

**FUNDAMENTOS, TEORIAS E
ASPECTOS METODOLÓGICOS
DISCIPLINARES APLICADOS NA
BIÔNICA E BIOMIMÉTICA**

SOBRE OS AUTORES

Felipe Luis Palombini | felipe.palombini@ufrgs.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8680770694335530>

Doutorando e mestre em Design pelo Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PGDesign/UFRGS), e graduado em Design de Produto (UFRGS). Foi professor substituto no curso de Desenho Industrial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ministrou curso de extensão para alunos de pós-graduação (UFRGS) sobre Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ CT), Análise por Elementos Finitos (FEA) e Prototipagem Rápida. Realiza pesquisa em Design de Produto, nas áreas de biônica, seleção de materiais, análise por elementos finitos, anatomia vegetal e análise estrutural de materiais naturais.

Wilson Kindlein Junior | wilsonkindleinjuniorgmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7277709797105149>

Professor titular do Departamento de Materiais da UFRGS. É bolsista de Produtividade em Pesquisa nível PQ-1A do CNPq. É professor orientador do Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign/UFRGS (CAPES 5) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M/UFRGS (CAPES 7). Foi coordenador do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS) de 1998 até novembro de 2017. É pós-doutor em Design Industrial (França) e doutor na área de Engenharia dos Materiais, com experiência desde 1990 na área de design e seleção de materiais e com experiência industrial.

Branca Freitas de Oliveira | branca@ufrgs.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3674155253307052>

Professora associada do Departamento de Design e Expressão Gráfica da UFRGS. É bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq nível 2. Possui pós-doutorado (UFRGS), doutorado, mestrado e graduação em Engenharia Civil (UFRGS). Tem experiência nas áreas de Engenharia Civil e Mecânica, com ênfase em Mecânica das Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: novos materiais, materiais compósitos, elementos finitos, modelos constitutivos, falha, envelhecimento, dano, viscoelasticidade e plasticidade.

Jorge Ernesto de Araujo Mariath | jorge.mariath@ufrgs.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6022200145144346>

Professor titular do Departamento de Botânica da UFRGS. É bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq nível 1C do CNPq. Foi diretor do Instituto de Biociências da UFRGS e é coordenador do Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg/UFRGS) desde 1977. Possui doutorado em Ciências Biológicas (USP), mestrado em Botânica (UFRGS) e graduação em Ciências Biológicas (UFRGS). Tem experiência na área de Botânica, subárea Morfologia Vegetal, com ênfase em Anatomia e Embriologia Vegetal, atuando principalmente nos seguintes temas: Rubiaceae, Aquifoliaceae (Ilex paraguariensis), Leguminosae, Bromeliaceae, Passifloraceae e Iridaceae.



Materiais e Biônica: sob a Ótica da Análise de Elementos Finitos Baseada em Imagens de Microtomografia de Raios X

Materials and Bionics: from the Viewpoint of Finite Element Analysis based on X-Ray Microtomography Imaging

Felipe L. Palombini | Wilson Kindlein Junior | Branca Freitas de Oliveira | Jorge E. Araujo Mariath

Resumo

Os materiais naturais apresentam diversas propriedades de grande interesse para aplicações em design e engenharia, bem como para projetos baseados no estudo de biônica. Essas propriedades derivam de sua microestrutura, a qual é composta por um complexo arranjo morfológico. Este capítulo aborda as possibilidades da combinação de duas técnicas avançadas para o estudo desses materiais: a Análise por Elementos Finitos (FEA) e a Microtomografia de Raios X (μ CT). As técnicas são exemplificadas através da realização de uma simulação 3D de um ensaio mecânico na microestrutura parenquimática do bambu. A combinação de técnicas resulta em uma análise tridimensional de alta resolução, não invasiva e com alta precisão morfológica, levando a um grande potencial para um melhor entendimento da funcionalidade microestrutural dos materiais naturais.

Palavras-chave: Biônica; Design & Tecnologia; Materiais naturais; Bambu.

Abstract

Natural materials have several properties of great interest for design and engineering applications, as well as for projects based on the study of bionics. These properties derive from their microstructure, which is composed of a complex morphological arrangement. This chapter discusses the possibilities of combining two advanced techniques for the study of these materials: Finite Element Analysis (FEA) and X-ray Microtomography (μ CT). The techniques are exemplified by performing a 3D simulation of a mechanical test on the parenchymatic microstructure of bamboo. The combination of techniques results in a high-resolution, noninvasive, and three-dimensional analysis with a high morphological accuracy, leading to a potential for a better understanding of the microstructural functionality of natural materials.

Keywords: Bionics; Design & Technology; Natural materials; Bamboo.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais naturais foram os primeiros a serem explorados pelo homem em diversas situações, de pequenos utensílios à construção de residências (ASHBY, 2012). Desse modo, parte de suas vantagens surge exatamente de sua grande versatilidade e disponibilidade. Um mesmo material, como uma determinada rocha por exemplo, pode ser atualmente utilizado de diversas formas: desde atributos estruturais, como elemento de construção; estéticos, como em rochas ornamentais, e até funcionais, como lã de rocha em aplicações de isolamento térmico e acústico.

A flexibilidade de aplicações torna os materiais naturais úteis em diversas indústrias. Entretanto, as grandes responsáveis por suas bem-sucedidas aplicações são suas múltiplas propriedades constitutivas (ASHBY; JOHNSON, 2011). Da suavidade ao toque do couro, da resistência e conforto das fibras de algodão (tricomias), ao isolamento termoacústico da cortiça (felema) vista na Figura 1, as características dos materiais naturais são de tal modo surpreendentes que, além de serem diretamente empregadas, têm sido estudadas a fim de buscar meios de melhorar as ideias de projeto, através do estudo de biônica (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). Assim, é possível destacar o desenvolvimento industrial de materiais sintéticos que, em sua concepção, foram também bioinspirados, como por exemplo, tecidos de poliuretano (PU), fibras de poliéster (PSF), bem como rolhas de polipropileno expandido (EPP).



Figura 1: A cortiça, proveniente da casca do sobreiro (*Quercus suber*) é um material com extraordinárias propriedades de isolamento.

Fonte: Autores.

