



**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

**DIRETRIZES PARA PESQUISAS EM MATERIAIS VEGETAIS COM ANÁLISES  
POR ELEMENTOS FINITOS BASEADAS EM MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X  
E IMPLICAÇÕES PARA PROJETOS DE BIÔNICA EM DESIGN E ENGENHARIA**

Tese de Doutorado

Porto Alegre

2020

**FELIPE LUIS PALOMBINI**

**Diretrizes para pesquisas em materiais vegetais com análises por elementos finitos baseadas em microtomografia de raios X e implicações para projetos de biônica em design e engenharia**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Branca Freitas de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Ernesto de Araujo Mariath

Porto Alegre

2020

**Felipe Luis Palombini**

**DIRETRIZES PARA PESQUISAS EM MATERIAIS VEGETAIS COM ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS BASEADAS EM MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X E IMPLICAÇÕES PARA PROJETOS DE BIÔNICA EM DESIGN E ENGENHARIA**

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

Porto Alegre, 30 de novembro de 2020.

---

**Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

**Banca Examinadora:**

---

Orientadora: **Prof.<sup>a</sup> Dra. Branca Freitas de Oliveira**

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG/UFRGS)

---

Coorientador: **Prof. Dr. Jorge Ernesto de Araujo Mariath**

Departamento de Botânica (DEBOT/UFRGS)

---

**Prof.<sup>a</sup> Dra. Fernanda Mayara Nogueira**

Campus Oriximiná (CORI/UFOPA) – Examinadora Externa

---

**Prof.<sup>a</sup> Dra. Alexandra Antunes Mastroberti**

Departamento de Botânica (DEBOT/UFRGS) – Examinadora Externa

---

**Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior**

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

---

**Prof. Dr. Renato Vaz Linn**

Departamento de Engenharia Civil (DECIV/UFRGS) – Examinador Interno

## AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente meus pais, Lia e Antônio, e minha amada companheira Mariana, pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus queridos orientadores, Prof.<sup>a</sup> Branca e Prof. Mariath, por todo o conhecimento a mim transmitido durante todos estes anos. Prof.<sup>a</sup> Branca, muito obrigado pela confiança plena em meu trabalho, sua atenção, carinho e prontidão, bem como pelo incentivo para vencermos todos os desafios que encontramos nesta trajetória e para sempre buscarmos a realização de pesquisas de excelência. Prof. Mariath, muito obrigado por seu entusiasmo contagiante, por ser um mestre cordial, amável e animado em todos os momentos, e por sua grande sabedoria, ainda que sempre unida a uma sede por novas tecnologias e descobertas. Foi um prazer e um verdadeiro privilégio ser orientado por vocês.

Ao querido Prof. Wilson, por todos os ensinamentos, carinho e orientações, tanto acadêmicas quanto de vida. Agradeço eternamente não somente por propiciar meu primeiro vínculo como bolsista de Iniciação Tecnológica, mas por me contagiar com a vontade de publicar e de sempre crescer como pesquisador.

Ao Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg/UFRGS), por além da disponibilização da Workstation – sem a qual os ensaios desta tese não teriam sido realizados – pelo caloroso acolhimento deste designer, pelos ensinamentos de métodos e técnicas essenciais, bem como por propiciar um ambiente cordial, empolgante e sempre aberto a novas áreas de pesquisa. Ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS), por me receber no início da minha trajetória acadêmica e por sempre manter as portas abertas no espírito de coletividade e crescimento conjunto, sempre com multidisciplinaridade e competência. A todos os professores, técnicos e colegas do LAVeg e do LdSM, muito obrigado pela convivência, e em especial à querida amiga Fernanda Nogueira pela grande parceria científica ao longo destes anos.

Ao Prof. Sidnei Paciornik (DEQM/PUC-Rio) pela disponibilização e assistência com as análises de microtomografia computadorizada de Raios X, bem como pela prontidão em me

auxiliar com análises e as revisões de trabalhos.

Ao corpo docente e funcionários 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.

### CIP - Catalogação na Publicação

Palombini, Felipe Luis

Diretrizes para pesquisas em materiais vegetais com análises por elementos finitos baseadas em microtomografia de raios X e implicações para projetos de biônica em design e engenharia / Felipe Luis Palombini. -- 2020.

196 f.

Orientadora: Branca Freitas de Oliveira.

Coorientador: Jorge Ernesto de Araujo Mariath.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Design & Tecnologia. 2. MicroCT. 3. Elementos Finitos. 4. Métodos numéricos. 5. Anatomia vegetal. I. Oliveira, Branca Freitas de, orient. II. Mariath, Jorge Ernesto de Araujo, coorient. III. Título.

## RESUMO

PALOMBINI, F. L. **Diretrizes para pesquisas em materiais vegetais com análises por elementos finitos baseadas em microtomografia de raios X e implicações para projetos de biônica em design e engenharia.** 2020. 196 f. Tese (Doutorado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

A combinação de análises morfológicas e por elementos finitos (FEA) baseadas em imagens de microtomografia de raios X ( $\mu$ CT) representa uma das mais avançadas abordagens para estudo 3D de materiais de maneira não-invasiva e de alta resolução, tendo seu uso crescente nos últimos anos para diversos ramos da ciência. Contudo, é notável o ainda pouco explorado uso de FEA e  $\mu$ CT para materiais de origem vegetal. De maneira relacionada, o profissional em design possui potencial para trabalhar com pesquisadores de diversas áreas, promovendo o uso de novas tecnologias que possam conduzir a resultados inovadores. Desse modo, esta tese apresenta o desenvolvimento de diretrizes gerais para auxiliar pesquisadores a trabalhar com a investigação por meio de FEA baseada em  $\mu$ CT, com foco em materiais vegetais. Com uma revisão teórica sobre os principais tópicos relacionados às técnicas, desde o papel do designer em pesquisas, a importância da investigação de materiais de origem vegetal, os fundamentos de  $\mu$ CT e de FEA baseada em bioimagens, foram fundamentados e seguidos três estudos de caso de pesquisa científica, levando a novas interpretações sobre a morfologia, estrutura, e funcionalidade de amostras vegetais e de dois estudos de caso de aplicações das informações obtidas em projetos de biônica de design e engenharia. Os resultados incluem contribuições científicas, oriundas dos estudos de caso, e de contribuições técnicas, relacionadas à escolha dos métodos mais adequados para as análises de  $\mu$ CT e FEA. Por fim, foram desenvolvidas diretrizes básicas para auxiliar demais pesquisadores no que diz respeito à preparação de amostras, realização da digitalização por  $\mu$ CT, pós-processamento de imagens, discretização de malhas e execução de análises por elementos finitos.

**Palavras-chave:** Design & Tecnologia. MicroCT. Elementos Finitos. Métodos numéricos. Anatomia vegetal.

## ABSTRACT

PALOMBINI, F. L. **Diretrizes para pesquisas em materiais vegetais com análises por elementos finitos baseadas em microtomografia de raios X e implicações para projetos de biônica em design e engenharia.** 2020. 196 f. Tese (Doutorado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Combining morphological and finite element (FEA) analyses based on X-ray microtomography imaging ( $\mu$ CT) represents one of the most advanced approaches to non-invasive and high-resolution 3D studies of materials, showing an increased use in recent years for several fields of science. However, the still little explored application of FEA and  $\mu$ CT for materials of plant origin is noteworthy. In a related way, designer has shown a potential to work with researchers from different areas, by promoting the use of new technologies that could lead to innovative results. Thus, this thesis presents the development of general guidelines to assist scientists working with investigations by means of FEA based on  $\mu$ CT, focusing on plant materials. With a theoretical review on the main topics related to the techniques, from the role of the designer in researches, the importance of the investigation of plant materials, the fundamentals of  $\mu$ CT, and FEA based on bioimaging, three case studies of scientific research were substantiated and followed, leading to new interpretations regarding the morphology, structure, and functionality of plant samples, and two case studies of application of the gathered information into bionic projects of design and engineering. Results include scientific contributions from the case studies and technical contributions related to the selection of the most appropriate methods for the analysis of  $\mu$ CT and FEA. Finally, basic guidelines were developed aiming to assist other researchers in the preparation of samples, the execution of  $\mu$ CT scanning, post-processing of images, discretization of meshes and conduction of finite element analysis.

**Keywords:** Design & Technology. MicroCT. Finite Elements. Numerical methods. Plant anatomy.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A_c$	Área da superfície de uma célula
$a_{R_i}$	Área segmentada de uma região $i$
$\gamma$	Relação de potência entre a densidade relativa e o módulo elástico
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	Deformações de cisalhamento
$c$	Velocidade da luz
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (dispositivo de carga acoplada)
CFE	<i>Crush Force Efficiency</i> (eficiência de força de impacto)
CT	<i>Computed Tomography</i> (tomografia computadorizada)
$\delta$	Componente da mudança de fase
$\delta_0$	Deslocamento inicial
$\delta_{max}$	Deslocamento máximo
$\Delta\delta$	Intervalo de deslocamento
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i> (imagem e comunicação digitais em medicina)
$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$	Deformações normais
$e$	Elemento de <i>voxel</i>
$E$	Energia
$E'$	Energia do elétron desviado
$E^*$	Módulo elástico efetivo
$E_e$	Módulo elástico de um elemento de <i>voxel</i>
$E_{ej}$	Energia cinética do elétron ejetado
$E_l$	Energia de ligação do elétron
$E_{fe}$	Energia cinética do fotoelétron livre

<b><i>eV</i></b>	Elétron-volt
<b><i>E<sub>p</sub></i></b>	Módulo elástico do parênquima
<b><i>E<sub>S</sub></i></b>	Módulo elástico da parede celular sólida do bambu
<b><i>E<sub>Sc</sub></i></b>	Módulo elástico do esclerênquima
<b><i>E<sub>total</sub></i></b>	Energia total absorvida
<b><i>f</i></b>	Frequência
<b><i>F(δ)</i></b>	Força registrada por deslocamento
<b><i>F<sub>m</sub></i></b>	Força média
<b><i>F<sub>peak</sub></i></b>	Pico de força inicial
<b>FAA</b>	Formaldeído, ácido acético e etanol
<b>FEA</b>	<i>Finite Element Analysis</i> (análise por elementos finitos)
<b>FoV</b>	<i>Field of View</i> (campo de visão)
<b><i>η</i></b>	Eficiência
<b><i>h</i></b>	Constante de Planck
<b>Hz</b>	Hertz
<b><i>i</i></b>	Nível de cinza 8-bit de um <i>voxel</i>
<b><i>i<sub>min</sub></i></b>	Nível de cinza 8-bit mínimo de um <i>voxel</i>
<b><i>I</i></b>	Intensidade da corrente
<b><i>I<sub>o</sub></i></b>	Intensidade original de um feixe de raios X
<b><i>I<sub>R</sub></i></b>	Intensidade da radiação após atravessar um objeto
<b><i>K, L, M, N...</i></b>	Camadas de elétrons
<b><i>K<sub>α</sub>, K<sub>β</sub>, K<sub>γ</sub></i></b>	Radiações características da camada de elétrons <b><i>K</i></b>
<b><i>keV</i></b>	Quiloelétron-volt
<b><i>kV</i></b>	Quilovolt

$\lambda$	Comprimento de onda
$L$	Carga
$L_v$	Resolução espacial
$mA$	Miliampère
$\mu$	Coefficiente de atenuação linear
$\mu_{compt}$	Coefficiente de atenuação devido ao efeito Compton
$\mu_{fe}$	Coefficiente de atenuação devido ao efeito fotoelétrico
$\mu_{ray}$	Coefficiente de atenuação devido ao espalhamento de Rayleigh
$\mu_{pp}$	Coefficiente de atenuação devido à produção por pares
$\mu_T$	Coefficiente de atenuação total
$\mu/\rho$	Coefficiente de atenuação de massa
$\mu CT$	<i>MicroComputed Tomography</i> (microtomografia computadorizada de raios X)
$MeV$	Megaelétron-volt
$ml$	Mililitro
$\mu m$	Micrômetro
$n$	Densidade de elétrons
$n_i$	Número de <i>voxels</i> com um valor $i$ de nível de cinza 8-bit
$N$	Número da contagem total de <i>voxels</i> com níveis de cinza diferente de 0
$P$	Potência do feixe
$\rho$	Densidade
$\rho^*$	Densidade do material celular
$\rho_s$	Densidade do sólido do qual o material celular é feito
$\rho x$	Espessura de massa
$(\rho^*/\rho_s)$	Densidade relativa

$(\rho^*/\rho_s)_P$	Densidade relativa do parênquima
$(\rho^*/\rho_s)_{Sc}$	Densidade relativa do esclerênquima
<b>Rad</b>	Dose de radiação
<b>ROI</b>	<i>Region of Interest</i> (região de interesse)
<b>S<sub>1</sub>; S<sub>2</sub>; S<sub>3</sub></b>	Camadas da parede celular secundária
<b>SEA</b>	<i>Specific Energy Absorption</i> (energia de absorção específica)
<b>STL</b>	<i>Stereolithography</i> (estereolitografia)
$\sigma_{compt}$	Seção de choque total do efeito Compton
$\sigma_P$	Resistência à compressão axial do parênquima
$\sigma_P^*$	Resistência à compressão axial efetiva do parênquima
$\sigma_{Sc}$	Resistência à compressão axial do esclerênquima
$\sigma_{fs}$	Módulo de ruptura da parede celular sólida do bambu
$\sigma_s$	Resistência à compressão da parede celular sólida do bambu
$\sigma_{VM_e}$	Tensão von Mises de cada elemento de <i>voxel</i>
<b>TIFF</b>	<i>Tagged Image File Format</i> (formato de arquivo de imagem rotulado)
$\varphi$	Porosidade da região
$\psi$	Esfericidade de uma partícula
<b>V</b>	Tensão
<b>V<sub>c</sub></b>	Volume de uma célula
<b>V<sub>R</sub></b>	Volume total de uma região
<b>V<sub>V</sub></b>	Volume de espaços vazios
<b>W</b>	Watt
<b>v</b>	Coefficiente de Poisson
<b>Z</b>	Número atômico

## LISTA DE EQUAÇÕES

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

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

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

$$(4) \quad \sigma_P = 0,3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_S}\right)_P^{3/2} \sigma_{fs}$$

$$(5) \quad \sigma_{Sc} = \left(\frac{\rho^*}{\rho_S}\right)_{Sc} \sigma_S$$

$$(6) \quad E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$(7) \quad L_v \propto Rad^3$$

$$(8) \quad I_R = I_0 e^{-\mu x}$$

$$(9) \quad I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x}$$

$$(10) \quad E = E_l + E_{fe}$$

$$(11) \quad \mu_{fe} \propto Z^4 \lambda^3$$

$$(12) \quad E = E_e + E'$$

$$(13) \quad \mu_{compt} = n \cdot \sigma_{compt}$$

$$(14) \quad \mu_{ray} \propto \frac{1}{E^2} \propto Z^2$$

$$(15) \quad \mu_{pp} \propto Z^2$$

$$(16) \quad \mu_T = \mu_{fe} + \mu_{compt} + \mu_{ray} + \mu_{pp}$$

$$(17) \quad \psi = \left( \frac{36 \pi V_c^2}{A_c^3} \right)^{1/3}$$

$$(18) \quad E_e = \left( \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}} \right)_e^2 E_s$$

$$(19) \quad E^* = \frac{E_s}{N} \sum_{i=a}^b \left( \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}} \right)^y n_i$$

$$(20) \quad \sigma_p^* = 0.3 \frac{\sigma_{fs}}{N} \sum_{i=a}^b \left( \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}} \right)^y n_i$$

$$(21) \quad \eta = \frac{L}{m}$$

$$(22) \quad F_m = \frac{E_{total}}{\Delta\delta}$$

$$(23) \quad E_{total} = \int_{\delta_0}^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta$$

$$(24) \quad CFE = \frac{F_m}{F_{peak}}$$

$$(25) \quad SEA = \frac{E_{total}}{m}$$

$$(26) \quad \sigma_{xx} = \frac{E_e}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{yy} + \nu\varepsilon_{zz}]$$

$$(27) \quad \sigma_{yy} = \frac{E_e}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\nu\varepsilon_{xx} + (1-\nu)\varepsilon_{yy} + \nu\varepsilon_{zz}]$$

$$(28) \quad \sigma_{zz} = \frac{E_e}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\nu\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{yy} + (1-\nu)\varepsilon_{zz}]$$

$$(29) \quad G_e = \frac{E_e}{2(1+\nu)}$$

$$(30) \quad \tau_{xy} = G_e \gamma_{xy}$$

$$(31) \quad \tau_{yz} = G_e \gamma_{yz}$$

$$(32) \quad \tau_{zx} = G_e \gamma_{zx}$$

$$(33) \quad \sigma_{VM_e} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}$$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Formulação do problema</b> .....	<b>24</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>24</b>
1.3.1	Objetivo geral .....	24
1.3.2	Objetivos específicos .....	24
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da tese e principais métodos seguidos</b> .....	<b>25</b>
1.4.1	Ensaio em equipamentos de $\mu$ CT.....	26
1.4.2	Preparação de amostras e processamento de imagens.....	27
1.4.3	Caracterização e análises por elementos finitos .....	28
1.4.4	Compilação e desenvolvimento de diretrizes.....	29
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>30</b>
<b>2.1</b>	<b>Design, tecnologias 3D e pesquisas científicas</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2</b>	<b>Pesquisa em materiais vegetais e implicações para design e engenharia</b> .....	<b>34</b>
2.2.1	Propriedades mecânicas de tecidos vegetais .....	37
2.2.2	Propriedades termofísicas de tecidos vegetais .....	39
2.2.3	Biônica e estudos morfológicos .....	40
<b>2.3</b>	<b>Microtomografia Computadorizada de Raios X (<math>\mu</math>CT)</b> .....	<b>43</b>
2.3.1	Geração de raios X .....	45
2.3.2	Fatores de influência no espectro de raio X .....	47
2.3.3	Atenuação da radiação .....	51
2.3.4	Mecanismos de contraste.....	56
2.3.5	Pós-processamento, filtros de imagem e caracterização .....	60
<b>2.4</b>	<b>Análise por Elementos Finitos (FEA) baseada em bioimagens</b> .....	<b>65</b>
2.4.1	Segmentação de bioimagem .....	67
2.4.2	Protocolos de discretização .....	70
2.4.3	Tipos de análises para amostras vegetais.....	75
<b>2.5</b>	<b>Desenvolvimento de diretrizes</b> .....	<b>77</b>
<b>3</b>	<b>ESTUDOS DE CASO – PESQUISA EM MATERIAIS VEGETAIS COM TECNOLOGIAS 3D</b> .....	<b>79</b>
<b>3.1</b>	<b>Comparação dos métodos de discretização de imagens de <math>\mu</math>CT</b> .....	<b>79</b>
3.1.1	Material e métodos .....	79
3.1.2	Resultados.....	89
3.1.3	Discussão .....	96

<b>3.2</b>	<b>Análise morfoestrutural do sistema vascular da região nodal do bambu .....</b>	<b>101</b>
3.2.1	Material e métodos .....	103
3.2.2	Resultados e discussão .....	107
<b>3.3</b>	<b>Análise térmica do papel da água na inflorescência-tanque de bromélia.....</b>	<b>116</b>
3.3.1	Materiais e métodos.....	116
3.3.2	Resultados.....	121
3.3.3	Discussão .....	125
<b>4</b>	<b>ESTUDOS DE CASO – APLICAÇÕES EM PROJETOS DE BIÔNICA .....</b>	<b>128</b>
<b>4.1</b>	<b>Design de estrutura biônica de paredes finas .....</b>	<b>128</b>
4.1.1	Projeto da estrutura biônica .....	129
4.1.2	Resultados e discussão .....	140
<b>4.2</b>	<b>Design de garrafa térmica bioinspirada na inflorescência-tanque de bromélias.....</b>	<b>151</b>
4.2.1	Projeto da garrafa térmica bioinspirada.....	151
4.2.2	Resultados e discussão .....	157
<b>5</b>	<b>DIRETRIZES GERAIS PARA UTILIZAÇÃO DE <math>\mu</math>CT E FEA EM MATERIAIS VEGETAIS .....</b>	<b>160</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>168</b>
	<b>PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA TESE .....</b>	<b>172</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>173</b>
	<b>APÊNDICE A – Dimensões das seções transversais das estruturas de núcleo único.....</b>	<b>189</b>
	<b>APÊNDICE B – Dimensões das estruturas de paredes finas das análises explícitas.....</b>	<b>190</b>
	<b>APÊNDICE C – Resumo dos resultados da análise explícita .....</b>	<b>193</b>
	<b>ANEXO A – Cálculo das tensões von Mises no VOX-FE a partir da Lei de Hooke.....</b>	<b>195</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia é definida por Groover (2012) como a utilização da ciência para suprir à sociedade os elementos necessários à sua sobrevivência e anseios. Industrialmente, está diretamente associada à rapidez e à facilidade de acesso a inovações, tornando-se inclusive determinante para o sucesso ou fracasso de empresas (BAXTER, 2000). Paralelamente, devido às grandes possibilidades oriundas do avanço tecnológico, é notável um crescimento do estudo de materiais e processos nas áreas de design e engenharia, principalmente relacionadas a métodos de alta resolução (CALLISTER *et al.*, 2006; LESKO, 2012). Novas tecnologias para análise física e caracterização 3D têm ganhado destaque em diversos campos da ciência, principalmente as relacionadas à microtomografia computadorizada de raios X (HANKE *et al.*, 2016; STOCK, 2009). Desse modo, o desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias de alta resolução podem tanto redefinir os conhecimentos existentes de materiais, quanto auxiliar no seu melhor uso.

A tecnologia para estudo e processamento de materiais naturais está intimamente ligada a projetos de design, acompanhando toda a trajetória da humanidade, que observa e faz seu uso como matéria prima (HESKETT, 2008; LIMA, 2006). Dentre os materiais mais eficientes e complexos em termos de estrutura e, ao mesmo tempo, mais importantes para o desenvolvimento industrial e científico encontram-se os de origem vegetal (ASHBY; JOHNSON, 2011). Há milênios, madeiras e fibras vegetais têm sido utilizadas para a construção e fabricação de estruturas, armas, ferramentas, embarcações, instrumentos musicais, etc. (MAUSETH, 2013). Análises morfológicas, estruturais e genéticas de diversas espécies de plantas contribuem constantemente para o desenvolvimento de novas fontes de alimentos e energia, como o milho e a cana-de-açúcar (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). De mesmo modo, o advento de novas tecnologias de observação teve papel fundamental para compreensão funcional de tecidos e células vegetais – a cortiça foi um dos primeiros materiais observados, com o aperfeiçoamento da microscopia e a definição celular por Robert Hooke, em 1664 (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; WOJTASZEK, 2011). Assim, o sucesso da utilização dos materiais de origem vegetal e/ou de suas formas construtivas e estruturais (biomimética e biônica) em projetos de design e engenharia está relacionada ao desenvolvimento científico bem como aos processos de caracterização e análise (ASHBY; FERREIRA; SCHODEK, 2009; MEYERS; CHEN, 2014).

De modo geral, os materiais naturais são mais variáveis em propriedades e em desempenho que suas alternativas sintéticas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Os diversos níveis de hierarquia estrutural, em escalas macro, micro e nanométrica, tornam os materiais de origem vegetal compósitos com organização microestrutural de grande complexidade, ainda que formados em grande parte por quatro tipos básicos de elementos constitutivos: celulose, hemiceluloses, pectinas e lignina (FAHN, 1990; GIBSON, 2012). São seus diferentes arranjos e distribuições que conferem as propriedades de interesse dos materiais vegetais. Para pesquisar os meios mais adequados de utilizá-los em projetos de produto e engenharia com base em suas propriedades, pode-se destacar a seleção de materiais, em que suas características técnicas, funcionais e, até, intangíveis são comparadas e ranqueadas (ASHBY; JOHNSON, 2011).

Além de aproveitar milhões de anos de aperfeiçoamento natural, com o uso direto dos materiais vegetais, é possível ainda estudar e extrair informações técnico-morfológicas para uso em projetos de design e engenharia. A biônica é o ramo da ciência responsável por investigar, padronizar e aplicar propriedades estruturais, funcionais e estéticas de elementos naturais (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). Para tanto, é essencialmente fundamentada em meios de observação, caracterização e análise, para correta interpretação e definição dos efeitos estudados. Desse modo, com os diversos níveis estruturais existentes, as tecnologias 3D de alta resolução representam um grande potencial tanto de seleção como de investigação dos materiais naturais (ASHBY; FERREIRA; SCHODEK, 2009; MEYERS; CHEN, 2014).

Aliada às tecnologias 3D e métodos de investigação de alta resolução encontram-se as análises numéricas. Ao contrário do método experimental, os métodos baseados em elementos finitos permitem maior controle de variáveis, além de investigações em diversas escalas (BATHE, 1996; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). Em materiais de origem vegetal, o uso do método de elementos finitos contribui tanto para novos conhecimentos funcionais da microestrutura de plantas (ONODA; SCHIEVING; ANTEN, 2015) e para uso em projetos de biônica (HUANG; XU, 2019), quanto para a análise e melhoria de seus caracteres fenotípicos<sup>1</sup> visando ao aumento do desempenho agrícola (FORELL *et al.*, 2015).

A caracterização é um dos principais pilares da ciência e engenharia para observação e análise microestrutural de materiais, bem como sua melhor aplicação (CALLISTER *et al.*, 2006). O uso de tecnologias de resolução em escalas micro e nanométricas está levando a mudanças

---

<sup>1</sup> A aparência física de um organismo, resultando da interação entre a constituição genética (genótipo) do organismo e seu ambiente (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

profundas no design e engenharia, com grandes impactos em diversas indústrias (ASHBY; FERREIRA; SCHODEK, 2009). Contudo, o desenvolvimento tecnológico para caracterização microestrutural de materiais de origem vegetal depende tanto do entendimento avançado dos processos utilizados quanto de sua adaptação para amostras específicas. As etapas de aplicação de tecnologias 3D de alta resolução requerem equipes multidisciplinares para a caracterização adequada destes materiais (ASHBY; JOHNSON, 2011; HÜBSCHEN *et al.*, 2016).

Na pesquisa científica, cada vez mais tem se observado a presença de áreas distintas trabalhando em conjunto, com popularização de termos como multidisciplinaridade, interdisciplinaridade e transdisciplinaridade (PAIN, 2003). Apesar de se caracterizar por pesquisas de maior impacto científico (OKAMURA, 2019), a multidisciplinaridade tende a receber maiores resistências com relação a financiamentos científicos em comparação com pesquisas monodisciplinares (BROMHAM; DINNAGE; HUA, 2016). Além disso, uma das principais dificuldades encontradas em equipes multidisciplinares é a necessidade de se desenvolver uma linguagem comum, em que é verificada a importância de se definir um vocabulário e conhecimentos para uso compartilhado (BRACKEN; OUGHTON, 2006). Deste modo, o designer também possui um significativo papel em buscar uma intermediação entre equipes, além de contribuir como um meio facilitador ao uso de tecnologias inovadoras.

Em disciplinas clássicas como ciências biológicas, a presença de equipes multidisciplinares, juntamente com o advento de novas tecnologias, pode contribuir para o avanço em pesquisas as quais muitas vezes levam a novas descobertas (PALOMBINI *et al.*, 2017). Igualmente, a presença de uma base curricular voltada a abordagens holísticas apresenta-se como um novo objetivo em instituições de ensino de vanguarda (PAIN, 2003). A exemplo, tem-se o relatório americano de 2003, intitulado “*Bio2010: Transforming Undergraduate Education for Future Research Biologists*” (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2003), da Academia Nacional de Ciências, a Academia Nacional de Engenharia, o Instituto de Medicina e o Conselho Nacional de Pesquisas, fortemente recomenda que estudantes de biologia estudem disciplinas variadas como matemática, física, química, ciências da computação e engenharia, até o ponto em que “o pensamento e trabalho interdisciplinar tornem-se uma segunda natureza” (PAIN, 2003; SANTOS, 2015). Uma linha de pensamento similar é seguida pelo espectro da educação STEAM (do inglês: *Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics*), em que a arte foi inserida no acrônimo STEM. Inicialmente foi desenvolvido nos anos 1990 como SMET, pelo *National Science Foundation*, sendo posteriormente reajustado para STEM pela bióloga americana

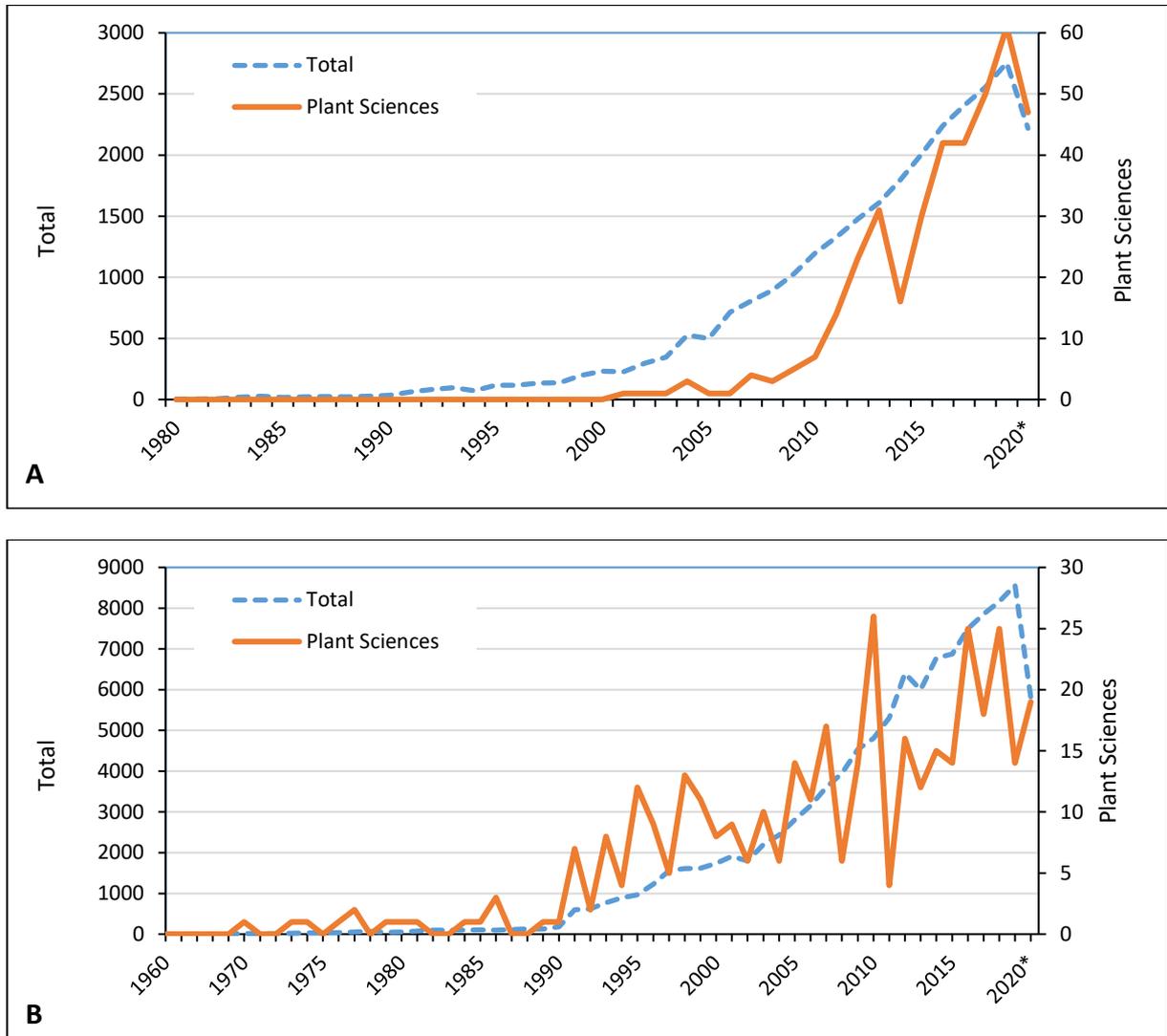
Judith Ramaley em 2001, na mesma instituição (HALLINEN, 2019). Fundamentalmente, a inclusão das artes em educação tradicional pode remeter a tempos históricos de filosofia clássica, em que atributos estéticos já eram de grande importância em desenvolvimento de projetos e estudos, necessitando-se, assim um constante envolvimento de abordagens holísticas (WATSON, ANDREW D.; WATSON, 2013).

Para auxiliar equipes de pesquisa e desenvolvimento de indústrias além do meio acadêmico a analisar aspectos microestruturais de materiais de origem vegetal, esta proposta de pesquisa pretende desenvolver diretrizes com base nos métodos de elementos finitos baseados em imagens de microtomografia. A pesquisa foi conduzida de modo a unir conhecimentos teórico-científicos sobre as técnicas de caracterização 3D de alta resolução, juntamente com as etapas práticas de aquisição, tratamento de imagens, segmentação e discretização para análises por elementos finitos.

### 1.1 Justificativa

A técnica de microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ CT) pertence ao estado da arte dos meios de caracterização 3D e análise de materiais, devido à sua grande resolução espacial, sua característica não-invasiva e sua capacidade de interação com métodos de análise numérica (HANKE *et al.*, 2016; STOCK, 2009), como por elementos finitos (FEA). Contudo, apesar do crescente número de pesquisas com essa tecnologia, poucas estão relacionadas à análise de plantas. Como exemplo, a figura 1 apresenta um comparativo anual de artigos publicados com termos relacionados à  $\mu$ CT (figura 1A, de 1980 a 2020\*, sendo o registro de 2020 ainda com registro em andamento) e à FEA (figura 1B), de 1960 a 2020\*) na área de botânica (*Plant Sciences*) em comparação com as demais áreas (Total), de acordo com registro na plataforma Web of Science™. Apesar de um aumento significativo na última década, os trabalhos sobre  $\mu$ CT (figura 1A) em áreas de estudo de plantas correspondem a apenas 0,72% do total. Mesmo considerando demais campos relacionados às ciências agrárias, agrônomas e florestais, incluindo pesquisas econômicas, multidisciplinares e de engenharia, os trabalhos correspondem a 1,35% do total. Já com relação à FEA (figura 1B), o resultado é ainda mais distinto, com apenas 0,02% de artigos correspondentes à área específica de *Plant Sciences*, e 0,353% considerando as demais áreas relacionadas.

Figura 1 – Artigos publicados registrados na plataforma Web of Science™, em todas as áreas (*Total*) na área de botânica (*Plant Sciences*): (A) entre 1980–2020\*, que incluem termos relacionados à  $\mu$ CT; e (B) entre 1960–2020\*, que incluem termos relacionados à FEA. \*O ano de 2020 ainda se encontra com registros em andamento.



FONTE: Autor (2020).

Ainda que o potencial de aplicação da tecnologia de  $\mu$ CT, ou mesmo de FEA, permita diferentes tipos de análises e contribuições, seu uso parece pouco explorado (BRODERSEN; RODDY, 2016). Uma vez que materiais vegetais também apresentam interessantes soluções para projetos de design e engenharia, tanto por meio de biônica como por seleção de materiais, maiores investigações nessa área levariam a contribuições para diversos campos da ciência e indústrias. Algumas dificuldades intrínsecas do uso de métodos baseados em tomografia computadorizada em plantas podem estar impedindo um número maior de pesquisas e, conseqüentemente, publicações e aplicações na indústria. Entre as quais é possível citar o baixo contraste obtido ao analisar este tipo de amostra (STAEDLER; MASSON; SCHÖNENBERGER,

2013), a baixa densidade total e relativa do material (PALOMBINI *et al.*, 2016) e a consequente escolha de parâmetros otimizados de potência de feixe, tempo de exposição e resolução para essas condições (DHONDT *et al.*, 2010). As dificuldades citadas podem ser correlacionadas uma vez que as projeções radiográficas de  $\mu$ CT são essencialmente baseadas na atenuação da radiação através da densidade da amostra. Desse modo, como as plantas possuem pouca variação de densidade entre os tecidos constituintes em crescimento primário, torna-se necessária a aplicação de diversas configurações particulares para bons resultados nas aquisições (PALOMBINI, 2016). Já com relação a análises por elementos finitos, algumas dificuldades relacionadas a definições nos tipos de análises, na discretização de volumes ou definição de condições de contorno também pode contribuir para a pouca abrangência da técnica nestas áreas.

Além da escolha dos parâmetros do equipamento, as etapas relacionadas às análises morfológica (qualitativa), numérica (quantitativa) e por elementos finitos também necessitam de processamentos específicos (PALOMBINI, 2016). As imagens sequenciais obtidas por meios de tomografia são compostas por *voxels* em níveis de cinza e precisam ser ajustadas e convertidas para outras extensões para serem analisados (RUSS; NEAL, 2016). A exemplo, o processo de discretização de imagens sequenciais para análise por elementos finitos necessita de um conjunto de *softwares* e etapas de ajustes complexas para geração e aprimoramento das malhas (CEBRAL; LÖHNER, 2001; PALOMBINI, 2016). As dificuldades encontradas nessas etapas podem também ser um fator contribuinte para pouca utilização de análises numéricas e por elementos finitos em pesquisas de  $\mu$ CT com plantas.

Alguns materiais vegetais com grande interesse comercial e industrial permanecem pouco estudados em termos de análises microestruturais por técnicas não-invasivas de alta resolução. Por exemplo, apesar de algumas propriedades mecânicas da cortiça terem sido estudadas e modeladas matematicamente com base em micrografias (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010), o desempenho do material com característica celular – configurado como uma espuma de células fechadas – poderia ser melhor compreendido com modelos discretizados a partir de imagens de  $\mu$ CT (KADER *et al.*, 2017). De modo semelhante, algumas fibras vegetais com importância comercial, como o linho (FAHN, 1990; MAUSETH, 2013), também não foram estudadas a nível celular. Ainda, a estrutura de determinadas gramíneas consideradas de interesse pelas indústrias de energia e alimentícia, como o milho e a cana-de-açúcar (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013), também poderiam ser beneficiadas com análise por elementos fi-

nitos baseada em tomografias de alta resolução (FORELL *et al.*, 2015).

De um modo geral, a ainda limitada literatura existente contendo diretrizes para aquisição, processamento, discretização, análise por elementos finitos e caracterização 3D de materiais vegetais por meio de  $\mu$ CT representa um indicativo da relativa baixa produção científica na área. O designer como pesquisador está diretamente ligado a tecnologias 3D voltadas à análise e à representação de projetos, tanto para fins industriais como científicos (COELHO, 2008; GALLE; KROES, 2014; LESKO, 2012). Desse modo, auxiliar e trabalhar com demais áreas, como ciências exatas e biológicas é também um importante papel do pesquisador em design. O desenvolvimento e disponibilização de novas tecnologias 3D demanda também meios facilitadores para maior acesso a pesquisadores, além da divulgação das suas possibilidades de aplicações. Nesse sentido, a presente pesquisa pretende abordar o levantamento e a elaboração de diretrizes a fim de auxiliar ao estudo de materiais de origem vegetal, através de análises morfológicas e por elementos finitos baseadas em imagens de  $\mu$ CT.

## **1.2 Formulação do problema**

Como definir diretrizes de utilização de tecnologias 3D de análise numérica por elementos finitos baseadas em imagens de microtomografia computadorizada de raios X para auxiliar pesquisadores no desenvolvimento científico e industrial através do estudo de materiais de origem vegetal e projetos de biônica?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

Desenvolver diretrizes para auxiliar pesquisadores na utilização de técnicas de análise por elementos finitos e caracterização morfológica de materiais de origem vegetal baseadas em imagens obtidas por microtomografia computadorizada de raios X.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Dar continuidade ao tema geral de pesquisa de mestrado do autor, visando à ampliação do potencial do uso de tecnologias baseadas em tomografia e em análise numérica em

materiais de origem vegetal;

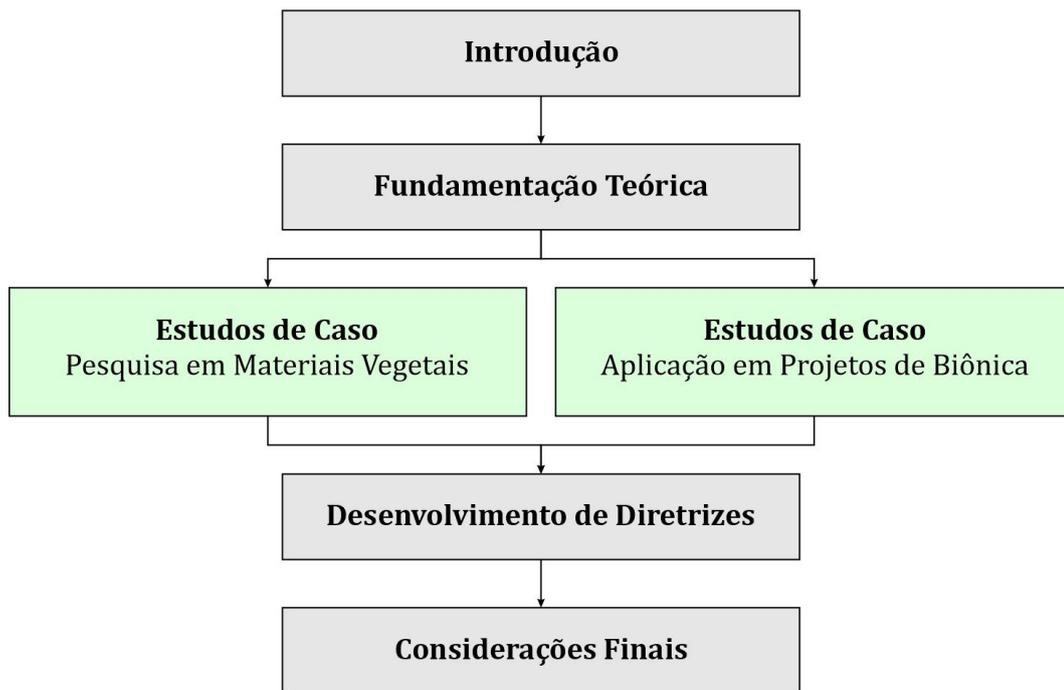
- Estudar o estado da arte de pesquisas de análises estruturais baseadas em tomografias de alta resolução de materiais de origem vegetal, incluindo as possibilidades de aplicação em diversos campos da ciência e na indústria;
- Realizar fundamentação teórica sobre as etapas de processamento de amostras, funcionamento, princípios físicos, e configurações básicas de execução de ensaios de  $\mu$ CT, além da execução análises morfológicas e por elementos finitos baseadas em imagens sequenciais de tomografias;
- Levantar as principais dificuldades relacionadas à análise de materiais vegetais por meio de tecnologias de  $\mu$ CT;
- Desenvolver estudos de caso práticos de ensaios em equipamentos de  $\mu$ CT, etapas pós-processamento e análises por elementos finitos;
- Desenvolver estudos de caso de aplicações das informações levantadas em projetos de biônica para design e engenharia;
- Compilar as informações fundamentadas juntamente com os resultados obtidos com os estudos de caso;
- Desenvolver diretrizes para as etapas relacionadas, desde o pré-processamento até as análises, sendo voltadas para pesquisadores de diferentes formações;
- Publicar os principais resultados sob a forma de artigos em periódicos multidisciplinares de grande alcance, apresentando o potencial de aplicação e incentivando por meio de métodos mais apropriados.

#### **1.4 Estrutura da tese e principais métodos seguidos**

Esta tese está organizada de modo a ser conduzido um levantamento sobre as diversas características práticas e teóricas de análises por elementos finitos baseadas em imagens de microtomografia de plantas. A figura 2 apresenta um fluxograma da estrutura geral da tese. Inicialmente, após a introdução, é desenvolvido o tópico de fundamentação teórica, em que os principais temas pertinentes ao trabalho são levantados e discutidos, dando ênfase nos conceitos básicos bem como ao estado da arte das tecnologias utilizadas. Em seguida são apresentados dois tipos de estudos de caso relativos a pesquisas realizadas durante a execução desta tese. O primeiro corresponde a pesquisas envolvendo diferentes materiais, equipa-

mentos e etapas de pré e pós-processamento para  $\mu$ CT e FEA. São destacadas as maiores dificuldades encontradas nas etapas, bem como diferentes meios para abordá-las. Em seguida são vistos estudos de caso relativos à aplicação de conhecimentos levantados com as pesquisas nos materiais em projetos conceituais de biônica para design e engenharia.

Figura 2 – Fluxograma da estrutura geral da tese.



FONTE: Autor (2020).

Por fim, além das contribuições científicas resultantes dos estudos de caso, são desenvolvidas e apresentadas diretrizes gerais para se trabalhar com as técnicas de  $\mu$ CT e FEA em materiais vegetais, dando enfoque em como proceder desde a execução de protocolos até a seleção de parâmetros. Nos tópicos abaixo, é apresentada uma breve descrição dos principais métodos e equipamentos utilizados durante a elaboração da tese.

#### 1.4.1 Ensaios em equipamentos de $\mu$ CT

Para as análises de microtomografia, foram utilizados equipamentos localizados em centros de pesquisa, através de colaborações para a publicação de trabalhos científicos. Foi utilizado o equipamento Xradia® 510 Versa (Carl Zeiss® X-Ray Microscopy, Inc., Pleasanton, CA, EUA), localizado no Grupo de Pesquisa em Microscopia Digital e Análise de Imagens do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de

Janeiro (MicDigi/PUC-Rio). O equipamento é considerado um dos mais avançados do país e trabalha com fonte de transmissão que alcança  $160\text{ kV}$ , além de permitir a utilização de um conjunto de objetivas para magnificação das projeções radiomicrográficas a resoluções espaciais de até  $0,7\ \mu\text{m}$ , além de opções de contraste de fase, tornando-o adequado para observação de tecidos de amostras de origem vegetal. Também foi utilizado o equipamento SkyScan® 1172 (Bruker® MicroCT, Kontich, Bélgica), localizado no Laboratório de Física Nuclear Aplicada do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina. O equipamento de bancada opera com fonte de transmissão de até  $100\text{ kV}$  e  $10\text{ W}$ , com resolução espacial inferior a  $5\ \mu\text{m}$ .

#### 1.4.2 Preparação de amostras e processamento de imagens

As preparações das amostras a serem analisadas, consideradas as etapas de pré-processamento, foram realizadas no Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg/UFRGS). O LAVeg é considerado o maior centro de pesquisa em morfologia vegetal da América Latina, possuindo diversos equipamentos para preparação, secionamento e observação por microscopia. Também no LAVeg foram realizadas as etapas de pós-processamento em uma *workstation* com alta capacidade de processamento. Tratando-se de imagens sequenciais de alta resolução e em formato bruto, *i.e.*, sem compressão, são necessários equipamentos com grande quantidade de memória e armazenamento, além de processadores com vários núcleos e placa de vídeo de uso profissional.

Os principais *softwares* utilizados são de código aberto, sendo o mais empregado o Fiji, uma distribuição do ImageJ (SCHINDELIN *et al.*, 2012) e baseado em Java. O *software* permite a inclusão e utilização de diversos filtros e *plug-ins*, para melhoria da qualidade das imagens, além de auxiliar na execução das etapas de binarização, caracterização celular, e segmentação. Para a discretização foi utilizado o *software* gratuito Gmsh (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009), um gerador automático 3D de malhas volumétricas para FEA. Também foi utilizado o pacote de *software* de código aberto VOX-FE (FAGAN *et al.*, 2007), que trabalha na conversão direta de *voxels* em elementos cúbicos para FEA.

### 1.4.3 Caracterização e análises por elementos finitos

As etapas de pós-processamento das imagens de  $\mu$ CT obtidas permitem também executar análises numéricas e morfológicas, definidas como caracterização das amostras. Entre as análises a serem aplicadas, encontram-se as de porosidade e densidade relativa, específicas para modelagem mecânica de materiais celulares, ao avaliar suas propriedades constitutivas lineares e não-lineares em relação à quantidade de material (PALOMBINI, 2016). Outros modos de caracterização incluem medições do diâmetro, espessura da parede celular e esfericidade dos poros (lume celular), quantificação do volume dos tecidos segmentados e suas distribuições ao longo das amostras.

Com a obtenção de malhas discretizadas com os *softwares* de código aberto e gratuitos, foi possível a realização de alguns tipos de análises por elementos finitos. Para isso, foi utilizado o *software* Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia® Corp., Providence, RI, EUA), disponível no Laboratório de Design Virtual (ViD/UFRGS). Com os ensaios de elementos finitos, além de verificar o desempenho mecânico e físico das amostras digitalizadas por  $\mu$ CT, frente a condições de contorno realistas, pretende-se realizar a comparação entre as malhas discretizadas com diferentes *softwares*, em termos de facilidade de geração, convergência dos resultados e recursos computacionais necessários. Diferentes modos de análise também foram ensaiados, como de transferência de calor, uso de não-linearidades, otimização de topologia, sensibilidade de malha, bem como análises explícitas. Além disso, também foram utilizados o *software* de seleção de materiais CES Edupack™ (Granta® Design Ltd., Cambridge, Reino Unido), disponível no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS), além do *software* de modelagem 3D Rhinoceros® 3D (McNeel®, Seattle, EUA) e o de renderização KeyShot® (Luxion® Inc., Tustin, CA, EUA), disponível no Curso de Desenho Industrial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), para desenvolvimento de projetos conceituais de biônica, baseando-se nos estudos realizados.

Todas as análises morfológicas e por elementos finitos estão relacionadas com avaliação do desempenho mecânico e físico de diferentes tipos de tecidos vegetais, com o intuito de auxiliar na compreensão do seu desempenho. Visto que os materiais de origem vegetal apresentam uma considerável complexidade formal, os métodos explorados de preparação, bem como de ensaios, tratamentos e análises pretendem gerar conhecimentos específicos para auxiliar pesquisadores de ciências biológicas, design e engenharia, além da indústria. Desse

modo, pretende-se definir e levantar os métodos mais adequados de simular e prever o comportamento mecânico de diferentes tipos de materiais vegetais, bem como suas aplicações em projetos de biônica.

#### 1.4.4 Compilação e desenvolvimento de diretrizes

A última fase da tese de doutorado consiste na compilação dos procedimentos metodológicos estudados e dos principais resultados científicos obtidos através dos diferentes estudos de caso. Desse modo, são definidos, para tipos principais de material vegetal, os processos mais adequados de preparação de amostra, definição de parâmetros de aquisição em equipamentos de  $\mu$ CT, protocolos para ajustes de imagem, caracterização e análises morfológicas, bem como para a geração e ajuste de malhas discretizadas, levando à execução de análises por elementos finitos. Com a compilação, foram desenvolvidas diretrizes práticas para orientar pesquisadores e a indústria na seleção e execução de processos de análises apropriados para cada tipo de amostra. O objetivo final pretendido foi, portanto, a transposição das contribuições científicas para contribuições técnicas, de modo tornar os conhecimentos necessários para a realização das análises mais acessíveis a diferentes profissionais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente tese pretende abranger aspectos teórico-práticos das análises morfológicas e por elementos finitos de materiais de origem vegetal, baseando-se em imagens de microtomografia, em vista a desenvolver diretrizes para auxiliar pesquisadores e a indústria. Inicialmente são vistos como o designer pode contribuir na condução de pesquisa científica na obtenção de resultados inovadores por meio de tecnologias 3D. No tópico seguinte são levantadas as implicações da pesquisa em materiais vegetais para o design e a engenharia, abordando o potencial de aplicação e estudo desses materiais. Em seguida é realizada uma breve revisão sobre microtomografia de raios X, incluindo as fases de geração de raios X, atenuação da radiação e etapas pós-processamento adequadas para amostras vegetais. O objetivo é verificar as possíveis dificuldades associadas aos processos e os motivos que possam estar contribuindo para a menor produção científica na área. Então são realizados levantamentos sobre análise por elementos finitos baseando-se em microtomografia, ressaltando o potencial de utilização da combinação das técnicas, novamente elencando as dificuldades inerentes das etapas de discretização, definição de propriedades constitutivas e execução das análises. Por fim, é realizada uma breve fundamentação sobre o desenvolvimento de diretrizes.

### 2.1 Design, tecnologias 3D e pesquisas científicas

As técnicas de caracterização por imagem sequenciais baseadas em tomografias representam um significativo avanço em diversos ramos da ciência, por permitir análises minimamente invasivas de alta resolução, e com características tanto qualitativas como quantitativas, ainda que permaneçam pouco aproveitadas em determinados ramos da ciência (LANDIS; KEANE, 2010). Com relação ao design, sua prática profissional está diretamente relacionada com avanços tecnológicos (PALOMBINI *et al.*, 2018a). De modo geral, tanto ao encontrar novos caminhos para a resolução de problemas de projeto quanto nas possibilidades de integração com diversas áreas, o designer possui uma série de conhecimentos e técnicas que podem auxiliá-lo nesse sentido (ASHBY; FERREIRA; SCHODEK, 2009; BAXTER, 2000; PALOMBINI *et al.*, 2017). De modo semelhante, a pesquisa em design também possui uma importante parte no desenvolvimento de novos modos de utilização de tecnologias com outros indivíduos. Lunenfeld (2003), por exemplo, afirma que a pesquisa em design também representa novos modos

de engajamento com tecnologias, principalmente por meios digitais. Nesse sentido, Groover (2012, p. 1) define tecnologia como a “aplicação da ciência ao fornecer à sociedade e a seus membros aquilo que lhe é necessário ou desejado”, reforçando sua cumplicidade com o usuário. Na observação geral do termo “design”, encontra-se especificamente a sua relação com a possibilidade de aplicação de novas tecnologias de modo universal (BÜRDEK, 2010). Nesse sentido, mais importante que a pesquisa em design ser apenas responsável por aprimorar as interfaces de interação do usuário com meios tecnológicos, é o fato do designer poder trabalhar para promover as relações entre estes usuários com a tecnologia, tanto em termos socioculturais, quanto em colaborações científicas (ASHBY; FERREIRA; SCHODEK, 2009; LUNENFELD, 2003; PALOMBINI *et al.*, 2018a).

Ao considerar o design um campo de interações multidisciplinares voltado à resolução de problemas, o designer pode ser visto como um profissional treinado para trabalhar com diferentes áreas da ciência (COELHO, 2008). O meio de atuação de designers apresenta um novo paradigma em que a atuação não se baseia mais em ser líder de projeto, mas em se tornar um agente facilitador de ideias (MURATOVSKI, 2015). Nesse ponto, surge o conceito do design como um campo transdisciplinar, em que não encontra mais limitações em quais tópicos puros e aplicados o designer pode apresentar contribuições, mas que transcende áreas em busca de melhores soluções para seus problemas de pesquisa e projeto (BAXTER, 2000; NICOLESCU, 2010; PALOMBINI *et al.*, 2018a).

Devido às possibilidades do avanço tecnológico, é notável um crescimento do estudo de aplicações de novas tecnologias em cursos de design (LESKO, 2012). O papel do designer não se limita apenas a ser um agente central nas relações entre clientes e indústria, mas também um profissional vinculado à necessidade de se adaptar rapidamente a novos recursos tecnológicos (PISANO; PIRONTI; RIEPLE, 2016). A atuação do designer envolve, então, tanto a utilização de novas tecnologias quanto o descobrimento de novos usos para as tecnologias que já são existentes (CIDADE *et al.*, 2016; PALOMBINI *et al.*, 2018a; SILVA; BOTURA JÚNIOR; PASCHOARELLI, 2013). Rust (2004) afirma que a capacidade do designer de incorporar ideias e conhecimento em artefatos possibilita-o contribuir com a pesquisa ao estimular o desenvolvimento de novas ideias. Com relação à utilização dos resultados oriundos de investigações científicas, os designers também podem ser atuantes como “catalisadores de pesquisas” (DRIVER; PERALTA; MOULTRIE, 2011):

Evidências sugerem que o uso de design auxilia cientistas a desenvolverem aplicações comerciais para seu trabalho, encontrando-se tanto em estágio de pesquisa ou durante o início do processo de transferência tecnológica (Traduzido de SAINSBURY, 2007, p. 151).

Profissionais treinados em design podem estimular a criação de novos conhecimentos ao produzir meios para testar ideias e auxiliar nas suas compreensões (DRIVER; PERALTA; MOULTRIE, 2011). Verhoeven *et al.* (2015) estudaram sobre a possibilidade de integração entre designers e cientistas, através de uma abordagem transdisciplinar. Entre as principais contribuições do designer, definidas pelos autores, estão, por exemplo, a aceleração geral da pesquisa e o fornecimento de meios criativos para experimentação e reflexão. Peralta e Moultrie (2010) apresentaram as relações entre designers e cientistas, em termos de métodos de pesquisa de design e pesquisa científica, com relação a trabalhos colaborativos. Ainda que os designers tenham seus objetivos na criação e cientistas na descoberta, segundo os autores ambos trabalham por meio de experimentação (PALOMBINI *et al.*, 2018a).

Determinados autores também abordaram as diferenças e semelhanças entre métodos de abordar pesquisa nas ciências tradicionais e no design. Farrell e Hooker (2012), por exemplo, partem da premissa dos objetivos finais de cada área, no que tange à produção de objetos metafísicos. Entretanto, os autores afirmam que os resultados de estudos intelectuais e a produção desses objetos não podem ser considerados como diferenças, uma vez que ambos o design e a ciência desenvolvem e produzem artefatos. Além disso, os autores acrescentam que as duas áreas são consideradas “produtos da capacidade geral de ação inteligente que caracteriza a inteligência humana”; definindo ambas como utilizadoras de processos de design e estratégias da razão com o objetivo de produzir objetos artificiais. Contudo, as colocações de que design e ciência não são essencialmente diferentes é bastante discutida. Galle e Kroes (2014) apontam quatro características principais sobre tanto as diferenças quanto as semelhanças: (1) os objetivos de ciência e design são diferentes, de modo a “estudar ou descrever” o mundo em comparação com “realizar mudanças”, bem como as diferenças entre a produção de conhecimento e a de artefatos, respectivamente; (2) apesar de ambos os campos possuírem o mundo como objeto de estudo, a ciência estuda “fenômenos naturais”, em ensaios, enquanto que o design propõe “objetos artificiais”, ainda que se baseando em estudos científicos; (3) ambos produzem, também, artefatos simbólicos (teorias e propostas conceituais de artefatos), entretanto para a ciência estes são considerados “cognitivo-descritivos” e, para

o design, são “prático-descritivos”; (4) em metodologia, diferem dos critérios de avaliação das soluções, de modo que mesmo que a “verdade” possa ser aplicada a teorias científicas, não faz sentido discutir esse conceito em uma proposta de artefato de um designer. Ainda, além de que os problemas de design e ciência não representem, puramente, uma diferença entre as áreas, tem-se que seus métodos podem apresentar semelhanças fundamentais (PALOMBINI et al., 2018a). Farrell e Hooker (2013) afirmam que ambos os métodos científico e de design são o resultado de processos cognitivos e da gestão de condições pragmáticas e complicadas, levando, portanto, a soluções igualmente objetivas. Por outro lado, ao expressar o *design thinking* como uma “arte liberal”, pode ser apontada, inclusive, a “impossibilidade” intrínseca do design em se apoiar na ciência na busca por soluções adequadas para os *wicked problems* (problemas perversos), com toda a carga humanitária presente (BUCHANAN, 1992). Isso se contrasta ao considerar os então chamados *tame problems* (problemas domesticados), das áreas de ciência e engenharia (CROSS, 2001), para os quais soluções poderiam ser encontradas de modo mais mecanizado.

Além das comparações entre as formas de atuação do designer e do cientista, determinados autores também comentam sobre a colaboração entre as áreas, com uma atuação mútua, principalmente com a adição da tecnologia como variável (PALOMBINI et al., 2018a). Levy (1985) destaca que o design, sendo considerado uma atividade basicamente humana, precisa ser visto como uma atuação tanto científica quanto tecnológica. Como o design precisa envolver não apenas o “quê” e o “como”, mas o “porquê” e o conhecimento de seu propósito, tem-se que sua atividade permeia as “incertezas epistemológicas” (da ciência), tal como princípios de “arte e técnica” (LEVY, 1985). O design passou de ser a atividade do simples projetar, para o ato de trabalhar na aplicação de conhecimento (CALVERA, 2006). Desse modo, com a participação de design em pesquisas científicas alguns paradigmas podem ser modificados, como a sugestão de que designers simplesmente contribuíssem no desenvolvimento e, mais especificamente, da aplicação de uma tecnologia (DRIVER; PERALTA; MOULTRIE, 2011; PALOMBINI et al., 2017). Nesse sentido, em casos de ciências clássicas, como a anatomia vegetal, sendo fundamentada na observação, caracterização e análise de micro e macrorregiões de plantas, várias são as possibilidades de inovação oriundas pelas tecnologias 3D que possam ser auxiliadas pela participação do designer, não apenas no desenvolvimento e nos aspectos técnicos da pesquisa científica, mas também nas etapas de concepção do problema de pesquisa bem como na interpretação dos resultados obtidos (PALOMBINI et al., 2018a).

## 2.2 Pesquisa em materiais vegetais e implicações para design e engenharia

No desenvolver da história do homem com os materiais, diversos períodos foram marcados pela exploração dos mesmos (ASHBY; JOHNSON, 2011). De modo geral, essa ligação com os materiais levou a muitos estudos para o entendimento de sua estrutura, funcionamento e aplicações, conduzindo a classificações diversas, utilizadas até hoje. Os materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos, por exemplo, são essencialmente constituídos de substâncias encontradas na natureza em sua forma primitiva – desde compostos inorgânicos, como os minérios, até orgânicos, como o petróleo – sendo fabricados através de processos que os transformam em materiais sintéticos (ASHBY, 2012; ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2012). Já os chamados materiais naturais são aqueles que necessitam de pouco ou praticamente nenhum microprocessamento para serem aplicados, variando-se desde fibras, madeiras, couros, rochas ornamentais, entre outros (ASHBY; FERREIRA; SCHODEK, 2009; KARANA; PEDGLEY; ROGNOLI, 2014). Além de necessitar de menos processamento para ser utilizado, os materiais naturais também se destacam por sua versatilidade, podendo possuir atributos estéticos, funcionais e estruturais de grande interesse (PALOMBINI et al., 2018b).

Dentre os materiais naturais de grande importância nas civilizações encontram-se os de origem vegetal (LESKO, 2012). Utilizados há milênios pelo homem, para a fabricação desde armas, utensílios, acessórios, instrumentos musicais, até residências, sua exploração deve-se principalmente à sua disponibilidade no meio ambiente, à facilidade de ser trabalhado, e às suas interessantes propriedades físico-mecânicas (ASHBY; JOHNSON, 2011). Como exemplo, destaca-se a resistência à compressão, flexão e tração, baixa densidade e bom isolamento termoacústico como algumas das características de plantas que as tornam uma das principais escolhas na seleção de materiais em projetos de design e engenharia (ASHBY, 2012).

De um modo geral, as características que conferem as interessantes propriedades aos materiais vegetais estão relacionadas à sua microestrutura. De mesmo modo que os materiais poliméricos utilizam-se da repetição de moléculas simples para construção de macromoléculas (TEEGARDEN, 2004), e de como os materiais compósitos aproveitam-se dos benefícios de fases com propriedades distintas e complementares (MALLICK, 1997), as propriedades das plantas derivam da combinação de substâncias simples e seu arranjo em múltiplas escalas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). No caso de madeiras o lenho é constituído de diferentes períodos (anéis) de crescimento, os quais são compostos por células lignificadas com parede

celular dividida em camadas, as quais contém microfibras de celulose em diferentes orientações (SCHULTZ, 1972). A partir de substâncias como celulose, pectina, hemiceluloses e ligninas as paredes celulares formam complexas e eficientes estruturas (KRAUS et al., 2006), de modo que cumpram os requisitos de funcionamento de plantas com o mínimo de material possível (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Apesar de, individualmente, tais componentes não apresentarem propriedades mecânicas de grande desempenho<sup>2</sup> (ASHBY, 2012), é sua configuração e arranjo entre si que define seu sucesso estrutural. Com o alinhamento de moléculas de celulose, formando microfibrilas, tem-se a formação do reforço das lamelas, cuja matriz é formada por ligninas e hemiceluloses (ASHBY, 2012). Por sua vez, com diferentes orientações de camadas de microfibrilas (S1, S2 e S3), tem-se a formação básica da parede celular vegetal.

Além do arranjo nanométrico de substâncias simples, as plantas também se destacam pela eficiente organização de sua estrutura na escala micrométrica. Entre os principais e mais conhecidos exemplos de materiais eficientes estão as monocotiledôneas e, em especial, as gramíneas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Plantas como o bambu, cana-de-açúcar e milho possuem uma distribuição transversal de seus feixes vasculares caracterizada por um padrão gradiente, ou seja, em maior número nas regiões externas do caule e em menor quantidade nas regiões internas. Esse padrão, chamado de atactostelo<sup>3</sup> (FAHN, 1990), estruturalmente representa a adição de mais material nas regiões com maior solicitação mecânica, sendo gradualmente reduzido até seu interior (RICH, 1987; WEGST, 2011).

Outro padrão característico que remonta a uma grande eficiência em plantas, como nas gramíneas, é a divisão do caule em regiões de nós e entrenós. Novamente para o exemplo dos bambus, o caule, em sua maioria oco, possui regiões transversais sólidas na região nodal, chamadas de diafragma (LIESE, 1998; MCCLURE, 1966). Enquanto na região dos entrenós os feixes vasculares são dispostos longitudinalmente, na região dos nós os mesmos movem-se lateralmente, permitindo que folhas e ramos sejam derivados do colmo. Estruturalmente, é importante destacar que a presença de uma região sólida como o diafragma contribui para evitar a ovalização da seção transversal do colmo ao ser flexionado, mantendo sua integridade (SCHULGASSER; WITZTUM, 1992; WEGST; ASHBY, 2007; ZHAO *et al.*, 2008).

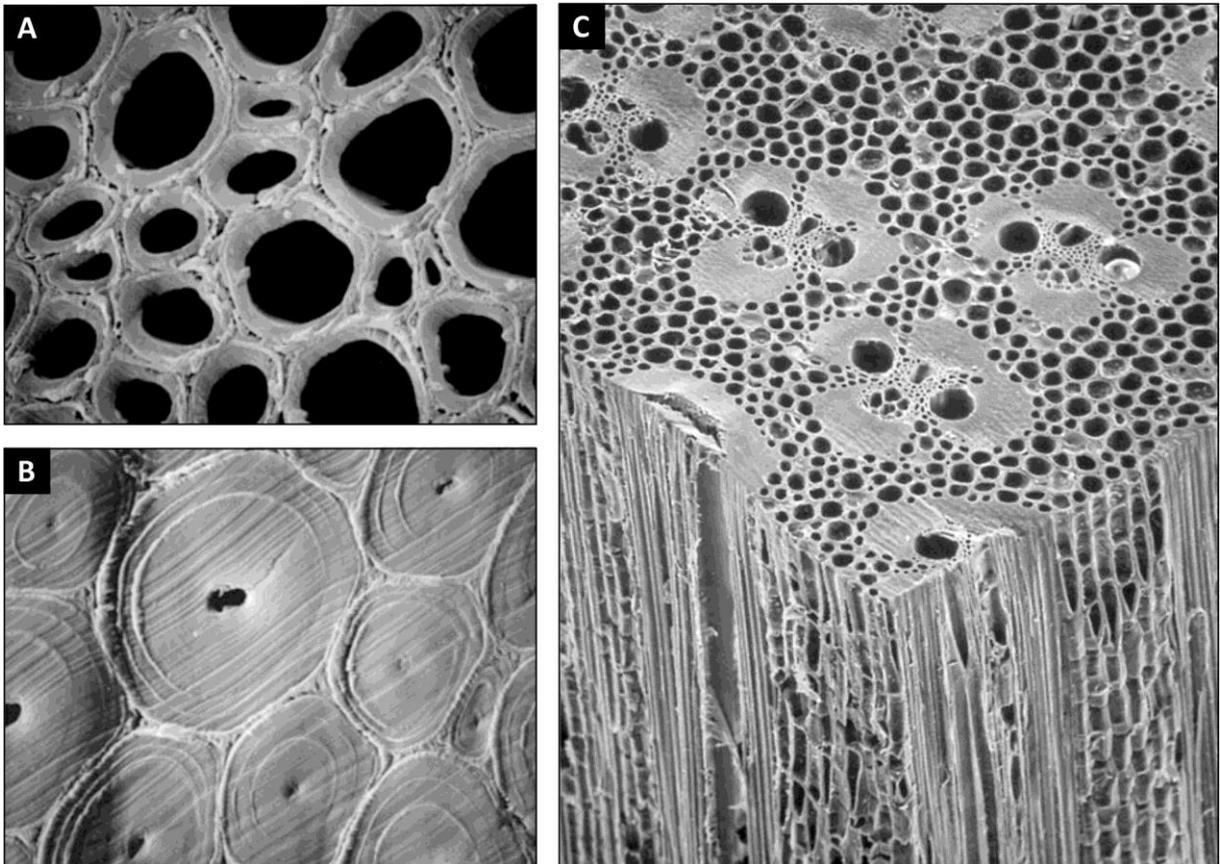
---

<sup>2</sup> Fibras de celulose têm módulos elástico aproximadamente igual ao de fibras de poliamida, e, portanto, muito menores do que os do aço; já a matriz lignina-hemicelulose na qual as fibras estão embebidas tem propriedades similares às da resina termofixa epóxi (ASHBY, 2012).

<sup>3</sup> Tipo de estelo (cilindro central interno em caules e raízes de plantas vasculares) em que os feixes são espalhados ou em padrões gradientes, como em monocotiledôneas (FAHN, 1990; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

Os feixes vasculares são compostos por elementos condutores (xilema e floema), sendo protegidos por calotas de esclerênquima e envoltos por parênquima. A figura 3 apresenta um aspecto da microestrutura do bambu. O esclerênquima (do grego *σκληρός* ou *sklēros*, que significa “duro”) é um tecido de sustentação composto por fibras alongadas e com parede celular lignificada (FAHN, 1990). Devido ao espessamento de sua parede celular com a lignina (figura 3A e B), suas células, em geral, não possuem protoplasto<sup>4</sup> vivo quando na sua maturidade (SCATENA; SCREMIN-DIAS, 2006). Esse processo aumenta a densidade do tecido e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas, como módulo elástico e resistência a compressão (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Figura 3 – Aspecto da microestrutura do bambu: células do esclerênquima com espessamento da parede celular em amostra com (A) 1 ano e (B) 6 anos; (C) visualização 3D do arranjo celular.



