo custo, com rápido crescimento e boa trabalhabilidade (McCLURE, 1966; PEREIRA; BERALDO, 2008). Historicamente, é sabido que o primeiro filamento utilizado em uma lâmpada por Thomas Edison

foi de carvão de bambu, além de que os primeiros aviões de Santos Dumont foram construídos com os colmos (caules) da planta (PEREIRA; BERALDO, 2008).

A tabela 1 apresenta algumas das principais propriedades mecânicas do bambu (ASHBY, 2012). A planta caracteriza-se, principalmente por sua resistência à tração aliada à baixa densidade, sendo proporcionalmente comparável ao aço (PEREIRA; BERALDO, 2008). Desse modo, o bambu tem sido estudado inclusive como material de reforço em compósitos com matrizes de epóxi, além de outros polímeros, e até como armação em concreto (MINKE, 2012; PEREIRA; BERALDO, 2008).

Tabela 1 – Principais propriedades mecânicas do bambu.

Propriedades	Valores
Densidade (kg/m ³)	600 – 800
Módulo Elástico (GPa)	15 – 20
Tensão de Escoamento (MPa)	35 – 44
Resistência à Tração (MPa)	36 – 45
Tenacidade à Fratura (MPa.m ^{1/2})	5 – 7

FONTE: Adaptado de Ashby (2012).

2.5.1 Gramíneas (Poaceae)

Os bambus pertencem à subfamília Bambusoideae, uma das 12 subfamílias da família Poaceae, as gramíneas (CLARK; LONDOÑO; RUIZ-SANCHEZ, 2015). Dentre as Angiospermas, a família Poaceae é considerada a que mais possui importância econômica para os seres humanos, por compreender alimentos e matérias-primas para fontes de energia, como a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), milho (*Zea mays*), aveia (*Avena sativa*), cevada (*Hordeum vulgare*), centeio (*Secale cereale*), entre outros (JUDD *et al.*, 2009; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013; SOUZA; LORENZI, 2012). Dos cerca de 650 gêneros e 9000 espécies mundiais, no Brasil são encontrados por volta de 180 gêneros, dos quais fazem parte 1500 espécies.

As gramíneas também têm grande importância para uso ornamental, em gramados e paisagismo, e determinados gêneros de bambu são, ainda, cultivados exclusivamente para este propósito (SOUZA; LORENZI, 2012). Além do principal componente em pastagens e em formações campestres, segundo Souza e Lorenzi (2012), é ainda destacado o uso de algumas espécies de Poaceae com finalidades medicinais, como o capim-limão (*Cymbopogon citratus*)

e como repelente de insetos, como a citronela (*Cymbopogon martinii*).

Na descrição da família Poaceae, segundo Souza e Lorenzi (2012), se caracterizam por serem rizomatosas, *i.e.*, desenvolvem-se horizontalmente, sendo às vezes lenhosas, como no caso dos bambus, com ciclo anual ou perene. Os caules possuem nós marcados – subdivisões transversais – com seção transversal circular a elíptica, sendo encontrados sólidos ou ocos, além da presença de corpos silicosos (JUDD *et al.*, 2009).

As folhas são distribuídas de forma alterna e dística, *i.e.*, com a presença de uma única folha por nó, mas distribuídas em um mesmo plano (SOUZA; LORENZI, 2012). Há a presença de bainhas²⁵ com margens sobrepostas, formando ocasionalmente um tubo, envolvendo o caule (JUDD *et al.*, 2009). As folhas são paralelinérveas, *i.e.*, suas nervuras são dispostas de modo paralelo na lâmina foliar (SOUZA; LORENZI, 2012).

Nas gramíneas, o tipo básico de inflorescências, agrupamentos regulares de flores (SCHULTZ, 1972), são as espiguetas, em que as flores são dispostas ao longo de um eixo, próximas umas das outras, formando uma pequena espiga (SOUZA; LORENZI, 2012). Em sua base, há a presença de um par de brácteas (ou glumas, estruturas foliosas modificadas e reduzidas para proteção das flores) próximas e sobrepostas (JUDD *et al.*, 2009; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

As flores são pequenas, não vistosas, e geralmente androginosporangiadas²⁶ (COCUCCI; MARIATH, 1995) e polinizadas pelo vento (JUDD *et al.*, 2009). As flores são consideradas aclamídeas, *i.e.*, não possuem o perianto – as regiões do involúcro da flor, conhecidas como cálice (formado pelas sépalas) e corola (formado pelas pétalas), segundo Souza e Lorenzi (2012). Os estames²⁷ variam de um a seis, podendo ser numerosos (para a subfamília Bambusoideae), e apresentam deiscência²⁸ longitudinal, em configuração chamada de rimosa (SOUZA; LORENZI, 2012). O gineceu²⁹ pode ser composto por dois ou três carpelos e é do tipo gamocarpelar (quando os carpelos são unidos), e é posicionado acima das demais peças florais (SOUZA;

²⁵ Base de uma folha que envolve o caule, em gramíneas (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

²⁶ As plantas, em geração diploide (2n), são consideradas esporófitos, *i.e.*, a geração que produz os esporos, as células reprodutivas que resultam de divisões celulares meióticas no androceu (conjunto dos estames) e no gineceu (conjunto de carpelos), segundo Cocucci e Mariath (1995).

²⁷ Regiões da flor que produzem os esporos do androceu (COCUCCI; MARIATH, 1995).

²⁸ A linha de abertura dos estames, que permite a liberação da geração gametofítica, o pólen, resultado da germinação de esporos (COCUCCI; MARIATH, 1995).

²⁹ Conjunto dos carpelos, as estruturas que envolvem um ou mais rudimentos seminais, os primórdios de uma semente (COCUCCI; MARIATH, 1995).

LORENZI, 2012). Os frutos característicos das gramíneas são secos, do tipo cariopse, popularmente conhecidos como grãos, possuindo geralmente a parede do fruto fusionada à semente (JUDD *et al.*, 2009).

A família Poaceae é considerada cosmopolita, com presença desde desertos a ambientes marinhos e de água doce, à exceção de regiões de grandes altitudes (JUDD *et al.*, 2009). De modo geral, as gramíneas são relativamente raras de ocorrerem no interior de formações florestais, à exceção das Bambusoideae (SOUZA; LORENZI, 2012). Destaca-se também o importante papel que os bambus lenhosos possuem na ecologia de florestas tropicais e temperadas da Ásia, segundo Judd *et al.* (2009). A região do Pampa é um exemplo de comunidades dominadas pelas gramíneas, representando cerca de 24% da vegetação terrestre (SOUZA; LORENZI, 2012).

Dentre as subfamílias das gramíneas, destaca-se Bambusoideae, que se constitui a única grande linhagem a se adaptar e se diversificar em habitats florestais (CLARK; LONDOÑO; RUIZ-SANCHEZ, 2015). A subfamília possui um mesmo ancestral, e é dividida em três clados: sendo dois correspondentes aos bambus lenhosos, das tribos Bambuseae (de clima tropical) e Arundinarieae (de clima temperado), e um dos bambus herbáceos, da tribo Olyreae (BAMBOO PHYLOGENY GROUP, 2012; LONGHI-WAGNER, 2012). Com maior resistência estrutural, os bambus lenhosos são caracterizados pelos colmos geralmente lignificados, com entrenós ocos ou sólidos e com flores bisporangidas (SCHMIDT; LONGHI-WAGNER, 2009). Nessa tribo encontram-se colmos com diâmetro variando de alguns milímetros até 30 cm, e com altura de poucos centímetros até 40 m, segundo os autores. O ciclo de floração oscila em até 120 anos, sendo considerada cíclica no grupo dos bambus lignificados (JUDD *et al.*, 2009).

2.5.2 *Bambusa tuldoides* Munro

A tribo Bambuseae possui 66 gêneros, divididos em 784 espécies e classificados em 7 subtribos (BAMBOO PHYLOGENY GROUP, 2012). É a tribo mais amplamente distribuída de Bambusoideae, ocorrendo dos trópicos às áreas temperadas, mesmo com ocorrência de neve (SCHMIDT; LONGHI-WAGNER, 2009), sendo estudada desde o século XIX. Munro (1868) publicou uma monografia das representações dos bambus lenhosos conhecidos há época, descrevendo 170 espécies agrupadas em 21 gêneros (CLARK; LONDOÑO; RUIZ-SANCHEZ, 2015).

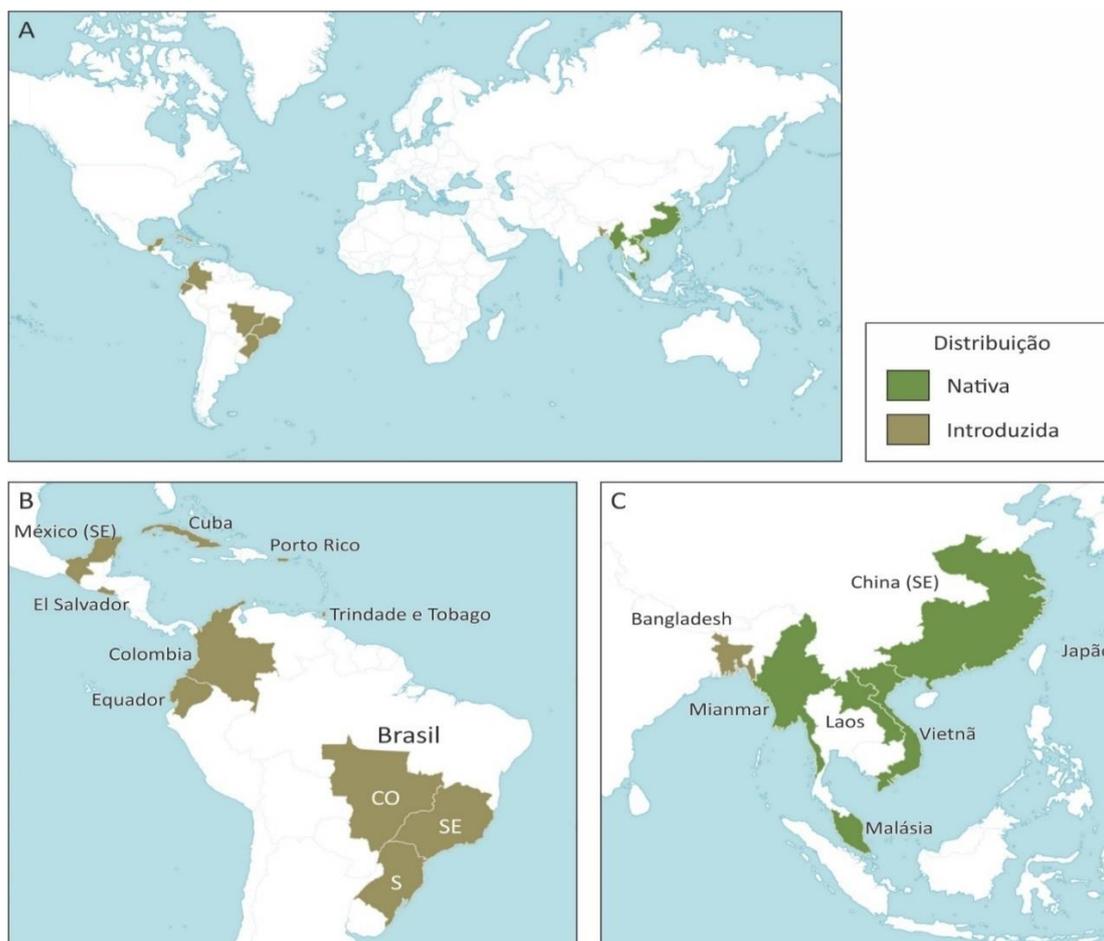
Um dos mais importantes gêneros dos bambus lignificados é *Bambusa*, com

aproximadamente 120 espécies (JUDD *et al.*, 2009). O gênero é considerado de larga distribuição, crescendo em florestas tropicais húmidas de baixa altitude ou em florestas montanhosas de até 1.500 m de altitude, tanto nos países asiáticos como americanos (CLARK; LONDOÑO; RUIZ-SANCHEZ, 2015). *Bambusa* é considerado o gênero de bambus mais difundido na Ásia tropical e subtropical, contendo diversas espécies introduzidas na América Central e do Sul, além de possuir importante papel econômico, segundo Clark, Londoño e Ruiz-Sanchez (2015).

No Rio Grande do Sul, uma das principais espécies exóticas cultivadas do gênero é *Bambusa tuldoides* Munro, de nome popular “taquaireira”, sendo cultivada como quebra-vento, além da utilização para a fabricação de cestos, objetos de uso doméstico, instrumentos musicais, além de serem utilizadas na produção de papel e em construções rústicas em áreas rurais como cercas e encanamentos (SCHMIDT; LONGHI-WAGNER, 2009; SMITH; WASSHAUSEN; KLEIN, 1981). Inicialmente descrita por Munro (1868), a espécie é nativa do sul da Ásia, no sudoeste da China, em Mianmar, Laos, Vietnã, além de regiões da Malásia e do Japão, conforme visto na figura 6 (EMONOCOT, 2016). Sua distribuição foi introduzida nas Américas Central e do Sul em regiões de países como El Salvador, Cuba, Porto Rico, Colômbia, Equador, Trindade e Tobago e sudeste do México. No Brasil, sua ocorrência dá-se principalmente nos estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (EMONOCOT, 2016).

Segundo Smith, Wasshausen e Klein (1981), *B. tuldoides* é considerada subarborescente, alcançando de 7 a 10 m de altura ou de 10 a 15 m, no Sul do Brasil. Os colmos são encontrados agregados, com espessura de 3 a 5 cm de diâmetro, lisos, glabros (ausência de pelos) e sem espinhos, segund os autores. Os nós são também glabros, de diâmetro um pouco maior, possuindo bainhas grandes e alongadas, lustrosas, de formato triangular e com cílios na base (SMITH; WASSHAUSEN; KLEIN, 1981). Os ramos são quase reunidos em feixes (subfasciculados), eretos e desiguais, *i.e.*, alguns são somente foliados e outros possuem, também, flores (SMITH; WASSHAUSEN; KLEIN, 1981). As folhas alcançam de 12 a 20 cm de comprimento e de 10 a 20 mm de largura, sendo glabras por cima e pouco pubescentes por baixo, sem nervuras evidentes, além de possuir bainhas justas e cilíndricas, com cílios finos no ápice (SMITH; WASSHAUSEN; KLEIN, 1981).

Figura 6 – Distribuição nativa e introduzida de *B. tuldoides*: (A) mundial; (B) Américas; e (C) Ásia.



FONTE: Adaptado de Emonocot (2016).

As inflorescências são sob forma de espiguetas sésseis, *i.e.*, sem a presença de um pedicelo (escapo floral, como um caule) ligando-as à base, possuindo de 25 a 30 mm de comprimento, e contendo de 4 a 8 flores (SMITH; WASSHAUSEN; KLEIN, 1981). As brácteas são desiguais e de formato ovado, quando as dimensões são maiores mais próximo ao escapo floral, com até 6 mm de comprimento (SMITH; WASSHAUSEN; KLEIN, 1981). O ciclo de floração de *B. tuldoides* foi estimado na América do Sul com duração de aproximadamente de 23 anos (GUERREIRO; LIZARAZU, 2010), contudo pode apresentar comportamentos diversos em condições ambientais diferentes. Segundo McClure (1966), conforme observado no sul da China, por exemplo, a morte de indivíduos seguiu imediatamente após a floração, ainda que poucas sementes fossem produzidas; por outro lado, indivíduos da mesma região que foram introduzidos em Honduras apresentaram uma floração mais consistente, sem diminuição aparente de seu aspecto vegetativo ou registro de morte.

A figura 7 apresenta imagens da distribuição de *B. tuldoides*. Na figura 7A a espécie é

observada de modo agrupado, devido à densa distribuição do rizoma. O rizoma é um sistema de caule-raiz, com crescimento horizontal subterrâneo, do qual propagam-se gemas que originarão novos colmos (LIESE; KÖHL, 2015; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013), vistos na figura 7B. A figura 7C apresenta detalhes das folhas (f) e bainhas (b) envolvendo os colmos nas regiões próximas aos nós.

Figura 7 – *Bambusa tuldoides*: (A) agrupamento; (B) colmos e (C) detalhes das folhas (f) e bainhas (b) envolvendo os colmos.



FONTE: Autor (2016).

As descrições taxonômicas³⁰ apresentadas permitem a identificação das características morfológicas, externas, essenciais das gramíneas (Poaceae), dos bambus lenhosos (Bambusoideae) e, particularmente, da espécie *B. tuldoides*. Uma vez conhecidas, essas características auxiliam o pesquisador tanto na identificação de espécies, quanto para estudos de preservação e, até, melhor utilização do material (PEREIRA; BERALDO, 2008; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). A seguir serão vistos os elementos da anatomia, *i.e.*, da estrutura interna (SCHULTZ, 1972), do caule da planta para a compreensão dos tecidos e células que contribuem para suas propriedades mecânicas, com vistas a estudos biônicos.

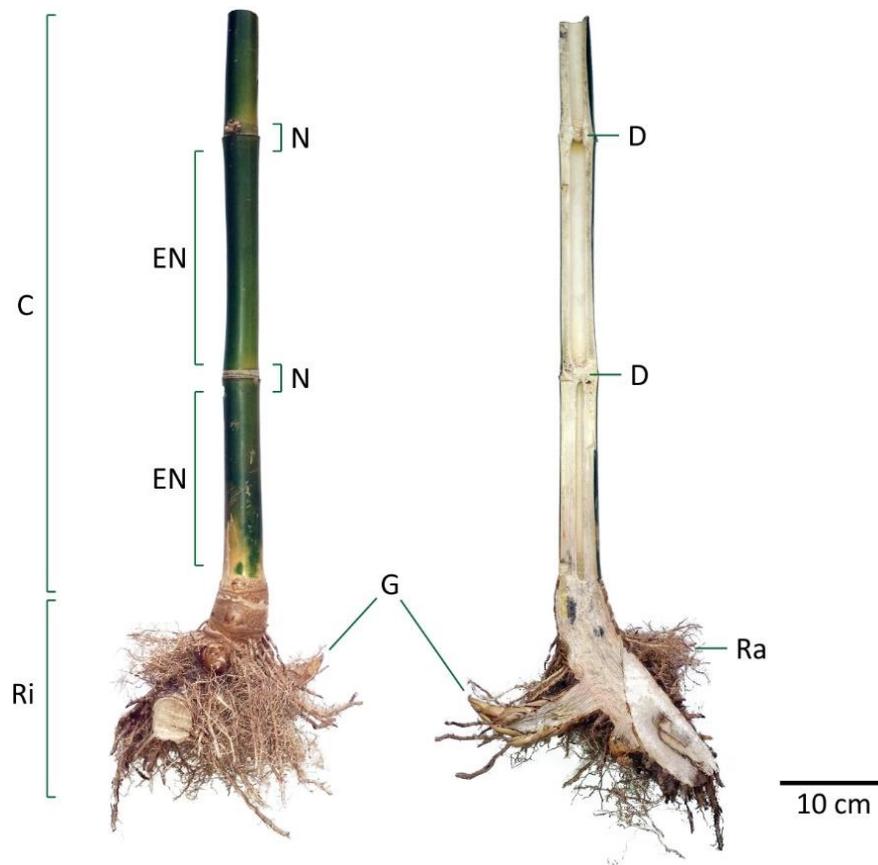
2.5.3 Anatomia estrutural do bambu

O bambu pode ser dividido na região subterrânea, correspondente ao rizoma (Ri), e na

³⁰ Taxonomia é a ciência que estuda a classificação de organismos por meio de caracteres morfológicos (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

região aérea, com o colmo (C), como visto na figura 8. A principal característica morfológica dos colmos, por sua vez, é a sua divisão em regiões de nó (N) e entre-nós (EN). As regiões dos entre-nós correspondem à parcela mais extensa do colmo, desenvolvendo-se verticalmente e possuindo seu interior oco. Nas regiões do entre-nós há apenas o transporte longitudinal de água e produtos da fotossíntese, ao contrário das regiões nodais, em que os elementos condutores movimentam-se transversalmente. Portanto, nessas regiões há a formação de seções transversais sólidas, chamadas de diafragmas (D).

Figura 8 – Morfologia básica do bambu (*B. tuldoides*), com detalhes do: (C) colmo; (Ri) rizoma; (EN) entre-nós; (N) nós; (G) gemas; (D) diafragma; e (Ra) raízes.



FONTE: Autor (2016).

Os colmos cilíndricos e ocos do bambu propiciam uma boa rigidez à planta, estudada pelos valores dos fatores de forma, aliada a uma baixa densidade (ASHBY, 2012). Contudo, conforme em demais tipos de estruturas tubulares, a falha mecânica pode ocorrer durante flexão do membro, iniciada pela ovalização da seção transversal. Wegst e Ashby (2007) avaliaram os modos de falha através da ovalização de tubos, utilizando o colmo do bambu como exemplo biônico. Os autores verificaram que os diafragmas agem como regiões de reforço

estrutural do caule da planta, *i.e.*, aumentando sua rigidez de modo a evitar a ovalização. A divisão dos colmos em regiões de nós e entre-nós permite, portanto, sua flexão em até um quarto de circunferência, sem ocasionar maiores danos à estrutura (WEGST; ASHBY, 2007).

Os caules subterrâneos, ou rizoma, são importantes estruturas reprodutivas, de modo que invadem áreas próximas e permitem o crescimento de novos ramos (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). Nos bambus, o sistema rizomático é bem desenvolvido, sendo estruturalmente considerado a fundação da planta (BANIK, 2015). Em *B. tuldoides*, o rizoma (figura 8, detalhe Ri) é do tipo paquimórfico ou simpodial, caracterizado por ser quase fusiforme³¹, curvado, sólido, com diâmetro maior que do colmo e possuindo raízes (figura 8, detalhe Ra) em suas regiões periféricas (McCLURE, 1966).