Dentre os materiais naturais mais antigos utilizados pelo homem, bem como com maior complexidade microestrutural encontram-se muitas plantas (LESKO, 2012). Os materiais vegetais possuem diversas propriedades mecânicas interessantes, como resistência à tração e à flexão, baixa densidade, isolamento térmico, entre outros, as quais são derivadas de sua anatomia. E são essas propriedades que os tornam objetos de grande interesse industrial e científico, como para projetos de biônica. Contudo, um melhor entendimento de sua microestrutura e, conseqüentemente, de suas propriedades, pode ser alcançado com a utilização do estado da arte em tecnologias 3D não invasivas e de alta resolução. Este capítulo aborda a combinação das técnicas de microtomografia computadorizada de raios X com análise por elementos finitos, apresentando as tecnologias bem como os potenciais científicos de seu estudo em materiais vegetais.

2. DO MACRO DESEMPENHO À MICRO COMPLEXIDADE

Muitas das grandes semelhanças entre materiais naturais e materiais poliméricos sintéticos, como destacado nos exemplos de aplicações diretas e bioinspiradas, encontram-se na sua característica fundamental: a repetição de padrões na escala micro, levando a propriedades na escala macro. Nos polímeros sintéticos, expressão derivada do grego de muitas (πολύς ou “polús”) partes (μέρος ou “meros”), sua fabricação ocorre com a formação de macromoléculas, como o polietileno, a partir de ligações químicas de moléculas menores, como o etileno (LESKO, 2012). Já nos polímeros naturais, como também são conhecidos, essa repetição de elementos menores ocorre de forma mais complexa e sofisticada (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Em madeiras, por exemplo, a

organização do lenho (tecido de espessamento denominado xilema secundário) é constituída de diferentes períodos de crescimento (anéis anuais), os quais são compostos por células lenhosas (lignificadas) que, por sua vez, possuem paredes celulares divididas em camadas, contendo diferentes orientações de microfibras (fibrilas de celulose), alongadas e espiraladas (SCHULTZ, 1972).

Além da reprodução uniforme e sistemática de padrões micro- e nanométricos, os materiais naturais tornam-se ainda mais fascinantes ao avaliar as variações inteligentes dessas disposições. Ossos com características trabeculares como o interior do fêmur, por exemplo (Figura 2), são formados pela organização microestrutural da hidroxiapatita (fosfato de cálcio e colágeno) sob a forma de curvas contínuas em regiões de maior solicitação mecânica (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Este tipo de disposição de curvas em regiões de maior tensão também é encontrado em estruturas, como no *Viaduc de Garabit*, na França. A ponte, desenvolvida pela equipe de Gustave Eiffel (alguns anos antes da Torre Eiffel), representa uma transposição das tensões de maior solicitação nas regiões curvas. Já no caso do crânio, com sua superfície externa maciça e interior poroso, o osso torna-se uma casca do tipo sanduíche, sendo favorecido por sua leveza mas mantendo sua função mecânica primária (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). O mesmo tipo de estrutura sanduíche também é utilizada, por exemplo, em capacetes de automobilismo.

Um dos materiais mais representativos de eficiência estrutural, para aplicação direta ou utilização em projetos de biônica, é o bambu (Figura 3). Além da capacidade de rápido crescimento e de aspectos ambientais associados, a gramínea constitui-se uma estrutura cilíndrica delgada e quase inteiramente oca e é conhecida por seu alto desempenho, sendo oriundo de características encontradas tanto nas escalas macro- quanto micrométricas (PALOMBINI, 2016). Na primeira escala, imediatamente destaca-se sua divisão nas regiões ocas do caule (entrenós) e nas maciças (nós). Enquanto na região dos entrenós os feixes de condução de água e nutrientes apresentam-se principalmente verticais e ligeiramente helicoidais (PALOMBINI *et al.*, 2016), na região maciça os traços vasculares envolvem-se entre si, dando origem a novas ramificações laterais (eixos). Mecanicamente, essas segmentações transversais sólidas impedem, por exemplo, a falha da estrutura por estrangulamento, ao ser flexionada. Já na escala micrométrica, destaca-se o padrão gradiente de orientação desses feixes ao observá-los em uma vista transversal.

Os elementos vasculares são distribuídos de modo gradativo (Figura 4), sendo em menor quantidade e mais distantes entre si na região interna do caule, e em maior quantidade e mais próximos, na periferia do mesmo. Novamente, essa distribuição gradiente otimizada (conhecida como atactostele) faz com que as regiões externas, que possuem maior solicitação de tração ou compressão, sejam mais reforçadas, de modo a fortalecer a planta, enquanto as regiões internas mantêm-se com baixa densidade (PALOMBINI *et al.*, 2016).

No ponto de vista de materiais, o bambu é considerado um compósito natural. Isso significa que a planta é constituída principalmente por fases distintas e complementares, sob uma ótica de propriedades mecânicas (GIBSON; ASHBY;

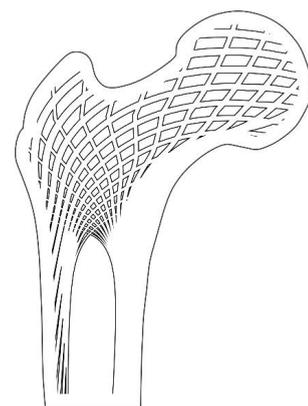


Figura 2: Corte longitudinal do fêmur humano apresenta as curvas de maior acúmulo de material, nas regiões de maior tensão. Este tipo de distribuição também é encontrado em obras, como no Viaduc de Garabit, na França.
Fonte: Autores.



Figura 3: O bambu é uma das plantas com maior desempenho mecânico em função de sua anatomia.
Fonte: Autores.

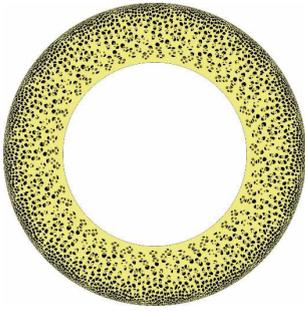


Figura 4: A seção transversal do bambu apresenta uma disposição gradiente dos elementos vasculares, sendo mais numerosos na região externa e mais dispersos no interior.

Fonte: Autores.