FONTE: Adaptado de (A), (B) Liese e Weiner (1996) e (C) Liese (1998).

Já o parênquima (do grego *παρέγχυμα* ou *parenkhyma*, que significa “derramado ao lado de”) é considerado um tecido simples, de preenchimento, sendo constituído por células vivas com diferentes formas e funções fisiológicas (FAHN, 1990). Enquanto o esclerênquima

<sup>4</sup> Termo correspondente à substância viva no interior de uma célula vegetal (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

fornece um reforço estrutural, em uma analogia a um material compósito, o parênquima foi mostrado como uma matriz, com um comportamento semelhante ao de uma espuma de células fechadas, em que a configuração do tecido auxilia a distribuir tensões locais por toda a estrutura, como visto em análises de compressão (DIXON *et al.*, 2018; PALOMBINI *et al.*, 2016).

### 2.2.1 Propriedades mecânicas de tecidos vegetais

Ao considerar a organização celular dos tecidos vegetais é possível definir analogias da sua anatomia com relação a modelos já conhecidos, para prever seu comportamento estrutural e auxiliar a compreender a complexidade estrutural de plantas, como o bambu (GIBSON; ASHBY, 1999). De um modo geral, todas as principais propriedades mecânicas de materiais com característica celular, como o parênquima e o esclerênquima, podem ser derivadas de sua densidade relativa, ou  $(\rho^*/\rho_S)$ . Segundo Gibson e Ashby (1999), essa grandeza adimensional representa a razão entre a densidade do material celular ( $\rho^*$ ) e a do material sólido ( $\rho_S$ ) do qual a parede celular do material é feita (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Uma vez que  $\rho^*$  representa a densidade do material inteiro, incluindo as regiões vazias, e  $\rho_S$  a densidade da parede celular apenas, ao dividi-los resultamos em uma relação de volume, ou ainda o valor da porosidade ( $\varphi$ ) daquela região. Assim, esta relação pode ser expressa 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; PALOMBINI, 2016).

Tratando-se de um material vegetal, uma região mais porosa representa uma maior presença relativa do lume celular, *i.e.*, o espaço interno vazio no interior da célula, não ocupado por constituintes protoplasmáticos (FAHN, 1990). Desse modo, quanto mais espessadas forem as paredes celulares de um tecido, menos poroso é o material e, conseqüentemente, maior é sua densidade relativa (PALOMBINI *et al.*, 2016). Ao avaliar o desempenho mecânico de amostras com regiões de diversos valores de porosidade, foi possível extrapolar uma relação entre a densidade relativa e as propriedades mecânicas de tecidos vegetais (DIXON; GIBSON, 2014; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Assim, foi definido que o módulo elástico ( $E_P$ ) do parênquima pode ser estimado por:

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

onde  $(\rho^*/\rho_S)_P$  é a densidade relativa do parênquima;  $E_S$  é o módulo elástico do material da parede celular sólida do bambu, sendo extrapolado experimentalmente em  $E_S = 39,8 \text{ GPa}$  (DIXON; GIBSON, 2014); e  $\gamma$  descreve a relação de potência entre a densidade relativa e o módulo para uma determinada geometria de um material celular. Apesar do parênquima assemelhar-se com uma estrutura do tipo *honeycomb* (figura 3C), ao apresentar células prismáticas, o tecido foi verificado por possuir um comportamento de uma espuma de células fechadas. Desse modo o fator  $\gamma$  foi definido entre 2,0 (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010) e 2,33 (DIXON *et al.*, 2018).

Com relação ao esclerênquima, por possuir uma região com lume celular menor e, assim, uma densidade relativa maior, o tecido pode ser mecanicamente aproximado a um material sólido (GIBSON, 2012; NIKLAS, 1992). Assim, seu módulo elástico ( $E_{Sc}$ ) pode ser estimado sem a necessidade de um fator exponencial da forma do material celular (DIXON; GIBSON, 2014; PALOMBINI *et al.*, 2016), ou seja, pela relação:

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

onde  $(\rho^*/\rho_S)_{Sc}$  é a densidade relativa do esclerênquima. O tecido é composto por feixes de fibras longitudinais e delgadas, apresentando, do ponto de vista microestrutural, um comportamento ortotrópico (PALOMBINI, 2016). Dependendo da escala analisada, o esclerênquima precisa considerar diferentes propriedades mecânicas tanto para os sentidos longitudinal quanto transversal, com uma relação aproximada entre o módulo elástico no sentido axial e no transversal de 3,5, avaliado experimentalmente, devido à orientação das microfibrilas na parede celular (CAVE, 1968; DIXON; GIBSON, 2014). Contudo, ao considerar o tecido como um todo, e não feixes de fibras isolados, bem como ao avaliar sua disposição complexa em uma região nodal, por exemplo, em que os feixes seguem múltiplas direções, o esclerênquima também pode ser simplificado como um material isotrópico.

Além do comportamento elástico, caracterizado pelas Eqs. (2) e (3), respectivamente para parênquima e esclerênquima, que permitem estimar os módulos de elasticidade, ambos os tecidos também apresentam propriedades não-lineares derivadas de suas densidades relativas. Para o parênquima, a resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_P$ ) pode ser definida como:

$$\sigma_P = 0,3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_S}\right)_P^{3/2} \sigma_{f_S} \quad (4)$$

em que  $\sigma_{f_S}$  é o módulo de ruptura do material sólido da parede celular, sendo extrapolado

em  $472 \text{ MPa}$ , com ensaios experimentais (DIXON; GIBSON, 2014). O módulo de ruptura é utilizado devido ao comportamento similar ao de uma espuma, assumindo que a falha ocorra pela flexão das paredes celulares e pela formação de rótulas plásticas<sup>5</sup>, desse modo definindo o expoente  $3/2$  na densidade relativa. A constante  $0,3$  está relacionada à extrapolação dos dados experimentais de ensaios mecânicos de compressão de modelos de espumas durante o colapso plástico (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Por fim, as propriedades de resistência à compressão do esclerênquima ( $\sigma_{sc}$ ) também podem ser obtidas a partir de valores da sua densidade relativa, de modo que:

$$\sigma_{sc} = \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \sigma_s \quad (5)$$

onde  $\sigma_s$  representa diretamente a resistência à compressão axial do material sólido da parede celular, sendo extrapolado em ensaios experimentais em  $248 \text{ MPa}$  (DIXON; GIBSON, 2014). Novamente, por se tratar de um material predominantemente sólido, com pouco lume celular, a modelagem de sua resistência à compressão não leva em consideração sua geometria, não incluindo um fator exponencial na densidade relativa ou a presença de uma constante (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

A partir da definição das propriedades mecânicas com base em propriedades geométricas e na densidade relativa de tecidos vegetais, pode ser empregada a realização de modelos virtuais, contendo a combinação de técnicas de  $\mu\text{CT}$  e FEA. Apesar de alguns autores terem pesquisado sobre a macro relação entre o parênquima ou o esclerênquima do bambu (PALOMBINI *et al.*, 2016; SILVA; WALTERS; PAULINO, 2006), uma comparação de métodos de discretização diferentes, ou de organizações mais complexas, como por exemplo, a região nodal da planta, podem ser explorados.

### 2.2.2 Propriedades termofísicas de tecidos vegetais

A união de técnicas de  $\mu\text{CT}$  e FEA também pode ser utilizada para a realização de análises não convencionais. A maioria dos trabalhos desse tipo aborda relações entre a estrutura e o seu desempenho mecânico (BOYD, 2009a; CRAWFORD, 2003; HUANG; LI; LIU, 2016; YOUSSEF; MAIRE; GAERTNER, 2005). Com relação a materiais biológicos, muitas características físicas

---

<sup>5</sup> Rótula ou dobradiça plástica é a flexão de elementos lineares ou planos de uma estrutura durante uma deformação plástica (ASHBY, 2012).

podem ser apontadas como de interesse para serem avaliadas por técnicas diferenciadas, em seu estado da arte, auxiliando em interpretações morfológicas.

Uma das mais importantes famílias de monocotiledôneas é Bromeliaceae, sendo encontradas em uma variedade de biomas, e com situações climáticas distintas. Nessa família, diferentes mecanismos especializados evoluíram para melhorar as suas condições adaptativas, como tricomas para absorção de água e o desenvolvimento de tanques de água (CRAYN; WINTER; SMITH, 2004; MEZ, 1935; NOGUEIRA, 2017; SCHIMPER, 1884; TIETZE, 1906). Tais características, chamadas de *key-innovations* (ou inovações-chave), permitiram que as suas espécies colonizassem diferentes áreas (BENZING, 2000; NOGUEIRA, 2017). Determinados gêneros apresentam inflorescências cuja morfologia adaptou-se para armazenar diferentes quantidades de água. Especificamente, *Nidularium innocentii* permite acúmulos de água de até 150 mL (LEME, 2000; NOGUEIRA et al., 2017). Contudo, ainda que alguns trabalhos associem o tanque a sistemas de proteção para a inflorescência (LEME, 2000; NOGUEIRA et al., 2017), o papel da água ainda não foi totalmente esclarecido. A partir disso, a utilização de método de elementos finitos também pode auxiliar na compreensão dos efeitos de proteção do tanque para a inflorescência.

Uma das hipóteses que podem ser levantadas para proteção da inflorescência por meio do acúmulo de água é a da regulação térmica na planta. Para avaliar o sistema, é possível utilizar elementos finitos para simular um modelo de transferência de calor da inflorescência e, em especial, do armazenamento de água no tanque. A geometria exata poderia ser adquirida por meio de  $\mu$ CT, em processos de discretização. Quanto às propriedades constitutivas específicas podem ser adaptadas da literatura, tais como valores de condutividade térmica, calor específico e densidade para o material vegetal (JAYALAKSHMY; PHILIP, 2010). Esse tipo de análise abriria possibilidade para ensaios em diversos tipos de materiais biológicos, auxiliando na compreensão de mecanismos de proteção e regulação térmica.

### 2.2.3 Biônica e estudos morfológicos

Além de estudos que auxiliem na compreensão do desempenho estrutural e funcional de tecidos vegetais por meio de técnicas como  $\mu$ CT e FEA, as informações resultantes também podem ser empregadas de maneira prática em projetos de design e engenharia. Nesse sentido, a biônica pode ser definida como a análise, interpretação, adaptação e aplicação de ca-

racterísticas estruturais, funcionais e estéticas encontradas em elementos da natureza (CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015; KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005; PALOMBINI, 2016). A biônica, portanto, está intimamente ligada a meios de investigação de materiais naturais, sobretudo quando relacionada a técnicas de caracterização em diversas escalas, levando ao desenvolvimento de produtos e estruturas inovadoras (PALOMBINI *et al.*, 2018b; PALOMBINI; RISSATO; ROLDO, 2016).

Alguns autores já investigaram características estruturais do bambu para aplicação em projetos de biônica, relacionando a presença de nós e entrenós, a distribuição gradiente dos feixes vasculares, entre outros. Por exemplo, Song *et al.* (2018) desenvolveram uma estrutura bioinspirada no bambu, com relação a adição de elementos de reforço transversal, simulando os nós da planta, obtendo um desempenho superior. Zou *et al.* (2016) também verificaram em uma estrutura biônica baseada no bambu que os nós atuam como juntas e contribuem para melhorar a capacidade de absorção de energia. De maneira similar, Zhao *et al.* (2008), Liu *et al.* (2015) e Jiao *et al.* (2010) também mostraram que o acréscimo de reforços sólidos, como o diafragma, em estruturas cilíndricas aumenta a performance do modelo como um todo. Basicamente, o processo de reforçar regiões transversais de uma estrutura simétrica dificulta tanto a falha por flambagem, durante compressão axial, quanto aumenta a sua resistência à flexão.

Já com relação à distribuição dos feixes, Ma *et al.* (2008) e Zou *et al.* (2016) investigaram o desenvolvimento de estruturas com o acréscimo de elementos de reforço de tamanho gradual, semelhante ao encontrado no bambu, obtendo um resultado mais eficiente. Ambos os trabalhos relatam que reforços dispostos de maneira gradiente no sentido radial do modelo, seja com variação no número ou no tamanho, influenciam na resistência da estrutura por incluir mais material na periferia da mesma, do modo como encontrado na planta (NIKLAS, 1992). Zhao *et al.* (2010) também apresentaram diversos exemplos de como a presença de um sistema de reforço gradiente, como o padrão de distribuição atactostelo, pode deixar estruturas mais resistentes. Já Palombini *et al.* (2018b) avaliaram não apenas a disposição dos feixes, mas também sua geometria. Foi verificado que tanto a distribuição quanto a geometria dos feixes podem contribuir para uma maior resistência à compressão.

Como visto no exemplo de estruturas bioinspiradas no bambu, as pesquisas em materiais vegetais possuem impacto direto no desenvolvimento de modelos estruturais conceituais inovadores, que podem apresentar um desempenho superior em comparação a alternativas

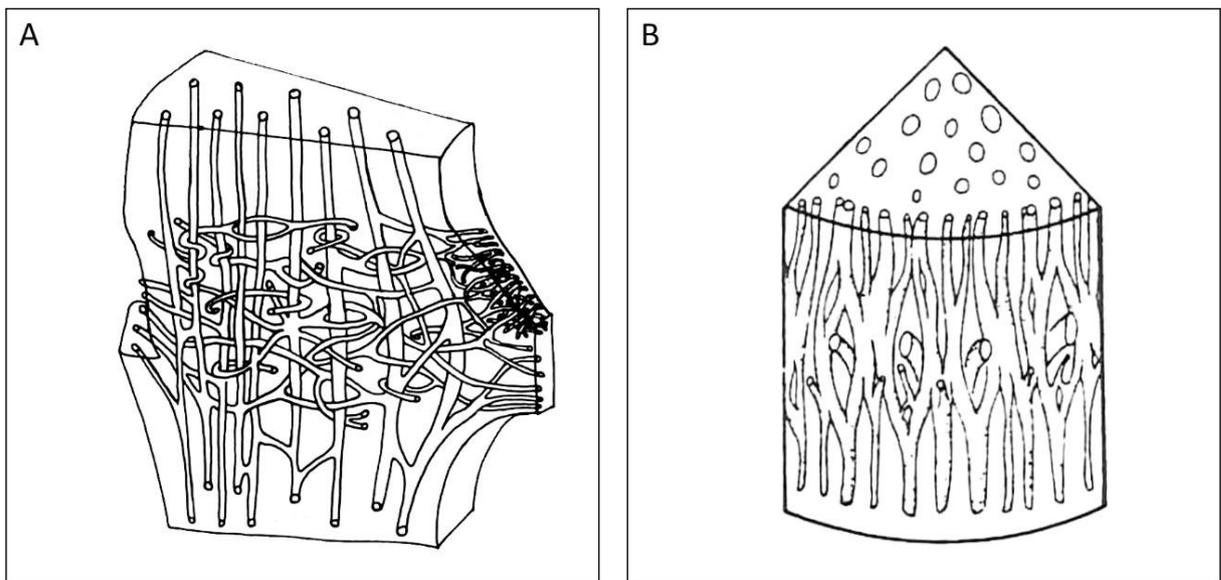
convencionais. Desse modo pode-se dizer que é imperativo que o processo de criação e desenvolvimento na biônica seja antecipado por uma análise e uma interpretação do elemento-alvo da natureza (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005; PALOMBINI, 2016). Ao se trabalhar com elementos naturais em uma escala micrométrica, como no caso da anatomia do bambu, torna-se importante, então, a utilização de tecnologias de alta resolução, equipamentos de excelência, bem como a presença de uma equipe multidisciplinar com recursos humanos qualificados (PALOMBINI et al., 2017, 2018b).

Se por um lado a disposição gradiente dos feixes de bambu na região dos entrenós já foi estudada e aplicada em estruturas biônicas, a região nodal permanece ainda pouco esclarecida. Ao considerar estudos morfológicos ou biomecânicos, ainda são encontradas divergências na literatura, de modo que a configuração dos elementos vasculares nessa região ainda não foi completamente investigada. A exemplo, Shao e Wang (2018) mostraram que os nós de fato reforçam os colmos do bambu sob diversas cargas, com a exceção da resistência à tração longitudinal. Além disso, Schulgasser e Witztum (1992) também concluíram que a região nodal previne propagações de trincas no sentido longitudinal. Por outro lado, Taylor *et al.* (2015) afirmaram que os nós precisariam ser mais proximamente espaçados para que um efeito significativo nas propriedades mecânicas do colmo fosse observado. Os autores sugerem que os nós são exemplos de evolução morfológica para evitar falha estrutural apenas em regiões próximas a novos ramos. Já do ponto de vista anatômico, Shao e Wang (2018) comentam que enquanto uma parte dos feixes vasculares curva-se para dentro e para fora e então se espalha na direção original, outra parte espalha-se transversalmente. Ainda, Liese e Tang (2015) afirmaram que alguns elementos vasculares passam diretamente pelo nó, ao passo que conectam outros na região do diafragma. Então, novamente, Taylor *et al.* (2015) declararam que o esclerênquima, por agir como um ponto de ramificação, é forçado a desviar da orientação longitudinal na região dos nós. Não apenas as definições sobre o papel estrutural da região nodal de plantas, como o bambu, são divergentes, como também são aquelas sobre sua configuração morfológica. Ilustrações e esquemas têm sido utilizados para auxiliar na representação 3D da vascularização da região nodal de gramíneas, como visto na figura 4.

O processo clássico de ilustração tridimensional na botânica utiliza como base o secionamento sequencial de regiões e a sua posterior reconstrução virtual mediante interpretação do observador (SCHULTZ, 1972). Embora os elementos vasculares desenvolvam-se praticamente de modo longitudinal ao longo da região dos entrenós, as regiões nodais apresentam

uma considerável complexidade formal na distribuição dos mesmos (FAHN, 1990). Nessas regiões, observa-se a anastomose dos vasos (figura 4A), *i.e.*, o processo de divisão e união dos mesmos por meio de traços vasculares (LIESE, 1998). Das regiões internas do caule também originam feixes que se movimentam transversalmente (figura 4A e B), para dar origem a novas ramificações (FAHN, 1990).

Figura 4 – Vascularização nas regiões nodais de gramíneas, evidenciando a complexidade organizacional dos feixes vasculares do: (A) bambu e do (B) milho.



FONTE: Adaptado de (A) Liese (1998) e (B) Fahn (1990).

Torna-se compreensível que reconstruir estruturas complexas a partir de cortes seriados é considerado uma tarefa desafiadora. Mesmo com protocolos de fixação e emblocamento para amostras mais delicadas (SCHULTZ, 1972) a reconstrução 3D pode ser considerada de difícil interpretação. Desse modo, surge outra oportunidade para a utilização de tecnologias de digitalização em alta resolução, como a microtomografia de raios X, de modo a poderem ser empregadas para auxiliar na visualização 3D precisa da amostra. Conseqüentemente, as tecnologias 3D permitiriam que essas informações sejam posteriormente aplicadas no desenvolvimento de modelos bioinspirados (PALOMBINI, 2016).

### 2.3 Microtomografia Computadorizada de Raios X ( $\mu$ CT)

Para investigar amostras complexas e delicadas em 3D, como, por exemplo, os tecidos vegetais, uma das principais técnicas disponíveis é a de microtomografia, conhecida como  $\mu$ CT

(SENSEN; HALLGRÍMSSON, 2009). Com operação similar à de tomografia computadorizada (CT) convencional, encontrada em hospitais, a técnica utiliza feixes eletromagnéticos colimados no comprimento de onda de raios X para digitalizar a amostra de acordo com os valores de densidade específicos de cada região. Basicamente, após a emissão da radiação, a mesma é atenuada pela amostra, gerando uma radiografia, chamada de projeção; em seguida, a amostra é rotacionada em uma fração de grau para a aquisição de uma nova projeção. Após uma ou meia volta completa, as projeções são combinadas por um algoritmo, gerando um modelo 3D volumétrico da amostra, o qual pode ser exportado e analisado (LANDIS; KEANE, 2010; PALOMBINI, 2016).

A  $\mu$ CT diferencia-se da CT convencional por sua alta capacidade de resolução, com a obtenção de tamanhos de *voxel*<sup>6</sup> de pelo menos 50 – 100  $\mu m$  (STOCK, 2009) ou próximos de 1  $\mu m$  (LANDIS; KEANE, 2010), e pela rotação relativa: sendo da fonte-emissor, na CT convencional, e da amostra, na  $\mu$ CT (HERMANEK et al., 2018). Entre as principais vantagens da tecnologia para pesquisa científica encontram-se a capacidade de digitalizar amostras in vivo, a possibilidade de instalar módulos para a realização de ensaios mecânicos in situ – tais como tração, compressão, nanoindentação etc. – bem como na utilização de diferentes tipos de magnificação (GLEASON; PAULUS; OSBORNE, 2010; STOCK, 2009). Os dois principais meios de magnificação encontrados nos equipamentos de  $\mu$ CT são a geométrica e a óptica, sendo que o primeiro é produzido pelo simples afastamento da amostra do detector, e o segundo pela utilização de objetivas entre a amostra e o detector. Por ser mais sofisticado, o sistema de magnificação óptica leva à obtenção de imagem com qualidade superior, em termos da razão entre sinal e ruído<sup>7</sup>.

De modo geral, os principais pontos a serem considerados na utilização de  $\mu$ CT é a relação entre (1) resolução, (2) contraste e ruído, (3) campo de visão, e (4) tempo de análise. O primeiro ponto diz respeito à quantidade de detalhes obtidos durante uma aquisição, sendo comumente é utilizado o termo de resolução espacial ( $L_v$ ). Com unidade geralmente em  $\mu m$ ,  $L_v$  é a menor separação na qual dois pontos podem ser percebidos como entidades discretas,

---

<sup>6</sup> *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  $\mu m$ , o seu modelo 3D reconstruído possuirá um *voxel* com 5 (L) x 5 (A) x 5 (C)  $\mu m$ , na escala real (PALOMBINI, 2016).

<sup>7</sup> *Signal-to-noise ratio* (SNR) é uma medida comum para quantificar a perda de qualidade de imagem durante um processo, sendo definido pela razão entre o sinal médio e o ruído médio de uma região (BURGER; BURGE, 2016).

sendo limitado pelos *voxels* das imagens finais obtidas (GOLDSTEIN *et al.*, 2003; STOCK, 2009). Desse modo, a resolução espacial pode ser estimada como, pelo menos, duas vezes o tamanho do *voxel* obtido (CIDADE *et al.*, 2018; PALOMBINI, 2016). O segundo ponto, contraste e ruído, está relacionado com a qualidade com que os detalhes podem ser trabalhados. Assim, quanto maior o contraste, mais fácil será distinguir regiões de densidades distintas, ao passo que detalhes com densidades intermediárias podem ser perdidas (LANDIS; KEANE, 2010). Por outro lado, com um maior detalhamento dessas regiões, é importante também levar em consideração a geração de ruídos, ou artefatos indesejados, ainda que os mesmos possam ser reduzidos em etapas de pós-processamento. Em seguida, o campo de visão, ou *field of view* (FoV), trata da abrangência captada pelas projeções de  $\mu$ CT; de maneira que quanto maior o FoV, menores serão os detalhes observáveis. A exceção dá-se pela realização de mais de uma aquisição, em posições distintas de uma mesma amostra, sendo combinadas posteriormente (HANKE *et al.*, 2016). Por fim, a questão do tempo diz respeito tanto ao custo da análise, obviamente, quanto à maior exposição de radiação e calor na amostra, sendo que, apesar de a  $\mu$ CT ser considerada uma análise não-destrutiva, o uso de tempos de projeção acima do necessário poderia danificar amostras mais delicadas (BOYD, 2009b).

Nos próximos subtópicos são vistos alguns dos princípios teóricos básicos necessários para compreensão do funcionamento e operação geral do equipamento e, conseqüentemente, para a seleção dos parâmetros mais apropriados para esse tipo de análise. Em seguida, é abordada a utilização desses parâmetros para se trabalhar com materiais de origem vegetal. As informações são de grande importância tanto para o desenvolvimento dos estudos de caso, bem como para a etapa de geração de diretrizes para essas análises.

### 2.3.1 Geração de raios X

Considerando a radiação no comprimento de onda ( $\lambda$ ) dos Raios X um tipo de onda eletromagnética, a energia ( $E$ ), medida em elétron-volt ( $eV$ ), de cada fóton é proporcional a sua frequência, sendo definida pela equação de Planck–Einstein (HERMANEK *et al.*, 2018):

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

em que  $h$  é a constante de Planck, ou  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ;  $f$  é a frequência, expressa em  $\text{Hz}$ ; e  $c$  é a velocidade da luz, ou  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Desse modo, com  $f$  variando de  $3 \times 10^{16}$  a

$3 \times 10^{19} \text{ Hz}$ , e conseqüentemente, com  $\lambda$  variando de 0,01 a 10 nm, tem-se que a energia de raios X varia de 100 eV a 100 keV (GLEASON; PAULUS; OSBORNE, 2010). Os raios X são caracterizados pela quantidade e pela qualidade do feixe. A quantidade está relacionada com o número de fótons, e a qualidade a energia dos mesmos e, assim, sua capacidade de penetração. Portanto, radiações com comprimento de onda maior, ou  $\lambda > 0,1 \text{ nm}$ , são designados pelo termo de raios X “moles”, ou com pouca penetração, e os com comprimento de onda menor são chamados de raios X “duros” (HERMANEK *et al.*, 2018).

O processo de interação entre o raio X e os materiais está relacionado nas propriedades da radiação ionizante. Os elétrons possuem uma energia de ligação essencial, sendo relacionada a seu correspondente átomo, de modo que essa energia: (1) diminui com a distância em que sua camada encontra-se do núcleo; e (2) é maior em átomos com maior número de prótons ( $Z$ ). Desse modo, tem-se que a menor energia de ligação pertence ao hidrogênio, correspondendo a aproximadamente 13,6 eV. Logo, fótons com energia superior a esse valor, como os raios X, possuem a capacidade de remover um elétron da órbita de um átomo, sendo considerados ionizantes (MORRISON, 2015).

A geração dessa radiação ocorre de diversos modos, tais como aceleradores lineares, de luz de sincrotron e os que são do foco desta pesquisa, ou seja, os provenientes de tubos de raios X, encontrados em equipamentos de  $\mu\text{CT}$  (SHAW, 2014). A fonte geradora desse tipo de equipamento consiste em um conjunto de cátodo e ânodo, inseridos em uma câmara a vácuo e conectados a uma fonte de energia. Ao ser conectado ao polo negativo do gerador, o cátodo é aquecido pelo efeito Joule, fazendo com que a energia cinética de seus elétrons aumente com a temperatura. Quando esta energia torna-se maior que a energia de ligação dos elétrons do cátodo, estes são ejetados do material, no efeito chamado de emissão termiônica (THORNTON; REX, 2013). Devido à diferença de potencial no sistema, os elétrons emitidos pelo efeito são acelerados em direção ao ânodo, que está conectado ao polo positivo do gerador. O processo de bombardeio de elétrons leva a uma grande produção de calor no ânodo, sendo que cerca de 99% da energia recebida é transformada em calor, e apenas o 1% restante é convertido em raios X (HERMANEK *et al.*, 2018). Sob essas circunstâncias, o tungstênio torna-se um dos materiais mais utilizado como cátodo e ânodo, devido a: (1) seu alto número atômico ( $Z = 74$ ), aumentando a probabilidade de elétrons serem emitidos e atingidos; e (2) seu alto ponto de fusão de 3422 °C, tornando-o capaz de suportar temperaturas próximas dos 2130 °C, alcançadas durante o efeito termiônico. Ainda por esse motivo, o ânodo é tam-

bém envolto em uma parte mais espessa, geralmente de cobre, para aumentar a dissipação do calor (HERMANEK *et al.*, 2018).

A conversão da emissão de elétrons acelerados em direção ao ânodo em raios X ocorre segundo três tipos de interações principais. Na primeira, ao aproximar-se do núcleo do ânodo, o elétron emitido é desacelerado e desviado pelo campo de Coulomb<sup>8</sup> do átomo, levando à geração de um fóton na frequência de raios X. Esse tipo de geração é conhecido por radiação de *bremstrahlung* (do alemão *bremsen* “freiar” e *strahlung* “radiação”), ou “radiação de desaceleração” (THORNTON; REX, 2013). A segunda interação, chamada de radiação característica, ocorre quando o elétron acelerado colide com um elétron de uma camada interior de um átomo do ânodo, ejetando-o. Por exemplo, um elétron da camada *K* (a mais próxima do núcleo), ao ser colidido e ejetado, leva à geração de uma lacuna (na camada onde estava) e à ionização do átomo. Essa lacuna é preenchida por um elétron de uma das camadas externas do átomo, *L*, *M*, *N*, etc., com a emissão de um fóton de raio X com energia característica  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$ ,  $K_{\gamma}$ , etc., respectivamente (STOCK, 2009). De modo similar, se o elétron ejetado é da camada *L*, a energia do fóton gerado pelo preenchimento das camadas externas *M*, *N*, *O*, etc. terá característica  $L_{\alpha}$ ,  $L_{\beta}$ ,  $L_{\gamma}$ , etc. (HERMANEK *et al.*, 2018). Por fim, o terceiro tipo corresponde à interação direta entre o elétron acelerado e o núcleo do átomo do ânodo, fazendo com que toda a energia do elétron seja transferida para radiação de *bremstrahlung*, ainda que possuindo uma probabilidade baixa de ocorrer.

### 2.3.2 Fatores de influência no espectro de raio X

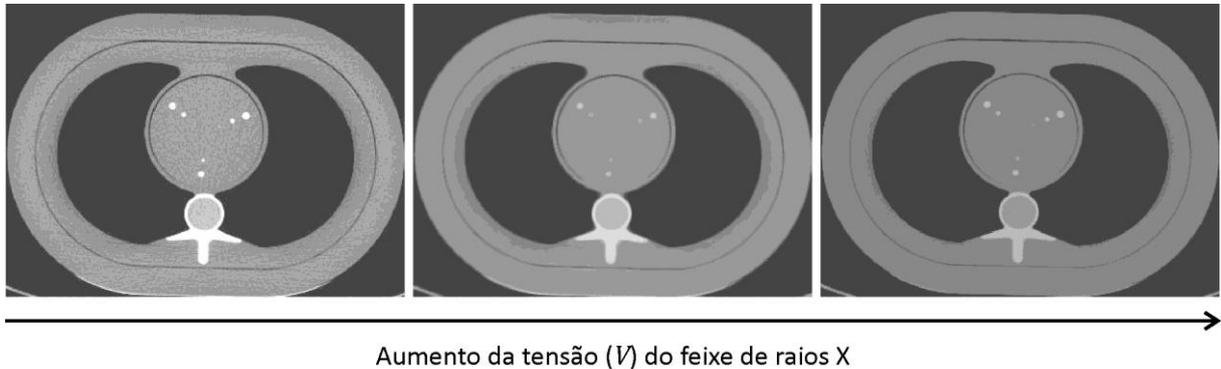
Com a geração e emissão de fótons de raio X, é possível definir alguns parâmetros de equipamento para modificar características do espectro, tais como (1) tensão, (2) corrente e o (3) uso de filtros. A tensão (*V*) de aceleração do tubo de raios X, geralmente medido em *kV*, determina tanto o intervalo quanto a amplitude da energia do espectro da radiação. Assim, quanto maior for a tensão, maior será a energia do feixe, auxiliando a penetração de amostras mais absorventes (HERMANEK *et al.*, 2018). A figura 5 ilustra a diferença entre níveis crescentes de tensão do feixe, em função do contraste em uma imagem de tomografia. Conforme a tensão é aumentada, maior é a energia dos fótons e mais penetrantes eles se tornam, redu-

---

<sup>8</sup> Campo eletrostático em volta de uma partícula ou corpo carregado (MORRISON, 2015).

zindo o ruído das imagens, ainda que também diminuindo o contraste entre as áreas mais densas (níveis mais claros de cinza) e menos densas (níveis mais escuros) (STOCK, 2009).

Figura 5 – Representação do efeito de aumento da tensão do feixe de raios X no contraste e ruído de uma amostra. Quanto maior a tensão, menor é a quantidade de ruído, mas também menor é o contraste.



FONTE: Adaptado de Shaw (2014).

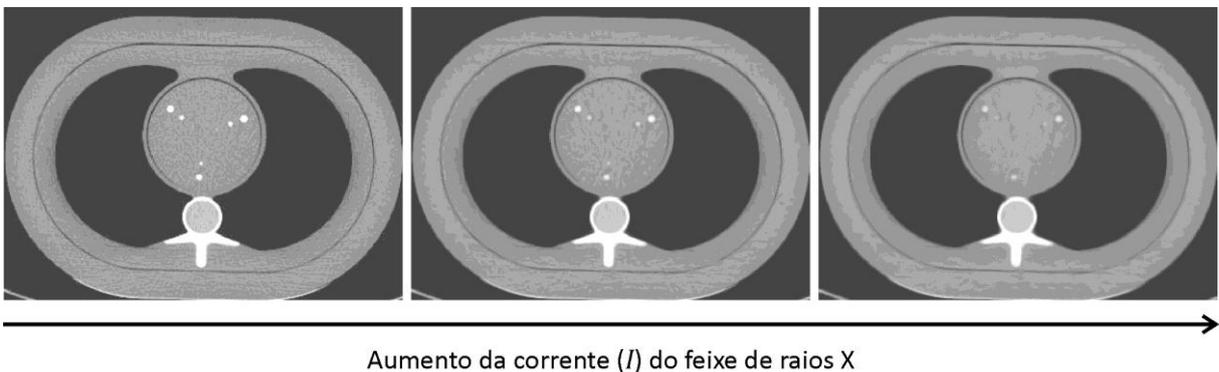
A intensidade da corrente ( $I$ ) do tubo de raios X também influencia diretamente a qualidade de uma aquisição por  $\mu$ CT. Contudo, diferentemente da tensão, que está relacionada com a energia do feixe e, portanto, à sua frequência e comprimento de onda, a corrente, geralmente medida em  $mA$  ou  $\mu A$ , determina o número de fótons que é emitido durante um intervalo de tempo (HERMANEK *et al.*, 2018). Assim, ao aumentar a corrente, há um aumento linear na intensidade de raios X, ainda que sem mudança no intervalo e na amplitude de energias dos fótons do feixe. O resultado é uma aquisição com uma menor quantidade de ruído, mas com uma maior tendência de espalhamento do foco de raios X, levando a uma perda na resolução espacial. A figura 6 representa o efeito do aumento da corrente em uma aquisição; ao aumentar a corrente, é notado uma diminuição do ruído, ao passo que há uma perda na resolução espacial, visto pelos detalhes das imagens (STOCK, 2009).

Como visto, a geração do feixe de raios X geralmente compreende uma gama de fótons com grande variação no espectro de comprimento de onda e, assim, da energia da radiação. Especialmente, os feixes “moles”, *i.e.*, com maior comprimento de onda, são mais facilmente atenuados pela matéria da amostra do que os de maior energia, levando a defeitos como o endurecimento de feixe<sup>9</sup>, que podem dificultar a interpretação de regiões com gradientes de densidade, principalmente se a região mais densa encontra-se na periferia (STOCK, 2009). Como eles são absorvidos pela amostra, a média de energia detectada pelo sensor é aumen-

<sup>9</sup> *Beam hardening* é o efeito de atenuações seletivas de fótons de baixa energia, levando à formação de artefatos indesejados, como gradientes radiais, faixas escuras no interior ou claras no exterior (STOCK, 2009).

tada em comparação ao feixe original, ou seja, o feixe é endurecido (HANKE *et al.*, 2016; HERMANEK *et al.*, 2018). Para evitar o efeito de filtros de baixa energia, é comum a utilização de filtros de materiais metálicos – como cobre, alumínio ou estanho – entre a fonte de radiação e a amostra. Desse modo, o feixe já é pré-endurecido, *i.e.*, fótons com baixa energia são minimizados, aumentando a média de energia do feixe emitido e diminuindo os efeitos dos artefatos indesejados nas imagens obtidas (HERMANEK *et al.*, 2018).

Figura 6 – Representação do efeito de aumento da corrente do feixe de raios X na resolução e no ruído de uma amostra. Quanto maior a corrente, menor é a quantidade de ruído, mas também menor é a resolução.



FONTE: Adaptado de Shaw (2014).

Outro importante fator na realização de análises de  $\mu$ CT, mesmo que seja considerado inerente ao equipamento, é o tamanho do ponto focal. Inclusive, os sistemas de tomografia trabalham com diferentes grupos de classificação com base no tamanho do ponto focal: CT convencional com tamanho maior que  $0,1\text{ mm}$ ; microtomografia com tamanhos de poucos micrômetros (microfocos); nanotomografia com tamanhos inferiores a  $1\ \mu\text{m}$  (*nanofocus*); e CT de síncrotron com até  $0,04\ \mu\text{m}$  (HERMANEK *et al.*, 2018). Como o processo de geração de raios X gera uma grande quantidade de calor, o feixe de elétrons recebido no ânodo não pode ter um tamanho focal infinitesimal. Ainda que seja o ideal para um aumento da resolução e para a redução de efeitos de “penumbra” e “borrões” em imagens de  $\mu$ CT, isso levaria a uma concentração de calor, que poderia derreter localmente o material (HERMANEK *et al.*, 2018). Assim, dois fatores principais afetam o tamanho do ponto focal: (1) a orientação do ânodo e (2) potência do tubo. A primeira diz respeito ao ângulo entre o feixe de elétrons e a superfície do ânodo: quanto menor for o ângulo (deixando-o mais paralelo ao feixe) maior será o tamanho do ponto focal, levando à perda de resolução; já quanto maior for o ângulo (deixando-o mais perpendicular ao feixe), maior é a probabilidade de os elétrons do feixe serem retroespalhados. Com relação à potência, quanto maior ela for, também é aumentado proporcional-

mente o tamanho do ponto focal (FLYNN *et al.*, 1994; HERMANEK *et al.*, 2018).

Ao relacionar a tensão e a corrente, tem-se a determinação tanto da potência do feixe ( $P = V.I$ ), em  $W$ , quanto da dose de radiação ( $Rad$ ). A dose de radiação, por sua vez, está também relacionada às características de absorção da amostra, definida por sua composição, densidade e tamanho (HANKE *et al.*, 2016). De modo geral, para a obtenção de resoluções espaciais ( $L_v$ ) maiores, torna-se necessário aumentar a dose de radiação, segundo a relação (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000; HANKE *et al.*, 2016):

$$L_v \propto Rad^3 \quad (7)$$

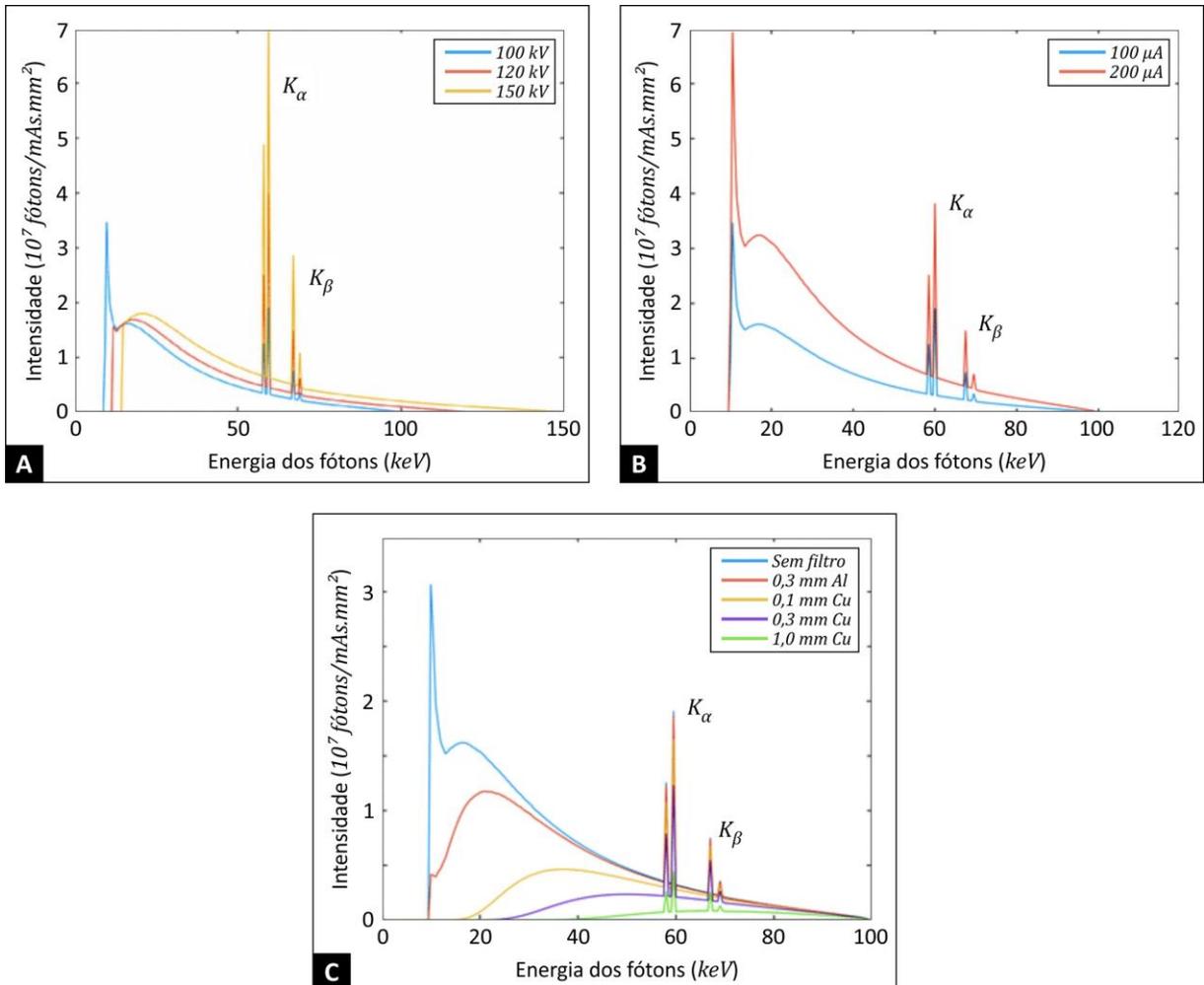
Nesse caso, é preciso levar em consideração a relação entre ambas as variáveis, de modo a manter um valor significativo de potência. Contudo, como um aumento na potência leva à diminuição do contraste (maior penetração em amostras), e um aumento na corrente leva à diminuição na resolução espacial (maior chance de espalhamento<sup>10</sup> de fótons), pode não ser recomendável aumentar a tensão e a corrente simultaneamente (SHAW, 2014). Além disso, como o aumento da potência do feixe também está relacionado a um maior tamanho do seu ponto focal (HERMANEK *et al.*, 2018), apesar de aumentar a dose de radiação que é recebida pela amostra, isso também levaria a uma perda de resolução. Desse modo, para aumentar a resolução espacial de uma análise de  $\mu$ CT torna-se essencial diminuir o tamanho da amostras utilizada ou trabalhar-se com equipamentos de feixes mais colimados (HANKE *et al.*, 2016; HERMANEK *et al.*, 2018; STOCK, 2009).

Para resumir as influências de cada parâmetro no feixe de raios X, a figura 7 apresenta exemplos de espectros gerados com variações na tensão, corrente e na aplicação de filtros, para um ânodo de tungstênio. Os espectros são mostrados em termos da energia dos fótons ( $keV$ ) em função da intensidade ( $fótons/mAs.mm^2$ ). As curvas contínuas representam a radiação *bremsstrahlung* e, os picos, as radiações características  $K_\alpha$  e  $K_\beta$ . Ao aumentar a tensão (figura 7A), é aumentada a intensidade de fótons de alta energia, e reduzida a dos de baixa energia. Aumentando a corrente (figura 7B), tem-se uma ampliação linear da intensidade dos fótons em todo o espectro. Por fim, ao modificar tanto a espessura quanto o material (densidade) dos filtros (figura 7C), tem-se uma diminuição da intensidade dos fótons de baixa energia no espectro gerado (HERMANEK *et al.*, 2018).

---

<sup>10</sup> *Scattering* é o fenômeno no qual os fótons têm sua direção alterada após interação com outras partículas (THORNTON; REX, 2013).

Figura 7 – Influência de parâmetros no espectro gerado de feixe de raios X, apresentados em termos da energia dos fótons ( $keV$ ) em função da intensidade ( $fótons/mAs.mm^2$ ), em que as curvas contínuas representam a radiação *bremsstrahlung* e, os picos, as radiações características  $K_\alpha$  e  $K_\beta$ : (A) influência da tensão; (B) influência da corrente; (C) influência da aplicação de filtros de raios X.



FONTE: Adaptado de Hermanek *et al.* (2018).

### 2.3.3 Atenuação da radiação

Diversos efeitos são observados durante a interação da radiação por raios X com o objeto, os quais também influenciam diretamente a qualidade das imagens obtidas por  $\mu CT$ . Essencialmente, ao atravessar um objeto, a intensidade do feixe de radiação é reduzida exponencialmente devido a mudanças no número, na energia e na direção dos fótons emitidos (HERMANEK *et al.*, 2018). A este processo de redução é dado o nome de atenuação. Com base nas descobertas de Röntgen (1898), a atenuação da radiação em um objeto homogêneo é determinada a partir da atenuação da intensidade original do feixe  $I_0$ , conforme a Lei de Beer-Lambert (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000):

$$I_R = I_0 e^{-\mu x} \quad (8)$$

onde  $I_R$  é a intensidade da radiação após atravessar um objeto com um *coeficiente de atenuação linear*  $\mu$ , expresso em  $cm^{-1}$ , e com espessura  $x$  (PALOMBINI, 2016; STOCK, 2009). O coeficiente  $\mu$  descreve a propriedade de atenuação de um material homogêneo específico sobre uma, também específica, energia de Raios X, dependendo linearmente da densidade do material (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000).

Como um mesmo material pode possuir um  $\mu$  diferente, como água, gelo e vapor, é possível relacioná-lo diretamente com suas respectivas densidades ( $\rho$ ), também linearmente dependentes, resultando no coeficiente *de atenuação de massa*, ou  $\mu/\rho$  (BEUTEL; KUNDEL; METTER, 2000; PALOMBINI, 2016). Desse modo, a Eq. (8) também pode ser reescrita como:

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x} \quad (9)$$

onde  $\rho x$  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  $\rho$  ser definido por  $g/cm^3$ , a unidade de  $\mu/\rho$  é  $cm^2/g$ .

A quantidade de atenuação da radiação está relacionada diretamente com o número de átomos da amostra que o feixe de Raios X colide, ao atravessá-la (STOCK, 2009). Assim, o coeficiente de atenuação de massa depende tanto do número atômico  $Z$  do material, quanto da energia  $E$  (em  $keV$ ) da radiação, e do seu comprimento de onda  $\lambda$  (expresso em  $nm$ )<sup>11</sup>. Desse modo, quanto maior for o número atômico e, por consequência, a densidade da amostra, maior será a atenuação da radiação. Contudo, apesar da relação direta entre as propriedades da matéria e a radiação por raios X, as Eqs. (8) e (9) são consideradas descrições incompletas da atenuação da radiação, em virtude de serem baseadas em uma propagação linear do fóton emitido e posteriormente captado pelo sensor, após atenuação na amostra (STOCK, 2009). Um dos motivos é a pouca coerência<sup>12</sup> característica da radiação produzida por tubos de raios X (HERMANEK *et al.*, 2018). Nesse caso, a atenuação da radiação é mais bem descrita com base em quatro fatores principais da interação entre os raios X e a matéria: (1) efeito fotoelétrico; (2) efeito Compton; (3) espalhamento Rayleigh; e (4) produção de pares (HERMANEK *et al.*, 2018; SHAW, 2014; STOCK, 2009).

O efeito fotoelétrico, provavelmente o mais conhecido deles, foi descoberto por Albert

<sup>11</sup> Para Raios X, a relação entre energia ( $E$ ) e comprimento de onda ( $\lambda$ ) é expressa por  $\lambda = 1,256 E$  (SVERGUN *et al.*, 2013).

<sup>12</sup> Coerência ocorre quando fótons da radiação possuem o mesmo comprimento de onda e fase (THORNTON; REX, 2013).

Einstein em 1905 e é um fenômeno sobre as relações entre a interação de fótons com elétrons (HERMANEK *et al.*, 2018). Especificamente, o efeito trata da emissão de um elétron do material de uma amostra ao ser atingido por um fóton. Para isso, é preciso que o fóton incidente possua uma energia mais alta que a energia de ligação de um elétron de uma camada interior do material irradiado, e ainda possua energia suficiente para ejetá-lo (STOCK, 2009). Desse modo, essa transferência de energia é descrita por:

$$E = E_l + E_{fe} \quad (10)$$

onde  $E = hf$ , apresentado na Eq. (6), é a energia do fóton;  $E_l$  é a energia de ligação; e  $E_{fe}$  é a energia cinética do fotoelétron livre (HERMANEK *et al.*, 2018). Ao ter o elétron ejetado, o material alvo passa a ser ionizado até que a lacuna deixada pelo elétron seja preenchida por outro elétron de uma camada mais externa, liberando um fóton com radiação característica fluorescente (STOCK, 2009). Uma das abordagens utilizadas para estimar a relação entre o coeficiente de atenuação devido ao efeito fotoelétrico ( $\mu_{fe}$ ) é:

$$\mu_{fe} \propto Z^4 \lambda^3 \quad (11)$$

em que  $Z$  é o número atômico do material irradiado; e  $\lambda$  é o comprimento de onda do fóton (HERMANEK *et al.*, 2018).

Segundo a teoria clássica do espalhamento de Joseph John Thomson, elétrons tenderiam a oscilar na mesma frequência dos fótons que os incidiram, irradiando, novamente, fótons na mesma frequência. Contudo, Arthur Compton observou que fótons com energia inferior (comprimentos de onda maiores) eram liberados após a colisão, confirmando que a lei de eletromagnetismo clássica não se aplicaria, e propondo seguir o modelo de Einstein, ao sugerir a aplicação das leis de conservação de energia (THORNTON; REX, 2013). Desse modo, o chamado efeito Compton (ou espalhamento Compton) é observado pela mudança de direção (espalhamento) de um fóton de raio X após a interação com elétrons livre ou elétrons de camada externa (valência), que possuem uma fraca ligação ao átomo (HERMANEK *et al.*, 2018). Conforme uma colisão elástica, o fóton muda seu comprimento de onda e direção, segundo:

$$E = E_{ej} + E' \quad (12)$$

em que  $E_{ej}$  é a energia cinética do elétron ejetado; e  $E'$  é a energia do elétron desviado (HERMANEK *et al.*, 2018). Ao contrário do efeito fotoelétrico, cuja probabilidade de ocorrer depende do número atômico do material irradiado – Eq. (11) – a probabilidade do efeito Compton depende da densidade de elétrons do mesmo. Assim seu coeficiente de atenuação ( $\mu_{compt}$ ) pode ser expresso por:

$$\mu_{compt} = n \cdot \sigma_{compt} \quad (13)$$

onde  $n$  é a densidade de elétrons; e  $\sigma_{compt}$  é a seção de choque<sup>13</sup> total do efeito Compton (HERMANEK *et al.*, 2018).

O espalhamento de Rayleigh ocorre quando fótons de baixa energia interagem com os elétrons da amostra, sendo uma consequência das propriedades das ondas eletromagnéticas de interagirem por meio das oscilações de seus campos elétricos (HERMANEK *et al.*, 2018). Os elétrons oscilados por esses fótons podem espalhar-se elasticamente, contudo, diferentemente do efeito Compton, nenhuma energia é transferida (HERMANEK *et al.*, 2018). Seu coeficiente de atenuação ( $\mu_{ray}$ ) segue a relação (PODGORŠAK, 2016):

$$\mu_{ray} \propto \frac{1}{E^2} \propto Z^2 \quad (14)$$

Mesmo com baixos valores de energia ( $E$ ), a atenuação por Rayleigh é baixa, portanto, sua contribuição para a atenuação total é pequena (PODGORŠAK, 2016).

Similar ao efeito fotoelétrico, a produção por pares resulta na atenuação completa do fóton incidente, entretanto é um fenômeno que ocorre somente em fótons de raio X com alta energia, na casa de  $MeV$  (HERMANEK *et al.*, 2018). Ao ser atenuado, o fóton gera a produção de um par elétron-pósitron devido à interação com o campo de Coulomb do átomo atingido (PODGORŠAK, 2016). O par recém gerado é anulado, gerando a emissão de fótons que podem ser espalhados ou absorvidos pelo núcleo (HERMANEK *et al.*, 2018). Já seu coeficiente de atenuação ( $\mu_{pp}$ ) pode ser estimado por (PODGORŠAK, 2016):

$$\mu_{pp} \propto Z^2 \quad (15)$$

Por se tratar de um efeito dependente de faixas de energia consideravelmente mais altas das convencionalmente utilizadas em  $\mu CT$ , sua contribuição para a atenuação total também é pequena (HERMANEK *et al.*, 2018).

Por fim, ao unir todas as quatro formas de atenuação relacionadas às interações entre os fótons de raio X e a amostra, é possível determinar a atenuação total do feixe, ao penetrá-lo. O coeficiente de atenuação total ( $\mu_T$ ) é, então, simplesmente definido pela soma dos coeficientes das Eqs. (11, 13, 14, 15) (HERMANEK *et al.*, 2018):

$$\mu_T = \mu_{fe} + \mu_{compt} + \mu_{ray} + \mu_{pp} \quad (16)$$

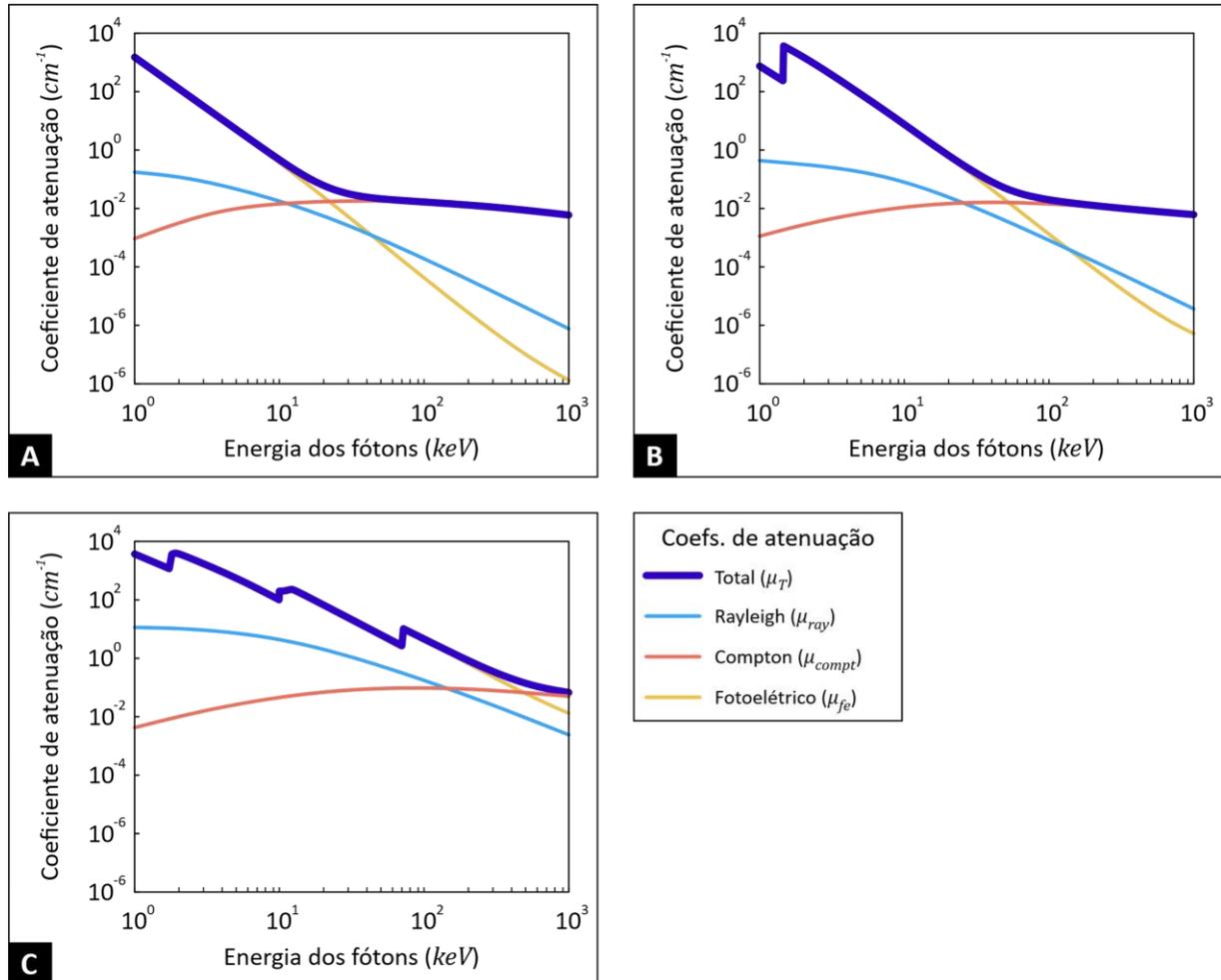
A figura 8 apresenta, em escala logarítmica, os espectros da contribuição de cada coeficiente

---

<sup>13</sup> Seção de choça (ou *cross section*), na física, é a área que está relacionada com a probabilidade de uma partícula ser espalhada por uma colisão (THORNTON; REX, 2013).

de atenuação visto para materiais com  $Z$  distintos: carbono ( $Z = 6$ ), alumínio ( $Z = 13$ ) e tungstênio ( $Z = 74$ ), bem como o somatório referente ao coeficiente de atenuação total ( $\mu_T$ ).

Figura 8 – Coeficientes de atenuação total ( $\mu_T$ ), do efeito fotoelétrico ( $\mu_{fe}$ ), do efeito Compton ( $\mu_{compt}$ ), e do espalhamento Rayleigh ( $\mu_{ray}$ ) para: (A) carbono; (B) alumínio; e (C) tungstênio.



FONTE: Adaptado de Hermanek *et al.* (2018).

Na maioria dos materiais a maior parte da contribuição da atenuação a energias mais baixas dá-se com o efeito fotoelétrico. Por ser independente do número atômico, o efeito Compton mantém-se de modo bastante similar em todos os materiais. Para o carbono (figura 8A), sendo um dos elementos mais representativos para materiais vegetais, em virtude de possuir o menor número atômico dos espectros apresentados, o efeito Compton torna-se o fator dominante de atenuação da radiação para energias acima de 25 keV. Para o caso do alumínio (figura 8B), um dos materiais utilizados como filtro para baixas energias, a dominância do efeito Compton surge apenas a energias superiores a 50 keV. Já para o tungstênio, material muito utilizado nos filamentos de cátodos e ânodos em tubos de raios X, o efeito

fotoelétrico torna-se dominante na maior gama de energias (HERMANEK *et al.*, 2018).

Os picos de descontinuidades observados nos espectros do alumínio (figura 8B) e tungstênio (figura 8C) correspondem às radiações características das camadas de elétrons através da atenuação pelo efeito fotoelétrico, sendo também conhecidos como bordas de absorção, ou *absorption edges* (PODGORŠAK, 2016). Para o alumínio, o pico corresponde à radiação característica da borda de absorção *K*, por volta de  $1,5\text{ keV}$ ; já para o tungstênio, as bordas de absorção *K*, *L* e *M* ocorrem por volta de  $70\text{ keV}$ ,  $11\text{ keV}$  e  $2\text{ keV}$ , respectivamente (HERMANEK *et al.*, 2018; PODGORŠAK, 2016). Como a energia de ligação da camada *K* do carbono é inferior ( $\sim 280\text{ eV}$ ) ao espectro apresentado, sua linha não aparece com descontinuidades de radiação característica (ATTWOOD, 2007). Por fim, uma vez que a atenuação por produção de pares só ocorre com fótons de alta energia, sua influência não é apresentada nas faixas dos espectros avaliados na figura 8.

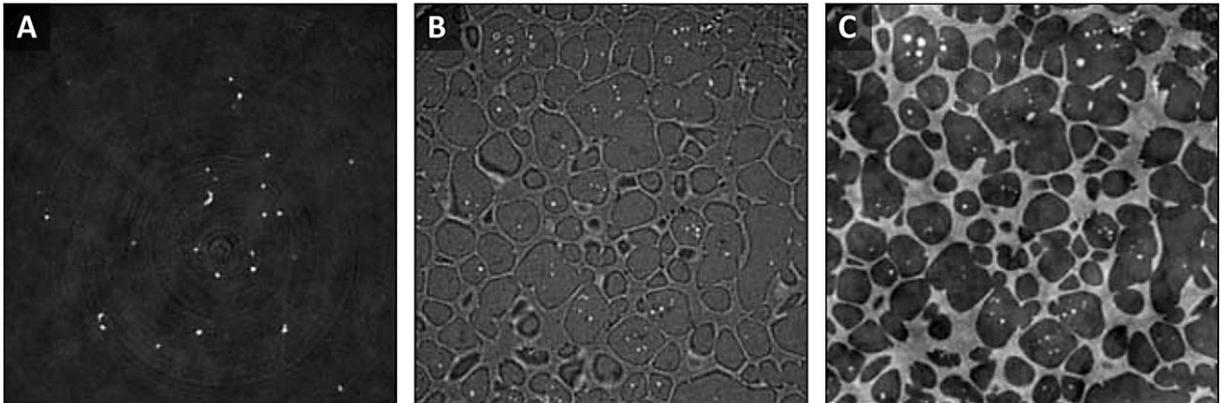
#### 2.3.4 Mecanismos de contraste

Ainda que a maioria dos equipamentos de  $\mu\text{CT}$  dependam do contraste baseado nos diferentes níveis de atenuação de radiação, a partir de valores separados para elementos e composições distintos, outros meios de ampliação e detecção de níveis de contraste também podem ser aplicados (STOCK, 2009). O contraste torna-se essencial para auxiliar na distinção de regiões diferentes em uma amostra. Por se tratar de um material com, relativamente, pouca variação de composição e densidade em uma mesma amostra, os materiais vegetais produzem, por consequência, imagens resultantes de  $\mu\text{CT}$  com menores níveis de contraste. Nesse sentido outros tipos de técnicas para aumento de contraste podem ser utilizados, tais como (1) contraste de fase (*phase-contrast*), (2) obtenção de imagem por campo escuro (*dark-field imaging*) e (3) a aplicação de agentes contrastantes.

O contraste de fase, conforme sua denominação indica, é caracterizado por utilizar informações sobre as mudanças de fase de um feixe de raios X ao atravessar a amostra para produzir projeções (HERMANEK *et al.*, 2018). A técnica é considerada mais sofisticada, contudo, encontra-se mais popularizada em equipamentos de  $\mu\text{CT}$  (STOCK, 2009). Durante a interação com o objeto, o feixe incidente de radiação passa por um processo de refração, dependente dos índices de refração específicos dos materiais componentes da amostra, o que produz uma mudança de fase. De maneira simplificada, os comprimentos de onda dos fótons

são distorcidos ao passar por regiões com diferentes densidades de elétrons, e sensores podem ser utilizados para detectar essas mudanças de modo a convertê-las em valores de intensidade (STOCK, 2009). A figura 9 apresenta um exemplo da aplicação do contraste de fase em uma amostra consistindo de grãos de alumínio embebidos em uma matriz de uma liga de alumínio e silício (*Al-Si*) em um ensaio de  $\mu$ CT. Devido à proximidade de densidade, no contraste por absorção da radiação (figura 9A) quase não é possível identificar diferença entre a matriz e os grãos. Ao aplicar o contraste de fase (figura 9B), as regiões com refração do feixe (contorno dos grãos) são destacadas e, após serem combinadas (figura 9C) tem-se uma imagem final com bom nível de contraste entre os materiais.

Figura 9 – Exemplo do efeito de contraste de fase em imagem de  $\mu$ CT de grãos de alumínio embebidos em uma matriz de *Al-Si*: (A) contraste por atenuação; (B) contraste de fase; e (C) imagens combinadas.

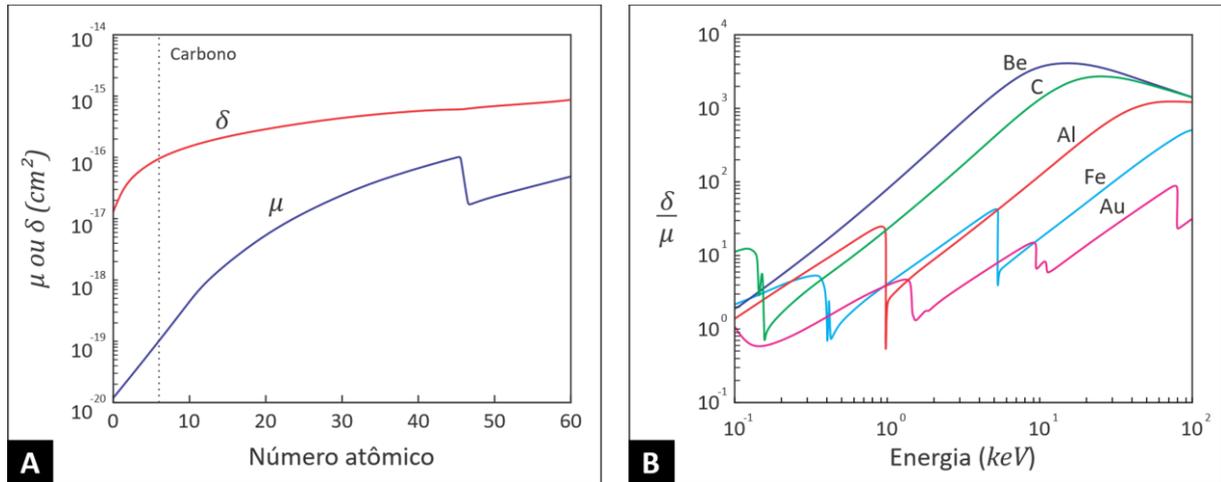


FONTE: Adaptado de Stock (2009).

O efeito do contraste de fase, em comparação ao processo de atenuação da radiação pode ser comparado com base em diferentes tipos de materiais. De acordo com os elementos químicos constituintes, sua influência torna-se mais significativa no sinal de radiação recebido. A figura 10 apresenta um comparativo entre os índices componentes da atenuação da radiação ( $\mu$ ) e mudança de fase ( $\delta$ ). Na figura 10A ambos os índices são apresentados em um espectro com relação a números atômicos distintos (SHAW, 2014). Para elementos com menor número atômico, como exemplificado para o carbono, o índice  $\delta$  é consideravelmente mais expressivo para definir contrastes maiores do que atenuação. Já na figura 10B é apresentado um espectro da força relativa do índice de mudança de fase sobre atenuação para diversos elementos químicos, em função da energia do feixe de raios X utilizado (BORBÉLY *et al.*, 2011). Nota-se, novamente, que quanto menor o número atômico do elemento, mais significativa é a força do índice de mudança de fase para contraste para imagens baseadas em raios X. Do

mesmo modo, como visto anteriormente, quanto maior for a energia dos feixes de raio X mais relevante torna-se a força do contraste por mudança de fase em comparação ao contraste por atenuação (HERMANEK *et al.*, 2018; STOCK, 2009).

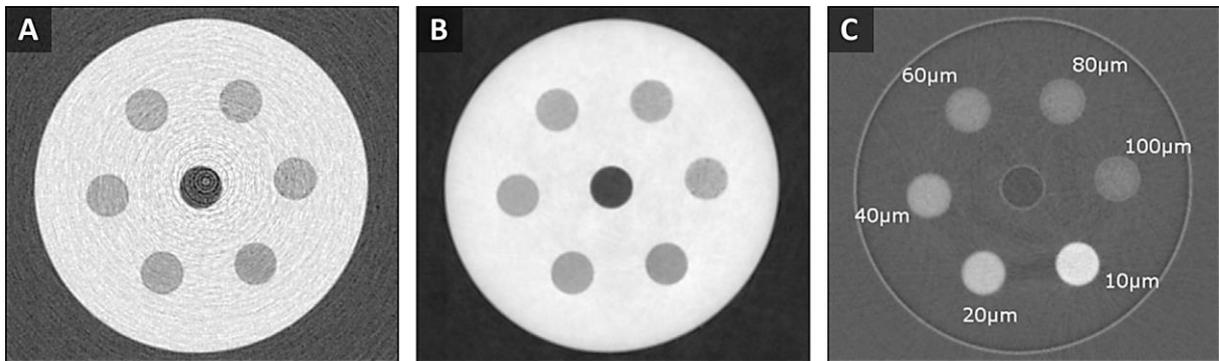
Figura 10 – Comparação dos componentes de atenuação ( $\mu$ ) e mudança de fase ( $\delta$ ): (A) relacionado ao número atômico e com ênfase no carbono ( $Z = 6$ ); (B) força relativa de  $\delta/\mu$  com relação à energia dos fótons.



FONTE: Adaptado de: (A) Shaw (2014); e (B) Borbély *et al.* (2011).

Contudo, há situações em que a detecção de diferentes níveis de refração em uma amostra não é suficiente para identificar pequenas alterações microestruturais em regiões específicas. Desse modo, a técnica de campo escuro trabalha para aumentar o contraste em pequenas regiões de um material com base em diferenças de espalhamento (STOCK, 2009). A técnica aproveita-se do fato de que regiões homogêneas levam a espalhamento de raios X de baixo ângulo negligenciáveis, ao passo que pequenas modificações de densidade levam a fortes espalhamentos de baixo ângulo. Os sinais que não são espalhados são utilizados como campo de fundo para serem removidos das imagens adquiridas, resultando um campo escuro em volta da amostra (HERMANEK *et al.*, 2018). A figura 11 ilustra o efeito da aplicação do contraste de campo escuro em uma amostra de um cilindro de Plexiglas® contendo seis compartimentos de polimetilmetacrilato (PMMA) em pó, com tamanhos de grão variando de 10 a 100  $\mu\text{m}$ . Tanto no contraste por atenuação (figura 11A) quanto no de fase (figura 11B) os compartimentos internos não apresentam diferenças entre si. No entanto, com a aplicação do campo escuro (figura 11C), essas regiões resultam em níveis de contraste diferentes, de modo que a intensidade detectada aumenta conforme a diminuição do tamanho dos grãos do pó de PMMA (HANKE *et al.*, 2016).