O desenvolvimento de novas colmos originados do rizoma, dá-se através de meristema apical e de gemas laterais (figura 8, detalhe G) dos rizomas (McCLURE, 1966). O meristema é um tecido considerado embrionário, *i.e.*, responsável pela produção de todos os outros tipos de tecidos, através da diferenciação (SCHULTZ, 1972). No seu desenvolvimento, as gemas jovens surgem como protuberâncias no solo, cobertas e protegidas por numerosas bainhas rígidas e de coloração frequentemente clara, formando as regiões rudimentares de todas as partes de um colmo maduro (BANIK, 2015). O crescimento ocorre basicamente pelo processo de alongamento gradual dos entre-nós, a partir da porção basal da gema até seu topo. O alongamento ocorre pelas zonas do meristema intercalar, localizado logo acima de cada nó, levando ao crescimento em comprimento dos eixos imaturos (BANIK, 2015; McCLURE, 1966).

Com o crescimento do colmo, ocorre a diferenciação celular abaixo do meristema apical para formar os feixes vasculares da planta (BANIK, 2015; FAHN, 1990). Os feixes vasculares são compostos pelo floema, condutor de alimento, pelo xilema, condutor de água e sais, além do esclerênquima e do parênquima (FAHN, 1990). O esclerênquima é o mais duro tecido vegetal, sendo formado por células delgadas e alongadas, mortas, com parede celular altamente lignificada (SCHULTZ, 1972). Já o parênquima é o tecido de preenchimento dos feixes vasculares e das demais regiões do caule da planta, sendo utilizado para o armazenamento de nutrientes, entre outros (BANIK, 2015).

Os tecidos dos feixes vasculares são produzidos diretamente pelo meristema apical,

³¹ As dimensões da seção são maiores no centro que nas extremidades (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

sendo chamados de xilema primário e floema primário (FAHN, 1990). O crescimento secundário, *i.e.*, com propriedades de espessamento³² do caule, como no caso das eudicotiledôneas, não ocorre no bambu, devido à ausência do câmbio vascular (FAHN, 1990). Desse modo, o rápido crescimento vertical dos bambus deve-se, tanto pela diferenciação do meristema intercalar, resultando o alongamento da região dos entre-nós, quanto pela ausência de crescimento secundário (McCLURE, 1966).

Uma das principais características das monocotiledôneas é a distribuição espalhada, ou esparsa (JUDD *et al.*, 2009) dos feixes vasculares no caule da planta, conhecida como atactostele. Na distribuição atactostele, os feixes vasculares são dispostos ordenadamente no estelo³³, sendo organizados em um gradiente transversal (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Assim, os feixes são menores e em maior número na região externa do colmo e maiores e mais dispersos na região interna (BANIK, 2015). Desse modo, devido à lignificação das paredes das células fibrosas, os bambus são gradualmente mais duros e resistentes nas regiões externas de seus caules (LIESE, 1998).

A distribuição atactostele dos feixes vasculares do bambu já foi explorada por diversos autores (ESTRADA; LINERO; RAMÍREZ, 2013; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; GOTTRON; HARRIES; XU, 2014; MA *et al.*, 2008; NOGATA; TAKAHASHI, 1995; WANG *et al.*, 2015; WEGST, 2011) como mais eficiente em termos de economia de material por resistência. Rich (1987), por exemplo, verificou que o padrão de distribuição gradiente dos feixes vasculares em palmeiras aumenta a sua rigidez à flexão (eq 7) por densidade em 2,5 vezes em comparação com árvores lenhosas uniformes. O mesmo desempenho foi verificado em outras plantas, como o bambu, e em compósitos sintéticos nos quais os processos produtivos inserem os materiais de reforço de maneira gradiente na matriz (WEGST, 2011). De modo semelhante, a distribuição também foi utilizada como inspiração no desenvolvimento de estruturas inovadoras por meio de biônica (MA *et al.*, 2008; ZHAO *et al.*, 2010; ZOU *et al.*, 2016), em que os modelos foram numericamente ensaiados para prever modos de falha em flambagem e em flexão.

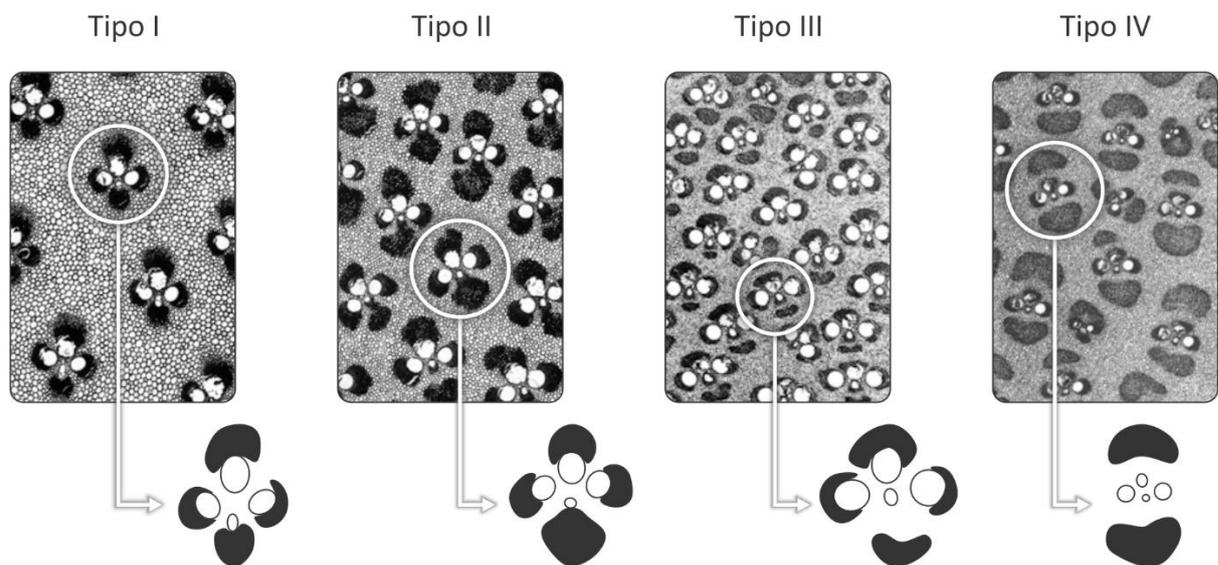
Os feixes fibrosos correspondem às calotas de esclerênquima nos elementos vasculares, e, para o bambu, podem ser divididos entre 4 tipos básicos (vistos, nos detalhes da figura 9, como as áreas hachuradas), variando conforme gêneros e espécies (LIESE, 1998). Os tipos I e

³² Processo de desenvolvimento transversal de caules e raízes, pelo aumento do diâmetro dos membros vegetais (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

³³ Estelo é a região interna dos caules plantas vasculares (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

II de feixe vascular constituem-se de uma única região próxima, com elementos vasculares (floema e xilema) protegidos por 4 feixes de fibras, sendo que no segundo tipo, um dos feixes é notavelmente maior. O tipo III constitui-se de 2 regiões mais isoladas, as quais uma com elementos vasculares envoltos por 3 feixes de fibras e a outra com apenas um feixe. Já o tipo IV possui 3 regiões separadas, sendo que os feixes fibrosos encontram-se separados dos elementos vasculares.

Figura 9 – Tipos de unidades de feixes vasculares no bambu, em micrografias com detalhes das fibras (áreas hachuradas) e dos elementos vasculares (áreas em branco).



FONTE: Modificado de Liese (1998).

Em qualquer um dos tipos de feixes vasculares, entretanto, é possível observar que as suas geometrias permanecem seguindo o mesmo padrão nas unidades adjacentes. Em termos estruturais, os feixes de fibras possuem tanto a função individual de proteger os elementos condutores internos de estrangulamentos, quanto à função coletiva de prover sustentação ao colmo da planta (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; McCLURE, 1966). Nesse sentido, as microgeometrias dos feixes vasculares fibrosos podem contribuir para as macropropriedades mecânicas do bambu, através do estudo dos seus fatores de forma (ASHBY, 2012). Essa abordagem permanece como outro ponto a ser verificado, para auxiliar na compreensão do desempenho estrutural do bambu.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos de observação tridimensional, caracterização, e análise numérica realizados no bambu, incluindo a preparação da amostra para cada análise. Em “estereoscopia e microscopia eletrônica de varredura” são apresentadas as primeiras análises de observação na amostra seccionada, incluindo o método utilizado de amolecimento de tecidos vegetais. No tópico “microtomografia computadorizada de Raios X” são mostradas as etapas de aquisição de imagens tomográficas, reconstrução 3D, segmentação, exportação e caracterização. Por fim, em “método dos elementos finitos” a análise numérica realizada é apresentada, tendo como base um modelo exportado a partir da reconstrução 3D das microtomografias.

3.1 Estereoscopia e Microscopia Eletrônica de Varredura

Nas etapas de caracterização de amostras de bambu, é essencial utilizar micrografias de seções do colmo do bambu, para se obter informações dos tecidos constituintes da planta, incluindo, por exemplo, a observação do grau de lignificação das paredes do esclerênquima e da morfologia dos feixes vasculares. Para isso, são necessários cortes lisos e sem danificações, para permitir boa observação e interpretação. Contudo, devido ao processo de incrustação, as regiões fibrosas do colmo tendem a ficar enrijecidas, dificultando um seccionamento liso e uniforme. Portanto, um método de amolecimento de tecidos lenhosos é necessário.

3.1.1 Preparação da amostra

Uma amostra madura, *i.e.*, já com considerável nível de lignificação, de *B. tuldoides* foi recolhida no município de Tapes, no Rio Grande do Sul. A região escolhida da amostra corresponde à posição superior do entre-nós, próxima ao nó basal, localizada a aproximadamente 50 cm do solo. Inicialmente a planta foi serrada próxima à região nodal escolhida, resultando em um formato cilíndrico com cerca de 30 mm de diâmetro e 10 mm de altura, para remoção de uma região de interesse. Uma região retangular foi seccionada e submersa em etilenodiamina (10% v/v em água) por 7 dias para amolecimento geral dos tecidos. O método de amolecimento de tecidos vegetais lignificados com etilenodiamina foi

inicialmente apresentado por Kukachka (1977), para a preparação de amostras de madeira. O método também foi verificado como muito eficiente para demais amostras vegetais não lenhosas (CARLQUIST, 1982). Esse procedimento permitiu um corte liso da amostra transversal e longitudinal, com o uso de uma lâmina de aço inoxidável.

Após lavagem em água, a amostra foi colocada em etanol 50% (em água) por uma hora, sendo transferida para etanol 70% por mais uma hora. A amostra foi, então, embebida utilizando 2,2-dimetoxipropano por 24 horas, como um método intermediário no processo de secagem. O 2,2-dimetoxipropano reage rapidamente com a água da amostra para formar metanol e acetona que, por serem voláteis, evaporam em um processo endotérmico (ERLEY, 1957). Por fim, a amostra foi mantida em uma cabine dessecadora com sílica-gel por 2 dias, para término de secagem. As dimensões finais da amostra foram de, aproximadamente, 5,4 (C) x 4,8 (L) x 4,5 (A) mm. O protocolo de amolecimento e secagem da amostra foi realizado no Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg) do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IB/UFRGS).

3.1.2 Estereoscopia

Após o protocolo de amolecimento, secionamento e secagem, a amostra foi previamente observada no estereoscópio SZX16 (Olympus® Corp., Tóquio, Japão), localizado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM), da Escola de Engenharia da UFRGS (EE/UFRGS). A disposição gradiente e a morfologia dos feixes vasculares, em especial do esclerênquima, foram observadas.

3.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A mesma amostra foi também observada em microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o equipamento TM3000 (Hitachi® High-Technologies Corp., Tóquio, Japão), localizado no LdSM. O equipamento opera em baixo-vácuo, portanto não necessita de metalização ou outros tipos de revestimento. A aceleração de feixe de elétrons utilizada foi de 15 keV com ampliações de até 2.500 X. Além da distribuição dos feixes vasculares, a lignificação e consequente redução do lume das células do esclerênquima foram observadas.

3.2 Microtomografia Computadorizada de Raios X

Para visualização 3D do bambu, de modo não-invasivo, foi conduzido um ensaio de microtomografia computadorizada de Raios X. O equipamento utilizado foi o Xradia® 510 Versa (Carl Zeiss® X-Ray Microscopy, Inc., Pleasanton, CA, EUA), localizado no Grupo de Microscopia Digital e Análise de Imagens da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (MicDigi/PUC-Rio), visto na figura 10. O equipamento utiliza magnificação óptica com o uso de objetivas de 0,4 até 20 X.

Figura 10 – Microtomografia computadorizada: (A) equipamento Xradia® 510 Versa e (B) detalhe do interior.



FONTE: Autor (2016).

O ensaio foi realizado na mesma amostra observada via MEV, após o protocolo de amolecimento, secagem e seccionamento. A realização do ensaio visou à observação morfológica

dos feixes vasculares na planta, bem como posterior segmentação e exportação para análises quantitativas e numéricas.

3.2.1 Aquisição de microtomografias

Com a intenção de facilitar a posterior segmentação e análises, os parâmetros foram ajustados de modo a aumentar o contraste entre as regiões sólidas das células (com maior densidade) e o lume (com menor densidade), bem como para reduzir o ruído excessivo das imagens finais. Nesse sentido, a tensão da fonte foi reduzida a valores próximos ao limite inferior do equipamento, ou 40 kV, para então ser ajustada conforme o tipo de amostra. Em seguida, a tensão foi gradualmente aumentada até a projeção tomográfica, na pré-visualização no *software* do equipamento, permitir a identificação das regiões de interesse: os feixes fibrosos e os elementos vasculares. A tabela 2 apresenta os parâmetros de aquisição de tomografias utilizados.

Tabela 2 – Parâmetros de aquisição de microtomografias.

Parâmetro	Valor
Tamanho do <i>voxel</i>	2,015 μm
Objetiva	4x
Tensão da fonte	80 kV
Potência da fonte	7 W
Número de projeções	1600
Tempo de exposição	1 s
Tempo total de aquisição	1h 06min
Filtro	LE1

FONTE: Autor (2016).

Por se tratar de uma amostra vegetal, com poucas diferenças de densidade entre as regiões constituintes, a potência do feixe também foi aumentada gradualmente, com base na pré-visualização do equipamento. Os valores finais da tensão e potência da fonte foram, respectivamente, 80 kV e 7 W. Optou-se por utilizar o filtro LE1 (*Low Energy*, ou baixa energia) à saída da fonte de Raios X para eliminar os raios de menor intensidade, que poderiam saturar o sensor nas regiões com as menores densidades. O valor padrão de tempo de exposição de 1 segundo foi mantido, a fim de evitar a superexposição de radiação no sensor. O processo de

aquisição resultou em 1600 projeções transversais distribuídas ao longo dos 360° de rotação. O tamanho do *voxel*, ou resolução espacial obtido foi de 2,015 μm .

3.2.2 Reconstrução

Após a aquisição das microtomografias, foi seguido o processo de reconstrução. As tomografias foram combinadas para gerar um modelo tridimensional com base no algoritmo proprietário do equipamento. O modelo pode, então, ser exportado para arquivos de extensão DICOM, em um total de 991 fatias.

3.2.3 Ajustes, segmentação e análise

Os arquivos das tomografias foram carregados no *software* de código aberto FIJI/ImageJ (SCHINDELIN *et al.*, 2012), para serem ajustados antes da análise. Inicialmente, as fatias originais foram ajustadas com relação ao contraste, para melhor definir as regiões com material celular sólido do lume. O ruído das imagens também foi reduzido para facilitar a segmentação de cada região e posteriores análises. Após, as imagens foram exportadas e carregadas no *software* Mimics Research (Materialise®, Lovânia, Bélgica), localizado no Laboratório de Bio-Design da PUC-Rio, para segmentação. O processo consistiu na criação manual de máscaras, através da ferramenta *Multiple Slice Edit*, para as regiões correspondentes aos feixes de fibras do esclerênquima, ao xilema, ao floema e ao parênquima. O processo de segmentação automatizado, *i.e.*, por meio de valores de limite de cinza (*threshold*), não pode ser utilizado devido à ausência de diferença de densidade entre as regiões sólidas dos tecidos. Após a segmentação, cada região pode ser isoladamente reconstruída em 3D.

Baseando-se na reconstrução 3D, a forma da seção transversal dos feixes de fibras foi simplificada e parametrizada para ser analisada quanto à sua eficiência, conforme os fundamentos de biônica (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). Para tanto, a geometria, formada por duas calotas sólidas de feixes fibrosos, foi comparada com seções compostas por dois círculos sólidos e por uma elipse. As dimensões externas da seção dos feixes foram mantidas. A análise foi realizada com a determinação dos fatores de forma para cada seção, através da eq. 8. Os valores da área e do momento de inércia foram obtidos com o uso do *software* Inventor (Autodesk® Inc., San Rafael, CA, EUA). Para fins referenciais, de acordo com

Ashby (2012), as geometrias também foram comparadas com seções em forma de anel, quadrada e circular.

O processo de segmentação por valores de limite foi também utilizado para identificar as regiões compreendidas por material celular sólido, gerando uma nova máscara que isolasse as regiões do lume celular. As máscaras de cada região segmentada foram intersectadas com a máscara do material sólido, por meio da ferramenta *Boolean Operations* (operações booleanas) resultado em novas máscaras individuais. Esse processo permitiu a determinação da porosidade e, conseqüentemente, da densidade relativa do parênquima e do esclerênquima (eq. 1).

3.3 Análise por Elementos Finitos

Com a segmentação da microtomografia e a geração de sólidos individuais de cada elemento básico da anatomia do bambu, foram definidos os sólidos para análise numérica via análise por elementos finitos. Para a análise, a região do parênquima foi isolada dos demais elementos dos feixes, o xilema, o floema e o esclerênquima. Da mesma forma, também foi definida a região do esclerênquima, com base na segmentação. Apesar de ambos os tecidos apresentarem algum nível de porosidade, as regiões isoladas foram mantidas inteiramente sólidas, *i.e.*, desconsiderando os espaços do lume celular.

3.3.1 Exportação de malhas

Para transformar os modelos 3D em malhas discretizadas para exportação, as duas regiões foram combinadas no Mimics através da ferramenta *Wrap*, que organiza os contornos das geometrias para que as malhas coincidam, sem deixar espaços vazios. Os arquivos foram então discretizados em malhas volumétricas, através da exportação para a extensão de arquivo de modelo INP. Essa extensão de arquivo é utilizada no *software* de análise de elementos finitos Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia® Corp., Providence, RI, USA), empregado nas análises. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Design Virtual (ViD) da EE/UFRGS.

A análise realizada baseou-se na reprodução de uma situação próxima à que uma amostra estaria sujeita em um ensaio real. Os eixos de coordenadas adotados foram o axial

(A), radial (R) e tangencial (T). Como o bambu comporta-se como uma estrutura do tipo cantiléver (NIKLAS, 1992), cada região do colmo tende a receber uma tensão de compressão ou tração, ao ser flexionado. Portanto, foi utilizada a força de compressão no modelo tridimensional. Além do desempenho linear das geometrias, com o uso de propriedades elásticas, a resistência à compressão axial do modelo foi estimada e comparada com ensaios da literatura, realizados com amostras reais de *B. tuldooides*.

3.3.2 Propriedades mecânicas

Os arquivos INP do parênquima e do esclerênquima foram importados no Abaqus/CAE e inseridos em uma montagem. A cada malha foram atribuídas propriedades constitutivas baseadas nos dados da caracterização 3D dos tecidos, a partir das imagens da μ CT. O parênquima foi configurado como isotrópico, devido à sua característica de espuma de célula fechada (DIXON; GIBSON, 2014), e suas propriedades de módulo elástico e resistência à compressão axial foram definidas a partir das equações 2 e 5, respectivamente, utilizando os valores de densidade relativa. Já à malha do esclerênquima, foram atribuídas propriedades de um material ortotrópico, com módulo elástico no sentido axial e transversal e com resistência à compressão baseadas nas equações 3, 4 e 6, respectivamente, também com dados da caracterização. Os coeficientes de Poisson adotados para o parênquima e o esclerênquima foram de 0,4 e 0,22, respectivamente, baseados em ensaios de nanoindentação (HABIBI *et al.*, 2015).

3.3.3 Condições de contorno

As condições de contorno também foram definidas com base na reprodução de uma situação real para a amostra. Nesse sentido, os nós laterais das malhas foram restringidos em movimento transversal, permitindo cada região a se deslocar apenas axialmente; nos referenciais do Abaqus/CAE, a restrição utilizada foi $U_T = U_R = 0$, sendo que U_T representa o deslocamento no sentido tangencial na amostra (no eixo X) e U_R no sentido radial (eixo Y). Já os nós inferiores das malhas foram restritos em movimentação axial (eixo Z, referencial $U_A = 0$) e em rotação sob os eixos tangencial e radial (referencial $UR_T = UR_R = 0$).

A aplicação da solicitação foi baseada, inicialmente, em uma regra das misturas,

utilizando os valores de resistência à compressão axial de cada material, ponderados pelos seus respectivos volumes relativos na amostra. A carga foi inserida como *Uniform pressure* (pressão uniforme) no *software*, de modo que um valor fixo, dado em MPa, é distribuído uniformemente sobre toda região selecionada. Além das propriedades constitutivas não-lineares aplicadas nas geometrias (resistência à compressão), a não-linearidade geométrica também foi ativada para a análise.