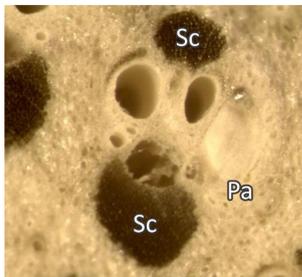


Figura 5: Fotomicrografia da seção transversal do bambu revela uma estrutura similar a um compósito: uma matriz de parênquima (Pa) envolvendo feixes de reforço do esclerênquima (Sc).

Fonte: Autores.

HARLEY, 2010). Por um lado, tem-se a presença de fibras longitudinais lignificadas (esclerênquima), que representam os elementos de reforço. Com maior densidade relativa, os feixes de esclerênquima possuem maior resistência à tração e por muito tempo foram considerados o principal tecido de sustentação da planta (Figura 5). Contudo, mesmo com menor densidade, o tecido de preenchimento (parênquima), que correspondente à matriz, também possui um papel essencial na rigidez do caule, de modo a distribuir as tensões aplicadas uniformemente (PALOMBINI *et al.*, 2016).

As micropropriedades que impactam no sucesso estrutural dos materiais naturais decorrem de milhões de anos de adaptação, especialização e melhoramento da natureza frente às adversidades na busca pela sobrevivência. Como resultados, obtêm-se materiais otimizados que combinam a economia de recursos em sua composição com o máximo de desempenho, tudo oriundo de um universo microscópico, organizado de forma ordenada, complexa e eficiente. O estudo e a aplicação de materiais naturais motivam a utilização de análises aprofundadas, em escalas cada vez menores. Desse modo, a utilização do estado da arte em técnicas de alta resolução torna-se uma parte fundamental da compreensão do funcionamento macro deste tipo de material, tanto para aplicações diretas quanto para projetos em biônica.

3. TECNOLOGIAS 3D DE ALTA RESOLUÇÃO PARA ANÁLISES NÃO INVASIVAS

A investigação de materiais naturais está diretamente associada a meios de observação e caracterização (PALOMBINI *et al.*, 2017). Novas gerações de técnicas de observação têm sido desenvolvidas com grande velocidade nas últimas décadas, impulsionadas principalmente por avanços na medicina (SHAW, 2014). Desse modo, os principais avanços evolutivos em termos de novos conhecimentos, como reflexo pelo maior número de publicações com técnicas avançadas de observação, são vistos em áreas relacionadas a materiais inorgânicos ou, em áreas biológicas, com tecidos animais (HANKE *et al.*, 2016). Especificamente em anatomia humana ou em estudos com camundongos, por exemplo, a utilização de técnicas de bioimagem permitiu avanços em diagnóstico e novos tratamentos, sendo também a principal fonte de motivação para novas tecnologias (SHAW, 2014).

Apesar da complexidade e do grande potencial dos materiais de origem vegetal, pouco tem sido explorado em termos de tecnologias 3D de alta resolução (BRODERSEN; RODDY, 2016; DHONDT *et al.*, 2010; PALOMBINI *et al.*, 2017). De um modo geral, essas técnicas estão associadas a quatro etapas fundamentais. A primeira diz respeito à digitalização, ou seja, a transformação de amostras físicas em dados digitais, por meio de técnicas tanto de superfície quanto volumétricas. Em seguida, segue a etapa de ajustes nos dados obtidos, em que são realizados aprimoramentos para, por exemplo, reduzir efeitos indesejados, como o ruído, e melhorar aqueles pretendidos, como o contraste e definição. Com os dados ajustados, seguem as análises propriamente ditas, as quais podem ser realizadas tanto qualitativamente, por observação, quanto numericamente. Por fim, a última etapa está relacionada à fabricação

de novos modelos físicos, por meio de alguns processos específicos, como a manufatura aditiva. Quando realizadas com alta resolução espacial, estas etapas fundamentais permitem ao pesquisador obter novos métodos tanto de investigação quanto de demonstração de seus resultados.

Dentre as principais tecnologias 3D volumétricas, de alta resolução, encontra-se a microtomografia computadorizada de raios X (STOCK, 2009). Sua principal vantagem está no fato de ser uma análise não invasiva. Ao considerar técnicas mais tradicionais, como secionamento de amostras para observação em microscopia de varredura (Figura 6), tecidos mais delicados como os vegetais podem ser danificados, mesmo em um corte homogêneo, o que prejudicaria a visualização em resoluções maiores. Por outro lado, ao observar uma região com grande ampliação em uma técnica 3D não invasiva, é possível a visualização de tecidos e células com total integridade (Figura 7).

A técnica de microtomografia computadorizada, semelhante à versão clínica, mais conhecida e popular, permite a digitalização de amostras pequenas por meio de princípios de interação das mesmas com a radiação (Figura 8). Como os raios X possuem a propriedade de atravessar a matéria, sendo atenuados e forma distinta por regiões com mais ou menos densidade, torna-se possível quantificar esse processo, dando origem a projeções micrográficas, tal como um exame de radiografia. Após uma projeção, a amostra é rotacionada em poucos ou frações de graus, e uma nova projeção é obtida. Ao término de meia ou uma volta completa, as projeções são combinadas automaticamente através de um algoritmo sofisticado, permitindo então a reconstrução 3D volumétrica da amostra (PALOMBINI *et al.*, 2016). Ao ser finalizada, a análise exporta os dados obtidos por meio de imagens BITMAP sequenciais da região, em tons de cinza. Semelhante à região de ossos em radiografias, quanto mais claros forem os pixels das imagens, menos radiação conseguiu atravessar (maior atenuação) e, portanto, mais densa é aquela região representada. Do mesmo modo, quanto mais escuros forem os pixels, mais radiação ultrapassou (menor atenuação) e menos densa é a região.