Figura 11 – Exemplo do efeito de campo escuro em imagem de  $\mu$ CT de um cilindro de Plexiglas® contendo seis compartimentos de polimetilmetacrilato (PMMA) em pó com tamanhos de grão variando de 10 a 100  $\mu\text{m}$ : (A) contraste por atenuação; (B) contraste de fase; e (C) contraste por campo escuro.



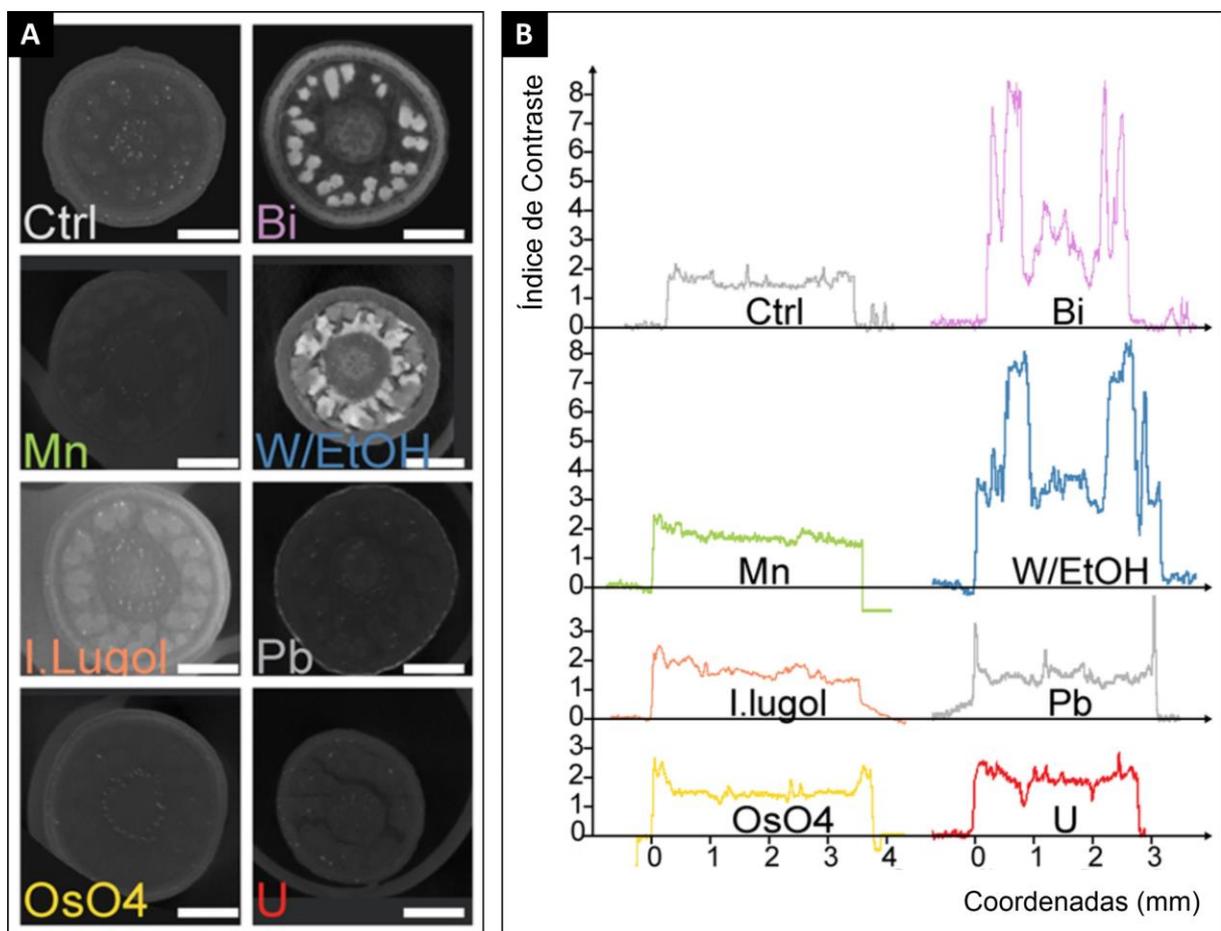
FONTE: Adaptado de Hanke *et al.* (2016).

Além do uso do contraste de fase e por campo escuro, que podem ser encontrados em determinados equipamentos de  $\mu$ CT, é possível basear-se na realização de protocolos que visam modificar o contraste de amostras por meio de agentes. Staedler, Masson e Schönenberger (2013) realizaram um comparativo dos principais métodos de contraste para tecidos vegetais com o objetivo de melhorar as imagens de alta resolução obtidas por  $\mu$ CT. Os autores impregnaram amostras de *Marcgravia caudata* com tartarato de bismuto (representado pela sigla Bi), permanganato de potássio (*Mn*), ácido fosfotúngstico em 70% etanol (*W/EtOH*), solução de Lugol (*I. Lugol*), citrato de chumbo (*Pb*), tetróxido de ósmio (*OsO<sub>4</sub>*) e acetato de uranila (*U*).

A figura 12 apresenta os resultados encontrados pelos autores relacionados à penetração dos agentes contrastantes no material biológico (figura 12A) com relação a índices de contraste, com a elaboração de um perfil (figura 12B). O perfil é definido com base na contagem relativa dos níveis de cinza em uma linha transversal (diâmetro) às respectivas imagens da figura 12A, de modo que quanto maiores forem os picos, maior é o nível de contraste das imagens. A linha transversal representa uma contagem relativa dos níveis de cinza de acordo com a sua posição (coordenada) na imagem, de modo que o valor de índice de contraste igual a zero representa o referencial (ar), ou a região preta de cada tomografia. Quando uma determinada região apresentam valores de cinza mais claros, o respectivo índice do contraste é maior. Deste modo, para bons níveis de contraste, é interessante a presença de picos e vales, representando regiões com tons de cinza mais claros e escuros. Os autores verificaram que os melhores agentes contrastantes, e que não danificavam as amostras, foram o ácido fosfotúngstico, tanto em 70% etanol (*W/EtOH*) quanto em FAA (formalina, ácido acético e álcool

etílico), e o tetróxido de ósmio ( $OsO_4$ ). Contudo, este foi observado contendo pouco poder de penetração, devendo, então, ser utilizado em amostras finas. Já o tartarato de bismuto (Bi), apesar dos bons níveis de contraste, também foi responsável por danos consideráveis em amostras, principalmente quando em exposição por maiores períodos (STAEDLER; MASSON; SCHÖNENBERGER, 2013).

Figura 12 – Aplicação de agentes contrastantes em amostra vegetal, com controle (*Ctrl*): (A) imagens de  $\mu$ CT com diferentes agentes; e (B) índice de contraste para cada agente. Agentes utilizados: tartarato de bismuto (Bi), permanganato de potássio (*Mn*), ácido fosfotúngstico em 70% etanol (*W/EtOH*), solução de Lugol (*I. Lugol*), citrato de chumbo (*Pb*), tetróxido de ósmio ( $OsO_4$ ) e acetato de uranila (*U*).



FONTE: Adaptado de Staedler, Masson e Schöenberger (2013).

### 2.3.5 Pós-processamento, filtros de imagem e caracterização

Após a aquisição das projeções radiográficas, parte-se para a etapa de reconstrução, que irá formar a geometria 3D da amostra digitalizada por  $\mu$ CT. Diversos conceitos relacionam-se a este processo, sendo sobretudo uma combinação de algoritmos que se baseiam em pontos em comum das projeções 2D para combiná-los (HERMANEK *et al.*, 2018). Além disso, para

transformar as radiações atenuadas em sinais digitais captáveis nas projeções são utilizados filtros cintiladores, os quais, de modo geral, emitem fótons no comprimento de onda da luz visível quando incididos por radiação na frequência de raios X (STOCK, 2009). Posteriormente, os raios de luz visível são captados por filtros CCD (*Charge-Coupled Device* ou dispositivo de carga acoplada). Contudo, como grande parte desse processo é realizada automaticamente e, muitas vezes, possuindo parâmetros desconhecidos ou proprietários do fabricante de cada equipamento, os quais permitem pouca modificação, bem como em virtude do propósito e justificativa desta tese ser elucidar os parâmetros essenciais para utilização de  $\mu$ CT em amostras vegetais, estas etapas não foram abordadas. Mais informações sobre as etapas de cintilação de raios X e processos matemáticos de reconstrução 3D baseadas em projeções de  $\mu$ CT podem ser vistas nas obras de Stock (2009), Hanke *et al.* (2016) e Hermanek *et al.* (2018).

Com as imagens reconstruídas em 3D com base nas projeções, o modelo digitalizado pode ser exportado como pilha de imagens<sup>14</sup> para etapas de pós-processamento e, posteriormente, analisado (PALOMBINI, 2016). Dentre os principais processos encontram-se os relacionados a ajustes de iluminação, redução de ruído e binarização. O primeiro diz respeito a modificações lineares (alterando todos os canais simultaneamente) ou não (alterando cada canal de maneira individual), tais como brilho, contraste e níveis, com o objetivo de aumentar a definição de regiões das imagens e facilitar sua visualização e estudo (RUSS; NEAL, 2016).

O processo de redução de ruído objetiva a redução dos artefatos indesejados aleatórios encontrados nas projeções de  $\mu$ CT e que são originados devido tanto à falta de informações suficientes quanto a incongruências na leitura dos sinais obtidos com a atenuação da radiação (HERMANEK *et al.*, 2018; SHAW, 2014). Diversos filtros podem ser aplicados para a redução de ruído, sendo novamente divididos, de modo geral, entre lineares e não-lineares. A figura 13 apresenta exemplos de aplicação de filtros mais utilizados para redução de ruído, com a imagem de “Lena”<sup>15</sup>, incluindo a imagem original (figura 13A), em resolução 512x512 *pixels*, e a versão com ruído (figura 13B), utilizada para aplicação dos demais filtros (figura 13 C-I).

---

<sup>14</sup> As imagens de  $\mu$ CT são exportadas como pilha de imagens (*image stack*), geralmente em formatos sem compactação como TIFF (*Tagged Image File Format*, ou formato de arquivo de imagem rotulado) e DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*, ou imagem e comunicação digitais em medicina), contendo uma sequência paralela de figuras cujo espaçamento equivale ao próprio valor do *voxel* da imagem, possibilitando que o modelo 3D seja visualizado em cortes sob qualquer direção (PALOMBINI *et al.*, 2017).

<sup>15</sup> A imagem é denominada devido ao nome da modelo sueca Lena Söderberg, ao posar para uma revista masculina em 1972. Foi incluída na coleção de imagens de testes da University of South California, sendo, desde então, considerada uma das fotografias mais utilizadas no mundo para pesquisa de desenvolvimento de filtros e tecnologias para imagens (BURGER; BURGE, 2016).

Figura 13 – Exemplo de aplicação de filtros para remoção de ruído: (A) imagem original; (B) imagem com ruído utilizada como base; (C) filtro de suavização linear; (D) filtro de mediana; (E) filtro *Sigma Plus*; (F) filtro Kuwahara; (G) filtro de difusão anisotrópica; (H) filtro bilateral; e (I) filtro de médias não-locais.



FONTE: (A) Adaptado de Burger e Burge (2016).

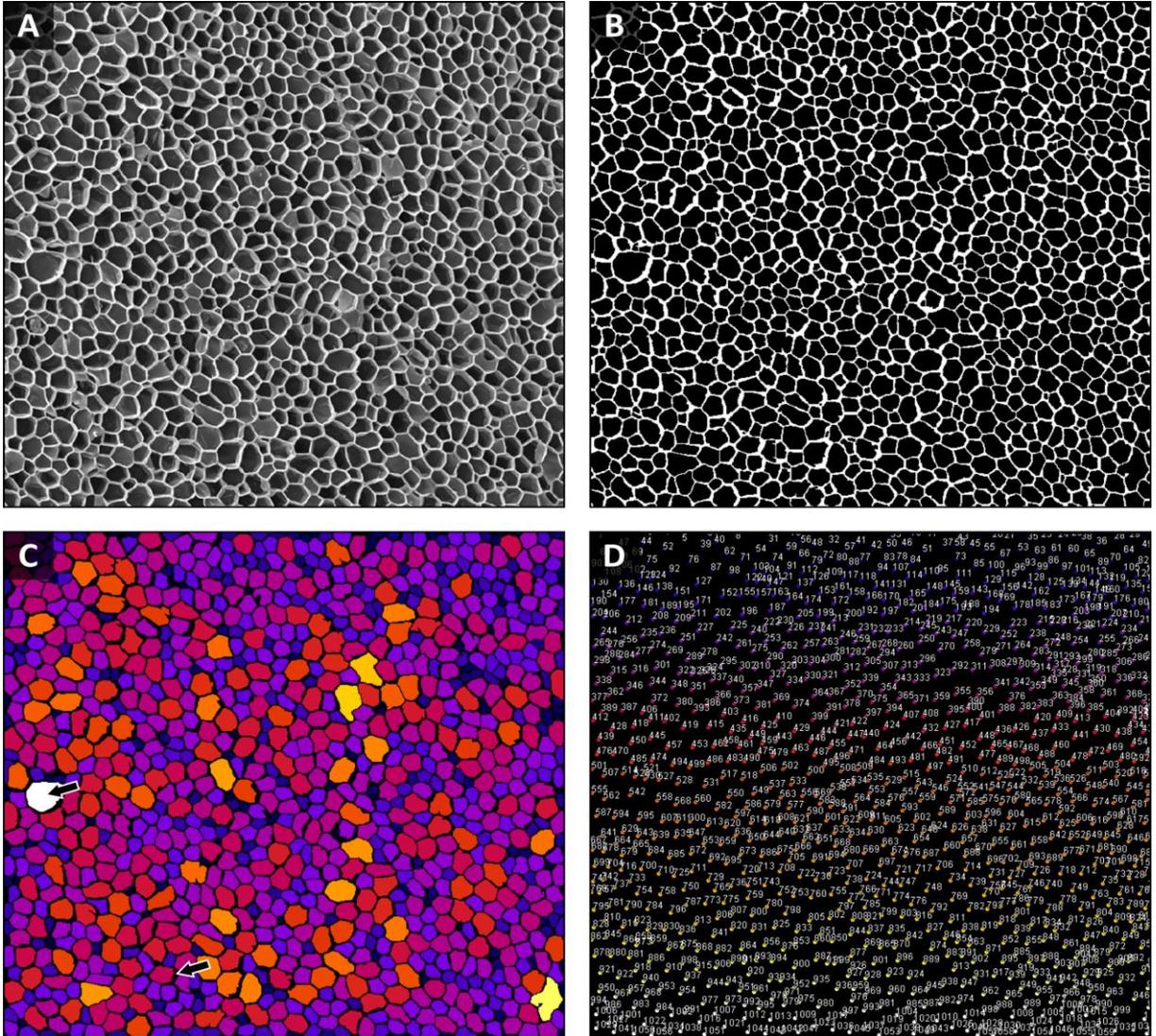
Os filtros lineares utilizam uma função matemática linear para realizar uma suavização geral na imagem, tais como suavização (*blur*) linear ou gaussiana (figura 13C), filtro adaptativo (*adaptive filter*) e filtro de diferença (*difference filter*) (BURGER; BURGE, 2016; GONZALEZ; WOODS, 2008). Nota-se que apesar de o filtro linear auxiliar na suavização do ruído, muitos detalhes finos também se tornam borrados, levando à perda de resolução em comparação à imagem original. Para evitar a perda de detalhes locais, torna-se interessante a aplicação de filtros não-lineares, os quais do contrário dos filtros lineares, utiliza expressões variáveis para

suavizar regiões. De modo geral, estes filtros calculam o resultado de uma posição na imagem com relação aos *pixels* dentro de uma determinada região da figura, utilizando-se de funções matemáticas não-lineares (BURGER; BURGE, 2016). O filtro de mediana (*median filter*, figura 13D) substitui todos os *pixels* da imagem pela mediana dos *pixels* na região filtrada, sendo mais efetivo contra ruídos locais (BURGER; BURGE, 2016). O filtro *Sigma Plus* (figura 13E) funciona de maneira semelhante, permitindo definir o tamanho do raio avaliado e do desvio-padrão (*sigma*) para cálculo da suavização (GONZALEZ; WOODS, 2008). O filtro Kuwahara (figura 13F) particiona a imagem em regiões para selecionar a mais homogênea para calcular os resultados do filtro (KUWAHARA *et al.*, 1976). O filtro de difusão anisotrópica (*anisotropic diffusion filter*) pondera os *pixels* em menor quantidade na direção do gradiente e em maior quantidade na direção oposta (anisotropia). Já o filtro bilateral (*bilateral filter*, figura 13H) utiliza a diferença entre valores de *pixels* para controlar quanto cada *pixel* individual na região do filtro contribui para a média local (TOMASI; MANDUCHI, 1998). Finalmente, o filtro de médias não-locais (*Non-Local Means*, figura 13I), ao invés de utilizar as médias de valores de *pixels* vizinhos ao *pixel* alvo para suavizá-lo, trabalha com a média de valores de todos os *pixels* da imagem, verificando sua similaridade com o alvo (BUADES; COLL; MOREL, 2011).

Como pode ser observado, nenhum filtro é capaz de ajustar uma imagem de modo que volte a parecer exatamente idêntica à original, uma vez que se torna impossível para um algoritmo distinguir totalmente quais características (*pixels*) da figura são ruído e quais efetivamente são detalhes desejados (BURGER; BURGE, 2016; GONZALEZ; WOODS, 2008). De modo geral, os filtros com melhores resultados, em termos de suavização de ruído e preservação de contornos, são os da última linha (figura 13, G-I). Em especial, o filtro de médias não-locais, apesar de seu resultado produzir uma suavização regional forte, e de preservar a maioria dos contornos, sua utilização é bastante intensiva em termos de recursos computacionais.

Com a aplicação de filtros para redução de ruídos na pilha de imagens de  $\mu$ CT, com o objetivo de aumentar a distinção de regiões desejadas, a sequência de imagens pode ser ajustada para determinadas análises quantitativas (figura 14), para realização de processos de caracterização. Para isto é preciso converter a imagem original (figura 14A) em um padrão binário (figura 14), ou seja, modificar os níveis de cinza de modo a exibir apenas *pixels* brancos e pretos (PALOMBINI, 2016). Desse modo é possível a *softwares* de edição de imagem, como o Fiji (SCHINDELIN *et al.*, 2012), realizar cálculos relativos às geometrias das imagens, sendo elas individuais ou como pilha sequenciais de  $\mu$ CT.

Figura 14 – Exemplo de processo de binarização de imagens: (A) micrografia transversal de cortiça; (B) imagem binarizada; (C) quantificação das células e organização do tamanho por cores com setas para a maior (branco) e menor (preto); (D) contagem e definição dos centroides de cada célula.



FONTE: (A) Adaptado de Lagorce-Tachon *et al.* (2018); (B), (C) e (D) Autor (2020).

As imagens binarizadas podem ser analisadas quanto a diversos parâmetros de regiões específicas. Tratando-se de materiais vegetais, por exemplo, as células podem ser quantificadas e organizadas por volume ou área (figura 14C), sendo organizadas de acordo com um critério estabelecido. Na figura 14C as células quantificadas foram organizadas em cores, conforme o seu tamanho, variando de cores quentes para os maiores tamanhos, a cores frias para os menores, sendo o branco e o preto aplicados, respectivamente, à maior e à menor célula da listagem, com detalhes em setas. Já na figura 14D aparecem listados os centroides de cada célula, bem como uma numeração referencial de cada unidade, a qual pode ser retornada em um arquivo de texto com os demais dados solicitados. Além disso, demais cálculos podem ser

derivados, como o posicionamento dos centroides em cada figura ou sequência de imagens, a determinação do diâmetro de Feret<sup>16</sup>, e o cálculo da esfericidade ( $\psi$ ), segundo:

$$\psi = \left( \frac{36 \pi V_c^2}{A_c^3} \right)^{1/3} \quad (17)$$

onde  $V_c$  e  $A_c$  são, respectivamente, o volume e a área de cada célula (JIANG *et al.*, 2011; PALOMBINI *et al.*, 2016; SINGH *et al.*, 2016). O índice  $\psi$  é adimensional, variando de 0 a 1, e determina a proximidade da geometria analisada com a de uma esfera perfeita, com  $\psi = 1$ .

## 2.4 Análise por Elementos Finitos (FEA) baseada em bioimagens

A análise por elementos finitos (FEA) baseada em bioimagens é uma área em ascensão, sendo responsável por avanços nas áreas de ciências dos materiais, ciências biológicas, medicina e odontologia (STOCK, 2009; ZHANG, 2013). Especificamente, quando associada a imagens de  $\mu$ CT, a FEA permite estudar o comportamento da microestrutura da amostra sob diferentes condições de contorno<sup>17</sup> (BOYD, 2009a). Sua principal vantagem é ser possível aproveitar-se da precisão geométrica das imagens oriundas das técnicas de bioimagem para geração de malhas realistas e conduzir análises que seriam consideradas mais difíceis de serem feitas por outros meios (WEVERS *et al.*, 2018). Devido às inerentes dificuldades de simular a complexidade fina de microestrutura de materiais diversos por meios físicos, essa é considerada uma abordagem interessante para análises térmicas e mecânicas (BOYD, 2009a; MAIRE *et al.*, 2003; PALOMBINI *et al.*, 2016).

Uma das principais aplicações de FEA encontra-se no seu uso em materiais com característica celular, tanto naturais (BOYD, 2009a; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010) quanto sintéticos (MAIRE *et al.*, 2003; PETIT; MEILLE; MAIRE, 2013). FEA baseada em imagens de  $\mu$ CT foi utilizada em materiais celulares metálicos (KÁDÁR *et al.*, 2004; KADER *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2010), poliméricos (BURTEAU *et al.*, 2012; WISMANS; GOVAERT; VAN DOMMELEN, 2010; YOUSSEF; MAIRE; GAERTNER, 2005), e cerâmicos (NOWAK *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2012) para avaliar seu comportamento mecânicos. De forma similar, relacionando amostras biomédicas, a união das técnicas também foi extensivamente utilizada no estudo de ossos trabecu-

<sup>16</sup> O diâmetro de Feret máximo é a maior distância entre duas tangentes externas paralelas de uma determinada partícula ou célula (PALOMBINI *et al.*, 2016; SINGH *et al.*, 2016).

<sup>17</sup> Condições de contorno são as propriedades limitantes de um modelo matemático que dizem respeito às cargas, restrições de movimento, temperatura, etc. (KUROWSKI, 2004; PALOMBINI, 2016).

lares<sup>18</sup>, tais como corpos vertebrais (CRAWFORD, 2003; CRAWFORD; CANN; KEAVENY, 2003; LADD *et al.*, 1998; SILVA; KEAVENY; HAYES, 1998), fêmur (KEYAK *et al.*, 1997; LOTZ, 1991; VERHULP; VAN RIETBERGEN; HUISKES, 2008), e rádio (MACNEIL; BOYD, 2008; PISTOIA *et al.*, 2002). Igualmente, FEA baseada em  $\mu$ CT também foi bastante empregada em odontologia nos últimos anos (AUSIELLO *et al.*, 2001; MAGNE, 2007; RODRIGUES *et al.*, 2009; SHIMIZU *et al.*, 2005; VERDONSCHOT *et al.*, 2001).

Do mesmo modo que com outros materiais celulares, a  $\mu$ CT vem tornando-se um método preciso para analisar diferentes estruturas de plantas (BRODERSEN; RODDY, 2016), tais como inflorescências (NOGUEIRA *et al.*, 2017; OSKOLSKI *et al.*, 2015), folhas (LEHMEIER *et al.*, 2017; PAJOR *et al.*, 2013), caules (BRODERSEN *et al.*, 2013; MAYO; CHEN; EVANS, 2010), e raízes (GREGORY *et al.*, 2003; HARGREAVES; GREGORY; BENGOUGH, 2009). Entretanto, pouco tem sido estudado sobre análises térmicas e mecânicas de plantas por meio de FEA baseada em  $\mu$ CT, apesar de sua microestrutura complexa, a qual influencia diretamente o seu desempenho em escala macro, e do interesse industrial em compreendê-las (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PALOMBINI, 2016). Por exemplo, Mebatsion *et al.* (2009) projetaram geometrias em 3D do parênquima de pera e maçã baseando-se em imagens de tomografia de raios X de síncrotron. Os modelos foram discretizados com uma malha tetraédrica, baseada na geometria, e níveis de concentração de oxigênio dentro das células foram simulados por FEA. Apesar de gerar modelos 3D, contudo, suas geometrias não eram iguais às dos tecidos reais, observados por CT. Assim certos detalhes não foram reproduzidos, prejudicando a precisão da análise. Por outro lado, Forell *et al.* (2015) investigaram a influência do material e da geometria na rigidez de caules de milho, para prevenir o acamamento<sup>19</sup> e para aumentar a performance de colheita para bioenergia. Os autores utilizaram a própria morfologia e densidade do caule, obtidos via  $\mu$ CT, em uma análise por elementos finitos através de um método de discretização baseado nos *voxels*, com uma malha hexaédrica. Contudo, a geometria das células não foi considerada na resolução utilizada. Já Palombini *et al.* (2016) utilizaram FEA baseada em  $\mu$ CT para caracterizar a microestrutura de um caule de bambu e compará-lo com amostras reais em ensaios de compressão da literatura. As morfologias dos tecidos da planta foram transferidas da  $\mu$ CT para a FEA, através de um processo de discretização baseada na

---

<sup>18</sup> Osso trabecular ou esponjoso é o tecido ósseo interno e menos denso, compostos por uma rede de estrutura celular em forma de barras e placas (STANDRING, 2010).

<sup>19</sup> Acamamento (ou *lodging*) é o termo utilizado para a condição em que plantas são tombadas por ação do vento ou chuva forte, encostando no chão (MAUSETH, 2014).

geometria e as propriedades constitutivas foram obtidas com base nas características do material celular (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010), utilizando dados da  $\mu$ CT juntamente com modelos vistos nas Eqs. (2-5).

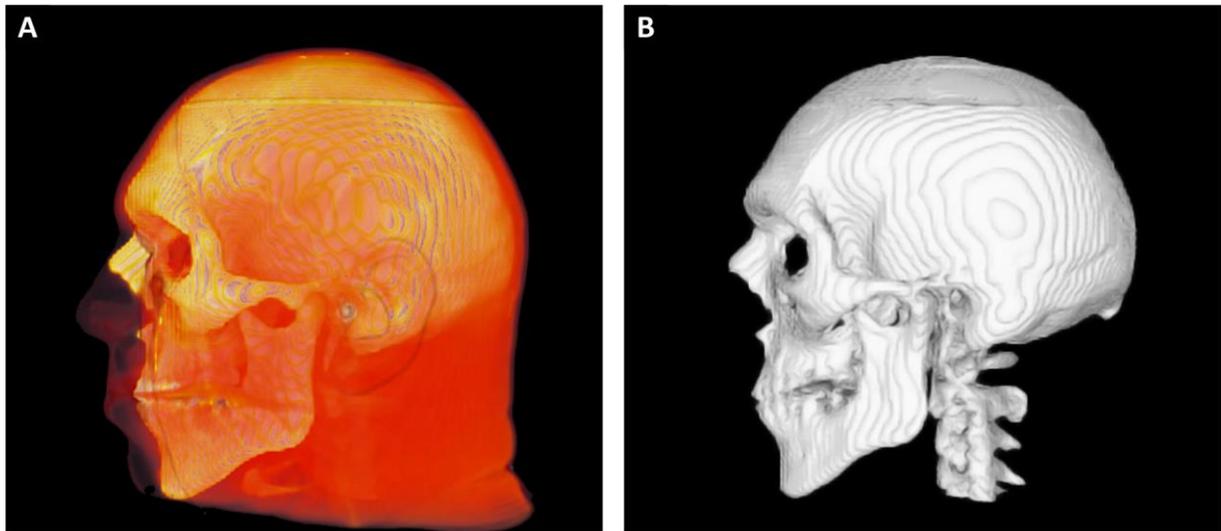
Entre as principais dificuldades em realizar análise por elementos finitos baseada em  $\mu$ CT de materiais vegetais é o processo de transferir dados de imagens sequenciais em uma malha discretizada, bem como definir suas propriedades mecânicas corretamente (MAIRE *et al.*, 2003; PETIT; MEILLE; MAIRE, 2013). Considerando o uso de modelos de análises computacionais como FEA em bioimagens uma área interdisciplinar relativamente recente, algumas etapas precisam ser aperfeiçoadas para um fluxo de trabalho mais rápido e preciso (ZHANG, 2013). Este tópico aborda dois dos principais pontos necessários para realização de análises por elementos finitos baseando-se em bioimagens de microtomografia, os processos de segmentação e discretização.

#### 2.4.1 Segmentação de bioimagem

O processo de segmentação consiste na separação de partes específicas da amostra na pilha de imagens de  $\mu$ CT em regiões significativas, numa tentativa de delinear ou extrair objetos em uma chamada região de interesse, ou ROI (*Region of Interest*) (BATCHELOR; EDWARDS; KING, 2012; PALOMBINI, 2016). A ROI pode ser representada por estruturas, tecidos ou células específicas da amostra ou mesmo regiões não pertencentes à mesma, como o ambiente com a qual ela está em contato (NOGUEIRA *et al.*, 2017; PALOMBINI *et al.*, 2016). Basicamente o processo pode ser dividido entre segmentação automatizada ou manual. A automatizada diz respeito à identificação das regiões de interesse por meio de algoritmos do *software*, os quais identificam, por exemplo, níveis de cinza similares e contínuos, através de limites (*threshold*), atribuindo-os a uma mesma ROI (BATCHELOR; EDWARDS; KING, 2012). Desse modo, esse procedimento é considerado mais fácil de ser realizado se conduzido em amostras com níveis de cinza discretos e bem definidos. Como visto, os níveis de cinza em imagens de tomografia são derivados das diferentes capacidades de atenuação da radiação, os quais estão relacionados às propriedades físicas de cada região, como a densidade. Assim, o processo torna-se mais fácil de ser executado em amostras com bastante variação de contraste entre as regiões de interesse, como no caso de imagens médicas, exemplificadas na figura 15 (BATCHELOR; EDWARDS; KING, 2012). Para bioimagens com regiões com diferentes níveis de atenuação,

como ossos e pele (figura 15A), há um grande contraste, permitindo a segmentação automatizada de regiões específicas (figura 15B).

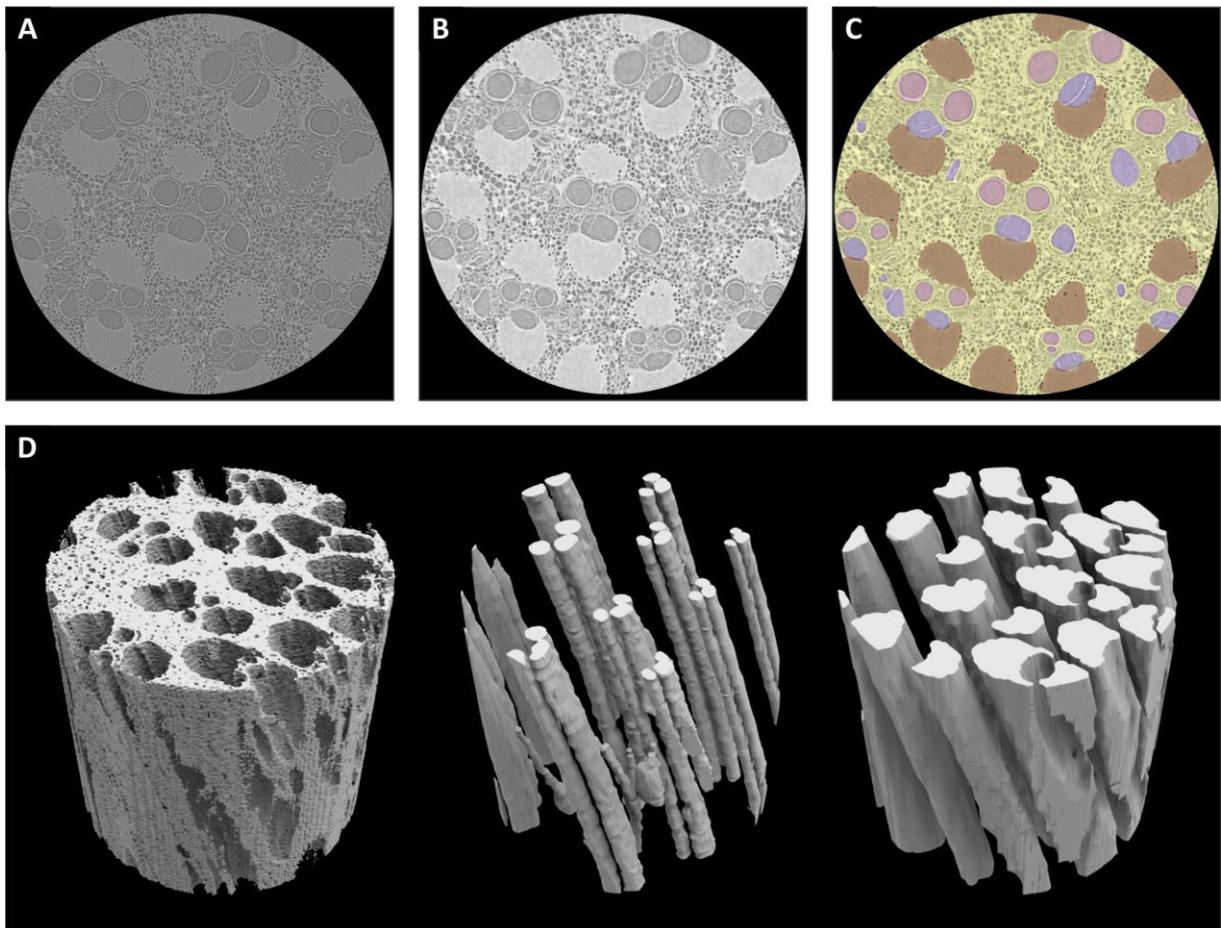
Figura 15 – Exemplo de processo de segmentação automatizada em bioimagens: (A) tomografia computadorizada, colorida artificialmente, apresentando tecidos diferentes com base na densidade; (B) segmentação automatizada do tecido ósseo.



FONTE: Adaptado de Batchelor, Edwards e King (2012).

Contudo, para amostras vegetais, uma vez que é encontrada muito pouca variação entre as densidades dos tecidos constituintes (PALOMBINI, 2016), o processo torna-se difícil de ser executado de maneira automatizada. Uma das possibilidades de aumentar a diferença nos níveis de cinza para segmentação é a utilização de agentes contrastantes nas amostras (STAEDLER; MASSON; SCHÖNENBERGER, 2013). Caso contrário, em muitas vezes o processo necessita ser executado de maneira manual. Nesse modo, é requerida intensa participação do operante para delimitar as regiões de interesse. A figura 16 apresenta um exemplo da segmentação manual em uma amostra de bambu digitalizada por  $\mu$ CT (PALOMBINI *et al.*, 2016). A aquisição por  $\mu$ CT resultou em níveis de atenuação de cinza muito similares, ou seja, com pouca distinção entre tecidos (figura 16A). Mesmo utilizando mecanismos como contraste de fase, torna-se difícil para *softwares* distinguir entre tecidos, como o parênquima e o esclerênquima, de maneira automatizada mesmo após ajustes de iluminação (brilho e contraste) e redução de ruído (figura 16B). Visualmente, contudo, é possível a distinção de diferentes ROI com base no espessamento da parede celular, apresentando tecidos com densidade relativa (porosidade) diferente, além das diferentes dimensões das células dos elementos condutores (figura 16C), permitindo a segmentação individual das mesmas.

Figura 16 – Exemplo de processo de segmentação manual em amostra de bambu: (A) fatia de  $\mu$ CT original; (B) fatia ajustada em termos de iluminação e redução de ruído; (C) processo de segmentação manual em que cada cor representa células distintas; (D) representação 3D das regiões segmentadas.



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

De maneira simplificada, o processo de segmentação manual consiste na criação de máscaras por meio de seleção de partes específicas de cada fatia de  $\mu$ CT, as quais correspondem às áreas relativas de cada ROI. O processo pode ser executado em *softwares* proprietários ou em *plugins* de código aberto tais como o *Segmentation Editor* (SCHINDELIN *et al.*, 2012) para o Fiji. Ao término da seleção da área específica, parte-se para a imagem subsequente, ou para um intervalo de imagens, onde uma nova seleção manual da mesma área será realizada (PALOMBINI, 2016). Após todo o intervalo das fatias terem as áreas da região selecionadas, utiliza-se um processo para interpolá-las de modo a unificar todas as áreas marcadas de uma região em um sólido. Ressalta-se que, quanto maiores forem as diferenças relativas de forma e posição entre as áreas segmentadas de duas fatias, no sentido transversal à sequência de imagens, maior é a necessidade de segmentar as imagens sequenciais em um intervalo menor; *i.e.*, quanto mais variável for a geometria das imagens ao longo da sequência de imagens, um

maior número de áreas marcadas será necessário para interpolá-la. Isto se deve ao processo de interpolação identificar regiões em comum das áreas selecionadas para unificá-las corretamente na máscara. Portanto se duas áreas sequenciais diferirem de geometrias e posicionamento, o algoritmo de interpolação apresentará erros. Por outro lado, se a região a ser segmentada apresentar uma seção constante, o intervalo entre a seleção das áreas transversais pode ser menor, ou seja, com um maior número de fatias entre cada marcação. Por fim, após o processo de segmentação, as regiões isoladas podem ser exportadas em formato STL<sup>20</sup> para posterior visualização em 3D (figura 16C).

É importante destacar que, para realizar os processos de caracterização e análises quantitativas, como visto no tópico 2.3.5, é de grande importância a correta segmentação da região de interesse (BATCHELOR; EDWARDS; KING, 2012; HEINZL; AMIRKHAPOV; KASTNER, 2018). Apesar da segmentação manual exigir exaustiva interação do usuário, o que pode representar cerca de 80% do tempo necessário para a realização de uma única análise (ZHANG, 2013), uma característica do processo é também um controle maior das regiões isoladas, o que possibilita avaliar com maior precisão as características desejadas (PALOMBINI, 2016). Por consequência, a segmentação também permite isolar dados específicos das sequências de imagens para determinar suas propriedades constitutivas específicas, para serem posteriormente aplicadas em análises por elementos finitos (BOYD, 2009a).

#### 2.4.2 Protocolos de discretização

Com as regiões de interesse segmentadas, é possível a realização de protocolos de discretização para serem aplicadas em FEA. Considerando análises por elementos finitos baseadas em microtomografia, esta etapa é considerada uma das mais complexas de ser realizada em virtude das dificuldades em se obter uma malha 3D adequada em termos de (BOYD, 2009a; PALOMBINI, 2016; PALOMBINI *et al.*, 2016; ZHANG, 2013): (1) representação suficiente dos detalhes da geometria 3D obtida por  $\mu$ CT; (2) utilização de um número razoável de elementos na malha; (3) tipos de elementos, compatibilidade com *softwares* de FEA, bem como com os diferentes módulos de testes; (4) possibilidade de montagem (*assembly*) de malhas. O primeiro ponto diz respeito à exatidão com a qual a geometria 3D será representada na malha

---

<sup>20</sup> Extensão *stereolithography* (estereolitografia) é considerado um formato universal para arquivos 3D, sendo constituído de malhas formadas por triângulos planos (PALOMBINI, 2016; PALOMBINI *et al.*, 2017).

discretizada. Tratando-se de amostras de materiais biológicos, suas geometrias irregulares necessitam de maior nível de detalhamento para algumas regiões (BOYD, 2009a). Sendo originada por imagens de  $\mu$ CT, a principal característica desse tipo de abordagem para amostras desse tipo é aproveitar-se da capacidade de representação em alta resolução e de forma não-invasiva para que a malha discretizada seja fidedigna (STOCK, 2009). Contudo, a discretização precisa levar em consideração a adição tanto de regiões falsas (como ruídos e defeitos nas imagens), quanto de regiões que poderiam sub ou superestimar a malha do modelo (como as bainhas das folhas em caules de bambu), em termos de rigidez e resistência da estrutura como um todo. Desse modo, é importante que tanto o processo de segmentação quanto o de discretização considere as geometrias adequadamente (BOYD, 2009a).

O número de elementos da malha também é fator essencial a ser considerado no processo de discretização (ZHANG, 2013; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). Obviamente, quanto mais elementos possuir uma mesma geometria, maior permite ser o detalhamento da mesma, mas, conseqüentemente, maior será também o consumo de recursos computacionais para resolvê-la (BATHE, 1996; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). Um dos meios de verificar a adequação do número de elementos de uma malha é através da sua convergência em uma análise. Desse modo, um número de análises é realizado em uma mesma geometria, com mesmas condições de contorno e propriedades constitutivas, mas com variação no número de elementos. Conforme a malha é modificada, pelo aumento do número e diminuição do tamanho dos elementos, o resultado da análise tenderá a convergir para um determinado valor, que poderá ser utilizado para determinar se ela está suficientemente refinada (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). Outra possibilidade de refino de malha e representação adequada da geometria é a utilização de elementos de tamanho variável para preencher uma geometria. Assim, em regiões mais espessas e homogêneas, elementos maiores podem ser empregados para ocupar um espaço maior e, progressivamente, os mesmos podem ser diminuídos conforme é aproximado o contorno da geometria, mantendo um menor número total de elementos na discretização (HUANG; USMANI, 1994).

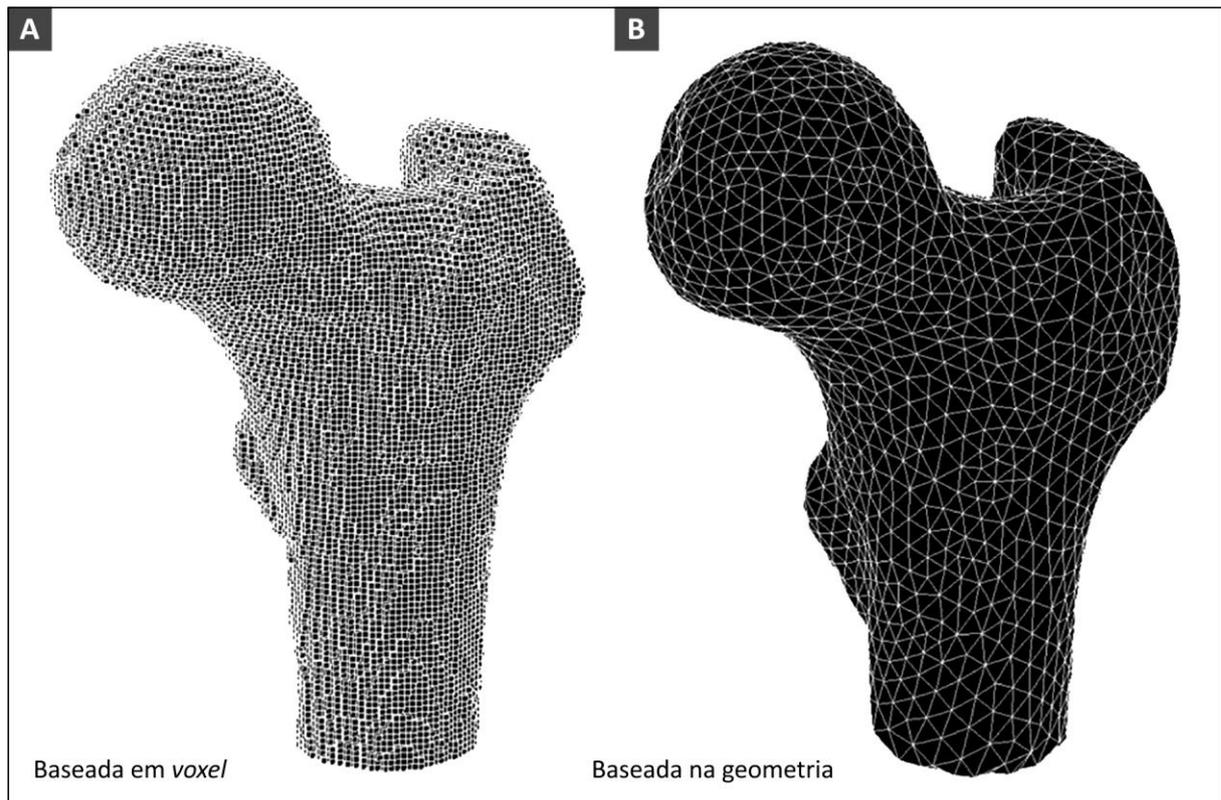
Os demais pontos a serem considerados estão relacionados com o tipo de elemento e tipo de configuração dos mesmos na malha. Elementos tetraédricos tendem a ser os mais empregados para discretizar bioimagens em virtude de possibilitarem o preenchimento de geometrias irregulares (BOYD, 2009a). Já em outros tipos de discretização, como é visto adiante, é comum o uso de elementos hexaédricos para este tipo de geometria. Contudo, fator

também importante é adequação do tipo de elemento ao *software* no qual a malha será utilizada bem como o módulo de análise que será executado (KUROWSKI, 2004). Por exemplo, mesmo os elementos tetraédricos voltados para análises gerais podem não ser compatíveis com os utilizados em análises de transferência de calor, exigindo alguma adaptação na programação (HUANG; USMANI, 1994). Por fim, para analisar materiais biológicos com diferentes tipos de propriedades constitutivas, pode ser de interesse dividir a malha em regiões distintas para atribuir seções independentes a cada uma. Desse modo, tanto dois ou mais conjuntos de elementos podem ser aplicados a uma mesma malha, quanto duas ou mais malhas podem ser utilizadas em uma montagem (KUROWSKI, 2004; PALOMBINI, 2016).

A discretização aplicada em bioimagens pode ser dividido entre dois modos fundamentais mais utilizados: (1) baseada em *voxel* (*voxel-based*) e (2) baseada na geometria (*geometry-based*). A divisão dos tipos de discretização dizem respeito tanto ao tipo de elemento constituinte da malha utilizado quanto ao meio com que as propriedades constitutivas são aplicadas ao modelo. A figura 17 ilustra os dois tipos de discretização mais utilizados, com relação ao tipo de elemento constituinte (LENAERTS; VAN LENTHE, 2009). Basicamente, a discretização baseada em *voxel* (figura 17A) consiste em transformar cada *voxel* da pilha de imagens diretamente em um elemento hexaédrico da malha (KEYAK *et al.*, 1990). Assim, em uma sequência de imagens, cada *voxel* constituinte tem seus dados de posicionamento relativo e de tonalidade de cinza transferidos para a malha de elementos finitos, podendo ser realizado de maneira automatizada com *softwares* específicos ou algoritmos. Por outro lado, com a discretização baseada na geometria (figura 17B), a forma precisa ser primeiramente segmentada e exportada, como visto anteriormente, para então ser transformada em uma malha de uso em FEA. Nesse processo, diferentes algoritmos podem ser utilizados para interpretar os *voxels* das imagens sequenciais e transformá-los em superfície, como o *marching cubes* (cubos marchantes), que cria uma malha 3D superficial com triângulos regulares voltada para modelos de bioimagem (LORENSEN *et al.*, 1987). Diferentemente da discretização baseada em geometria, a baseada em *voxel* não necessita de segmentação, devido à natureza direta do processo de conversão de *voxels* em elementos finitos (BOYD, 2009a). Outra característica do método baseado em *voxel* é a alta resolução de sua malha, sendo limitada apenas pela resolução da pilha de imagens utilizada. Este também é um contraponto, uma vez que, por utilizar um número considerável de elementos, este tipo de discretização necessita de muitos recursos computacionais. Por outro lado, como o baseado na geometria depende do processo de suavização,

usando algoritmos para realizar uma interpolação da posição dos *voxels* na definição de cada elemento da malha, o refino da malha torna-se independente da resolução da pilha de imagens original, permitindo também a utilização de uma malha que necessite de menos recursos computacionais.

Figura 17 – Exemplos de tipos de elementos utilizados em meios de discretização de bioimagem: (A) baseada em *voxel*, com elementos hexaédricos; e (B) baseada na geometria, com elementos tetraédricos.

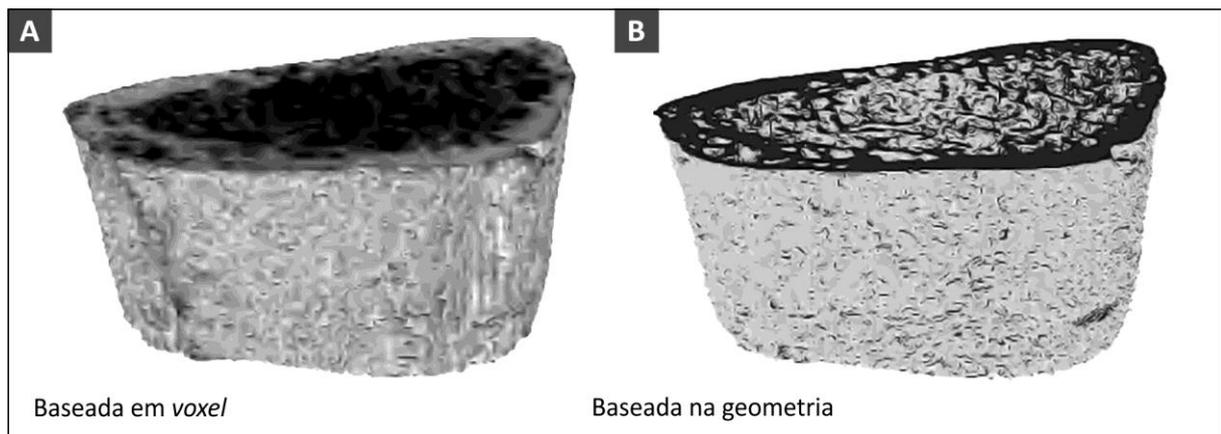


FONTE: Adaptado de Lenaerts e van Lenthe (2009).

A definição das propriedades constitutivas também varia de acordo com o processo de discretização empregado (figura 18). No método baseado em *voxels* (figura 18A), além da posição relativa de cada *voxel* na pilha de imagens original, os seus valores de rigidez também são atribuídos ao elemento correspondente na malha discretizada (BOYD, 2009a). Como visto anteriormente, os diferentes níveis de cinza de um *voxel* de uma imagem por tomografia estão atribuídos à capacidade de atenuação da radiação daquela região (STOCK, 2009); de modo que, para um mesmo material, quanto mais denso ele for, maior será sua capacidade de absorção de energia. Da mesma forma, as propriedades constitutivas de um material biológico também estão diretamente associadas aos seus valores de densidade relativa, ou à sua porosidade (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Assim, os dados de rigidez (relativos à fase elástica)

de um elemento discretizado estão correlacionados à densidade aparente do seu respectivo *voxel*. Por sua vez, a densidade aparente, que avalia a quantidade de material homogêneo presente na região compreendida pelo *voxel*, também pode ser estimada pelo seu nível de cinza 8-bit (figura 18A). Isso significa que esse valor corresponde à quantificação do volume relativo de material para aquela região. Portanto, ele é diretamente relacionado às propriedades elástica daquele elemento em particular: quanto mais escuro for o *voxel*, relativamente menos material ele representa e, conseqüentemente, mais baixos são os valores de suas propriedades mecânicas (HOMMINGA *et al.*, 2001). Por esse motivo, este tipo de discretização e análise também é conhecido por *Quantitative Computed Tomography* (QCT), ou Tomografia Computadorizada Quantitativa (MACNEIL; BOYD, 2008; PISTOIA *et al.*, 2002).

Figura 18 – Exemplos de determinação de propriedades constitutivas de acordo com o tipo de elemento utilizado em meios de discretização de bioimagem: (A) baseada em *voxel*, com propriedades dependentes dos níveis de cinza; e (B) baseada na geometria, com propriedades homogêneas.



FONTE: Adaptado de Boyd (2009a).

Por outro lado, para a discretização baseada na geometria (figura 18B), as propriedades totais do modelo são definidas pela união das propriedades constitutivas do material atribuído na FEA com a configuração de sua geometria (BOYD, 2009a). Nesse caso, como a malha utilizada é considerada homogeneizada, a todos os elementos são atribuídas propriedades constitutivas iguais e homogêneas (PALOMBINI, 2016). Desse modo, para que uma região tenha propriedades de rigidez e resistência maiores ou menores, torna-se necessário compensar a homogeneidade das relações construtivas com a adição de mais ou menos elementos neste local, respectivamente (BOYD, 2009a).

### 2.4.3 Tipos de análises para amostras vegetais

Após a escolha do tipo de discretização a ser realizada em amostras vegetais digitalizadas, tem-se a definição dos tipos de análises por elementos finitos que poderão ser executadas. Com uma grande variedade de análises possíveis de serem realizadas por elementos finitos, este tópico pretende abordar apenas alguns conceitos fundamentais que podem ser empregados em amostras digitalizadas. Devido principalmente a limitações do tipo de malha utilizada (baseadas em *voxel* ou na geometria), a escolha das análises tende a ser restrita também pela capacidade de *softwares* específicos em realizá-las por meio de modelos matemáticos. Tais modelos são definidos por um conjunto de relações entre variáveis que expressam características essenciais de um sistema ou processo físico através de termos analíticos (REDDY, 2004). Desse modo, com relação às equações utilizadas para a resolução do problema matemático, sua realização pode incluir um método linear e não-linear. Em análises mecânicas, por exemplo, esta divisão está relacionada a análises de rigidez (regime elástico) ou resistência (regime plástico), respectivamente (BOYD, 2009a).

De modo geral, existem duas fontes comuns de não-linearidades que podem ser incluídas em análises por elementos finitos: geométrica e constitutiva. A primeira surge diretamente das relações de deformação-deslocamento aplicadas, em que modificações na geometria do modelo afetam diretamente seu comportamento e, conseqüentemente, seus resultados (REDDY, 2004). Já a segunda deve-se a modificações não-lineares nas respostas do material às solicitações realizadas (BATHE, 1996). Há ainda a presença de não-linearidades nas condições de contorno, condição em que as mesmas não se mantêm constantes durante a análise (KUROWSKI, 2004).

De modo geral, a presença de não-linearidades constitutivas em análises mecânicas diz respeito à adição de propriedades do material mais abrangentes. Desse modo, não apenas valores do regime elástico (como módulo elástico) são utilizados, mas também determinadas condições como resistência e limites de escoamento<sup>21</sup>. A teoria da plasticidade diz respeito, portanto, à uma descrição analítica das relações de tensão-deformação de um corpo deformado após ele ter escoado parcial ou totalmente (REDDY, 2004). Ainda que não exatamente correspondente ao que ocorre naturalmente, muitas vezes um sistema de plasticidade ideal

---

<sup>21</sup> A resistência ao escoamento refere-se ao alongamento máximo que pode ser permitido em um modelo antes que a deformação plástica ocorra (KUROWSKI, 2004).

(elastoplástico perfeito) é utilizado para simplificação das condições da análise. Neste sistema, as condições constitutivas utilizadas limitam o valor das tensões von Mises<sup>22</sup> máximas ao limite de plasticidade ou escoamento, eliminando singularidades de tensões (KUROWSKI, 2004). Para refinamento, um modelo de material plástico com endurecimento pode ser empregado, em que as tensões de escoamento são dependentes de um parâmetro de endurecimento (REDDY, 2004).

Para a realização de análises por elementos finitos em amostras vegetais digitalizadas, diferentes tipos de ensaios numéricos podem ser realizados, dependendo dos tipos de variáveis que se desejam analisar. Em ensaios mecânicos, é comum a separação geral entre análises modais, estáticas e dinâmicas. A primeira diz respeito à obtenção das frequências naturais e modos de vibração associados com essas frequências (KUROWSKI, 2004). Já estáticas e dinâmicas dizem respeito ao efeito de inércia durante sua realização. No primeiro caso, não ocorre a dependência do tempo, de modo que as cargas são aplicadas de maneira constante. Já no segundo caso, tanto o sistema ou a aplicação das cargas mudam com o tempo, levando em consideração efeitos como a aceleração, e massa (BATHE, 1996). Por sua vez, ao considerar incrementos de tempo durante a realização da análise, também são encontradas abordagens implícitas e explícitas para a sua resolução. No primeiro caso, cada incremento de tempo precisa convergir, entretanto os intervalos de tempo podem ser grandes. Já no caso das abordagens explícitas, cada incremento não requer convergência, contudo para uma resolução precisa, são necessários incrementos menores, para levar a uma análise estável (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

Além de análises mecânicas e estruturais a serem realizadas em amostras digitalizadas, é possível a execução de análises térmicas. Nestes casos, as unidades das propriedades constitutivas e das condições de contorno são adaptadas para relações de transferência de calor. Como exemplo, a tabela 1 apresenta um comparativo entre as respectivas unidades do SI utilizadas em análises estruturais e térmicas, de modo que analogias podem ser definidas entre os dois sistemas. Assim como tensões podem ser induzidas por carga ou por deslocamentos, fluxo de calor pode ser aplicado com uma fonte de calor ou por uma temperatura.

---

<sup>22</sup> Critério de von Mises ou tensão equivalente diz respeito a uma grandeza escalar de tensão representativa a todos os seis componentes (normais e cisalhamento) de um estado de tensões em 3D (KUROWSKI, 2004).

Tabela 1 – Analogias entre análises estrutural e térmicas, em unidades do SI.

<b>Estrutural</b>	<b>Térmica</b>
Deslocamento [ $m$ ]	Temperatura [ $K$ ]
Deformação	Gradiente de temperatura [ $K/m$ ]
Tensão [ $N/m^2$ ]	Fluxo de calor [ $W/m^2$ ]
Carga [ $N$ ] [ $N/m^2$ ] [ $N/m^3$ ]	Fonte de calor [ $W$ ] [ $W/m^2$ ] [ $W/m^3$ ]

FONTE: Adaptado de Kurowski (2004).

## 2.5 Desenvolvimento de diretrizes

Conforme o progresso avança tanto no desenvolvimento quanto na aplicação de tecnologias 3D não-invasivas, como microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ CT) e análise por elementos finitos (FEA), é ampliada a possibilidade de intensificação do papel do designer, com o objetivo de propiciar meios para que cientistas possam empregá-las em pesquisas científicas (PALOMBINI *et al.*, 2018a). Desse modo, torna-se interessante facilitar o acesso a tais ferramentas e técnicas, como um meio de aumentar sua presença em pesquisas, permitindo, assim, que mais profissionais possam usufruí-las (ANSARI; RASHIDIAN, 2012). Portanto, o desenvolvimento de diretrizes gerais pode vir a auxiliar este processo de transmissão de conhecimentos determinados, tendo o designer um importante papel no seu desenvolvimento.

De modo geral, diretrizes (ou *guidelines*) são um conjunto de declarações desenvolvidas de maneira sistemática para auxiliar um determinado grupo de possíveis utilizadores na escolha de decisões gerais sobre um determinado estudo ou circunstância (SHANEYFELT; MAYO-SMITH; ROTHWANGL, 1999). Uma das principais aplicações de diretrizes são em áreas médicas e governamentais, contudo sua prática estende-se a conceitos gerais pré-definidos, podendo ser utilizada nos mais diversos campos de estudo (KHAN, 2018). Mesmo que a maioria da literatura disponível sobre metodologias para o desenvolvimento de diretrizes esteja relacionada à área de ciências médicas (SHEKELLE *et al.*, 1999), muitos pontos podem ser extraídos e aplicados nos demais ramos da pesquisa científica.

Um dos pontos iniciais a serem considerados para o desenvolvimento de diretrizes é a identificação e o refinamento da determinada área de estudo a ser abordada (SHEKELLE *et al.*, 1999). Desse modo, é possível delimitar as etapas essenciais a serem definidas nas diretrizes, bem como definir qual é o público-alvo principal ao qual elas são destinadas. Após, é interessante listar quais são os métodos e protocolos principais que o documento deve abordar, in-

cluindo técnicas e equipamentos (SHANEYFELT; MAYO-SMITH; ROTHWANGL, 1999). Com base nessas informações, é possível estruturar as diretrizes com base em um pensamento metodológico, seguindo uma base de pensamento compatível com a que o futuro usuário tenderá a seguir para a resolução de seu problema científico (KHAN, 2018).

Partindo do princípio da universalidade da qual determinadas diretrizes podem ser destinadas (KHAN, 2018), outra importante questão a ser levada em consideração é como torná-las acessíveis. Nesse sentido, torna-se essencial o estabelecimento de uma linguagem comum, com a utilização de vocabulários e termos que possam ser interpretados por um público abrangente, principalmente se os destinatários são originados de diferentes áreas do conhecimento (BRACKEN; OUGHTON, 2006). Com uma linguagem mais compreensiva, o propósito de tornar as diretrizes eficientes fica mais próximo de ser alcançado (ANSARI; RASHIDIAN, 2012). De maneira semelhante, diretrizes devem fornecer um acesso rápido e conciso a um determinado volume de informações importantes, com o objetivo de tornar a tomada de decisões de um estudo facilitada e amparada por conhecimentos prévios (KHAN, 2018). Sendo o designer um profissional capacitado a trabalhar com diferentes áreas da ciência (COELHO, 2008), sua atuação está também diretamente ligada ao desenvolvimento de materiais com um denominador em comum, possuindo como característica uma abrangência a profissionais com diferentes formações. Um dos principais exemplos é no auxílio de materiais didáticos, com uma configuração voltada à democratização do saber (SCHNEIDER, 2010). Neste tipo de material, tem-se o objetivo de tornar a informação a ser transmitida não apenas clara e de fácil compreensão, mas de interesse. Ao lidar com diferentes tipos de utilizadores, as diretrizes devem ser, portanto, tanto universais, com relação à sua linguagem base, quanto práticas, no que diz respeito ao interesse do usuário em buscar e utilizá-las como material de consulta.

Por fim, também é importante destacar que, de maneira geral, diretrizes não devem ser utilizadas incondicionalmente em todos os casos, ou serem seguidas *ipsis litteris*, como um “livro de receitas”, de modo que cada protocolo não é necessariamente universal e aplicável a qualquer usuário (KHAN, 2018). Assim, tem-se que uma vez definido que diretrizes não são consideradas um conjunto resoluto de regras, em muitas circunstâncias elas devem ser interpretadas exatamente como guias e sugestões para auxiliarem determinados usuários a tomarem decisões que podem ser tanto melhores, quanto mais especificadas. Nesse sentido, torna-se natural que diretrizes sejam utilizadas primariamente como base para futuras adaptações, dependendo de cada caso e aplicação (KHAN, 2018).

### 3 ESTUDOS DE CASO – PESQUISA EM MATERIAIS VEGETAIS COM TECNOLOGIAS 3D

Neste capítulo são apresentados estudos de caso desenvolvidos no decorrer desta tese referentes à pesquisa em materiais vegetais com tecnologias 3D, visando aplicar os princípios levantados durante a fundamentação teórica. Inicialmente, foi realizado um estudo comparativo entre os métodos de discretização de imagens de  $\mu$ CT de uma região do parênquima do bambu, para aplicação em FEA. No segundo tópico é apresentada uma análise morfoestrutural do complexo sistema vascular da região nodal do bambu, utilizando imagens de  $\mu$ CT em uma análise não-linear por elementos finitos. No último tópico é realizada uma análise térmica para verificar o papel da água no tanque de uma espécie de bromélia, utilizando um módulo de transferência de calor na FEA baseada em  $\mu$ CT.

#### 3.1 Comparação dos métodos de discretização de imagens de $\mu$ CT

Neste estudo de caso são comparados dois dos principais métodos de discretização de imagens de  $\mu$ CT, baseada em *voxel* e na geometria. Foram utilizadas imagens de uma região do parênquima do bambu, sendo aplicadas em análises por elementos com base nos dois métodos de discretização. As propriedades constitutivas utilizadas foram baseadas nos modelos matemáticos apresentados na fundamentação teórica, sendo derivadas de dados extraídos das imagens de  $\mu$ CT, como os níveis de cinza. O principal objetivo deste estudo é apresentar uma abordagem de FEA baseada em  $\mu$ CT a um nível celular, a qual pode ser replicado nos demais tipos de tecidos vegetais.

##### 3.1.1 Material e métodos

###### 3.1.1.1 Amostra e preparação

Uma amostra de *Bambusa tuldoides* Munro foi coletada no município de Tapes, no estado do Rio Grande do Sul. *B. tuldoides* é nativa do sul da China e do Vietnã, sendo introduzida e cultivada nas Américas do Sul e Central (OHRNBERGER, 1999; PALOMBINI, 2016). Devido ao seu esclerênquima consideravelmente lignificado no caule, protocolos de amolecimento e secagem foram seguidos utilizando-se como base a dissertação do autor (PALOMBINI, 2016). Em seguida, a amostra foi seccionada, e uma região isolada, consistindo

em células parenquimáticas, foi escolhida para a aquisição de imagens por microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ CT).

### 3.1.1.2 Microtomografia de raios X

O equipamento de  $\mu$ CT Xradia® 510 Versa (Zeiss® X-ray Microscopy, Pleasanton, CA, EUA) foi utilizado para a aquisição de imagens da amostra, localizado no Grupo de Pesquisa em Microscopia Digital e Análise de Imagens (MicDigi/PUC-Rio). O equipamento combina magnificações geométricas e ópticas, possuindo uma fonte de transmissão que alcança 160 kV e 10 W (CIDADE *et al.*, 2018). Nesse estudo, tal como os protocolos de preparação da amostra, os mesmos parâmetros de aquisição definidos em Palombini (2016) foram utilizados. Devido à densidade da amostra vegetal, foram definidos valores de tensão e corrente da fonte em 80 kV e 88  $\mu$ A, respectivamente, com um tempo de exposição de 1 s, e o uso de uma objetiva de 4X (PALOMBINI *et al.*, 2016). Os valores de tensão e corrente são considerados medianos nas capacidades do equipamento, levando a uma potência de cerca de 7 W, ainda que com um relativo baixo tempo de exposição. Como visto na fundamentação, os parâmetros buscaram aumentar a dose da radiação na amostra o suficiente para que se obtivesse bons níveis de contraste e resolução no nível celular.

A reconstrução 3D resultante foi exportada como uma série de imagens em formato DICOM. O processamento das imagens foi realizado no *software* de acesso aberto Fiji, uma distribuição do ImageJ (SCHINDELIN *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2015). Inicialmente, a pilha de imagens original foi alinhada utilizando as ferramentas Reslice e Rotate, a fim de ajustar a amostra digitalizada e, conseqüentemente, a orientação das células do parênquima com relação às coordenadas globais. As células do parênquima na pilha de imagens foram analisadas utilizando o *plugin 3D Objects Counter* (BOLTE; CORDELIÈRES, 2006), em termos de volume e relação de aspecto<sup>23</sup> das células, e com relação à densidade relativa do tecido. O *plugin* realiza a separação e quantificação de regiões fechadas dentro de um volume, tais como células ou poros (PALOMBINI, 2016). Ajustes adicionais da pilha de imagem foram realizados separadamente, de acordo com cada método de discretização para FEA, para obtenção das propriedades construtivas, sendo descritos em seguida. Para fins de comparação de recursos computa-

---

<sup>23</sup> *Aspect ratio* é a relação entre a maior para a menor dimensão de uma célula, definindo quão alongada ela é (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; ZHANG, 2013)

cionais necessários, os processos de discretização para as análises por elementos finitos de ambos os métodos foram realizados na mesma *workstation* contendo dois processadores Xeon® E5-2630 (Intel® Corp., Santa Clara, CA, EUA) e 64GB de RAM, localizada no Laboratório de Anatomia Vegetal – LAVeg/UFRGS.

### 3.1.1.3 Discretização baseada em *voxel*

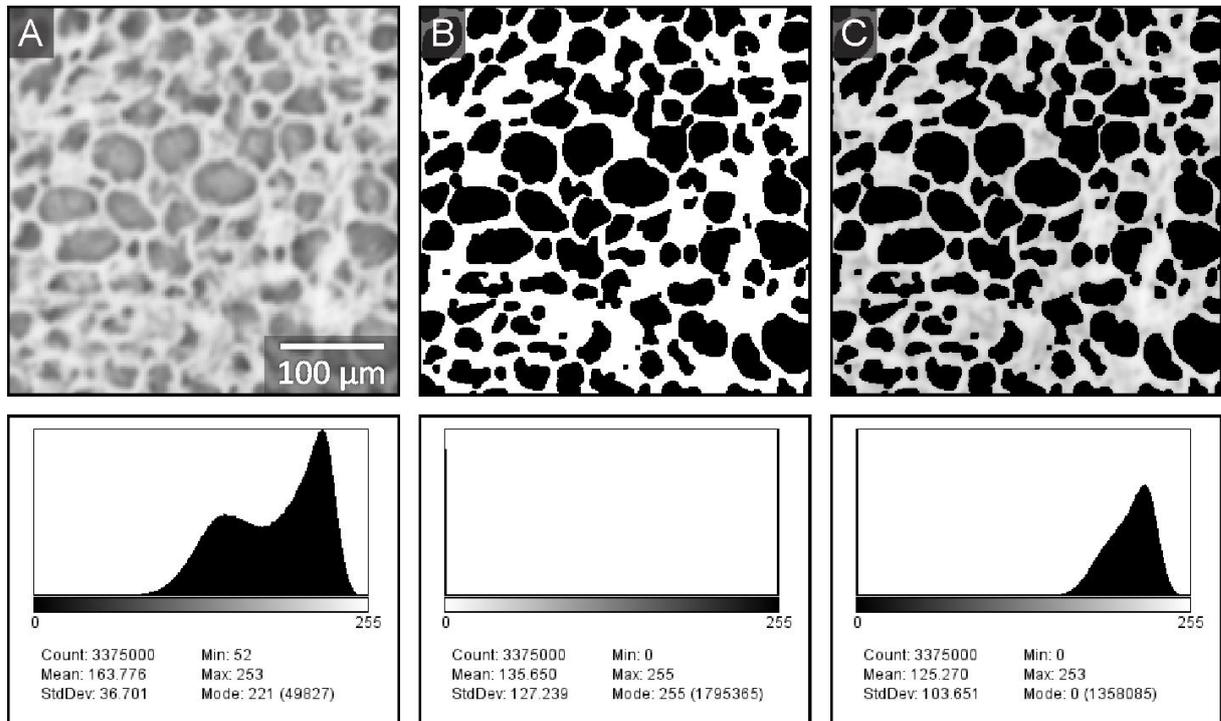
O primeiro método de discretização realizado foi o baseado em *voxel* (*voxel-based meshing*). Como visto, o método consiste na transposição de cada *voxel* da pilha de imagens em um elemento hexaédrico diretamente, sendo que a posição e a rigidez relativas a cada *voxel* é atribuída ao respectivo elemento. Como os dados de propriedades constitutivas por este método utilizam os níveis de cinza 8-bit de cada *pixel* das fatias (ou *voxel*, levando em consideração a pilha de imagens), nenhum ajuste de imagem, tais como brilho, contraste ou segmentação foi realizado.