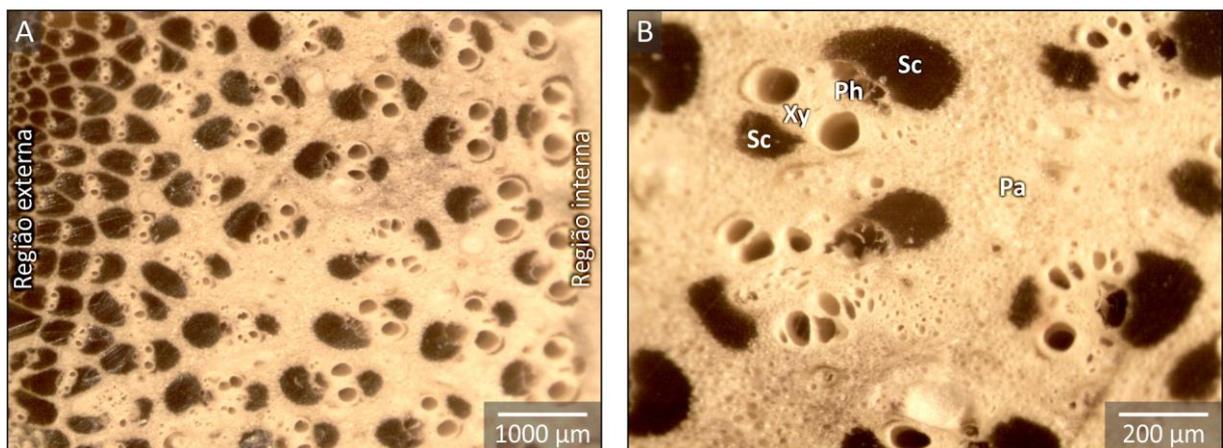
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussão relacionados com a caracterização 3D e a análise numérica do bambu (*B. tuldooides*), baseando-se em imagens tridimensionais de microtomografia computadorizada. Os resultados correspondem à finalização da etapa de Análise, da metodologia de design por meio do estudo de biônica proposta por (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005).

4.1 Caracterização superficial

A figura 11 apresenta micrografias de luz da seção transversal da amostra de *B. tuldooides*, apresentando a organização radial dos feixes vasculares. Os feixes encontram-se distribuídos de maneira gradiente, sendo mais numerosos, com dimensões menores e mais agrupados na região externa, e maiores e mais espaçados na região interna (figura 11A). Na magnificação da figura 11B são mostrados os elementos que constituem uma unidade de feixes vasculares da planta. A porosidade, ou lume, do parênquima (figura 11B, detalhe Pa) pode ser observada pelo aspecto de espuma, contudo tanto o xilema (detalhe Xy) quanto o floema (detalhe Ph) apresentam-se com lume visualmente maior.

Figura 11 – Micrografias de luz da seção transversal do bambu, mostrando o (A) distribuição gradiente dos feixes vasculares, da região interna à externa, e (B) ampliação dos elementos constituintes: xilema (Xy), floema (Ph), esclerênquima (Sc) e parênquima (Pa).



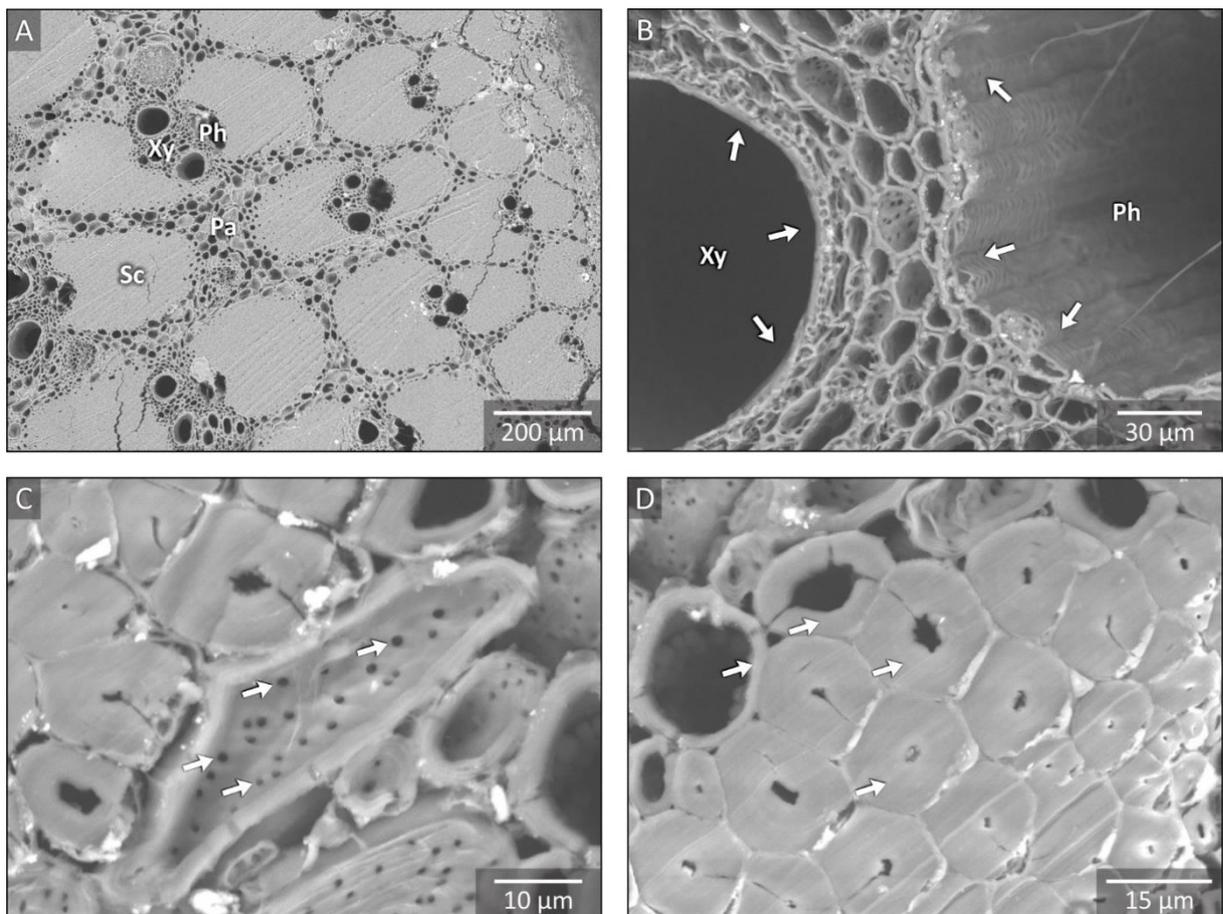
FONTE: Autor (2016).

A parede celular dos elementos condutores é consideravelmente mais frágil; em especial a parede do floema encontra-se totalmente dissolvida, *i.e.*, dissolvida pelo uso da

substância de amolecimento de tecidos rígidos, o etilenodiamina, descrito no tópico 3.1.1. O esclerênquima (figura 11B, detalhe Sc) pode ser observado pelo seu aspecto lenhoso, de coloração mais escura, derivado do processo de lignificação de sua parede celular.

Com o uso do protocolo de amolecimento, foi possível obter um corte transversal liso da amostra, ao passo que preservando sua morfologia, como pode ser observado nas micrografias eletrônicas de varredura da figura 12. Na figura 12A os elementos constituintes dos feixes de fibras são vistos, observando-se a maior densidade relativa (porosidade aparente) do esclerênquima (detalhe Sc) em comparação ao parênquima (detalhe Pa). Com maior detalhamento, é visto a dissolução da parede celular do floema (figura 12B, detalhe Ph), em comparação à do xilema (detalhe Xy).

Figura 12 – Micrografias eletrônicas de varredura da seção transversal do bambu, mostrando o (A) elementos dos feixes vasculares: xilema (Xy), floema (Ph), esclerênquima (Sc) e parênquima (Pa); (B) detalhe das paredes celulares do floema, dissolvida, e do xilema; (C) detalhe das pontoações celulares; (D) detalhe dos diferentes níveis de lignificação das paredes de células do esclerênquima.



FONTE: Autor (2016).

Na figura 12C é possível observar as cavidades (setas indicativas), denominadas de

pontoações celulares. Essas cavidades são formadas nas paredes celulares, e são utilizadas como interconexões celulares para a passagem de substâncias (FAHN, 1990). Na figura 12D as células do esclerênquima, ou fibras, são visualizadas em secionamento transversal. Os detalhes (setas) da figura indicam os diferentes níveis de espessamento das paredes secundárias, ocasionado pela incrustação de lignina, conforme o posicionamento e maturidade da célula, *i.e.*, quanto mais jovem, menos lignificada (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). Esse processo diminui consideravelmente o lume celular – levando à morte da célula – e aumentando sua densidade relativa. Conseqüentemente, o esclerênquima, como um todo, torna-se muito mais rígido, tanto em termos de dureza e propriedades elásticas individuais de cada célula, quanto na sua forma axialmente alongada no colmo da planta.

As imagens em microscopia de luz e eletrônica de varredura da superfície secionada da amostra poderiam ser utilizadas na caracterização volumétrica da mesma, com vistas a determinar informações sobre as propriedades dos tecidos constituintes. Através dessas imagens, é possível estimar a quantidade de região ocupada por cada elemento (parênquima, esclerênquima, xilema e floema), com base na área ocupada por cada região vistas na superfície aparente da seção. Além disso, a quantidade de lume e de material celular sólido, levando a dados sobre a porosidade e, conseqüentemente, densidade relativa, poderia ser estimado pelas superfícies secionadas, do modo como foi realizado por alguns autores (DIXON *et al.*, 2015; DIXON; GIBSON, 2014; ESTRADA; LINERO; RAMÍREZ, 2013; FAISAL *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2012). Contudo, isso levaria a uma análise baseada somente na superfície da região secionada, desprezando-se as demais partes da amostra. Desse modo, uma técnica não-destrutiva, tridimensional e de alta resolução leva a uma caracterização volumétrica da amostra, com um maior detalhamento de todas as suas regiões.

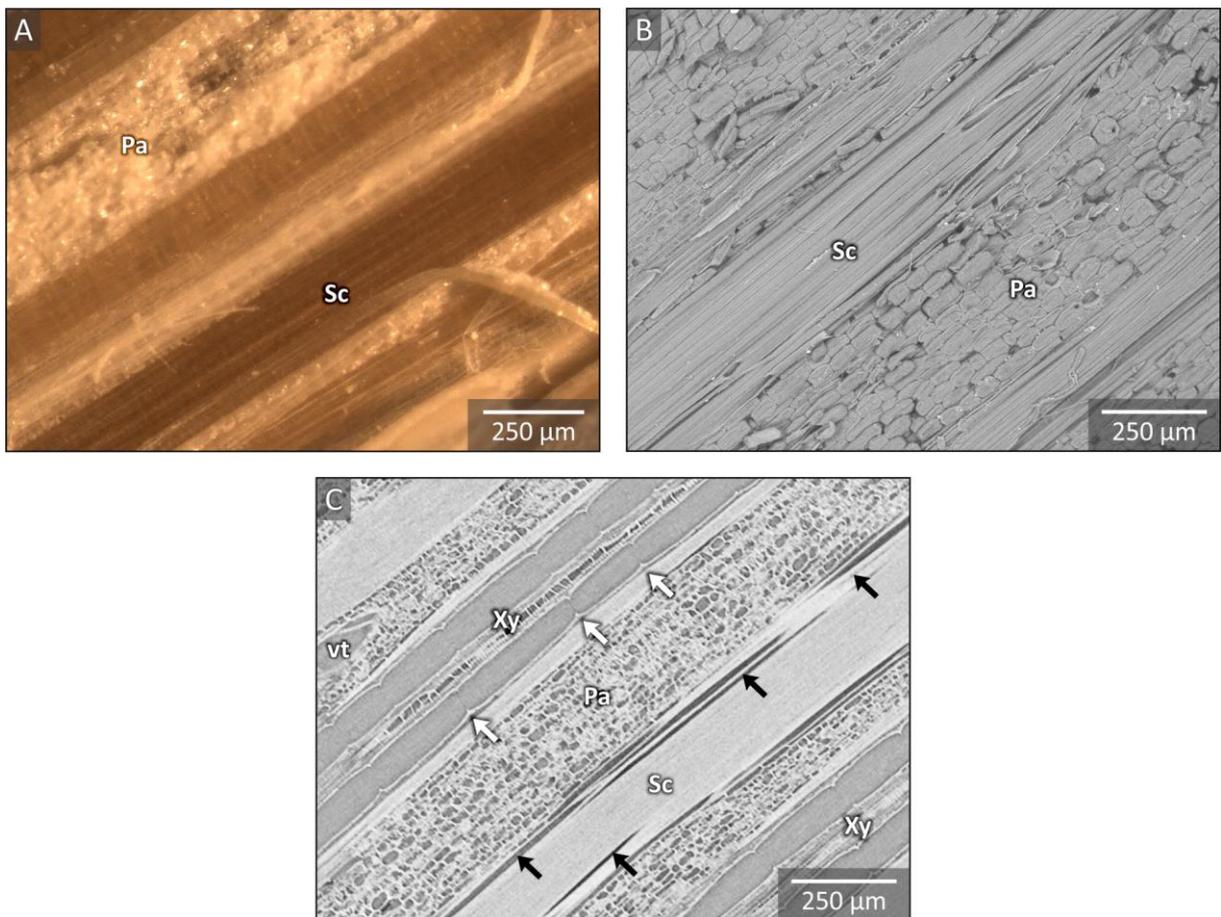
4.2 Caracterização volumétrica

Após a reconstrução e exportação das microtomografias, as imagens em formato DICOM foram carregadas no *software* FIJI/ImageJ, antes da segmentação e caracterização. O objetivo foi melhorar a qualidade das imagens, através da redução do nível de ruído e aumento do contraste, ao passo que mantendo os contornos das estruturas.

Uma das principais vantagens da microtomografia para análise microestrutural de materiais é a capacidade de permitir o secionamento virtual da amostra, em qualquer direção.

Por se caracterizar como uma análise não-invasiva, ou não-destrutiva (HANKE *et al.*, 2016), a μ CT permite observar internamente a amostra sob qualquer ângulo. Nesse sentido, a figura 13 apresenta um comparativo de visualização de uma seção longitudinal da amostra de bambu, por meio de técnicas invasivas e não-invasivas.

Figura 13 – Comparação dos métodos invasivos e não-invasivos no seccionamento longitudinal do bambu, através de observação por: (A) microscopia de luz, (B) MEV, e (C) μ CT; com identificação do parênquima (Pa), esclerênquima (Sc), xilema (Xy) e traços vasculares (vt); e detalhes das placas de perfuração (setas claras) e do lume celular das fibras (setas escuras).



FONTE: Autor (2016).

As figura 13A e B mostram um seccionamento longitudinal da amostra observado por microscopia de luz e eletrônica de varredura, respectivamente. Nota-se que, apesar do protocolo de amolecimento de tecidos permitir um corte liso, as regiões do parênquima (detalhe Pa) e esclerênquima (detalhe Sc) apresentam-se danificadas. Por outro lado, na micrografia da figura 13C, oriunda de μ CT, apresenta um seccionamento longitudinal sem qualquer tipo de dano à amostra. Além da clara identificação das regiões mais rígidas, como do parênquima e esclerênquima, a técnica permite a observação bem definida dos traços vasculares (detalhe

vt) e do xilema (detalhe Xy). O seccionamento longitudinal virtual da μ CT possibilita, ainda, a visualização das regiões de encontro longitudinal dos elementos de vaso (detalhes das setas claras), denominada placa de perfuração do tipo simples (FAHN, 1990). Essas regiões equivalem-se às pontoações da célula do parênquima, vistas na figura 12C, permitindo livre movimentação de água, de célula para célula.

Além dos detalhes das células dos elementos condutores, o seccionamento longitudinal permite a observação das regiões dos lumes das fibras, na figura 12C. Essas regiões são identificadas por meio das cavidades em formato alongado no sentido do esclerênquima, posicionadas próximo ao parênquima (detalhadas nas setas escuras). A imagem revela que consideravelmente lignificadas, as células fibrosas possuem regiões com níveis menores de incrustação na periferia dos feixes, próximo ao parênquima, como visto, também, pela micrografia transversal da figura 12D.

4.2.1 Segmentação

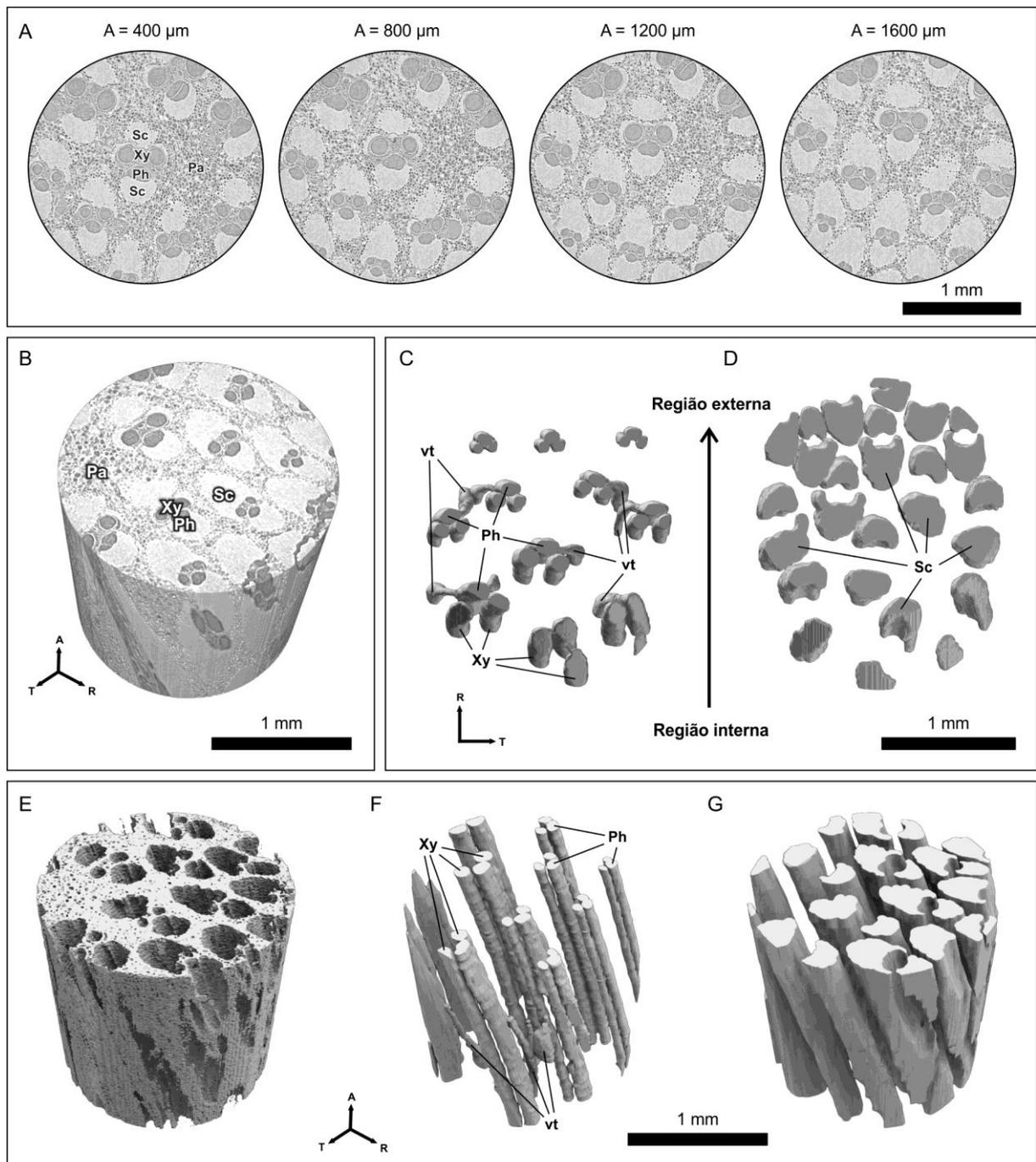
Após o ajuste de ruído, as imagens foram carregadas no Mimics, para segmentação manual. O processo de reconstrução no *software* é visto na figura 14. A série de seções transversais circulares indicam que a morfologia dos feixes vasculares permanece aproximadamente constante, com o incremento da posição axial da fatia, com valores de 400 a 1600 μ m (figura 14A). A reconstrução 3D da região total do ensaio de microtomografia é vista na figura 14B, com um formato cilíndrico de 2 mm de diâmetro e de altura.

As regiões segmentadas dos elementos vasculares (figura 14C) e dos feixes fibrosos (figura 14D) permitem observar a movimentação axial do xilema (detalhe Xy) e do floema (detalhe Ph), bem como os traços vasculares (detalhe vt) conectando feixes adjacentes. Na amostra analisada, é verificado que os traços movimentam-se entre os feixes de fibras, próximo às regiões dos floemas, em um processo denominado anastomose. A anastomose é uma ligação entre elementos condutores no caule (FAHN, 1990), de modo que com a ausência de movimento transversal, em virtude da região do entre-nós, os traços vasculares são a única forma não-axial de conexão entre feixes.

Na figura 14E é verificada uma imagem em perspectiva da região segmentada do parênquima, em que é observada a alta porosidade do tecido. O parênquima assemelha-se a uma espuma de célula fechada e lados curvilíneos, como definido na literatura (GIBSON;

ASHBY; HARLEY, 2010). Considerado o tecido de preenchimento, o parênquima envolve e circunda todas as regiões não ocupadas pelos elementos vasculares (figura 14F) e feixes do esclerênquima (figura 14G).

