

GEÍSA GAIGER DE OLIVEIRA
GUSTAVO JAVIER ZANI NÚÑEZ
ORGANIZADORES

Des
ign
em
pes.
qui
sa. vol 4

GEÍSA GAIGER DE OLIVEIRA
GUSTAVO JAVIER ZANI NÚÑEZ
ORGANIZADORES

Des
ign
em
pes.
qui
sa. vol 4

Este livro é uma das publicações do Instituto de Inovação, Competitividade e Design (IICD) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (www.ufrgs.br/iicd).

© dos autores – 2021

Projeto gráfico: Melissa Pozatti

D457 Design em pesquisa: volume 4 [recurso eletrônico] / organizadores Geísa Gaiger de Oliveira [e] Gustavo Javier Zani Núñez. – Porto Alegre: Marcavisual, 2021.
720 p. ; digital

ISBN 978-65-89263-33-3

Este livro é uma publicação do Instituto de Inovação, Competitividade e Design (IICD) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (www.ufrgs.br/iicd)

1. Design. 2. Gestão do Design. 3. Gestão de Projetos. 4. Educação. 5. Sustentabilidade. 6. Desenvolvimento humano. 7. Saúde. 8. Bem-estar. 9. Tecnologia .10. Emoção. I. Oliveira, Geísa Gaiger de.. II. Núñez, Gustavo Javier Zani.

CDU 658.512.2

CIP-Brasil. Dados Internacionais de Catalogação na Publicação.
(Jaqueline Trombin – Bibliotecária responsável CRB10/979)



Marcavisaual Editora - Conselho Editorial

www.marcavisaual.com.br

Airton Cattani – Presidente

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Adriane Borda Almeida da Silva

UFPEL – Universidade Federal de Pelotas

Celso Carnos Scaletsky

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Denise Barcellos Pinheiro Machado

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Marco Antônio Rotta Teixeira

UEM – Universidade Estadual de Maringá

Maria de Lourdes Zuquim

USP – Universidade de São Paulo

Capítulo 16

Biônica e seleção de materiais: design de garrafa térmica bioinspirada na inflorescência-tanque de bromélias

Felipe Luis Palombini, Branca Freitas de Oliveira
e Jorge Ernesto de Araujo Mariath

RESUMO

Determinadas espécies de bromélias apresentam como importante característica a formação de uma inflorescência-tanque, uma região na qual a água é acumulada com o propósito de regular a temperatura de seu interior, preservando suas flores de trocas bruscas de calor com o ambiente. Seguindo a metodologia de design baseada em biônica, este capítulo apresenta uma proposta de adaptação dessa característica para o desenvolvimento de uma garrafa térmica bioinspirada, em que a tampa foi projetada com a adição de um núcleo em seu interior. Foi realizado um mapa de seleção de materiais para definir quais as alternativas mais adequadas de serem incluídas no modelo, buscando maximizar a calorimetria e minimizar a condutividade térmica. O modelo proposto foi comparado com uma garrafa controle, sem a presença de núcleo, através de análises de transferência de calor pelo método dos elementos finitos. Os resultados mostraram que o modelo biônico contribuiu para uma menor troca de calor entre o exterior e interior da garrafa, confirmando que a característica de regulamento térmico da inflorescência-tanque de bromélias pode ser aplicada no projeto de produtos inovadores por meio de biônica.

Palavras-chave: design, seleção de materiais, microtomografia de raios x, elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa com foco em biônica trata essencialmente do estudo de características biológicas encontradas em seres vivos, as quais possuem potencial para serem aplicadas em projetos de design, arquitetura e engenharia (PALOMBINI *et al.*, 2020c; ROTH, 1983). Tais características dizem respeito tanto a cores, formas e texturas, quanto à funcionalidade e à estrutura de um determi-

nado gênero, espécie, família etc. (CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015). De posse desses atributos, o projetista pode avaliá-los quanto ao seu objetivo proposto (como exemplo: estética, funcionalidade ou desempenho), validando sua escolha perante alternativas e, finalmente, contribuindo com o desenvolvimento de soluções inovadoras (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005). Contudo, para permitir uma correta avaliação da propriedade buscada na natureza, naturalmente é preciso apropriar-se da informação biológica de uma maneira adequada, utilizando-se, assim, de diferentes meios de observação e análise. Com o advento de múltiplas tecnologias 3D, torna-se possível investigar amostras complexas em diferentes níveis de magnificação, possibilitando a visualização de informações nunca registradas (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 seccionamento 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 (μCT).