Uma vez que cada *voxel* é convertido em um elemento na malha, torna-se necessário considerar o número de *voxels* utilizados na análise como uma função tanto de sua resolução quanto do alcance, ou número de células, da região. A resolução da pilha de imagens foi ajustada de modo a permitir uma clara definição da morfologia das células do parênquima, ao preservar sua geometria prismática com células curvadas (DIXON *et al.*, 2018). Por outro lado, o alcance foi definido de modo a incluir um número significativo de células, para que a análise seja representativa. Novamente, uma vez que quanto maior for o número de elementos de uma malha, maiores serão os recursos computacionais necessários para resolver a FEA, ponderar o número absoluto de *voxels* discretizados também é importante. Portanto, uma região de interesse cúbica de  $150 \times 150 \times 150$  *voxels* foi cortada da pilha de imagens no Fiji, consistindo em um *pixel* com tamanho de lado (resolução espacial) de  $2,02 \mu\text{m}$ . Por fim, o pacote de *software* de código aberto para FEA baseada em *voxel* VOX-FE (FAGAN *et al.*, 2007) foi utilizado na conversão dos *voxels* em elementos da malha. VOX-FE possui uma interfase gráfica que permite a definição de condições de contorno, além de um módulo de resolução (*solver*) próprio que suporta paralelização.

### 3.1.1.4 Discretização baseada na geometria

O segundo método de discretização realizado foi o baseado na geometria (*geometry-based meshing*). Como visto, o método consiste na conversão de um conjunto de imagens binárias em uma malha de superfície 3D e, então, para conversão em um malha de volume 3D com elementos tetraédricos (MÜLLER; RÜEGSEGGGER, 1995). Diferentemente da discretização baseada em *voxel*, os dados dos *voxels* originais, com relação à geometria e às propriedades constitutivas, são convertidos separadamente, uma vez que apenas um único material é atribuído para a malha. A geometria pode ser refinada a fim de preservar a forma do material celular ao aumentar o número de elementos e suavizar a malha para reduzir discontinuidades geométricas (BOYD, 2009a). Quanto às propriedades constitutivas, as mesmas precisam ser adicionadas separadamente à malha. Nesse estudo de caso, elas foram baseadas em dados das imagens de  $\mu$ CT, baseando-se nos modelos numéricos vistos na fundamentação teórica. A figura 19 apresenta o processo de preparação das imagens de  $\mu$ CT para este método.

Figura 19 – Fatias de exemplo da  $\mu$ CT do parênquima do bambu, mostrando os ajustes da pilha de imagens e o correspondente histograma para a discretização baseada na geometria: (A) fatia original da ROI cúbica ( $150 \times 150 \times 150$  *voxels*) cortada da pilha de imagens da  $\mu$ CT; (B) fatia binária, após ajustes de brilho e contraste; e (C) fatia apresentando células sem lume, após a operação *Image Calculator*, utilizada para obtenção das propriedades constitutivas.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020b).

A mesma região de interesse cúbica da pilha de imagens do processo baseado em *voxel* foi utilizada neste método (figura 19A). A principal dificuldade do método baseado na geometria é obter uma pilha de imagens binária que seja precisa, comparada com a morfologia real da amostra. Como visto, a binarização é frequentemente realizada por métodos de limites (*threshold*), em que os *voxels* com níveis de cinza superiores a um valor (limite) definido são considerados material de parede celular sólido e homogêneo, e os *voxels* abaixo desse valor são considerados espaços vazios. Se o limite é definido muito alto, um menor número de *voxels* é convertido a material da parede celular, e discontinuidades na geometria podem ocorrer, enfraquecendo, assim, o modelo. Já se o limite é definido muito baixo, mais elementos são convertidos em parede celular, possivelmente superestimando tanto a rigidez e a resistência do modelo. Assim, ao invés de binarizar as imagens diretamente por limites, o brilho foi ajustado e o contraste foi aumentado no Fiji, antes da pilha de imagens ser convertida a imagens binárias, utilizando a operação *Make Binary* (figura 19B). Esse método aumenta o controle sobre o processo de binarização (PALOMBINI *et al.*, 2016), devido à inspeção visual das células a cada modificação de brilho e contraste, resultando em uma malha contínua e com espessura de parede celular adequada.

Depois de binarizada os constituintes protoplasmáticos também foram adicionados ao material celular devido a sua densidade aparente similar e, conseqüentemente, seu nível de cinza. Uma vez que estes constituintes não ficaram em contato com a parede celular após a binarização, eles poderiam interferir com o processo de geração da malha (DIXON *et al.*, 2018) bem como com a FEA. Portanto, a pilha de imagens binárias foi processada para remover as regiões internas e não-conectadas dos constituintes de dentro do lume celular, utilizando a operação *Fill Holes* no Fiji. Depois desse processo, a pilha de imagens foi convertida em uma malha de superfície 3D utilizando o comando *3D Viewer*. A malha de superfície foi exportada em extensão STL (binário) e foi primeiramente reparada com o *software* com licença gratuita Netfabb Basic (Netfabb GmbH, Lupburg, Alemanha), utilizando *scripts* de reparo do aplicativo. Por fim, a malha STL foi internamente preenchida para criar uma malha de volume utilizando o Gmsh (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009), um gerador de malha 3D para elementos finitos automático gratuito. O *software* de FEA proprietário Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia® Corp., Providence, RI, EUA) foi utilizado para a resolução do modelo baseado na geometria, disponível no Laboratório de Design Virtual – VID/UFRGS.

### 3.1.1.5 Propriedades constitutivas

Na abordagem deste estudo de caso, as propriedades constitutivas de ambas as análises foram baseadas nos modelos numéricos para o parênquima do bambu, de acordo com a fundamentação teórica realizada anteriormente, as quais fundamentadas na obra de Gibson e Ashby (1999). Uma vez que a parede celular do parênquima do bambu é relativamente isotrópica, devido à orientação de baixa angulação das suas microfibrilas (DIXON *et al.*, 2018), as equações (2) e (4), vistas anteriormente, são particularmente úteis para serem aplicadas em um modelo de FEA, de modo a compensar a geometria da espuma substituindo-a por um volume sólido isotrópico, homogêneo e não-celular, bem como para estimar a sua resistência à compressão (PALOMBINI *et al.*, 2016). Entretanto, para uma análise por elementos finitos que leva em consideração a geometria celular do parênquima, diferentes abordagens podem ser seguidas para definir suas propriedades mecânicas lineares e não-lineares, dependendo do método de discretização. Ainda, uma vez que o *software* VOX-FE atualmente não suporta não-linearidades, as análises comparativas baseadas em *voxel* e na geometria foram conduzidas apenas no regime elástico, de modo a avaliar a rigidez de cada estrutura celular.

No método baseado em *voxel*, ao converter cada dado dos *voxels* em um elemento, sua densidade aparente é essencial para estimar suas propriedades. Quanto maior for o seu nível de cinza, mais denso será a correspondente região e, conseqüentemente, mais rígida ela será considerada. No entanto, mesmo ao processar imagens de uma fonte de  $\mu$ CT de alta resolução, um único *voxel* não necessariamente contém informações relativas à presença ou ausência absoluta de material vegetal naquela região discreta (HOMMINGA *et al.*, 2001); *i.e.*, o mesmo *voxel* poderia representar ambos a parede celular do parênquima e o seu espaço referente ao lume. Desse modo, segundo a Eq. (2), o módulo elástico ( $E_e$ ) de cada elemento de *voxel* ( $e$ ) é definido como:

$$E_e = \left( \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}} \right)_e^2 E_s \quad (18)$$

em que  $i$  é o nível de cinza 8-bit correspondente àquele elemento, o qual originalmente varia de 0 a 255 (HOMMINGA *et al.*, 2001); já  $i_{max}$  e  $i_{min}$  são os valores máximos e mínimos de  $i$  na pilha de imagens, respectivamente. Ao trabalhar com imagens brutas, *i.e.*, não ajustadas em termos de brilho e contraste, os valores mínimo e máximo de níveis de cinza geralmente não correspondem à amplitude total dos níveis de 8-bit: 0 e 255, respectivamente; ou seja,

nenhuma região é, geralmente, representada por *voxels* absolutamente pretos ou brancos. Portanto, apesar de apresentar uma região do lume aparentemente vazia (relativos a uma amostra seca) e, assim, não possuir propriedades mecânicas significativas quando comparada à parede celular, tais regiões possuem um valor de  $i$  de, no mínimo, 52, como visto no histograma original da pilha de imagens (figura 19A). Se tais regiões fossem consideradas no cálculo, elas iriam aumentar demasiadamente a rigidez do modelo inteiro, levando a resultados errôneos. Na Eq. (18), o termo  $(i - i_{min}/i_{max} - i_{min})$  representa o termo da densidade relativa  $(\rho^*/\rho_S)$  da Eq. (2), para cada *voxel* no volume 3D, em que  $i_{max} = 255$  e  $\rho_S = 1$ , respectivamente. Desse modo, para o valor correto de  $(\rho^*/\rho_S) \rightarrow 0$  em um *voxel* particular do lume no volume 3D, correspondente à ausência de material naquela região,  $i_{min}$  precisa tender a 52. Já o coeficiente de Poisson adotado para todos os elementos do parênquima foi de 0,4 e de 0,0 para os elementos do lume (PALOMBINI *et al.*, 2016).

Para o método baseado na geometria, a malha volumétrica discretizada foi importada no *software* Abaqus/CAE. Como apenas um único material pode ser atribuído ao modelo baseado na geometria do parênquima, suas propriedades precisaram ser homogeneizadas para a malha inteira. Uma vez que nem todos os *voxels* binários de cor branca correspondem a um material sólido, a densidade aparente de cada *voxel* da parede celular também foi considerada. Portanto, ao invés de atribuir o valor de  $E_S$  nas propriedades elásticas da malha diretamente – ou seja, ao considerar que a pilha de imagens binárias representa somente uma região sólida de parede celular nos *voxels* brancos – um procedimento similar à análise baseada em *voxel* foi seguido, de modo a evitar uma superestimação de suas propriedades mecânicas. Inicialmente, os *voxels* correspondentes ao lume precisaram ser excluídos da soma do histograma. Assim, a operação *Image Calculator*, no Fiji foi realizada, a qual subtraiu a pilha de imagens binária (figura 19B) da pilha de imagens original (figura 19A). Na pilha de imagens resultante (figura 19C), todos os *voxels* do lume da pilha original foram substituídos por *voxels* de nível de cinza 0 (apresentados em preto). O histograma resultante foi, então, utilizado para definir o módulo elástico efetivo ( $E^*$ ) isotrópico da região:

$$E^* = \frac{E_S}{N} \sum_{i=a}^b \left( \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}} \right)^{\gamma} n_i \quad (19)$$

em que  $N$  é o número da contagem total de *voxels* com nível de cinza diferente de 0 no histograma da pilha de imagens; e  $n_i$  é o número de *voxels* com um valor particular  $i$  de nível de cinza 8-bit. De maneira similar ao modelo baseado em *voxel*, o valor de  $i_{min}$  e  $i_{max}$  foram

preservados como 52 e 255, respectivamente, uma vez que nenhum ajuste de brilho e contraste foi realizado na pilha de imagens resultante da operação de subtração. Por outro lado, uma vez que o modelo baseado na geometria já possui a própria geometria do material celular do parênquima, conseqüentemente cada elemento da malha precisa ser tratado como um sólido não-celular. Desse modo, o índice  $\gamma$ , da Eq. (2), foi assumido como 1, *i.e.*, desprezando a variável morfológica (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010) e, assim, definindo uma relação direta e linear entre a densidade aparente da região e as correspondentes propriedades do tecido. Os índices dos valores limitantes  $a$  e  $b$  representam os valores mínimo e máximo encontrados no histograma, ou 137 e 253, respectivamente, para a pilha de imagens calculada (figura 19C). O histograma da figura 19C reporta, na realidade, um valor mínimo de 0. Contudo, ele representa os *voxels* na cor preta (lume), resultantes da operação *Image Calculator*. Ao excluir a contagem dos níveis de cinza iguais a 0, o valor mínimo do histograma torna-se 137. Portanto, para  $i < 137$  ou  $i > 253$ , o valor de  $n_i = 0$  foi utilizado. Finalmente, o mesmo coeficiente de Poisson de 0,4 foi definido aos elementos da malha.

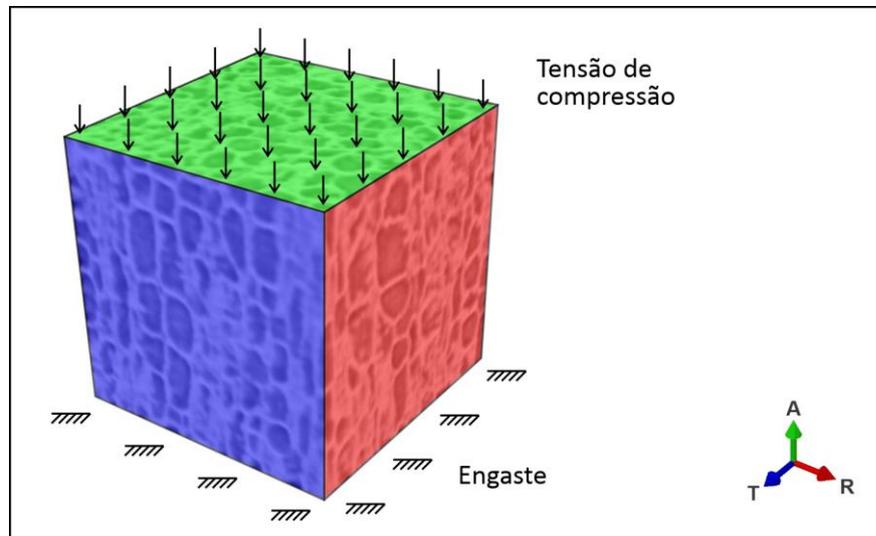
#### 3.1.1.6 Cargas e condições de contorno

Ambos os métodos tiveram aplicações de cargas e restrições de movimento iguais, simulando uma tensão de compressão axial. Contudo, devido às limitações do *software* VOX-FE, as condições de contorno foram simplificadas, podendo ser visualizadas na Figura 20. Os eixos X, Y e Z dos modelos foram adotados de acordo com as orientações tangencial (T), axial (A) e radial (R) originais na planta, respectivamente. Para simplificar e para se obter uma comparação adequada entre ambos os *softwares*, a face inferior da ROI cúbica – equivalente ao plano transversal na planta – foi engastada. Na face oposta, uma tensão de compressão foi aplicada, correspondendo à orientação axial na planta. Já as faces laterais, devido às limitações do VOX-FE, foram mantidas livres, simulando, portanto, uma situação em que o cubo da região de interesse tivesse sido extraído do restante da amostra. A magnitude da força foi definida com base na resistência à compressão axial da amostra avaliada, utilizando as informações de densidade aparente da pilha de imagens original (figura 19A). Portanto, de modo similar às Eqs. (4) e (18), a resistência à compressão axial efetiva do parênquima ( $\sigma_p^*$ ) foi determinada como:

$$\sigma_p^* = 0.3 \frac{\sigma_{fs}}{N} \sum_{i=a}^b \left( \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}} \right)^\gamma n_i \quad (20)$$

uma vez que  $\sigma_p^*$  foi calculado utilizando a pilha de imagens original, os valores limitantes  $a$  e  $b$  correspondem a 52 e a 253, respectivamente. Novamente, o valor de  $\gamma = 3/2$  foi utilizado para o modelo baseado em *voxel*, uma vez que a própria ROI é caracterizada por um modelo de espuma de célula fechada (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Finalmente, a resistência à compressão foi convertida em força utilizando a área da face da ROI cúbica de  $0,091 \text{ mm}^2$ . No VOX-FE, para a malha baseada em *voxel*, a força foi definida como *Parallel* e a *Distribution* foi ajustada como *Area*. Já no Abaqus/CAE, para a malha baseada na geometria, a carga foi definida como *Total Force* e uma propriedade geral de autocontato foi definida (*surface-to-surface interaction* e *frictionless*), para prevenir regiões adjacentes de se interceptarem durante a aplicação da carga.

Figura 20 – Condições de contorno empregadas nas análises. Região cúbica dividida entre o plano transversal (verde), e os planos longitudinais (azul e vermelho). Os eixos tangencial (T), axial (A) e radial (R) correspondem às orientações da ROI na planta relativas ao colmo cilíndrico. A tensão de compressão e o engaste foram aplicados nas faces opostas, no sentido axial.



FONTE: Autor (2020).

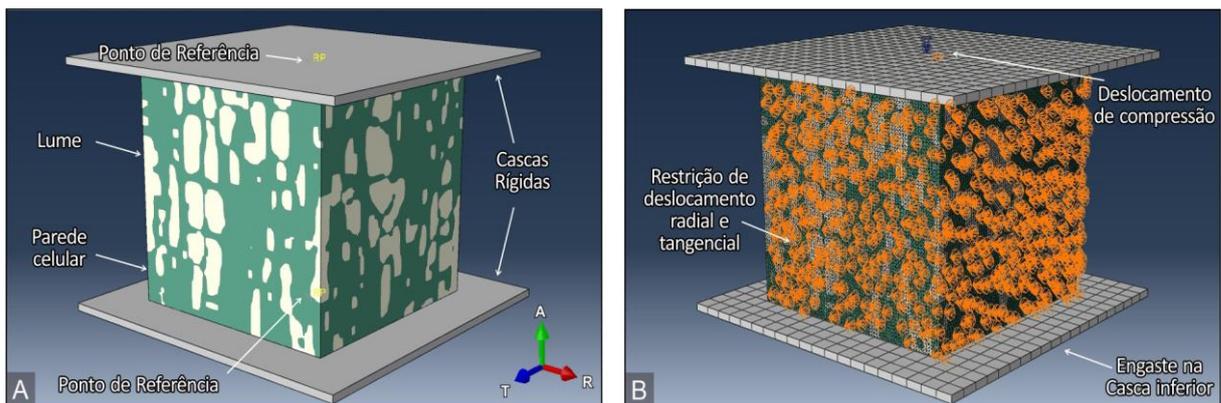
Por fim, as análises dos modelos baseados em *voxel* e na geometria foram comparados em termos de deslocamento (magnitude), tensões von Mises, bem como deformações normais axial, tangencial e radial. Além da análise baseada na geometria definida anteriormente, a influência de determinados parâmetros foi verificada neste tipo de discretização. Inicialmente, foi considerado o uso de propriedades mecânicas diretas da parede celular ( $E_s$ ) na

geometria, *i.e.*, sem a utilização do módulo elástico efetivo ( $E^*$ ), obtido pela Eq. (19). Também foi analisado um modelo com o valor de  $\gamma = 2$ , *i.e.*, sem considerar a própria geometria de um material celular do modelo 3D. Outras duas análises foram realizadas contendo a adição da região da geometria do lume no modelo, e as propriedades mecânicas foram também baseadas na Eq. (19), entretanto considerando a os níveis de cinza da região do lume. Para diferenciá-las, uma das análises foi realizada com um valor de 0,0 para o coeficiente de Poisson e outra com o valor de 0,4, sendo o mesmo da parede celular.

### 3.1.1.7 Análises Explícitas por Elementos Finitos

Adicionalmente às análises baseadas na geometria e em *voxel*, foram realizadas duas análises não-lineares por elementos finitos, utilizado o modo explícito no Abaqus/CAE (*explicit step*), em uma compressão axial (figura 21). Na primeira análise foi utilizado o mesmo modelo baseado na geometria anterior e, na segunda, foi adicionada a região do lume, para avaliar seu volume relativo durante a compressão.

Figura 21 – Condições de contorno para a FEA explícita do modelo baseado na geometria: (A) a parede celular do parênquima (verde) envolvendo a região do lume (amarelo) foi unida em montagem entre duas cascas rígidas, indeformáveis, dispostas nas extremidades opostas do eixo axial, com a adição de pontos de referência em cada casca; (B) no ponto de referência superior foi definido um deslocamento de compressão; o ponto inferior foi engastado; os elementos periféricos das laterais tiveram restritos os deslocamentos nos sentidos radial e tangencial. Os eixos tangencial (T), axial (A) e radial (R) correspondem às orientações da ROI na planta relativas ao colmo cilíndrico.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020b).

Na figura 21A são vistas as seções aplicadas às regiões do parênquima, em verde, e do lume, em amarelo. A montagem entre as regiões foi realizada incluindo a presença de duas placas rígidas indeformáveis nas faces superior e inferior do modelo. Em cada casca rígida foi adicionado um ponto de referência, sob os quais foram aplicadas as condições de contorno.

Um deslocamento axial de compressão de  $100 \mu\text{m}$  foi aplicado no ponto de referência superior, utilizando uma amplitude linear tabular e o ponto de referência inferior foi engastado (figura 21B). Já os nós laterais do modelo foram restritos em deslocamento nos sentidos radial e tangencial, *i.e.*, simulando, assim, uma região envolvida no modelo.

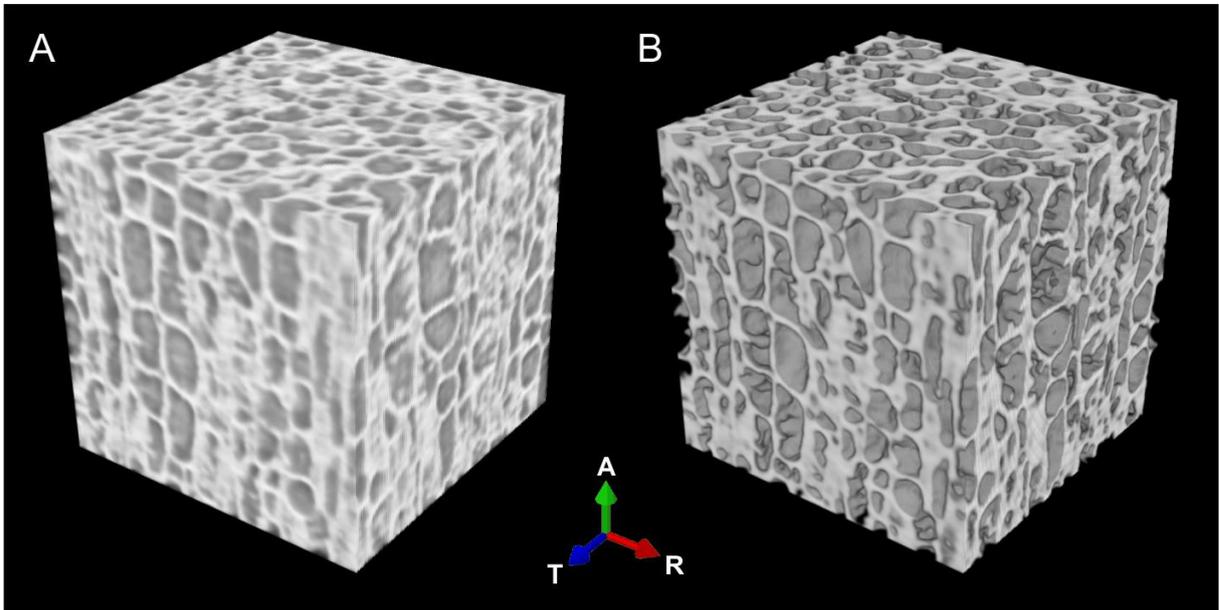
As mesmas propriedades elásticas foram definidas ao material celular. Entretanto, um valor de resistência à compressão axial para o volume 3D após a operação *Image Calculator*, também obtida pela Eq. (20), foi utilizado como tensão de escoamento no Abaqus/CAE. As propriedades mecânicas da região do lume da segunda análise explícita foram adicionadas de acordo com os níveis de cinza da região, e utilizando as Eqs. (19) e (20). As regiões do parênquima e do lume tiveram valores de coeficiente de Poisson de 0,4 e 0,0, respectivamente. Novamente, uma propriedade de autocontato foi definida a todas as geometrias. Já a interação entre as placas rígidas e todos os elementos do modelo foi configurada com uma opção de contato geral (*general contact*), para prevenir intersecções.

### 3.1.2 Resultados

A reconstrução 3D da  $\mu\text{CT}$  do parênquima do bambu, visualizado utilizando-se o *plugin 3D Viewer* do *software* Fiji, é apresentada na figura 22. A ROI original cortada (figura 22A) consiste em um sólido cúbico de  $302,3 \mu\text{m}$  de lado, com as células prismáticas do parênquima distribuídas axialmente, no sentido do eixo maior. Destaca-se que a pilha de imagens original apresenta uma baixa distinção de densidade aparente (contraste nos níveis de cinza) entre as paredes celulares e o lume.

Por outro lado, a região de interesse após a operação *Image Calculator* apresenta células sem volume no lume (figura 22B). O *plugin 3D Viewer* do Fiji automaticamente identifica *voxels* da cor preta, como visto na figura 19C, como sendo plano de fundo (*background*), representando-os como espaços vazios. Apesar de remover o interior das células, o modelo do parênquima mantém os níveis de cinza originais nas paredes celulares. O *plugin 3D Objects Counter* retornou uma contagem de, aproximadamente, 680 células na ROI, contendo um volume médio de  $5,81 \times 10^{-6} \text{mm}^3$  e uma relação de aspecto de 1,54. O valor de densidade relativa de 0,383 foi avaliado ao utilizar a máscara binária.

Figura 22 – Reconstrução 3D da  $\mu$ CT do parênquima do bambu, com a região de interesse (ROI) selecionada: (A) ROI cúbica original das células do parênquima apenas, com  $302,3 \mu\text{m}$  de lado, cortadas a partir da pilha de imagens original da  $\mu$ CT; e (B) ROI das células sem lume, após o processo de subtração da pilha de imagens binária, utilizando a operação *Image Calculator*. Os eixos tangencial (T), axial (A) e radial (R) correspondem à orientação da ROI na planta.

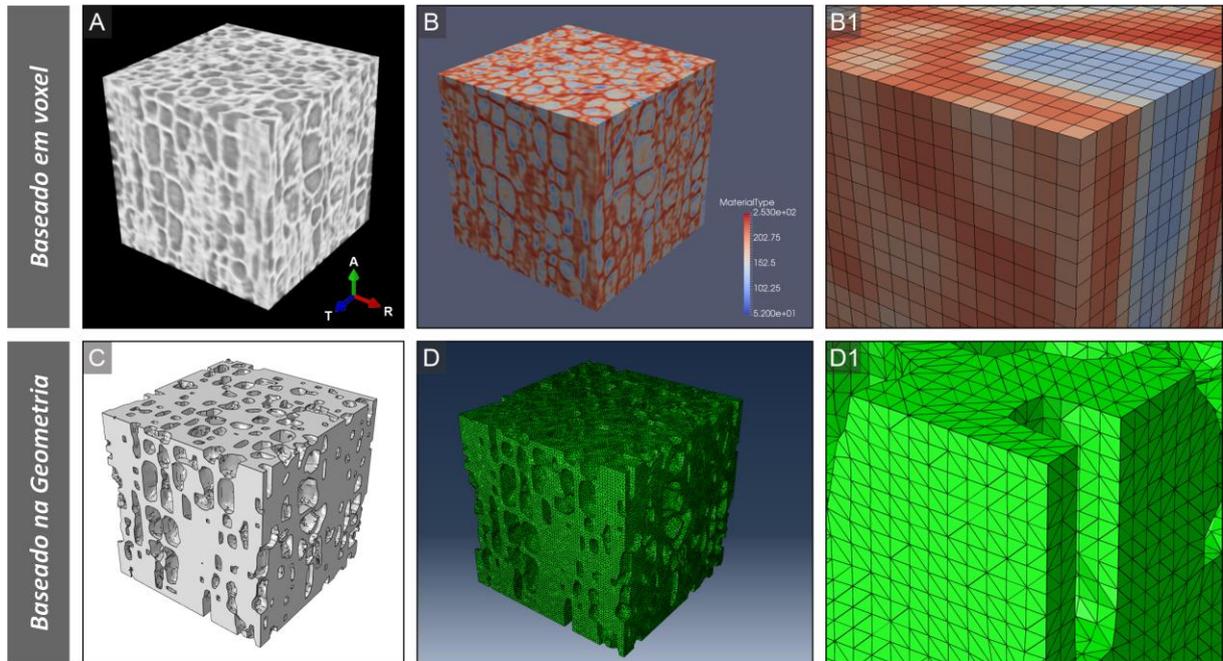


FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020b).

Os resultados dos processos de discretização são apresentados na figura 23. No método baseado em *voxel*, cada *voxel* da pilha de imagens original (figura 23A) foi convertido em elementos individuais, em um processo direto. Ao importar a sequência de imagens no VOX-FE (figura 23B), o *software* utiliza as posições e os níveis de cinza de cada *voxel* para atribuir o módulo elástico, segundo a Eq. (18). Não foi necessário nenhum refinamento adicional, e cada dado dos *voxels* foi transferido ao elemento hexaédrico correspondente (figura 23 B1). O VOX-FE apresenta uma legenda de cores intitulada *Material Type* (figura 23B), a qual retorna a amplitude dos níveis de cinza 8-bit da pilha de imagens carregada (de 52 a 253). O tempo do carregamento das imagens e do processo de conversão da pilha de imagens é diretamente proporcional ao número de *voxels*.

Para mais de  $3,38 \times 10^6$  elementos na ROI, com o VOX-FE foi necessário aproximadamente 15 *min*, e utilizou cerca de 17 *GB* de RAM. Por outro lado, o modelo baseado na geometria necessitou de passos adicionais. Após a pilha de imagens binárias ser convertida em uma malha de superfície 3D (figura 23C), o *software* Gmsh criou a malha de volume em um processo de cerca de 10 *min* que consumiu cerca de 7 *GB* de RAM. A malha volumétrica resultante (figura 23D) consistiu em cerca de  $1,06 \times 10^6$  elementos tetraédricos e cerca de 230.000 nós (figura 23 D1).

Figura 23 – Processos de discretização do parênquima do bambu. No modelo baseado em *voxel*: (A) o processo é baseado na localização e na densidade aparente da pilha de imagens de  $\mu$ CT original; (B) no *software* VOX-FE, os *voxels* são convertidos diretamente em uma malha discreta, e cada *voxel* compreende um único elemento hexaédrico (B1); A legenda em cores representa o tipo de material de acordo com a distribuição dos níveis de cinza da pilha original. No modelo baseado na geometria: (C) a pilha de imagens binária é primeiramente convertida em uma malha de superfície 3D e, então, a uma malha de volume utilizando o *software* Gmsh; (D) no *software* Abaqus/CAE, elementos tetraédricos uniformes preenchem a estrutura celular (D1).



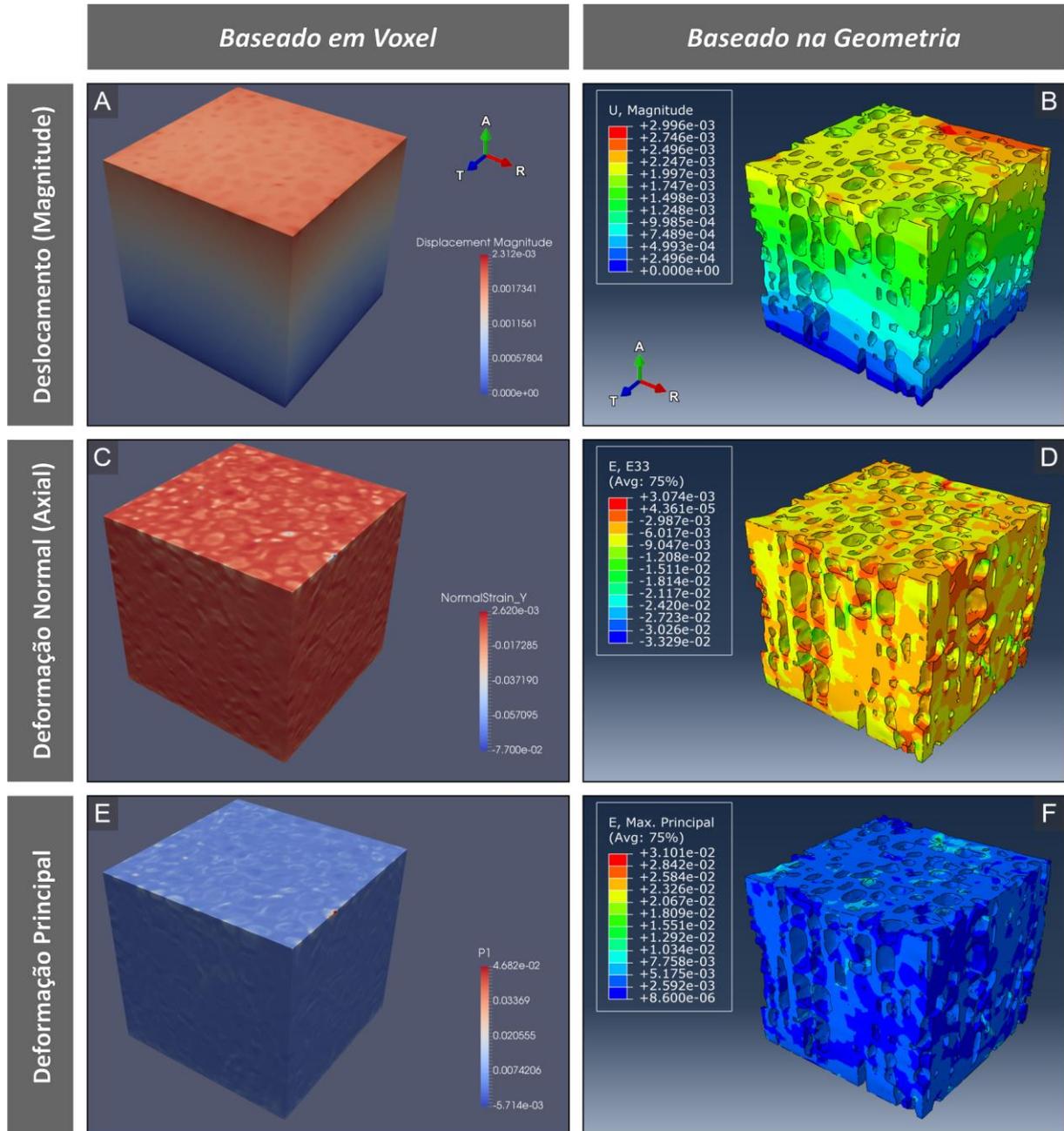
FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020b).

O modelo baseado em *voxel* resultou em um módulo elástico médio de  $6,38 \text{ GPa}$ , determinado pela Eq. (18), e uma resistência à compressão de  $35,92 \text{ MPa}$ , pela Eq. (20). Estes valores seriam correspondentes a uma densidade relativa de cerca de 0,40, por meio das Eqs. (2) e (4). Quanto ao modelo baseado na geometria, o módulo elástico e a resistência à compressão foram avaliados pelas Eqs. (19) e (20) como  $27,84 \text{ GPa}$  e  $106,05 \text{ MPa}$ , respectivamente. De modo similar, ao utilizar as Eqs. (2) e (4), o modelo baseado na geometria, o qual consiste principalmente de parede celular, apresentaria uma densidade relativa próxima a 0,83. Segundo o valor da resistência à compressão do modelo baseado em *voxel* e a face da área da ROI cúbica, uma carga uniforme de  $3,3 \text{ N}$  foi aplicada em ambas as análises do VOX-FE e do Abaqus/CAES. O modelo baseado em *voxel* utilizou cerca de  $75 \text{ GB}$  de RAM e memória virtual, com um tempo total de  $23 \text{ min}$ ; já o modelo baseado na geometria consumiu por volta de  $15 \text{ GB}$  de RAM, levando um tempo total de  $7 \text{ min}$ .

Alguns resultados de deslocamento (*displacement*) e deformações (*strains*) dos modelos baseados em *voxel* e na geometria, para as FEA lineares, são apresentados na figura 24. A

visibilidade dos contornos dos elementos da malha no Abaqus/CAE foi definida como *Features edges*, para facilitar a visualização dos resultados.

Figura 24 – Resultados das FEA para os modelos baseados em *voxel* e na geometria, para a  $\mu$ CT do parênquima do bambu: (A) e (B) magnitude do deslocamento (em *mm*); (C) e (D) deformações normais no sentido axial ( $\epsilon_{yy}$ ); (E) e (F) deformações principais ( $\epsilon_1$ ).

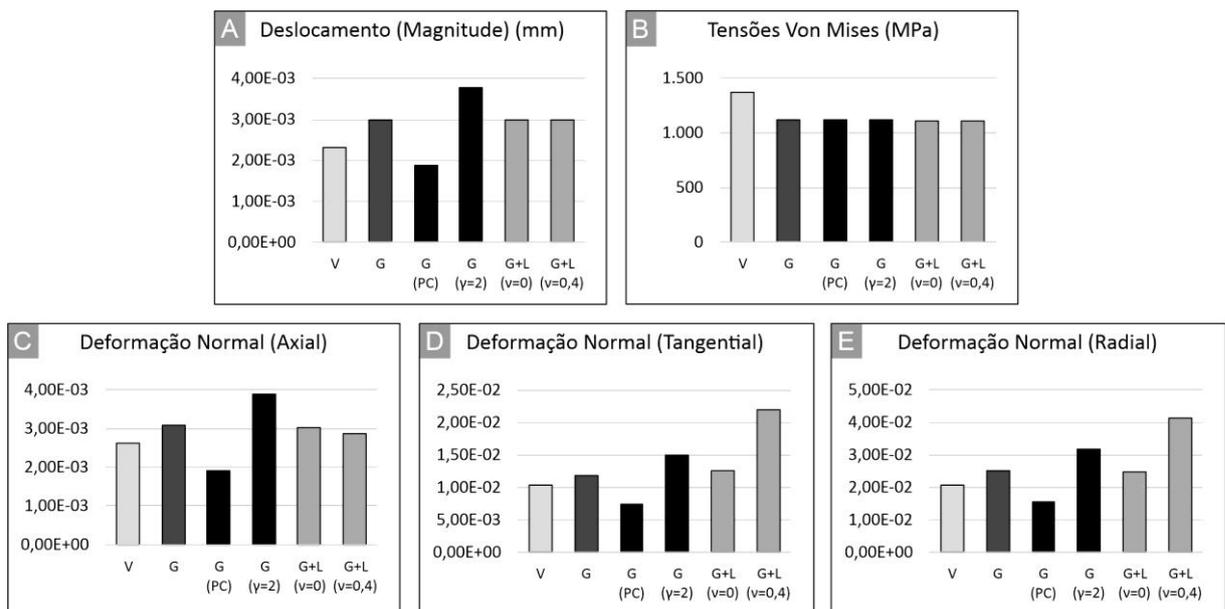


FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020b).

De modo geral, os resultados foram bastante similares entre os métodos, entretanto algumas características podem ser destacadas. A magnitude do deslocamento do modelo baseado no *voxel* (figura 24A) apresenta um gradiente regular entre as faces de topo (aplicação

da carga) e baixo (restrição de movimento) da região de interesse cúbica, entre todos os lados. Por outro lado, uma magnitude de deslocamento maior foi observada no canto superior direito do referencial do modelo baseado na geometria (figura 24B). As deformações normais na direção axial ( $\varepsilon_{yy}$ ), para ambos os modelos baseados em *voxel* (figura 24C) e na geometria (figura 24D) foram maiores nas regiões de parede de células vizinhas no sentido axial. Quanto à deformação principal ( $\varepsilon_1$ ), valores maiores foram encontrados em regiões particulares de parede celular para ambos os modelos (figura 24 E F). Os resultados comparativos das análises dos dois métodos de discretização, com variações das propriedades constitutivas do modelo baseado na geometria, são apresentados na figura 25.

Figura 25 – Resultados comparativos das FEA para os modelos baseados em *voxel* e na geometria, para a  $\mu$ CT do parênquima do bambu: (A) deslocamento (magnitude); (B) tensões von Mises; (C) deformação normal axial; (D) deformação normal tangencial; e (E) deformação normal radial. O modelo *V* é baseado em *voxel*; *G* é baseado na geometria; *G (PC)* é o baseado na geometria considerando as propriedades constitutivas sólidas da parede celular; *G ( $\gamma = 2$ )* é o modelo baseado na geometria considerando o valor de  $\gamma = 2$  na Eq. (19); *G + L ( $\nu = 0$ )* é o modelo baseado na geometria com a adição da região do lume com coeficiente de Poisson de 0,0; e *G + L ( $\nu = 0,4$ )*, com o coeficiente de 0,4. As direções axial, tangencial e radial são baseadas na orientação das células do parênquima na planta.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020b).

O primeiro modelo comparado (*PC*) consiste no modelo baseado na geometria com a utilização das propriedades constitutivas da parede celular sólido de  $E_s = 39,8 \text{ GPa}$  (DIXON; GIBSON, 2014), ou seja, sem considerar os níveis de cinza (densidade aparente) dos *voxels* no modelo numérico. A segunda variação ( $\gamma = 2$ ) trata da utilização do valor de  $\gamma = 2$  na Eq. (19), ou seja, sem considerar a geometria própria de material celular do modelo. O terceiro e

quarto modelos apresentam o acréscimo da região do lume celular do parênquima ( $G + L$ ), sendo o primeiro com esta região possuindo coeficiente de Poisson igual a zero ( $\nu = 0$ ), ou seja, com uma região comprimível, e o segundo com o coeficiente igual ao da parede celular ( $\nu = 0,4$ ). Nesses cenários, o módulo elástico e a resistência à compressão médios do modelo inteiro (parede celular e lume) foram de  $5,96 \text{ GPa}$  e  $32,11 \text{ GPa}$ , respectivamente. Isto indica uma densidade relativa média de  $0,39$ , similar à calculada pelo histograma da  $\mu\text{CT}$ . Estes resultados indicam que o modelo baseado na geometria tem uma rigidez e resistência próximas ao do baseado em *voxel*.

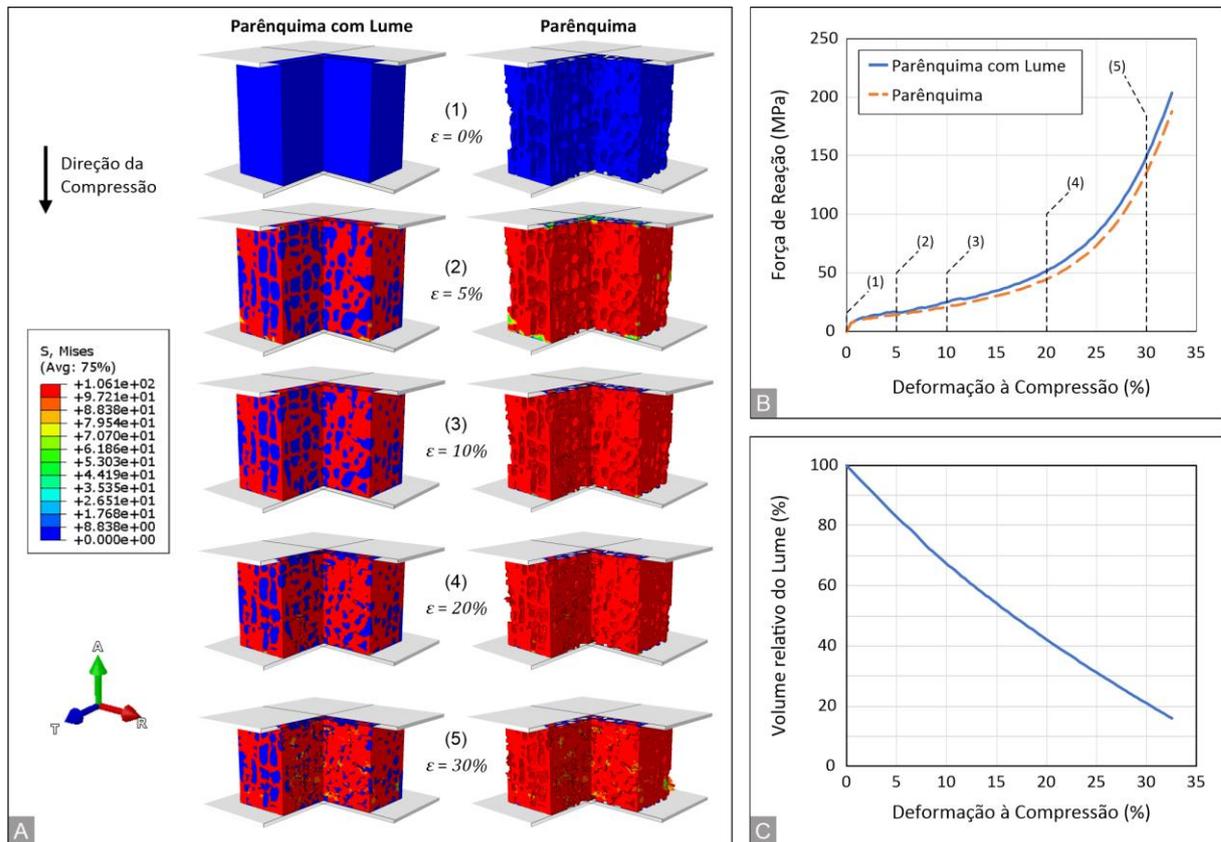
O modelo baseado na geometria ( $G$ ) apresentou um deslocamento máximo (magnitude) cerca de  $30\%$  maior que o baseado em *voxel* ( $V$ ), como visto na figura 25A. Já o modelo  $G$  ( $PC$ ) apresentou um deslocamento aproximadamente  $38\%$  mais baixo que o modelo baseado na geometria original ( $G$ ). Já considerando o modelo  $\gamma = 2$ , o deslocamento foi cerca de  $26\%$  maior. Quanto aos modelos com a inclusão da região do lume ( $G + L$ ) apresentaram um deslocamento  $1\%$  menor que o que o original, independentemente do coeficiente de Poisson.

Todos os modelos baseados na geometria, executados com o Abaqus/CAE, retornaram os valores de tensões von Mises. Contudo, os resultados de tensões para o modelo baseado em *voxel* não pode ser visualizado, uma vez que o VOX-FE não os calcula. Por outro lado, uma vez que o VOX-FE retorna os valores de deformação normal ( $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ ) e de cisalhamento ( $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ), as tensões von Mises puderam ser calculadas separadamente, através das relações de tensão-deformação da Lei de Hooke (ANEXO A), resultando em um valor máximo de  $1.372 \text{ MPa}$  (figura 25B). Já todos os modelos baseados na geometria resultaram em um máximo valor de  $1.122 \text{ MPa}$ , cerca de  $17\%$  menor que o modelo baseado em *voxel*. Conforme esperado, em análises lineares por elementos finitos de modelos com mesma geometria, carga e condições de contorno, tanto o modelo original ( $G$ ), quanto o com as propriedades constitutivas da parede celular sólida ( $PC$ ) e o modelo sem relações constitutivas da estrutura celular ( $\gamma = 2$ ) resultaram nos mesmos valores de tensões von Mises. Já a adição da região do lume reduziu ligeiramente ( $-1\%$ ) o valor máximo das tensões von Mises registrados em ambos os modelos ( $\nu = 0$  e  $\nu = 0,4$ ).

Com relação às deformações normais axial (figura 25C), tangencial (figura 25D) e radial (figura 25E), o modelo baseado na geometria resultou em valores aproximadamente  $17\%$ ,  $13\%$  e  $22\%$  maiores, respectivamente. Quanto ao modelo  $PC$ , todos os valores de deforma-

ção foram cerca de 38% mais baixos, comparado com o modelo original ( $G$ ). Quanto ao modelo  $\gamma = 2$ , os valores foram 26% maiores em todas as deformações. Já o modelo baseado na geometria juntamente com a região do lume ( $G + L$ ) com  $\nu = 0$  resultou em cerca dos mesmos valores de deformação (variando de  $-2\%$  a  $2\%$ ) que o modelo  $G$ . Já o modelo com  $\nu = 0,4$  a deformação axial foi 6% menor que o modelo  $G$  e as deformações tangencial e radial foram 86% e 65% maiores, respectivamente. Por fim, a figura 26 apresenta os resultados das análises não-lineares explícita de compressão axial.

Figura 26 – Resultados das análises explícitas por elementos finitos do modelo baseado na geometria, com e sem a região do lume: (A) representação gráfica das tensões von Mises durante as deformações axiais relativas de 0%, 5%, 10%, 20% e 30%; (B) curva tensão-deformação dos modelos com e sem a região do lume, dados com a relação entre a deformação relativa axial e a força de reação no ponto de referência definido na casca rígida superior; (C) deformação à compressão em função do volume relativo do lume, relativo ao seu valor original.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020b).

As tensões von Mises são vistas na figura 26A, com uma vista interna, em corte, dos modelos nos planos axial-radial e axial-tangencial, em diferentes níveis de compressão. Ainda que tensionadas, as regiões do lume são mostradas com valores baixos de tensão devido as propriedades de tensão de escoamento relativamente menores que do material da parede

celular; desse modo, no gráfico apresentado, os valores de tensão da região do lume são comparativamente menores, resultando em uma coloração azul. As curvas de tensão-deformação de ambas as análises são vistas na figura 26B, em que a deformação à compressão está relacionada às dimensões totais do modelo, e os valores de tensão foram retornados pela força de reação registrada no ponto de referência definido na casca rígida superior. A 5% quase a totalidade dos elementos encontram-se no limite da tensão de escoamento, considerando já na fase plástica. A 10% é iniciada a flambagem de algumas paredes celulares, e algumas regiões celulares pequenas começam a se densificar. A 20%, o platô no gráfico tensão-deformação, o qual é principalmente devido à flambagem de paredes celulares locais (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010), é terminado, iniciando o processo de densificação, aumentando potencialmente a força de reação. Finalmente, a cerca de 30%, praticamente todas as células colapsaram e a maioria das paredes celulares axialmente opostas estão em contato direto, aumentando a densificação no modelo e, conseqüentemente, a força de reação registrada.

Em termos de comparação, as análises com o modelo do parênquima apenas e com a adição da região do lume resultaram em deformações similares, principalmente devido às propriedades constitutivas relativamente menores e ao valor igual a 0 do coeficiente de Poisson do lume. De maneira similar, os valores das forças de reação apresentaram uma diferença máxima de 20% (a uma compressão de cerca de 12%), mostrando que a região do lume não aumenta demasiadamente a resistência do modelo. Como efeito da densificação do parênquima durante a análise de compressão, um decréscimo no volume do lume é observado. A figura 26C apresenta a curva decrescente da soma de todos os elementos da malha do lume, relativo ao seu estado inicial (100% do volume). A curva segue uma relação praticamente linear. A cerca de 17% de compressão, a região do lume é reduzida a apenas 50% do volume inicial. Na máxima deformação à compressão (cerca de 33%), o volume relativo do lume foi reduzido a aproximadamente 17%. Novamente, devido à incapacidade do método baseado em *voxel* em utilizar não-linearidades nas análises, o cálculo de volume em função da compressão não pode ser realizado.

### 3.1.3 Discussão

Discretização baseada em *voxel* e na geometria são dois dos métodos mais apropriados para FEA de materiais celulares como plantas (LENGSFELD *et al.*, 1998; MAIRE *et al.*, 2003;

PETIT; MEILLE; MAIRE, 2013), ainda que eles requeiram cuidado em termos de selecionar uma região representativa e avaliar suas propriedades mecânicas. A ROI selecionada compreende um número significativo de células do parênquima combinadas com um tamanho de *voxel* relativamente pequeno. As características do volume e da relação de aspecto das células estão de acordo com dados da literatura (AHVENAINEN *et al.*, 2017). Ainda que as densidades relativas do tecido estivessem um tanto superior aos dados de literatura para *B. tuldoides* (PALOMBINI *et al.*, 2016), indicando um maior espessamento de parede celular, o qual é esperado para diferentes regiões de plantas (LIESE; KÖHL, 2015), não fez diferença para essa abordagem. Isso se deve aos métodos combinados que consideram a densidade aparente de regiões discretas para estimar sua rigidez. Para o modelo baseado em *voxel*, os valores dos resultados de módulo elástico e resistência à compressão estavam de acordo com modelos numéricos do parênquima para a mesma densidade (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Apesar da similaridade dos resultados dos métodos baseados no *voxel* e na geometria, é importante destacar que este é mais suscetível a falhas geométricas locais, como visto nos resultados locais de deslocamento (figura 24). Como característica tanto de materiais naturais e desse tipo de método de discretização, pequenas descontinuidades podem ocorrer, ainda que nenhuma grande deformação ou tensão foi observada naquela região. Deformações maiores em paredes de células axialmente próximas foram observadas em ambos os métodos (figura 24 C e D), sendo característico de um dos modos de falha do parênquima reportado na literatura (DIXON; GIBSON, 2014; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Os resultados do modelo baseado em *voxel* apresentaram maior similaridade ao modelo baseado na geometria que também considera os níveis de cinza nas suas propriedades constitutivas. A FEA não-linear do modelo baseado na geometria convergiu para uma resistência à compressão comparável à estimada pelas equações dos modelos numéricos. Além disso, a análise apresentou a ocorrência de flambagem parcial local em algumas paredes celulares, também como esperado como um modo de falha durante a compressão. Isso reforça que mesmo que ambas as abordagens possam ser utilizadas para analisar o comportamento mecânico de tecidos vegetais, o método baseado na geometria retorna mais informações sobre o comportamento mecânico próximo a cargas críticas.

Quanto ao modelo baseado na geometria e suas propriedades constitutivas, algumas questões são importantes de serem consideradas. Primeiramente, considerar a densidade aparente da parede celular foi crucial para estimar mais adequadamente as propriedades da

estrutura. Se o módulo e a resistência da parede celular sólida fossem atribuídos à estrutura inteira diretamente, elas representariam uma superestimação de 40% das propriedades mecânicas, considerando sua densidade relativa. Na FEA linear investigada, tal diferença aumentou a rigidez do modelo, levando a valores máximos de deslocamento e deformação aproximadamente 38% inferiores. Em segundo lugar, enquanto o modelo numérico original para as propriedades mecânicas do parênquima do bambu é baseado na suposição de que a geometria celular inteira pode ser substituída por um sólido não-celular e isotrópico em uma FEA simplificada (DIXON *et al.*, 2018; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PALOMBINI *et al.*, 2020c), como visto no valor de  $\gamma = 2$  na Eq. (2), o mesmo não pode ser aplicado em uma malha configurada como um material celular, como o modelo utilizado neste estudo de caso. Neste caso, a própria geometria da malha já engloba o fator de espuma de célula fechada no modelo numérico, dado pela relação exponencial do valor de  $\gamma$ . Desse modo, não é necessário que as propriedades constitutivas da malha sejam aplicadas com o mesmo valor de  $\gamma$  como em uma região sólida e não-celular. Em comparação, o uso de  $\gamma = 2$  nas relações constitutivas da geometria celular resultaria em uma estrutura menos rígida, com um aumento de cerca de 26% em deslocamento e deformações (figura 25, modelo  $\gamma = 2$ ). Uma possibilidade para utilizar propriedades homogêneas é aplicar um material heterogêneo em um modelo baseado na geometria, baseando-se nos níveis de cinza dessa região na  $\mu$ CT (AMANI *et al.*, 2018b).

Outra possibilidade de aplicar o modelo baseado na geometria em uma FEA de uma amostra vegetal é ao incluir uma região relacionada ao lume celular. Neste estudo de caso, tal montagem foi comparada de duas maneiras (figura 25, modelos  $G + L$ ), ao variar o coeficiente de Poisson da região do lume. No primeiro cenário, a amostra foi modelada como seca na imagem de  $\mu$ CT, *i.e.*, ao atribuir o valor de zero para o coeficiente (figura 25, modelo  $\nu = 0$ ). Neste caso, os resultados foram similares ao modelo  $G$  original, indicando que a região do lume com propriedades de espaços vazios não adicionaria rigidez excessiva ao modelo completo. Em comparação, a análise com a inclusão da região do lume com o mesmo coeficiente de Poisson da parede celular (figura 25, modelo  $\nu = 0,4$ ) apresentaria resultados diferentes. Como esperado, na direção axial, onde a carga foi aplicada, os resultados de deformação normal foram bastante similares, entretanto nas direções transversais (tangencial e radial), as deformações foram significativamente maiores. Biologicamente, ao considerar uma amostra in natura, com um percentual de umidade naturalmente maior, as células parenquimáticas do bambu exibem um protoplasto, o qual é em grande parte composto por vacúolos cheios de

água, sais e compostos que auxiliam no controle da pressão interna da célula. (FAHN, 1990; MAUSETH, 2014). Nesta situação, a região do lume apresentaria um coeficiente de Poisson maior e quase incompressível. Quando seca, a região do lume da amostra morre, e o conteúdo aquoso em seu interior é significativamente reduzido, assim influenciando diretamente as propriedades mecânicas gerais do material. Portanto, como a modelagem baseada em *voxel*, a região do lume pode ser utilizada no modelo baseado na geometria se esta região é modelada de maneira similar em ambos os métodos, *i.e.*, ao adicionar um valor zerado mais realista no coeficiente de Poisson para a região, como a amostra seca, para evitar deformações perpendiculares maiores.

Uma vez que o modelo baseado na geometria com um coeficiente de Poisson zerado ( $G + L, \nu = 0$ ) foi similar ao modelo baseado na geometria original ( $G$ ) nos resultados das análises lineares (figura 25), pode-se supor que ele também foi o modelo mais apropriado para ser testado nas análises explícitas (figura 26). Na fase elástica da análise ( $\varepsilon < 1\%$ ), ambos os modelos foram deformados de maneira similar (figura 26B). Já com relação à fase plástica ( $1\% < \varepsilon < 33\%$ ), as curvas de tensão-deformação também foram bastante comparáveis e similares a resultados da literatura para amostras internas de espécies de bambu (DIXON; GIBSON, 2014; OBATAYA; KITIN; YAMAUCHI, 2007), em que o parênquima domina a proporção do tipo de células. Novamente, é importante destacar que ao utilizar uma região do lume com um coeficiente de Poisson igual a zero tem-se deformações locais muito próximas (figura 26A), uma vez que a região inclui relativamente pouca rigidez e resistência ao modelo. Em termos de ensaios experimentais com bambu, o percentual de umidade também influencia o macrocomportamento mecânico diretamente. As resistências à compressão, tensão, cisalhamento e flexão são reduzidas em amostras deixadas em ambientes com altos níveis de umidade (ASKARINEJAD *et al.*, 2015; JAKOVLJEVIĆ *et al.*, 2017; WAKCHAURE; KUTE, 2012). Microscopicamente, o mesmo comportamento pode ser observado em ensaios de nanoindentação, em que as propriedades mecânicas de paredes celulares das fibras do bambu decrescem (WANG *et al.*, 2013). Uma vez que o módulo elástico de celulose seca é maior que o de celulose úmida, como a água é perdida das células fibrosas, o módulo elástico do tecido pode aumentar devido (i) à desidratação dos componentes de celulose da parede celular e (ii) à densificação do fração de volume da parede celular no tecido (NIKLAS, 1992). Entretanto, o efeito de secagem nas propriedades mecânicas é diferente em células de paredes finas, tais como as encontradas no parênquima. Neste caso, um conteúdo de umidade maior nos vacúolos leva a uma

maior pressão de turgor<sup>24</sup> dentro do protoplasto celular (FAHN, 1990), o qual reduz o movimento e flambagem das paredes celulares (NIKLAS, 1992), bem como aumenta as propriedades mecânicas do tecido (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Os efeitos biológicos da deformação à compressão em um lume com alta umidade e, conseqüentemente, alta pressão de turgor, podem ser reproduzidos em análises explícitas por elementos finitos, quando esta região é modelada com um alto coeficiente de Poisson. Pode ser destacado que os elementos internos e, portanto, sem restrição do modelo apresentam deformações maiores em comparação aos elementos periféricos (figura 26A,  $\varepsilon = 20\%$  e  $\varepsilon = 30\%$ ), e são mais responsáveis pela redução geral do volume do lume durante a compressão (figura 26C). Uma vez que os elementos periféricos dos modelos foram restritos em movimentos radiais e tangenciais (figura 21) para evitar superimposição em regiões externas e para representar uma região envolta mais realista, sua deformação aparente seguiu majoritariamente o próprio deslocamento axial. Além disso, se nenhuma condição de contorno laterais fossem aplicadas, a geometria teria apresentado uma deformação perpendicular muito maior resultando em, conseqüentemente, forças de reação muito menores. Por fim, o uso de análises explícitas permite que regiões vegetais complexas possam ser analisadas em termos de deformações locais e totais, bem como com relação a modificações de volume relativo durante a deformação.

Embora possuindo um grande potencial de FEA baseadas em  $\mu$ CT de plantas, a nível celular, algumas limitações podem ser listadas. Por exemplo, destacam-se os consideráveis recursos de processamento e de memória necessários para uma ROI com tanto um tamanho de *voxel* com resolução significativa quanto um número total de células representativo. Analisar uma região celular maior de uma amostra de planta iria requerer um esforço computacional ainda maior. Caso contrário, é necessário aumentar o tamanho do *voxel* (perda de resolução), levando a uma menor precisão da geometria das células. Já para uma maior resolução celular, contudo, tomografias baseadas em luz de síncrotron ou nanotomografia seriam mais interessantes para aumentar os detalhes da geometria da célula (MAIRE; WITHERS, 2014).

Outro tópico de importante discussão é a menor representatividade de FEA diretamente baseadas em  $\mu$ CT, considerando uma amostra vegetal inteira. Para materiais sólidos, diversas abordagens de células unitárias podem ser seguidas para representar uma região maior, por

---

<sup>24</sup> Pressão de turgor é a pressão que se desenvolve no interior de uma célula vegetal como resultado da absorção de água por osmose e/ou embebição (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013).

meio de condições de contorno periódicas (WISMANS; GOVAERT; VAN DOMMELEN, 2010). Entretanto, apesar de mais eficientes em termos de computação (MAIRE et al., 2003), tais técnicas podem não levar em consideração as microinfluências de um material natural celular e irregular, como o parênquima do bambu. Ao utilizar volumes de alta resolução obtidos por  $\mu$ CT, é possível beneficiar-se da precisão geométrica na FEA, particularmente relacionadas ao comportamento local do material avaliado (KADER et al., 2017), contudo um tamanho de amostra reduzido pode ser apontado como uma das principais desvantagens (MAIRE; WITHERS, 2014).

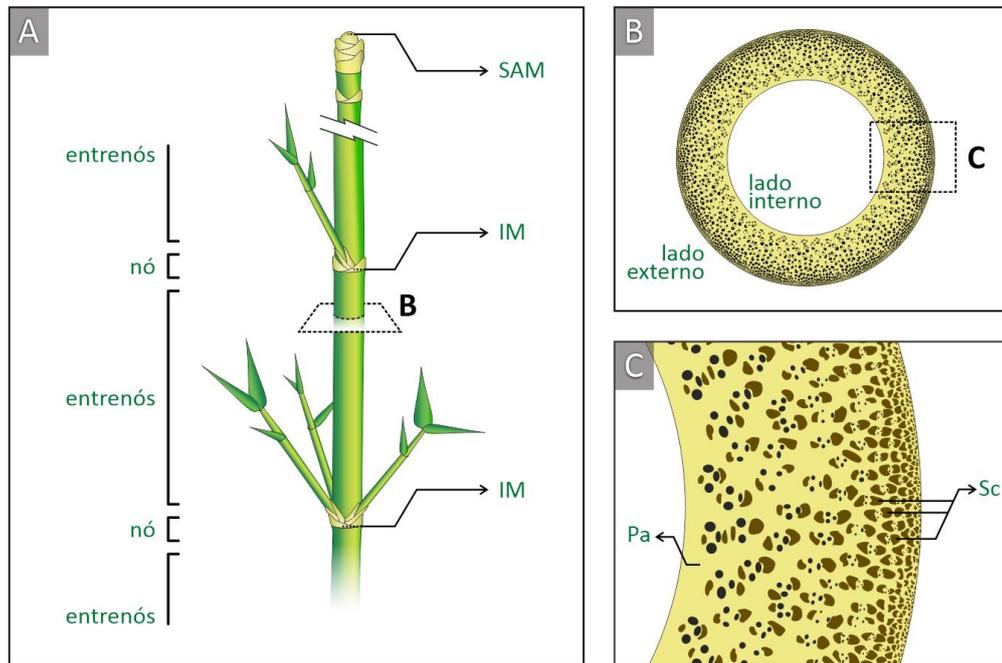
Ao comparar os *softwares* utilizados, a resolução (solver) do método baseado na geometria mostrou-se mais otimizado: apresentou uma relação de número de elementos para memória consumida ( $E/M$ ) cerca de 57% maior. Por outro lado, uma vez que o método baseado em *voxel* não requer passos adicionais de discretização além de carregar e converter a pilha de imagens, o procedimento de discretização apresentou uma relação  $E/M$  31% melhor que a discretização baseada na geometria. Quanto às características dos *softwares*, contudo, o VOX-FE atualmente não apresenta resultados de tensões diretamente, necessitando que as tensões von Mises sejam calculadas de maneira separada, por exemplo. Além disso, a falta de opções para não-linearidades pode limitar as aplicações do método, ainda que ambas as técnicas de discretização podem ser aplicadas em combinação. De todo modo, ao combinar uma malha de alta resolução com propriedades constitutivas apropriadas que foram modeladas juntamente com resultados de densidade aparente, a FEA baseada em  $\mu$ CT pode ser considerada uma abordagem precisa para avaliar comportamentos mecânicos de materiais complexos e delicados como tecidos vegetais. Por fim, tem-se que, devido à característica do parênquima, as mesmas técnicas abordadas também poderiam ser empregadas em demais materiais celulares, sejam naturais ou sintéticos, como espumas e estruturas tipo *honeycomb*.

### **3.2 Análise morfoestrutural do sistema vascular da região nodal do bambu**

O bambu é uma das estruturas mais eficientes na natureza, combinando interessantes propriedades mecânicas com baixa densidade, em múltiplas escalas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; NIKLAS, 1992). Na figura 27 são apresentadas as principais características macro e microestruturais da planta. Macroscopicamente, o caule cilíndrico da planta é dividido em regiões ocas de entrenós e nós sólidos (figura 27A). Os feixes vasculares aparecem espaçados e distri-

buídos ao longo do tecido fundamental do caule, seguindo o padrão de monocotiledôneas chamado de arranjo atactostelo. No entrenós esse arranjo é longitudinal dos feixes vasculares é observado por sua distribuição em um gradiente radial, aumentando em número da parte interna à externa da planta (figura 27B). Já nos nós, os feixes movem-se transversalmente, gerando a região sólida do diafragma. Já microscopicamente, a combinação de diferentes tecidos com propriedades complementares torna o bambu um material natural análogo a um compósito natural (AMADA *et al.*, 1996; LAKKAD; PATEL, 1981; LOW; CHE; LATELLA, 2006). Os elementos vasculares são envoltos e protegidos por feixes de esclerênquima e preenchidos por células de parênquima, como visto na figura 27C, em que *Pa* representa o parênquima, e *Sc* o esclerênquima.

Figura 27 – Principais características macro e microestruturais do bambu: (A) segmentação do caule em regiões de nós e entre-nós, em que SAM é o meristema<sup>25</sup> apical caulinar (*shoot apical meristem*) e IM é meristema intercalar (*intercalary meristem*); (B) seção transversal intermodal, mostrando a distribuição gradiente atactostelo dos feixes vasculares, do interior ao exterior do caule; (C) tecidos que envolvem os elementos vasculares, em que *Pa* é parênquima e *Sc* são os feixes de esclerênquima.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

Neste estudo de caso é apresentada a caracterização 3D da morfologia e uma análise por elementos finitos baseada em imagens de  $\mu$ CT para um ramo apical de bambu. A amostra consiste em uma região nodal com a formação de 3 ramos secundários. Foram avaliados da-

<sup>25</sup> Tecido considerado primitivo e embrionário, *i.e.*, responsável pela produção de todos os outros tipos de tecidos, através da diferenciação (PALOMBINI, 2016; SCHULTZ, 1972).