Figura 14 – Processo de reconstrução e segmentação 3D das microtomografias do bambu: (A) Seções transversais com variação na posição axial, com detalhe dos elementos dos feixes vasculares: xilema (Xy), floema (Ph), esclerênquima (Sc) e parênquima (Pa); (B) Reconstrução 3D; Vista axial de renderização 3D da região segmentada dos (C) elementos condutores, incluindo os traços vasculares (vt) e dos (D) feixes do esclerênquima; Vista em perspectiva das regiões segmentadas do (E) parênquima; (F) elementos condutores; e (G) esclerênquima. Coordenadas: A = Axial; T = Transversal; R = Radial.



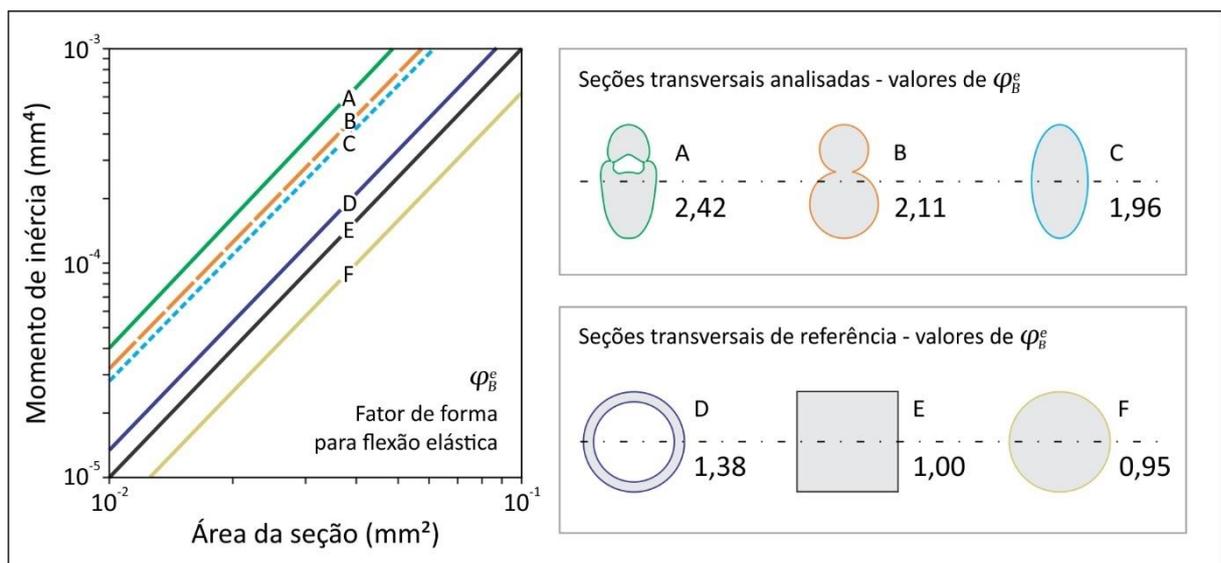
FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2016).

4.2.2 Análise de formas

Ao longo do eixo axial, as seções dos feixes fibrosos do esclerênquima apresentaram uma geometria uniforme, observado pelas figura 14D e G, e correspondendo de acordo com o tipo IV de feixes (figura 9), descrito por Liese (1998). Os feixes de fibras do bambu não apenas possuem a função de aumentar a resistência do colmo, mas também de proteger os elementos vasculares do estrangulamento ocasionado pela flexão do mesmo, prejudicando o fluxo de substâncias (McCLURE, 1966; NIKLAS, 1992).

As características funcionais dos feixes fibrosos podem ser derivadas das formas das duas calotas que envolvem os elementos condutores, levando a um acréscimo na rigidez do colmo do bambu, como um todo. Desse modo, para verificar o desempenho da geometria, a figura 15 apresenta a determinação do fator de forma φ_B^e , definido pela eq. 8, da seção transversal dos feixes fibrosos parametrizados do bambu (seção A). A seção parametrizada foi comparada com duas seções comumente utilizadas em estudos biônicos da distribuição gradiente dos feixes do bambu (MA *et al.*, 2008; ZOU *et al.*, 2016). A primeira seção comparada corresponde a duas circunferências (seção B), representando cada uma das calotas de fibras do esclerênquima. Já a segunda seção representa a união dessas formas através de uma única elipse (seção C).

Figura 15 – Fator de forma para flexão elástica φ_B^e , definido como a relação entre o momento de inércia e a área de seções transversais analisadas (A, B e C) e de referência (D, E e F).



FONTE: Autor (2016).

Os valores de φ_B^e analisados correspondem à flexão no sentido radial de orientação real dos feixes no colmo do bambu, como vistos na figura 14D. Desse modo, um movimento de flexão no colmo da planta leva a flexões isoladas em cada um dos feixes de fibras. Esse movimento de curvatura isolado ocorre sob um eixo tangencial ao colmo da planta e, conseqüentemente, o eixo corresponde à lateral do feixe, *i.e.*, a região de menor dimensão da seção transversal. Na figura 15, o eixo de flexão é representado pela linha de traço e ponto, posicionada sobre todas as seções transversais.

A relação entre a área da seção A^2 e seu momento de inércia I , segundo a eq. 8 e plotados em escala logarítmica, mostra que a geometria dos feixes fibrosos do bambu (seção A) apresenta o maior valor de φ_B^e dentre as três seções analisadas, com dimensões externas semelhantes. Isso significa que a morfologia da seção dos feixes do bambu também influencia o seu desempenho e eficiência. Desse modo, para uma mesma área de seção transversal e, conseqüentemente, mesma quantidade de material, os feixes do bambu apresentam um maior momento de inércia, *i.e.*, uma maior rigidez no sentido radial da planta. Por comparação, o valor de φ_B^e utiliza uma seção quadrada como referência, levando ao valor de $\varphi_B^e = 1$ para a mesma (ASHBY, 2012).

4.2.3 Análise microestrutural

Com os resultados da microtomografia foi possível determinar as propriedades constitutivas dos tecidos avaliados, através dos valores da densidade relativa (ρ^*/ρ_S). Esses, por sua vez, foram obtidos através da eq. 1, a partir dos dados da porosidade (φ) individual de cada região segmentada. O valor de φ corresponde, então, ao volume relativo do lume de cada tecido (V_V/V_R , na eq. 1). Comparando-se às células parenquimáticas, as do esclerênquima apresentam muito menos lume, como visto nas figuras 12 e 13. Portanto, os valores resultantes da densidade relativa do parênquima e do esclerênquima foram de 0,274 e 0,907, respectivamente; compatíveis com os dados apresentados por Dixon e Gibson (2014).

A combinação das características 3D das células parenquimáticas analisadas valida o tecido para ser matematicamente modelado como uma espuma com células fechadas e paredes celulares curvas (DIXON; GIBSON, 2014; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Do mesmo modo, a caracterização volumétrica 3D do esclerênquima e do parênquima leva a uma estimativa mais precisa das suas propriedades mecânicas, através dos valores da densidade relativa. Desse

modo, os valores podem ser determinados de modo mais apropriado para a análise numérica, visando à previsão da resistência à compressão axial do modelo 3D.

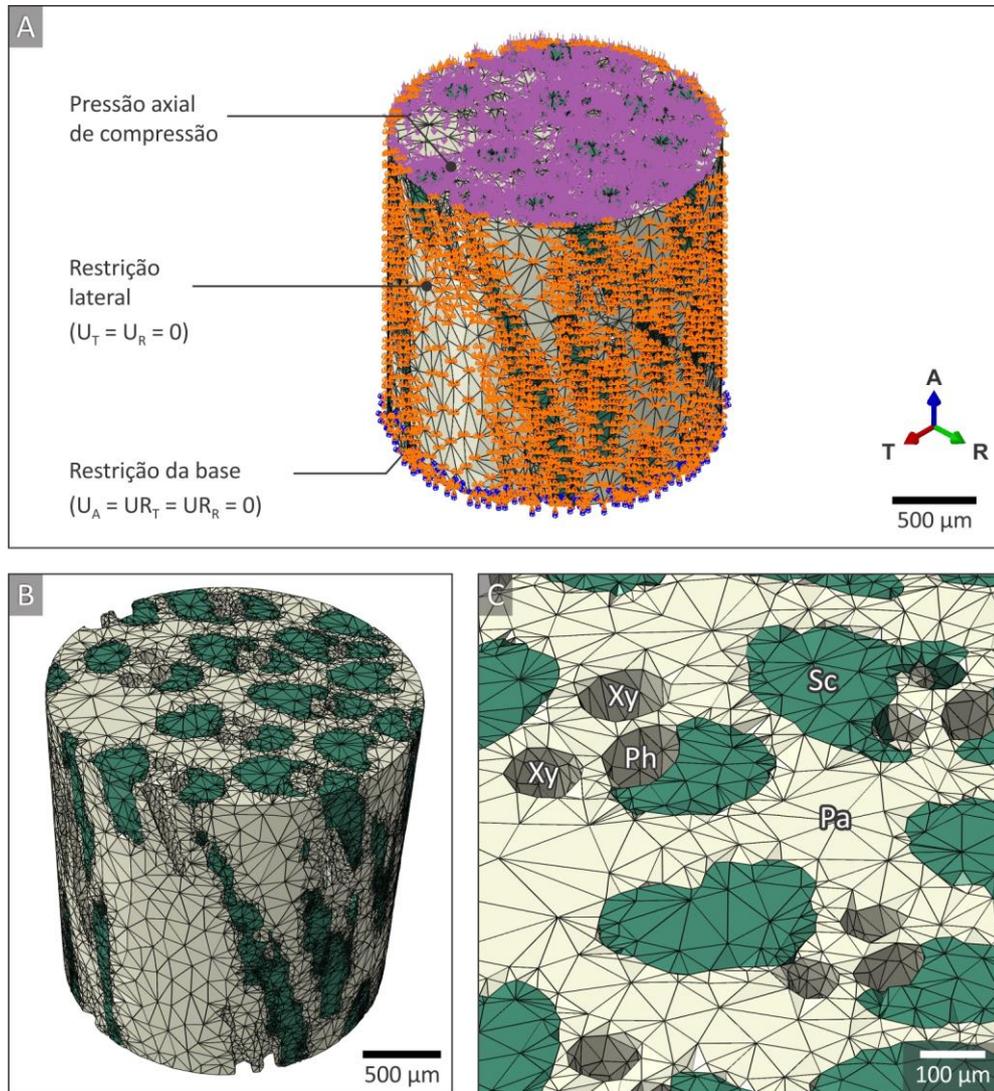
4.3 Análise numérica

As malhas utilizadas na análise de elementos finitos priorizaram a forma tridimensional do esclerênquima e dos elementos de condução, baseado na segmentação da μ CT da amostra de *B. tuldoides*. As geometrias das malhas foram mantidas sólidas para ambos os tecidos, *i.e.*, desconsiderando o lume celular. Isso se deve ao excesso de elementos e nós que seriam necessários para discretizar uma estrutura porosa/celular como o bambu, levando a um esforço computacional muito maior. Nesse sentido, os valores das propriedades mecânicas aplicadas nas geometrias discretizadas já levam em consideração as suas características celulares naturais. A figura 16 apresenta o modelo discretizado da amostra para a análise.

A figura 16A mostra as condições de contorno da análise com o objetivo de simular uma situação de compressão real a qual a amostra estaria sujeita, considerando sua localização no colmo do bambu. As setas de cor roxa indicam a pressão de compressão axial aplicada no modelo, até a convergência para a resistência à compressão da estrutura. Todos os nós laterais, nos sinais laranjas, foram limitados à movimentação axial (U_A), impedindo o translado radial e tangencial, no plano transversal ($U_T = U_R = 0$). Os nós do lado oposto à pressão aplicada, na base do modelo (indicado por sinais azuis) foram restringidos na rotação sobre os eixos radial e tangencial, bem como na translação axial ($U_A = U_{R_T} = U_{R_R} = 0$).

Aproximadamente 290.000 elementos tetraédricos (tipo C3D4) e 60.000 nós foram utilizados para discretizar o modelo de montagem, com as regiões do esclerênquima e do parênquima (figura 16B). As propriedades constitutivas foram aplicadas nas regiões do parênquima (figura 16C, detalhe Pa) e esclerênquima (detalhe Sc), baseando-se nos dados da caracterização volumétrica da (ρ^*/ρ_S) e nas equações 2, 3, 4, 5 e 6. Desse modo, o parênquima foi definido como isotrópico com módulo elástico $E_P = 2,989 \text{ GPa}$. Já o esclerênquima foi configurado como ortotrópico, com módulo na direção axial $E_{A_{Sc}} = 36,106 \text{ GPa}$ e na direção transversal $E_{T_{Sc}} = 10,316 \text{ GPa}$. A resistência à compressão axial definida para o parênquima foi $\sigma_P = 20,32 \text{ MPa}$ e para o esclerênquima foi $\sigma_{Sc} = 224,98 \text{ MPa}$.

Figura 16 – Análise numérica no modelo 3D da microtomografia do bambu: (A) carga axial e condições de contorno, onde A = axial, R = radial e T = transversal; (B) modelo discretizado com elementos tetraédricos; (C) detalhe das malhas do esclerênquima (Sc) e do parênquima (Pa), com as regiões do lume do xilema (Xy) e floema (Ph).



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2016).

4.3.1 Limite de resistência à compressão

Uma regra das misturas foi utilizada para estimar a falha pela resistência à compressão axial do modelo de montagem, como um referencial inicial para a pressão aplicada na estrutura, no Abaqus/CAE. O valor foi determinado com a soma dos valores de σ_P e σ_{Sc} , ponderados com base nos respectivos volumes relativos, como proposto por Dixon e Gibson (2014). As resistências σ_P e σ_{Sc} levam em consideração os valores de densidade relativa, contudo os volumes utilizados correspondem às regiões totais dos tecidos, incluindo os espaços vazios do lume celular, que não apresentam uma contribuição estrutural. Portanto, os valores utilizados

dos volumes dos tecidos, na regra das misturas, também foram multiplicados pelas respectivas densidades relativas. As demais regiões correspondem aos elementos condutores, cuja geometria do lume já foi removida do modelo discretizado do parênquima (figura 16C). Assim, as contribuições de resistência do parênquima e do esclerênquima foram determinadas em 3,23 MPa e 63,90 MPa, respectivamente. Portanto, uma pressão uniforme de 67,13 MPa foi inserida no modelo de montagem.

A análise inicial falhou com a pressão estimada de referência com a regra das misturas, indicando um incremento máximo de carga de 0,3747 representado pelo valor de *Total Time/Freq*. Na análise realizada, esse valor representa o incremento máximo suportado pelo modelo (incluindo geometria e propriedades constitutivas), sendo que o valor 1 seria equivalente à carga completa determinada.

Uma segunda análise foi conduzida utilizando-se como base o valor do incremento máximo multiplicado pela pressão inicial de referência, resultando em convergência do modelo para a resistência de compressão axial de 25,16 MPa, antes da falha dos tecidos. Esse valor é comparável aos encontrados na literatura com ensaios mecânicos de amostras reais, especificamente para *B. tuldoides*. But e Chia (1997) divulgaram um limite de 30,2 MPa para resistência à compressão de *B. tuldoides*. Janssen (1991) encontrou um valor de 35 MPa como tensão máxima de resistência à compressão para a espécie. Já Colli *et al.* (2007) descreveram um limite de resistência à compressão para a espécie de 39,5 MPa.

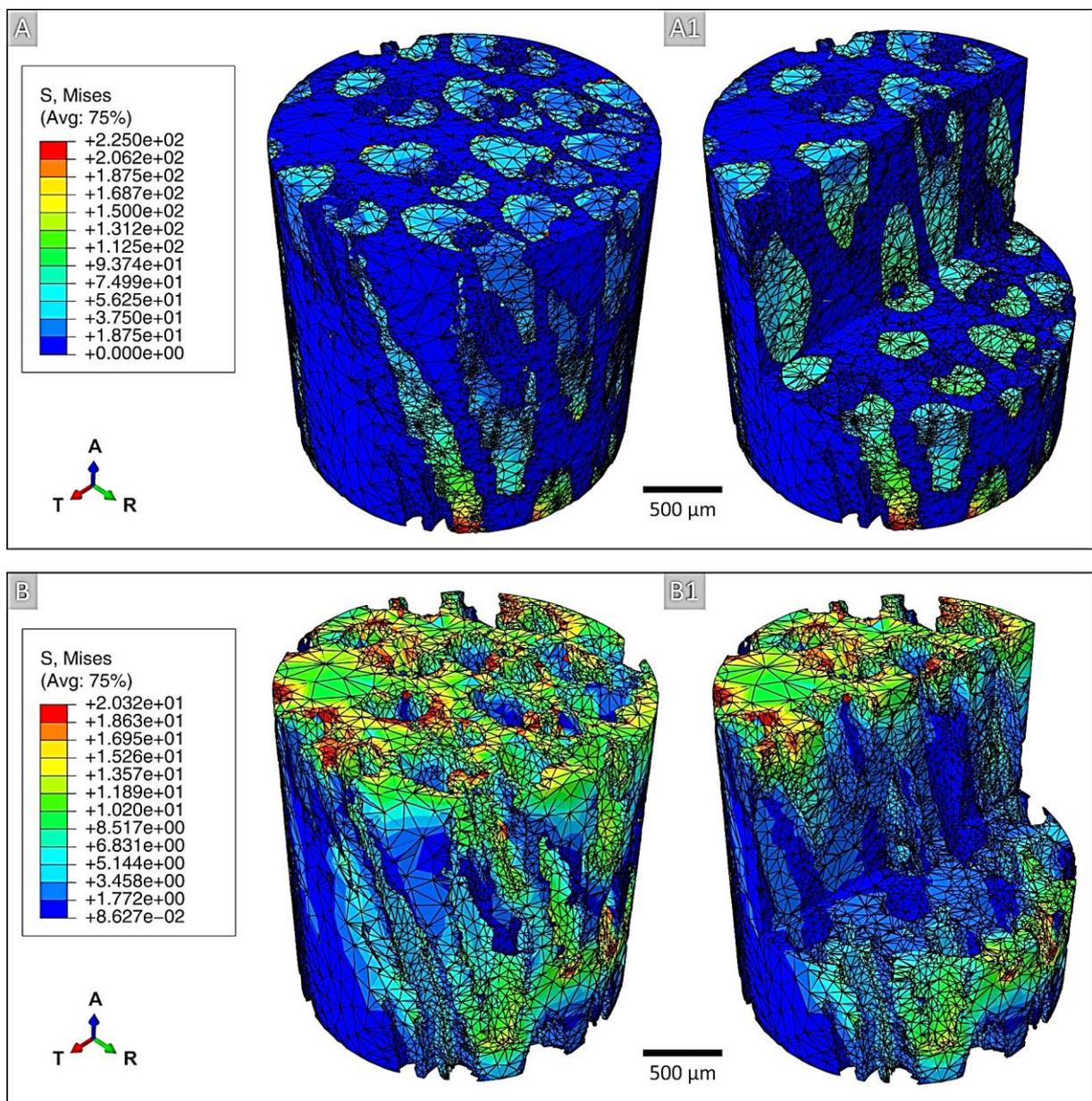
Ao analisar mecanicamente o bambu como um material natural, a variação dos valores de resistência à compressão reportados pelos autores (de 30,2 MPa a 39,5 MPa) deve-se a diversas variáveis, *e.g.*, a posição radial e localização axial da amostra no colmo da planta, a maturidade dos tecidos (grau de lignificação), os protocolos de secagem, etc. (COLLI *et al.*, 2007; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; NIKLAS, 1992). Os resultados obtidos com a análise foram, portanto, considerados condizentes com a escala de valor suportado pela espécie na literatura, indicando que o uso da regra das misturas para propriedades não-lineares (inelásticas) pode não ser uma estimativa precisa, devido à complexidade dos modos de falha para materiais compósitos (MALLICK, 1997).

4.3.2 Critérios de falha: esclerênquima e parênquima

O modelo discretizado da microtomografia foi definido, de modo simplificado, como um

elastoplástico, *i.e.*, contendo propriedades elásticas e valores máximos de compressão axial, representando um escoamento dos materiais. Desse modo, a falha do modelo foi delimitada pela falha individual das regiões do parênquima e esclerênquima, através dos limites de compressão atribuídos. A figura 17 apresenta as tensões von Mises da análise de elementos finitos com convergência dos limites dos materiais para a carga total de 25,16 MPa. A figura 17A e o detalhe A1 apresentam o modelo de montagem inteiro e com vista em corte, respectivamente.

Figura 17 – Tensões von Mises na falha por compressão axial do modelo discretizado do bambu a partir da micromotografia: (A) modelo de montagem inteiro e detalhe (A1) de vista em corte; (B) modelo do parênquima inteiro e detalhe (B1) de vista em corte.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2016).

Os modelos convergiram até os materiais atingirem os critérios de falha por limite elástico determinados pelos valores das resistências σ_P e σ_{SC} . Uma vez que a resistência à compressão para o parênquima é cerca de 10 vezes inferior à do esclerênquima, na figura 17A, a região do tecido de preenchimento aparece totalmente azulada, *i.e.*, com virtualmente nenhuma tensão. Conseqüentemente, a fim de visualizar as tensões von Mises no tecido, os elementos do esclerênquima foram removidos da visualização (com comando *Hide*), na figura 17B, com detalhe B1 de vista em corte. Essa opção automaticamente redefine a escala de valores máximos e mínimos para as tensões, de acordo com os elementos com visualização ativada.