A microtomografia de raios X, também chamada como μ CT, é caracterizada por permitir uma resolução espacial próxima a 1 μ m (LANDIS; KEANE, 2010), levando a novas possibilidades de investigações científicas de tecidos com elevado grau de detalhes microscópicos, como amostras vegetais (NOGUEIRA *et al.*, 2017). O destaque principal desta técnica é sua característica não invasiva, ou seja, que permite a visualização de qualquer região interna da amostra sem a necessidade de cortes físicos, processos de embocamento, ou a consequente degradação da amostra. Assim, com um secionamento virtual a técnica torna-se apropriada para tecidos que poderiam ser danificados durante o processo de corte, mesmo seguindo protocolos de amolecimento (PALOMBINI *et al.*, 2017). Ainda, com a utilização de contraste de fase, regiões com níveis de densidade próximos, como em tecidos vegetais diferentes e adjacentes, podem ser mais facilmente segmentadas. O contraste de fase funciona com base na detecção dos desvios dos raios X que refracionam ao cruzarem fases distintas, mesmo com índices de absorção de radiação semelhantes.

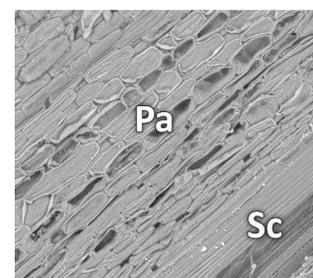


Figura 6: Seção longitudinal do bambu observado por microscopia de varredura, apresentando as células prismáticas do parênquima (Pa) e as células alongadas da esclerênquima (Sc).

Fonte: Autores.

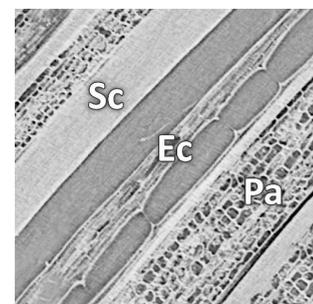


Figura 7: Seção longitudinal do bambu em um corte virtual por meio de imagens de μ CT, com as células do parênquima (Pa), as células da esclerênquima (Sc) e detalhes dos elementos condutores (Ec), os quais poderiam ser danificados com secionamentos físicos.

Fonte: Autores.

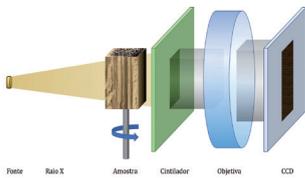


Figura 8: Esquema de funcionamento básico de um microtomógrafo. Uma fonte emite radiação na frequência de raios X, os quais atravessam e são atenuados pela amostra. A radiação é então transformada em luz visível por um filtro cintilador, sendo magnificada por uma objetiva e capturada por um sensor CCD, representando uma projeção. Em seguida, a medida em que a amostra é rotacionada, novas projeções são obtidas até completar uma volta.
Fonte: Autores.

4. ESTADO DA ARTE EM PESQUISA DE MATERIAIS NATURAIS

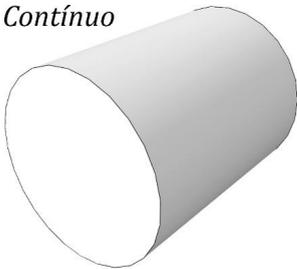
A μ CT é uma ferramenta poderosa para análises quali- e quantitativas de materiais naturais e, especialmente, em plantas, permitindo obter imagens e dados volumétricos de órgãos, tecidos e células (NOGUEIRA *et al.*, 2017). Para tal é possível a segmentação de cada região de interesse para uma análise isolada. Ou seja, dentro de uma mesma aquisição de microtomografia, é possível, por exemplo, a separação dos dados obtidos em regiões distintas como, no caso do bambu, a distinção entre os feixes de esclerênquima, os elementos condutores e o parênquima. Entretanto, em amostras vegetais esse processo dificilmente pode ser realizado de modo automatizado, com base nas diferenças entre os níveis de cinza. Mesmo com tecnologias de contrastes específicas como contraste de fase e campo negro, os valores de cinza, embora bem definidos, acabam se confundindo nas imagens. Isso se deve às semelhanças em densidade entre os tecidos, tornando muitas vezes necessária uma segmentação manual.

A técnica de μ CT pode ser aplicada em conjunto com demais tipos de tecnologias, aumentando ainda mais suas possibilidades. Como exemplo, com a exportação de uma região segmentada em um formato tridimensional é possível a fabricação de um modelo físico, em uma escala maior e com alta fidelidade morfológica, para fins instrucionais (PALOMBINI *et al.*, 2017). Para isso, diversos *softwares* proprietários e de código-aberto podem ser utilizados na conversão de imagens sequenciais de microtomografia em uma malha 3D, como em formato STL. Contudo, em termos de avaliação funcional e estrutural, uma nova técnica associada tem alcançado destaque no estado da arte em análise de materiais, a Análise por Elementos Finitos.

A Análise por Elementos Finitos (FEA) consiste na elaboração e resolução de modelos matemáticos virtuais representativos de situações reais. Desenvolvido para a solução de problemas complexos de engenharia estrutural, o método de elementos finitos é fundamentado na divisão de um sólido contínuo, com complexidade infinita, em um discreto, com complexidade finita, o qual é composto por um número conhecido de partes menores (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). Ao pensar em um material vegetal, por exemplo, encontramos uma enorme complexidade em termos de elementos constituintes. Órgãos, tecidos, células, organelas, moléculas e átomos: quanto mais aumentamos a resolução, mais detalhes são encontrados e, aparentemente, mais infinita torna-se a estrutura. Como analisar virtualmente um modelo com infinitos elementos necessitaria de um computador com poder de processamento igualmente infinito, a divisão do modelo em um número finito de elementos permite realizar uma analogia do modelo contínuo em uma análise com grande precisão (Figura 9).

Com a técnica, além de características mecânicas, é possível inclusive avaliar desde solicitações térmicas, eletromagnéticas, acústicas, etc. Para isso, necessitamos alguns dados básicos essenciais. Antes de tudo, é preciso definir qual a geometria será avaliada. Em termos de design e engenharia, é comum a modelagem de um produto em 3D, com a utilização de *softwares* CAD, e a conversão de suas formas

Contínuo



Discreto

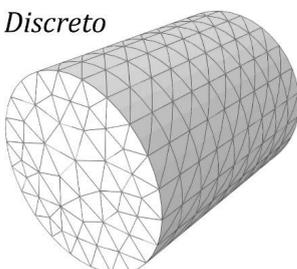


Figura 9: A Análise por Elementos Finitos é baseada no processo de divisão de um sólido contínuo em discreto, com um número conhecido de elementos constituintes.