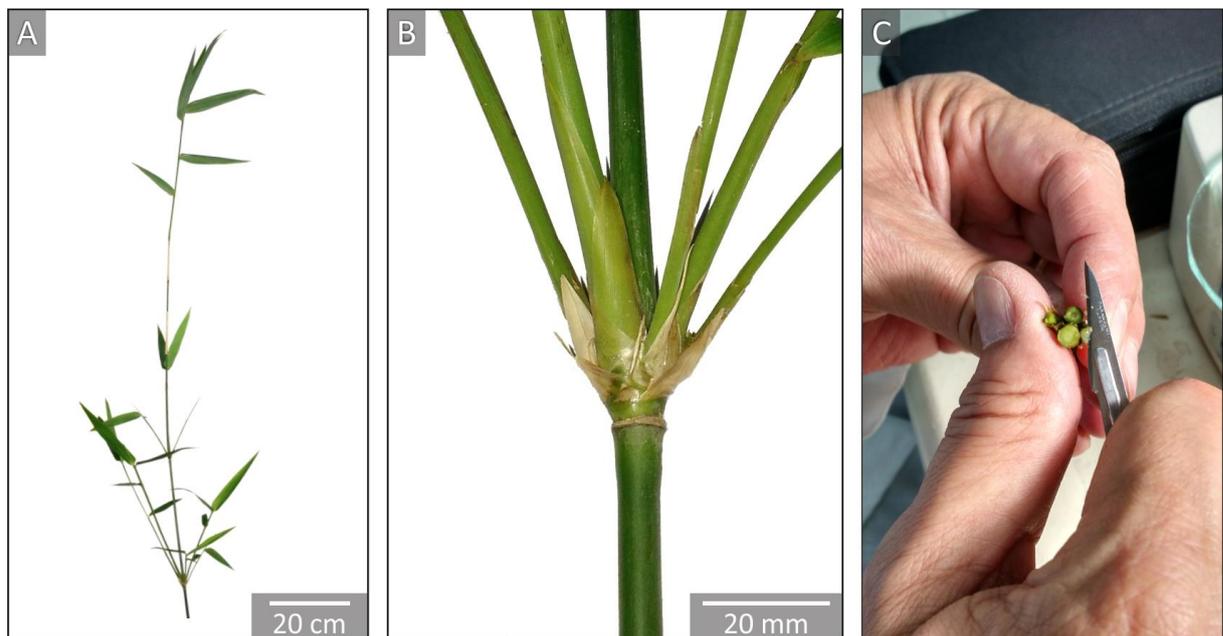
dos como volume, porosidade, densidade relativa e a distribuição dos tecidos na amostra. Os dados foram utilizados para determinar suas propriedades constitutivas e uma FEA não-linear foi realizada, verificando a distribuição de tensões ao longo da região nodal com ramificação.

### 3.2.1 Material e métodos

#### 3.2.1.1 Amostra e preparação

Uma amostra madura de *B. tuldoides* (figura 28) foi coletada no município de Tapes, no estado de Rio Grande do Sul. A ROI selecionada corresponde à região apical da planta (figura 28A) devido ao desenvolvimento de eixos laterais na região nodal (figura 28B). Por ser da porção apical, a amostra consistia em dimensões pequenas, facilitando a sua digitalização completa além da obtenção de resoluções maiores na  $\mu$ CT.

Figura 28 – Preparação da amostra de bambu (*B. tuldoides*): (A) porção apical do caule; (B) região nodal do caule, consistindo em um eixo primário gerando bainhas e eixos laterais; (C) secionamento da amostra.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

A amostra foi secionada transversalmente de maneira manual, acima da região nodal com um bisturi (figura 28C). Devido à posição apical da amostra no caule, as células do esclerênquima apresentaram um nível menor de lignificação, não sendo necessário seguir, portanto, nenhum protocolo de amolecimento de tecidos. A amostra foi fixada em FAA<sub>50</sub> (Adaptada de JOHANSEN, 1940), composta por cinco partes de formaldeído, cinco partes de

ácido acético e 90 partes de etanol 50% (SAMPAIO; DE CHIARA MOÇO; MARIATH, 2013) permanecendo por 7 dias. Após esse período, a amostra seguiu o protocolo apresentado em Palombini (2016), com submersões em etanol, e no composto desidratante 2,2-dimetoxipropano, como meio intermediária de secagem por 24 h, e sendo, por último, levada à dessecadora de sílica-gel.

### 3.2.1.2 Microtomografia de raios X

A aquisição das imagens de  $\mu$ CT (figura 29) foi realizada no equipamento Xradia® 510 Versa (Zeiss® X-ray Microscopy, Pleasanton, CA, EUA), localizado no Grupo de Pesquisa em Microscopia Digital e Análise de Imagens (MicDigi/PUC-Rio). Seguindo os mesmos princípios levantados na fundamentação teórica, tal como foi seguido no estudo de caso anterior, com uma amostra de menores dimensões (figura 29A) é possível a obtenção de resoluções espaciais maiores, por um menor espalhamento do feixe de radiação. Os mesmos parâmetros de 80 kV e 88  $\mu$ A para a tensão e corrente foram utilizados, juntamente com a objetiva de ampliação de 4  $\times$  (figura 29B), resultando em um tamanho de *voxel* de 5,611  $\mu$ m.

Figura 29 – Aquisição de imagens de  $\mu$ CT: (A) amostra do bambu da região nodal; (B) posicionamento da amostra e objetiva de 4  $\times$  (S = Amostra, O = Objetiva); e (C) projeção da  $\mu$ CT.

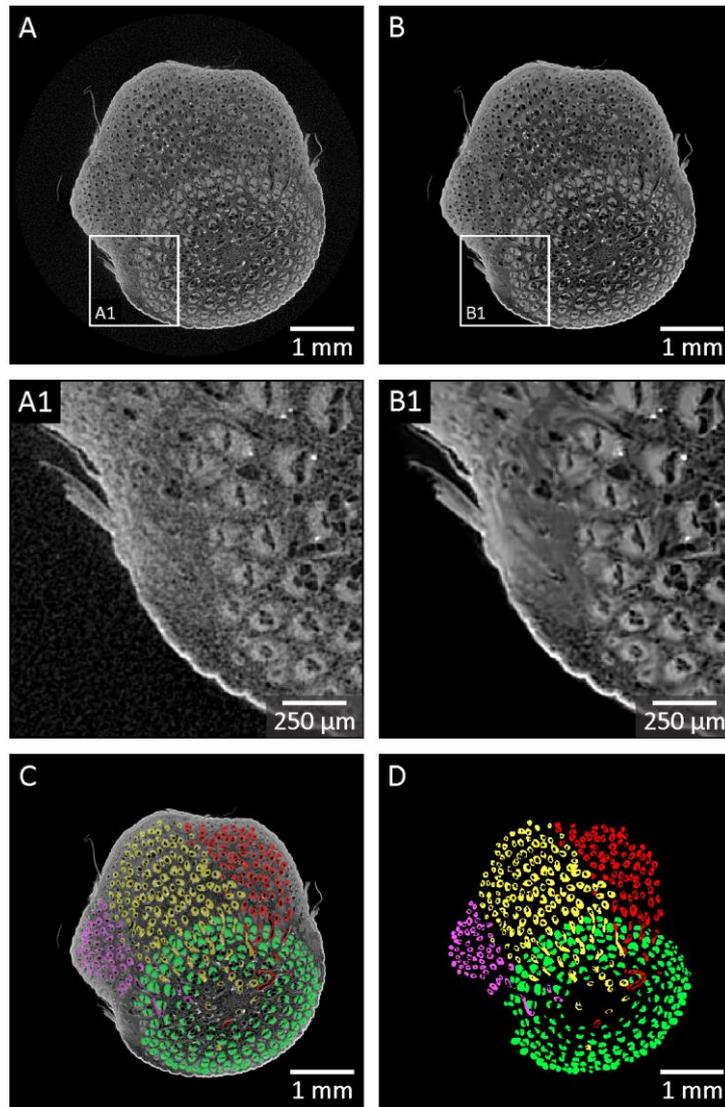


FONTE: Autor (2020) e adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

Foi utilizado um filtro de radiação de baixa energia (*LE1*), proprietário do equipamento de  $\mu$ CT, para evitar efeitos de endurecimento de feixe. Devido às dimensões longitudinais da amostra, foram realizados dois tomos de aquisições de imagem, correspondentes às regiões superior e inferior, para digitalizá-la por completo. Cada tomo consistiu em 1601 projeções (figura 29C), com passos de 0,225°, e tempo de exposição de 1 s, totalizando um tempo de aquisição de 2 h 15 min.

Após a união dos dois tomos adquiridos, com algoritmos proprietários do equipamento, as imagens sequenciais foram exportadas em formato DICOM. Novamente, o processamento das imagens foi realizado com o *software* de código aberto Fiji (SCHINDELIN *et al.*, 2012) e o processamento é apresentado na figura 30. A pilha de imagens original (figura 30A) foi ajustada com o filtro *Non-Local Means* (BUADES; COLL; MOREL, 2011) para redução de ruído (figura 30B). O filtro foi utilizado para auxiliar na definição das estruturas observadas, mas com a suavização dos defeitos de ruído de imagens, para auxiliar na posterior segmentação. Os detalhes ampliados de antes e depois do processo são vistos em A1 e B1, respectivamente.

Figura 30 – Processamento das imagens de  $\mu$ CT: (A) fatia original e detalhe (A1) do ruído na região; (B) imagem filtrada com o filtro de redução de ruído *Non-Local Means* e detalhe (B1) da mesma região, após a redução do ruído; (C) segmentação manual do esclerênquima dos feixes vasculares do eixo primário (verde) e secundários (roxo, amarelo e vermelho); e (D) máscara binária dos feixes segmentados.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

Para uma melhor visualização, além de uma análise precisa dos feixes vasculares do bambu na região nodal, os feixes do esclerênquima foram segmentados (figura 30C). Como visto na fundamentação teórica, devido à similaridade de densidade entre os tecidos, o processo de segmentação teve de ser realizado de modo manual e individual, consistindo em um processo consideravelmente mais laborioso que o de segmentação automática. Uma vez que os feixes tendem a se curvar e mover transversalmente na região nodal, rastreá-los e identificá-los torna-se difícil. Desse modo, cada eixo foi segmentando de maneira distinta, sendo atribuída uma cor própria, a qual foi seguida no decorrer do estudo de caso: verde para o eixo principal (ou primário), e roxo, amarelo e vermelho para os eixos secundários (figura 30C). Foi utilizado o *plugin Segmentation Editor* (SCHINDELIN *et al.*, 2012) durante o processo, gerando máscaras binárias que poderiam ser exportadas e analisadas. As regiões do lume celular dos elementos condutores do xilema e do floema foram preservadas ao subtrair uma máscara adicional contendo o lume celular da máscara binária segmentada, utilizando a operação *Image Calculator*, como no estudo de caso anterior. As máscaras binárias resultantes (figura 30D) foram, então, exportadas em arquivos com formato STL binário, de acordo com cada eixo, para a análise morfológica.

### 3.2.1.3 Análise por Elementos Finitos

Para avaliar o comportamento mecânico da região nodal do bambu, uma análise por elementos finitos (FEA) foi realizada na pilha de imagens processada. Os processos de discretização dos arquivos STL em uma malha volumétrica seguiu os métodos do modelo baseado na geometria, do estudo de caso anterior, sendo novamente utilizado o Gmsh (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009). Uma única malha foi utilizada para discretizar a amostra inteira do bambu, contudo elementos agrupados foram atribuídos às regiões do parênquima e do esclerênquima para definição de propriedades constitutivas independentes. Para reduzir o número total de elementos da malha discretizada, os espaços do lume do xilema e do floema foram desprezados dos feixes vasculares. Tais detalhes forçariam os elementos da malha a possuírem um tamanho ainda menor, requerendo ainda mais poder de processamento para resolução da FEA. A malha volumétrica foi exportada em formato INP para rodagem no *software* Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia® Corp., Providence, RI, EUA), do mesmo modo como no estudo de caso anterior.

As propriedades constitutivas foram definidas com base nas informações vistas na fundamentação teórica, ou seja, utilizando os valores de densidade relativa do esclerênquima e do parênquima. Como o volume discretizado apresenta uma geometria sólida, ao invés da geometria de espuma dos próprios tecidos – o que aumentaria expressivamente o número de elementos, optou-se por uma abordagem partindo diretamente das Eqs. (2 – 5); ou seja, a abordagem vista no estudo de caso anterior, em que a contribuição da geometria do parênquima dá-se diretamente pela forma da malha volumétrica, não foi seguida em função da complexidade e do tamanho da região analisada.

Novamente, um regime elastoplástico foi definido na análise, com o propósito de investigar as tensões e as deformações da modelo nodal do bambu durante a carga de compressão máxima suportada. Nesse sentido, uma carga de compressão axial inicial de  $100\text{ MPa}$ , definida como *Total Force*, foi distribuída na face da seção transversal superior do modelo. A análise foi executada até convergir para uma carga máxima de compressão. A face inferior do modelo foi restrita como engaste. Por fim, como no estudo anterior, uma propriedade de autocontato foi definida nos elementos do modelo (interação do tipo *surface to surface* e *frictionless*), para prevenir regiões adjacentes de se interceptarem.

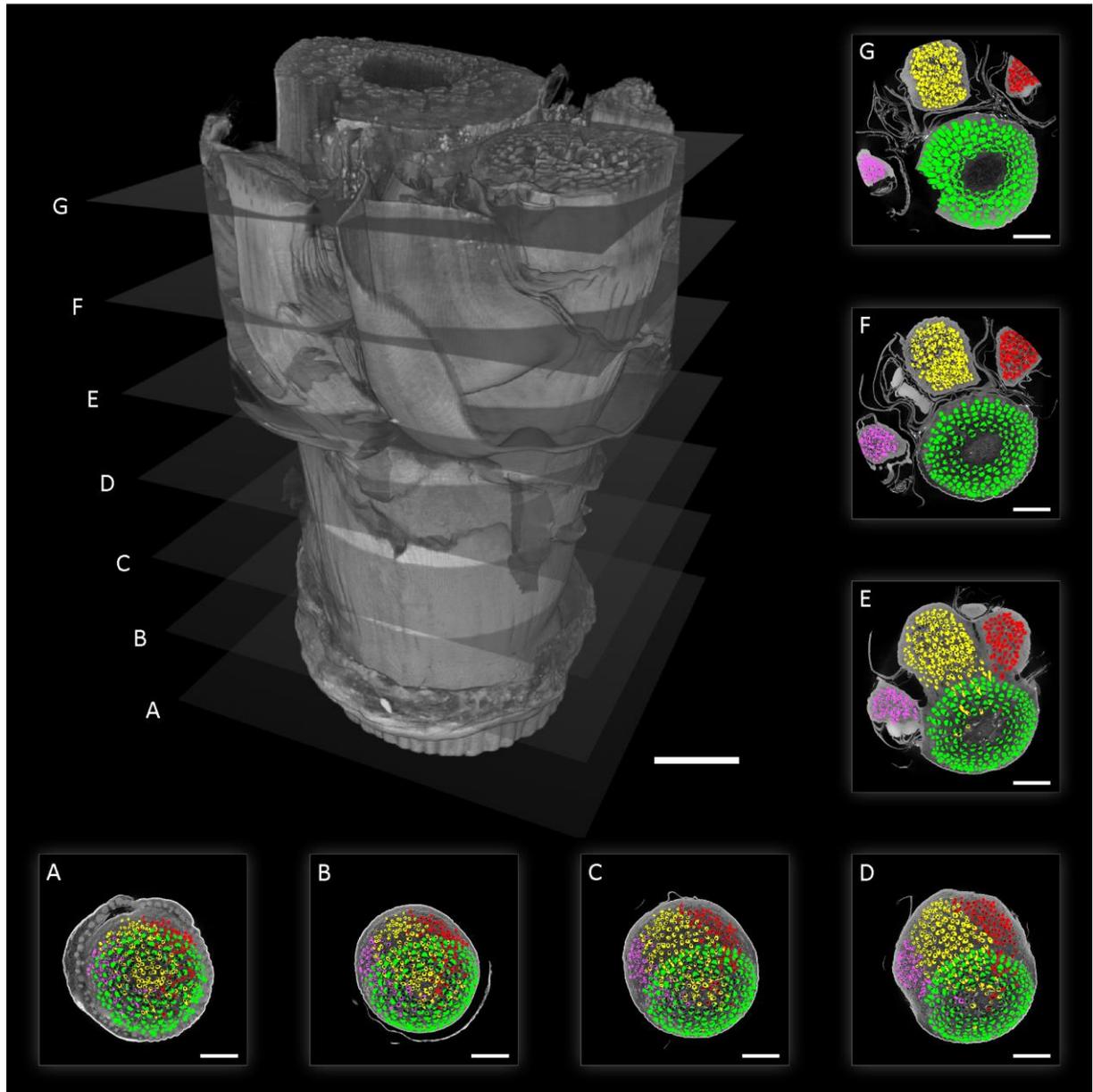
### 3.2.2 Resultados e discussão

#### 3.2.2.1 Análise morfológica

A reconstrução 3D da região nodal do bambu com eixos secundários é apresentada na figura 31. Os detalhes A até G apresentam o desenvolvimento dos ramos até os eixos secundários, com a união das máscaras binárias dos feixes vasculares segmentados e das fatias de  $\mu\text{CT}$ , distribuídas da parte inferior à parte superior do modelo. Na parte inferior do diafragma (figura 31A), os feixes vasculares marginais deixam o cilindro central, vascularizando as bainhas das folhas; ao mesmo tempo outros feixes marginais migram para fora do cilindro central, com a adição de demais elementos marginais da região oposta a ele, passando através dos principais em direção ao lado de fora (figura 31 B, C e D). Conforme a posição referencial da fatia de  $\mu\text{CT}$  se aproxima da região superior do diafragma, os feixes vasculares dos eixos secundários são visto envolvendo e circundando aqueles do eixo principal, enquanto se movimentam transversalmente (figura 31C), e se alinham aos seus respectivos ramos secundários

(figura 31D), até se encontrarem totalmente separados em ramos (figura 31E).

Figura 31 – Reconstrução 3D da região nodal do bambu. Detalhes A-G apresentam fatias (da base ao topo da amostra) mostrando o desenvolvimento de bainhas de folhas e ramos do caule, destacando a anastomose dos feixes vasculares ao conectar o eixo principal (verde) aos feixes secundários (roxo, amarelo e vermelho). Barra de escala = 1 mm.



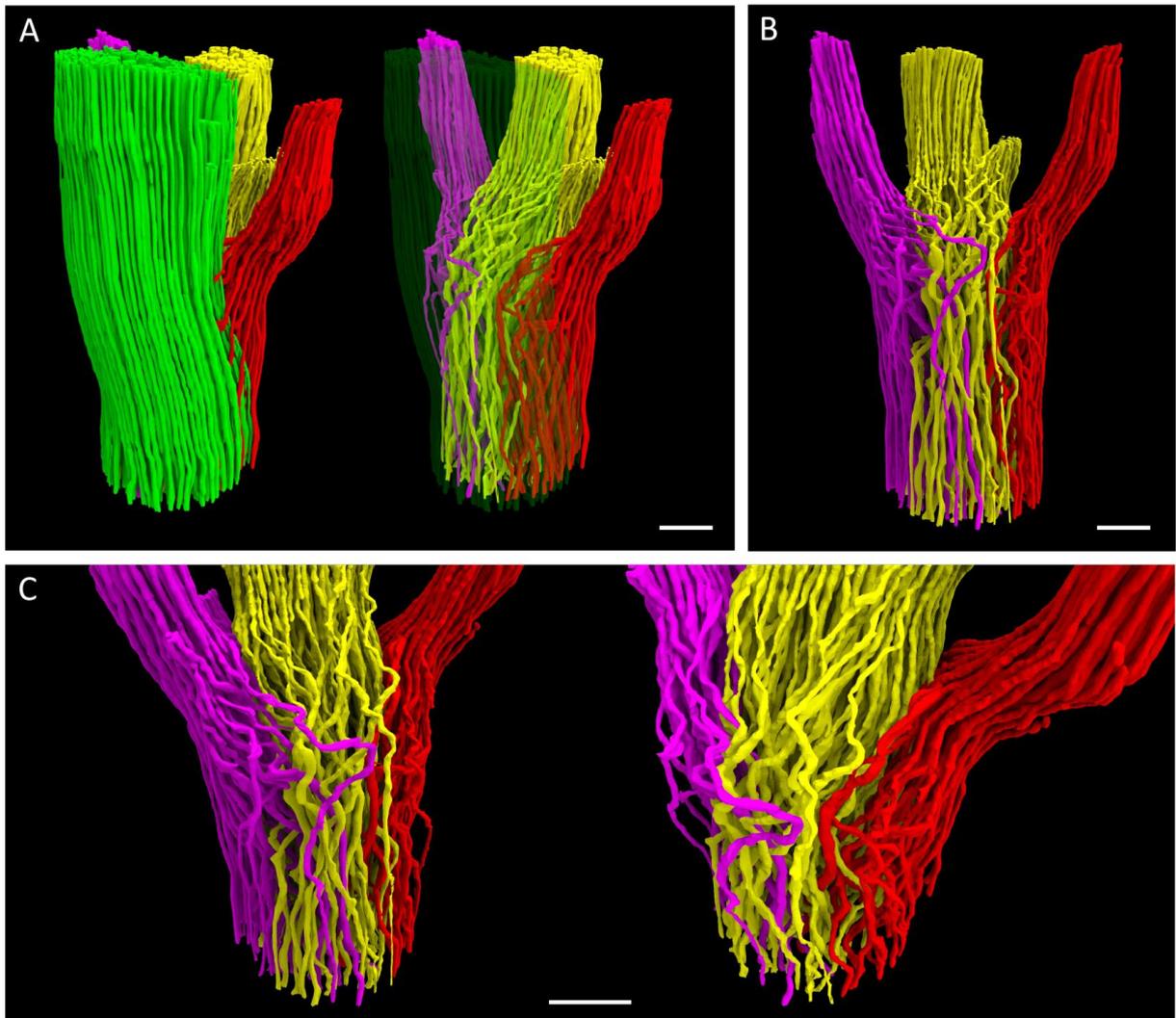
FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

Torna-se interessante destacar que a maioria dos feixes secundários mantém sua posição transversal relativa nos eixos secundários acerca de sua distribuição espalhada original no eixo primário (atactostelo). Desse modo, ao considerar um feixe originado em uma determinada posição do eixo principal, após sua movimentação e derivação para uma ramificação secundária, sua nova posição tenderá a ser relativamente semelhante à original, mesmo com

o entrelaçamento nos feixes principais. Após separados em novos eixos, na parte superior do nó (figura 31F), os elementos vasculares do eixo primário apresentam um espessamento significativo, de modo a aumentar sua dimensão transversal, particularmente nas regiões axilares do eixo principal (figura 31G). Este comportamento também é visto nas descrições estruturais da região nodal do bambu reportado por Liese e Tang (2015), e Shao e Wang (2018).

A reconstrução 3D dos feixes vasculares após a segmentação dos feixes é apresentada na figura 32. Ao esconder os feixes vasculares do eixo principal (figura 32A – em verde), os feixes dos eixos secundários (em roxo, amarelo e vermelho) podem ser vistos entrelaçando-se a esses. O movimento horizontal dos feixes secundários descritos com base nas fatias de  $\mu$ CT sequenciais pode ser mais bem observado na figura 32B.

Figura 32 – Reconstrução 3D dos feixes vasculares da região nodal do bambu. (A) feixes vasculares do eixo principal entrelaçando-se com os do eixo secundário; (B) feixes vasculares do eixo secundário apenas; e (C) detalhes da movimentação transversal dos feixes vasculares secundários. Barra de escala = 1 mm.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

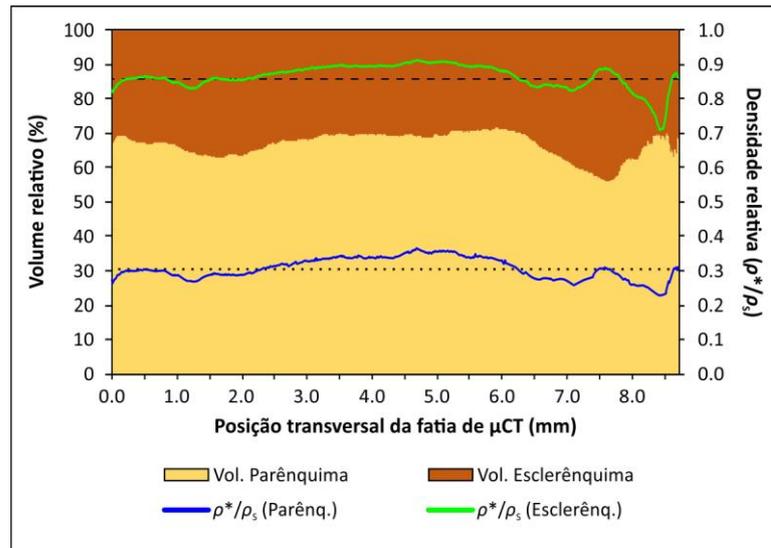
Ao se desenvolver verticalmente em novos ramos, os feixes também se movem na direção oposta ao seu respectivo eixo antes de ser dividido em uma nova ramificação. Tais características também podem ser observadas na figura 32C, com os espaços vazios referentes aos feixes vasculares do eixo principal, que foram escondidos. Apesar de não apresentarem um espaçamento de esclerênquima acima da região nodal, o entrelaçamento dos feixes vasculares secundários também sugere uma conexão de reforço com o eixo principal. Uma característica interessante observada é a continuidade dos ramos secundários da região basal até a ramificação, sem pontes (*bridges*) ou traços vasculares – como visto da figura 4, nos esquemas encontrados na literatura – conectando os eixos secundários com o primário. Tais estruturas desenvolvem-se nos entrenós, abaixo da região nodal (PALOMBINI *et al.*, 2016).

O volume total, a densidade relativa e a porosidade das regiões segmentadas do parênquima e do esclerênquima foram quantificadas. A relação desses valores com a posição de cada fatia transversal da  $\mu$ CT é apresentada na figura 33. O parênquima apresentou um volume absoluto de, aproximadamente,  $57,4 \text{ mm}^3$ , com uma densidade relativa média de 0,317 e, conseqüentemente, uma porosidade de 68,3%. Já o esclerênquima resultou em um volume absoluto de cerca de  $28,4 \text{ mm}^3$ , o qual pode ser dividido entre o eixo principal, com  $15,4 \text{ mm}^3$ , e os três eixos secundários, ou  $2,2 \text{ mm}^3$ ,  $7,5 \text{ mm}^3$  e  $3,3 \text{ mm}^3$ . Os tecidos também apresentaram uma densidade relativa de cerca de 0,860, resultando em uma porosidade de 14%, aproximadamente. Os valores encontrados foram, de modo geral, similares aos reportados na literatura (AMADA *et al.*, 1996; JANSSEN, 2000; PALOMBINI *et al.*, 2016).

De modo geral, a densidade relativa do parênquima e do esclerênquima segue um padrão similar da parte inferior à parte superior da amostra. Além disso, ao relacionar os dados da densidade relativa da figura 33 com as imagens sequenciais da figura 31, determinadas características de densidades dos tecidos do bambu podem ser listadas. O ligeiro aumento da densidade relativa após  $1 \text{ mm}$ , na região inferior do nó, diz respeito ao início do espalhamento dos feixes secundários em novos eixos, como visto nas figura 31 A e B. Então, a densidade relativa aumenta para ambos os tecidos até a posição da fatia atingir cerca de  $5 \text{ mm}$ , na parte superior do nó, e correspondendo às figura 31 D e. Tal comportamento indica que ao desenvolver novos feixes vasculares, as células do esclerênquima do bambu tendem a se espessarem, ou se tornarem mais lignificadas. Após a posição da fatia em  $7 \text{ mm}$ , após os eixos secundários destacarem-se do primário (figura 31F), um aumento no lume celular é observado, diminuindo a densidade relativa. Por fim, logo acima da região nodal (figura 31G), o espessa-

mento do esclerênquima no eixo principal resulta em um maior volume relativo e a uma maior densidade relativa, antes da posição das fatias em 8 mm. Isso pode sugerir um aumento na rigidez nesta região do bambu. O último aumento da densidade relativa após isto está relacionado ao final do posicionamento da amostra no campo de visão da  $\mu$ CT.

Figura 33 – Volume relativo (%) e densidade relativa ( $\rho^*/\rho_s$ ) do parênquima e do esclerênquima relacionado a cada posição da fatia transversal da  $\mu$ CT. As linhas tracejadas e pontilhadas representam os valores médios de  $\rho^*/\rho_s$  para o parênquima e o esclerênquima, respectivamente.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

### 3.2.2.2 Análise por Elementos Finitos

O processo de discretização do modelo 3D segmentado da região nodal do bambu focou na geometria dos feixes vasculares, principalmente representados pelo esclerênquima. O volume de preenchimento, correspondente ao parênquima, envolve o esclerênquima, seguindo os eixos primário e secundários. Devido ao seguimento de uma análise por elementos finitos não-linear, em que a carga de compressão máxima é avaliada, as bainhas de folhas e outras estruturas externas finas foram suprimidas do modelo 3D durante a segmentação. Isso foi seguido para evitar a marcação de tensões locais excessivas que poderiam subestimar a compressão máxima suportada (antes do escoamento), além de aumentar o número total de elementos e nós na malha, o que levaria a um requerimento ainda maior de recursos computacionais para a resolução da análise.

A figura 34 apresenta os resultados da etapa de discretização baseada na geometria do modelo da  $\mu$ CT. O modelo de montagem (figura 34A) foi dividido entre as partes relativas ao

parênquima e ao esclerênquima, mostrados em branco e verde, respectivamente, devido às cores originais do *software* Abaqus/CAE. A figura 34B apresenta os elementos do esclerênquima de maneira isolada, ao esconder o conjunto do parênquima, no *software*. Os contornos dos elementos da malha também foram escondidos nas figura 34 A e B, para auxiliar na visualização dos elementos constituintes.

Figura 34 – Processo de discretização para a FEA baseada na  $\mu$ CT: (A) modelo de montagem discretizado com as regiões do parênquima (branco) e esclerênquima (verde); (B) região do esclerênquima apenas, ao esconder os elementos de malha do parênquima; e (C) detalhe da malha de elementos tetraédricos da montagem. Os contornos dos elementos foram escondidos em A e B para melhor visualização.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

O modelo total da montagem consistiu em uma malha única de elementos tetraédricos do tipo *C3D4*, com aproximadamente 22 milhões de elementos e cerca de 3,6 milhões de nós (figura 34C). Dois materiais e seções foram definidos com base nos elementos do esclerênquima e do parênquima, sendo adicionados à malha. Uma malha fina, com elementos de tamanho uniforme, foi utilizada devido à geometria dos feixes do esclerênquima. Para evitar uma malha ainda mais refinada, como visto, os elementos vasculares do floema e do xilema

foram suprimidos. Tais detalhes iriam requerer um número consideravelmente maior de elementos na malha e, conseqüentemente, mais recursos computacionais.

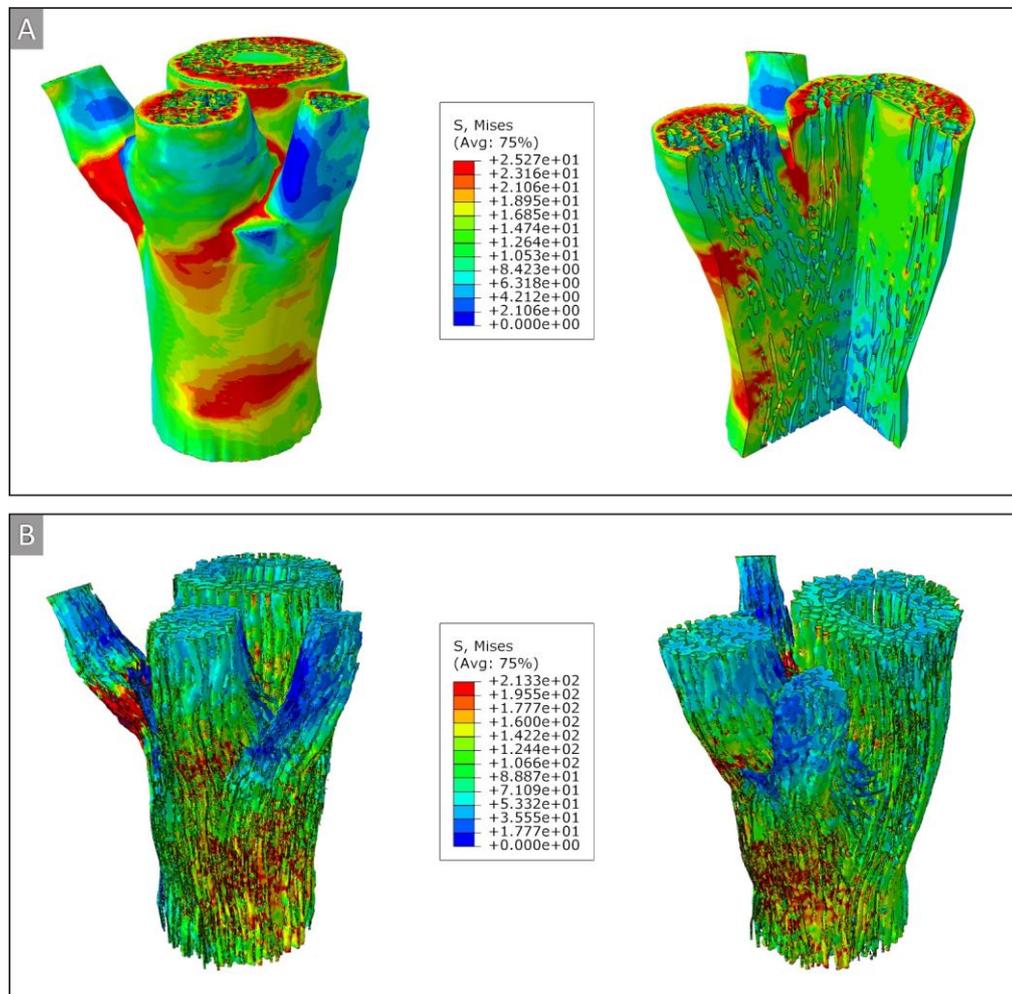
Utilizando as Eqs. (2 – 5) da fundamentação teórica, as propriedades constitutivas para o parênquima e o esclerênquima foram definidas com base nos dados de suas respectivas densidades relativas. O módulo elástico resultou em cerca de  $4,0 \text{ GPa}$  para o parênquima e  $34,2 \text{ GPa}$  para o esclerênquima, bem como  $25,3 \text{ MPa}$  e  $213,3 \text{ MPa}$  para seus respectivos valores de resistência à compressão. Uma vez que a orientação dos feixes do esclerênquima na geometria foi definida pela distribuição dos elementos na malha, o tecido já apresentava uma configuração delgada, como uma fibra. Portanto, ambos os materiais foram definidos como isotrópicos utilizando as propriedades mecânicas acima.

A tensão inicial total de  $100 \text{ MPa}$  aplicada no modelo apresentou um incremento de carga (*load increment*) máximo de  $0,6207$  e, para valores maiores, não houve convergência na FEA. Em seguida, uma segunda análise foi realizada, ajustando a carga ao valor reportado pelo incremento máximo. O modelo convergiu, então, para uma tensão de compressão axial máxima de, aproximadamente,  $62 \text{ MPa}$ . O resultado encontra-se na mesma magnitude daqueles na literatura para ensaios físicos com *B. tuldoides*. Por exemplo, Colli *et al.* (2007) encontraram valores de resistência à compressão variando de  $46 \text{ MPa}$  até cerca de  $72 \text{ MPa}$  para amostras localizadas em regiões nodais, da base ao topo do colmo. Já Nascimento *et al.* (2002) encontraram valores de compressão de  $65,8 \text{ MPa}$  a  $88,2 \text{ MPa}$ . Por outro lado, os dados de But e Chia (1997) reportam valores de compressão por volta de  $30 \text{ MPa}$  na região nodal, e Janssen (1991) reportou valores variando entre  $27 \text{ MPa}$  a  $43 \text{ MPa}$ . Contudo, essa variação não é surpreendente e pode ser esperada devido à variabilidade natural do bambu, bem como a diversos fatores controlados, tais como o nível de maturidade da amostra e sua posição no colmo, os protocolos de coleta e secagem, entre outros (LIESE, 1998; NIKLAS, 1992; PALOMBINI *et al.*, 2016). Desse modo, em FEA baseada em  $\mu\text{CT}$  de plantas, os resultados qualitativos da análise podem ser considerados de igual importância, em termos de investigar o comportamento mecânico complexo da amostra.

Os resultados das tensões von Mises correspondentes à carga de compressão máxima para a convergência da FEA são apresentados na figura 35. Devido a diferenças na amplitude dos valores das legendas para as tensões dos conjuntos de elementos do parênquima e do esclerênquima (os quais são automaticamente recalculados com base em seus respectivos valores limitantes de  $\sigma_p$  e  $\sigma_{sc}$ ) bem como para uma melhor visualização, os tecidos foram

apresentados separadamente. O modelo do parênquima isolado e sua vista em corte são vistos na figura 35A. As zonas de maior tensão são encontradas, principalmente, nas regiões inferiores de ramificação dos eixos secundários, além de na face superior da montagem, onde a carga de compressão foi aplicada. Os eixos secundários também foram mais tensionados nas regiões de conexão com outros ramos. Apesar de possuir uma quantidade considerável de feixes de esclerênquima, contudo, a região interna da parte inferior da amostra apresentou baixos valores de tensão.

Figura 35 – Resultados das tensões von Mises na compressão máxima: (A) elementos do parênquima apenas, e vista em corte longitudinal; (B) elementos do esclerênquima apenas, e vista em corte longitudinal.



FONTE: Adaptado de Palombini *et al.* (2020c).

Apesar de ativar diversos feixes esclerenquimáticos de reforço em todos os eixos (figura 35B), o parênquima apresentou-se como uma região de menores tensões no eixo primário. Além de dissipar as tensões de compressão ao longo da amostra inteira e, então, mecanicamente atuar como uma matriz celular, em uma analogia a compósitos (DIXON *et al.*, 2018;

PALOMBINI *et al.*, 2016), tal comportamento indica uma tendência para o parênquima de preservar seu eixo principal. Mesmo com uma distribuição uniforme da tensão de compressão, com a maioria das regiões tensionadas concentradas nos eixos secundários, é possível inferir que a planta tenderia a proteger os seus meristemas intercalar (*intercalar meristema* ou IM) e apical caulinar (*shoot apical meristema* ou SAM), como detalhados no esquema da figura 27. Ainda que cada ramo também possua IM e SAM, no eixo principal estes meristemas possuem um controle dominante responsável pela arquitetura da planta (KERSTETTER, 1997). Além disso, o espessamento dos feixes de esclerênquima na porção superior do eixo primário, sendo observado nas imagens de  $\mu$ CT e nos dados da densidade relativa, representam que essa região era mais velha que as porções ramificadas e, então, receberam deposições adicionais de parede celular secundária. Além disso, o controle dominante do eixo principal representa um esforço para a planta em aumentar sua resistência naquela região; com áreas transversais maiores nos feixes, a distribuição das tensões von Mises tende a ser relativamente menores (BOYD, 2009a; MORTENSEN, 2007), como visto nos resultados.

Os resultados sobre o papel mecânico dos nós no bambu corroboram com aqueles reportados por Shao e Wang (2018) e Zou *et al.* (2016), uma vez que tais regiões aumentaram a dissipação das tensões e reforçaram, de um modo geral, o colmo durante cargas de compressão. De maneira similar às conclusões de Taylor *et al.* (2015), relacionadas à evolução dos nós do bambu para prevenir falha na proximidade dos ramos, os resultados sugerem que a planta tende a preservar o eixo primário em cargas de compressão, conduzindo tensões maiores aos ramos secundários. Biologicamente, tal comportamento permitiria o desenvolvimento de estruturas laterais, tais como ramos e folhas, sem comprometer a resistência do eixo principal (FAHN, 1990). Além disso, o espalhamento longitudinal e transversal dos feixes vasculares no nó, além do espessamento do esclerênquima também estão de acordo com a fundamentação teórica (LIESE; TANG, 2015; SHAO; WANG, 2018), mas não sua origem, como demonstrada no modelo em 3D. Por outro lado, destaca-se que algumas características reportadas na fundamentação, acerca do arranjo 3D dos feixes vasculares na região nodal não foram observados na reconstrução em  $\mu$ CT. Particularmente, a presença de pontes vasculares e anastomoses de ramos no diafragma (DING; LIESE, 1997) foram observadas apenas abaixo da região nodal (PALOMBINI *et al.*, 2016). Assim, novamente, tal configuração também pode representar um modo para a planta proteger tecidos de desenvolvimento considerados mais importantes tais como os meristemas intercalar e caulinar (KERSTETTER, 1997; MCCLURE, 1966). Por fim, a

configuração de entrelaçamento dos feixes de fibras também pode ser explorada em projetos de biônica baseados no bambu (LIU *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2008) ao induzir a distribuição de tensões em regiões de interesse e ao preservar determinada regiões.

### 3.3 Análise térmica do papel da água na inflorescência-tanque de bromélia

Determinadas espécies de bromélias evoluíram com modificações de grande importância em sua estrutura, conhecidas como inovações-chave (*key-innovations*), que foram responsáveis pela conquista de territórios com condições ambientais diversas (SILVESTRO; ZIZKA; SCHULTE, 2014). Uma dessas características é o desenvolvimento de tanques biológicos – em Bromeliaceae trata-se de uma inflorescência-tanque – que, com o acúmulo de água, pode estar relacionada com uma proteção térmica à planta (NOGUEIRA, 2017). O presente estudo de caso trata da investigação do papel da água na inflorescência-tanque de bromélia, com vistas à sua influência na temperatura interna da planta. O estudo foi conduzido por meio de cooperação com a Dra. Fernanda Mayara Nogueira (LAVeg/UFRGS), a qual realizou as análises experimentais, sendo as análises numéricas conduzidas pelo autor desta tese (NOGUEIRA *et al.*, 2019). Dois grupos de indivíduos foram mantidos em condições iguais, mas sendo um com ausência de água no seu tanque da inflorescência e outro em condições normais. Um exemplar foi digitalizado via  $\mu$ CT e discretizado, utilizando método baseado na geometria. Então, duas análises por FE foram conduzidas, com o modo de transferência de calor, em cenários correspondendo à presença e à ausência de água em seu interior.

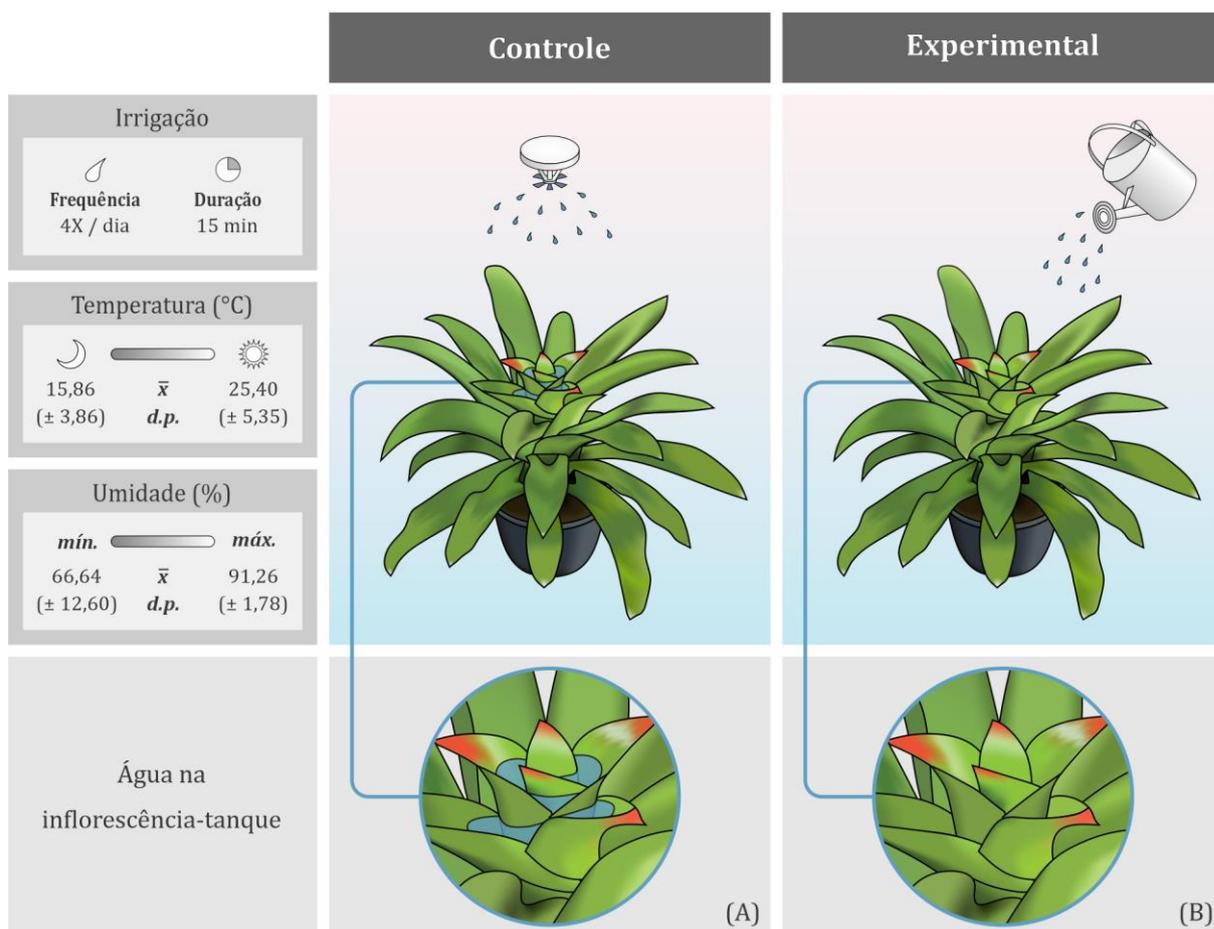
#### 3.3.1 Materiais e métodos

##### 3.3.1.1 Amostra e preparação

Indivíduos de *Nidularium innocentii* foram coletados no campo e mantidos na Coleção Viva do Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg/UFRGS). Vinte e quatro indivíduos foram analisados durante o desenvolvimento da inflorescência de modo a serem realizadas medições do desenvolvimento de flores em dois grupos distintos, correspondendo à fase experimental. Já outro indivíduo foi preparado para execução da digitalização por  $\mu$ CT e da FEA por transferência de calor, correspondendo à fase numérica. A fase experimental foi conduzida durante cinco meses, sendo correspondente ao período de floração da espécie – do início do

desenvolvimento da inflorescência até a antese<sup>26</sup>. Os indivíduos analisados foram divididos entre dois grupos em duas casas de vegetação com controle de irrigação de água (figura 36).

Figura 36 – Esquema para o método experimental. O grupo controle foi irrigado automaticamente e a água foi fornecida no solo, nas folhas e no tanque (A). O grupo experimental foi irrigado manualmente e a água foi fornecida no solo e nas folhas, mas a inflorescência-tanque foi mantida seca (B). A mesma frequência e duração da irrigação, tal como as mesmas condições ambientais de temperatura e umidade foram seguidas para ambos os grupos. Os valores mínimos e máximos, bem como médias ( $\bar{x}$ ) e desvios-padrão (*d.p.*) apresentados para a temperatura e umidade correspondem ao total do experimento.



FONTE: Adaptado de Nogueira *et al.* (2019).

A temperatura e a umidade foram registradas com um *datalogger*. No primeiro grupo, chamado de controle (figura 36A), doze indivíduos foram mantidos com fornecimento de água no solo, nas folhas e na inflorescência-tanque, com irrigação automática de 4 × ao dia, com duração de 15 *min*. No segundo grupo, chamado de experimental (figura 36B), doze indivíduos também foram mantidos durante o tempo de floração com fornecimento de água no solo e folhas, mas não na inflorescência-tanque. Nesse grupo a irrigação foi realizada de modo

<sup>26</sup> Antese é o florescimento ou o período respectivo ao abrir do botão da flor (FONT QUER, 1965).

manual, também 4 × ao dia e com duração de 15 *min*, mas com a água colocada diretamente nas folhas e no solo. Após a antese das primeiras flores, foram conduzidas medições gerais em exemplares de cada inflorescência, para ambos os grupos.

Na fase numérica, o indivíduo foi coletado no início do desenvolvimento e fixado segundo a metodologia apresentada por Nogueira (2017), com base em Mcdowell e Trump (1976) e modificada de Hayat (2000). Tratando-se de um material em estágio inicial de desenvolvimento, seus tecidos apresentam baixos níveis de contraste. Sendo assim, após a lavagem, a amostra foi submersa em ácido fosfotúngstico (PTA) a 1% e FAA a 50% por 28 dias, com a solução sendo substituída a cada 7 dias (HAYAT, 2000). Como visto, o PTA aproveita-se das propriedades do tungstênio de penetração em tecidos para aumentar a densidade de regiões específicas da amostra, mantendo sua integridade (STAEDLER; MASSON; SCHÖNENBERGER, 2013). A amostra foi, então, lavada com abundância em tampão de fosfato de sódio a 0,1 M, com *pH* 7,2. Por fim, o material foi desidratado em acetona e secado utilizando ponto crítico<sup>27</sup> (GERSTERBERGER; LEINS, 1978).

### 3.3.1.2 Microtomografia de Raios X

A amostra foi digitalizada no equipamento de  $\mu$ CT SkyScan® 1172 (Bruker-microCT®, Kontich, Bélgica), localizado no Laboratório de Física Nuclear Aplicada do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, composto por magnificação geométrica apenas. Devido ao protocolo de aumento de contraste, com amostras de regiões mais densas, optou-se por utilizar valores de tensão mais baixo e de corrente mais alto, sendo 74 *kV* e 133  $\mu$ A, respectivamente, para manter uma potência da fonte por volta de 9,8 *W*. O tempo de exposição foi definido em 1700 *ms* e nenhum filtro de radiação foi utilizado. Devido ao tamanho da amostra, novamente, duas aquisições foram realizadas, sendo na parte inferior e na superior, sendo combinadas pelo algoritmo proprietário do equipamento e exportadas, resultando em uma pilha de imagens de 1840 fatias com um tamanho de *voxel* de 1,991  $\mu$ m.

A pilha de imagens foi importada no Fiji (SCHINDELIN et al., 2012) tanto para os ajustes iniciais de brilho e contraste, quanto para as demais operações. Em seguida a pilha foi ajustada com o filtro de redução de ruído *Sigma Plus* (GONZALEZ; WOODS, 2008; PALOMBINI et al.,

---

<sup>27</sup> A técnica de ponto crítico é utilizada para secar amostras, sobretudo para observação em microscopia eletrônica de varredura, consistindo na transformação da fase líquida em gasosa (GOLDSTEIN et al., 2003).

2016) e a segmentação baseada na geometria foi realizada com o *plugin Segmentation Editor*. Duas máscaras binárias foram criadas, sendo o primeiro o material da amostra em si (tecido vegetal) e o segundo o seu ambiente interno, correspondendo à região interna do tanque. Por fim, as malhas foram exportadas como superfície 3D em arquivo STL binário.

### 3.3.1.3 Análise térmica por Elementos Finitos

As malhas superficiais em formato STL, do mesmo modo como no primeiro estudo de caso, foram previamente ajustadas com o *software* de licença gratuita Netfabb Basic (Netfabb GmbH, Lupburg, Alemanha), utilizando *scripts* de reparo do aplicativo. Em seguida, foi utilizado o *software* gratuito Gmsh (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009) para geração e exportação de malhas volumétricas. A malha foi ajustada de modo a incluir elementos de tamanho variável, com o objetivo de reduzir o número total de elementos e, assim, reduzir a quantidade de recursos computacionais necessários para a análise. As malhas foram exportadas em arquivo de extensão INP, para o *software* de FEA Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia® Corp., Providence, RI, EUA). É importante destacar que o *software* Gmsh utilizou elementos tetraédricos do tipo *C3D4*, os quais são incompatíveis com o módulo de transferência de calor (*heat transfer*) no *software* Abaqus/CAE. Portanto, os arquivos INP tiveram que ser ajustados em um editor de texto convencional para transformar a designação dos elementos para *DC3D4*; este tipo é também tetraédrico e essencialmente idêntico ao tipo *C3D4*, porém é adaptado para análises de transferência de calor no *software*.

Os arquivos INP das malhas volumétricas foram abertos no Abaqus/CAE para a realização de duas análises de transferência de calor, com o objetivo de comparar o ambiente da planta, definindo-o como água ou ar. Diferentes propriedades termofísicas foram aplicadas a cada instância, sendo adaptadas da literatura, como apresentado na tabela 2. As propriedades de condutividade térmica, calor específico e densidade para o material vegetal foram adaptadas de resultados gerais de análises fototérmicas de diversos tipos de folhas apresentadas por Jayalakshmy e Philip (2010). Ainda que não sejam especificamente obtidas para *N. innocentii*, tais valores representam uma estimativa das propriedades reais para a planta. Além disso, como o objetivo era avaliar a variável ambiental no sistema (sendo água ou ar), a necessidade de propriedades exatas para a planta torna-se menos relevante. Como a malha foi exportada utilizando escala em milímetros, as propriedades constitutivas atribuídas foram adaptadas em

termos das unidades originais do SI, as quais utilizam as grandezas em metros. Da mesma forma, as temperaturas foram substituídas de Kelvin para graus Célsius, e a temperatura do zero absoluto foi definida no *software* com o valor de  $-273,15$ .

Tabela 2 – Propriedades termofísicas relacionadas a análise de transferência de calor.

<b>Material</b>	<b>Condutividade térmica (<math>W/mm^{\circ}C</math>)</b>	<b>Calor específico (<math>J/kg^{\circ}C</math>)</b>	<b>Densidade (<math>kg/mm^3</math>)</b>
Água	6,00E-04	4,19E+03	1,00E-06
Ar	2,00E-05	1,01E+03	1,10E-09
Tecido vegetal	3,00E-04	2,20E+03	6,90E-07

FONTE: Adaptado de Jayalakshmy e Philip (2010).

Foram criados dois passos (*steps*) no Abaqus/CAE para a análise de transferência de calor, sendo um estado estacionário (*Steady-State*) e a um transiente (*Transient*). O primeiro estabelece uma temperatura homogênea inicial para todo o modelo, com uma duração de 1 s. O segundo passo representa a aplicação de um calor ambiental durante 24 h, correspondendo a um período (*Time period*) de 86.400 s, definidos em incrementos de 1 h, ou 3.600 s. Uma temperatura uniforme foi aplicada como condição de contorno nos nós exteriores da face superior do modelo, com uma magnitude de 1. Para simular uma evolução gradiente de aumento e diminuição de temperatura externa, foi definida uma amplitude durante o tempo total da análise, utilizando a opção do tipo suave (*smooth*). Os valores inferiores e superiores da amplitude foram baseados nas médias das temperaturas mínimas e máximas registradas diariamente, durante o teste experimental (figura 36). Portanto, no início da transferência de calor, no tempo do passo  $t = 0$ , e ao término, no tempo do passo  $t = 86.400$ , a amplitude foi ajustada como 15,86 °C (a média das temperaturas mínimas) e, ao meio da análise, ao tempo de passo  $t = 43.200$ , a amplitude foi definida como 25,40 °C (a média das máximas).

Diferentes propriedades de interação térmica foram criadas e definidas no passo transiente para cada análise, representando a inflorescência-tanque preenchida por água e ar, simulando os ensaios do grupo de controle e experimental, respectivamente. Para o ambiente preenchido por água, uma condição de filme superficial (*surface film condition*) de  $6,05 \times 10^{-5} W/mm^2 \text{ }^{\circ}C$  foi definida entre os nós da planta que estavam em contato com a água, e uma condição de filme de  $1,5 \times 10^{-5} W/mm^2 \text{ }^{\circ}C$  para os nós das superfícies externas da montagem. Tais condições representam os valores gerais de coeficientes de transferência de calor livre por convecção da água e do ar, respectivamente (KREITH; BLACK, 1980).

Quanto ao modelo com ambiente do tanque preenchido por ar, a mesma condição de filme de  $1,5 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  foi definida para os nós em contato com a planta e com o ambiente externo da amostra, representando a convecção livre para o ar. Já os demais nós não foram afetados por estas propriedades de interação, representando, assim, uma transferência de calor natural entre cada material bem como uma perda de calor para o ambiente, seja no cenário de preenchimento do tanque por água ou por ar.

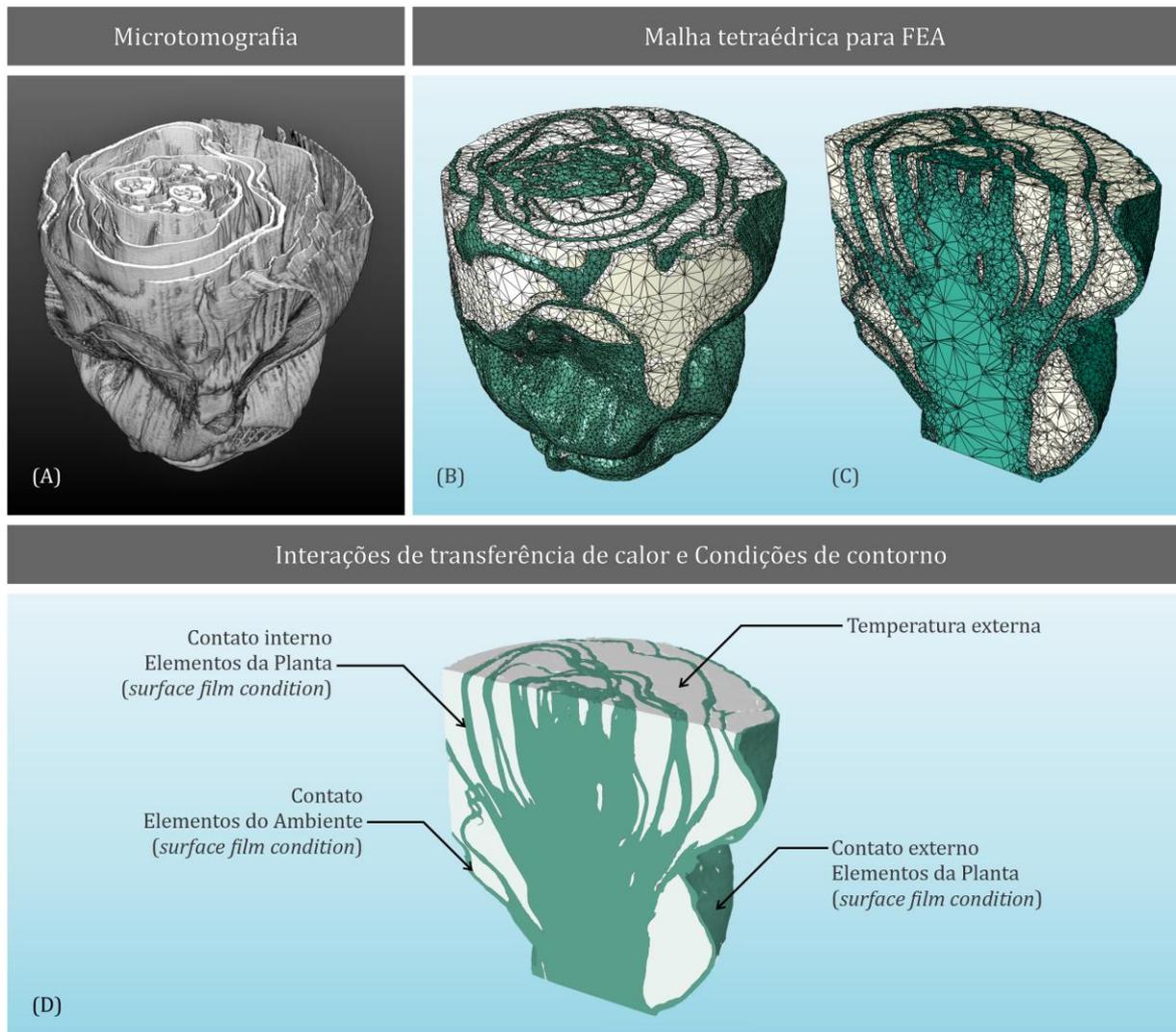
### 3.3.2 Resultados

No grupo experimental, o qual não possuía água na inflorescência-tanque, um dos indivíduos não floresceu, já os demais indivíduos atingiram a antese. Foi verificado que apesar do número de ramificações nas inflorescências não apresentar diferença estatística entre o grupo experimental e o controle, as dimensões das flores foram significativamente maiores no segundo grupo. Os indivíduos do grupo de controle não apresentaram nenhum dano ou características incomuns nos componentes da inflorescência durante o tempo do experimento. Já as plantas do grupo experimental apresentaram diversas características de destaque. Por exemplo, um atributo comum foi a ocorrência de danos nos componentes da inflorescência, especialmente as folhas. As brácteas apresentaram danos longitudinais, segundo o arranjo vascular do tecido, tanto na florescência principal quanto nas ramificações. Ainda, o indivíduo que não atingiu a antese apresentou necroses nos ápices das inflorescências e em sua extensão, bem como nos botões florais.

Quanto à fase numérica, a figura 37 apresenta os resultados do processo de discretização a partir do modelo 3D da  $\mu\text{CT}$ . O modelo 3D original da  $\mu\text{CT}$  da inflorescência-tanque (figura 37A) foi transformado em malha volumétrica tetraédrica (figura 37B), consistindo em cerca de 730.000 elementos do tipo  $DC3D4$ , e por volta de 210.000 nós. A figura 37C apresenta uma vista em corte longitudinal da malha, apresentando os elementos tetraédricos de tamanho variado. A montagem consistiu em elementos para a região da planta, apresentados em verde, e do ambiente do tanque, em branco. Desse modo, para cada FEA de transferência de calor realizada, o material do ambiente do interior do tanque era ajustado para corresponder ao material tanto de água quanto de ar, como nos grupos de controle e experimental, respectivamente. A figura 37D apresenta as interações e as condições de contorno adicionadas ao modelo, em que condições de filme superficial (*surface film condition*) indicam as rela-

ções entre as regiões sólidas adjacentes. Diferentes condições de filme foram atribuídas aos elementos de contato externo e interno da região da planta, de acordo com as relações de convecção de água e ar, conforme o ambiente avaliado em cada análise. De maneira similar, foram atribuídas as mesmas condições de filme superficial relacionadas ao ar e à água aos elementos de contato da região do ambiente. A região do volume do tanque foi calculada pelo Abaqus/CAE e resultou em cerca de  $138 \text{ mm}^3$ ; já a região sólida do material vegetal resultou em  $57 \text{ mm}^3$  em volume, aproximadamente.

Figura 37 – Método de discretização para a análise de transferência de calor: (A) modelo 3D da  $\mu\text{CT}$  da inflorescência-tanque; (B) malha tetraédrica da montagem; e (C) vista em corte longitudinal da malha, com as regiões da planta (verde) e do ambiente do tanque (branco); (D) vista em corte longitudinal da montagem (sem contornos da malha), mostrando as condições de contorno e de interação aplicadas nas regiões da planta e do ambiente.



FONTE: Adaptado de Nogueira *et al.* (2019).

Os resultados da análise de transferência de calor, comparando a influência da água ou

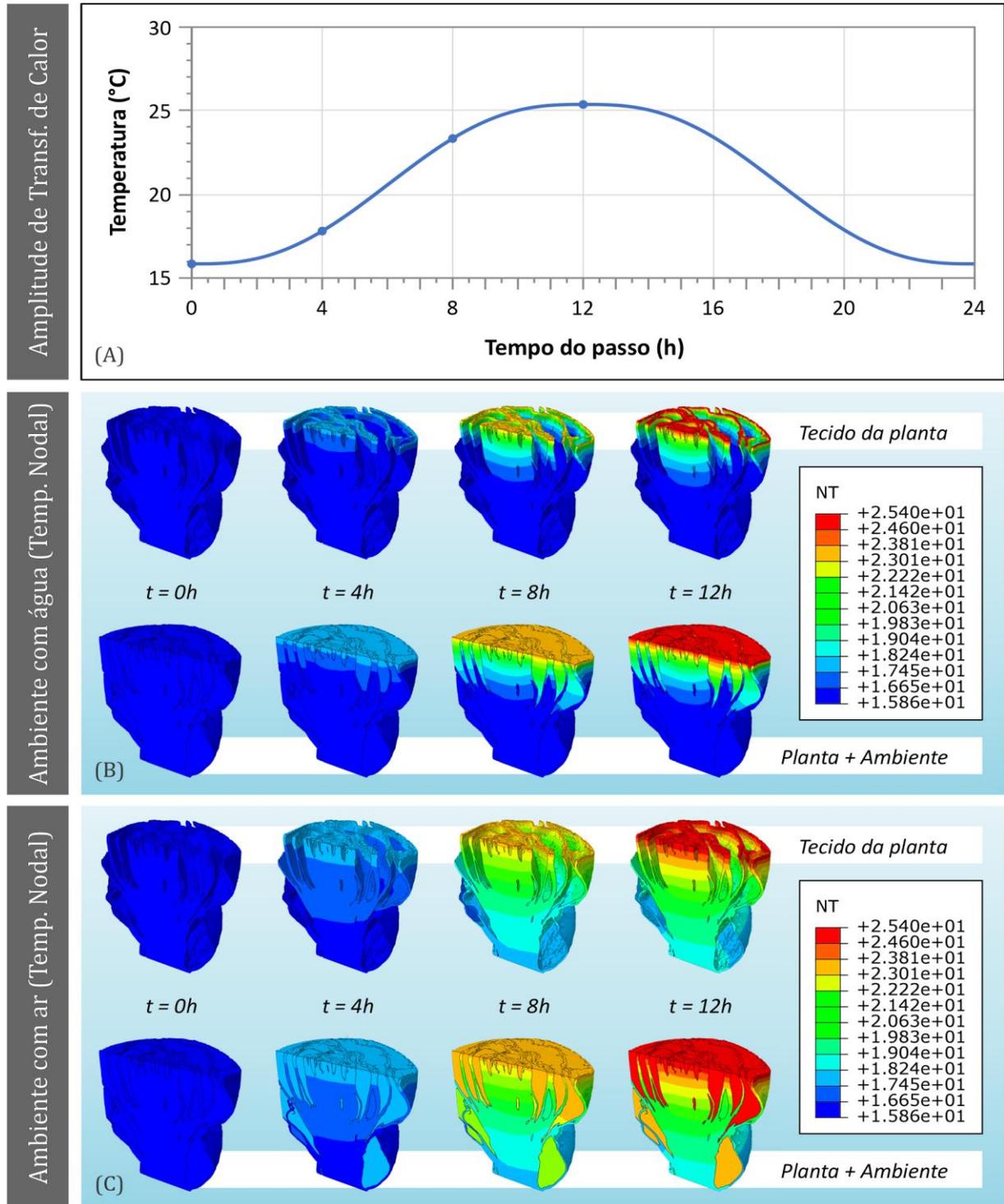
do ar na inflorescência-tanque são vistos na figura 38. A amplitude da transferência de calor reproduziu um efeito de aquecimento e resfriamento suavizado no modelo da montagem, durante o tempo total do passo de 24 *h* (figura 38A).

A análise com a água e o ar, como visto nas figura 38B e C, respectivamente, foram comparadas em quatro estágios de tempo do passo: 0 *h*, 4 *h*, 8 *h* e 12 *h*. Dois resultados são mostrados para cada estágio de tempo e para cada análise realizada (com água e com ar), com visualização em corte longitudinal. A linha superior de cada análise representa a geometria do material do tecido da planta, apenas, escondendo a geometria do ambiente. Já a linha inferior inclui o modelo completo da análise, tanto com o material da planta quanto com o volume representativo do interior do tanque. As análises de transferência de calor são apresentadas em termos da temperatura nodal referente (*NT11*), utilizando a escala padrão retornada pelo Abaqus/CAE. A legenda apresenta valores limitantes correspondentes à amplitude definida na análise, ou seja, variando de 15,86 °C até 25,40 °C. As linhas de contorno dos elementos tetraédricos da malha foram escondidas para facilitar a visualização e comparação do gradiente de cores da temperatura nodal para cada modelo. Uma vez que a análise de transferência de calor foi modelada de maneira linear, as temperaturas nodais representam valores instantâneos para cada medição de tempo do passo realizada. Desse modo, os resultados dos tempos do passo relativos à fase de decréscimo da temperatura, variando entre 12 *h* e 24 *h*, são inversamente idênticos à fase de aumento, entre 0 *h* e 12 *h*, portanto não foram exibidos. No tempo de passo de 14.400 *s* (ou 4 *h*), tanto o modelo da planta quanto o da montagem apresentam pouca diferença de aquecimento. Porém, o modelo com o ambiente definido como ar apresenta um aquecimento mais rápido, mesmo em regiões mais inferiores. No tempo de 28.800 *s* (ou 8 *h*), quase todos os elementos da geometria da planta tiveram suas temperaturas aumentadas em alguns graus, no modelo com ar. Já no tempo de 43.200 *s* (ou 12 *h*), o modelo da planta e da montagem, no ambiente com água, não apresentou um aumento significativo da temperatura, à exceção dos elementos superiores. Já no ambiente com ar, quase todos os elementos estabilizaram na temperatura externa definida de 25,40 °C.

Para verificar o comportamento da transferência de temperatura no eixo principal e nas ramificações secundárias do modelo da inflorescência, pontos específicos foram selecionados durante os tempos do passo de aquecimento (figura 39). Os pontos selecionados estão localizados na base de diferentes ramos na inflorescência (figura 39A). Os pontos “A” e “B” correspondem à antera e ao ovário, respectivamente, localizados na florescência principal e na re-

gião distal madura mais superior; “C” corresponde a uma ramificação distal axilar; “D” e “F” são pontos de ramos maduros intermediários; já “E” corresponde a um ramo jovem proximal.

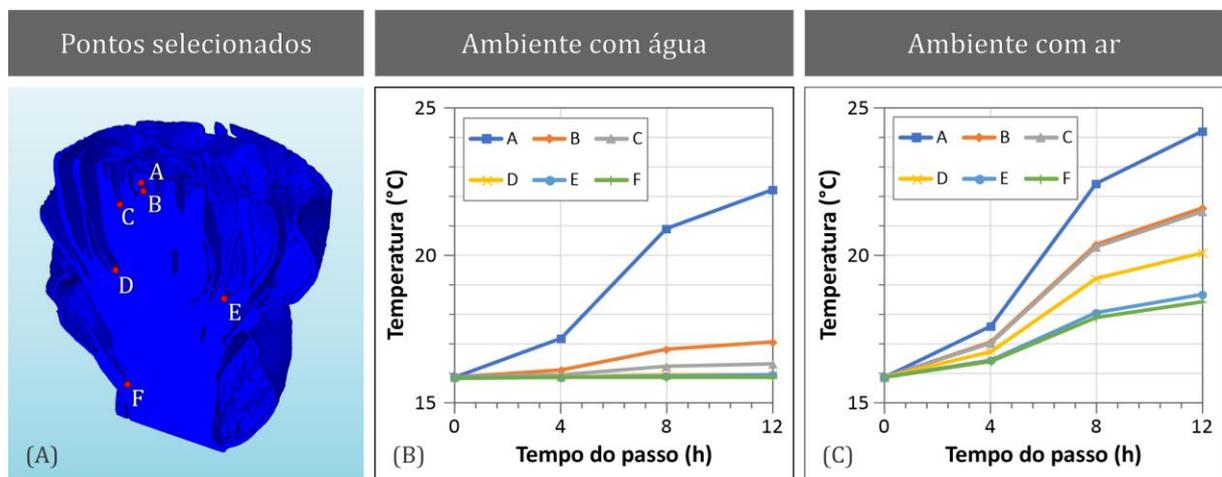
Figura 38 – Resultado da análise de transferência de calor: (A) amplitude da temperatura durante o passo da análise; visualização em corte longitudinal das temperaturas nodais para o modelo preenchido por (B) água e (C) ar. São apresentados os tempos do passo de 0 h, 4 h, 8 h e 12 h, com resultados divididos entre o tecido da planta, apenas, e a montagem incluindo o ambiente.