O parênquima apresentou um comportamento típico de matriz, em uma analogia com materiais compósitos, ao tensionar todos os elementos de reforço das fibras de maneira quase uniforme, mesmo os que não possuíam contato direto com a pressão aplicada ou com as restrições de movimento. A maioria dos elementos internos do esclerênquima foram tensionados com, ao menos, cerca de metade dos valores de limite à compressão σ_{SC} ; contudo, resalta-se que todos os elementos foram estressados durante a análise. Diferentemente, os elementos periféricos da malha do parênquima alcançaram rapidamente o limite de resistência à compressão do material, enquanto que os internos permaneceram, na maioria, sem ser tensionados.

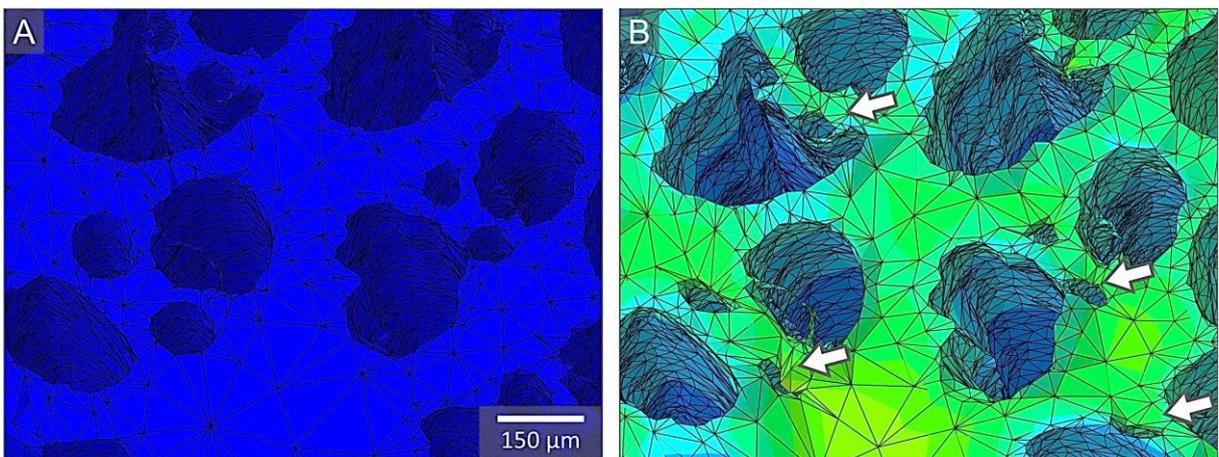
Utilizando a regra das misturas para o módulo elástico da montagem, seguindo o mesmo processo de ponderar pelos volumes e densidade relativos de cada tecido, obtém-se o valor de 13,1 GPa, comparável aos encontrados na literatura, para *B. tuldooides* (AHMAD, 2000; SHRESTHA; CREWS, 2014). Entretanto, é importante ressaltar que o limite de resistência à compressão do modelo discretizado foi cerca de 60% inferior ao estimado pela regra das misturas. Portanto, o uso da análise por elementos finitos em materiais naturais, como o bambu, pode se beneficiar das geometrias com alta resolução provenientes da discretização de um modelo gerado por microtomografia.

A dificuldade em se prever os limites de resistência à compressão no bambu, por meio de regra das misturas, pode estar relacionada à ausência da variável geométrica dos elementos constituintes. Esse fator, por outro lado, foi diretamente considerado na análise por elementos finitos. Como visto na análise dos fatores de forma (tópico 4.2.2), a geometria dos feixes de fibras representa uma contribuição microscópica às propriedades macroscópicas do colmo do bambu. Ao analisar um modelo discretizado originado de μ CT de alta resolução, as

formas dos reforços fibrosos encontram-se em uma escala maior, ressaltando sua contribuição à rigidez da montagem. Portanto, os projetos biônicos inspirados na anatomia do bambu devem levar em consideração não apenas a disposição gradiente dos feixes de fibras no colmo, mas, também, as geometrias individuais dos feixes fibrosos, aumentando sua eficiência.

A análise numérica buscou simular de um modo realista os efeitos da compressão axial no modelo discretizado do bambu, de modo a permitir ser comparado com resultados da literatura. Assim, foi considerada a representação de uma amostra seca, ou seja, sem a presença de material no interior do xilema ou floema; tal como seria representado em ensaios reais. Portanto, devido aos elementos condutores do bambu não terem água ou demais substâncias, os mesmos não tendem a oferecer resistência estrutural ao caule, durante a compressão. Isso leva ao efeito de estrangulamento local dos elementos, durante solicitações de compressão, vistos na figura 18.

Figura 18 – Efeito de estrangulamento dos elementos condutores na compressão axial do bambu, na Análise por Elementos Finitos, observado no modelo do parênquima somente: (A) modelo não tensionado e (B) modelo após o limite de compressão, com detalhe (setas) dos elementos condutores;



FONTE: Autor (2016).

Ainda que a análise tenha sido realizada em uma região do caule da amostra, os resultados obtidos foram representativos para comparação com ensaios em amostras reais da literatura. A análise por elementos finitos levou em consideração a geometria tridimensional realística obtida pela microtomografia, além das propriedades dos materiais determinadas com a caracterização no nível celular. Desse modo, fez-se necessário o uso da técnica não-invasiva e de alta resolução para se obter dados suficientes para condução da

análise numérica. Portanto, uma vez conhecidos os valores da densidade relativa dos tecidos constituintes do bambu, é possível aplicar a abordagem proposta de análise numérica em um modelo discretizado de μ CT em outras espécies de bambu, bem como em demais amostras de plantas com característica estrutural.

5 DESIGN DE ESTRUTURAS BIÔNICAS

A caracterização do bambu baseada em modelos 3D obtidos por microtomografia computadorizada de Raios X revelou uma estrutura organizada como um compósito natural, com uma matriz celular e reforços distribuídos de maneira gradiente, do interior ao exterior do colmo. Esses estudos corresponderam à etapa de “Análise” na metodologia de design por meio de biônica (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005), onde permitem a geração de conhecimento técnico sobre o funcionamento estrutural da planta, para ser aplicada no design de produto.

Os resultados da análise por elementos finitos do parênquima mostraram-no como um tecido vegetal com importante função na resistência estrutural da planta, de modo a agir como uma matriz ao tensionar todos os feixes de fibras. Desse modo, mesmo com uma pressão aplicada de modo local no caule e possuindo propriedades mecânicas de magnitude inferior (módulo elástico e resistência à compressão), o parênquima distribuiu as solicitações para o esclerênquima ao longo do modelo. Entretanto, a influência de uma matriz parenquimática ainda não foi explorada em estruturas bioinspiradas no bambu, de modo que apenas a disposição gradiente do esclerênquima foi considerada.

Outro fator verificado com contribuição na rigidez do bambu é a morfologia individual dos feixes vasculares fibrosos da planta. O formato da seção das calotas do esclerênquima mostrou-se mais eficiente em solicitações de flexão, no sentido radial do colmo da planta, em comparação com seções circulares ou elípticas, convencionalmente utilizadas em modelos biônicos (Figura 15). Da mesma forma que a presença de uma matriz parenquimática, com característica de espuma de células fechadas, o uso de elementos de reforço com geometrias mais próximas às dos feixes fibrosos do bambu ainda não foi estudado em estruturas bioinspiradas no bambu.

Nesse sentido, esse capítulo trata da etapa de “Aplicação” na metodologia de design seguida por estudo de biônica. São realizados o desenvolvimento, prototipagem e a análise numérica de duas estruturas biônicas, incluindo ambos os aspectos mencionados, em comparação com uma terceira estrutura da literatura. Na seção “modelagem e condições de contorno” são apresentadas as geometrias das estruturas cilíndricas desenvolvidas e os parâmetros de impressão FDM e da análise por elementos finitos realizada. Em “seleção de materiais e propriedades constitutivas” são mostradas as etapas de escolha de materiais apropriados

para o desenvolvimento de modelos biônicos, com base nos resultados de caracterização e análise anteriores. Por fim, no tópico “prototipagem e análise por elementos finitos” são apresentados os *mock-ups* prototipados e é realizada a análise e comparação, em termos de carga suportada e eficiência de material, das estruturas desenvolvidas.

5.1 Modelagem e condições de contorno

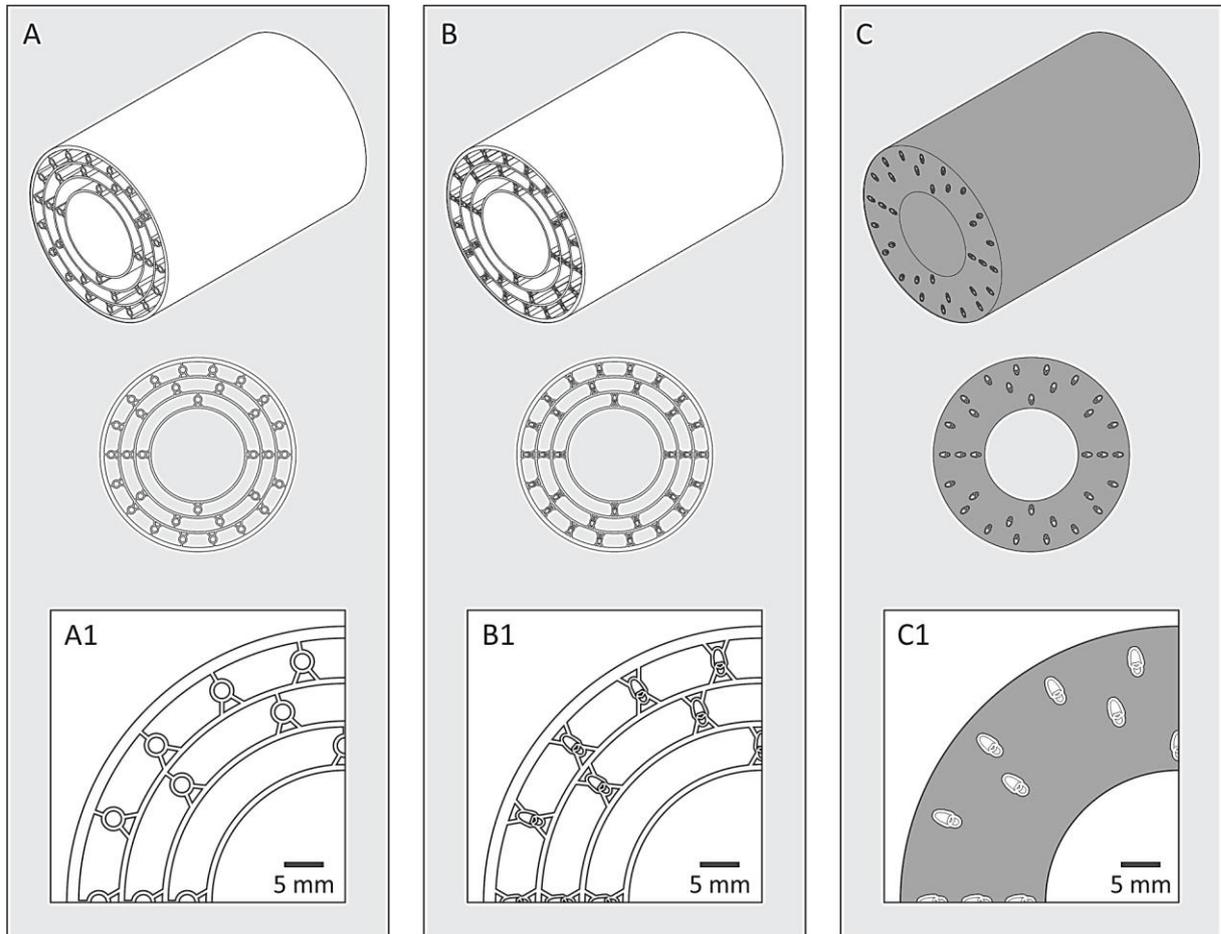
Duas estruturas bioinspiradas no bambu foram desenvolvidas com o uso do *software* Inventor, utilizando como base o modelo apresentado por Zou *et al.* (2016), visto na figura 19A. Assim, todas as estruturas foram modeladas contendo diâmetro externo e interno de 70 e 35 mm, respectivamente; a altura dos cilindros analisados é de 100 mm. Todas as estruturas foram engastadas nas superfícies inferiores dos cilindros, impedindo movimentos de translação e rotação nessa região. Nas superfícies opostas, foi aplicada uma pressão de referência de 50 MPa, distribuída como *Total force*, no *software* Abaqus, para verificar o limite de resistência à compressão das estruturas. Foi conduzida uma análise não-linear, devido à inclusão das não-linearidades geométrica e constitutiva nos modelos. Todos os ensaios foram configurados novamente em uma situação de elastoplástico perfeito.

A estrutura original de Zou *et al.* (2016) possui ainda duas seções transversais em formato de disco, totalmente sólidas, ao longo do cilindro. Essas seções sólidas representam as regiões do diafragma do colmo do bambu, tendo sido comprovadas pelos autores como mais eficientes. Essas regiões, contudo, não foram incluídas em nenhum dos três modelos comparados, uma vez que seriam uma variável em comum entre todas as estruturas. Desse modo, a análise buscou avaliar a eficiência em alterar apenas os componentes longitudinais da estrutura, os quais a geometria da seção dos elementos de reforço e a presença de um material sólido, próximo à matriz parenquimática.

O modelo referencial, visto na figura 19A, constitui-se de quatro cascas cilíndricas concêntricas, sendo a mais externa com maior espessura. Entre as mesmas, os autores incluíram elementos cilíndricos individuais de maneira gradiente, sendo 4 na região interna, 10 na intermediária e 18 na mais externa. Essa distribuição, segundo os autores, está relacionada com os valores mais próximos da densidade de feixes vasculares no sentido radial do colmo do bambu, em cada uma das regiões. Também de acordo com os autores, os elementos de reforço foram inspirados em unidades isoladas de células do esclerênquima, as quais possuem

o formato delgado e com seção aproximadamente circular.

Figura 19 – Estruturas bioinspiradas no bambu: (A) modelo de referência com detalhe (A1) dos elementos de reforço cilíndricos; (B) modelo 1 com detalhe (B1) dos elementos de reforço parametrizados com base nos feixes do esclerênquima; (C) modelo 2 com detalhe (C1) dos elementos de reforço parametrizados envoltos por material sólido baseado no parênquima.



FONTE: (A) Adaptado de Zou *et al.* (2016); (B) e (C) Autor (2016).

No primeiro modelo desenvolvido (modelo 1 – figura 19B), a geometria dos elementos de reforço foi modificada para o formato parametrizado dos feixes de fibras do bambu, vistos na seção transversal A da figura 15. Essa geometria bioinspirada corresponde a uma escala proporcionalmente mais próxima à observada no colmo da planta. Desse modo, enquanto o modelo da literatura apresenta os elementos de reforço na escala das células individuais do esclerênquima, o modelo 1 desenvolvido apresenta elementos na escala das calotas do tecido. Como as calotas são considerados feixes de diversas células agrupadas do esclerênquima, sua parametrização e inclusão como elemento de reforço na estrutura representa, proporcionalmente, uma adaptação mais aproximada da configuração real do bambu.

Tanto na estrutura de referência (figura 19A) quanto na estrutura do modelo 1 (figura

19B), a presença dos elementos bioinspirados no bambu deu-se de modo a incluir apenas a distribuição gradiente do esclerênquima, desconsiderando o papel do parênquima como matriz. Nesse sentido, o segundo modelo desenvolvido (modelo 2 – figura 19C) é caracterizado pela remoção das cascas cilíndricas concêntricas e a inclusão de uma região representativa do parênquima. Assim, no modelo 2, os elementos de reforço são externamente preenchidos por um material sólido celular, porém mantendo as mesmas dimensões externas e internas das demais estruturas. Desse modo, foi necessário um processo de seleção de materiais (ASHBY, 2012) para aplicação das propriedades corretas.

Todos os modelos foram discretizados utilizando-se elementos hexaédricos (tipo C3D8R), com tamanho global aproximado de 1 mm, incluindo controle de curvatura e controle de tamanho mínimo de 0,05 mm. O modelo de referência (figura 19A) possuía cerca de 190.000 elementos e 300.000 nós; o primeiro modelo desenvolvido (figura 19B) foi discretizado contendo por volta de 540.000 elementos e 730.000 nós; já a malha do segundo modelo desenvolvido (figura 19C) possuía aproximadamente 1.900.000 elementos e 2.100.000 nós.

5.1.1 Impressão FDM

Além da análise por elementos finitos para comparação de eficiência das estruturas desenvolvidas em relação ao modelo referencial, é interessante a fabricação de *mock-ups* para validação visual dos projetos. Desse modo, é possível realizar uma análise visual das geometrias das estruturas projetadas (vistas na figura 19B e C), bem como da disposição de seus elementos constituintes. Assim, foram fabricados três modelos físicos através da técnica de modelagem por deposição de material fundido (FDM), sendo dois para destaque dos elementos de reforço, e um com a geometria inteira da seção da estrutura.

O processo de impressão 3D pela técnica de FDM utilizou o equipamento uPrint™ SE (Stratasys® Inc., Eden Prairie, MN, USA), localizado no Laboratório de Inovação e Fabricação Digital (LIFELAB) da Escola de Engenharia da UFRGS (EE/UFRGS), visto na figura 20. Foi utilizado um total de 31,16 cm³ de material de modelo e 13,74 cm³ de material de suporte. O tempo total de impressão, definido pelo equipamento com base no caminho percorrido em todas as camadas, foi de 6h29min.

Após o processo, as peças impressas foram submersas em água para remoção do material de suporte, no equipamento WaveWash™ Support Cleaning System (Stratasys® Inc., Eden

Prairie, MN, USA), também localizado no LIFELAB. O equipamento de lavagem utiliza água aquecida a aproximadamente 70°C, em agitação, para dissolução do polímero de suporte. O processo transcorreu por aproximadamente 5 horas.

Figura 20 – Equipamento de impressão FDM uPrint™ SE.



FONTE: Autor (2016).

5.2 Seleção de materiais e propriedades constitutivas

As regiões sólidas das estruturas – as cascas cilíndricas do modelo de referência e do modelo 1, bem como os elementos de reforço de todos os modelos – foram associadas a uma liga de alumínio, com base nos parâmetros utilizados no modelo de comparação proposto por Zou *et al.* (2016). Assim, o módulo elástico e a tensão de escoamento utilizados foi de 70 GPa e 250 MPa, respectivamente, com densidade de 2.700 kg/m³ e coeficiente de Poisson de 0,31, conforme dados apresentados pelos autores.

O modelo 2 desenvolvido (figura 19C) inclui uma região volumétrica bioinspirada no parênquima, preenchendo os elementos de reforço modelados com a mesma liga de alumínio referência utilizada nos demais modelos. Para escolha das propriedades constitutivas dessa região celular, é necessário um material que possua característica de espuma de células fechadas. Desse modo, foi realizada uma análise de seleção de materiais, através do *software* CES EduPack™ (Granta Design® Ltd., Cambridge, UK), localizado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS. Para análise, foram analisados os materiais com propriedades relacionadas a espumas. No *software*, foi incluído um material com as propriedades

obtidas da caracterização do parênquima, listadas na tabela 3.

Os mapas de seleção de materiais trabalham com faixa de valores, ou seja, os valores das propriedades apresentados possuem um desvio-padrão, representados graficamente pelos eixos das elipses. Portanto, os dados do parênquima foram inseridos com variação de 10%, para mais e para menos, nos limites superior e inferior, respectivamente. Assim a comparação visual do tecido nos mapas é realizada de modo mais facilitado.

Tabela 3 – Propriedades do parênquima, com base na caracterização, e os limites inferior e superior inseridos nos mapas de seleção de materiais do *software* CES EduPack.

Propriedade	Valores da caracterização	Valores limite inseridos	
		Inferior (90%)	Superior (110%)
Densidade Relativa	0,274	0,247	0,301
Módulo elástico (GPa)	2,989	2,690	3,288
Resistência à compressão (MPa)	20,320	18,288	22,352
Densidade (kg/m ³)	411,000	369,900	452,100

FONTE: Autor (2016).