Fonte: Autores.

para FEA, em uma malha discretizada. Essa malha 3D volumétrica é composta por alguns tipos principais de elementos mínimos, os quais tetraedros, hexaedros e prismas (Figura 10). Em seguida, a esta malha são atribuídas propriedades constitutivas, as quais representam as propriedades intrínsecas de cada material aplicado que se deseja avaliar, como por exemplo módulo elástico, condutividade térmica, entre outros. Por fim, são adicionadas as condições de contorno do modelo, ou seja, quais as solicitações externas que serão aplicadas, como tensão, fluxo de calor, etc., bem como as restrições de movimentação.

Para formas geométricas, bem definidas e uniformes, o processo de análise por elementos finitos torna-se mais trivial a medida em que os meios para gerar os modelos 3D são mais facilitados. Contudo, recentemente vem crescendo a necessidade de analisar mecanicamente determinadas estruturas biológicas, principalmente nas áreas da saúde, como exemplo em análises estruturais de fêmures em pacientes com osteoporose (BOYD, 2009). Como, obviamente, cada pessoa possui características anatômicas e clínicas únicas, a utilização de uma geometria padronizada e homogênea, ainda que bem detalhada, não pode ser considerada representativa para todas as situações. Desse modo, as mais atuais ferramentas de investigação encontram-se baseadas na união das técnicas de elementos finitos com tomografias, em que as geometrias são obtidas diretamente das imagens sequenciais, transformando-se em uma análise tridimensional não invasiva e de alta precisão morfológica.

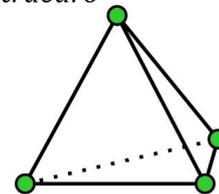
De maneira semelhante à pesquisa em áreas da saúde, é possível combinar as técnicas de μ CT com FEA para análise da microestrutura dos demais materiais biológicos, como para o caso da anatomia vegetal. Contudo, mesmo com a grande potencialidade da aplicação, poucos trabalhos têm utilizado essa abordagem (PALOMBINI *et al.*, 2017). Com as combinações de técnicas é possível avaliar, por exemplo, quais modificações genéticas podem ser aplicadas em caules de milho para evitar o acamamento (quebra e tombamento do caule), aumentando o desempenho produtivo e o rendimento da plantação para bioenergia (FORELL *et al.*, 2015).

5. APLICAÇÃO DE μ CT E FEA EM ANÁLISE ESTRUTURAL DO PARÊNQUIMA

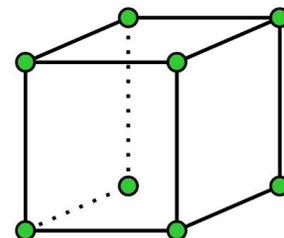
Para demonstração de uma análise por elementos finitos baseada em imagens sequenciais de microtomografia de raios X, uma amostra de bambu foi digitalizada (PALOMBINI, 2016) com o equipamento Xradia® 510 Versa (Carl Zeiss® X-Ray Microscopy, Inc., Pleasanton, CA, EUA), localizado no Grupo de Microscopia Digital e Análise de Imagens da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (MicDigi/PUC-Rio). O equipamento opera com um conjunto de objetivas para magnificação óptica das projeções, permitindo obter boa qualidade de imagem com baixa quantidade de ruído.

As imagens sequenciais obtidas possuíam uma resolução espacial de 2,02 μ m, possibilitando a distinção de tecidos e células. Para a análise foi escolhida uma região de interesse cúbica com dimensão lateral de aproximadamente 340

Tetraedro



Hexaedro



Prisma

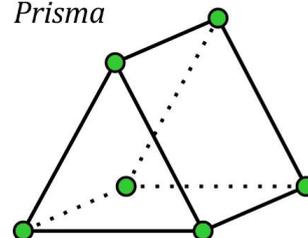


Figura 10: Principais tipos de elementos 3D utilizados para compor uma malha volumétrica discreta, em uma Análise por Elementos Finitos.

Fonte: Autores.

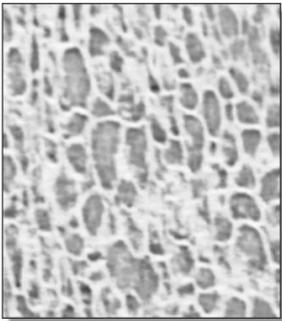
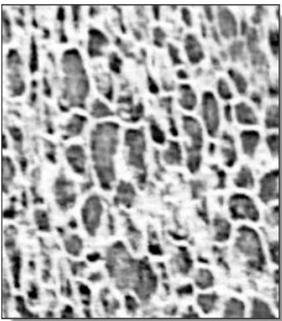
**Fatia original****Ajustes****Imagem binária**

Figura 11: Processo de pós-processamento nas imagens de microtomografia do parênquima. Inicialmente, as fatias originais foram ajustadas quanto a contraste e redução de ruído. Em seguida foram transformadas em binárias, sendo que os pixels brancos representam o material sólido (parede celular) e os pixels pretos as regiões vazias (lume celular).

Fonte: Autores.

μm , composta pelo parênquima. As imagens foram processadas no *software* de código aberto Fiji (SCHINDELIN *et al.*, 2012), baseado no ImageJ. As imagens foram inicialmente ajustadas em contraste e redução de ruído (PALOMBINI, 2016) de modo a permitir um destaque das regiões correspondentes ao material celular sólido (parede celular), com maior densidade, e às regiões vazias do interior da célula de (lume celular), com menor densidade (Figura 11).

As imagens binárias foram convertidas ao formato STL, correspondente a uma extensão universal sob a forma de malha tridimensional superficial (Figura 12). Pelo fato de ser superficial significa que a malha é composta por diversos triângulos que representam as regiões externas da geometria, sendo que em seu interior a malha é oca. A extensão é amplamente utilizada desde por equipamentos de fabricação, como máquinas de usinagem e impressão 3D, até por *softwares* de modelagem e visualização 3D. O arquivo em extensão STL foi então transformado em uma malha discreta para uma análise por elementos finitos, com o uso do *software* de acesso livre Gmsh (GEUZAIN; REMACLE, 2009). Essa malha é considerada volumétrica, ou seja, ao invés de ser formada por triângulos superficiais, como em STL, é constituída inteiramente de sólidos tetraedros, ocupando todo o seu interior (Figura 13). Após gerada, a malha volumétrica discreta foi exportada em arquivo de extensão INP, para análise.