FONTE: Adaptado de Nogueira *et al.* (2019).

O desenvolvimento da temperatura nos pontos selecionados para o ambiente com água e com ar são vistos respectivamente nas figura 39 B e C. Com relação ao ambiente com água, os pontos C e F apresentaram um aumento médio na temperatura de 1,1% no tempo do passo de 12 h, ou apenas 0,7% de aumento no tempo total de aquecimento (4 h – 12 h), com relação à temperatura inicial de 15,86 °C. Quanto aos pontos A e B, mais próximos do tipo do modelo de montagem, a temperatura registrou um aumento de 40,2% e 7,6%, respectivamente, para o tempo do passo de 12 h. Por outro lado, a análise do ambiente com ar apresentou um aumento mais significativo da temperatura. Ao tempo de 12 h, enquanto a temperatura do ponto F aumentou 16,3%, os pontos D e E aumentaram 26,7% e 17,7%, respectivamente, enquanto os pontos B e C, cerca de 36,1% e 35,5%, respectivamente. Ainda que quase atingindo a temperatura externa total de 25,40 °C, o ponto A registrou temperatura de 52,5% mais alta que a original, respectivamente. Em termos relativos, todos os pontos analisados do ambiente com ar atingiram um aumento máximo de 20,9% ( $\pm 8,4\%$ ) no tempo de 12 h quando comparados com o cenário com água.

Figura 39 – Resultados da transferência de calor: (A) seleção de pontos específicos (A – F) próximos a ramos distintos; e temperatura nodal para os pontos selecionados durante os tempos do passo de 0 h, 4 h, 8 h e 12 h, para a inflorescência com ambiente de (B) água e (C) ar.



FONTE: Adaptado de Nogueira *et al.* (2019).

### 3.3.3 Discussão

Diversas características evolutivas são encontradas em plantas terrestres que contribuíram para seu desenvolvimento e reprodução, sob diversas condições ambientais. A exemplo, encontra-se *N. innocentii*, com uma distribuição ao longo da Mata Atlântica, majoritariamente

em regiões costeiras e com grande amplitude de elevação (LEME, 2000; NOGUEIRA, 2017). Para combater diferentes fatores de estresse, mecanismos foram desenvolvidos pelas plantas para responder condições não favoráveis (ATKINSON; URWIN, 2012). Com as análises realizadas neste estudo de caso foi possível verificar um destes mecanismos, o qual representado pelo papel da água na inflorescência-tanque da espécie. De modo geral, os resultados levaram a dois pontos principais: (1) a ausência de água no tanque leva a respostas de estresse biológico na planta; e (2) que a sua morfologia contribui para menores variações térmicas. Os órgãos reprodutivos dependem de nutrientes, como água e produtos fotossintéticos, sem a presença desses nutrientes, é iniciada uma série de respostas fisiológicas (BARNABÁS; JÄGER; FEHÉR, 2007). Contudo, no grupo experimental, mesmo com a inclusão de água no solo e nas folhas, este comportamento foi observado – com a presença de necroses e lesões, indicando um papel específico da água no tanque, diferentemente da hidratação do indivíduo.

Com relação aos resultados da modelagem numérica, nota-se que as partes distais da inflorescência foram as mais afetadas pela oscilação na temperatura. No modelo com o ambiente de ar, os pontos distais aumentaram a temperatura em cerca de 53% no período de 12 h. Já no modelo com água, dos pontos intermediários aos mais proximais a temperatura aumentou menos de 1% no mesmo período. Este efeito deu-se principalmente pelo fato de a água agir como uma proteção térmica para a região, evitando grandes variações de temperatura. Apesar de possuir uma maior condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor por convecção que o ar, a água também apresenta um calor específico muito maior, com relação a um mesmo volume. Isso significa que a água necessita de mais energia para aumentar sua temperatura em uma região particular que o ar. Considerando o volume do tanque medido de *N. innocentii*, próximo ao resultado da literatura de cerca de  $150 \text{ mm}^3$  (NOGUEIRA *et al.*, 2017), essa diferença representaria uma energia térmica necessária (avaliada em Joules) aproximadamente 4 milhões de vezes maior para aumentar sua temperatura em 1 °C.

No presente estudo de caso foi possível utilizar a geometria original da amostra de *N. innocentii* obtida por  $\mu\text{CT}$  para a execução das análises, apresentando um desempenho de regulador térmico significativo para a água. Mesmo que as propriedades termofísicas atribuídas para o material vegetal não correspondam exatamente às da espécie, elas não fariam diferença significativa na sua relação com a água e o ar – referentes aos valores dos coeficientes de transferência por convecção livre. Uma vez que o propósito da análise foi o de avaliar a influência desses meios em uma geometria precisa e com condições de contorno realistas, as

propriedades constitutivas da planta foram definidas apenas para mantê-las em um nível de grandeza similar ao esperado – sendo diferente de outros materiais, tais como concreto, aço, polímeros etc. Portanto, mesmo que outras propriedades sejam utilizadas no material da planta, não seria esperada mudanças significativas nos resultados.

Como visto, a união das técnicas de FEA e  $\mu$ CT permite diferentes tipos de investigações, incluindo análises de transferência de calor. Este tipo de abordagem já foi empregado em materiais sintéticos e de engenharia, tais como espumas de célula aberta feitas de alumínio (AMANI *et al.*, 2018a) e carbetos de silício (FAN *et al.*, 2016). Contudo, seu uso em amostras biológicas era considerado desconhecido na literatura. Desse modo, esse estudo apresenta a primeira aplicação desse tipo de análise, não apenas para uma planta, mas para um material biológico de modo geral, incluindo os de natureza biomédica.

A utilização de protocolos de contraste foi interessante para aumentar a identificação de tecidos de baixa densidade da amostra frente a seu ambiente. Tratando-se de um equipamento de  $\mu$ CT que não possui mecanismos para magnificação óptica, este processo auxiliou no aumento do contraste das imagens. O processo de discretização necessitou de uma etapa adicional, para modificação do tipo de elemento tetraédrico para torná-lo compatível com a análise por transferência de calor. Por fim, a utilização de elementos de tamanho variado também se apresentou como uma abordagem interessante, tanto para diminuir o número total de elementos, como para reduzir os recursos computacionais necessários para as análises.

## 4 ESTUDOS DE CASO – APLICAÇÕES EM PROJETOS DE BIÔNICA

Este capítulo descreve estudos de casos resultantes das pesquisas realizadas durante esta tese, relacionando os conhecimentos obtidos sobre os materiais vegetais, por meio das tecnologias 3D abordadas anteriormente, com o desenvolvimento de projetos de biônica. No primeiro estudo de caso é apresentado o projeto de uma estrutura de paredes finas com base na geometria dos feixes vasculares do bambu. Já o segundo estudo diz respeito ao desenvolvimento de uma garrafa térmica isolante, baseando-se nas propriedades de conservação térmica da inflorescência-tanque de bromélias.

### 4.1 Design de estrutura biônica de paredes finas

Como visto, diversas características do bambu já foram estudadas como responsáveis por seu desempenho (PALOMBINI, 2016) e desse modo exploradas em projetos de biônicas, no desenvolvimento de produtos e estruturas conceituais. Contudo, o papel da geometria específica dos feixes vasculares relacionados à sua capacidade de absorção de energia ainda permanece inexplorado. Projetos bioinspirados já se mostraram com grandes propriedades de absorção de energia, principalmente através do desenvolvimento de estruturas de paredes finas (HU *et al.*, 2019; HUANG; XU, 2019; LIU *et al.*, 2015). Com aplicações em diversas indústrias, tais como aeroespacial, arquitetura, militar e automotiva, tais estruturas beneficiam-se da alta capacidade de absorção de energia cinética para proteger indivíduos e regiões vitais, além de determinar locais específicos para falha (ZOU *et al.*, 2016). Este conceito de absorção de energia também é conhecido pelo termo *crashworthiness*, o qual é voltado para impactos e como absorvê-los de maneira eficiente, bem como na relação entre materiais e design (DAEHN, 2014).

O presente estudo trata do desenvolvimento conceitual de uma estrutura de paredes finas baseada na geometria dos feixes vasculares do bambu, em comparação com diferentes designs de estruturas bioinspiradas no bambu da literatura, voltando-se para a absorção de energia. Uma amostra de bambu analisada por  $\mu$ CT foi utilizada como inspiração para o desenvolvimento da estrutura por *software* CAD. O modelo foi analisado em termos de conexão da geometria bioinspirada com a estrutura de paredes finas, de modo a otimizar tanto o seu aspecto quanto a validação de sua eficiência.

#### 4.1.1 Projeto da estrutura biônica

O processo de design foi iniciado por uma análise de uma estrutura unitária, com uma única geometria bioinspirada, através de uma análise de otimização de topologia para definir as melhores geometrias para conectar o núcleo ao seu exterior. Em seguida, foi realizada uma análise de sensibilidade do refinamento da malha da estrutura unitária. Após, a estrutura unitária com a geometria dos feixes foi comparada com demais padrões geométricos, para validar a teoria de que possuiria um desempenho superior. Por fim, o padrão do núcleo foi aplicado em uma macroestrutura, e análises não-lineares explícitas de elementos finitos foram seguidas na mesma, comparando-a com demais estruturas bioinspiradas no bambu, encontradas na literatura, através de ensaios de compressão axial, lateral e flexão.

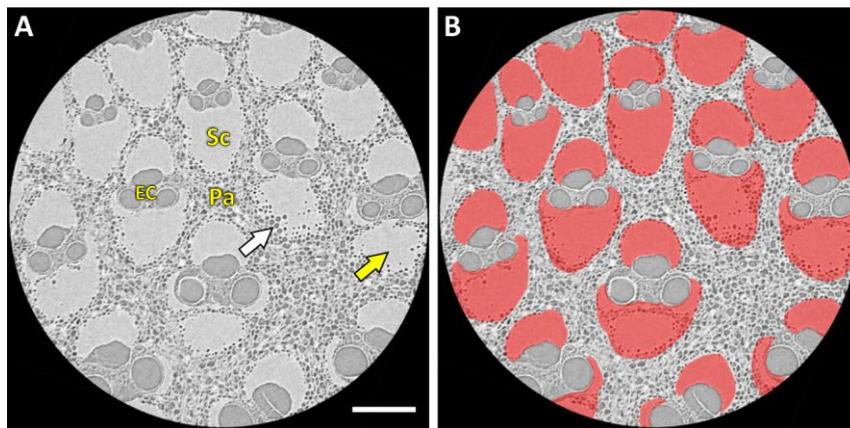
##### 4.1.1.1 Amostra e análise por $\mu$ CT

Uma amostra de *B. tuldoides* Munro foi coletada no município de Tapes, no estado do Rio Grande do Sul. Foram realizados protocolos de amolecimento e secagem (PALOMBINI, 2016; PALOMBINI *et al.*, 2020c) devido a seu esclerênquima lignificado no caule. A amostra foi seccionada, e uma região isolada consistindo em células parenquimáticas foi escolhida para a aquisição de imagens por  $\mu$ CT. A tensão e corrente do tubo de raios X foi definida como 50 kV e 88  $\mu$ A, respectivamente, resultando em um tamanho de *voxel* de cerca de 2,02  $\mu$ m.

A figura 40 apresenta um exemplo de fatia da  $\mu$ CT mostrando as estruturas internas do bambu: os elementos condutores (EC), tais como floema e xilema, os feixes de fibras compostos por células do esclerênquima (Sc), bem como do tecido de preenchimento, com células do parênquima (Pa). De maneira oposta às células do parênquima, as quais são praticamente equiaxiais, dispostas como uma espuma, as do esclerênquima têm por característica sua geometria delgada e axialmente alongada, possuindo espessamento de parede celular secundário, devido à incrustação de lignina. Entretanto, é possível notar que células do esclerênquima possuem diferentes níveis de espessamento, como mostra a figura 40A. As setas branca e amarela indicam células do esclerênquima que possui diferentes níveis de crescimento intrusivo entre elas, mostrando um tamanho maior ou menor de lume celular nas células, respectivamente; ou seja, células que possuem paredes celulares com diferentes espessuras. Em uma fatia axial de  $\mu$ CT, como exemplificado, uma região maior do lume é vista como sendo

mais porosa (seta branca), e uma região menor como uma região mais densa (seta amarela). Tais diferenças devem-se a diversos fatores, tais como o nível de maturidade da planta, bem como condições climáticas e do solo (FAHN, 1990; LIESE, 1998).

Figura 40 – Microtomografia de raios X ( $\mu$ CT) de amostra de fatia de bambu (*B. tuldooides*): (A) fatia de  $\mu$ CT original com designação dos elementos condutores (EC), células do esclerênquima (Sc) e do parênquima (Pa). Setas branca e amarela indicam regiões dos feixes de fibras com lume celular maior e menor, respectivamente; (B) fatia de  $\mu$ CT original, com a adição de máscara indicando os feixes vasculares do tipo IV. Barra de escala = 300  $\mu$ m.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

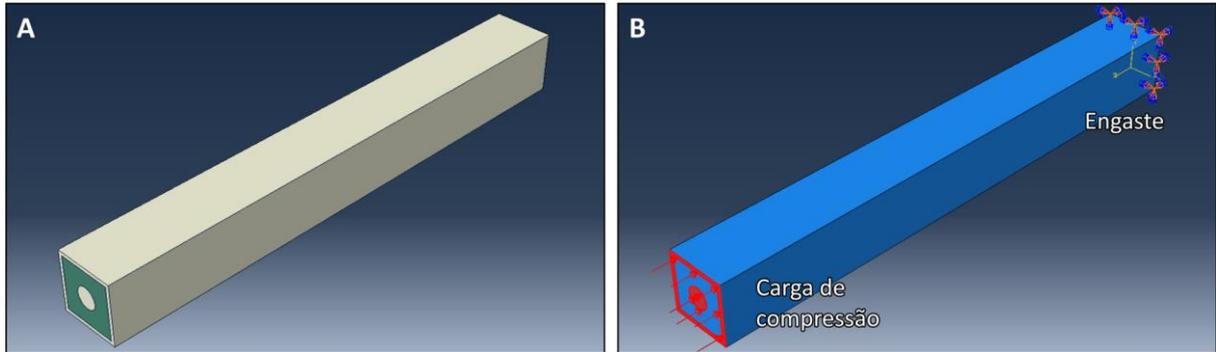
De acordo com a classificação de Liese (1998), os feixes vasculares de *B. tuldooides* correspondem ao Tipo IV, sendo distinguíveis por duas calotas de esclerênquima com diferentes tamanhos. Na figura 40B é mostrada a fatia original com a adição de uma máscara envolvendo as células do esclerênquima e revelando o padrão geométrico do Tipo IV. Esta geometria foi parametrizada e escolhida para aplicação como reforço em uma estrutura de paredes finas.

#### 4.1.1.2 Análise de otimização de topologia

Antes da utilização do padrão geométrico dos feixes vasculares do bambu no design de uma estrutura biônica, foi necessário definir como se daria o tipo de conexão de um núcleo com uma estrutura externa. Para isso foi realizada uma análise de otimização de topologia em uma estrutura unitária de paredes finas de teste, em um ensaio de compressão realizado no Abaqus/CAE. A análise consiste em avaliar qual é a geometria otimizada para conectar um estrutura oca de seção quadrada de  $1,1 \times 1,1 \text{ mm}$ , com uma espessura de  $0,07 \text{ mm}$  e comprimento de  $10,0 \text{ mm}$ , contendo um núcleo cilíndrico em seu interior, com  $0,4 \text{ mm}$  de diâmetro e os mesmos  $10,0 \text{ mm}$  de comprimento (figura 41). Foi criada uma geometria com uma

seção (*section*) e definida sendo a região a ser topologicamente otimizada (figura 41A, região verde), envolvendo o núcleo cilíndrico e no interior da parede da estrutura, considerados a geometria fixa (figura 41A, região branca).

Figura 41 – Análise de otimização de topologia: (A) estrutura de paredes finas, composta por uma região de geometria fixada (branco), e o material a ser topologicamente otimizado (verde); (B) condições de contorno da análise, sendo atribuída uma carga de compressão nas faces da estrutura externa e no núcleo cilíndrico, com um engaste nas respectivas faces opostas.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

As condições de contorno foram definidas como uma carga de compressão de  $100 \text{ MPa}$  aplicada nas superfícies de topo da geometria fixa, e um engaste na face oposta (figura 41B). Para as relações constitutivas, foram utilizadas as propriedades de uma liga de alumínio, e os parâmetros do material são mostrados na tabela 3. Como o propósito do estudo de caso é comparar estruturas em termos de geometrias, as mesmas propriedades constitutivas foram utilizadas nos modelos de todas as análises.

Tabela 3 – Propriedades constitutivas para estruturas de paredes finas utilizadas nas análises.

Propriedade constitutiva	Valor atribuído
Densidade do material ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ )	2,7E-6
Módulo elástico ( $\text{GPa}$ )	73
Coefficiente de Poisson	0,32
Resistência ao escoamento ( $\text{MPa}$ )	300

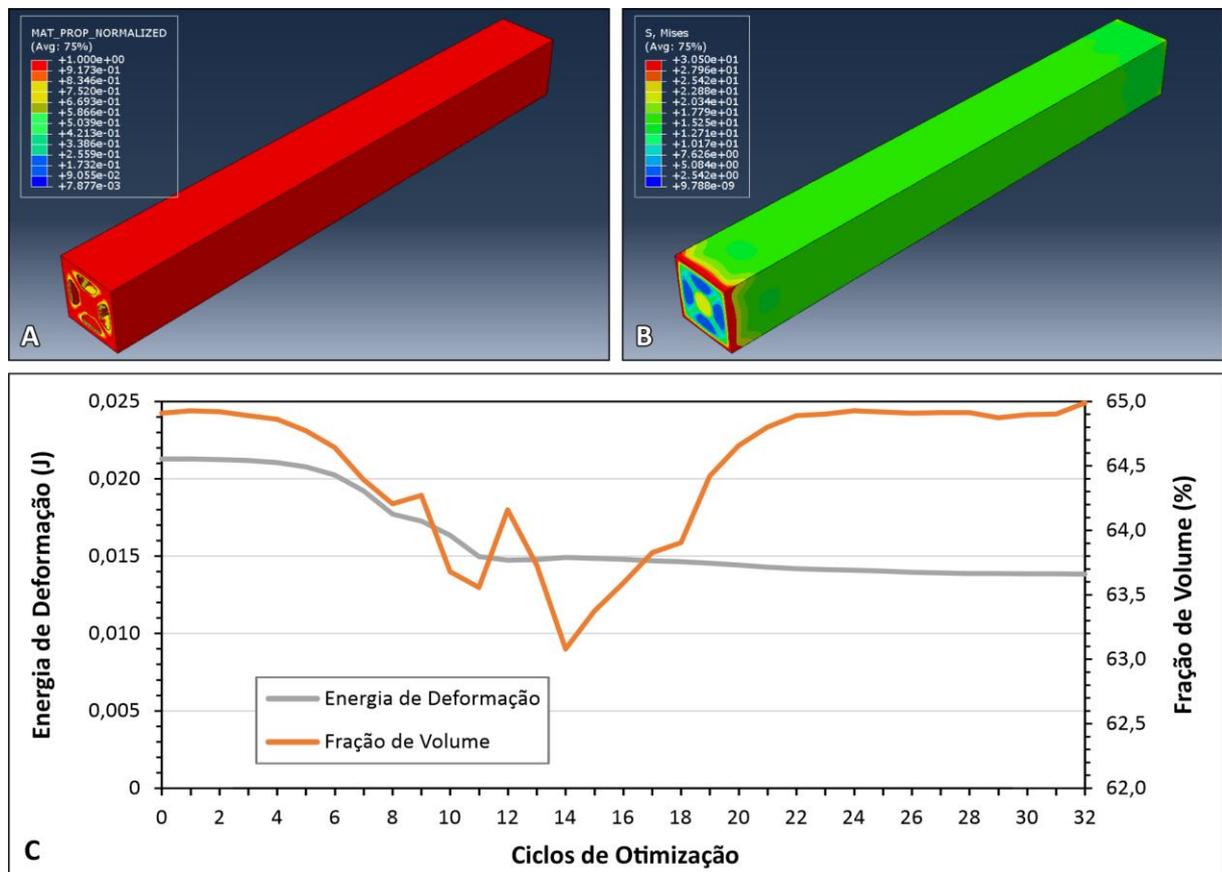
FONTE: Adaptado de CES Edupack™ (Granta® Design Ltd., Cambridge, Reino Unido).

Uma malha com tamanho de elemento (*element size*) de  $0,03 \text{ mm}$  foi utilizada para discretizar toda a montagem, sendo utilizados aproximadamente 360.000 elementos lineares hexaedros, do tipo  $C3D8R$ , e cerca de 375.000 nós. No Abaqus/CAE foi criada uma tarefa de

otimização (*optimization task*) na região verde do modelo. Duas respostas de design (*design responses*) foram criadas: energia de deformação (*strain energy*) e volume. A função objetiva (*objective function*) foi definida como minimizar a energia de deformação dessa região, e a restrição de otimização (*optimization constrain*) foi definida como limitar seu volume a 65% do valor inicial, sendo definido um número máximo de 50 ciclos de otimização.

No total foram necessários 32 ciclos de otimização para que os objetivos determinados na análise fossem alcançados (figura 42). A figura 42A apresenta a variável da distribuição de material normalizada, a qual representa a quantidade de material removida para a resolução do passo de otimização. A região definida teve uma quantidade de material removida, de modo a conectar a estrutura externa com o núcleo cilíndrico interior através de um padrão de X; ou seja, o resultado obtido consiste em quatro regiões espaçadas 90° radialmente e conectadas nos vértices da estrutura externa.

Figura 42 – Resultados da análise de otimização de topologia da estrutura de teste: (A) variável da distribuição de material normalizada; (B) tensões von Mises; (C) ciclos de otimização e função da energia de deformação e da fração de volume. Os contornos de malha foram escondidos para melhor visibilidade.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

A região removida corresponde aos elementos com os mais baixos valores de tensões von Mises (figura 42B), resultando em uma energia de deformação minimizada. A figura 42C apresenta os resultados dos ciclos de otimização em função da energia de deformação e da fração de volume. Pode ser observado que o passo de otimização já inicia reduzindo a fração de volume abaixo dos limites definidos (65%), entretanto com a energia de deformação calculada podendo ser ainda minimizada. Nos ciclos seguintes, a fração de volume oscila enquanto a energia de deformação é reduzida até alcançar seu valor mínimo enquanto respeitando as condições de contorno relativas a 65% do volume inicial, assim se encerrando após um total de 32 ciclos.

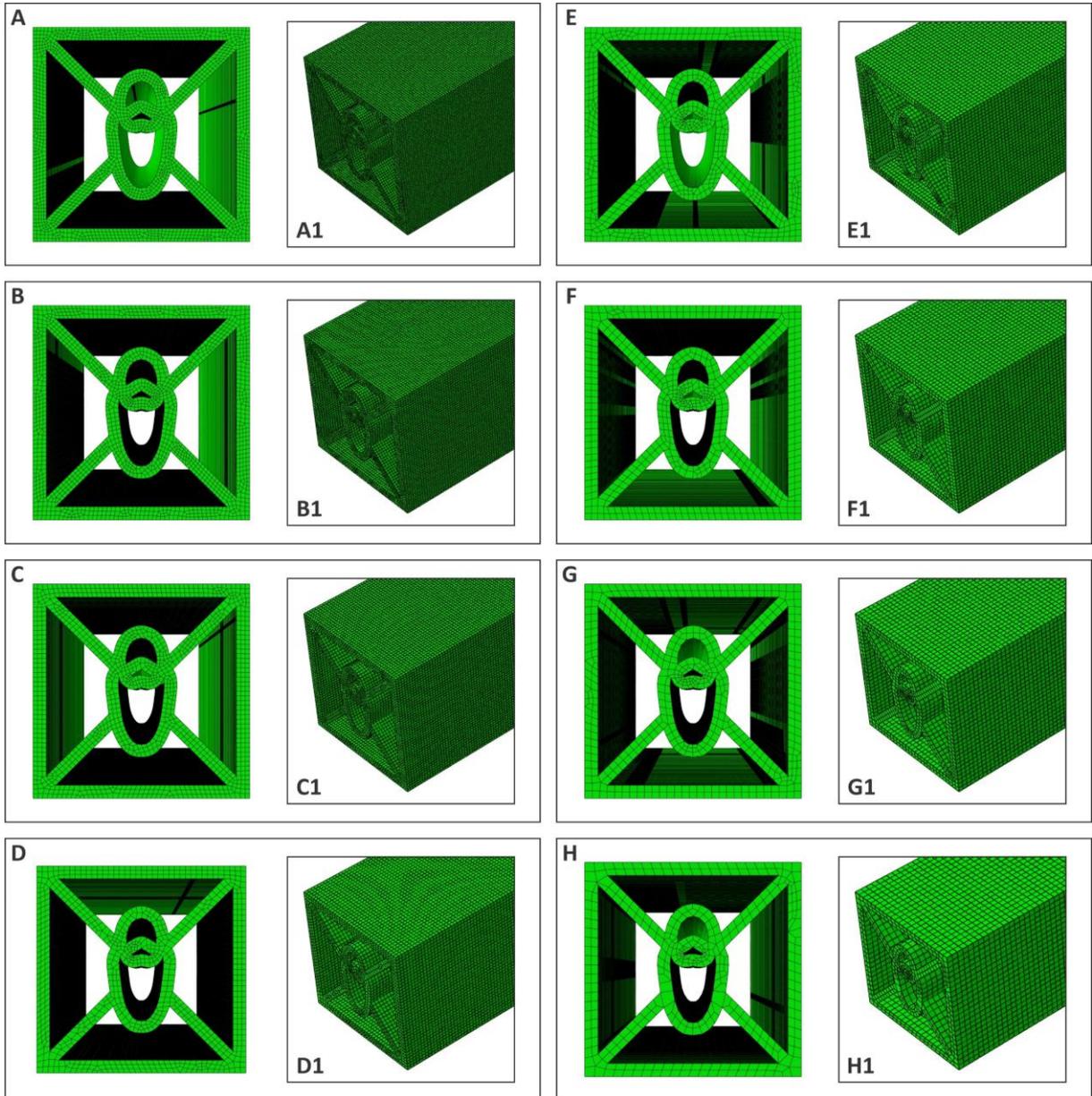
Os resultados da análise de otimização de topologia mostraram que o padrão em X é a geometria mais adequada para conectar um núcleo em uma estrutura de paredes finas, conforme os padrões definidos, em termos de maior eficiência em uma razão rigidez-a-volume. Além disso, conforme mostrado por Fu *et al.* (2019), quando utilizado como reforço em uma geometria, o padrão em X também possuía a melhor performance. Portanto, esse padrão foi utilizado para a conexão da geometria bioinspirada nos feixes do bambu nas demais análises.

#### 4.1.1.3 Análise de sensibilidade de malha

Após a definição do tipo de conexão do núcleo, ou elemento de reforço, a ser aplicado em estrutura de paredes finas, foi desenvolvida uma segunda estrutura, similar à anterior, mas com o padrão baseado nos feixes vasculares do bambu como elemento de núcleo, através de uma análise de sensibilidade. A estrutura avaliada possui as mesmas dimensões externas da análise anterior, abrigando um núcleo de 0,7 mm de altura, de modo a imitar o tamanho do núcleo original dos feixes de esclerênquima do bambu.

Uma vez que o principal efeito esperado neste estudo é avaliar a influência da própria geometria dos feixes vasculares do bambu, a análise de sensibilidade foi focada em definir o tamanho de elemento da malha requerido para representar a geometria corretamente, de modo a minimizar os recursos computacionais necessários. Portanto, diferentes tamanhos de refinamento de malha foram definidos, para avaliar sua influência nos resultados em termos tanto de desempenho estrutural quanto de recursos computacionais. A malha foi composta de elementos lineares hexaedros (tipo *C3D8R*), com variações de 0,02 mm até 0,05 mm (figura 43).

Figura 43 – Análise de sensibilidade do refinamento de malha de uma estrutura de núcleo único. Imagens de A até H representam diferentes elementos de malha de: 0,020; 0,023; 0,025; 0,030; 0,033; 0,035; 0,040; e 0,050, respectivamente. Detalhes A1 até H1 apresenta vistas isométricas das estruturas nos diferentes tamanho de elemento de malha.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

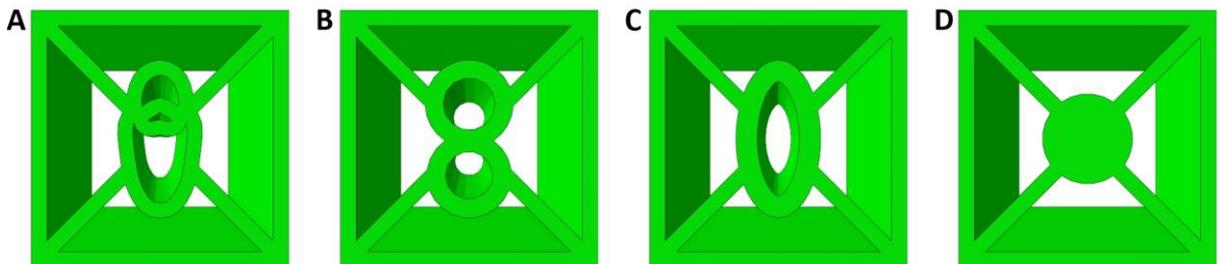
As estruturas foram avaliadas em ensaios de compressão em FEA, utilizando o modo de não-linearidade geométrica. Conforme a análise de otimização de topologia, uma pressão uniforme foi aplicada na face da seção transversal e a face oposta foi engastada. Do mesmo modo que a análise de otimização de topologia realizada, uma pressão uniforme foi aplicada na face da seção transversal e a face oposta foi engastada. Novamente, o objetivo foi simplificar a execução das análises, para ser conduzida com um conjunto simplificado de condições de contorno. Para avaliar a influência do tamanho do elemento de malha, a carga máxima suportada,

a deformação plástica e o tempo total da solução foram avaliados. As mesmas propriedades de liga de alumínio foram (tabela 3) aplicadas nos modelos.

#### 4.1.1.4 Comparação de padrões geométricos de núcleo único

Seguindo a análise de sensibilidade, mais três estruturas de paredes finas foram projetadas com núcleos diferentes, como visto na figura 44, para comparar e validar seu desempenho mecânico com o núcleo biônico (figura 44A), definido previamente. As estruturas comparadas consistem em núcleos de geometria bi-circular (figura 44B), elíptico (figura 44C) e cilíndrica (figura 44D). Todas as estruturas foram projetadas para possuírem dimensões externas similares e a mesma seção transversal ( $0,563 \text{ mm}^2$ ) e, conseqüentemente, o mesmo volume ( $5,63 \text{ mm}^3$ ). As estruturas foram testadas em compressão, com as mesmas condições de contorno e propriedades constitutivas utilizadas na análise de sensibilidade, mantendo a não-linearidade geométrica ativada. O tamanho do elemento de malha otimizado obtido nos resultados da análise de sensibilidade foi utilizado para todas as estruturas.

Figura 44 – Comparação de estruturas de paredes finas com núcleos de diferentes seções transversais: núcleos (A) biônico; (B) bi-circular; (C) elíptico; e (D) cilíndrico.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

Diversos testes foram realizados em cada estrutura, com pressões de compressão crescentes até que cada estrutura convergisse para o valor máximo de carga suportada. A máxima carga suportada ( $L$ ), definida em  $N$ , foi utilizada para verificar a eficiência ( $\eta$ ), definida em  $N \cdot g^{-1}$ , de cada estrutura de paredes finas de acordo com:

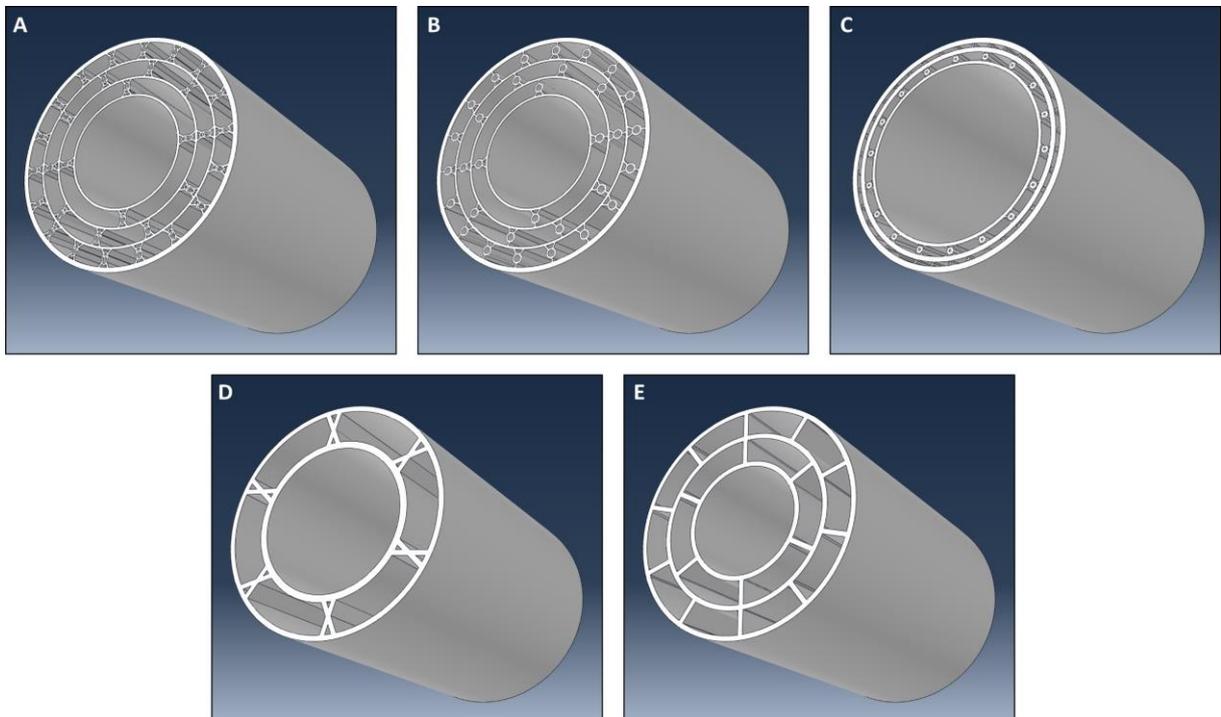
$$\eta = \frac{L}{m} \quad (21)$$

em que  $m$  é a massa, definida em  $g$ , da estrutura, a qual foi a mesma para todos os modelos. As dimensões detalhadas de cada seção transversal avaliada estão presentes no APÊNDICE A.

#### 4.1.1.5 Análises Explícitas por Elementos Finitos

Para investigar o desempenho de absorção de energia da geometria baseada nos feixes vasculares do bambu, o núcleo biônico avaliado anteriormente foi utilizado como elemento de reforço em um modelo de estrutura de paredes finas e comparado com quatro modelos diferentes da literatura, os quais também foram bioinspirados no bambu (figura 45). Uma estrutura de paredes finas baseada no trabalho de Zou *et al.* (2016) foi empregada como modelo-base (dimensões externas) em todas as estruturas avaliadas, para fins de uniformização, e todas as estruturas avaliadas possuíam seção transversal constante. A estrutura da literatura consiste em quatro cilindros concêntricos, reforçados por uma série de núcleos circulares, ligados por um padrão de três pontos. O número de reforços aumenta progressivamente do interior ao exterior da estrutura, representando o arranjo vascular dos feixes no bambu.

Figura 45 – Modelos bioinspirados avaliados: (A) estrutura biônica proposta, contendo a geometria dos feixes vasculares como reforço; (B) estrutura referencial #1, baseada no modelo de Zou *et al.* (2016), com uma geometria circular como reforço; (C) estrutura referencial #2, baseada no modelo de Ma *et al.* (2008); (D) estrutura referencial #3, baseada no modelo de Fu *et al.* (2019); (E) estrutura referencial #4, baseada no modelo de Chen *et al.* (2018).



FONTE: (A) Autor (2020); e modelos adaptados nos trabalhos de (B) Zou *et al.* (2016), (C) Ma *et al.* (2008), (D) Fu *et al.* (2019) e (E) Chen *et al.* (2018).

O modelo biônico proposto (figura 45A), baseado no modelo da literatura, consiste no mesmo número e arranjo de cilindros concêntricos e reforços, entretanto, a geometria destes

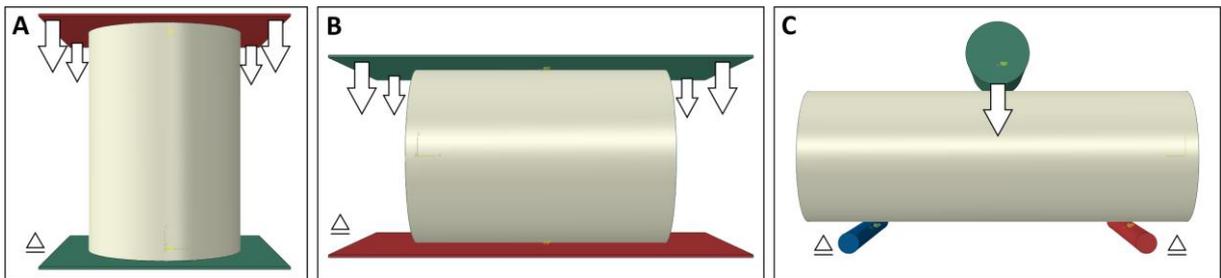
foi substituída pelo padrão bioinspirado nos feixes vasculares, de acordo com a validação nos ensaios anteriores. Além disso, os três pontos de ligação foram substituídos pelo padrão em X, de acordo com as análises de otimização de topologia anteriores. Cabe ressaltar que, apesar do modelo da literatura de Zou *et al.* (2016) incluir duas placas sólidas como reforços transversais representando as regiões nodais do bambu, tal característica não foi incluída em nenhum modelo analisado, devido à intenção de reduzir o número de elementos hexaédricos utilizados para discretizar cada modelo e, assim, o tempo computacional. Mesmo que tal característica aumente a performance de uma estrutura de paredes finas, o principal objetivo deste estudo de caso foi avaliar a influência da geometria dos feixes como núcleos de reforço.

O primeiro modelo da literatura comparado (figura 45B, estrutura ref. #1) foi baseada justamente no modelo proposto por Zou *et al.* (2016), de modo que a única diferença entre ele e o modelo proposto é a geometria dos reforços e seu tipo de conexão. O segundo modelo comparado (figura 45C, estrutura ref. #2) foi baseado na seção transversal do modelo proposto por Ma *et al.* (2008), consistindo de cilindros concêntricos de espessuras crescentes do interior ao exterior, reforçadas por núcleos circulares conectados por um padrão em X, os quais são maiores entre os cilindros interno e intermediário, e mais numerosos entre os cilindros intermediário e externo. O terceiro modelo comparado (figura 45D, estrutura ref. #3) foi baseado no modelo otimizado de Fu *et al.* (2019), compreendido por dois cilindros concêntricos conectados por seis elementos de núcleo em formato de X. Por fim, o quarto modelo comparado (figura 45E, estrutura ref. #4) foi baseado no modelo de Chen *et al.* (2018), consistindo de três cilindros concêntricos com reforços radiais entre eles. As dimensões externas de todas as estruturas foram modificadas para possuírem de 70 *mm* em diâmetro e 100 *mm* em comprimento, conforme definido pelo modelo original de Zou *et al.* (2016), e os detalhes das seções transversais estão presentes no APÊNDICE B.

Três análises de impacto foram realizadas utilizando o modo explícito (*explicit*) no Abaqus/CAE para cada estrutura, baseando-se nos testes realizados por Zou *et al.* (2016). A figura 46 apresenta os testes realizados e as respectivas condições de contorno. O primeiro consiste em um ensaio de impacto de compressão axial (figura 46A), em que cada estrutura é posicionada entre duas placas rígidas. A placa inferior foi engastada ( $\Delta$ ) e um deslocamento para baixo de 70 *mm* (ou 70% da altura) foi aplicado na superior ( $\Downarrow$ ). A segunda análise foi de um impacto de compressão lateral (figura 46B), em que as duas placas rígidas foram posicionadas paralelamente nas laterais de cada modelo; novamente com a inferior engastada ( $\Delta$ ) e com

um deslocamento para baixo de 35 *mm* (ou 50% da largura) definido na superior ( $\Downarrow$ ). Já a terceira análise foi um impacto de flexão em três pontos (figura 46C), na qual dois cilindros rígidos foram posicionados distantes 140 *mm* e engastados ( $\triangle$ ) no lado inferior de cada estrutura, e um deslocamento para baixo de 100 *mm* ( $\Downarrow$ ) foi aplicado em um terceiro cilindro rígido, posicionado no centro do lado oposto de cada modelo. Nas análises de flexão o comprimento de cada estrutura foi dobrado para 200 *mm*. As placas rígidas das análises de compressão axial e lateral, bem como o cilindro superior da análise de flexão, foram restritos em deslocamento transversal e em rotação. Para um análise de impacto, o deslocamento imposto nos corpos rígidos de todas as análises foi definido com velocidade de 10 *m/s* (ZOU *et al.*, 2016), seguindo uma amplitude tabular. Novamente, todos os deslocamentos foram aplicados em pontos de referência criados nos respectivos corpos rígidos.

Figura 46 – Análises explícitas de impacto por elementos finitos para: (A) teste de compressão axial; (B) teste de compressão lateral; (C) teste de flexão em três pontos. Setas brancas representam os deslocamentos e  $\triangle$  representam as restrições de engaste definidas para os corpos rígidos.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

Baseando-se nos resultados da força de reação, alguns parâmetros podem ser levantados para comparar a performance de cada estrutura, tais como força média ( $F_m$ ), e pico de força inicial ( $F_{peak}$ ).  $F_m$  representa a média dos valores registrados, durante a compressão (SONG; CHEN; LU, 2012), podendo ser calculado por:

$$F_m = \frac{E_{total}}{\Delta\delta} \quad (22)$$

em que  $E_{total}$  é o total de energia absorvida por cada estrutura durante o intervalo de deslocamento  $\Delta\delta$ . Por sua vez,  $E_{total}$  pode ser obtido de acordo com:

$$E_{total} = \int_{\delta_0}^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (23)$$

em que  $F(\delta)$  é a força registrada entre os deslocamentos inicial ( $\delta_0$ ) e final ( $\delta_{max}$ ) (GRACIANO; MARTÍNEZ; SMITH, 2009), sendo  $E_{total}$  também calculado automaticamente

pelo Abaqus/CAE nos resultados da análise explícita. Já  $F_{peak}$  representa o valor registrado mais alto de  $F(\delta)$  no qual o regime elástico encerra, antes de deformações permanentes (TARLOCHAN *et al.*, 2013). Ao relacionar ambos os parâmetros, é possível determinar a Eficiência da Força de Impacto ( $CFE$  – *Crush Force Efficiency*) pela razão:

$$CFE = \frac{F_m}{F_{peak}} \quad (24)$$

$CFE$  está relacionado, portanto, à desaceleração da força de impacto, ao definir quão estável é a deformação de uma estrutura (TARLOCHAN *et al.*, 2013).

Além das curvas de tensão-deformação geradas a cada teste, baseadas nos valores de saída (obtidos no *history output*) das análises e nas forças de reação registradas nas estruturas rígidas, a absorção de energia também foi avaliada. Para compensar as diferenças de volume e, conseqüentemente, de massa das estruturas, o critério de Absorção Específica de Energia ( $SEA$  – *Specific Energy Absorption*) foi utilizado para comparar a performance de cada modelo. O critério  $SEA$  pode ser determinado pela razão:

$$SEA = \frac{E_{total}}{m} \quad (25)$$

em que  $m$  é a massa de cada estrutura (ZOU *et al.*, 2016).

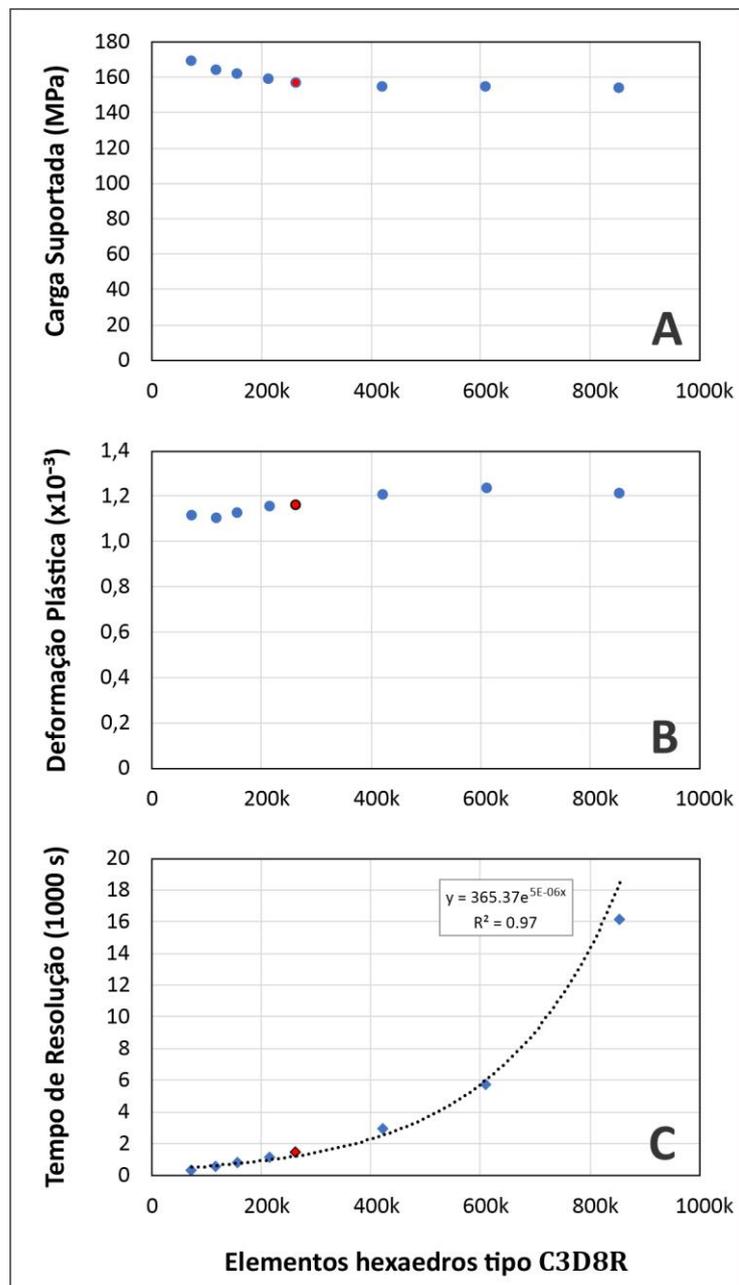
Além da adaptação para os mesmos valores de diâmetro e comprimento, as estruturas comparadas da literatura foram também modificadas em termos de área de seção transversal, com o objetivo de resultar em volumes mais próximos ao modelo proposto, ainda que preservando suas características geométricas. Entretanto, devido às variações inerentes às próprias geometrias utilizadas, as estruturas ainda apresentaram pequenas diferenças em volume. Os modelos de referência #1 (figura 45B) e #3 (figura 45D) possuem volumes cerca de 5% menores que o modelo proposto (figura 45A), enquanto que os modelos #2 (figura 45C) e #4 (figura 45E) possuem volumes aproximadamente 5% e 3% maiores, respectivamente. Ainda que essas diferenças em volume podem levar a influências nas forças de reação durante os ensaios, elas se tornam menos relevantes ao serem normalizadas por sua massa via  $SEA$ , de todo modo, as diferenças de massas foram consideradas na avaliação das estruturas.

Por fim, uma regra de contato geral foi novamente definida em todas as regiões (corpos rígidos e deformáveis) com elas mesmos, além de controles de autocontato, para evitar que se interceptem. Os corpos rígidos foram definidos como superfície de restrição mestre (*master constraint surface*) sobre as escravas (*slaves*) dos modelos deformáveis, no Abaqus/CAE.

#### 4.1.2 Resultados e discussão

O principal objetivo deste estudo de caso é avaliar o efeito do formato dos feixes vasculares do bambu nas suas propriedades de absorção de impacto em estruturas biônicas, portanto é essencial que sua geometria seja adequadamente simulada. Desse modo, a figura 47 apresenta os resultados da análise de sensibilidade.

Figura 47 – Resultados da análise de sensibilidade de refinamento de malha do modelo biônico: (A) carga máxima suportada; (B) deformação plástica; e (C) tempo de resolução; por estruturas com números diferentes de elementos hexaedros. O ponto destacado representa o tamanho de elemento de malha escolhido.



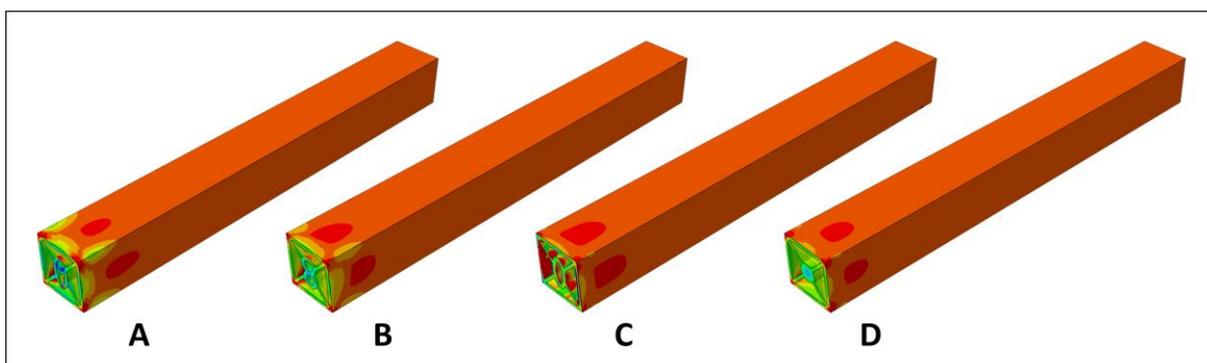
FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

Todas as estruturas atingiram valores similares de carga máxima suportada (figura 47A), entretanto é possível observar que os resultados convergem para cerca de  $155 \text{ MPa}$ , a partir do modelo com cerca de 264.000 elementos (tamanho de elemento de malha de  $0,030 \text{ mm}$ ), até o modelo com cerca de 855.000 elementos (tamanho  $0,020 \text{ mm}$ ), com a maior densidade de malha, *i.e.*, com o maior número de elementos por unidade de volume. De maneira similar, a deformação plástica (figura 47B) convergiu para cerca de  $1,21 \times 10^{-3}$  com o aumento do número de elementos na malha. Por outro lado, aumentar a densidade da malha também aumenta significativamente o tempo de resolução (figura 47C) da análise. Enquanto o modelo de 264.000 elementos concluiu a análise em cerca de  $1.500 \text{ s}$  ( $\sim 25 \text{ min}$ ), o modelo de 855.000 elementos levou cerca de  $16.000 \text{ s}$  ( $\sim 4,5 \text{ h}$ ).

Quando aplicado em grandes volumes, um refinamento de malha maior aumentaria exponencialmente o tempo de resolução e, assim, o requerimento computacional para completar a análise, ainda que com diferenças desprezíveis nos resultados. Portanto, baseando-se nos resultados da máxima carga suportada e deformação plástica, o refinamento de malha de  $0,030 \text{ mm}$  foi escolhido para os demais testes deste estudo de caso. Considerando que na estrutura biônica testada, a altura do feixe vascular possuía  $0,7 \text{ mm}$ , essa dimensão foi utilizada como guia geral para as próximas etapas de discretização.

Os resultados dos designs de diferentes núcleos para validação da geometria biônica estão na figura 48. As estruturas apresentaram distribuições de tensões von Mises durante compressão quase idênticas, entretanto a carga máxima suportada foi distinta. O modelo biônico proposto (figura 48A) suportou uma carga de compressão máxima de  $157 \text{ MPa}$  (ou cerca de  $88,4 \text{ N}$ , considerando a área da seção de  $0,563 \text{ mm}^2$ ); o modelo bi-circular (figura 48B) suportou  $142 \text{ MPa}$  (ou  $79,9 \text{ N}$ ); o modelo elíptico (figura 48C) suportou  $138 \text{ MPa}$  (ou  $77,7 \text{ N}$ ); e o modelo cilíndrico (figura 48D) suportou  $145 \text{ MPa}$  (ou  $81,64 \text{ N}$ ). Utilizando a Eq. (21), isso resulta em eficiência de carga de compressão por massa de  $5,8 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{g}^{-1}$  para o modelo biônico, o qual é cerca de 11%, 14% e 8% superior aos modelos com núcleos bi-circular, elíptico e cilíndrico, respectivamente. Estes resultados mostram que um projeto de núcleo bioinspirado na geometria dos feixes vasculares do bambu podem contribuir para um melhor desempenho em ensaios futuros de absorção de impacto, em comparação com padrões simplificados. Essa validação teve como objetivo justificar a adoção de uma geometria diferenciada dos feixes na aplicação como elemento de reforço na estrutura de paredes finas desenvolvida.

Figura 48 – Resultados das tensões von Mises da comparação das estruturas de núcleos únicos: (A) biônico; (B) bi-circular; (C) elíptico; e (D) cilíndrico. Contornos de malha foram omitidos para melhor visibilidade.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

A discretização da estrutura de paredes finas para as análises não-lineares explícitas foi baseada no tamanho do reforço do núcleo biônico da estrutura proposta (figura 45A) em relação com os resultados da análise de sensibilidade. No modelo de núcleo único testado, a geometria biônica de reforço possuía  $0,7 \text{ mm}$  de altura, e um tamanho de elemento de malha de  $0,03 \text{ mm}$  foi escolhido como otimizado na convergência dos resultados e nos tempos de processamento relativamente baixos; *i.e.*, tal tamanho de elemento foi suficiente para representar a geometria bioinspirada nos feixes vasculares sem aumentar desnecessariamente o uso de recursos computacionais. Na estrutura de paredes finas proposta, o elemento de reforço possui  $3,9 \text{ mm}$  de altura, portanto um tamanho de elemento de  $0,17 \text{ mm}$  foi utilizado para discretizar todas as estruturas. Elementos lineares hexaedros (tipo *C3D8R*) foram utilizados no processo, e a tabela 4 resume os números aproximados de elementos e nós para cada estrutura para os ensaios de compressão axial e lateral ( $100 \text{ mm}$  de comprimento) e para os ensaios de flexão ( $200 \text{ mm}$  de comprimento).

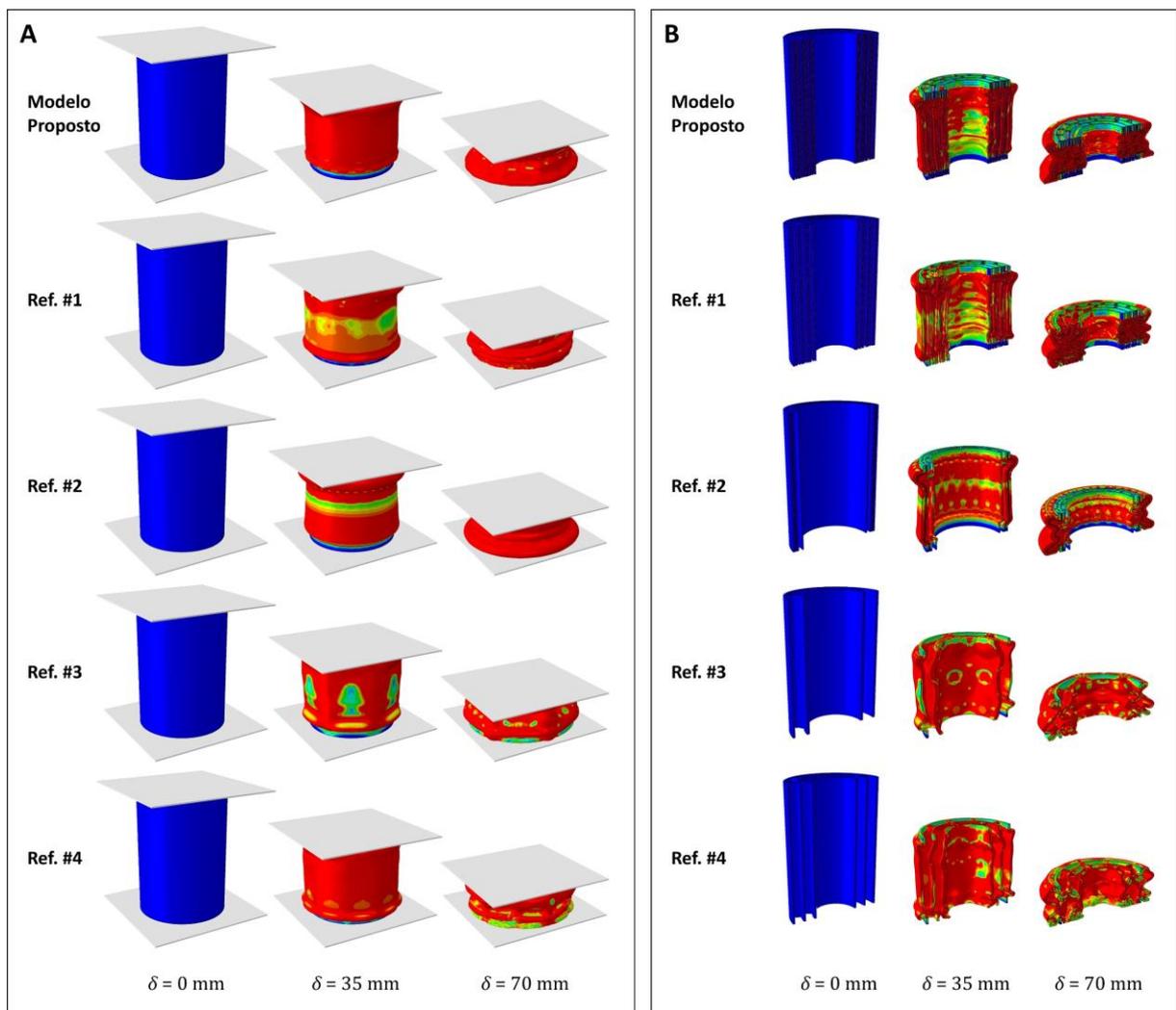
Tabela 4 – Resultados da discretização das estruturas de paredes finas ensaiadas, em milhões de elementos lineares hexaedros (tipo *C3D8R*) e em milhões de nós.

Estrutura	Elementos		Nós	
	Axial / Lateral	Flexão	Axial / Lateral	Flexão
Modelo proposto	20,9	41,8	24,6	49,1
Modelo Referencial #1	19,6	39,1	22,9	45,7
Modelo Referencial #2	23,0	46,1	25,8	51,5
Modelo Referencial #3	19,7	39,5	21,2	42,5
Modelo Referencial #4	21,5	43,1	23,5	47,0

FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

A figura 49 apresenta a deformação do modelo proposto e dos os de referência baseados na literatura para análise axial explícita. A montagem completa (estrutura de paredes finas deformável e os corpos rígidos) são vistos na figura 49A e uma vista em corte interna isolada de cada estrutura é vista na figura 49B. A progressão da deformação difere a partir do tipo de reforço presente em cada estrutura. Os modelos de referência #3 e #4 apresentam deformações locais de flexão externas (figura 49A) e internas (figura 49B) relacionadas ao padrão mais espalhado de reforços. O modelo #2, possuindo uma casca externa mais espessa, apresenta uma deformação de um sólido cilíndrico regular, similar a resultados encontrados na literatura (FU *et al.*, 2019; ZOU *et al.*, 2016).

Figura 49 – Resultados das tensões von Mises da deformação axial do modelo proposto e das estruturas de referência em diferentes deslocamentos ( $\delta$ ) relativos à posição inicial: (A) vista da montagem completa; (B) vista em corte da estrutura apenas. Contornos de malha foram removidos para visibilidade.

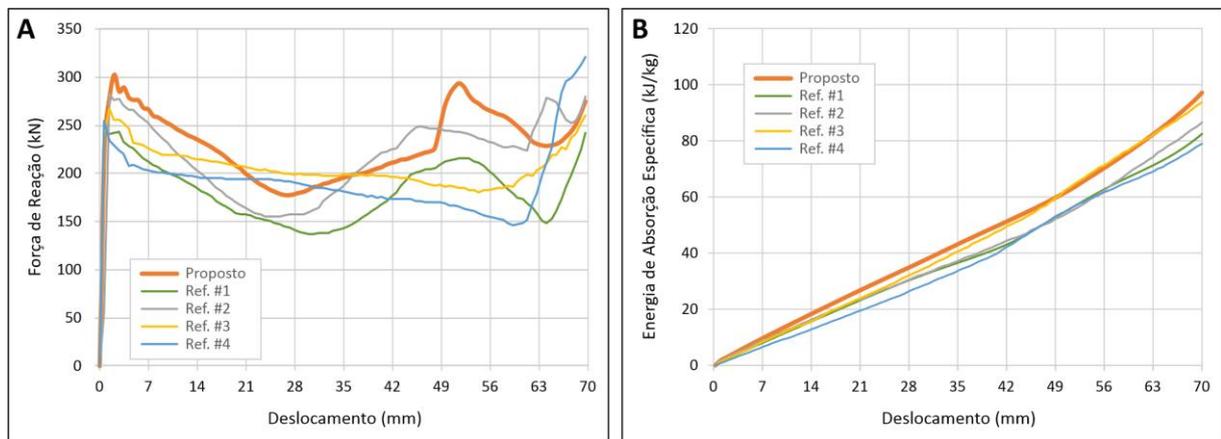


FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

Quanto ao modelo proposto e o #1, apresentam este tipo de deformação cilíndrica na casca externa, sendo mais espalhado na interna, com flexões locais. Entretanto, como visto nas imagens em corte (figura 49B), a região do meio do modelo #1 apresenta uma deformação maior que o modelo proposto. Isso indica que a modificação dos elementos de reforço para padrão bioinspirado influenciaram em menores deformações perpendiculares durante compressão axial.

Os resultados numéricos das análises axiais são apresentados na figura 50. As curvas tensão-deformação definidas pela força de reação e deslocamento do corpo rígido superior são vistas na figura 50A. Conforme observado nos resultados visuais (figura 49), modelos similares tendem a apresentar resultados de força de reação análogas ao longo do teste. O modelo proposto, bem como o #1 e #2 apresentam padrões quase idênticos até  $\delta = 40 \text{ mm}$  e  $50 \text{ mm}$ , quando o modelo #2 e o proposto apresentam maiores densificações, respectivamente, e suas forças de reação correspondentes aumentam. Os modelos #3 e #4 também se comportam de maneira similar, com uma força de reação decrescente em uma região de platô até cerca de  $\delta = 60 \text{ mm}$ , quando é iniciada a densificação.

Figura 50 – Resultados da análise axial: (A) força de reação por deslocamento; (B) SEA por deslocamento.



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

Ao utilizar a Eq. (22), a força média  $F_m$  do modelo proposto foi cerca de 27% maior que do #1, sendo que a única diferença foi a modificação da geometria do núcleo. Comparando com os modelos #2, #3 e #4, a  $F_m$  foi 6%, 12% e 20% maior, respectivamente. Quanto ao pico de força inicial  $F_{peak}$ , o modelo proposto apresentou valor 25%, 8%, 13% e 19% maior que os respectivos modelos de referência. Entretanto, ao relacionar estes valores com a eficiência de força de impacto ( $CFE$ ), via Eq. (24), ambos os modelos #2 e #3 mostraram valores

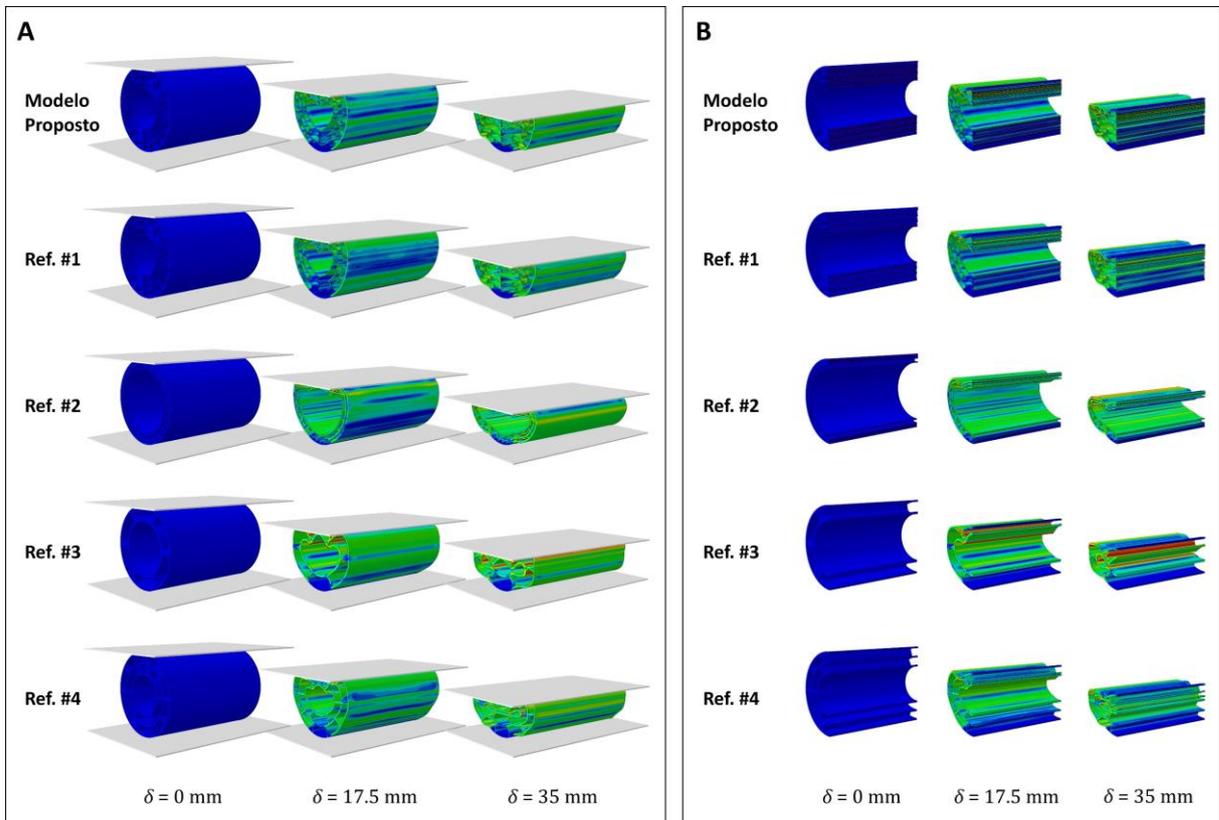
maiores, de 0,763 e 0,767, em comparação com o valor de 0,755 do modelo proposto. Isso mostra que, apesar de possuir valores de  $F_m$  e  $F_{peak}$ , tais estruturas apresentam deformações mais estáveis, *i.e.*, com picos de força menos significantes e com uma maior região de platô no regime plástico. Por outro lado, quanto aos modelos #1 e #4, a  $CFE$  foi de 0,740 e 0,751, respectivamente; isso significa que apenas com a mudança no design do elemento de reforço para o núcleo bioinspirado, o modelo proposto mostrou uma deformação cerca de 2% mais estável que o referencial #1.

Por meios da energia total de absorção  $E_{total}$ , via Eq. (23), o modelo proposto foi 27% superior ao ser comparado com o #1. Considerando seu volume pouco maior, a energia de absorção específica  $SEA$  foi cerca de 18% superior, via Eq. (25), como visto na figura 50B. Quanto aos modelos #2, #3 e #4, a  $E_{total}$  foi 6%, 12% e 20% maior e a  $SEA$  foi cerca de 12%, 4% e 23% maior, respectivamente. É importante destacar que o modelo #3 apresentou valores similares de  $SEA$  ao longo da análise, inclusive ultrapassando os do modelo proposto a alguns deslocamentos (figura 50B). Devido à similaridade dos resultados, portanto, é possível afirmar que ambas as estruturas possuem virtualmente as mesmas capacidades de absorção de energia específica.

As deformações das estruturas durante a análise de impacto de compressão lateral são mostradas na figura 51. Novamente, a figura 51A apresenta a montagem inteira a diferentes deslocamentos ( $\delta$ ), e as vistas em corte somente de cada estrutura são vistas na figura 51B. Conforme no ensaio anterior, estruturas similares tendem a apresentar progressões de deformação comparáveis, sendo o modelo proposto similar ao #1, em termos de flexão interna das cascas cilíndricas; enquanto que as tensões aparecem de maneira mais distribuídas na casca externa do modelo proposto (figura 51A). Isso indica que os reforços bioinspirados influenciam o comportamento de compressão lateral de maneira a aumentar as tensões e deformações em regiões locais da estrutura de paredes finas.

Como esperado, com uma casca cilíndrica externa mais espessa, o modelo referencial #2 apresenta menor flexão e tensões mais distribuídas por volta de  $\delta = 35 \text{ mm}$ , quando comparado às outras estruturas. Isso pode levar a maiores pico de força inicial e absorção de energia. Por outro lado, devido ao fato de possuírem reforços mais distribuídos, os modelos de referência #3 e #4 apresentaram tanto flexão quanto níveis de tensões concentradas significativamente maiores em  $\delta = 35 \text{ mm}$  (figura 51B).