Os valores do módulo elástico e da resistência à compressão foram incluídos com base nos resultados da caracterização do parênquima, apresentados no capítulo 4. Para a determinação da densidade, ρ_P , do tecido de preenchimento foi utilizada a relação:

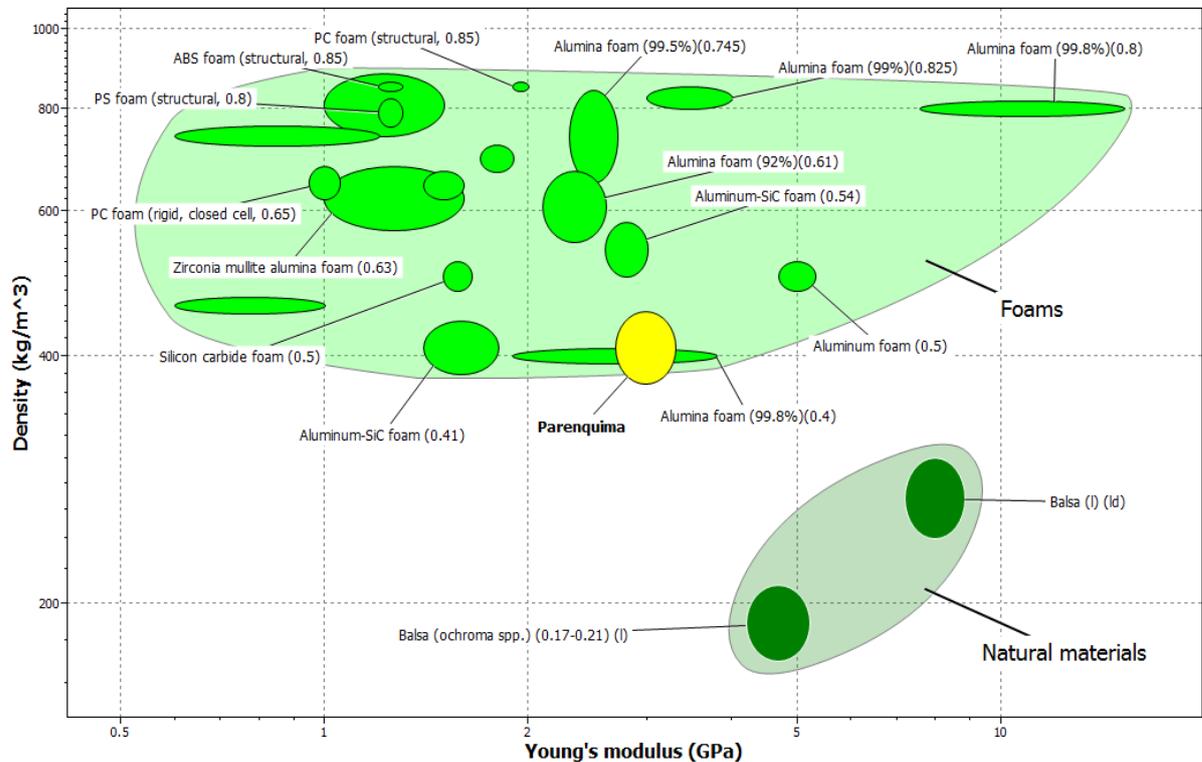
$$\rho_P = \left(\frac{\rho^*}{\rho_S} \right)_P \cdot \rho_S \quad (12)$$

em que ρ_S é a densidade aproximada da parede celular sólida de plantas, ou aproximadamente 1500 kg/m³ (DIXON; GIBSON, 2014). A densidade do parênquima, portanto, pode ser estimada com base na sua densidade relativa.

O primeiro mapa de seleção de materiais (figura 21) apresenta a relação entre o módulo elástico (*young's modulus*) e a densidade (*density*) do parênquima, em comparação com os demais materiais do banco de dados do *software*. Em termos de módulo elástico, é possível observar que o tecido de preenchimento apresenta uma faixa de valores semelhantes à de espumas de óxido de alumínio, vistas no mapa como *alumina foam*, sendo considerado superior às espumas poliméricas, como as de policarbonato (PC), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poliestireno (PS). Já em relação aos valores de densidade, o tecido apresenta uma magnitude inferior à grande parte das espumas metálicas, sendo superior apenas aos materiais naturais. A espuma metálica que mais se aproxima com as propriedades de módulo elástico

e densidade do parênquima é a “*alumina foam (99.8%)(0.4)*”, em que os valores representam 99,8% de alumina, na composição, e densidade na faixa de $0,4 \text{ g/cm}^3$, ou 400 kg/m^3 .

Figura 21 – Mapa de módulo elástico (*young's modulus*) por densidade (*density*), com materiais com característica de espumas em comparação com os dados do parênquima.



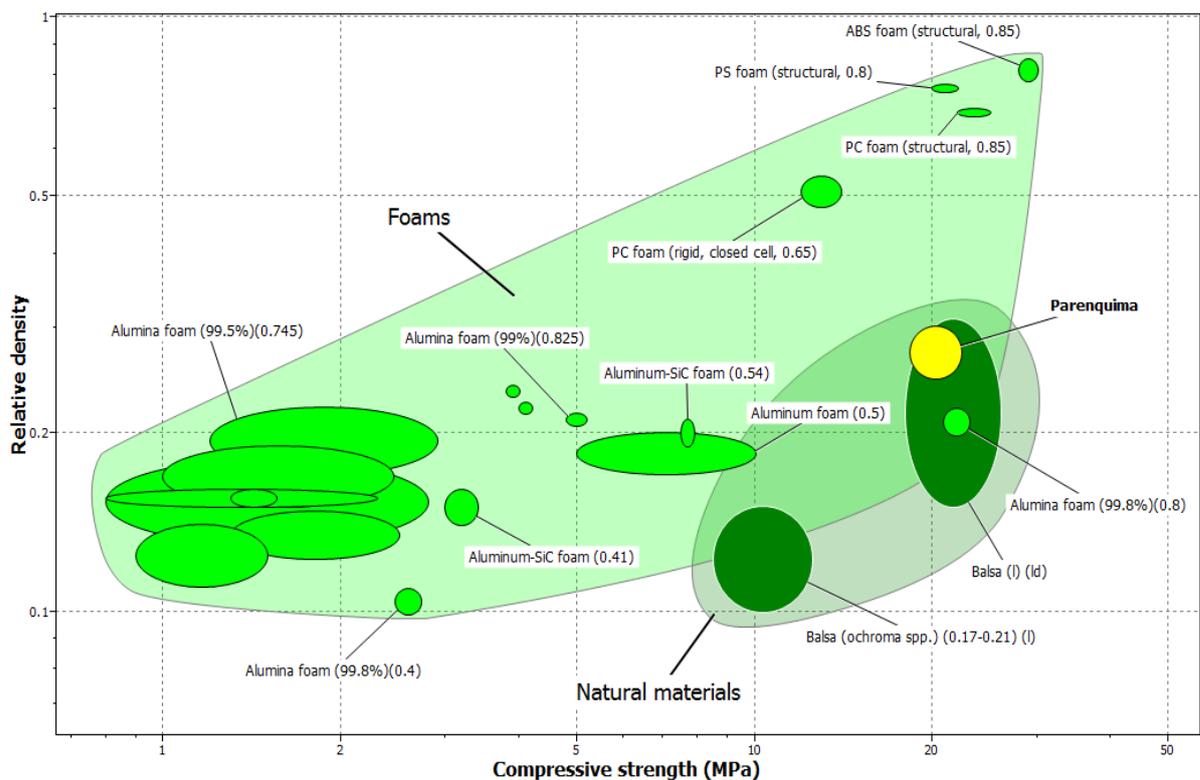
FONTE: Autor (2016).

O segundo mapa de seleção, visto na figura 22, apresenta a relação entre a resistência à compressão (*compressive strenght*) e a densidade relativa (*relative density*) do parênquima, em comparação aos mesmos materiais do mapa anterior. Nessa análise, o tecido de preenchimento mostrou-se como um dos materiais com maiores valores de resistência à compressão, com limites próximo às espumas poliméricas de ABS, PS e PC, e à uma espuma de alumínio de alta densidade – “*alumina foam (99.8%)(0.8)*”, com densidade por volta de 800 kg/m^3 . Contudo, entre as informações de ambos os mapas, é evidenciada a superioridade em eficiência do parênquima em comparação aos demais materiais sintéticos. Ou seja, além de possuir altas propriedades de módulo elástico e resistência à compressão, o tecido também apresenta baixos valores de densidade, em comparação aos demais materiais.

Em termos de densidade relativa, tal como o módulo elástico, novamente o parênquima mostrou-se mais próximo às espumas baseadas em alumínio. A densidade relativa, como

visto, está relacionada à porosidade do material, de modo que o tecido apresenta um desempenho superior às alternativas sintéticas, mesmo com menos material proporcionalmente utilizado. É possível observar, também, que os materiais tendem a seguir uma relação linear entre a resistência à compressão e a densidade relativa, confirmando este parâmetro como um dos mais importantes ao se estudar sólidos celulares (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Figura 22 – Mapa de resistência à compressão (*compressive strenght*) por densidade relativa (*relative density*), com materiais com característica de espumas em comparação com os dados do parênquima.



FONTE: Autor (2016).

Uma característica observada dos materiais naturais é, apesar disso, a distorção da linearidade “resistência à compressão e densidade relativa” dos materiais sintéticos, apresentando-se em uma região mais inferior e direita do mapa da figura 22. Tanto o parênquima quanto os demais materiais naturais apresentam valores altos de resistência à compressão, ao passo que mantendo uma densidade relativa inferior. Esse efeito deve-se aos arranjos estruturais que os tecidos e as células vegetais possuem, como em compósitos de diversas escalas (NIKLAS, 1992; WANG *et al.*, 2012).

Com base nos resultados dos mapas de seleção, foi visto que os materiais sintéticos que mais se aproximam das características estruturais do parênquima são as espumas com base

em alumínio. Como diversas configurações desse tipo de espuma são encontradas, foi selecionada a espuma de alumínio com densidade de cerca de 400 kg/m^3 – visto nos mapas de seleção como “*alumina foam (99.8)(0.4)*” – com módulo elástico e densidade semelhantes ao tecido. Apesar dessa espuma possuir valores inferiores de resistência à compressão, sua escolha deu-se em virtude de sua menor densidade em comparação às demais espumas de alumínio. Esse fator é importante para avaliar a eficiência de uma estrutura, ou seja, a quantidade de carga suportada, em função da quantidade de material, em massa, com que é feita. Cabe ressaltar que os resultados da seleção de materiais também condizem com informações da literatura, em que espumas de alumínio são consideradas os materiais sintéticos com propriedades estruturais mais próximas às de tecidos vegetais, segundo Gibson, Ashby e Harley (2010).

O modelo 2 é composto por uma matriz celular de espuma de alumínio, reforçada por elementos da liga de alumínio referência e geometria parametrizada inspirada nos feixes de esclerênquima. Do ponto de vista estrutural, o modelo pode ser considerado como um compósito por possuir duas fases com propriedades mecânicas distintas e complementares: matriz celular de baixa densidade com reforços de alto módulo (MORTENSEN, 2007). Entretanto, o efeito de compósito obtido deu-se através de um único material-base, o alumínio. Essa característica é também encontrada em estruturas vegetais, como o bambu e em madeiras, em que ambos os materiais de matriz e reforço são arranjos geométricos de células compostas basicamente por celulose, lignina e hemicelulose (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; NIKLAS, 1992). Desse modo, a utilização de uma mesma liga metálica para fabricação dos elementos de matriz e reforço de uma estrutura com característica de compósito também representa um processo bioinspirado em plantas estruturais lignificadas, como o bambu.

As espumas de alumínio podem ser obtidas por diversos processos de fabricação como, por exemplo, através de metalurgia do pó, dependendo das propriedades mecânicas (em função da densidade relativa) e das características (em função de células fechadas ou abertas) desejadas (ASHBY *et al.*, 2000). Para a espuma de alumínio de células fechadas, utilizada no segundo modelo biônico, é possível empregar o processo de liberação de gás por decomposição de um agente espumante. Nesse método, de acordo com Ashby *et al.* (2000), o agente espumante, hidreto de titânio (TiH_2), é misturado com uma liga de alumínio, ambos como pó. A mistura é então compactada a frio e extrudada, conforme a densidade e o perfil desejados.

Os perfis extrudados são, então, cortados em pedaços menores e colocados em um

molde selado e dividido, onde são aquecidos ligeiramente acima da temperatura *solidus*³⁴. Como o TiH_2 decompõe-se a partir de 465°C, temperatura inferior ao ponto de fusão de 660°C do alumínio e suas ligas, o processo faz com que o agente espumante se decomponha, liberando gás hidrogênio (H_2) e criando vazios na estrutura. Assim, a mistura obtém as propriedades fluidas de um semissólido³⁵, preenchendo todas as regiões do molde (ASHBY *et al.*, 2000).

O processo de fabricação de espumas de alumínio permite sua utilização em conjunto com demais regiões sólidas não-celulares da mesma liga metálica, em uma estrutura única. Estudos têm sido realizados para o desenvolvimento de estruturas sanduíches fabricadas com alumínio, como em painéis possuindo núcleo celular (ASHBY *et al.*, 2000; SEELIGER, 2002; STYLES; COMPSTON; KALYANASUNDARAM, 2007) ou diretamente em estruturas bioinspiradas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; JIAN-ZHONG; JIU-GEN; JIA-JU, 2005). Nesse sentido, o segundo modelo desenvolvido pretende analisar o desempenho de uma estrutura organizada como um compósito de alumínio, contendo as fases de matriz porosa bioinspirada no parênquima e de reforço atribuído à geometria dos feixes do esclerênquima.

5.3 Prototipagem e análise por elementos finitos

A análise das duas estruturas desenvolvidas deu-se de modo visual, com o uso de modelos prototipados em impressão FDM, e estrutural, através do método de elementos finitos. Para a prototipagem dos modelos, buscou-se ressaltar os elementos internos de reforço (vistos, anteriormente, nos detalhes B1 e C1 da figura 19) das estruturas projetadas, os quais são compostos pela geometria bioinspirada nos feixes vasculares do bambu. Os modelos impressos podem ser vistos na figura 23, possuindo 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

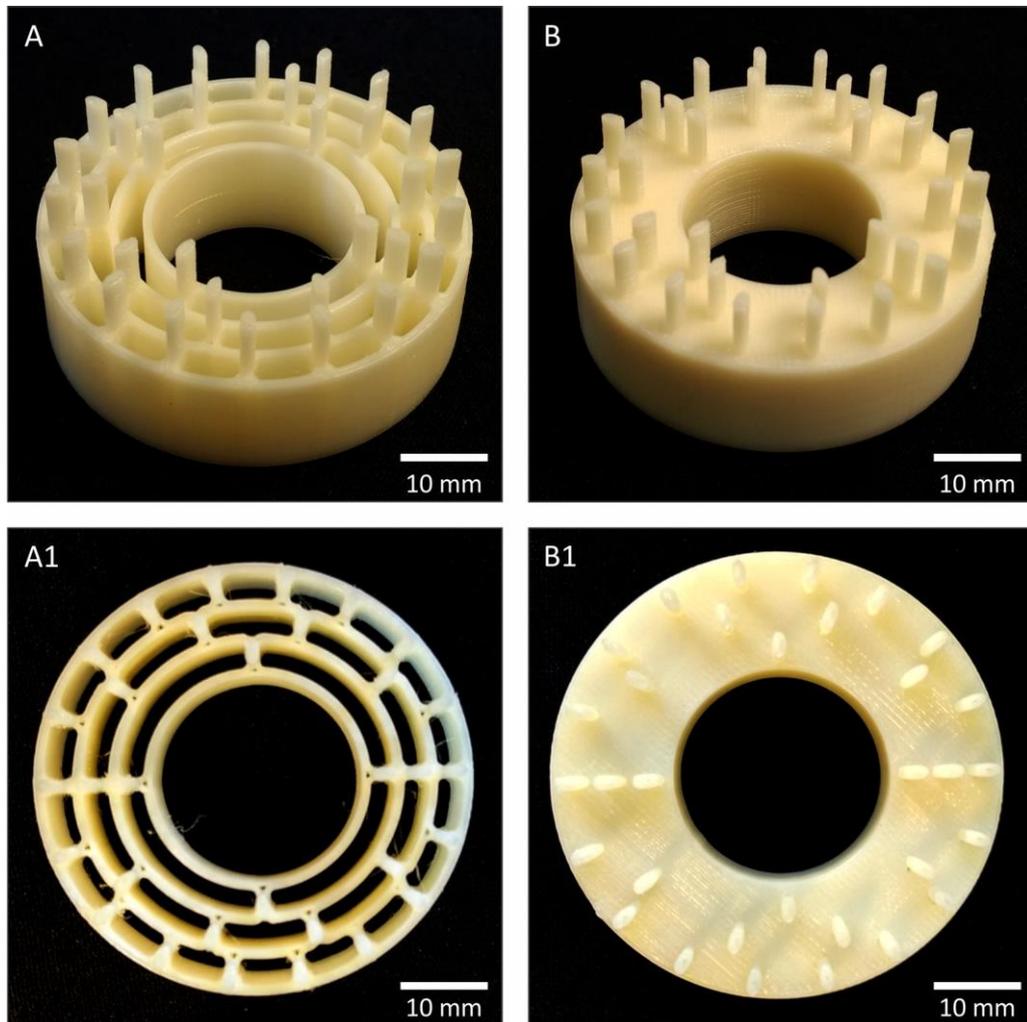
Em virtude de ambas estruturas possuírem uma seção transversal constante, os modelos impressos foram limitados com relação à altura, para economia dos insumos de impressão. De modo semelhante, para facilitar a visualização isolada dos elementos de reforço, eles foram impressos de modo a se sobressaírem das demais regiões, em ambos os modelos (figura 23). Assim a metade inferior dos modelos foi impressa de maneira completa, com todas as

³⁴ Em ciência dos materiais, a temperatura *solidus* é aquela abaixo das fases líquidas de uma determinada liga, em um diagrama de fases, *i.e.*, a temperatura limite em que os elementos da substância são considerados sólidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2006).

³⁵ Semissólido é o estado em que um material encontra-se entre as fases sólidas e líquidas (ASHBY *et al.*, 2000).

regiões, e a metade superior com somente os elementos de reforço.

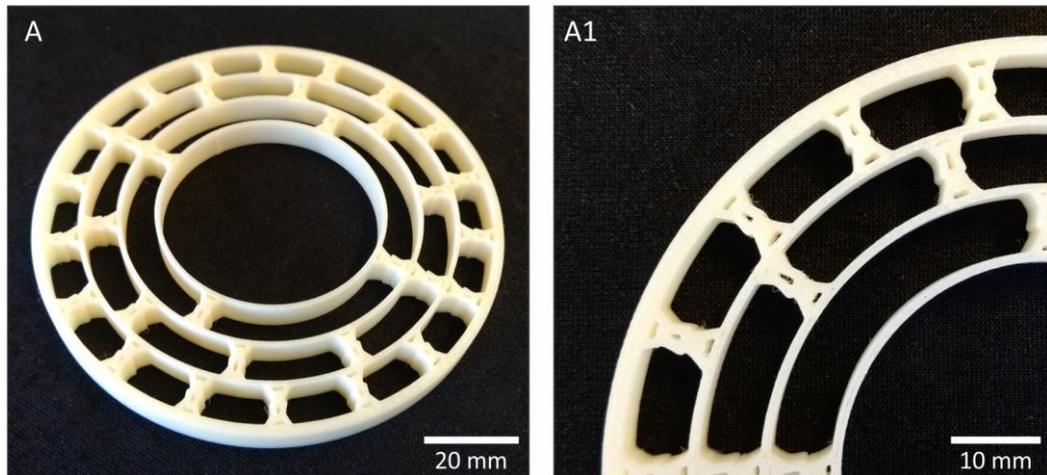
Figura 23 – Impressão FDM das estruturas desenvolvidas, com evidência dos materiais de reforço: (A) modelo 1, de cilindros concêntricos e reforços sólidos; (B) modelo 2, reforços sólidos envolvidos por uma matriz celular. Detalhes (A1) e (B1) mostram a vista superior dos respectivos modelos (A) e (B).



FONTE: Autor (2016).

Além da representação com destaque da geometria dos elementos de reforço na figura 23, o modelo 1 também foi impresso com a seção transversal completa, com diâmetro de 100 mm, para observação detalhada dos elementos de reforço. Conforme a vista superior do modelo virtual 1 desenvolvido (visto no detalhe B1 da figura 19), a figura 23, detalhe A1, apresenta a ampliação da seção transversal da geometria parametrizada dos feixes do esclerênquima do bambu. Com a impressão de um *mock-up* em escala maior, foi possível analisar os detalhes das geometrias que a estrutura final possuiria, em tamanho real. Do mesmo modo como nos demais modelos impressos, como a seção transversal é constante, não foi necessária a impressão de um modelo com maior altura, dentro dos propósitos da observação.

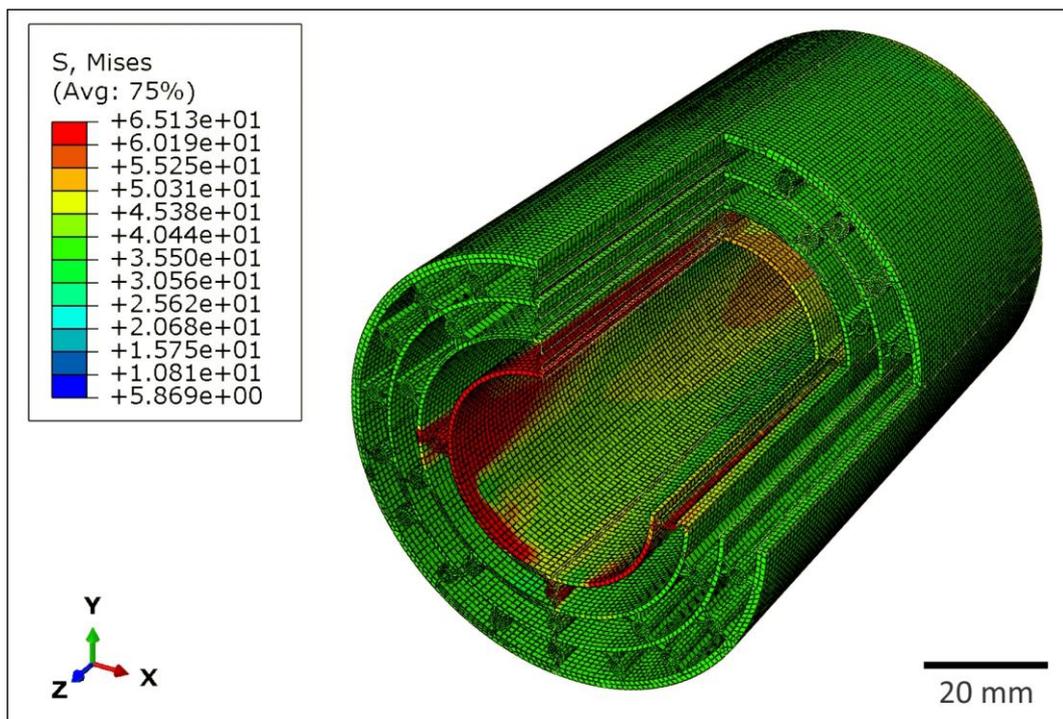
Figura 24 – Impressão FDM do modelo 1, com cilindros concêntricos e reforços parametrizados, em seção transversal completa. Detalhe (A1) mostra a vista superior do respectivo modelo.