Um dos mais avançados meios de investigação de materiais da atualidade é a técnica de microtomografia computadorizada de raios X (μCT). De maneira semelhante à tomografia computadorizada de uso clínico, a técnica apropria-se da propriedade da radiação, neste comprimento de onda, de “atravessar” a matéria, sendo atenuada, transformada em luz visível e, posteriormente, adquirida pelo equipamento (PALOMBINI, 2020; STOCK, 2009). A atenuação de raios X ocorre em função da densidade de cada região da amostra, gerando uma projeção final com diferentes níveis de contraste que, após ser combinada com demais projeções concêntricas, permite a formação de um modelo 3D virtual,

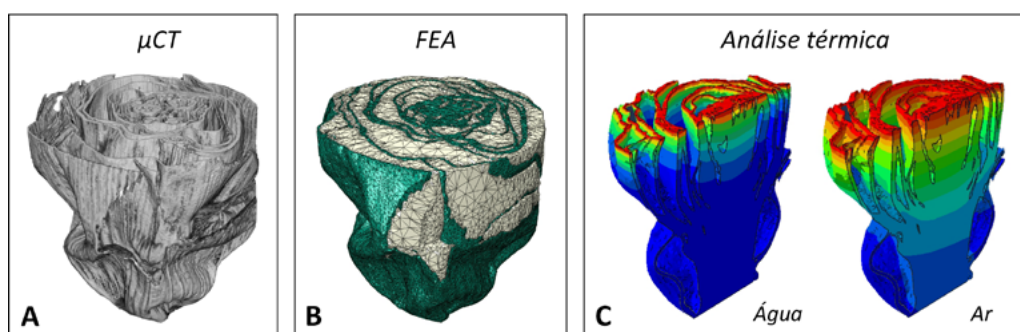
o qual pode ser exportado para investigações (HANKE *et al.*, 2016). Como principal característica da μ CT tem-se o fato de ser um meio de observação de alta resolução, com detalhes na casa de micrômetros ou nanômetros, além do fato de ser considerado não-invasivo (PALOMBINI *et al.*, 2018). Desse modo, é possível analisar detalhes de uma amostra em, virtualmente, infinitos planos de corte, sem a necessidade de seccioná-la fisicamente.

Além da capacidade de visualização para análises morfológicas de amostras por μ CT, outro importante ponto da técnica é a realização de análises quantitativas e físico-mecânicas. O primeiro tipo corresponde a meios numéricos com dados como dimensões lineares, volumes, porosidade, contagem de células etc. (NOGUEIRA *et al.*, 2017). Já o segundo diz respeito à simulação de condições reais por meio de um ambiente virtual, em um método conhecido como elementos finitos (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013). Muito utilizada por profissionais de engenharia, design e arquitetura, a análise por elementos finitos (FEA) é baseada, de modo geral, em um processo matemático de divisão de uma região contínua (*i.e.* infinita) de um determinado objeto de estudo, em um número finito de elementos, para que o sistema possa ser resolvido numericamente e cujo resultado seja o mais próximo possível do original (PALOMBINI; MARIATH; OLIVEIRA, 2020). Como principal dificuldade desse tipo de análise é possível citar a geração de um modelo com uma geometria fidedigna que possa ser utilizado, principalmente ao simular uma amostra biológica (PALOMBINI *et al.*, 2020a). Contudo, ainda que não seja considerado trivial, ao trabalhar com μ CT é possível discretizar o próprio modelo 3D gerado em uma malha para que possa ser utilizada em FEA, facilitando e tornando ainda mais preciso o processo de investigação do material biológico.

Diversas características biológicas têm sido estudadas com a utilização das técnicas combinadas de μ CT e FEA em diferentes áreas, levando a novas descobertas tanto relacionadas a pesquisas clínicas quanto científicas (BOYD, 2009). A exemplo, em trabalhos recentes, foi investigado o papel estrutural do parênquima (tecido de preenchimento) do bambu, verificando que o mesmo trabalha como uma matriz em um compósito, ao distribuir tensões

por toda a planta (PALOMBINI *et al.*, 2016). As técnicas combinadas também verificaram estruturalmente que a planta, em uma região nodal, distribui tensões para ramos secundários, preservando a integridade do eixo principal (PALOMBINI *et al.*, 2020b). Apesar disso, além de análises mecânicas, o método de elementos finitos com μ CT possibilita a realização de uma variedade de ensaios virtuais. A exemplo, tem-se a primeira investigação de um material biológico da literatura (NOGUEIRA *et al.*, 2019) correspondendo a uma FEA de transferência de calor utilizando uma malha de alta resolução oriunda de uma digitalização por μ CT (Figura 1). Neste estudo, os autores investigaram qual o papel da inflorescência-tanque de bromélias de uma determinada espécie, *Nidularium innocentii* (Bromeliaceae), a qual naturalmente leva à acumulação de água.