Figura 51 – Resultados das tensões von Mises da deformação lateral do modelo proposto e das estruturas de referência em diferentes deslocamentos ( $\delta$ ) relativos à posição inicial: (A) vista da montagem completa; (B) vista em corte da estrutura apenas. Contornos de malha foram removidos para visibilidade.



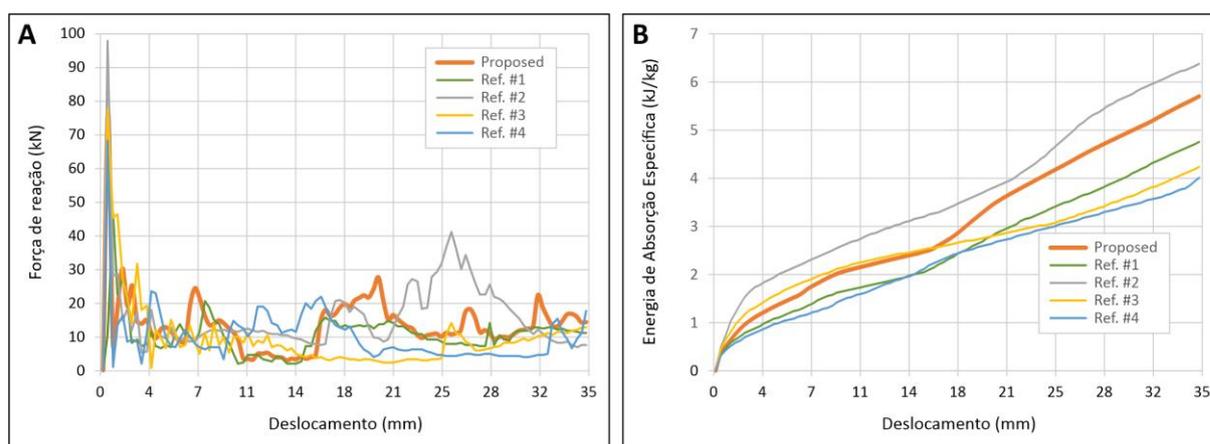
FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

A figura 52 apresenta os resultados numéricos da análise de compressão lateral, e as curvas de tensão-deformação estão presentes na figura 52A. Novamente, modelos similares apresentaram picos e regiões de platô comparáveis, tais como o modelo proposto e os referenciais #1, e do mesmo modo que o #3 e #4. Utilizando a Eq. (22), a força média  $F_m$  do modelo proposto foi 29%, 45% e 38% maior que os modelos referenciais #1, #3 e #4, respectivamente. Entretanto, o modelo #2 resultou em uma  $F_m$  18% maior, ao longo do teste. Do mesmo modo,  $F_{peak}$  foi também 28% maior no modelo #2 e cerca de 1% maior no #3 que o modelo proposto; por outro lado, a estrutura desenvolvida ultrapassou em 64% e 12% os valores de #1 e #4, respectivamente. Quanto à  $CFE$ , o modelo #1 resultou em um valor 27% maior ( $CFE = 0,225$ ) que o proposto (0,177), sendo a estrutura com a deformação mais estável; já o modelo proposto resultou em valores cerca de 8%, 47% e 23% maiores que os modelos #2 (0,164), #3 (0,121) e #4 (0,144), respectivamente.

Considerando a energia de absorção total  $E_{total}$ , via Eq. (3), o modelo desenvolvido obteve um resultado 29% maior, em comparação com #1. O modelo foi também 45% e 38%

que #3 e #4, respectivamente. Novamente, contudo, #2 mostrou valor 18% maior que o modelo proposto, conforme esperado. Com relação à energia de absorção específica *SEA* (figura 52B), a diferença entre o modelo proposto ao #1 cai para 20%, o qual ainda é significativo. Em comparação aos modelos #3 e #4, a estrutura desenvolvida mostrou valores 35% e 42% maiores, respectivamente. Todavia, apesar de possuir uma massa maior, novamente o modelo #2 apresentou uma *SEA* 12% maior que o modelo proposto.

Figura 52 – Resultados da análise lateral: (A) força de reação por deslocamento; (B) *SEA* por deslocamento.



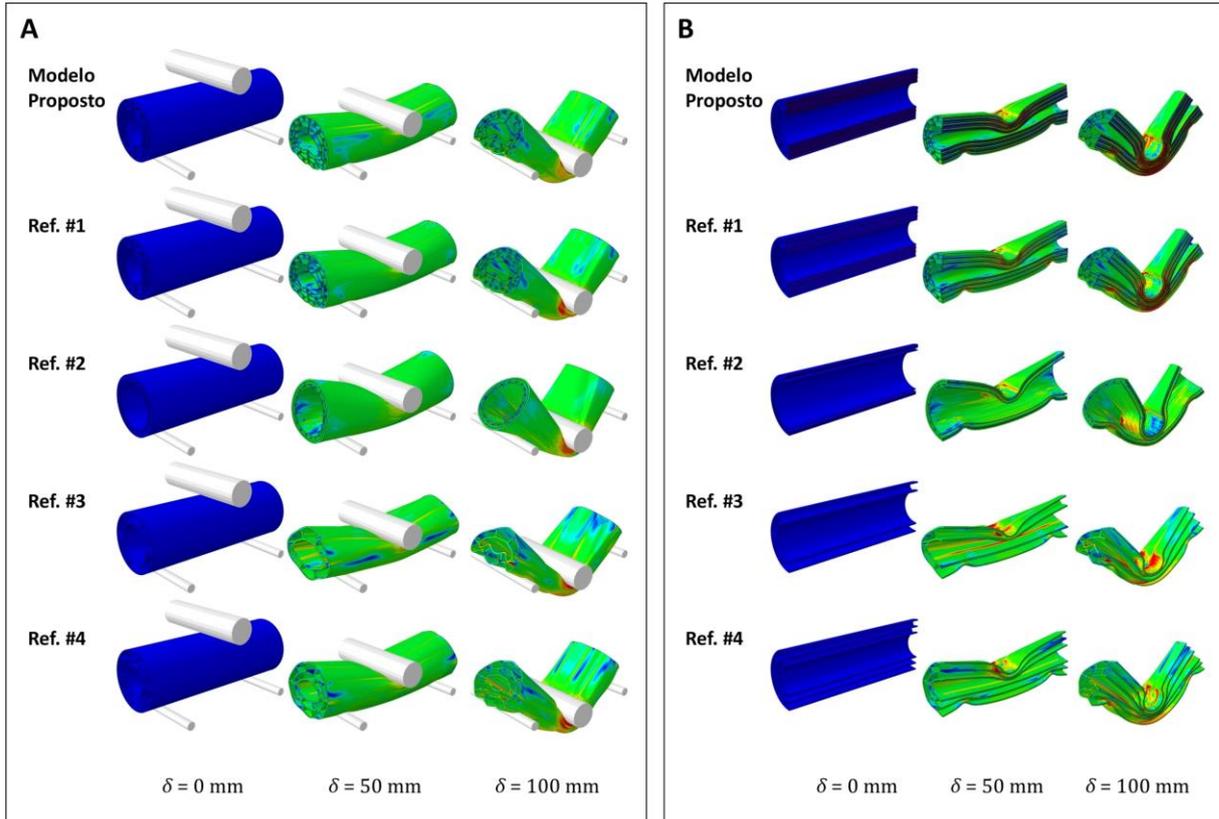
FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

De modo geral, como visto nas imagens das deformações (figura 51), bem como nos resultados numéricos (figura 52), a casca cilíndrica mais espessa do modelo #2 levou a uma força de reação maior e uma maior absorção de impacto nos testes de compressão lateral. Ainda, ao substituir o padrão de reforço do modelo #1 pelo padrão biônico resultou em valores superiores em quase todos os parâmetros avaliados, com exceção da eficiência de força de impacto (*CFE*). Neste parâmetro, a estrutura #1 apresentou valores de força média relativamente próximos às do pico de força inicial, assim levando à razão *CFE* a valores maiores que o modelo proposto.

A figura 53 apresenta os resultados da deformação na análise de impacto em flexão, em que os resultados para a montagem completa (estrutura e cilindros rígidos) são apresentados na figura 53A e a vista em corte das estruturas de paredes finas encontra-se na figura 53B. Seguindo o padrão observado nos ensaios anteriores, o comportamento de deformação de estruturas similares, tais como os modelos proposto e #1, bem como o #3 e #4, são análogos devido ao tipo e quantidade de elementos de reforço. Os modelos #3 e #4 foram os com maior flexão das cascas cilíndricas, devido aos seus reforços mais espalhados, enquanto que o #2

resultou em menos flexão na região externa, como esperado devido à sua casca mais espessa (figura 53A). Ao comparar com #1, o modelo proposto mostrou maiores distribuições de tensões externas e internas em  $\delta = 100 \text{ mm}$  (figura 53B).

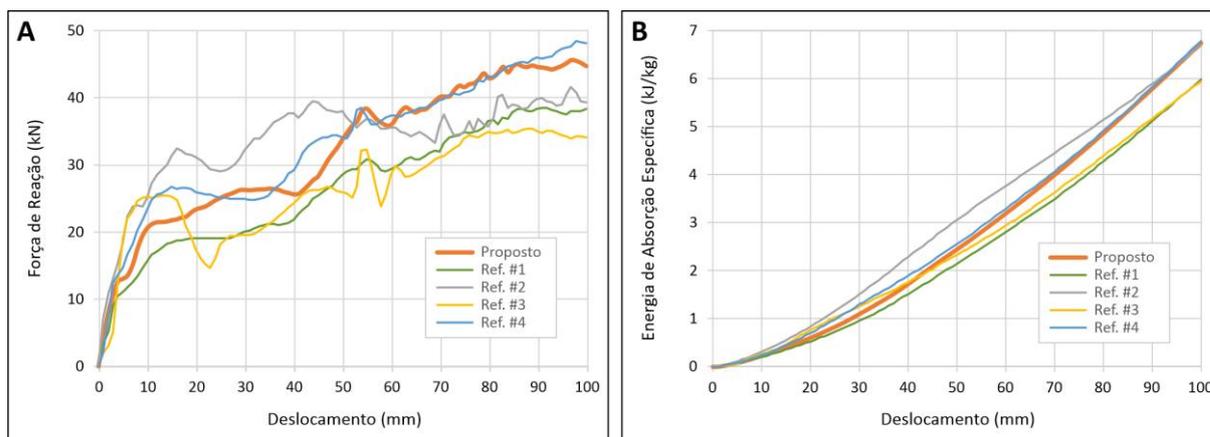
Figura 53 – Resultados das tensões von Mises da deformação em flexão do modelo proposto e das estruturas de referência em diferentes deslocamentos ( $\delta$ ) relativos à posição inicial: (A) vista da montagem completa; (B) vista em corte da estrutura apenas. Contornos de malha foram removidos para visibilidade



FONTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

A figura 54 apresenta os resultados numéricos da análise de flexão, e as curvas de força de reação por deslocamento são vistas na figura 54A. Novamente, as similaridades entre os modelos são também observadas nas curva, de modo que o modelo proposto segue um padrão semelhante ao referencial #1. Surpreendentemente, após a curva do modelo #4 seguir um comportamento similar à do modelo #2 até cerca de metade do deslocamento da análise ( $\delta = 50 \text{ mm}$ ), sua força de reação continua a aumentar, indicando uma densificação maior. Por outro lado, depois de um pico de força inicial mais alto devido à sua casca cilíndrica externa mais espessa, a estrutura #2 colapsa, com ovalização de sua seção transversal em  $\delta = 50 \text{ mm}$ . Após isso, sua força de reação decresce até a densificação de seus elementos de reforço iniciar e, assim, a curva retoma a valores mais altos.

Figura 54 – Resultados da análise de flexão: (A) força de reação por deslocamento; (B) SEA por deslocamento.



FORNTE: Adaptado de Palombini, Mariath e Oliveira (2020).

A  $F_m$  do modelo proposto foi cerca de 21% e 22% maior que as dos referenciais #1 e #3, respectivamente, via Eq. (22), ao passo que foi cerca de 5% e 4% menor que as de #2 e #4. Quanto a  $F_{peak}$ , o modelo proposto superou apenas o valor de #1, por 33%; enquanto que #2, #3 e #4 resultaram em valores de  $F_{peak}$  cerca de 22%, 28% e 12% maiores, respectivamente. Conforme os resultados de eficiência de força de impacto ( $CFE$ ) do teste lateral, o modelo proposto ( $CFE = 1,635$ ) resultou em um valor 17%, 56% e 8% maior comparado a #2 (1,399), #3 (1,046), e #4 (1,517), respectivamente; já o modelo #1 foi 10% maior (1,798), calculando por Eq. (24).

Por fim, em termos de absorção de energia, alterar a geometria do reforço para o padrão biônico novamente resultou em um valor de  $E_{total}$  21% maior que o referencial #1, via Eq. (23). Ao considerar a energia de absorção específica  $SEA$  (figura 54B), utilizando Eq. (25), isso representa um aumento de 13% com relação a #1. O modelo proposto também mostrou um valor de  $E_{total}$  22% maior que #3, ainda que #2 e #4 foram 5% e 4% melhores. Por outro lado, a estrutura proposta teve uma  $SEA$  13% maior que #3. Já #2 e #4 resultaram em virtualmente os mesmos valores de energia absorção específica, com uma diferença de cerca de 1%, para menos e para mais, respectivamente. Nota-se que o referencial #2 resultou em um valor maior de  $SEA$  em quase todo o deslocamento da análise de impacto por flexão (figura 54B), sendo igualado pelo modelo proposto e por #4 somente nos deslocamentos finais. Um resumo gráfico dos principais resultados das análises explícitas de impacto de compressão axial e lateral, e de flexão em três pontos deste estudo de caso é apresentado em figuras suplementares do APÊNDICE C.

Ainda que considerada uma característica importante para sua resistência axial, devido

a sua disposição no bambu, a geometria dos feixes vasculares não havia sido explorada em projetos de biônica. Ao comparar com um modelo de referência, a simples modificação do elemento de reforço original por um biônico levou a um notável ganho de performance médio de 17% na absorção de energia específica, considerando os três ensaios realizados. De maneira geral, os resultados mostraram que (1) a geometria dos feixes contribui para o comportamento mecânico geral da planta; (2) o design dos núcleos de reforço tem uma influência considerável na performance mecânica de estruturas de paredes finas; e (3) o uso de conexões de quatro pontos (padrão em X) dos núcleos às cascas cilíndricas aumenta a performance do modelo.

Com relação aos modelos referenciais #2, #3 e #4, o proposto apresentou uma performance relativamente superior, considerando que os designs das estruturas baseadas na literatura eram bastante diferentes, mesmo sendo todos inspirados no bambu. Nota-se que o modelo #2 apresentou uma performance geral melhor das estruturas comparadas, superando inclusive o modelo proposto em alguns parâmetros nos ensaios de compressão lateral e flexão. Como característica principal, essa estrutura referencial inclui uma casca cilíndrica externa mais espessa, levando a uma resistência inicial superior (considerando o pico de força inicial) e uma maior resistência à flexão local no regime plástico. Por outro lado, a escolha por pequenas regiões de reforço entre as paredes prejudicou a densificação durante a compressão; *i.e.*, as paredes opostas do interior da estrutura levam mais tempo para se tocarem e se densificarem, diminuindo assim as capacidades de absorção de energia. Novamente, os modelos referenciais #3 e #4 apresentaram regiões de reforço mais dispersas, o que facilita flexões locais, diminuindo também as forças de reação durante o platô e, conseqüentemente as forças médias gerais.

Ao considerar a análise de compressão axial, a estrutura proposta apresentou uma ligeira melhora na energia de absorção específica (*SEA*), mas um pico de força maior, ao comparado com o modelo #3, por exemplo. Contudo, com relação ao ensaio de compressão lateral e de flexão, o modelo proposto apresentou melhores resultados. Em termos de complexidade de fabricação, ambos os modelos avaliados consistem em um único perfil transversal, o qual poderia ser extrudado por igual. De modo geral, nenhuma estrutura avaliada foi claramente superior em todos os parâmetros dos três testes. Mas é importante destacar que com poucas modificações no design de reforço de uma estrutura de paredes finas é possível se obter resultados de *SEA* melhores. Contudo, mais estudos podem ser realizados para melhorar ainda

mais os demais parâmetros, como uma redução do pico de força inicial de uma estrutura bioinspirada no bambu.

Por fim, como uma diretriz geral para o desenvolvimento de estruturas de paredes finas inspiradas no bambu voltadas para a absorção de impactos, é possível destacar alguns fatores para um melhor desempenho específico: (1) utilização de núcleos de reforço com geometria baseada nos feixes vasculares do bambu; (2) a ligação do núcleo a cilindros concêntricos ser realizado por um padrão em X; (3) o arranjo destes núcleos deve ser realizado seguindo a distribuição gradiente dos feixes na planta; e (4) aumentar progressivamente na espessura das paredes cilíndricas em direção à periferia.

## **4.2 Design de garrafa térmica bioinspirada na inflorescência-tanque de bromélias**

Conforme pesquisado no estudo de caso do capítulo 3.3, algumas inflorescências da família Bromeliaceae possuem uma estrutura desenvolvida como tanque, para armazenamento de água. A inflorescência-tanque de bromélias fornece à planta uma importante capacidade de proteção térmica vinculada a seu acondicionamento de água. Em virtude de ser considerado um material com grande capacidade térmica, de maneira relativa, a água requer bastante energia para aumentar sua temperatura. Desse modo, sua utilização na planta permite que as estruturas sejam protegidas de mudanças bruscas de temperatura (NOGUEIRA *et al.*, 2019). Este mesmo princípio pode ser aplicado em projetos de design bioinspirados em que a utilização de materiais com capacidade térmica elevada seja um fator importante. Nesse sentido, o presente estudo de caso trata do desenvolvimento de uma garrafa térmica biônica conceitual, utilizando as propriedades de proteção térmica das inflorescências-tanque de bromélias como característica inovadora.

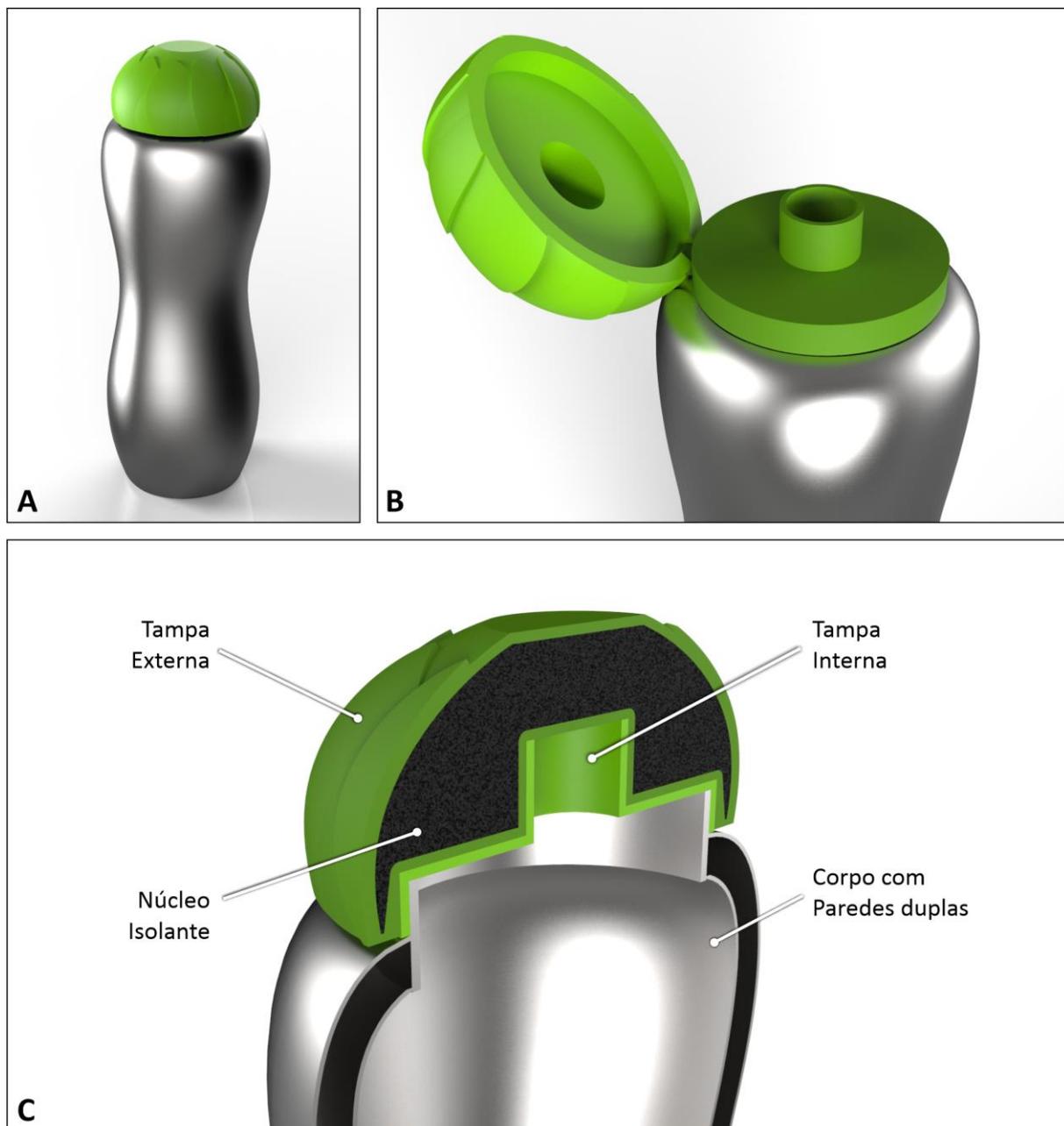
### **4.2.1 Projeto da garrafa térmica bioinspirada**

#### **4.2.1.1 Modelagem 3D**

A figura 55 apresenta uma representação visual da garrafa conceitual bioinspirada na capacidade de isolamento e proteção térmica da inflorescência-tanque de bromélias. A garrafa projetada (figura 55A) consiste em um corpo metálico com uma tampa polimérica com geometria com padronização de repetição de formas inspirada na inflorescência. O principal

diferencial da tampa (figura 55B) diz respeito ao fato de consistir em uma forma sólida, ao invés de oca. Na figura 55C é apresentada uma vista em corte da parte superior da garrafa.

Figura 55 – Projeto de garrafa térmica conceitual bioinspirada na inflorescência-tanque de bromélias: (A) aparência externa; (B) detalhe da abertura da tampa; (C) vista em corte com detalhes dos componentes.



FONTE: Autor (2020).

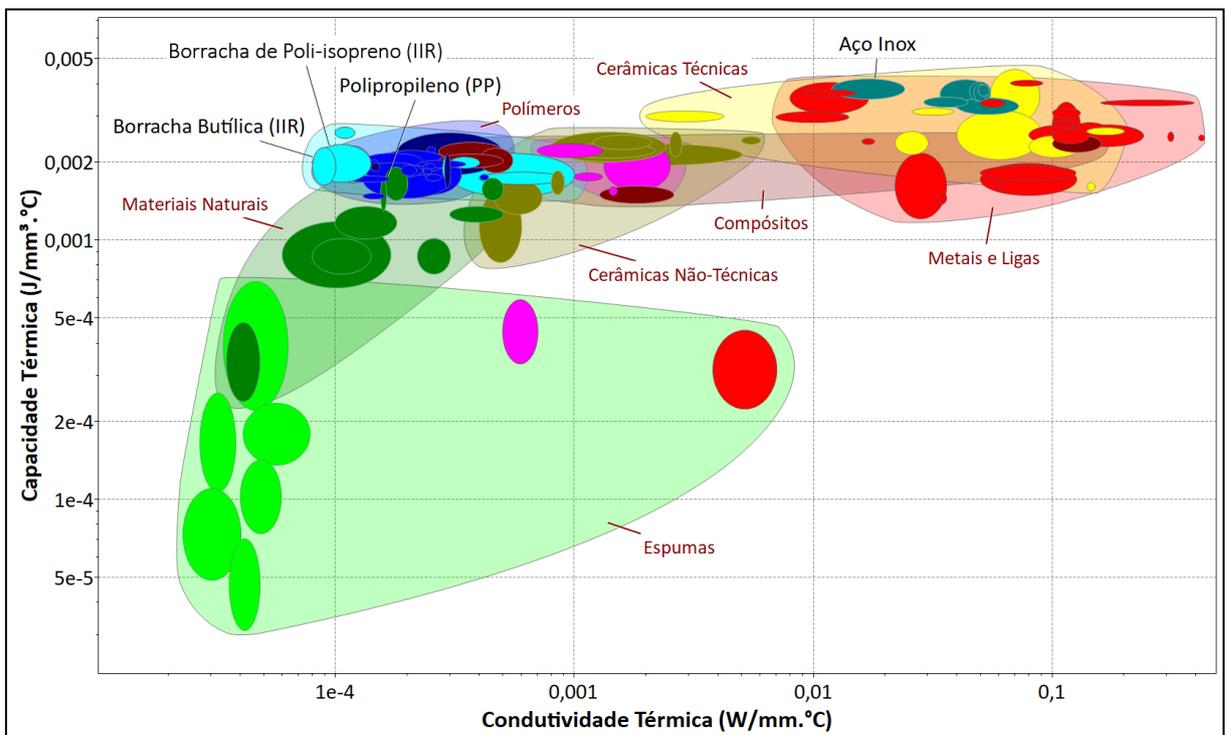
Como característica do conceito bioinspirado na inflorescência-tanque, a tampa externa possui, em seu interior, um material aplicado como núcleo. Conforme sua analogia na natureza, o objeto do núcleo é fornecer uma região com maior isolamento térmico à tampa. Para isto, objetiva-se que esta região possua atributos de maior calorimetria e baixa condutividade.

Já na parte inferior foi aplicada uma solução de projeto já conhecida na indústria, de modo que o corpo metálico foi projetado com paredes duplas, com isolamento constituído de uma região a vácuo. A garrafa conceitual foi modelada no *software* Rhinoceros® 3D (McNeel®, Seattle, EUA) e renderizada no *software* KeyShot® (Luxion® Inc., Tustin, CA, EUA).

#### 4.2.1.2 Seleção de materiais

Para uma correta avaliação do desempenho da garrafa térmica, bem como validação de sua proposta de tampa isolante, é de grande importância, além do desenvolvimento de uma solução formal, a escolha dos materiais mais adequados para se obter o efeito desejado. Nesse sentido, foi realizada um processo de seleção de materiais, para identificar os principais candidatos a serem utilizados no projeto. Para isso foi criado um mapa de seleção de materiais (*materials selection chart*) no *software* CES Edupack™ (Granta® Design Ltd., Cambridge, Reino Unido), visto na figura 56, em escala logarítmica.

Figura 56 – Mapa de seleção de materiais do *software* CES Edupack™ de condutividade térmica em função de capacidade térmica com materiais candidatos para aplicação no projeto da garrafa térmica conceitual.



FONTE: Autor (2020).

Para evitar excessos de detalhamento técnicos além dos objetivos deste estudo de caso, foi escolhido o nível 2 (*level 2*) de informações sobre os materiais, no CES Edupack™. Conforme

o interesse principal do estudo, em especial à seleção de materiais para utilização na região do núcleo da tampa externa, foram selecionadas duas variáveis relacionadas a propriedades térmicas. No eixo da abscissas, foi aplicada a propriedade de condutividade térmica adaptada para milímetros ( $W/mm \cdot ^\circ C$ ), em que o desejável, obviamente, são materiais com valores menores. Já no eixo das ordenadas, foi incluída a propriedade de capacidade térmica, também modificado para milímetros ( $J/mm^3 \cdot ^\circ C$ ), sendo que, por sua vez, desejou-se materiais com maiores valores. É importante destacar que o *software* possui como padrão a presença de capacidade térmica específica ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ), em que é levada em consideração a massa do material. Uma vez que a região do núcleo já possui uma forma especificada no projeto e, portanto, um volume final já definido, a propriedade de capacidade térmica específica foi multiplicada pela densidade no *software*, resultando em uma associação de calorimetria por volume de material a ser aplicado.

O mapa possui a presença de envelopes de famílias de materiais, definidas como espumas, materiais naturais, polímeros, cerâmicas técnicas e não-técnicas, compósitos e metais e ligas, sendo destacados alguns materiais. Para o corpo de paredes duplas com isolamento a vácuo, em virtude da sua consolidação no estado da arte para este tipo de aplicação, foi selecionado o aço inox. O material, apesar de ser um baixo condutor térmico, possui uma alta calorimetria, ou seja, necessita de uma grande quantidade de energia para aumentar sua temperatura em  $1^\circ C$ , além de possuir boas propriedades de processabilidade. Para o material das tampas externas e internas, também conforme encontrado em similares, foi escolhido o polipropileno (PP), que é considerado um bom isolante térmico com relativa calorimetria.

Para o material do núcleo, buscou-se alternativas que possuíssem simultaneamente baixas propriedades de condutividade térmica, juntamente com uma alta capacidade térmica. Duas alternativas de elastômeros destacaram-se, a borracha de poli-isopreno e a borracha butílica. O poli-isopreno é a substância química que forma a borracha, sendo encontrada comercialmente, em sua maior parte, como borracha natural, derivada do látex – uma emulsão aquosa de poli-isopreno e de outras substâncias (GROOVER, 2012; TEEGARDEN, 2004). Já borracha butílica é um material sintético com propriedades semelhantes às de borracha natural (ASHBY; JOHNSON, 2011), sendo uma copolimerização de isobutileno (cerca de 98% a 99%) e de isopreno, e podendo ser vulcanizada para diminuir sua permeabilidade ao ar, com diversas aplicações industriais (GROOVER, 2012). De modo geral, os dois elastômeros são semelhantes tanto em propriedades térmicas quanto em aplicações industriais e, portanto, ambos

foram considerados para aplicação como material do núcleo da tampa da garrafa, antes da definição dos materiais finais utilizados no decorrer dos testes por elementos finitos.

#### 4.2.1.3 Análise térmica por Elementos Finitos

Para verificar a capacidade de isolamento da tampa da garrafa, bem como para validar o projeto biônico inspirado na inflorescência-tanque, foi realizada uma análise por elementos finitos de transferência de calor (*heat transfer*). Para isso, o modelo desenvolvido foi exportado para o formato STL binário no Rhinoceros® 3D. Utilizando uma divisão em *layers*, cada material diferente da garrafa foi exportado como arquivo binário independente. Os arquivos binários foram discretizados no *software* gratuito Gmsh (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009), sendo exportados em formato INP para o *software* Abaqus CAE, com uma malha do tipo *C3D4*. Conforme visto no estudo de caso do tópico 3.3, os arquivos precisaram ser abertos em um editor de texto para ajustar a codificação do tipo de malha para *DC3D4*, a qual é aplicada em análises de transferência de calor.

Os arquivos ajustados em extensão INP foram abertos no Abaqus/CAE para a realização de três análises comparativas de transferência de calor, com o objetivo de comparar os efeitos propostos no design da garrafa térmica bioinspirada na inflorescência-tanque. Com base nos estudos de seleção de materiais, diferentes propriedades termofísicas foram aplicadas a cada geometria da garrafa, com base em seu respectivo material. A tabela 5 apresenta as propriedades constitutivas utilizadas nas análises em que o aço inox foi aplicado ao corpo da garrafa e o polipropileno nas tampas interna e externa. As borrachas de poli-isopreno e butílica foram avaliadas quanto à sua eficiência como material de núcleo no interior da tampa externa. Já uma versão de controle, *i.e.*, sem a adição de um material de núcleo termoisolante no interior da tampa, também foi avaliada, incluindo as propriedades do ar como material.

Os modelos foram projetados utilizando a escala de milímetros como referência, deste modo as unidades aplicadas no Abaqus/CAE foram definidas nesta grandeza. Do mesmo modo que no estudo de caso anterior, as temperaturas foram substituídas das unidades originais do SI de Kelvin para graus Célsius para facilitar a visualização dos resultados, portanto a temperatura do zero absoluto foi definida no *software* de elementos finitos como  $-273,15$ .

Para cada análise realizada de transferência de calor, dois passos (*steps*) foram criados no Abaqus/CAE, um de estado estacionário (*steady-state*) e um transiente (*transient*). O pri-

meiro estabelece a temperatura homogênea inicial de 20 °C para a totalidade do modelo, com uma duração de 1 s. Já o segundo passo representou a aplicação de uma fonte de temperatura uniforme com magnitude de 1 no interior da garrafa durante 500 s, para avaliar a capacidade de isolamento ou transferência dos materiais envolvidos. Para uma modificação gradual da temperatura, foi definida uma amplitude durante o tempo total da análise, utilizando a opção rampa (*ramp*). De maneira diferente das análises realizadas no capítulo 3.3, este estudo de caso utilizou a adição de uma temperatura baixa no interior da garrafa, simulando a adição de um líquido frio, cuja temperatura variou de 2,5 °C até chegar à temperatura ambiente definida previamente de 20 °C.

Tabela 5 – Propriedades termofísicas para a análise de transferência de calor.

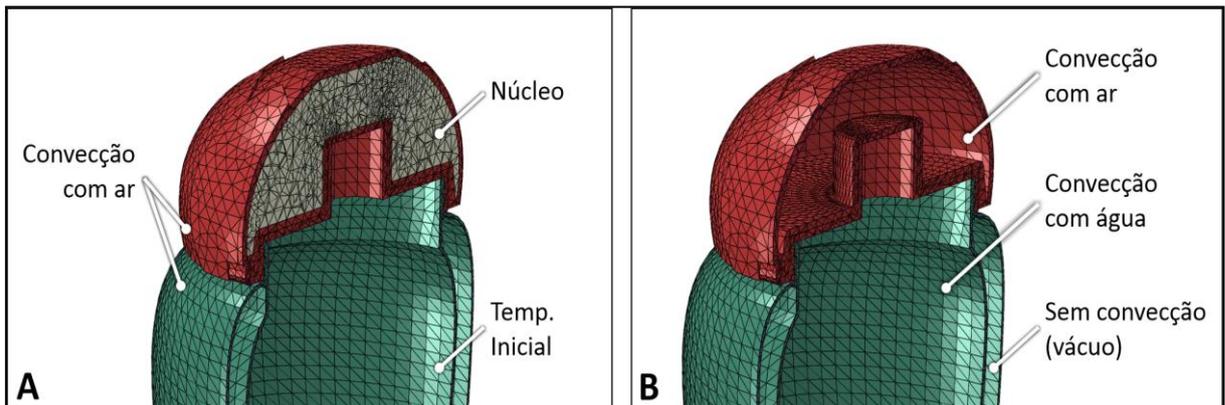
<b>Material</b>	<b>Condutividade térmica (<math>W/mm^{\circ}C</math>)</b>	<b>Calor específico (<math>J/kg^{\circ}C</math>)</b>	<b>Densidade (<math>kg/mm^3</math>)</b>
Ar	2,00E-05	1,01E+03	1,10E-09
Aço Inox	6,00E-02	4,82E+02	7,80E-06
Polipropileno (PP)	2,20E-04	1,68E+03	9,00E-07
Borracha de poli-isopreno	1,10E-05	2,15E+03	9,35E-07
Borracha butílica	9,00E-06	2,15E+03	9,10E-07

FONTE: Adaptado de CES Edupack™ (Granta® Design Ltd., Cambridge, Reino Unido).

Novamente adaptando do estudo de caso anterior, estas análises incluíram a aplicação de propriedades de interação térmica entre as regiões/materiais avaliados. Para o interior da garrafa, sendo preenchido por água, uma condição de filme superficial (*surface film condition*) de  $6,05 \times 10^{-5} W/mm^2 \text{ }^{\circ}C$  foi definida para os respectivos nós, e para a região externa da garrafa em contato com o ar, ou para a região da tampa externa sem a presença de núcleo, foi definida uma condição de filme de  $1,5 \times 10^{-5} W/mm^2 \text{ }^{\circ}C$ . Estes valores representam os valores gerais de coeficientes de transferência de calor livre por convecção da água e do ar, respectivamente (KREITH; BLACK, 1980). As superfícies internas das paredes duplas do corpo da garrafa foram mantidas sem condição de interação por convecção, simulando uma situação de vácuo, conforme proposto pelo modelo. Já as demais regiões não foram afetadas por estas propriedades de interação, representando, assim, uma transferência de calor natural entre cada material definido bem como uma troca de calor com o ambiente. A figura 57 apresenta um resumo das condições de contorno atribuídas aos modelos com (figura 57A) e sem (figura 57B) a presença do núcleo. Em ambos os modelos existe a convecção com ar externa, a adição

de uma temperatura inicial e uma convecção com água no interior da garrafa, bem como a ausência de convecção (vácuo) entre as paredes duplas internas do corpo da garrafa. Como diferença tem-se a transferência de calor por meio de convecção com ar no interior da tampa externa, quando da ausência do núcleo (figura 57B), e por meio do próprio material do qual o núcleo é constituído, quando ele é presente (figura 57A).

Figura 57 – Condições de contorno atribuídas às análises da garra térmica (A) com e (B) sem a presença do núcleo.



FONTE: Autor (2020).

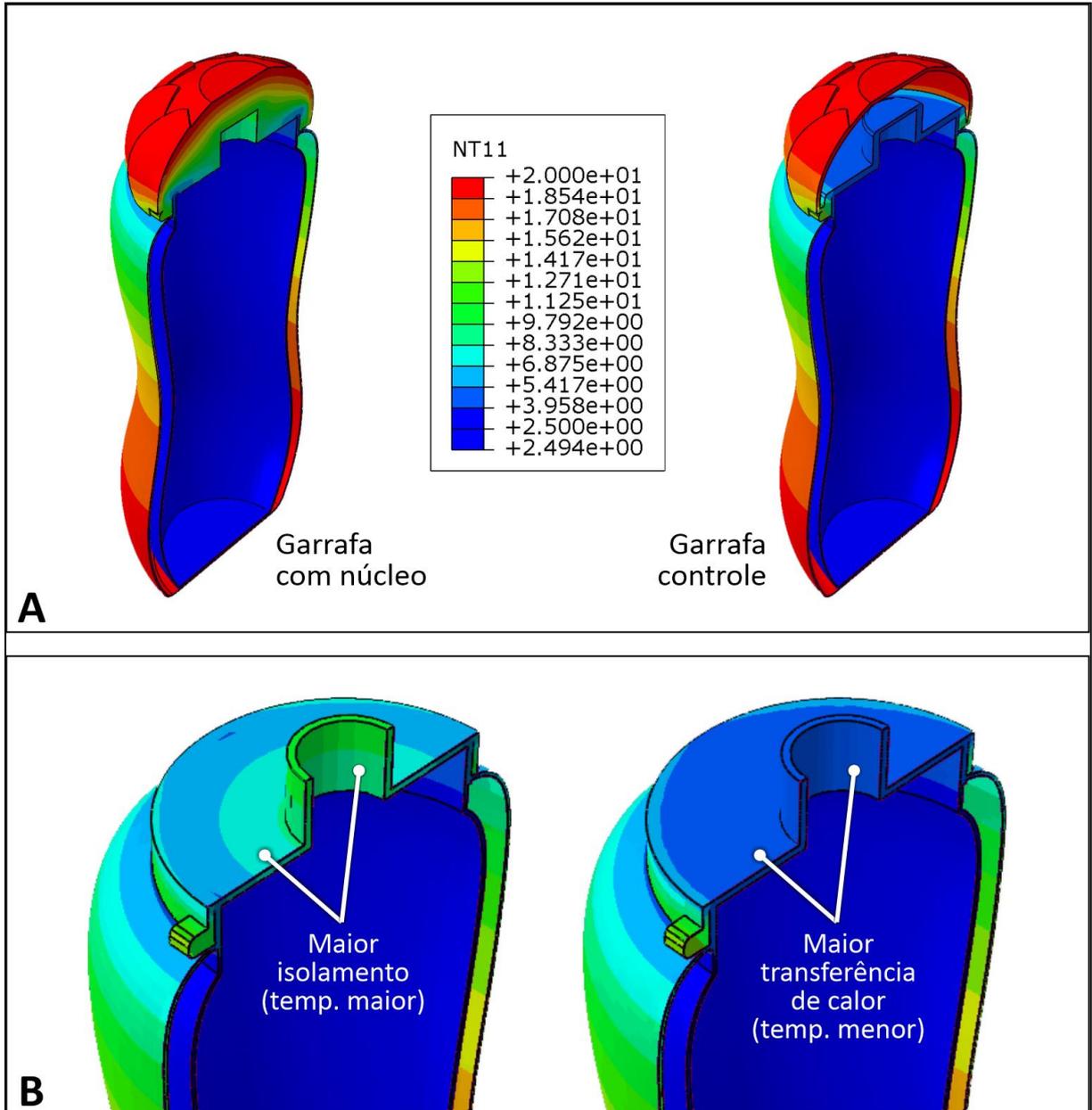
#### 4.2.2 Resultados e discussão

Após a realização das análises, foi avaliado qual dos materiais selecionados como opção para aplicação no núcleo obteve o melhor desempenho, sendo escolhido o da borracha de poli-isopreno. Apesar de os resultados terem sido semelhantes entre os dois materiais elastômeros pré-selecionados, a borracha de poli-isopreno apresentou uma capacidade de isolamento de temperatura superior, de modo a permitir uma menor transferência de calor do interior da garrafa ao exterior. O desempenho ligeiramente melhor entre os materiais reflete os resultados do mapa de seleção de materiais (figura 56), em que ambos também se encontram próximos, apesar do poli-isopreno possuir uma menor condutividade térmica, ao passo que possui uma calorimetria ainda menor.

Os resultados da análise de transferência de calor da garrafa térmica desenvolvida podem ser visualizados na figura 58. Novamente, devido aos resultados semelhantes entre os dois materiais elastômeros, apenas os resultados com o núcleo de poli-isopreno são apresentados. As imagens consistem em uma visualização em corte da garrafa com o projeto desenvolvido da tampa bioinspirada na inflorescência-tanque de bromélias em comparação com uma garrafa controle, *i.e.*, sem a presença de um elemento de núcleo termoisolante (figura

58A). Os resultados são apresentados utilizando a escala linear correspondente à temperatura registrada em cada nó (*nodal temperature*, ou NT11).

Figura 58 – Resultados da análise de transferência de calor da garrafa térmica desenvolvida: (A) vista em corte da garrafa com núcleo e da garrafa controle (sem núcleo); (B) detalhe da região do corpo e da tampa interna, mostrando um maior isolamento da garrafa com núcleo.



FONTE: Autor (2020).

Ao avaliar a garrafa inteira (figura 58A), como esperado, observa-se que o corpo não apresentou nenhuma diferença de temperatura nodal entre um modelo e o outro, quando o a temperatura do interior da garrafa está em 2,5 °C e o exterior está em 20,0 °C. Contudo observa-se que a tampa com a adição do elemento de núcleo apresenta um gradiente bas-

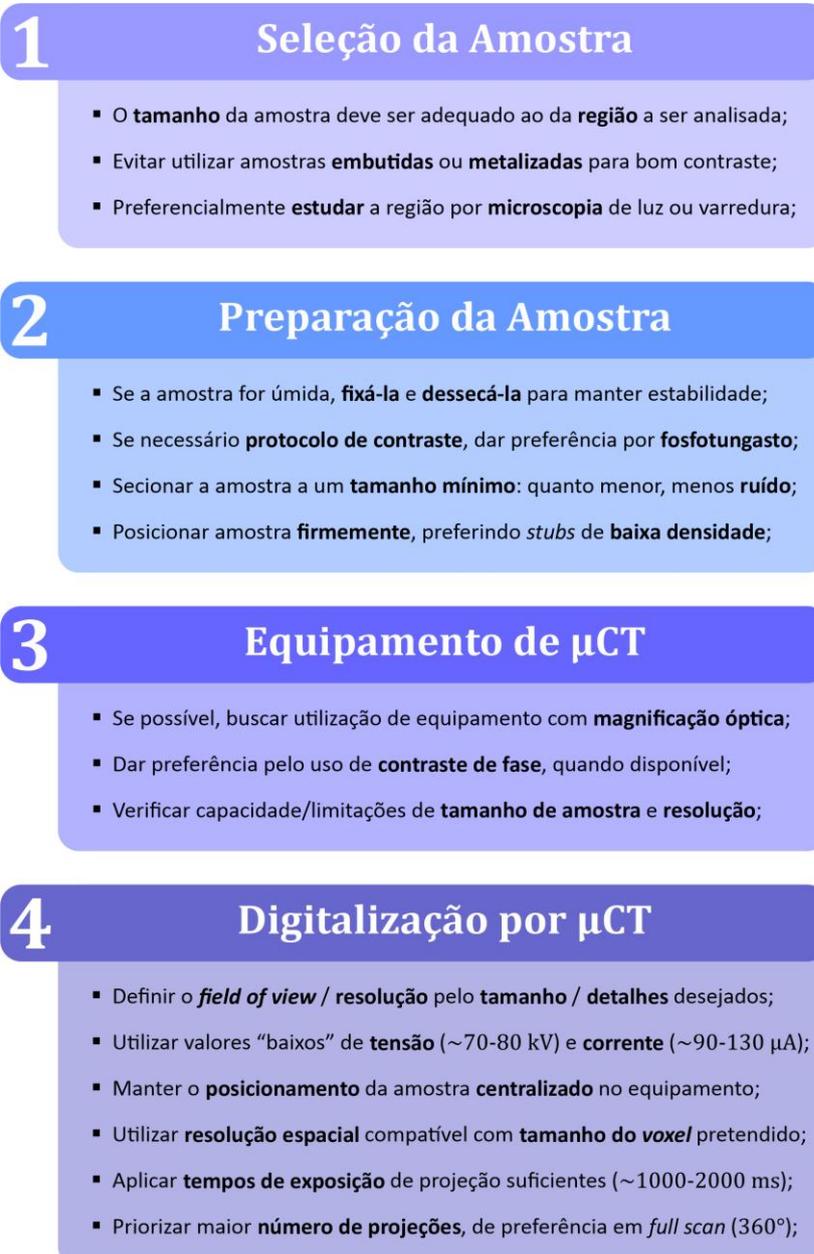
tante pronunciado entre a temperatura no interior e do exterior. Ao avaliar em detalhe da região da tampa inferior apenas (figura 58B), a qual fica em contato mais próximo com o líquido gelado em seu interior, é possível observar que a garrafa com núcleo resultou em temperaturas externas cerca de  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  maiores em comparação, demonstrando uma menor transferência de calor em comparação com a garrafa controle, sem núcleo. Já na garrafa controle, praticamente todos os nós da tampa interna já se encontravam com a temperatura nodal mais fria, igual à do líquido em seu interior. Isso significa que a adição do elemento de núcleo aumentou a capacidade de isolamento da tampa da garrafa, diminuindo a transferência de calor para a tampa da garrafa, o que mantém seu interior mais frio por mais tempo.

É importante ressaltar que apesar da parte externa de ambas as tampas (modelos com e sem núcleo) encontrar-se com tons vermelhos (mais quente), isso não significa que ambos resultaram de maneira semelhante. No início das análises, todos os elementos tiveram seus nós modificados para possuírem a mesma temperatura externa de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Assim, como o seu material (polipropileno) não é um bom condutor, mesmo após a adição do líquido frio (como visto na figura 58A), a tampa externa da garrafa controle também apresenta pouca variação na sua temperatura. Contudo, avaliando seu interior, observa-se que a temperatura parece mais isolada na garrafa com núcleo, levando a um menor ganho de calor do exterior para a região interna.

## 5 DIRETRIZES GERAIS PARA UTILIZAÇÃO DE $\mu$ CT E FEA EM MATERIAIS VEGETAIS

Este capítulo propõe a apresentação de diretrizes gerais voltadas às técnicas de análises por elementos finitos (FEA) baseadas em imagens de microtomografia de raios X ( $\mu$ CT) de materiais de origem vegetal, e que contenha meios para auxiliar pesquisadores não especializados a realizá-las. Inicialmente, a figura 59 apresenta as diretrizes gerais relacionadas às etapas de seleção e preparação da amostra, dados sobre equipamento e digitalização de  $\mu$ CT.

Figura 59 – Diretrizes gerais das etapas de seleção e preparação de amostra de origem vegetal, dados sobre equipamentos e digitalização por  $\mu$ CT.



A etapa de seleção da amostra vegetal baseia-se principalmente na avaliação da relação entre o tamanho da amostra a ser digitalizada por  $\mu$ CT e o da região de interesse (ROI) a ser analisada. Além de prevenir o espalhamento desnecessário de raios X e a consequente diminuição da resolução final, utilizar amostras não maiores que o necessário permite uma maior estabilidade no equipamento, ao ser rotacionada entre cada projeção. De maneira similar, é importante evitar o uso de amostras emblocadas ou metalizadas para que não haja modificações na absorção da radiação, o que levaria a perdas no contraste. Por fim, é também interessante estudar previamente as amostras vegetais por microscopia de luz ou varredura, tanto por se tratar de técnicas geralmente mais acessíveis, quanto por permitirem identificar melhor quais são as regiões de interesse.

Na fase seguinte, apesar da digitalização por  $\mu$ CT necessitar de pouca preparação, existe a necessidade de manter a amostra estável durante toda a análise. Desse modo, no caso da amostra for úmida e, portanto, possuir o risco de secar e se movimentar entre as projeções, torna-se interessante fixá-la e dessecá-la. Com relação a protocolos de contraste, caso sejam necessários, recomenda-se a preferência pelos baseados em ácido fosfotúngstico, por permitirem boa penetração e não danificarem a amostra. Novamente, ao secionar a amostra para preparação, é importante deixar um tamanho mínimo, de maneira que quanto menor o volume a ser atenuado por radiação, menores serão os desvios e, conseqüentemente, menor será o ruído nas imagens finais. Já com relação à fixação da amostra, é importante que ela esteja firmemente posicionada no *stub*, para evitar movimentação. Além disso, para amostras mais delicadas que exijam mais apoio, é preferível a aplicação de *stubs* de materiais com baixa densidade para não influenciar a aquisição, tais como papelão, espumas poliméricas etc.

Com relação aos equipamentos de  $\mu$ CT, obviamente, conforme a disponibilidade, é preferível escolher os que possuem algum tipo de magnificação óptica. Como visto, diferentemente da magnificação puramente geométrica, a óptica apresenta uma melhor relação entre sinal e ruído (SNR), levando a imagens finais mais bem definidas. Da mesma forma, sempre que possível, é interessante optar por equipamentos que possuam contraste de fase, principalmente por se tratar de amostras vegetais, com pouca diferença de densidade. Por fim, é sempre interessante avaliar quais são as capacidades e limitações do equipamento de  $\mu$ CT quanto ao tamanho da amostra e resoluções suportadas com relação aos objetivos do estudo.

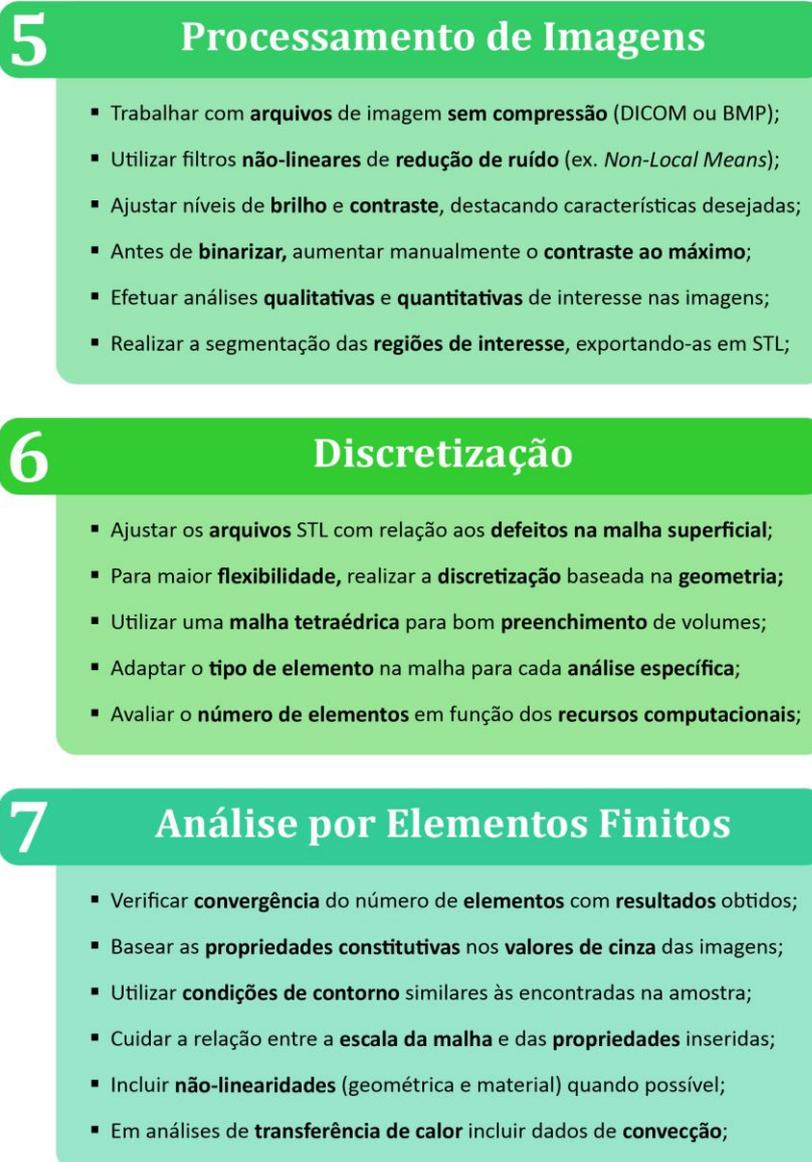
Já à fase de digitalização, a principal relação diz respeito ao campo de visão (FoV) e a resolução pretendida. Quanto maior o FoV maior será o tamanho da região analisada, contudo

provavelmente menor será a resolução devido às limitações do equipamento. Desse modo é essencial avaliar o tamanho da ROI com relação aos detalhes desejados de se observar. Em seguida, na seleção de parâmetros, para amostras vegetais é comum a aplicação de valores relativamente baixos de tensão ( $\sim 70 - 80 \text{ kV}$ ) e corrente ( $\sim 90 - 130 \mu\text{A}$ ), em virtude da baixa densidade das amostras, para se obter bons detalhes com pouco ruído. Já ao posicionar a amostra no equipamento, é importante coincidir o seu centro com o centro do local de rotação da projeção. Ao utilizar magnificação geométrica, a resolução espacial nem sempre é compatível com o tamanho do *voxel*; *i.e.*, muitas vezes as imagens resultantes possuem um valor pequeno de tamanho de *voxel*, mas não apresentam boa definição, com resolução espacial prejudicada. Desse modo, para evitar imagens desnecessariamente grandes, é importante verificar a relação entre a resolução com o tamanho efetivo do *voxel*. Com relação aos tempos de exposição, de maneira geral, para amostras vegetais tem como suficiente os valores entre 1000 e 2000 *ms*, mantendo o maior número possível de projeções, sempre que possível em *full scan*, em que a amostra gira  $360^\circ$  durante as projeções.

A figura 60 apresenta as diretrizes gerais correspondentes às etapas de processamento de imagens obtidas do equipamento de  $\mu\text{CT}$ , processos de discretização, e das análises por elementos finitos (FEA). Ao trabalhar com imagens sequenciais de microtomografia, para evitar a presença de artefatos, é essencial trabalhar com formatos de arquivos que não possuam compressão, tais como DICOM ou BMP. Desse modo, os ruídos naturais presentes nas imagens podem ser reduzidos com o uso de filtros. Preferencialmente, deve-se preferir a utilização de filtros não-lineares, como o *Non Local Means*, uma vez que eles possuem algoritmos mais sofisticados para identificar as regiões de detalhes e suavizar as regiões com ruídos. Em seguida, parte-se para ajustes de brilho e contraste, de modo a destacar as características desejadas. Já anteriormente à binarização, é importante que os ajustes de brilho e contrastes sejam realizados de maneira manual: aumentando-se o contraste ao máximo, e ajustando o valor do brilho até as características desejadas estarem claramente visíveis. Por outro lado, se a binarização for conduzida de maneira automática, o *software* definirá os valores de brilho automaticamente, o que poderá levar à perda de detalhes. Com as imagens binarizadas, é possível a realização de análises tanto qualitativas quanto quantitativas, como contagem de células, dimensionamentos gerais, volumetria etc. Em seguida, as diversas ROIs podem ser segmentadas, contudo o processo provavelmente deve ser realizado de maneira manual, em virtude da baixa densidade entre os diferentes tecidos. Por fim, cada ROI segmentada pode

ser exportada como um arquivo 3D superficial, em extensão STL.

Figura 60 – Diretrizes gerais das etapas de processamento de imagens, discretização e análises por elementos finitos de amostras vegetais digitalizadas por  $\mu$ CT.



FONTE: Autor (2020).

A partir dos arquivos STL exportados, é necessário realizar ajustes nas malhas superficiais relacionados a defeitos comumente encontrados, tais como a orientação uniforme dos triângulos constituintes, a presença de “buracos” na malha, ou elementos da mesma estarem se sobrepondo. Com os arquivos STL ajustados, parte-se efetivamente para a etapa de discretização. Como visto, os dois métodos principais são baseados na geometria e em *voxel*, sendo que o primeiro, apesar de requerer mais etapas, oferece uma maior flexibilização tanto de tipos de análises que podem ser feitas quanto de parâmetros que podem ser inseridos no

sistema. Dentre os tipos de malha, é preferível a utilização de elementos tetraédricos, que oferecem uma capacidade maior de preenchimento e adaptação a diferentes geometrias mais orgânicas como de amostras vegetais, além de permitirem ser refinadas em regiões de maiores detalhes. Outro ponto importante a ser verificado é a possível necessidade de adaptação dos tipos de elementos da malha para a análise a ser realizada. Por exemplo, após a exportação para um tipo padrão de elemento tetraédrico para análises mecânicas, o arquivo da malha pode requerer sua modificação para análises de transferência de calor; nesse caso, o documento pode ser aberto em um editor de texto para alteração do tipo de elemento específico. Por fim, e, talvez, uma das mais importantes etapas do processo de discretização baseada na geometria é avaliar o número de elementos utilizado para discretizar uma geometria, em função dos recursos computacionais disponíveis e dos objetivos da análise. Por um lado, ao diminuir o tamanho dos elementos é possível preencher com mais exatidão os detalhes de uma determinada geometria mais complexa, entretanto isso também leva a um aumento significativo do número de elementos e, conseqüentemente, dos recursos computacionais necessários para executar a futura análise. Desse modo é de grande importância ponderar estas variáveis para que a análise seja geometricamente representativa.

Ao realizar a configuração da FEA, o número de elementos de malha utilizados também é importante para verificar a convergência nos resultados obtidos. De modo geral, novamente, quanto mais elementos a malha possuir, teoricamente mais precisos tenderão a ser os resultados de cada análise. Entretanto, muitas vezes a diminuição dos números de elementos não apresentaria uma diferença tão significativa entre os resultados, permitindo que uma mesma análise possa ser conduzida com uma malha mais simplificada. Portanto, verificar a convergência entre o número de elementos e os resultados obtidos é um meio para balancear a precisão dos resultados com os recursos computacionais necessários. Com relação às propriedades constitutivas, principalmente em análises estruturais, é bastante importante basear-se nas propriedades dos níveis de cinza da pilha de imagens de  $\mu$ CT.

Como visto, para análises de plantas com característica estrutural de interesse, como o bambu, a utilização de modelos numéricos para relacionar as características físicas da amostra com suas propriedades constitutivas. Já para as condições de contorno, é importante também verificar os meios em que a ROI discretizada está inserida. A exemplo, se a região foi recortada do interior de uma amostra maior, ela precisa ser apropriadamente restringida em movimento. Como os arquivos de malha não apresentam unidades definidas, é essencial verificar

a escala com que o arquivo STL inicial foi exportado (com unidades em *mm* ou  $\mu m$ ), para que as propriedades constitutivas inseridas no *software* de FEA sejam proporcionais. Já com relação à complexidade e maior realismo das análises, é recomendável a adição de não-linearidades no sistema, principalmente a geométrica e material. Por fim, em análises de transferência de calor, é fundamental incluir valores de convecção apropriados quando no caso de existir trocas de calor com o ambiente.

Além das etapas essenciais descritas anteriormente, a figura 61 apresenta uma lista de dicas gerais que são importantes para pesquisadores utilizarem as técnicas de  $\mu$ CT e FEA em amostras vegetais. Antes de tudo, é sempre recomendável buscar referências na literatura que já utilizaram essas análises em amostras ou equipamentos similares, quando existentes. Desse modo, é possível balizar a escolha de protocolos e parâmetros com ainda mais precisão a serem utilizados nas pesquisas. Outro ponto importante é avaliar com cuidado quais são as amostras a serem digitalizadas por  $\mu$ CT e, principalmente, quantas serão. A principal razão é o custo de cada análise, de modo que a microtomografia geralmente não é uma técnica comumente associada com repetição (em uma mesma amostra) ou mesmo com análises em muitas amostras.

Figura 61 – Dicas gerais importantes da utilização das técnicas de  $\mu$ CT e FEA em amostras vegetais.

## 8

### Dicas Importantes

- Buscar estudos na **literatura** sobre **protocolos** e **parâmetros** já utilizados em **amostras similares**, para auxiliar nas novas análises;
- Escolher bem **quais são** as amostras e principalmente **quantas são**;
- Levar **informações sobre amostra** (densidade, regiões de interesse, etc.);
- Registrar os **parâmetros utilizados** para posterior análise/publicação;
- Portar **HD externo** com bastante **espaço disponível** (>1TB) para transportar as **pilhas de imagens** sem compressão de  $\mu$ CT;
- Se possível, dispor de **workstation** com bastante **memória RAM** (>64 GB) e bom poder de **processamento**;
- Usufruir de **softwares** de uso **gratuito** ou de **acesso aberto**, como para **edição de imagens** de  $\mu$ CT (Fiji) e **discretização** (Gmsh);
- Quando possível, comparar **a grandeza dos valores** dos resultados obtidos pelas análises **numéricas** com os de **experimentais**;

Outro ponto a ser considerado, principalmente para pesquisadores de áreas diversas, é levar informações sobre as amostras a serem digitalizadas nos centros de pesquisa em que o equipamento de  $\mu$ CT se encontra. Tais dados incluem, por exemplo, valores de densidade, principais elementos químicos constituintes, localização das regiões de interesse, além, é claro, de uma aproximação dos parâmetros gerais de aquisição (tensão, corrente, aplicação de filtros etc.) para auxiliar o processo de digitalização. Em contrapartida, é também essencial registrar todos os parâmetros que efetivamente foram utilizados na aquisição por  $\mu$ CT, para posterior análise ou publicação dos resultados.

Como as imagens sequenciais são trabalhadas em formato sem compressão, as imagens tendem a possuir um grande tamanho. Além de serem armazenadas as imagens originais da aquisição, muitas vezes são realizados mais de um tomo, ou mais de uma sequência de digitalização, em uma mesma amostra. Somando-se às imagens originais das projeções de raios X geralmente disponibilizadas ao pesquisador, bem como à presença de mais de uma amostra, é fácil alcançar grandes espaços. Desse modo, é recomendável portar HD externo com um espaço disponível considerável, com cerca de 1 *TB* ou mais. Além de espaço para transporte das imagens sequenciais, o computador de trabalho também precisa possuir uma quantidade significativa de recursos computacionais disponíveis, principalmente poder de processamento (CPU) e memória RAM. Como exemplo, em uma série de imagens em que cada fatia é uma imagem em 8-bit, sem compressão, com resolução de  $4000 \times 4000$  *pixels*, tem-se um tamanho final de mais de 15 *MB*. Com uma pilha de imagens de cerca de 4000 fatias, a sequência possuirá cerca de 60 *GB* e, conseqüentemente, torna-se necessária uma *workstation* com 65 *GB* de memória ou mais. Desse modo, muitas vezes faz-se necessário dividir a pilha de imagens em sequências de 1000 fatias, por exemplo, para ajustá-las aos poucos.

Outro ponto de grande importância para pesquisadores é ter o conhecimento e saber trabalhar com alternativas gratuitas de *softwares*. Como grande exemplo, tem-se o *software* de acesso aberto Fiji, uma distribuição do ImageJ, que é capaz de carregar ajustar e editar pilhas de imagens sequenciais de  $\mu$ CT. Acima de tudo, uma das principais vantagens é permitir a inclusão de *plugins* diversos, também de código aberto, para redução de ruído, seleção, segmentação, visualização e exportação. Outro exemplo é o *software* de uso gratuito Gmsh, que possui uma robusta ferramenta de discretização de volumes STL em malhas, com capacidade de exportação para uma série de suítes de aplicativos de FEA.

Por fim, ao se trabalhar com FEA baseadas em imagens de  $\mu$ CT, sendo uma análise nu-

mérica, tem o contraponto de resultados de ensaios experimentais. Desse modo, ao conduzir um estudo com estas técnicas, sempre que possível, é interessante comparar os resultados com ensaios realizados experimentalmente, seja pelos próprios autores ou por estudos similares da literatura. Contudo, ainda mais importante, é verificar se a própria grandeza dos resultados obtidos numericamente corresponde à escala esperada experimentalmente. Desse modo é possível ter um maior grau de certeza de que as análises estão precisas e, portanto, foram executadas de uma maneira correta.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Análises por Elementos Finitos baseadas em bioimagens de  $\mu$ CT representam um grande potencial para estudar, analisar e prever determinados comportamentos estruturais e termo-físicos de materiais vegetais. A principal vantagem de meios numéricos é a possibilidade de realizar análises não-invasivas e de alta resolução de regiões delicadas, uma vez que ensaios com amostras físicas de tecidos individuais são consideradas mais difíceis de serem realizadas experimentalmente. A exemplo, tanto determinados tecidos congestos quanto arranjos celulares precisos de uma amostra de planta podem ser estudados, e dados de regiões discretas podem ser extraídos das  $\mu$ CT e aplicados em combinação com modelos numéricos convencionais para melhor estimar suas propriedades constitutivas. E o designer possui conhecimentos que o tornam um agente importante para realizar a ligação entre tecnologias inovadoras e demais áreas de conhecimento.

Como visto na fundamentação teórica e exemplificado no decorrer dos estudos de caso, algumas etapas são consideradas fundamentais para uma análise adequada utilizando FEA baseada em imagens de  $\mu$ CT para amostras vegetais. Devido à interdisciplinaridade oriunda da união das técnicas, alguns conhecimentos básicos sobre morfologia vegetal, física moderna, engenharia dos materiais e ciência da computação tornam-se importantes para a realização das análises. Neste processo de integração de áreas, pode-se destacar o conceito de pensamento educacional definido pelo STEAM, em que não apenas profissionais de diversas formações podem trabalhar de maneira conjunta, mas a própria geração de novos recursos humanos pode se beneficiar de seguir um caminho multidisciplinar na formação.

Seguindo este princípio, o principal objetivo desta tese foi pesquisar uma série de conhecimentos básicos essenciais sobre os temas de  $\mu$ CT e FEA para aplicação em amostras vegetais, para permitir o desenvolvimento de um conjunto de diretrizes gerais. Como as diretrizes são consideradas guias gerais para execução de um determinado protocolo de tarefas, objetivou-se desenvolvê-las de uma maneira direta e acessível a diferentes leitores. A partir de uma formação e pós-graduação em design, e considerando a capacidade do designer de trabalhar com diferentes campos da ciência, as diretrizes pretendem ser uma contribuição para que mais profissionais possam usufruir de tecnologias 3D de ponta para suas pesquisas científicas e industriais. Dentre as principais etapas descritas, para a realização de FEA baseadas em  $\mu$ CT de plantas, foram abordadas a seleção e preparação de amostras, a escolha de

parâmetros de digitalização, protocolos de ajuste de imagem, a discretização de modelos 3D, a definição de suas propriedades constitutivas e condições de contorno, bem como a correta avaliação dos resultados obtidos por análises estruturais e térmicas.

É importante destacar que apesar das diretrizes terem sido construídas e fundamentadas tendo como base análises de materiais de origem vegetal, a maioria das informações apresentadas também poderiam ser utilizadas diretamente para outros tipos de amostras. Entretanto, obviamente, determinados parâmetros precisariam ser adaptados, principalmente os relacionados ao processo de aquisição de imagens por  $\mu$ CT. Como a técnica está diretamente ligada à composição e, conseqüentemente, à densidade da amostra estudada, faz-se necessário que valores como tensão, corrente, tempo de exposição, FoV, número de projeções, por exemplo, sejam modificados para atender aos requisitos de diferentes amostras em um estudo pretendido. De todo modo, a recomendação geral de que uma consulta na literatura seja realizada para verificar estudos anteriores com amostras similares torna-se universal, permitindo que mais materiais sejam investigados.

### **6.1 Contribuições para pesquisa científica em materiais vegetais**

Além de auxiliar na caracterização de plantas (FORELL *et al.*, 2015; PALOMBINI *et al.*, 2016) e na validação de modelos numéricos para seu comportamento mecânico (DIXON *et al.*, 2018), abordagens combinadas de FEA com  $\mu$ CT podem ser utilizadas para estimar, por exemplo, a resistência e os modos de falha de um modelo de planta, com relação a sua estrutura celular para diversas aplicações. Por exemplo, para botânica, o comportamento de estruturas reprodutivas durante seu desenvolvimento e maturação, tais como a dispersão de pólen por anteras, poderia ser analisado mecanicamente por FEA baseada em  $\mu$ CT. Além disso,  $\mu$ CT também poderia ser aplicada junto com ensaios mecânicos de alta resolução, tais como nanoindentação (TAN *et al.*, 2011), verificando propriedades discretas para uma análise ainda mais realista. Quanto a análises termofísicas, a combinação das técnicas também apresenta potencial para outras investigações, tais como as lacunas de ar e tecidos de depósito de água (SANTOS-SILVA *et al.*, 2013) e tricomas (VERSIEUX *et al.*, 2010), os quais poderiam ser avaliados termicamente. De modo semelhante, os espinhos de Cactaceae, que estão relacionados à redução do aquecimento solar (MAUSETH, 1999), também poderiam ser beneficiados em termos de novos conhecimentos científicos com estes métodos.