FONTE: Autor (2016).

Já na análise estrutural, por meio de elementos finitos, o mesmo protocolo da análise do bambu, por microtomografia, foi seguido, ao verificar a carga máxima suportada em relação à pressão inicial de referência aplicada de 50 MPa. A estrutura referência, proposta por Zou *et al.* (2016) suportou uma pressão axial máxima de 36,72 MPa. A figura 25 apresenta os resultados das tensões von Mises do modelo de referência, com vista em corte.

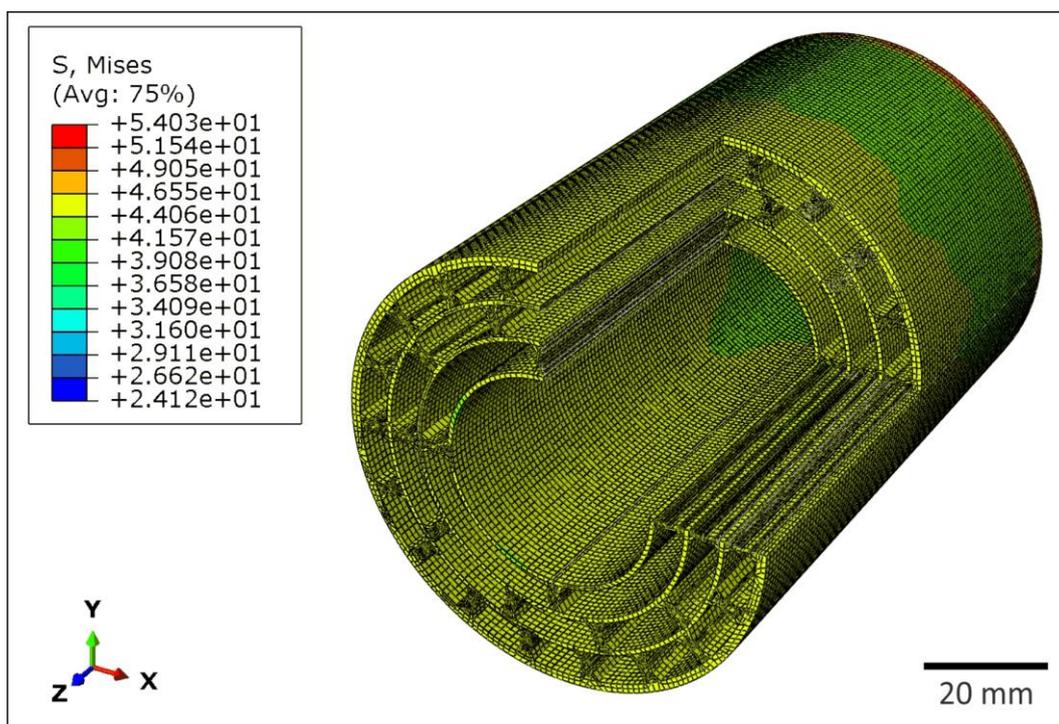
Figura 25 – Tensões von Mises do modelo referência, baseado em Zou *et al.* (2016), com vista em corte.



FONTE: Autor (2016).

O segundo ensaio foi realizado no modelo 1 (visto na figura 19B), suportando uma pressão axial máxima de 45,18 MPa. Isso representa um aumento no desempenho de aproximadamente 23%, apenas ao modificar a geometria dos elementos de reforço para aproximarem-se mais da seção transversal dos feixes do esclerênquima, e mantendo as demais dimensões externas e internas da estrutura. As tensões von Mises do modelo são visualizadas na figura 26, também em corte.

Figura 26 – Tensões von Mises do modelo 1, com vista em corte.



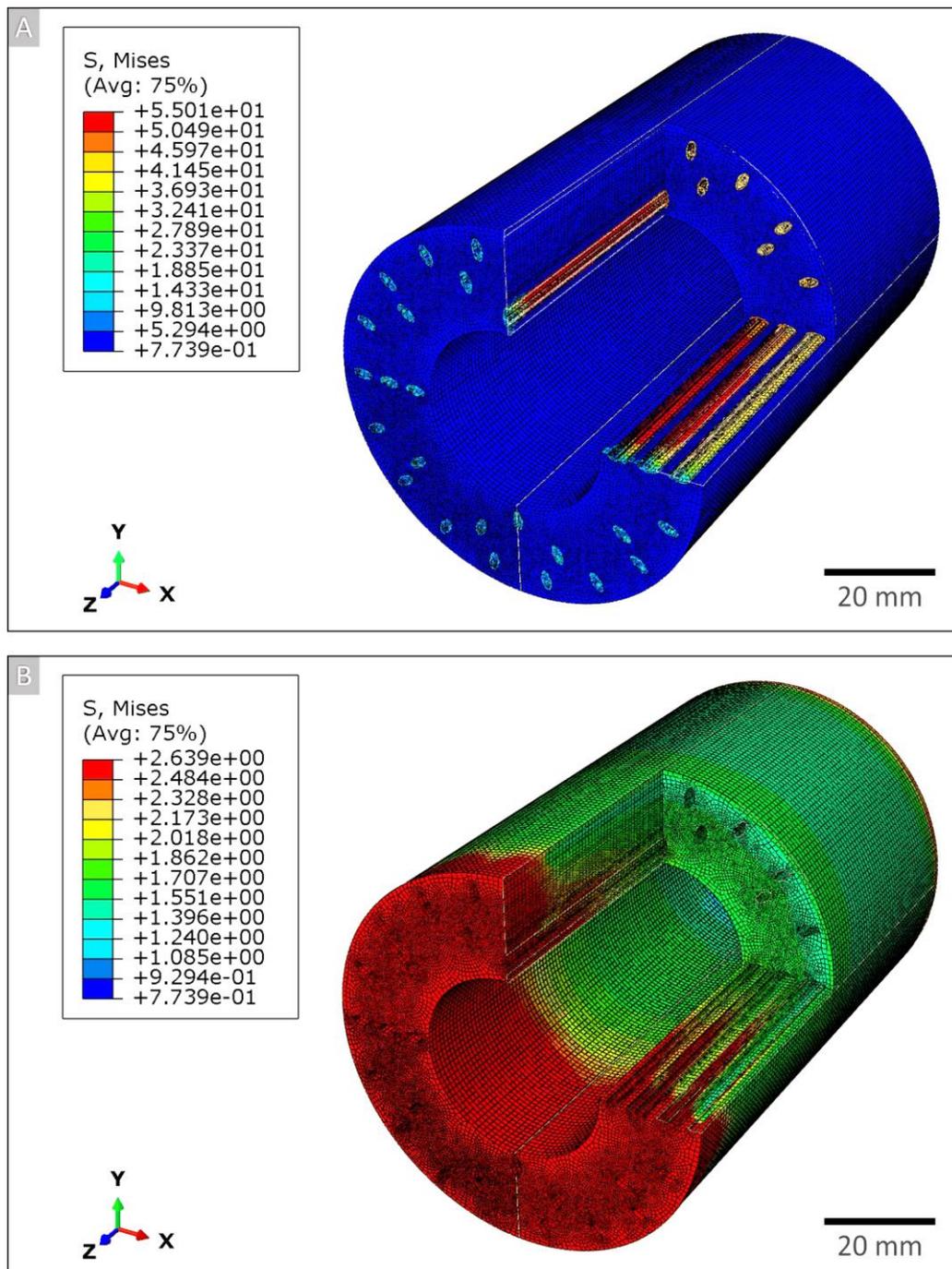
FONTE: Autor (2016).

Por fim, a terceira análise por elementos finitos foi conduzida no segundo modelo desenvolvido (visto na figura 19C), que inclui a presença de uma fase celular referente à espuma de alumínio descrita no tópico 5.2. O segundo modelo suportou uma pressão axial máxima de 30,41 MPa, representando cerca de 83% da pressão suportada pela estrutura de referência, ou um desempenho aproximadamente 17% inferior. As tensões von Mises do segundo modelo, visualizado em corte como montagem completa, ou seja, com ambos os materiais de reforço e matriz, são apresentadas na figura 27A.

As estruturas internas de reforço são mostradas com tensões mais altas na quase totalidade de seus elementos. Entretanto, assim como verificado nos resultados da análise numérica no modelo discretizado do bambu, obtido por microtomografia, a maior parte dos

elementos correspondentes à espuma de alumínio aparece com baixos valores de tensões. Isso se deve às magnitudes inferiores das propriedades constituintes da região, em comparação com os valores do material de reforço. Portanto, a figura 27B apresenta a vista em corte das tensões von Mises para a região da matriz celular do modelo, representada pela espuma de alumínio.

Figura 27 – Tensões von Mises, com vista em corte, do modelo 2: (A) com o material de reforço junto com a matriz celular; (B) somente com a matriz celular.



De modo semelhante aos resultados da análise numérica do modelo discretizado do parênquima, baseado em microtomografia (visto na figura 17B), a região da matriz celular da espuma de alumínio apresentou tensões maiores nas regiões próximas aos elementos de reforço e na região onde foi aplicada a carga, indicando distribuição da pressão nos elementos de reforço. No modelo discretizado do parênquima, também foram observadas tensões maiores nas regiões de contorno restritas, como os elementos laterais do cilindro. Essas tensões não foram visualizadas na estrutura biônica da figura 27B visto que não foram inseridas restrições nas laterais do modelo cilíndrico.

O comportamento geral do segundo modelo desenvolvido indica que a espuma de alumínio pode ser considerada como referencial biônico para o parênquima, ao ativar os elementos de reforço interno. O desempenho bruto da estrutura foi inferior ao modelo de referência, contudo para comparar as três estruturas em termos de eficiência, faz-se necessário considerar a quantidade de material empregada em cada situação.

5.3.1 Análise de eficiência

Os resultados das análises por elementos finitos das estruturas apresentaram variações consideráveis no desempenho, quando consideradas as variáveis ensaiadas. No caso da alteração da seção dos elementos de reforço para uma geometria mais próxima à encontrada nos feixes vasculares fibrosos, foi constatado um aumento na pressão axial máxima suportada. Já ao incluir uma região celular, composta de uma espuma de alumínio, houve uma redução na quantidade de carga suportada. Entretanto, apesar de todas as estruturas possuírem dimensões externas idênticas, as quantidades de material empregado são distintas.

Desse modo, a tabela 4 apresenta a eficiência dos modelos biônicos analisados, utilizando a estrutura referência como comparativo. A eficiência é representada pela resistência específica à compressão, λ , de cada estrutura biônica, determinada através de:

$$\lambda = \frac{\sigma_A}{m} \quad (13)$$

em que σ_A é a resistência à compressão axial, representada pelo valor máximo de pressão que a estrutura suportou; e m é a massa, em gramas, de cada modelo. Os valores de m foram quantificados com o volume de cada estrutura, com o *software* Inventor, conforme os valores atribuídos de densidade para cada material.

O modelo 1 apresentou uma estrutura com cerca de 3% a mais de material, em massa, em comparação com o modelo de referência. Contudo, ao suportar uma pressão maior, o modelo resultou em uma eficiência cerca de 19% superior ao modelo referencial. Desse modo, é possível inferir que a modificação da geometria das seções de reforço, utilizando a forma biônica parametrizada a partir da seção dos feixes de fibras, representa um aumento real na rigidez da estrutura.

Tabela 4 – Eficiência dos modelos biônicos analisados por meio da resistência específica à compressão, λ , em comparação à estrutura referência apresentada por Zou *et al.* (2016), em função da massa, m , e da resistência à compressão axial, σ_A .

Modelo	m		σ_A		λ	
	(g)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa/g)	(%)
Referência	231,450	100,00	36,72	100,00	0,159	100,00
Modelo 1	239,157	103,33	45,18	123,04	0,189	119,08
Modelo 2	146,283	63,20	30,41	82,82	0,208	131,03
Reforço	35,608					
Matriz celular	110,675					

FONTE: Autor (2016).

Apesar do modelo 2 possuir um desempenho bruto de resistência à compressão axial inferior, sua estrutura foi projetada com uma redução de material de aproximadamente 37%. A massa da região sólida da estrutura (tabela 4 – Modelo 2, reforço) apresentou uma redução em comparação aos demais modelos, em virtude da remoção das cascas cilíndricas. Já a adição da região de matriz celular (tabela 4 – Modelo 2, matriz celular), preenchendo toda a estrutura, resultou em um menor acréscimo à massa total. Isso levou o modelo a apresentar uma eficiência específica aproximadamente 31% maior que o modelo referencial.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo abordou o uso de biônica para desenvolvimento de estruturas baseadas no bambu. Foram seguidas etapas de Identificação, Análise e Aplicação da metodologia de design de produto por meio de biônica. O processo foi conduzido de modo a levantar o estado da arte em pesquisas bioinspiradas na planta, bem como em técnicas de observação 3D, caracterização e análise de estruturas. Os resultados dessa etapa permitiram aplicar o conhecimento obtido ao avaliar o desempenho e a eficiência de modelos biônicos desenvolvidos, em comparação com a literatura.

6.1 Preparação de amostra e caracterização

A espécie *Bambusa tuldoides* foi caracterizada e analisada por meio de técnicas de alta resolução para compreensão das propriedades que contribuem para a resistência estrutural do bambu. A análise consistiu em protocolos de amolecimento e secagem para permitir um secionamento liso, de modo a preservar as morfologias dos diferentes tecidos. O uso de etilendiamina em amostras lignificadas de bambu, nas concentrações utilizadas, mostrou-se eficiente para cortes transversais e longitudinais. Do mesmo modo, o 2,2-dimetoxipropano contribuiu no processo de secagem, removendo a umidade da amostra e preservando sua microestrutura.

A observação da amostra em microscopias de luz e eletrônica de varredura possibilitou a identificação de características das células de parênquima, como as pontoações, e do esclerênquima, como os diferentes níveis de lignificação da parede celular. Contudo foi necessário o uso de microtomografia computadorizada de raios X para visualização interna da amostra, com um secionamento virtual sob qualquer ângulo. A técnica não-invasiva permitiu a caracterização do tecido de modo volumétrico. Foi realizada a segmentação dos diferentes tecidos constituintes da amostra – parênquima, esclerênquima, e elementos vasculares – incluindo seu arranjo tridimensional e contagem volumétrica. Os resultados obtidos foram compatíveis com informações da literatura. Além disso, a μ CT permitiu a observação da porosidade do parênquima, definida pelo lume celular, e das conexões entre feixes vasculares próximos, através dos traços vasculares.

Os resultados apontam que o parênquima pode ser considerado como uma espuma de

célula fechada e com paredes celulares curvilíneas, conforme considerado na literatura. Esses dados, juntamente com os valores de densidade relativa do parênquima e do esclerênquima, possibilitaram uma análise estrutural da amostra.

6.2 Análise estrutural da planta

A geometria da seção dos feixes vasculares fibrosos de *B. tuldoides* foi parametrizada e comparada com demais estruturas representativas, utilizadas em estudos biônicos do bambu. As geometrias foram analisadas entre si e com seções de referência, por meio do estudo de fatores de forma, levando em consideração a área da seção e seu momento de inércia. Foi verificado que as geometrias dos feixes de fibras do esclerênquima, alinhados radialmente, contribuem para as propriedades mecânicas do colmo, além de protegerem os elementos vasculares, em seu interior.

Os modelos tridimensionais obtidos da μ CT foram segmentados em duas regiões principais: do parênquima, removendo as regiões relativas do lume celular dos elementos de condução, e esclerênquima. As regiões foram discretizadas e exportadas para análise via elementos finitos, de modo a simular as condições de contorno de uma amostra real. As propriedades aplicadas em cada geometria foram obtidas com base nos resultados da caracterização volumétrica, com o uso de modelos matemáticos para estimar o módulo elástico e resistência a compressão axial. O parênquima foi modelado como isotrópico, considerando sua morfologia celular, e o esclerênquima como ortotrópico, devido às diferenças nas propriedades no sentido longitudinal e transversal às fibras.

A amostra analisada por elementos finitos suportou uma pressão axial de 25,16 MPa antes da falha pelo limite elástico dos materiais constituintes, valor condizente com ensaios da literatura com amostras reais. Apesar da estimativa do módulo elástico total da amostra por meio de regra das misturas ser comparável aos valores da literatura, a previsão do limite de resistência à compressão axial pelo mesmo modo mostrou-se imprecisa.

A análise numérica mostrou que o parênquima apresenta um comportamento de matriz em uma analogia com compósito, de modo que tensiona todos os elementos fibrosos de reforço, mesmo mantendo os elementos de seu interior com pouca tensão. O resultado da análise mostrou que a abordagem de ensaios numéricos em modelos discretizados, com geometria e propriedades constitutivas obtidas a partir da microtomografia e caracterização

volumétrica, pode ser empregado em demais estruturas vegetais para auxiliar na compreensão de suas propriedades mecânicas.

Cabe ressaltar que o processo seguido de discretização de modelos de microtomografia apresenta uma complexidade para obtenção de uma malha condizente com a estrutura, levando a um grande consumo de processamento nesta etapa. Portanto, nesse estudo não foram consideradas as etapas de refinamento de malha desse modelo, para verificar a necessidade de aumentar ou diminuir o número de elementos na malha, antes da análise. Contudo, os resultados apresentaram-se condizentes com informações da literatura, representando uma nova possibilidade de análise estrutural de alta resolução em amostras vegetais.

6.3 Aplicação e desenvolvimento de modelos biônicos

Uma estrutura bioinspirada no bambu da literatura (ZOU *et al.*, 2016) foi utilizada para comparação com dois modelos desenvolvidos com base nos resultados da caracterização e análise numérica do bambu. Todos os modelos possuíam dimensões externas e internas idênticas à referência e foram baseados em uma liga de alumínio proposta pelos autores. Foi utilizada a técnica de impressão FDM para fabricação de *mock-ups* para observação da disposição dos elementos de reforço nas estruturas, e para análise visual da geometria da seção de um modelo. Além da impressão 3D, foi transcorrida uma análise por elementos finitos dos dois modelos desenvolvidos, para comparação de eficiência (em termos de carga suportada por quantidade de material) com o modelo de referência.

A primeira estrutura projetada (modelo 1) foi desenvolvida através da modificação da seção dos elementos de reforço de modo a incluírem a geometria parametrizada da seção dos feixes do esclerênquima, que havia resultado em um desempenho melhor, na análise de formas por flexão. O modelo 1 apresentou uma eficiência 19% maior na resistência à compressão específica, *i.e.*, relacionando a quantidade, em massa, de material utilizado na estrutura.

Para a segunda comparação foi desenvolvido um modelo que mantivesse os elementos de reforço de alumínio, com geometria baseada na parametrização dos feixes do bambu, mas com a adição de um material celular, envolvendo-os como matriz. O material tinha como objetivo aplicar as propriedades de uma matriz celular parenquimática, possuindo baixa densidade e acionando todos os elementos de reforço internos. Foi conduzida uma seleção

de materiais por análise para comparar o desempenho estudado do tecido vegetal com demais materiais disponíveis na indústria. Os materiais que mais se aproximaram do parênquima, nos mapas de seleção, foram as espumas de alumínio, conforme também apontado pela literatura. Portanto, uma espuma de alumínio com densidade e módulo elástico próximos ao parênquima foi selecionada para o modelo. Como resultado, apesar de suportar uma pressão axial inferior à estrutura de referência, o modelo resultou em uma massa proporcionalmente ainda menor. Isso levou a estrutura a apresentar uma eficiência por volta de 31% superior ao modelo de referência. O mesmo efeito de matriz celular na análise numérica na planta também foi observado na estrutura biônica, com a matriz acionando todos os elementos internos de reforço.

Em termos de fabricação, conforme discutido por Zou *et al.* (2016), a complexidade dos perfis analisados dificultaria processos convencionais de manufatura, havendo a necessidade inicial de utilização de técnicas de manufatura aditiva. Contudo, tal como os autores do modelo referencial, como o objetivo da análise é verificar novas geometrias biônicas mais eficientes, esse ponto não foi abordado nesta pesquisa. Assim o estudo buscou avaliar o acréscimo de desempenho específico que uma estrutura bioinspirada no bambu pode possuir ao relacionar fatores pouco explorados na literatura.

Os resultados da caracterização e da análise dos modelos biônicos mostraram que, além dos aspectos já abordados na literatura, dois novos fatores podem ser levados em consideração no design de estruturas inspiradas no bambu. O primeiro diz respeito à geometria das seções transversais dos feixes de fibras da planta, ao serem combinados com uma distribuição radial gradiente. O segundo trata da presença de uma matriz celular com características do parênquima, ao envolver os elementos de reforço, além de possuir menor densidade.

A utilização da técnica de impressão FDM levou à fabricação de modelos físicos representativos das estruturas desenvolvidas. Dois *mock-ups* foram criados apresentando os elementos de reforço em destaque, e um foi prototipado em escala maior, para análise visual dos detalhes das geometrias parametrizadas. As peças impressas foram fabricadas visando à precisão da seção transversal e à economia de insumos de impressão, desse modo sem utilizar a altura total dos modelos reais. Como a seção é constante, os *mock-ups* foram impressos com uma altura baixa, mantendo os detalhes das geometrias e dos materiais de reforço.