Figura 1 – Análise do papel da inflorescência-tanque: (A) μ CT da região do tanque; (B) malha discretizada em que a região verde é do material vegetal e a branca é do ambiente (água ou ar); e (C) vista em corte da análise de transferência de calor do tanque, comparando as temperaturas nos dois ambientes.



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

Em uma análise experimental, dois grupos de indivíduos de *N. innocentii* foram observados em casa de vegetação desde o desenvolvimento inicial até o florescimento (antese), sendo que em um grupo controle a água na inflorescência-tanque foi mantida, já no grupo experimental a água foi deixada apenas na terra e nas folhas (NOGUEIRA *et al.*, 2019). Foi verificado que mesmo o grupo experimental mantendo-se hidratado, foi observada a presença de necroses e lesões nos indivíduos, indicando que a água exerce um papel específico. Numericamente, a hipótese avaliada foi de que a água agiria como uma proteção térmica, sendo confirmada pela FEA baseada em μ CT (Figura 1 A). Ao con-

figurar uma malha discretizada, como visto na Figura 1 B (com o tecido do material vegetal em verde e o de um ambiente em branco), foram simuladas duas situações. Na primeira com o ambiente com propriedades térmicas referentes ao ar, como no grupo experimental, e à água, como no grupo controle. Os resultados da FEA, de temperatura nodal (Figura 1 C), mostraram que a água age como um regulador térmico, diminuindo variações de temperatura ao longo da inflorescência e evitando a geração de danos à planta. Para isso, torna-se importante as propriedades da água que a caracterizam como uma massa térmica, tais como um alto calor específico e densidade.

Partindo de informações originadas de materiais biológicos, segundo a metodologia em biônica (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005), este capítulo tem como objetivo a aplicação das propriedades termoisolantes da água em Bromeliaceae, seguindo sua configuração dentro do ambiente da inflorescência-tanque, através do desenvolvimento de uma garrafa térmica conceitual. O tópico seguinte descreve o processo projetual do objeto em questão, incluindo sua modelagem, a seleção de materiais e as configurações da análise térmica por elementos finitos que foi realizada, a fim de compará-la com uma alternativa convencional. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados das análises, englobando o potencial da utilização de tecnologias 3D de alta resolução como fonte de inspiração para projetos de biônica.