Após a malha discretizada ser gerada, o *software* Abaqus CAE (Dassault Systèmes Simulia® Corp., Providence, RI, EUA) foi utilizado para análise por elementos finitos. O arquivo de modelo INP do parênquima discretizado foi importado para um ensaio virtual de compressão. As condições de contorno da análise foram definidas como uma tensão aplicada na face superior da malha, correspondendo ao sentido axial em relação ao caule do bambu, e os nós inferiores foram restritos em movimentação. A análise foi realizada levando em consideração o limite entre a fase elástica e plástica do material, bem como as variações na geometria celular durante a solitação. Desse modo, o ensaio foi realizado com a definição das não linearidades constitutiva e geométrica. A primeira foi representada por uma propriedade mecânica linear, de módulo elástico e coeficiente de Poisson, e uma não linear, da resistência à compressão. Já na não linearidade geométrica, foi estabelecida a opção de autocontato, para prevenir a malha de se sobrepor durante a análise. O módulo elástico incluído do material sólido (parede celular) inserido foi de 39,8 GPa com coeficiente de Poisson de 0,4 e resistência à compressão de 472 MPa (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

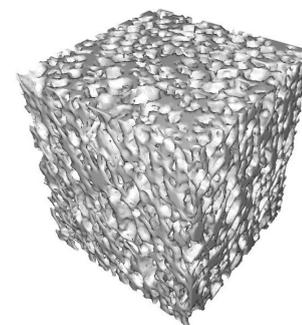
O resultado da análise convergiu para uma resistência à compressão do parênquima de 1,39 MPa, compatível com valores da literatura para amostras com densidade relativa semelhante (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PALOMBINI *et al.*, 2016) e visualizado na distribuição das tensões von Mises (Figura 14). Mecanicamente, o parênquima comportou-se como uma espuma de células fechadas. Foi verificado que o tecido possui uma característica estrutural importante de distribuição de tensões localizadas em toda sua região. A combinação de uma estrutura de células fechadas com paredes celulares

com boas propriedades mecânicas faz do parênquima um material ao mesmo tempo resistente e muito leve. Além disso, sua característica celular faz com que as tensões von Mises sejam distribuídas de modo uniforme por toda a sua extensão, o que contribui para o sucesso estrutural do bambu.

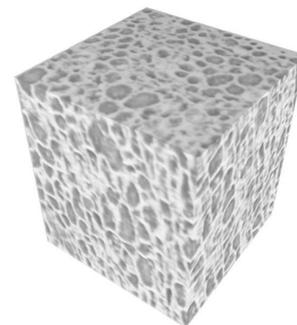
6. DO ESTUDO DE MATERIAIS NATURAIS A PROJETOS BIOINSPIRADOS

A investigação dos tecidos de plantas com arquitetura celular complexa, como o bambu, por meio de técnicas 3D não invasivas e de alta resolução possibilita compreender mecanicamente o comportamento da amostra, identificando regiões com maior e menor tensões e deformações, por meio de FEA (BOYD, 2009). Além disso, tais técnicas também permitem o estudo de geometrias de regiões específicas de uma amostra digitalizada, bem como a observação do desenvolvimento das mesmas em seu interior (CIDADE *et al.*, 2018; PALOMBINI *et al.*, 2017) encontra-se o bambu, pertencente ao grupo das gramíneas lenhosas, e caracterizado pela grande razão resistência por densidade. Dentre as características que conferem a resistência da planta encontra-se sua microestrutura, formada por feixes fibrosos longitudinais que envolvem elementos condutores ao longo do caule. A anatomia vegetal diz respeito ao estudo da microestrutura de plantas, onde são utilizados métodos clássicos de secionamento em amostras para observação microscópica dos tecidos e células constituintes. O designer deve estar na vanguarda de tecnologias para colaborar com o desenvolvimento de novas técnicas e aplicá-las na criação de novos produtos. Com o avanço das tecnologias 3D, novas técnicas de observação têm surgido para estudo de materiais, como a Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ CT). De um modo geral, a partir da correta interpretação de uma estrutura, função, ou organização encontrada na natureza, torna-se possível sua adaptação ou parametrização para futura aplicação em projetos de design e engenharia (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005).

O estudo de materiais naturais para aplicação em biônica necessita de equipes multidisciplinares – desde biólogos, engenheiros, designers, geólogos e cientistas de materiais – para auxiliarem na transposição das propriedades observadas em futuros projetos de design. No caso de plantas com notável característica estrutural, como o bambu, algumas características podem ser citadas como fatores que podem contribuir para um melhor desempenho, quando aplicadas em projetos. A exemplo, tem-se o gradiente de distribuição dos feixes vasculares (como visto na Figura 4) que depositam relativamente mais material nas regiões periféricas, que possuem maior sollicitação mecânica. De maneira similar, com relação aos feixes em bambus, eles também podem ser encontrados com disposições e geometrias específicas, quando visualizados transversalmente (LIESE, 1998). A Figura 15 apresenta os quatro tipos de configurações dos feixes que podem ser encontrados em diferentes espécies de bambu, que também influenciam na resistência da planta como um todo (PALOMBINI, 2016). Já a presença de elementos transversais na região nodal do colmo oco do bambu, conhecidos como diafragma (Figura 16), é um meio de

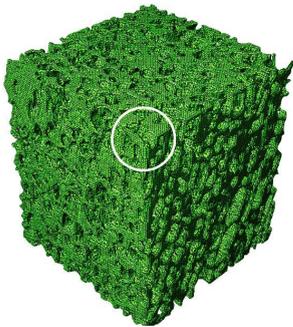


Malha STL

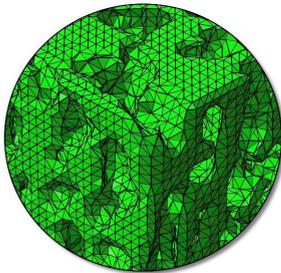


Reconstrução 3D

Figura 12: Reconstrução 3D da região de interesse da amostra do parênquima do bambu e a conversão para malha superficial em formato STL.
Fonte: Autores.