O modelo referencial é proposto pelos autores como sendo possível de ser manufaturado através de impressão 3D (ZOU *et al.*, 2016), ainda que processos de extrusão também

possam ser empregados (LEFTERI, 2013). Em termos de processos de prototipagem, o uso de sinterização seletiva a laser permite a execução de perfis complexos, em combinação com técnicas de metalurgia do pó, como com agentes espumantes (ASHBY *et al.*, 2000; ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2012).

O advento de tecnologias 3D de caracterização em alta resolução, como a microtomografia de Raios X, e análise por elementos finitos abre caminho para novas possibilidades de investigação da microestrutura de materiais naturais. Este estudo apresentou uma nova abordagem de análise de tecidos vegetais do bambu, aliando precisão geométrica com propriedades constitutivas e condições de contorno realistas. Este método de análise estrutural pode também ser empregado em diferentes espécies e famílias de plantas, para a geração de conhecimentos técnico-morfológicos de sua anatomia que possam ser aplicados em projetos de design e engenharia, por meio de biônica. Os materiais naturais apresentam uma grande complexidade estrutural definida de escalas macro- a nanométrica; portanto, suas interessantes propriedades precisam levar em consideração a influência dos diferentes níveis de organização formal, seja de células ou tecidos.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. **Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials**. 2000. 210 f. Tese (Doutorado) - Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2000.
- AKHTAR, R.; EICHHORN, S. J.; MUMMERY, P. M. Microstructure-based Finite Element Modelling and Characterisation of Bovine Trabecular Bone. **Journal of Bionic Engineering**, v. 3, n. 1, p. 3–9, mar. 2006.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (EDS.). **Anatomia vegetal**. Viçosa: Ed. UFV, 2003.
- ASHBY, M. F. *et al.* **Metal foams : a design guide**. Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 2000.
- ASHBY, M. F. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materiais e design : arte e ciência na seleção de materiais em projeto de produto**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CAMPUS, 2011.
- ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materiais : engenharia, ciência, processamento e projeto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- BACK, N. *et al.* **Projeto integrado de produtos : planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 2008.
- BAMBOO PHYLOGENY GROUP. An updated tribal and subtribal classification of the bamboos (Poaceae: Bambusoideae). **The Journal of the American Bamboo Society**, v. 24, n. 1, p. 1–10, 2012.
- BANIK, R. L. Morphology and growth. In: LIESE, W.; KÖHL, M. (Eds.). **Bamboo : the plant and its uses**. Cham, SZ: Springer International Publishing, 2015. p. 43–89.
- BAR-COHEN, Y. **Biomimetics: Nature-Based Innovation**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2011.
- BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1996.
- BAXTER, M. **Projeto de produto : guia prático para o design de novos produtos**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- BENYUS, J. M. **Biomimética : inovação inspirada pela natureza**. São Paulo: Cultrix, 2003.
- BEUTEL, J.; KUNDEL, H. L.; METTER, R. L. VAN (EDS.). **Handbook of medical imaging : physics and psychophysics**. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2000.
- BOLDUC, J.-F. *et al.* Finite-Element Analysis of Geometrical Factors in Micro-Indentation of Pollen Tubes. **Biomechanics and Modeling in Mechanobiology**, v. 5, n. 4, p. 227–236, out. 2006.
- BUDYNAS, R.; NISBETT, K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 10th. ed. New York: McGraw-Hill Science, 2014.
- BURGERT, I. Exploring the micromechanical design of plant cell walls. **American Journal of Botany**, v. 93, n. 10, p. 1391–1401, 2006.

- BUT, P. P. H.; CHIA, L. C. *Bambusa tuldooides* Munro. In: DRANSFIELD, S.; WIDJAJA, E. A. (Eds.). . **Plant Resources of South-East Asia No. 7: Bamboos**. Leiden (Netherlands): Backhuys Publishers, 1997. p. 72–74.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais : uma abordagem integrada**. 2a. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006.
- CARLQUIST, S. The Use of Ethylenediamine in Softening Hard Plant Structures for Paraffin Sectioning. **Stain Technology**, v. 57, n. 5, p. 311–317, jan. 1982.
- CAVE, I. D. The Anisotropic Elasticity of the Plant Cell Wall. **Wood Science and Technology**, v. 2, p. 268–278, 1968.
- CHAND, N.; SHUKLA, M.; SHARMA, M. K. Analysis of Mechanical Behaviour of Bamboo (*Dendrocalamus strictus*) by Using FEM. **Journal of Natural Fibers**, v. 5, n. 2, p. 127–137, maio 2008.
- CHUNG, K. F. F.; YU, W. K. K. Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. **Engineering Structures**, v. 24, n. 4, p. 429–442, abr. 2002.
- CIDADE, M. K.; PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JÚNIOR, W. Biônica como processo criativo : microestrutura do bambu como metáfora gráfica no design de joias contemporâneas. **Educação Gráfica (Online)**, v. 19, n. 1, p. 91–103, 2015.
- CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; RUIZ-SANCHEZ, E. Bamboo taxonomy and habitat. In: LIESE, W.; KÖHL, M. (Eds.). . **Bamboo : the plant and its uses**. Cham, SZ: Springer International Publishing, 2015. p. 1–30.
- COCUCCI, A. E.; MARIATH, J. E. A. Sexualidade das plantas. **Ciência Hoje**, v. 18, n. 106, p. 51–61, 1995.
- COLLI, A. *et al.* Physical and mechanical properties and preservation, with boron and tannin, of the *Bambusa tuldooides* (Munro). **Brazilian Journal of Forestry and Environment**, v. 14, n. 1, p. 56–64, 2007.
- DIXON, P. G. *et al.* Comparison of the structure and flexural properties of Moso, Guadua and Tre Gai bamboo. **Construction and Building Materials**, v. 90, p. 11–17, 2015.
- DIXON, P. G.; GIBSON, L. J. The structure and mechanics of Moso bamboo material. **Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society**, v. 11, n. 99, p. 20140321–20140321-, out. 2014.
- EMONOCOT. **Bambusa tuldooides Munro**. ICOMM. Disponível em: <<http://e-monocot.org/taxon/urn:kew.org:wcs:taxon:399090>>.
- ERLEY, D. S. 2,2-Dimethoxypropane as a Drying Agent for Preparation of Infrared Samples. **Analytical Chemistry**, v. 29, n. 10, p. 1564, out. 1957.
- ESTRADA, M.; LINERO, D. L.; RAMÍREZ, F. Constitutive relationship of the fiber cluster of bamboo *Guadua angustifolia*, determined by means of a Weibull probability function and a model of progressive failure. **Mechanics of Materials**, v. 63, n. 1, p. 12–20, 2013.
- EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Esau's plant anatomy : meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- FAHN, A. **Plant Anatomy**. Fourth ed. Oxford: Pergamon Press, 1990.
- FAISAL, T. R. *et al.* Computational study of the elastic properties of *Rheum rhabarbarum* tissues via

- surrogate models of tissue geometry. **Journal of Structural Biology**, v. 185, n. 3, p. 285–294, 2014.
- FERREIRA, C. V. *et al.* **Projeto de produto**. Rio de Janeiro: Elsevier - Abepro, 2011.
- FU, W. S. *et al.* Research on Finite Element Model for Parallel to Bamboo Culms Axial Shear. **Applied Mechanics and Materials**, v. 477–478, p. 986–989, dez. 2013.
- GHYKA, M. C. **The Geometry of Art and Life**. New York: Dover Publications, 1977.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. New York, NY: Springer New York, 2015.
- GIBSON, L. J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 9, n. 76, p. 2749–2766, nov. 2012.
- GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular solids : structure and properties**. 2nd. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.
- GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F.; HARLEY, B. A. **Cellular materials in nature and medicine**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- GLEASON, S. S.; PAULUS, M. J.; OSBORNE, D. Principles of Micro X-ray Computed Tomography. In: WEISSLEDER, R.; ROSS, B. D.; REHEMTULLA, A. (Eds.). **Molecular Imaging : Principles and Practice**. Shelton, CT: People's Medical Publishing House – USA, 2010. p. 54–75.
- GOLDSTEIN, J. *et al.* **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. 3. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2003.
- GOTTRON, J.; HARRIES, K. A.; XU, Q. Creep behaviour of bamboo. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 79–88, 2014.
- GUERREIRO, C. I.; LIZARAZU, M. A. Flowering of *Bambusa tuldoidea* (Poaceae, Bambusoideae, Bambuseae) in southern South America. **Darwiniana**, v. 48, n. 1, p. 25–31, 2010.
- HABIBI, M. K. *et al.* Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: Underlying mechanisms. **Acta Biomaterialia**, v. 16, p. 178–186, 2015.
- HAMANT, O. *et al.* Developmental Patterning by Mechanical Signals in Arabidopsis. **Science**, v. 322, n. 5908, p. 1650–1655, dez. 2008.
- HANKE, R. *et al.* X-ray microtomography for materials characterization. In: HÜBSCHEN, G. *et al.* (Eds.). **Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods**. Duxford, UK: Woodhead, 2016. p. 45–79.
- HERTRICH, P. **Practical radiography**. Erlangen, Germany: John Wiley & Sons, 2005.
- HIBBELER, R. C. **Mechanics of materials**. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2005.
- HORBENS, M. *et al.* Multi-scale simulation of plant stem reinforcement by brachysclereids: A case study in apple fruit peduncles. **Journal of Structural Biology**, 2015.
- HOSOKAWA, A. *et al.* Ductile fracture via hydrogen pore mechanism in an aluminum alloy; quantitative microstructural analysis and image-based finite element analysis. **Materials Science and Engineering: A**, v. 671, p. 96–106, 2016.

HUANG, R.; LI, P.; LIU, T. X-ray microtomography and finite element modelling of compressive failure mechanism in cenosphere epoxy syntactic foams. **Composite Structures**, v. 140, p. 157–165, 2016.

HÜBSCHEN, G. *et al.* (EDS.). **Materials characterization using Nondestructive Evaluation (NDE) methods**. Duxford, UK: Woodhead, 2016.

INKSON, B. J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In: HÜBSCHEN, G. *et al.* (Eds.). . **Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods**. Duxford, UK: Woodhead, 2016. p. 17–43.

JANSSEN, J. J. A. **Mechanical Properties of Bamboo**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991. v. 37

JIAN-ZHONG, Z.; JIU-GEN, W.; JIA-JU, M. Porous structures of natural materials and bionic design. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 6, n. 10, p. 1095–1099, 2005.

JIAO, H.; ZHANG, Y.; CHEN, W. The Lightweight Design of Low RCS Pylon Based on Structural Bionics. **Journal of Bionic Engineering**, v. 7, n. 2, p. 182–190, jun. 2010.

JUDD, W. S. *et al.* **Sistemática vegetal : um enfoque filogenético**. 3. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2009.

KEOGH, L. *et al.* Fatigue in bamboo. **International Journal of Fatigue**, v. 75, p. 51–56, 2015.

KINDLEIN JÚNIOR, W.; GUANABARA, A. S. Methodology for product design based on the study of bionics. **Materials & Design**, v. 26, n. 2, p. 149–155, abr. 2005.

KRAUS, J. E. *et al.* A Célula Vegetal. In: APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Eds.). . **Anatomia Vegetal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006. p. 31–86.

KUKACHKA, B. **Sectioning refractory woods for anatomical studies**. Madison Wis.: Dept. of Agriculture Forest Service Forest Products Laboratory, 1977.

KUROWSKI, P. M. **Finite Element Analysis for Design Engineers**. Warrendale, PA: SAE International, 2004.

LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomography. **Materials Characterization**, v. 61, n. 12, p. 1305–1316, dez. 2010.

LANGFORD, M. **Basic Photography**. 7. ed. Oxford: Focal Press, 2000.

LEFTERI, C. **Como se Faz : 92 Técnicas de Fabricação para Design de Produtos**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2013.

LEFTERI, C. **Materials for Design**. London: Laurence King Publishing, 2014.

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

LIESE, W. **The Anatomy of Bamboo Culms**. Beijing: BRILL, 1998.

LIESE, W.; KÖHL, M. (EDS.). **Bamboo : the plant and its uses**. Cham, SZ: Springer International Publishing, 2015.

LO, T. Y. *et al.* Strength analysis of bamboo by microscopic investigation of bamboo fibre. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1532–1535, 2008.

- LO, T. Y.; CUI, H. Z. Z.; LEUNG, H. C. C. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. **Materials Letters**, v. 58, n. 21, p. 2595–2598, ago. 2004.
- LONGHI-WAGNER, H. M. Poaceae: an overview with reference to Brazil. **Rodriguésia**, v. 63, n. 1, p. 089–100, mar. 2012.
- LOW, I. M.; CHE, Z. Y.; LATELLA, B. A. Mapping the structure, composition and mechanical properties of bamboo. **Journal of Materials Research**, v. 21, n. 8, p. 1969–1976, 2006.
- LU, Y.; CHIU, Y. L.; JONES, I. P. Three-dimensional analysis of the microstructure and bio-corrosion of Mg–Zn and Mg–Zn–Ca alloys. **Materials Characterization**, v. 112, p. 113–121, 2016.
- MA, J. *et al.* Elastic Buckling of Bionic Cylindrical Shells Based on Bamboo. **Journal of Bionic Engineering**, v. 5, n. 3, p. 231–238, set. 2008.
- MACNAB, M. **Design by Nature : Using Universal Forms and Principles in Design**. Berkeley, EUA: New Riders, 2011.
- MAIER, M. *et al.* Transfer of Natural Micro Structures to Bionic Lightweight Design Proposals. **Journal of Bionic Engineering**, v. 10, n. 4, p. 469–478, out. 2013.
- MALLICK, P. K. (ED.). **Composites Engineering Handbook**. New York: CRC Press, 1997.
- MARASHDEH, M. W. *et al.* Measurement of mass attenuation coefficients of *Rhizophora* spp. binderless particleboards in the 16.59–25.26 keV photon energy range and their density profile using x-ray computed tomography. **Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine**, v. 70, n. 4, p. 656–662, abr. 2012.
- MARASHDEH, M. W. *et al.* Determining the mass attenuation coefficient, effective atomic number, and electron density of raw wood and binderless particleboards of *Rhizophora* spp. by using Monte Carlo simulation. **Results in Physics**, v. 5, p. 228–234, 2015.
- MAUSETH, J. D. **Botany : An Introduction to Plant Biology**. Toronto: Jones & Bartlett Publishers, 2014.
- MCCLURE, F. A. **The Bamboos : a fresh perspective**. Cambridge, UK: Harvard University Press, 1966.
- MINKE, G. **Building with bamboo**. Basel, SZ: Birkhäuser, 2012.
- MORTENSEN, A. (ED.). **Concise encyclopedia of composite materials**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- MUNRO, W. A Monograph of the Bambusaceæ, including Descriptions of all the Species. **Transactions of the Linnean Society of London**, v. 26, n. 1, p. 1–157, abr. 1868.
- NACHTIGALL, W.; WISSER, A. **Bionics by examples : 250 scenarios from classical to modern times**. New York: Springer, 2014.
- NIKLAS, K. J. **Plant biomechanics : an engineering approach to plant form and function**. Chicago, EUA: University of Chicago Press, 1992.
- NOGATA, F.; TAKAHASHI, H. Intelligent functionally graded material: Bamboo. **Composites Engineering**, v. 5, n. 7, p. 743–751, 1995.
- OHRENBERGER, D. **The Bamboos of the World : Annotated Nomenclature and Literature of the Species and the Higher and Lower Taxa**. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1999.

- PALOMBINI, F. L. *et al.* Bionics and design: 3D microstructural characterization and numerical analysis of bamboo based on X-ray microtomography. **Materials Characterization**, v. 120, p. 357–368, 2016.
- PARK, B.-D. *et al.* Hardness evaluation of cured urea–formaldehyde resins with different formaldehyde/urea mole ratios using nanoindentation method. **European Polymer Journal**, v. 49, n. 10, p. 3089–3094, 2013.
- PENG, G. *et al.* Detection of complex vascular system in bamboo node by X-ray μ CT imaging technique. **Holzforschung**, v. 68, n. 2, p. 223–227, jan. 2014.
- PEREIRA, M. A. DOS R.; BARATA, T. Q. F. Bamboo as sustainable material used in design and civil construction : species, management, characterization and applications. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 339–350, dez. 2014.
- PEREIRA, M. A. DOS R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. 2. ed. Bauru, SP: Canal6, 2008.
- QIAN, M. *et al.* Finite element modelling of cell wall properties for onion epidermis using a fibre-reinforced hyperelastic model. **Journal of Structural Biology**, v. 172, n. 3, p. 300–304, 2010.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Raven Biology of Plants**. 8. ed. New York: W. H. Freeman, 2013.
- REDDY, J. N. **An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis**. New York: Cambridge University Press, 2004.
- RICH, P. M. Mechanical Structure of the Stem of Arborescent Palms. **Botanical Gazette**, v. 148, n. 1, p. 42–50, mar. 1987.
- SATTLER, K. D. (ED.). **Fundamentals of picoscience**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2013.
- SCHINDELIN, J. *et al.* Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. **Nature methods**, v. 9, n. 7, p. 676–682, jul. 2012.
- SCHMIDT, R.; LONGHI-WAGNER, H. M. A tribo Bambuseae (Poaceae, Bambusoideae) no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 7, n. 1, 2009.
- SCHULTZ, A. R. **Estudo prático da botânica geral**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1972.
- SEELIGER, H.-W. Manufacture of Aluminum Foam Sandwich (AFS) Components. **Advanced Engineering Materials**, v. 4, n. 10, p. 753–758, 14 out. 2002.
- SENSEN, C. W.; HALLGRÍMSSON, B. (EDS.). **Advanced imaging in biology and medicine : technology, software environments, applications**. New York: Springer Science & Business Media, 2009.
- SHARMA, B.; GATÓO, A.; RAMAGE, M. H. Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 95–101, 2015.
- SHRESTHA, R.; CREWS, K. I. **Development of engineered bamboo using a low tech method** 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. **Anais...** Byron Bay (Australia): Southern Cross University, 2014
- 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, nov. 2006.

SILVA, L. F. *et al.* Multiscale 3D characterization of discontinuities in underwater wet welds. **Materials Characterization**, v. 107, p. 358–366, set. 2015.

SILVA, F. P. DA. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. 2011. 192 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SINGH, S. S. *et al.* Three dimensional microstructural characterization of nanoscale precipitates in AA7075-T651 by focused ion beam (FIB) tomography. **Materials Characterization**, v. 118, p. 102–111, ago. 2016.

SMITH, L. B.; WASSHAUSEN, D. C.; KLEIN, R. M. Gramineae. In: REITZ, R. (Ed.). **Flora ilustrada Catarinense, Parte 1**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1981.

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica sistemática : guia ilustrado para identificação das famílias de fanerógamas nativas e exóticas do Brasil**. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2012.

STOCK, S. R. **MicroComputed tomography : methodology and applications**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2009.

STYLES, M.; COMPSTON, P.; KALYANASUNDARAM, S. The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures. **Composite Structures**, v. 80, n. 4, p. 532–538, 2007.

SUN, Y. *et al.* A Bamboo-Inspired Nanostructure Design for Flexible, Foldable, and Twistable Energy Storage Devices. **Nano Letters**, p. 150526093233005–150526093233005, 2015.

SVERGUN, D. I. *et al.* **Small angle X-ray and neutron scattering from solutions of biological macromolecules**. New York: Oxford University Press, 2013.

WANG, F. *et al.* The effect of elementary fibre variability on bamboo fibre strength. **Materials & Design**, v. 75, p. 136–142, jun. 2015.

WANG, R.; JIAO, Q.-Y.; WEI, D.-Q. Mechanical Response of Single Plant Cells to Cell Poking: A Numerical Simulation Model. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 48, n. 6, p. 700–705, jun. 2006.

WANG, X. *et al.* Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 9, n. 70, p. 988–996, maio 2012.

WEGST, U. G. K. Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and wood-based composites. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 4, n. 5, p. 744–755, 2011.

WEGST, U. G. K.; ASHBY, M. F. The structural efficiency of orthotropic stalks, stems and tubes. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 21, p. 9005–9014, 2007.

WICKE, M. *et al.* Characterization of Casting Pores in Fe-rich Al-Si-Cu Alloys by Microtomography and Finite Element Analysis. **Procedia Structural Integrity**, v. 2, p. 2643–2649, 2016.

YU, Y. *et al.* Mechanical characterization of single bamboo fibers with nanoindentation and

microtensile technique. **Holzforschung**, v. 65, n. 1, p. 113–119, 2011.

ZHAO, L. *et al.* Structural Bionic Design and Experimental Verification of a Machine Tool Column. **Journal of Bionic Engineering**, v. 5, p. 46–52, set. 2008.

ZHAO, L. *et al.* Lightweight Design of Mechanical Structures based on Structural Bionic Methodology. **Journal of Bionic Engineering**, v. 7, p. 224–231, set. 2010.

ZHAO, L. *et al.* Lightweight Design and Verification of Gantry Machining Center Crossbeam Based on Structural Bionics. **Journal of Bionic Engineering**, v. 8, n. 2, p. 201–206, jun. 2011.

ZHOU, A. *et al.* Hybrid approach to determine the mechanical parameters of fibers and matrixes of bamboo. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 191–196, 2012.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The Finite Element Method : it's basis and fundamentals**. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

ZOU, L. *et al.* Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers. **Materials Science and Engineering: C**, v. 29, n. 4, p. 1375–1379, 2009.

ZOU, M. *et al.* A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo. **Thin-Walled Structures**, v. 101, p. 222–230, abr. 2016.