2 PROJETO DE GARRAFA TÉRMICA BIOINSPIRADA

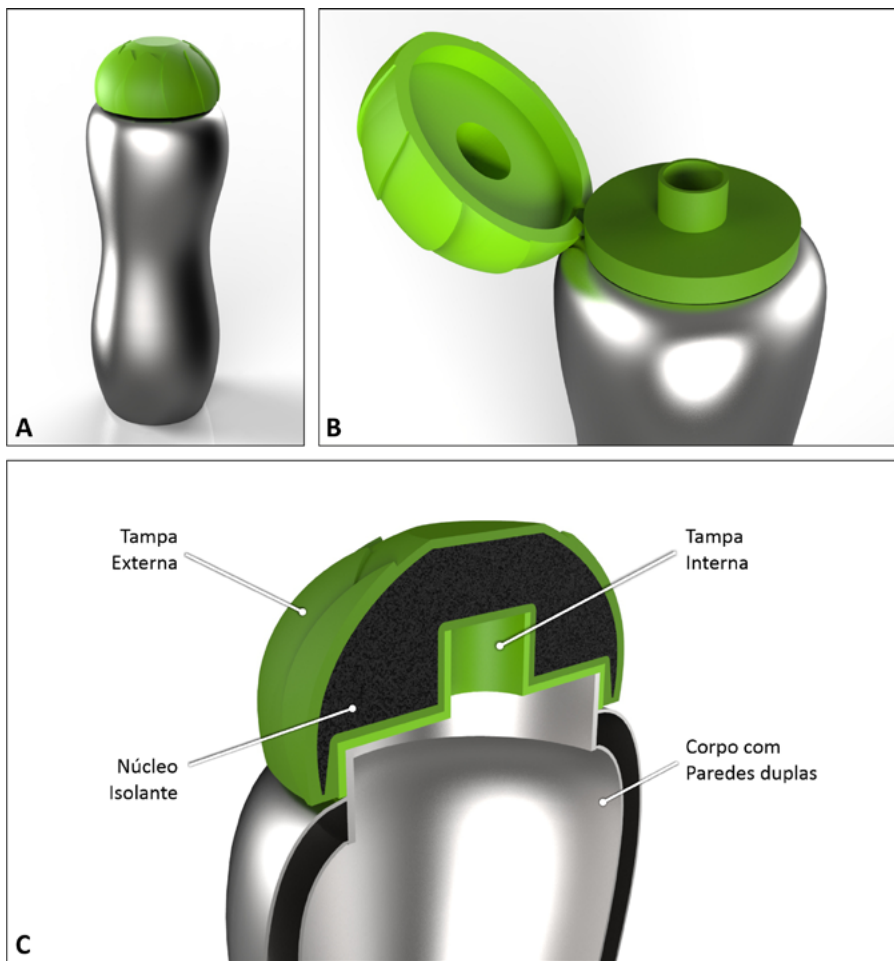
O presente tópico trata do processo projetual de desenvolvimento de uma garrafa térmica bioinspirada nas propriedades termoisolantes vistas da inflorescência-tanque de determinados gêneros de Bromeliaceae. Inicialmente é descrito o processo de modelagem em 3D do produto. Em seguida, é apresentado um mapa de seleção de materiais nos quais são vistas algumas possíveis alternativas para aplicação no modelo. Por fim, é descrito o processo de análise térmica por elementos finitos realizado, para verificação de seu desempenho.

2.1 Modelagem 3D

Uma visualização da garrafa térmica conceitual bioinspirada na capacidade de regulamento térmico e consequente isolamento da inflorescência-tanque de bromélias é vista na Figura 2. O corpo metálico da garrafa projetada (Figura 2A) consiste em conjunto com paredes duplas e interior a vácuo, conforme já é bem estabelecido como padrão de isolamento e é encontrado em modelos similares no mercado. A tampa polimérica apresenta uma geometria contendo uma padronização de repetição de formas, a qual foi visualmente inspirada na inflorescência. Contudo, o principal diferencial da tampa externa, a qual se abre para acesso ao líquido armazenado (Figura 2B), diz respeito ao fato de consistir em uma configuração sólida, ao invés de oca, como ocorre em alternativas similares. Na Figura 2C é apresentada um detalhe da vista em corte da parte superior da garrafa.

Como característica do conceito de bioinspiração na inflorescência-tanque, segundo a metodologia de biônica para projetos de design, a tampa externa maciça possui, em seu interior, um material aplicado como núcleo. Conforme sua analogia na natureza, o objetivo deste componente é representá-lo como uma região da tampa com um maior isolamento térmico. Para alcançar esta intenção, o projeto foi configurado de modo que esta região possua atributos de maior calorimetria e baixa condutividade. A calorimetria, também conhecida por capacidade térmica ou calor específico, está relacionada com a energia necessária para aquecer de um determinado material por (ou , uma vez que ambas as unidades de temperatura são lineares); já a condutividade térmica é a taxa à qual o calor é conduzido através de um sólido (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2012). Na parte inferior do projeto da garrafa foi aplicada uma solução de projeto já conhecida na indústria, de modo que o corpo metálico foi projetado com paredes duplas, com o isolamento térmico sendo determinado por uma região a vácuo entre as paredes. A garrafa conceitual foi modelada no *software* Rhinoceros® 3D (McNeel®, Seattle, EUA) e renderizada no *software* KeyShot® (Luxion® Inc., Tustin, CA, EUA).

Figura 2 – Projeto de garrafa térmica conceitual bioinspirada na inflorescência-tanque: (A) aparência externa; (B) detalhe da abertura da tampa; (C) vista em corte com detalhes dos componentes.