Malha discreta



Detalhe

Figura 13: Malha volumétrica discreta do parênquima e detalhe dos elementos finitos tetraédricos constituintes.

Fonte: Autores.

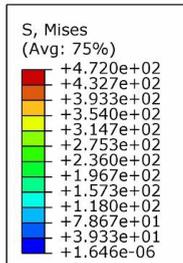
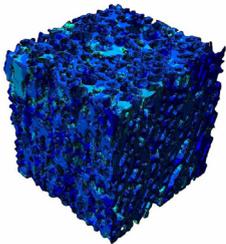


Figura 14: Resultado da análise de elementos finitos baseada em imagens de microtomografia do parênquima. As tensões von Mises são representadas pelo gradiente de cores, onde as cores mais quentes representam maior tensão. Fonte: Autores.

impedir o estrangulamento do caule ao ser flexionado, levando à falha mecânica (WEGST; ASHBY, 2007). Além disso, a presença de uma matriz parenquimática muito leve e com característica de material celular funciona ao melhor distribuir as tensões aplicadas em uma região do caule, como visto nos ensaios realizados. De um modo geral, todos esses fatores contribuem em conjunto com as interessantes propriedades estruturais do bambu. Entretanto, nem todas são utilizadas em projetos de biônica.

Determinadas características da anatomia do bambu têm sido bastante utilizadas em projetos de biônica, com o objetivo de aumentar a resistência estrutural e ao mesmo tempo utilizar uma menor quantidade de material em sua fabricação. Em especial, os padrões de reforço gradiente (da distribuição dos feixes vasculares) e a utilização de seções transversais sólidas (da presença do diafragma) são recursos empregados para aumentar a resistência à compressão de estruturas. Contudo, características como uma matriz celular de baixo peso como o parênquima e elementos de reforço com geometria inspirada nos tipos de feixes vasculares ainda é pouco explorada. Para isso, torna-se interessante a utilização das técnicas exploradas de μ CT e FEA para visualização e entendimento do funcionamento estrutural dos diferentes tipos de tecidos do bambu, bem como eles se organizam como um todo.

Para apresentar exemplos de aplicações em projetos bioinspirados em aspectos da anatomia do bambu, foram estudadas duas estruturas conceituais. A Figura 17 apresenta as estruturas desenvolvidas, consistindo em cilindros com o mesmo diâmetro externo e interno (70 e 35 mm), e mesmo comprimento (100 mm). Como característica em comum, ambas apresentam elementos de reforço baseados em um dos tipos de configuração dos elementos vasculares (Tipo IV, visto na Figura 15). Do mesmo modo, em ambas as estruturas os elementos de reforço estão dispostos de maneira gradiente, ou seja, em maior número na região externa do cilindro e em menor na região interna. Contudo, na Estrutura 1, os elementos estão interligados por um conjunto de cilindros concêntricos cuja a espessura também é gradiente. Esse tipo de configuração é bastante utilizado em estruturas bioinspiradas (ZOU *et al.*, 2016), pois permite mais material nas regiões externas, além de manterem um espaço interno vazio, diminuindo a quantidade de material.

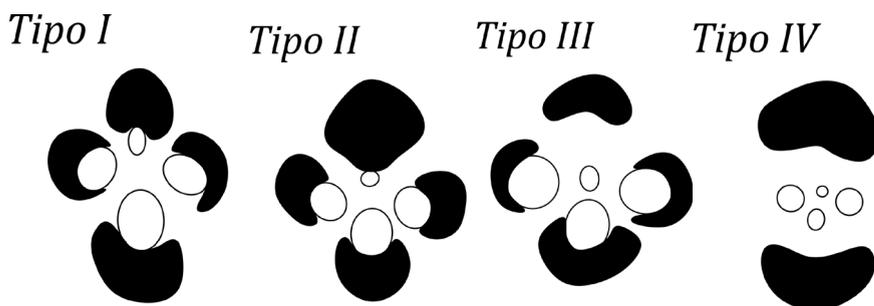


Figura 15: Os 4 tipos de configurações dos elementos vasculares encontrados em diferentes espécies de bambu. As regiões pintadas correspondem ao esclerênquima e as brancas correspondem aos elementos condutores (floema e xilema). Fonte: Autores.

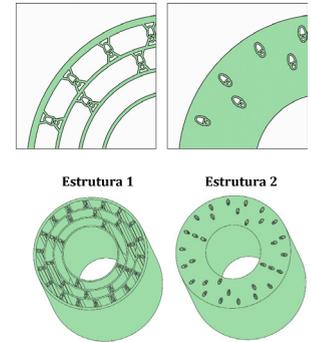


Figura 16: Uma das principais características encontradas no bambu é sua resistência à flexão. O caule oco da planta apresenta seções transversais sólidas na região dos nós, chamadas de diafragma. Mecanicamente, essa região é responsável por prevenir a falha por estrangulamento do caule, quando flexionado, sendo, portanto, empregado em projetos de biônica.
 Fonte: Autores.

Estrutura 1

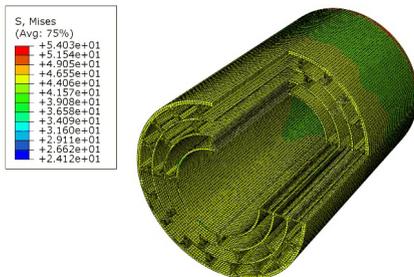


Figura 17: Exemplos de estruturas bioinspiradas na anatomia do bambu. A estrutura 1 consiste em cilindros concêntricos com elementos de reforço de gradiente e com geometria dos feixes do bambu. A estrutura 2 apresenta um material cilíndrico poroso, representando o parênquima, envolvendo as estruturas de reforço. Fonte: Autores.