Alguns estudos de caso de pesquisa em materiais vegetais foram seguidos com o objetivo de apresentar meios práticos para utilizar abordagens e metodologias diversas para estudar este tipo de material, resultando em novas compreensões sob plantas. Do ponto de vista de contribuições científicas desta tese, mostrou-se que o parênquima do bambu: (1) possui atributos de matriz celular ao dissipar tensões; e que (2) seu colapso durante compressão axial é ocasionado principalmente por flambagem da parede celular. Em regiões nodais do bambu, contendo ramificação, viu-se que: (3) os feixes vasculares marginais deixam o cilindro central para vascularizar as bainhas das folhas; (4) os feixes secundários se interlaçam nos primários, mas tendem a manter sua posição relativa original ao se dividir em novos eixos; (5) sob compressão, a planta tende a transmitir tensões axiais para os eixos secundários, a fim de preservar o meristema intercalar e, por consequência, o meristema apical do seu eixo principal. Sob a inflorescência-tanque de bromélias: (6) ao ser desprovida de água no tanque, mesmo com água no solo e nas folhas, diferentes tipos de lesões e necroses são geradas na planta; (7) a presença da água no tanque foi observada como um importante fator para regulação térmica.

## 6.2 Implicações para projetos de biônica em design e engenharia

Com a utilização das técnicas vistas como  $\mu$ CT e FEA, diversos projetos de biônica podem ser beneficiados dos estudos em materiais vegetais. Por exemplo, a cortiça, por possuir propriedades estruturais extremamente importantes (PALOMBINI *et al.*, 2020a; PEREIRA, 2015), pode ser explorada em estudos de biônica para o meio industrial, de modo que a característica celular do tecido pode ser útil no estudo de materiais auxéticos<sup>28</sup> ou com coeficiente de Poisson próximo a zero (PETIT; MEILLE; MAIRE, 2013). Por outro lado, um material vegetal com tecidos próximos de diferentes densidades, como gramíneas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010), poderia ser estudado para aplicações de espumas inteligentes, com adaptação de densidade relativa com base nas necessidades do usuário; além disso, indústrias bélicas e de segurança também podem explorar espumas com propriedades de resistência balística. Estruturas bioinspiradas na região nodal do bambu também podem ser exploradas em virtude de sua capacidade de distribuição de tensões e mecanismos de falha específicos para regiões pré-determinadas (PALOMBINI *et al.*, 2020c). Já a capacidade de armazenamento e regulação tér-

---

<sup>28</sup> Materiais com coeficiente de Poisson negativo, ou seja, em que ao serem puxados em uma direção são expandidos na direção transversal (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

mica presente na inflorescência-tanque de bromélias através da água (NOGUEIRA *et al.*, 2019) possui inúmeras aplicações, como em dispositivos de captação pluvial, no mecanismo de resfriamento de painéis fotovoltaicos, além de sistemas de massa térmica para armazenamento de calor voltados a fachadas de prédios em locais de clima frio (ASHBY, 2012; ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2012).

Para apresentar alguns exemplos de projetos de biônica em design e engenharia, outros estudos de caso também foram conduzidos com relação às características do bambu no desenvolvimento de estrutura de paredes finas, e à capacidade de regulação térmica da inflorescência-tanque na criação de uma garrafa térmica conceitual. Como contribuições de design e engenharia nesta tese foi visto que: (1) a geometria dos feixes vasculares do bambu contribuem para o comportamento mecânico geral da planta em projetos de biônica; (2) o design dos elementos de reforço de núcleo possuem uma grande influência nas propriedades de estruturas de paredes finas; (3) o uso de um padrão em X na conexão dos núcleos com as paredes finas aumenta a performance do modelo; (4) a inclusão de um material possuindo simultaneamente características de isolamento térmico e calorimetria contribui para um melhor desempenho térmico quando aplicada na tampa de uma garrafa térmica.

Considerando os estudos de caso realizados sobre pesquisa científica em materiais vegetais e sobre aplicações em projetos de biônica, é possível destacar a importância da atuação de equipes multidisciplinares no decorrer do desenvolvimento desta tese. Com diferentes conhecimentos prévios, foi possível não apenas compreender melhor tópicos distintos, mas também encontrar as principais dificuldades relacionadas a tecnologias 3D, as quais requeriam uma linguagem em comum. A partir desta motivação, com o desenvolvimento de diretrizes gerais com itens pontuais e de linguagem mais simples pretende-se ampliar a capacidade de utilização de  $\mu$ CT e FEA por diferentes profissionais. Abranger e unificar mais áreas do conhecimento é um novo caminho para permitir a realização de pesquisas de ponta e para promover a formação de recursos humanos com mais capacitações. À luz da complexidade fascinante da natureza, problemas científicos sempre podem se beneficiar de abordagens holísticas, mesclando diferentes habilitações com o estado da arte em tecnologias de análise.

## PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA TESE

- Artigos publicados em Periódicos Internacionais

PALOMBINI, F. L. *et al.* Combining numerical models and discretizing methods in the analysis of bamboo parenchyma using finite element analysis based on X-ray microtomography. **Wood Science and Technology**, v. 54, n. 1, p. 161–186, 14 jan. 2020.

PALOMBINI, F. L. *et al.* Biomimetic systems and design in the 3D characterization of the complex vascular system of bamboo node based on X-ray microtomography and finite element analysis. **Journal of Materials Research**, v. 35, n. 8, p. 842–854, 28 abr. 2020.

PALOMBINI, F. L.; MARIATH, J. E. DE A.; OLIVEIRA, B. F. DE. Bionic design of thin-walled structure based on the geometry of the vascular bundles of bamboo. **Thin-Walled Structures**, v. 155, p. 106936, out. 2020.

NOGUEIRA, F. M. *et al.* Heat transfer in the tank-inflorescence of *Nidularium innocentii* (Bromeliaceae): Experimental and finite element analysis based on X-ray microtomography. **Micron**, v. 124, p. 102714, set. 2019.

- Artigo publicado em Periódico Nacional

PALOMBINI, F. L. *et al.* Design-Aided Science: o designer como promotor de tecnologias 3D para inovação em pesquisa científica. **Revista Educação Gráfica**, v. 22, n. 3, p. 169–186, 2018.

- Capítulo de Livro publicado

PALOMBINI, F. L. *et al.* Materiais e Biônica: sob a Ótica da Análise de Elementos Finitos Baseada em Imagens de Microtomografia de Raios X. In: ARRUDA, A. J. V. (Ed.). **Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 245–260.

- Resumo publicado em Anais de Congresso

NOGUEIRA, F. M. *et al.* **The tank-inflorescence of *Nidularium*: 3D architecture and the role of water using Finite Element Analysis based on  $\mu$ CT**. MONOCOTS VI - 6th International Conference on Comparative Biology of Monocotyledons. **Anais...** Natal: Herbarium UFRN, 2018.

## REFERÊNCIAS

- AHVENAINEN, P. *et al.* Spatially-localized bench-top X-ray scattering reveals tissue-specific microfibril orientation in Moso bamboo. **Plant Methods**, v. 13, n. 1, p. 5, 9 dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-016-0155-1>
- AMADA, S. *et al.* The Mechanical Structures of Bamboos in Viewpoint of Functionally Gradient and Composite Materials. **Journal of Composite Materials**, v. 30, n. 7, p. 800–819, 27 maio 1996. DOI: <https://doi.org/10.1177/002199839603000703>
- AMANI, Y. *et al.* Thermal conductivity of highly porous metal foams: Experimental and image based finite element analysis. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 122, p. 1–10, jul. 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.050>
- AMANI, Y. *et al.* Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. **Acta Materialia**, v. 159, p. 395–407, out. 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.08.030>
- ANSARI, S.; RASHIDIAN, A. Guidelines for Guidelines: Are They Up to the Task? A Comparative Assessment of Clinical Practice Guideline Development Handbooks. **PLoS ONE**, v. 7, n. 11, p. e49864, 26 nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049864>
- ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASHBY, M. F.; FERREIRA, P. J. S. G.; SCHODEK, D. L. **Nanomaterials, nanotechnologies and design : an introduction for engineers and architects**. Burlington, EUA: Butterworth-Heinemann, 2009.
- 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.
- ASKARINEJAD, S. *et al.* Effects of humidity on shear behavior of bamboo. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**, v. 5, n. 6, p. 236–243, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.11.007>
- ATKINSON, N. J.; URWIN, P. E. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 10, p. 3523–3543, 1 jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers100>
- ATTWOOD, D. T. **Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation : principles and applications**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- AUSIELLO, P. *et al.* 3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites. **Journal of biomechanics**, v. 34, n. 10, p. 1269–77, out. 2001.
- BARNABÁS, B.; JÄGER, K.; FEHÉR, A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. **Plant, Cell & Environment**, p. 071030190532001-???, 30 out. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>
- BATCHELOR, P. G.; EDWARDS, P. J.; KING, A. P. 3D Medical Imaging. In: **3D Imaging, Analysis and Applications**. London: Springer London, 2012. p. 445–495. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4063-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4063-4_11)

- 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.
- BENZING, D. H. **Bromeliaceae profile adaptive radiation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- BEUTEL, J.; KUNDEL, H. L.; METTER, R. L. VAN (EDS.). **Handbook of medical imaging : physics and psychophysics**. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2000.
- BOLTE, S.; CORDELIÈRES, F. P. A guided tour into subcellular colocalization analysis in light microscopy. **Journal of microscopy**, v. 224, n. Pt 3, p. 213–232, dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2006.01706.x>
- BORBÉLY, A. *et al.* Submicron Tomography Using High Energy Synchrotron Radiation. In: LASAGNI, F. A.; LASAGNI, A. F. (Eds.). **Fabrication and Characterization in the Micro-Nano Range**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 151–170. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17782-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17782-8_7)
- BOYD, S. K. Image-Based Finite Element Analysis. In: **Advanced Imaging in Biology and Medicine**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009a. p. 301–318. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68993-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68993-5_14)
- BOYD, S. K. Micro-Computed Tomography. In: **Advanced Imaging in Biology and Medicine**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009b. p. 3–25. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68993-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68993-5_1)
- BRACKEN, L. J.; OUGHTON, E. A. “What do you mean?” The importance of language in developing interdisciplinary research. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 31, n. 3, p. 371–382, 1 set. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-5661.2006.00218.x>
- BRODERSEN, C. R. *et al.* Xylem vessel relays contribute to radial connectivity in grapevine stems (*Vitis vinifera* and *V. arizonica*; Vitaceae). **American Journal of Botany**, v. 100, n. 2, p. 314–321, 1 fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.3732/ajb.1100606>
- BRODERSEN, C. R.; RODDY, A. B. New frontiers in the three-dimensional visualization of plant structure and function. **American Journal of Botany**, v. 103, n. 2, p. 184–188, 1 fev. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3732/ajb.1500532>
- BROMHAM, L.; DINNAGE, R.; HUA, X. Interdisciplinary research has consistently lower funding success. **Nature**, v. 534, n. 7609, p. 684–687, 29 jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature18315>
- BUADES, A.; COLL, B.; MOREL, J.-M. Non-Local Means Denoising. **Image Processing On Line**, v. 1, p. 208–212, 13 set. 2011. DOI: [https://doi.org/10.5201/ipol.2011.bcm\\_nlm](https://doi.org/10.5201/ipol.2011.bcm_nlm)
- BUCHANAN, R. Wicked Problems in Design Thinking. **Design Issues**, v. 8, n. 2, p. 5, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2307/1511637>
- BÜRDEK, B. E. **Design : história, teoria e prática do design de produtos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.
- BURGER, W.; BURGE, M. **Digital image processing : an algorithmic introduction using Java**. London: Springer, 2016.
- BURTEAU, A. *et al.* Impact of material processing and deformation on cell morphology and mechanical behavior of polyurethane and nickel foams. **International Journal of Solids and Structures**, v. 49, n.

19–20, p. 2714–2732, out. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsostr.2012.05.026>

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. *et al.* **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

CALVERA, A. Treinando pesquisadores para o design: algumas considerações e muitas preocupações acadêmicas. **Revista Design em Foco**, v. 3, n. 1, p. 97–120, 2006.

CAVE, I. D. The Anisotropic Elasticity of the Plant Cell Wall. **Wood Science and Technology**, v. 2, p. 268–278, 1968. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00350273>

CEBRAL, J. R.; LÖHNER, R. From medical images to anatomically accurate finite element grids. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 51, n. 8, p. 985–1008, 20 jul. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.205>

CHEN, B. C. *et al.* Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing. **International Journal of Impact Engineering**, v. 115, p. 48–57, 1 maio 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.01.005>

CIDADE, M. K. *et al.* Método para determinação de parâmetros de gravação e corte a laser CO<sub>2</sub> com aplicação na joalheria contemporânea. **Design & Tecnologia**, v. 12, p. 54–64, 2016.

CIDADE, M. K. *et al.* Investigation of the thermal microstructural effects of CO<sub>2</sub> laser engraving on agate via X-ray microtomography. **Optics & Laser Technology**, v. 104, p. 56–64, ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.002>

CIDADE, M. K.; PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JÚNIOR, W. Biônica como processo criativo : microestrutura do bambu como metáfora gráfica no design de joias contemporâneas. **Revista Educação Gráfica**, v. 19, n. 1, p. 91–103, 2015.

COELHO, L. A. L. (ED.). **Conceitos-chave em design**. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio Novas Ideias, 2008.

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.

CRAWFORD, R. P. Quantitative Computed Tomography-Based Finite Element Models of the Human Lumbar Vertebral Body: Effect of Element Size on Stiffness, Damage, and Fracture Strength Predictions. **Journal of Biomechanical Engineering**, v. 125, n. 4, p. 434, 1 ago. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1589772>

CRAWFORD, R. P.; CANN, C. E.; KEAVENY, T. M. Finite element models predict in vitro vertebral body compressive strength better than quantitative computed tomography. **Bone**, v. 33, n. 4, p. 744–750, out. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S8756-3282\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S8756-3282(03)00210-2)

CRAYN, D. M.; WINTER, K.; SMITH, J. A. C. Multiple origins of crassulacean acid metabolism and the epiphytic habit in the Neotropical family Bromeliaceae. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 101, n. 10, p. 3703–8, 9 mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0400366101>

- CROSS, N. Designerly Ways of Knowing: Design Discipline Versus Design Science. **Design Issues**, v. 17, n. 3, p. 49–55, jul. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1162/074793601750357196>
- DAEHN, G. S. Sustainable design and manufacture of lightweight vehicle structures. In: **Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 433–461. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097422.2.433>
- DHONDT, S. *et al.* Plant structure visualization by high-resolution X-ray computed tomography. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 8, p. 419–422, ago. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.05.002>
- DING, Y.; LIESE, W. Anatomical investigations on the nodes of bamboos. In: SOC, L.; CHAPMAN, G. (Eds.). **The bamboos**. London: Academic Press, 1997. p. 265–279.
- DIXON, P. G. *et al.* 3D printed structures for modeling the Young's modulus of bamboo parenchyma. **Acta Biomaterialia**, v. 68, p. 90–98, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.12.036>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0321>
- DRIVER, A. J.; PERALTA, C.; MOULTRIE, J. Exploring How Industrial Designers Can Contribute to Scientific Research. **International Journal of Design**, v. 5, n. 1, p. 17–28, 2011.
- FAGAN, M. J. *et al.* Voxel-based Finite Element Analysis — Working Directly with Microct Scan Data. **Journal of Morphology**, v. 268, n. 12, p. 1071–1071, dez. 2007.
- FAHN, A. **Plant anatomy**. Fourth ed. Oxford: Pergamon Press, 1990.
- FAN, X. *et al.* Microtomography-based numerical simulations of heat transfer and fluid flow through  $\beta$ -SiC open-cell foams for catalysis. **Catalysis Today**, v. 278, p. 350–360, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.12.012>
- FARRELL, R.; HOOKER, C. The Simon–Kroes model of technical artifacts and the distinction between science and design. **Design Studies**, v. 33, n. 5, p. 480–495, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2012.05.001>
- FARRELL, R.; HOOKER, C. Design, science and wicked problems. **Design Studies**, v. 34, n. 6, p. 681–705, nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2013.05.001>
- FLYNN, M. J. *et al.* Microfocus X-ray sources for 3D microtomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 353, n. 1–3, p. 312–315, dez. 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91664-0](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91664-0)
- FONT QUER, P. **Diccionario de botânica**. Barcelona: Ed. Labor S.A., 1965.
- FORELL, G. VON *et al.* Preventing lodging in bioenergy crops: a biomechanical analysis of maize stalks suggests a new approach. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 14, p. 4367–4371, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv108>
- FU, J. *et al.* Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption. **Thin-Walled Structures**, v. 135, p. 400–413, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.10.003>
- GALLE, P.; KROES, P. Science and design: Identical twins? **Design Studies**, v. 35, n. 3, p. 201–231, maio 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2013.12.002>

GERSTERBERGER, P.; LEINS, P. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Blütenknospen von *Physalis philadelphica* (Solanaceae) Anwendung einer neuen Präparationsmethode. **Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft**, v. 91, n. 1, p. 381–387, 1 out. 1978. DOI: <https://doi.org/10.1111/J.1438-8677.1978.TB03660.X>

GEUZAINÉ, C.; REMACLE, J.-F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 79, n. 11, p. 1309–1331, 10 set. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.2579>

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. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0341>

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.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 3. ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2008.

GRACIANO, C.; MARTÍNEZ, G.; SMITH, D. Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes. **Thin-Walled Structures**, v. 47, n. 8–9, p. 953–961, 1 ago. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.02.002>

GREGORY, P. J. *et al.* Non-invasive imaging of roots with high resolution X-ray micro-tomography. **Plant and Soil**, v. 255, n. 1, p. 351–359, ago. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026179919689>

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing** : materials, processes, and systems. 5. ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

GROSS, D. *et al.* **Engineering Mechanics 2**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.

HALLINEN, J. **STEM**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/STEM-education>>. Acesso em: 16 out. 2020.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00003-1>

HARGREAVES, C. E.; GREGORY, P. J.; BENGOUGH, A. G. Measuring root traits in barley (*Hordeum vulgare* ssp. *vulgare* and ssp. *spontaneum*) seedlings using gel chambers, soil sacs and X-ray microtomography. **Plant and Soil**, v. 316, n. 1–2, p. 285–297, 27 mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9780-4>

HAYAT, M. A. (ED.). **Principles and techniques of electron microscopy** : biological applications. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

HEINZL, C.; AMIRKHANOV, A.; KASTNER, J. Processing, Analysis and Visualization of CT Data. In:

CARMIGNATO, S.; DEWULF, W.; LEACH, R. (Eds.). **Industrial X-Ray Computed Tomography**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 99–142. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3_4)

HERMANEK, P. *et al.* Principles of X-ray Computed Tomography. In: CARMIGNATO, S.; DEWULF, W.; LEACH, R. (Eds.). **Industrial X-Ray Computed Tomography**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 25–67. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3_2)

HESKETT, J. **Design**. São Paulo: Ática, 2008.

HOMMINGA, J. *et al.* Introduction and evaluation of a gray-value voxel conversion technique. **Journal of Biomechanics**, v. 34, n. 4, p. 513–517, abr. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00227-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00227-X)

HU, D. *et al.* Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing. **Composites Part B: Engineering**, v. 162, p. 21–32, abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.095>

HUANG, H.-C.; USMANI, A. S. **Finite Element Analysis for Heat Transfer : Theory and Software**. London: Springer, 1994.

HUANG, H.; XU, S. Crashworthiness analysis and bionic design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. **Thin-Walled Structures**, v. 144, p. 106333, 1 nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106333>

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.040>

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

JAKOVLJEVIĆ, S. *et al.* The influence of humidity on mechanical properties of bamboo for bicycles. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 35–48, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.189>

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

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

JAYALAKSHMY, M. S.; PHILIP, J. Thermophysical Properties of Plant Leaves and Their Influence on the Environment Temperature. **International Journal of Thermophysics**, v. 31, n. 11–12, p. 2295–2304, 21 dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0877-7>

JIANG, L. *et al.* Three-dimensional (3D) microstructural characterization and quantification of reflow porosity in Sn-rich alloy/copper joints by X-ray tomography. **Materials Characterization**, v. 62, n. 10, p. 970–975, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.07.011>

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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(09\)60207-9](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(09)60207-9)

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill Book, 1940.

KÁDÁR, C. *et al.* X-ray tomography and finite element simulation of the indentation behavior of metal

foams. **Materials Science and Engineering: A**, v. 387–389, p. 321–325, dez. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.03.091>

KADER, M. A. *et al.* Macro and micro collapse mechanisms of closed-cell aluminium foams during quasi-static compression. **Materials & Design**, v. 118, p. 11–21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.011>

KARANA, E.; PEDGLEY, O.; ROGNOLI, V. (EDS.). **Materials Experience** : fundamentals of materials and design. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

KERSTETTER, R. A. Shoot Meristem Formation in Vegetative Development. **THE PLANT CELL ONLINE**, v. 9, n. 7, p. 1001–1010, 1 jul. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1001>

KEYAK, J. H. *et al.* Automated three-dimensional finite element modelling of bone: a new method. **Journal of Biomedical Engineering**, v. 12, n. 5, p. 389–397, set. 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0141-5425\(90\)90022-F](https://doi.org/10.1016/0141-5425(90)90022-F)

KEYAK, J. H. *et al.* Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling. **Journal of Biomechanics**, v. 31, n. 2, p. 125–133, maio 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(97\)00123-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(97)00123-1)

KHAN, N. **What is a Guideline?** Disponível em: <<https://s4be.cochrane.org/blog/2018/02/13/what-is-a-guideline/>>. Acesso em: 26 out. 2020.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.05.009>

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.

KREITH, F.; BLACK, W. Z. **Basic Heat Transfer**. New York: Harper & Row, 1980.

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

KUWAHARA, M. *et al.* Processing of RI-Angiocardigraphic Images. In: **Digital Processing of Biomedical Images**. Boston, MA: Springer US, 1976. p. 187–202. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0769-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0769-3_13)

LADD, A. J. C. *et al.* Finite-element modeling of trabecular bone: Comparison with mechanical testing and determination of tissue modulus. **Journal of Orthopaedic Research**, v. 16, n. 5, p. 622–628, set. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.1100160516>

LAGORCE-TACHON, A. *et al.* Contribution of image processing for analyzing the cellular structure of cork. **Journal of Chemometrics**, v. 32, n. 1, p. e2988, 1 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/cem.2988>

LAKKAD, S. C.; PATEL, J. M. Mechanical properties of bamboo, a natural composite. **Fibre Science and Technology**, v. 14, n. 4, p. 319–322, 1 jun. 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0015-0568\(81\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0015-0568(81)90023-3)

LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomography. **Materials Characterization**, v. 61, n. 12, p. 1305–1316, dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.09.012>

LEHMEIER, C. *et al.* Cell density and airspace patterning in the leaf can be manipulated to increase leaf photosynthetic capacity. **The Plant Journal**, v. 92, n. 6, p. 981–994, 1 dez. 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1111/tpj.13727>

LEME, E. M. C. **Bromélias da Mata Atlântica: Nidularium**. Rio de Janeiro: Sextante, 2000.

LENAERTS, L.; VAN LENTHE, G. H. Multi-level patient-specific modelling of the proximal femur. A promising tool to quantify the effect of osteoporosis treatment. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 367, n. 1895, p. 2079–93, 28 maio 2009. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0302>

LENGSFELD, M. *et al.* Comparison of geometry-based and CT voxel-based finite element modelling and experimental validation. **Medical Engineering & Physics**, v. 20, n. 7, p. 515–522, out. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4533\(98\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(98)00054-X)

LESKO, J. **Design industrial** : guia de materiais e fabricação. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2012.

LEVY, R. Science, technology and design. **Design Studies**, v. 6, n. 2, p. 66–72, abr. 1985. DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-694X\(85\)90016-X](https://doi.org/10.1016/0142-694X(85)90016-X)

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.

LIESE, W.; TANG, T. K. H. Properties of the Bamboo Culm. In: LIESE, W.; KÖHL, M. (Eds.). **Bamboo : The Plant and its Uses**. Berlin: Springer, Cham, 2015. p. 227–256. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6_8)

LIESE, W.; WEINER, G. Ageing of bamboo culms. A review. **Wood Science and Technology**, v. 30, n. 2, p. 77–89, abr. 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00224958>

LIMA, M. A. M. **Introdução aos materiais e processos para designers**. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna Ltda., 2006.

LIU, S. *et al.* Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads. **Thin-Walled Structures**, v. 88, p. 70–81, mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.11.006>

LORENSEN, W. E. *et al.* **Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm**. Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '87. **Anais...** New York, New York, USA: ACM Press, 1987

LOTZ, J. C. Fracture Prediction for the Proximal Femur Using Finite Element Models: Part I—Linear Analysis. **Journal of Biomechanical Engineering**, v. 113, n. 4, p. 353, 1 nov. 1991. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2895412>

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. 08, p. 1969–1976, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0238>

LUNENFELD, P. The design cluster. In: LAUREL, B. (Ed.). **Design research** : methods and perspectives. Cambridge, US: The MIT Press, 2003. p. 10–15.

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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(08\)60029-3](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(08)60029-3)

MACNEIL, J. A.; BOYD, S. K. Bone strength at the distal radius can be estimated from high-resolution

peripheral quantitative computed tomography and the finite element method. **Bone**, v. 42, n. 6, p. 1203–1213, jun. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bone.2008.01.017>

MAGNE, P. Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data. **Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials**, v. 23, n. 5, p. 539–48, 1 maio 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.03.013>

MAIRE, E. *et al.* X-ray tomography applied to the characterization of cellular materials. Related finite element modeling problems. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 16, p. 2431–2443, 1 dez. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00276-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00276-8)

MAIRE, E.; WITHERS, P. J. Quantitative X-ray tomography. **International Materials Reviews**, v. 59, n. 1, p. 1–43, 5 jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743280413Y.0000000023>

MALLICK, P. K. (ED.). **Composites Engineering Handbook**. New York: CRC Press, 1997.

MAUSETH, J. D. Anatomical Adaptations to Xeric Conditions in *Maihuenia* (Cactaceae), a Relictual, Leaf-Bearing Cactus. **Journal of Plant Research**, v. 112, n. 3, p. 307–315, set. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00013886>

MAUSETH, J. D. **Plants & people**. Burlington, US: Jones & Bartlett Learning, 2013.

MAUSETH, J. D. **Botany : An Introduction to Plant Biology**. Toronto: Jones & Bartlett Publishers, 2014.

MAYO, S. C.; CHEN, F.; EVANS, R. Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. **Journal of Structural Biology**, v. 171, n. 2, p. 182–188, ago. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.04.001>

MCCLURE, F. A. **The Bamboos : a fresh perspective**. Cambridge, UK: Harvard University Press, 1966.

MCDOWELL, E. M.; TRUMP, B. F. Histologic fixatives suitable for diagnostic light and electron microscopy. **Archives of pathology & laboratory medicine**, v. 100, n. 8, p. 405–14, ago. 1976.

MEBATION, H. K. *et al.* A novel method for 3-D microstructure modeling of pome fruit tissue using synchrotron radiation tomography images. **Journal of Food Engineering**, v. 93, n. 2, p. 141–148, jul. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.008>

MEYERS, M. A.; CHEN, P.-Y. **Biological materials science : biological materials, bioinspired materials, and biomaterials**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.

MEZ, C. C. Bromeliaceae. In: ENGLER, A. (Ed.). **Das Pflanzenreich, Regni Vegetabilis Conspectus**. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann, 1935. p. 1–667.

MORRISON, J. C. **Modern physics for scientists and engineers**. Cambridge, US: Academic Press, 2015.

MORTENSEN, A. (ED.). **Concise encyclopedia of composite materials**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007.

MÜLLER, R.; RÜEGSEGG, P. Three-dimensional finite element modelling of non-invasively assessed trabecular bone structures. **Medical Engineering & Physics**, v. 17, n. 2, p. 126–133, mar. 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/1350-4533\(95\)91884-J](https://doi.org/10.1016/1350-4533(95)91884-J)

MURATOVSKI, G. Paradigm Shift: Report on the New Role of Design in Business and Society. **She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation**, v. 1, n. 2, p. 118–139, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sheji.2015.11.002>

NASCIMENTO, A. M.; STACHERA, S. F.; XAVIER, L. M. **Determinação de algumas propriedades físicas e**

**mecânicas do Bambusa tuldoides (Munro)**. II Congresso Ibero-americano de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Florestais. **Anais...** Curitiba: 2002

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **BIO2010**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2003.

NICOLESCU, B. Methodology of Transdisciplinarity - Levels of Reality, Logic of the Included Middle and Complexity. **Transdisciplinary Journal of Engineering & Science**, v. 1, n. 1, p. 19–38, 2010.

NIKLAS, K. J. **Plant biomechanics** : an engineering approach to plant form and function. Chicago, EUA: University of Chicago Press, 1992.

NOGUEIRA, F. M. **Estudo da arquitetura da inflorescência nos gêneros nidularioides (Bromelioideae - Bromeliaceae)**. 2017. 56 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

NOGUEIRA, F. M. *et al.* Tank-inflorescence in *Nidularium innocentii* (Bromeliaceae): three-dimensional model and development. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 185, n. 3, p. 413–424, 31 out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/botlinnean/box059>

NOGUEIRA, F. M. *et al.* Heat transfer in the tank-inflorescence of *Nidularium innocentii* (Bromeliaceae): Experimental and finite element analysis based on X-ray microtomography. **Micron**, v. 124, p. 102714, set. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2019.102714>

NOWAK, M. *et al.* On the Reconstruction Method of Ceramic Foam Structures and the Methodology of Young Modulus Determination. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 58, n. 4, 1 jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0154>

OBATAYA, E.; KITIN, P.; YAMAUCHI, H. Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber–foam composite structure. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 5, p. 385–400, 29 maio 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0127-8>

OHRNBERGER, 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.

OKAMURA, K. Interdisciplinarity revisited: evidence for research impact and dynamism. **Palgrave Communications**, v. 5, n. 1, p. 1–9, 1 dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0352-4>

ONODA, Y.; SCHIEVING, F.; ANTEN, N. P. R. A novel method of measuring leaf epidermis and mesophyll stiffness shows the ubiquitous nature of the sandwich structure of leaf laminae in broad-leaved angiosperm species. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 9, p. 2487–2499, 1 maio 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv024>

OSKOLSKI, A. *et al.* Inflorescence and floral morphology of *Haptanthus hazlettii* (Buxaceae, Buxales). **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 179, n. 1, p. 190–200, set. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/boj.12303>

PAIN, E. **Multidisciplinary Research: Today's Hottest Buzzword?** Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/careers/2003/01/multidisciplinary-research-todays-hottest-buzzword>>. Acesso em: 16 out. 2020.

PAJOR, R. *et al.* Seeing space: visualization and quantification of plant leaf structure using X-ray micro-computed tomography. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 2, p. 385–390, jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers392>

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) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

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, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.09.022>

PALOMBINI, F. L. *et al.* Design, biônica e novos paradigmas: uso de tecnologias 3D para análise e caracterização aplicadas em anatomia vegetal. **Design e Tecnologia**, v. 7, n. 13, p. 46–56, 30 jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.23972/det2017iss13pp46-56>

PALOMBINI, F. L. *et al.* Design-Aided Science: o designer como promotor de tecnologias 3D para inovação em pesquisa científica. **Revista Educação Gráfica**, v. 22, n. 3, p. 169–186, 2018a.

PALOMBINI, F. L. *et al.* Materiais e Biônica: sob a Ótica da Análise de Elementos Finitos Baseada em Imagens de Microtomografia de Raios X. In: ARRUDA, A. J. V. (Ed.). **Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza.** São Paulo: Editora Blucher, 2018b. p. 245–260. DOI: <https://doi.org/10.5151/9788580393491-15>

PALOMBINI, F. L. *et al.* Biônica e Seleção de Materiais Celulares para projetos de Design: caracterização e análise de cortiça e espumas poliméricas. **Design & Tecnologia**, v. 10, n. 20, p. 1–10, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.23972/det2020iss20pp01-10>

PALOMBINI, F. L. *et al.* Combining numerical models and discretizing methods in the analysis of bamboo parenchyma using finite element analysis based on X-ray microtomography. **Wood Science and Technology**, v. 54, n. 1, p. 161–186, 14 jan. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01146-4>

PALOMBINI, F. L. *et al.* Biomimetic systems and design in the 3D characterization of the complex vascular system of bamboo node based on X-ray microtomography and finite element analysis. **Journal of Materials Research**, v. 35, n. 8, p. 842–854, 28 abr. 2020c. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.117>

PALOMBINI, F. L.; MARIATH, J. E. DE A.; OLIVEIRA, B. F. DE. Bionic design of thin-walled structure based on the geometry of the vascular bundles of bamboo. **Thin-Walled Structures**, v. 155, p. 106936, out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106936>

PALOMBINI, F. L.; RISSATO, C. C.; ROLDO, L. Seleção de materiais e Design : projeto conceitual de luminária de ágata e cortiça bioinspirada na corticeira-do-banhado. In: DONATO, M.; DUARTE, L. DA C. (Eds.). **Gemas, Joias e Mineração : Pesquisas Aplicadas no Rio Grande do Sul.** 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/IGEO, 2016. p. 48–57.

PERALTA, C.; MOULTRIE, J. **Collaboration between designers and scientists in the context of scientific research : a literature review.** Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference. **Anais...** Dubrovnik, Croatia: 2010

PEREIRA, H. The Rationale behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry. **BioResources**, v. 10, n. 3, p. 6207–6229, 2 jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.Pereira>

PETIT, C.; MEILLE, S.; MAIRE, E. Cellular solids studied by x-ray tomography and finite element modeling – a review. **Journal of Materials Research**, v. 28, n. 17, p. 2191–2201, 7 set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.97>

PISANO, P.; PIRONTI, M.; RIEPLE, A. The changing role of the designer in new business models based around 3D printing technologies. In: DEFILLIPPI, R.; RIEPLE, A.; WIKSTRÖM, P. (Eds.). **International**

**Perspectives on Business Innovation and Disruption in Design.** Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2016. p. 60–74. DOI: <https://doi.org/10.4337/9781784716646.00009>

PISTOIA, W. *et al.* Estimation of distal radius failure load with micro-finite element analysis models based on three-dimensional peripheral quantitative computed tomography images. **Bone**, v. 30, n. 6, p. 842–848, jun. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S8756-3282\(02\)00736-6](https://doi.org/10.1016/S8756-3282(02)00736-6)

PODGORŠAK, E. B. **Radiation physics for medical physicists.** 3. ed. Berlin: Springer, 2016.

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. DOI: <https://doi.org/10.1086/337626>

RODRIGUES, F. P. *et al.* Sequential software processing of micro-XCT dental-images for 3D-FE analysis. **Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials**, v. 25, n. 6, p. e47-55, 1 jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.02.007>

RÖNTGEN, W. C. Ueber eine neue Art von Strahlen. **Annalen der Physik**, v. 300, n. 1, p. 12–17, 1 jan. 1898. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.18983000103>

RUSS, J. C.; NEAL, F. B. **The Image processing handbook.** 7. ed. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2016.

RUST, C. Design Enquiry: Tacit Knowledge and Invention in Science. **Design Issues**, v. 20, n. 4, p. 76–85, set. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1162/0747936042311959>

SAINSBURY, D. **The race to the top** : a review of government's science and innovation policies. London: HM Treasury, 2007.

SAMPAIO, D. S.; DE CHIARA MOÇO, M. C.; MARIATH, J. E. A. Floral ontogeny of *Aeschynomene falcata* and *A. sensitiva* (Leguminosae: Papilionoideae) supports molecular phylogenetic data. **Plant Systematics and Evolution**, v. 299, n. 3, p. 499–513, mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00606-012-0739-9>

SANTOS-SILVA, F. *et al.* Invasion of the South American dry diagonal: What can the leaf anatomy of Pitcairnioideae (Bromeliaceae) tell us about it? **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 208, n. 8–9, p. 508–521, ago. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2013.08.003>

SANTOS, C. A. DOS. **Biologia sistêmica: ciência do século 21.** Disponível em: <<https://cienciahoje.org.br/coluna/biologia-sistemica-ciencia-do-seculo-21/>>. Acesso em: 16 out. 2020.

SCATENA, V. L.; SCREMIN-DIAS, E. Parênquima, Colênquima e Esclerênquima. In: APPEZZATO-DAGLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Eds.). **Anatomia Vegetal.** 2. ed. Viçosa: UFV, 2006. p. 109–128.

SCHIMPER, A. F. W. Ueber bau und lebensweise der epiphyten Westindiens. **Botanisches centralblatt**, v. 17, p. 192- 195;223- 227;253- 258;284- 294;319- 326;350- 359;3, 1884.

SCHINDELIN, J. *et al.* Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. **Nature methods**, v. 9, n. 7, p. 676–682, jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>

SCHNEIDER, B. **Design - uma introdução** : o design no contexto social, cultural e econômico. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

SCHULGASSER, K.; WITZTUM, A. On the strength, stiffness and stability of tubular plant stems and leaves. **Journal of Theoretical Biology**, v. 155, n. 4, p. 497–515, abr. 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(05\)80632-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(05)80632-0)

SCHULTZ, A. R. **Estudo prático da botânica geral**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1972.

SENSEN, C. W.; HALLGRÍMSSON, B. (EDS.). **Advanced imaging in biology and medicine** : technology, software environments, applications. New York: Springer Science & Business Media, 2009.

SHANEYFELT, T. M.; MAYO-SMITH, M. F.; ROTHWANGL, J. Are Guidelines Following Guidelines? **JAMA**, v. 281, n. 20, p. 1900, 26 maio 1999. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.281.20.1900>

SHAO, Z.; WANG, F. Mechanical Characteristics of Bamboo Structure and Its Components. In: **The Fracture Mechanics of Plant Materials**. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 125–146. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-9017-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-9017-2_7)

SHAW, C. C. **Cone beam computed tomography**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2014.

SHEKELLE, P. G. *et al.* Clinical guidelines: Developing guidelines. **BMJ**, v. 318, n. 7183, p. 593–596, 27 fev. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.318.7183.593>

SHIMIZU, Y. *et al.* Study of Finite Element Modeling from CT Images. **Dental Materials Journal**, v. 24, n. 3, p. 447–455, 2005. DOI: <https://doi.org/10.4012/dmj.24.447>

SILVA, D. C.; BOTURA JÚNIOR, G.; PASCHOARELLI, L. C. Inovação e pesquisa em design nas universidades brasileiras. **Design e Tecnologia**, v. 3, n. 06, p. 1–12, 31 dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.23972/det2013iss06pp1-12>

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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0232-3>

SILVA, L. F. *et al.* Multiscale 3D characterization of discontinuities in underwater wet welds. **Materials Characterization**, v. 107, p. 358–366, set. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.07.030>

SILVA, M. J.; KEAVENY, T. M.; HAYES, W. C. Computed tomography-based finite element analysis predicts failure loads and fracture patterns for vertebral sections. **Journal of Orthopaedic Research**, v. 16, n. 3, p. 300–308, maio 1998. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.1100160305>

SILVESTRO, D.; ZIZKA, G.; SCHULTE, K. Disentangling the effects of key innovations on the diversification of Bromelioideae (Bromeliaceae). **Evolution**, v. 68, n. 1, p. 163–175, jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/evo.12236>

SINGH, R. *et al.* Characterization of the deformation behavior of intermediate porosity interconnected Ti foams using micro-computed tomography and direct finite element modeling. **Acta Biomaterialia**, v. 6, n. 6, p. 2342–2351, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.11.032>

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.05.009>

SONG, J.; CHEN, Y.; LU, G. Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns. **Thin-Walled Structures**, v. 54, p. 65–71, maio 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.02.007>

- SONG, J. F. *et al.* Bionic design and multi-objective optimization for variable wall thickness tube inspired bamboo structures. **Thin-Walled Structures**, v. 125, p. 76–88, 1 abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.010>
- STAEDLER, Y. M.; MASSON, D.; SCHÖNENBERGER, J. Plant Tissues in 3D via X-Ray Tomography: Simple Contrasting Methods Allow High Resolution Imaging. **PLoS ONE**, v. 8, n. 9, p. e75295, 27 set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075295>
- STANDRING, S. (ED.). **Gray's Anatomia : a Base Anatômica da Prática Clínica**. 40. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- STOCK, S. R. **MicroComputed tomography : methodology and applications**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2009.
- SVERGUN, D. I. *et al.* **Small angle X-ray and neutron scattering from solutions of biological macromolecules**. New York: Oxford University Press, 2013.
- TAN, T. *et al.* Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. **Acta Biomaterialia**, v. 7, n. 10, p. 3796–3803, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008>
- TARLOCHAN, F. *et al.* Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. **Thin-Walled Structures**, v. 71, p. 7–17, 1 out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.04.003>
- TAYLOR, D. *et al.* The biomechanics of bamboo: investigating the role of the nodes. **Wood Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 345–357, 30 mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0694-4>
- TEEGARDEN, D. M. **Polymer Chemistry : Introduction to an Indispensable Science**. Arlington: NSTA Press, 2004.
- THORNTON, S. T.; REX, A. **Modern physics for scientists and engineers**. 4. ed. Boston, MA: Brooks-Cole, 2013.
- TIETZE, M. Physiologische Bromeliaceen Studien II. Die Entwicklung der wasseraufnehmenden Bromeliaceen Trichome, Z. f. Naturwiss. **Z. Naturwiss.**, v. 78, p. 1–50, 1906.
- TOMASI, C.; MANDUCHI, R. **Bilateral filtering for gray and color images**. Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271). **Anais...** Narosa Publishing House, 1998
- VERDONSCHOT, N. *et al.* Generation of 3-D finite element models of restored human teeth using micro-CT techniques. **The International journal of prosthodontics**, v. 14, n. 4, p. 310–5, 2001.
- VERHOEVEN, F. *et al.* **Transdisciplinary designer-scientist collaboration in child oncology**. Proceedings of the 4th Participatory Innovation Conference 2015. **Anais...** University for applied sciences The Hague, 2015
- VERHULP, E.; VAN RIETBERGEN, B.; HUISKES, R. Load distribution in the healthy and osteoporotic human proximal femur during a fall to the side. **Bone**, v. 42, n. 1, p. 30–35, jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bone.2007.08.039>
- VERSIEUX, L. M. *et al.* Alcantarea (Bromeliaceae) leaf anatomical characterization and its systematic implications. **Nordic Journal of Botany**, v. 28, n. 4, p. 385–397, ago. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2010.00727.x>
- WAKCHAURE, M.; KUTE, S. Effect of moisture content on physical and mechanical properties of bamboo. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 13, p. 753–763, 2012.

WANG, H. *et al.* Effects of Moisture Content on the Mechanical Properties of Moso Bamboo at the Macroscopic and Cellular Levels. **BioResources**, v. 8, n. 4, 12 set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5475-5484>

WATSON, ANDREW D.; WATSON, G. H. Transitioning STEM to STEAM: Reformation of Engineering Education. **Journal for Quality and Participation**, v. 36, n. 3, p. 1–5, 2013.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.02.013>

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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1936-8>

WEVERS, M. *et al.* Applications of CT for Non-destructive Testing and Materials Characterization. In: CARMIGNATO, S.; DEWULF, W.; LEACH, R. (Eds.). **Industrial X-Ray Computed Tomography**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 267–331. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3_8)

WISMANS, J. G. F.; GOVAERT, L. E.; VAN DOMMELEN, J. A. W. X-ray computed tomography-based modeling of polymeric foams: The effect of finite element model size on the large strain response. **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**, v. 48, n. 13, p. 1526–1534, 26 maio 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/polb.22055>

WOJTASZEK, P. (ED.). **Mechanical integration of plant cells and plants**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

YOUSSEF, S.; MAIRE, E.; GAERTNER, R. Finite element modelling of the actual structure of cellular materials determined by X-ray tomography. **Acta Materialia**, v. 53, n. 3, p. 719–730, 1 fev. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2004.10.024>

ZHANG, L. *et al.* Modeling the mechanical properties of optimally processed cordierite–mullite–alumina ceramic foams by X-ray computed tomography and finite element analysis. **Acta Materialia**, v. 60, n. 10, p. 4235–4246, jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.025>

ZHANG, Y. Challenges and Advances in Image-Based Geometric Modeling and Mesh Generation. In: ZHANG, Y. (Ed.). **Image-Based Geometric Modeling and Mesh Generation**. Berlin: Springer, 2013. p. 1–10. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4255-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4255-0_1)

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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(08\)60071-2](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(08)60071-2)

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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(09\)60239-0](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(09)60239-0)

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The finite element method** : its basis and fundamentals. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

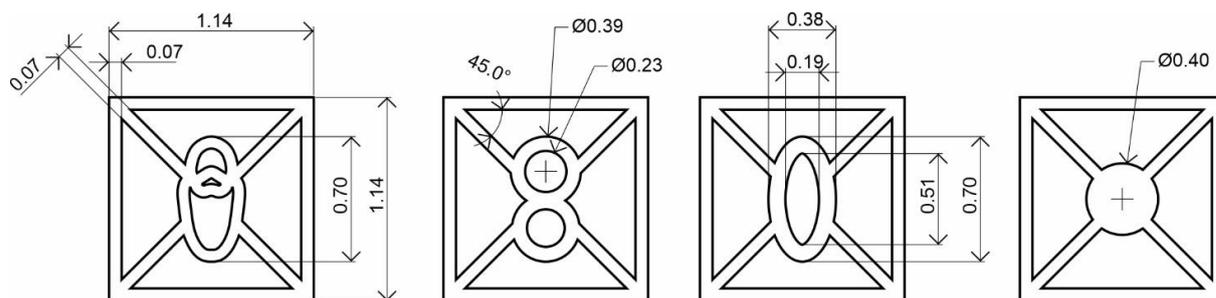
ZOU, M. *et al.* A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo. **Thin-Walled Structures**, v. 101, p. 222–230, abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.023>



## APÊNDICE A – Dimensões das seções transversais das estruturas de núcleo único

As dimensões detalhadas das seções transversais de cada estrutura avaliada na seção 4.1.1.4 estão presentes na figura suplementar A1. Dimensões ausentes significam que são repetidas de outros modelos.

Figura A1 – Detalhes das dimensões (em *mm*) das seções transversais das estruturas de núcleo único.

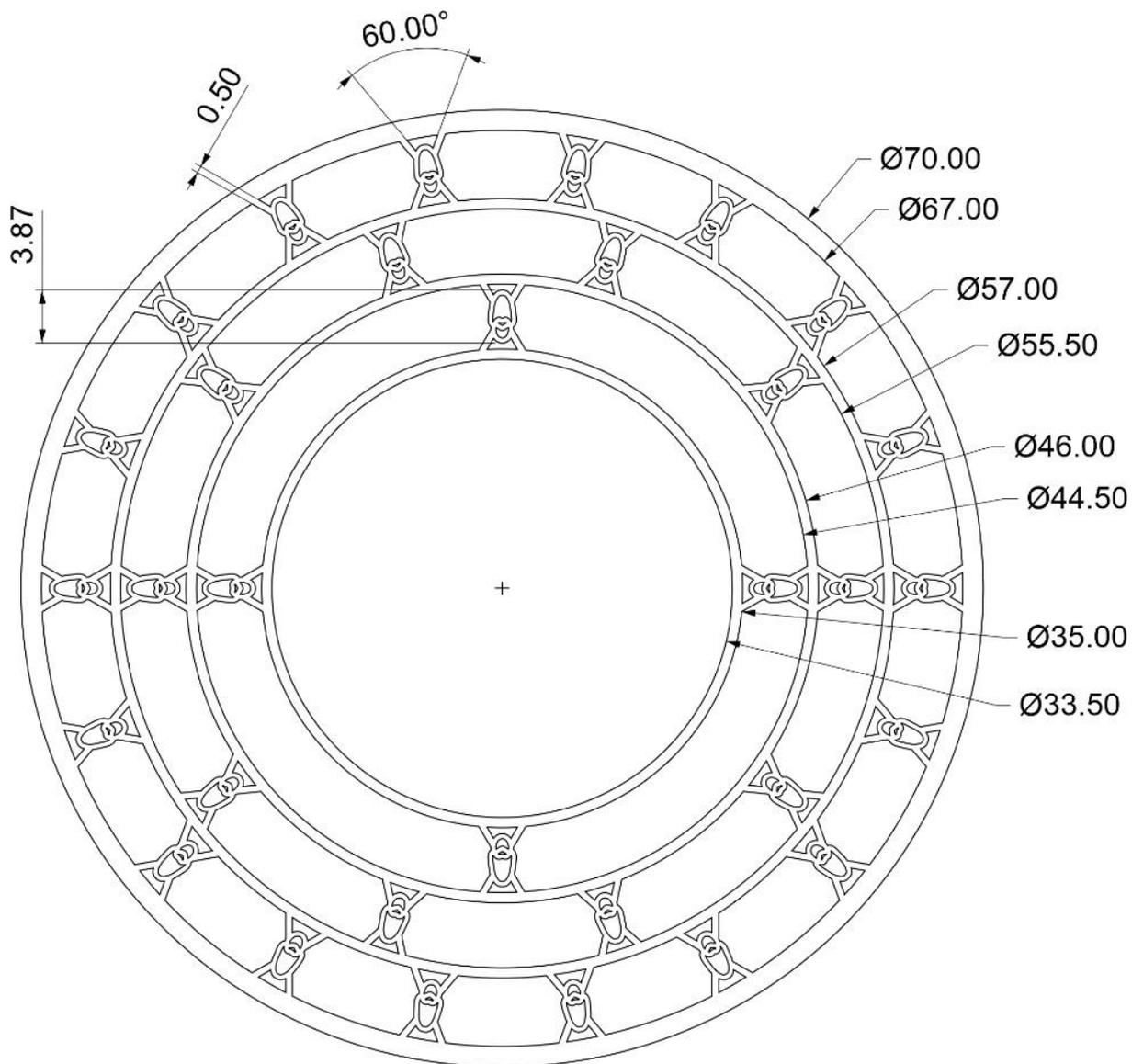


FONTE: Autor (2020).

**APÊNDICE B – Dimensões das estruturas de paredes finas das análises explícitas**

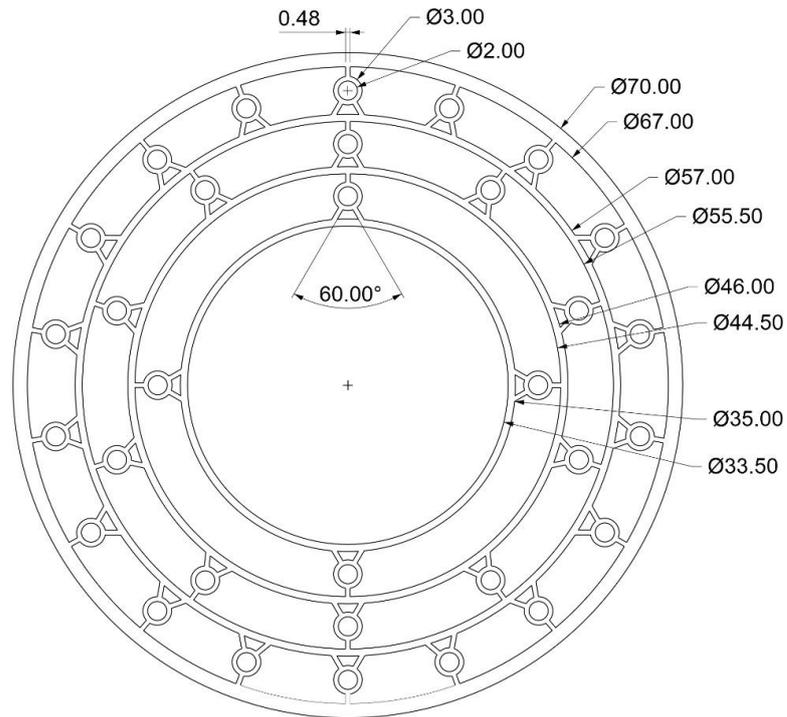
As dimensões das seções transversais das estruturas de paredes finas avaliadas por FEA explícitas no tópico 4.1.1.5 são vistas nas figuras suplementares A2 até A6.

Figura A2 – Detalhes das dimensões (em *mm*) das seções transversais da estrutura biônica proposta.



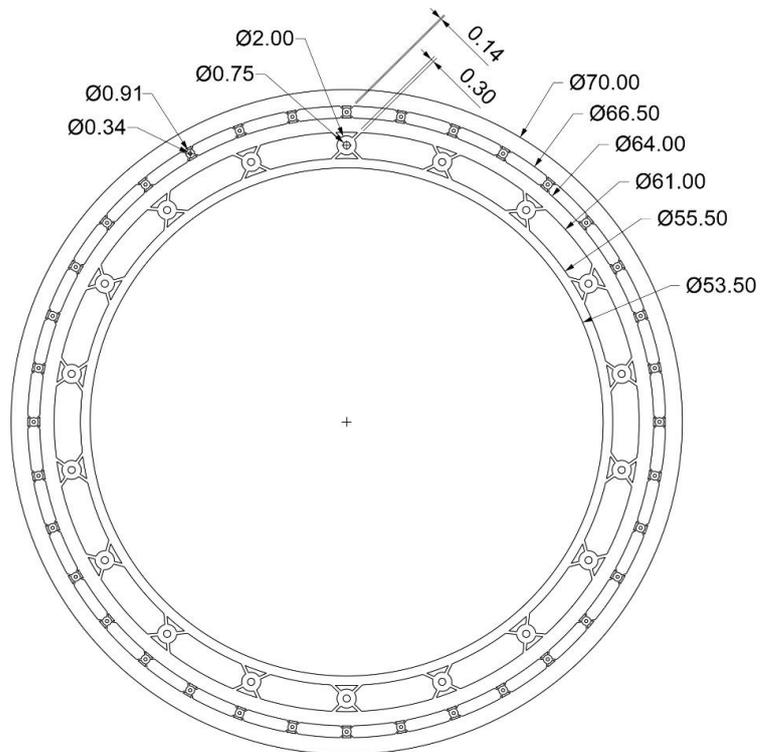
FONTE: Autor (2020).

Figura A3 – Detalhes das dimensões (em mm) das seções transversais da estrutura #1.

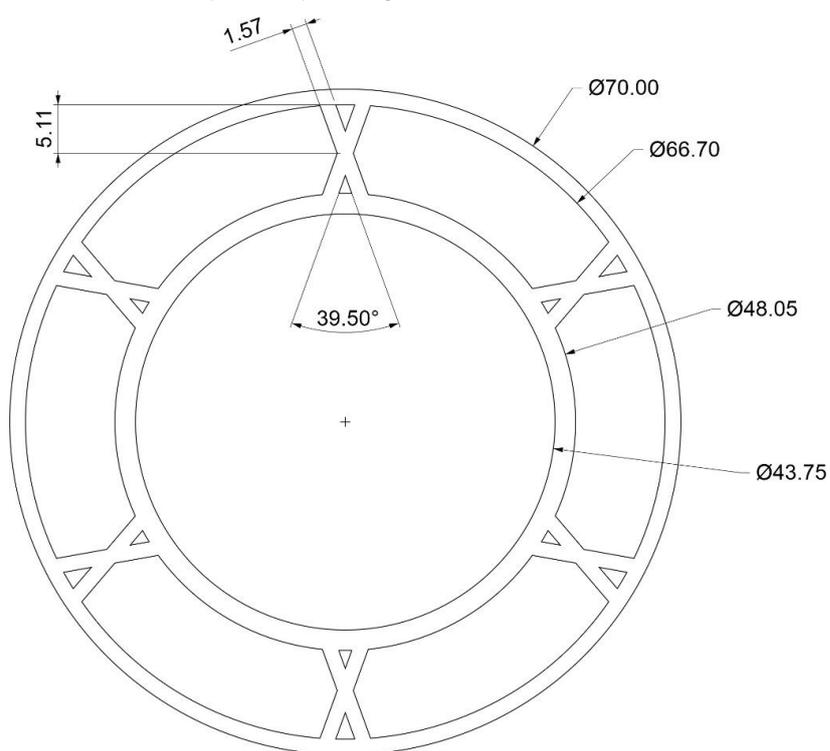
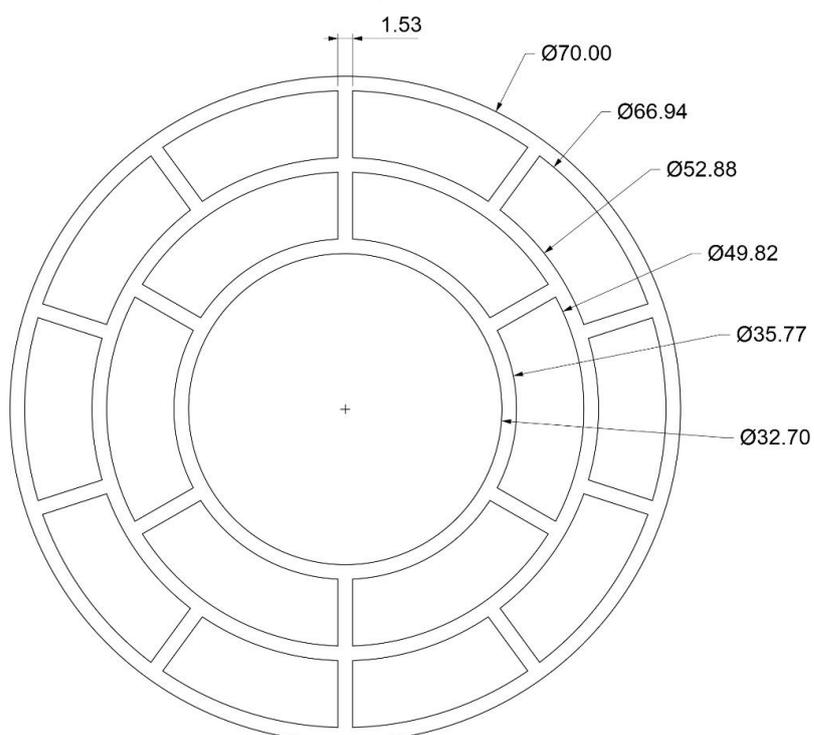


FONTE: Autor (2020), baseado no modelo de Zou *et al.* (2016).

Figura A4 – Detalhes das dimensões (em mm) das seções transversais da estrutura #2.



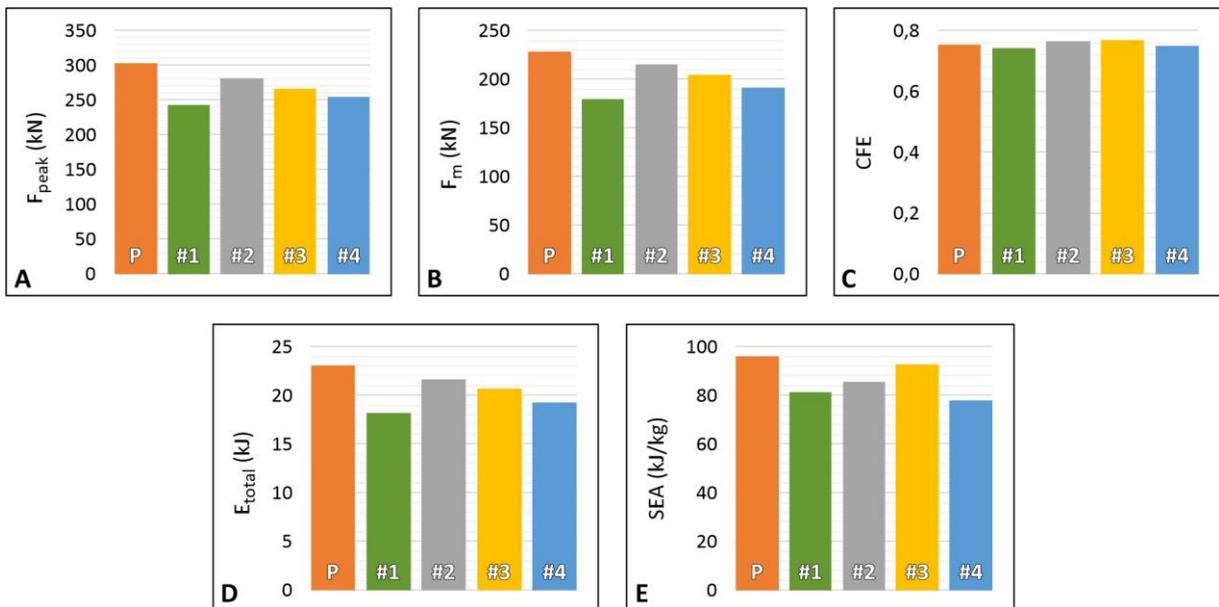
FONTE: Autor (2020), baseado no modelo de Ma *et al.* (2008).

Figura A5 – Detalhes das dimensões (em *mm*) das seções transversais da estrutura #3.FONTE: Autor (2020), baseado no modelo de Fu *et al.* (2019).Figura A6 – Detalhes das dimensões (em *mm*) das seções transversais da estrutura #4.FONTE: Autor (2020), baseado no modelo de Chen *et al.* (2018).

### APÊNDICE C – Resumo dos resultados da análise explícita

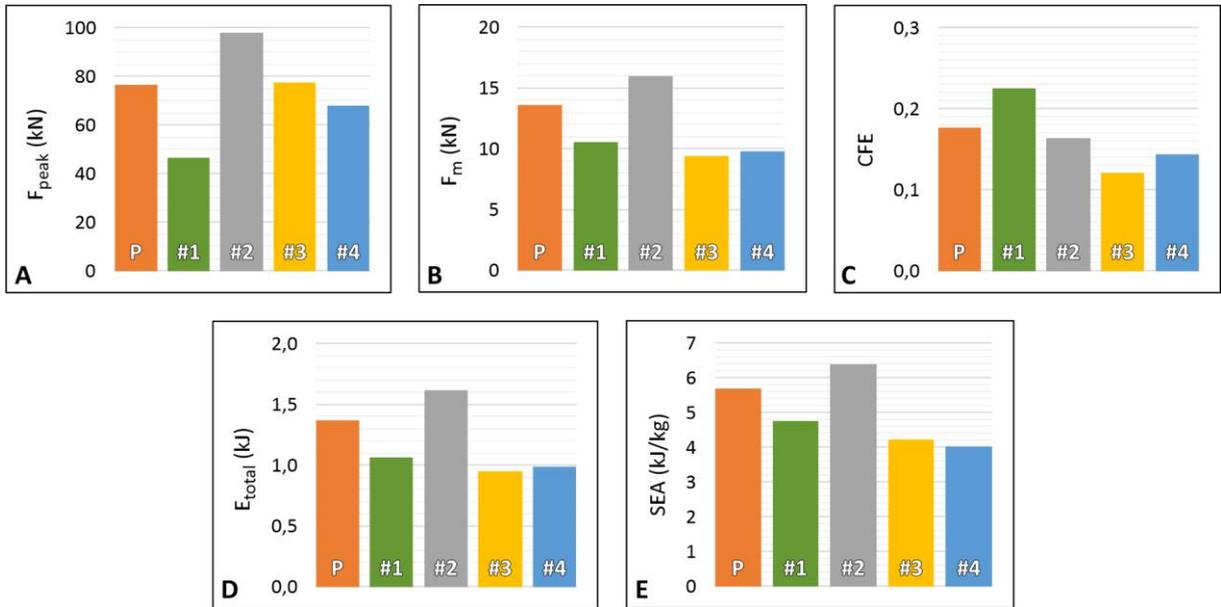
As figuras suplementares A7, A8 e A9 apresentam um resumo gráfico em números absolutos dos principais resultados obtidos das análises explícitas por elementos finitos do tópico 4.1.1.5 referentes aos ensaios de impacto de compressão axial e lateral, e de flexão, respectivamente. Em A são apresentados os valores de pico de força inicial ( $F_{peak}$ ); em B os resultados de força média ( $F_m$ ); em C a eficiência de força de impacto ( $CFE$ ); em D energia total absorvida ( $E_{total}$ ); e em E os resultados da energia de absorção específica ( $SEA$ ).

Figura A7 – Resultados absolutos para a análise de impacto de compressão axial: (A) pico de força inicial ( $F_{peak}$ ); (B) força média ( $F_m$ ); (C) eficiência de força de impacto ( $CFE$ ); (D) energia total absorvida ( $E_{total}$ ); (E) energia de absorção específica ( $SEA$ ). P = Modelo Proposto; #1 = Modelo Ref. #1; #2 = Modelo Ref. #2; #3 = Modelo Ref. #3; #4 = Modelo Ref. #4.



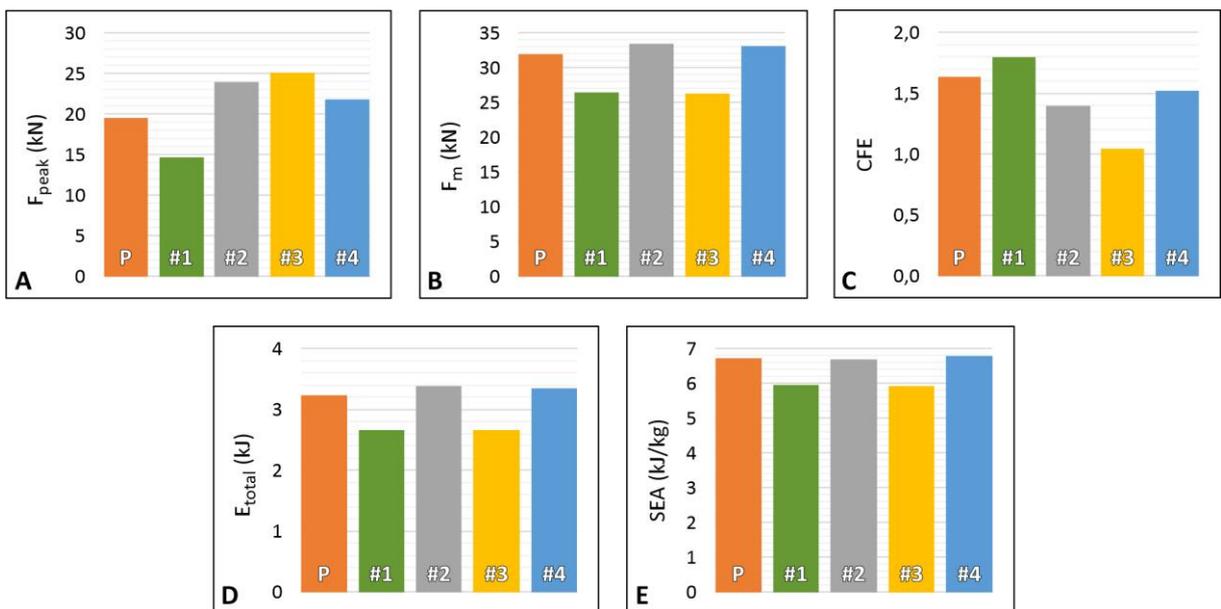
FONTE: Autor (2020).

Figura A8 – Resultados absolutos para a análise de impacto de compressão lateral: (A) pico de força inicial ( $F_{peak}$ ); (B) força média ( $F_m$ ); (C) eficiência de força de impacto ( $CFE$ ); (D) energia total absorvida ( $E_{total}$ ); (E) energia de absorção específica ( $SEA$ ). P = Modelo Proposto; #1 = Modelo Ref. #1; #2 = Modelo Ref. #2; #3 = Modelo Ref. #3; #4 = Modelo Ref. #4.



FONTE: Autor (2020).

Figura A9 – Resultados absolutos para a análise de impacto de flexão: (A) pico de força inicial ( $F_{peak}$ ); (B) força média ( $F_m$ ); (C) eficiência de força de impacto ( $CFE$ ); (D) energia total absorvida ( $E_{total}$ ); (E) energia de absorção específica ( $SEA$ ). P = Modelo Proposto; #1 = Modelo Ref. #1; #2 = Modelo Ref. #2; #3 = Modelo Ref. #3; #4 = Modelo Ref. #4.



FONTE: Autor (2020).

## ANEXO A – Cálculo das tensões von Mises no VOX-FE a partir da Lei de Hooke

Como o *software* de código aberto VOX-FE de análise por elementos finitos baseado em voxel não retorna automaticamente as tensões von Mises. Contudo, são retornados os valores de deformações normais e de cisalhamento. Desse modo, é possível calcular as tensões von Mises com base na Lei de Hooke e nas relações de tensão-a-deformação (GROSS *et al.*, 2018).

A partir dos valores de módulo elástico ( $E_e$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) conhecidos de cada voxel ( $e$ ), e também com os valores retornados das deformações normais ( $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ ) e de cisalhamento ( $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ), podemos utilizar as relações:

$$\sigma_{xx} = \frac{E_e}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{yy} + \nu\varepsilon_{zz}] \quad (22)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E_e}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\nu\varepsilon_{xx} + (1-\nu)\varepsilon_{yy} + \nu\varepsilon_{zz}] \quad (23)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E_e}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\nu\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{yy} + (1-\nu)\varepsilon_{zz}] \quad (24)$$

Em que  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{zz}$  são as tensões normais. Em seguida, utilizando-se do cálculo do módulo de cisalhamento de cada voxel ( $G_e$ ), é possível determinar as tensões de cisalhamento  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$ :

$$G_e = \frac{E_e}{2(1+\nu)} \quad (25)$$

$$\tau_{xy} = G_e \gamma_{xy} \quad (26)$$

$$\tau_{yz} = G_e \gamma_{yz} \quad (27)$$

$$\tau_{zx} = G_e \gamma_{zx} \quad (28)$$

Por fim, é possível calcular as tensões von Mises de cada voxel ( $\sigma_{VM_e}$ ):

$$\sigma_{VM_e} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (29)$$

A partir destas relações constitutivas clássicas, os valores resultantes de cada um dos

*voxels* da análise retornados pelo *software* VOX-FE foram adicionados em uma planilha de cálculo do *software* Excel® (Microsoft®, Redmond, WA, EUA), para a o cálculo das tensões von Mises de cada *voxel*, isoladamente, bem como para a determinação do *voxel* com a maior tensão registrada, para comparação com os modelos baseados na geometria.