Estrutura 2

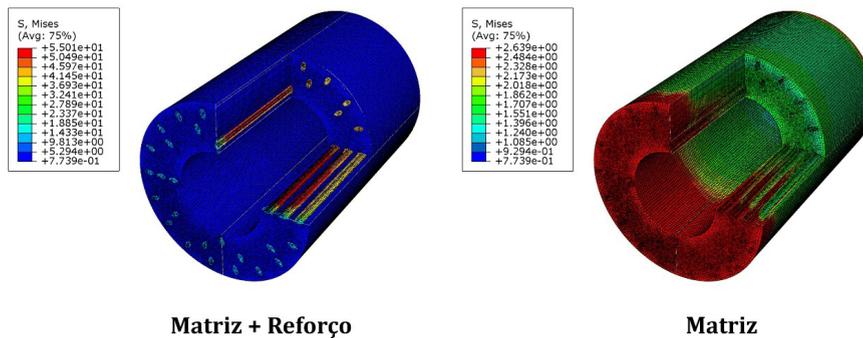


Figura 18: Resultados dos ensaios de compressão das estruturas conceituais bioinspiradas no bambu, visualizadas em corte, e distribuído por tensões von Mises. A estrutura 2 é apresentada com a região da matriz celular e do reforço, e somente da região da matriz. Fonte: Autores.

Já a estrutura 2 consiste nos mesmos elementos de reforço, tanto na geometria e no material sólido, quanto em número e na disposição gradiente. Por outro lado, ao invés de serem conectados por meio de cilindros concêntricos sólidos, os reforços foram envolvidos por outro material, com característica celular como o parênquima. Em ambas as estruturas foi aplicada uma tensão de compressão no sentido longitudinal do cilindro, sendo verificado quais valores máximos suportados antes da falha, sendo ensaiados por FEA. Por fim, as estruturas foram comparadas em termos de desempenho, relativo à carga suportada pela massa da estrutura.

Os resultados são visualizados na Figura 18, com vista em corte do cilindro. A estrutura 2 é apresentada de duas formas: contendo as geometrias da matriz celular e do reforço sólido e contendo somente da matriz. A estrutura 1 suportou uma tensão de compressão axial máxima de 45,15 MPa. Já a estrutura 2 suportou uma tensão de 30,41 MPa. Quanto à massa, a estrutura 1 possui valor de 239 g. Por outro lado, por possuir uma região de matriz celular com densidade consideravelmente inferior, a massa da estrutura 2 foi registrada em apenas 146 g. Por consequência, a estrutura contendo a região celular foi cerca de 10% mais eficiente que a estrutura convencional, contendo cilindros concêntricos. Desse modo, tem-se que os efeitos de matriz de células fechadas com baixa densidade, visualizadas nos ensaios com o parênquima também podem ser aplicados no desenvolvimento de estruturas biônicas mais eficientes, mantendo uma boa relação entre carga suportada e massa total da estrutura. Esse estudo conceitual surge, portanto, como exemplo da importância em se aprofundar o conhecimento em materiais naturais através de técnicas 3D, não invasivas e de alta resolução, como a μ CT e FEA.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O bambu possui como principal característica estrutural o fato de ser considerado um polímero composto natural, devido à multiplicação de microestruturas arrançadas e dispostas de modo otimizado. Ao serem unidos, esses micropadrões fazem com que o material apresente boa propriedade mecânica com uma baixa densidade. Desse modo, pesquisas para avaliação da estrutura de plantas em escala micrométrica são de grande importância para compreensão do seu comportamento em escala macro, tanto para aplicações diretas do material no design, arquitetura e engenharia, quanto para adaptação dessas informações por meio de projetos bioinspirados.

Em termos de propriedades estruturais, para níveis de compreensão cada vez mais avançados sobre materiais naturais, e em especial em plantas, faz-se necessário o emprego de tecnologias 3D que sejam, simultaneamente, não invasivas e de alta resolução. Nesse sentido, essa pesquisa buscou apresentar uma introdução das técnicas de microtomografia computadorizada de raios X (μ CT) e análise por elementos finitos (FEA). Como visto, a primeira é responsável pela digitalização volumétrica da amostra, permitindo investigações morfológicas não invasivas e de alta resolução. Já a segunda é utilizada para condução de análises virtuais que possam simular condições reais, tais como em ensaios mecânicos. Contudo, para análises estruturais em amostras com uma característica morfológica altamente heterogênea, como os tecidos vegetais, indicamos a união das duas técnicas.

De modo geral, as principais características da união das técnicas de elementos finitos baseada em imagens de microtomografia são a (1) alta fidelidade morfológica, a (2) alta resolução espacial e o (3) uso de uma geometria 3D não superficial. Considerando o papel essencial de

investigações anatômicas para a compreensão estrutural de plantas e demais materiais biológicos como um todo, bem como os principais atributos dessa união, é possível considerar a combinação das técnicas como o estado da arte em análises estruturais para materiais naturais. Com este trabalho, espera-se uma maior difusão deste tipo de abordagem em pesquisas, de modo a facilitar a compreensão do complexo funcionamento destes materiais.

REFERÊNCIAS

- ASHBY, M. F. *Seleção de materiais no projeto mecânico*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. *Materiais e design: arte e ciência na seleção de materiais em projeto de produto*. 2. ed. Rio de Janeiro: CAMPUS, 2011.
- BOYD, S. K. Image-Based Finite Element Analysis. In: *Advanced Imaging in Biology and Medicine*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 301-318.
- 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.
- CIDADE, M. K. et al. Investigation of the thermal microstructural effects of CO₂ laser engraving on agate via X-ray microtomography. *Optics & Laser Technology*, v. 104, p. 56-64, ago. 2018.
- 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.
- 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.
- GEUZAIN, 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.
- GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F.; HARLEY, B. A. *Cellular materials in nature and medicine*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- 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.
- 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.
- LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomography. *Materials Characterization*, v. 61, n. 12, p. 1305-1316, dez. 2010.
- LESKO, J. *Design industrial: guia de materiais e fabricação*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- LIESE, W. *The Anatomy of Bamboo Culms*. Beijing: BRILL, 1998.
- 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, 2017.
- 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, 2016.
- 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, 30 jun. 2017.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. *Raven biology of plants*. 8. ed. New York: W. H. Freeman, 2013.
- SCHINDELIN, J. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, v. 9, n. 7, p. 676-682, jul. 2012.
- SCHULTZ, A. R. *Estudo prático da botânica geral*. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1972.
- SHAW, C. C. *Cone beam computed tomography*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2014.

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

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.

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

ZOU, 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.