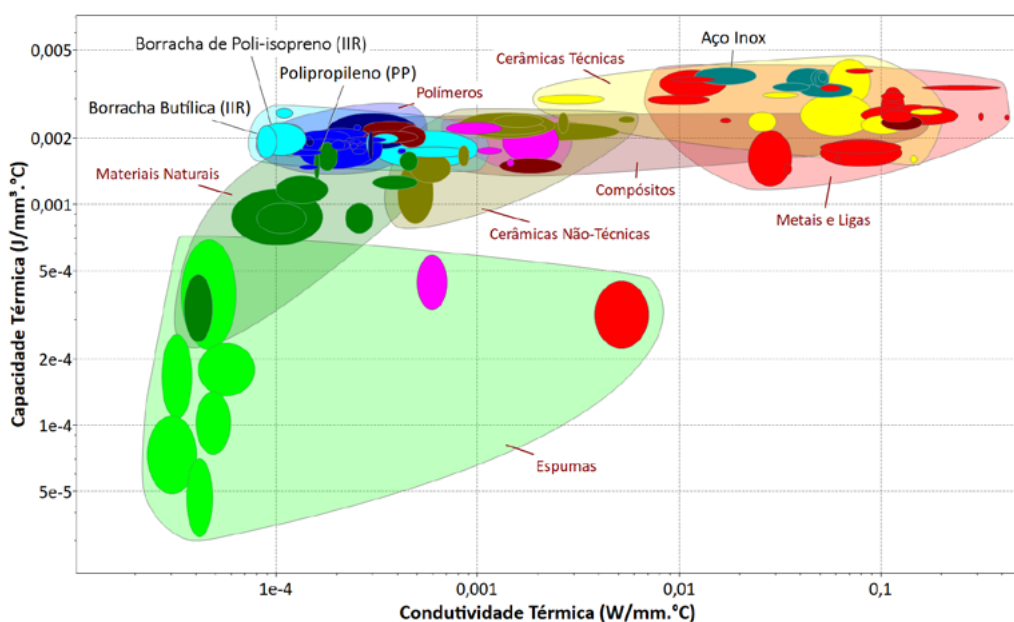
Fonte: Autores (2021).

2.2 Seleção de Materiais

Para uma correta avaliação do desempenho da garrafa térmica, bem como para validar sua proposta de uma tampa com propriedades termoisolantes superiores às de um modelo convencional, torna-se de grande importância, além do desenvolvimento de uma solução geométrica apropriada, a escolha dos materiais mais adequada para se obter o efeito desejado. Nesse sentido, para este estudo foi realizado um processo de seleção de materiais de modo a identificar os principais candidatos a serem utilizados no projeto. Para isso, foi criado um mapa de seleção de materiais (ASHBY; JOHNSON, 2011) no *software* CES Edupack™ (Granta® Design Ltd., Cambridge, Reino Unido), apresentado na Figura 3, em escala logarítmica.

Para evitar excessos de detalhamentos 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 deste capítulo, em especial à seleção de materiais para utilização na região do núcleo da tampa externa, foram definidas para o mapa as duas variáveis de interesse mencionadas anteriormente, relacionadas às propriedades térmicas. No eixo da abscissas, foi aplicada a propriedade de condutividade térmica adaptada para milímetros ($\text{W/mm}\cdot^{\circ}\text{C}$), 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 ($\text{J/mm}^3\cdot^{\circ}\text{C}$), 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 ($\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$), em que é levada em consideração a massa do material. Como a região do núcleo é geometricamente restrita, uma vez que corresponde a 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.

Figura 3 – 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.



Fonte: Autores (2021).

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, sendo um baixo condutor térmico, relativamente entre os metais, também possui uma alta calorimetria, ou seja, necessita de uma grande quantidade de energia para aumentar sua temperatura em , além de possuir boas propriedades de conformação e processabilidade. Já 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, foram buscadas 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 uma borracha natural, derivada do látex – uma emulsão aquosa de poli-isopreno e de outras substâncias (GROOVER, 2012; TEEGARDEN, 2004). Já a borracha butílica é um material sintético com propriedades semelhantes às de borracha natural (ASHBY; JOHNSON, 2011), sendo uma copolimerização de isobutileno (cerca de a) e de isopreno, e podendo ser vulcanizada para diminuir sua permeabilidade ao ar, com diversas aplicações industriais (GROOVER, 2012). De modo geral, ambos os elastômeros são semelhantes tanto em propriedades térmicas quanto em aplicações industriais e, portanto, as duas alternativas foram consideradas para aplicação como material do núcleo da tampa da garrafa.

2.3 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*), utilizando o *software*

Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia® Corp., Providence, RI, EUA). Para isso, o modelo desenvolvido foi exportado para o formato STL binário no *software* 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* de acesso aberto Gmsh (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009), sendo posteriormente exportados em formato INP para o *software* Abaqus CAE, com uma malha inicial do tipo (PALOMBINI, 2020). Conforme seguido no estudo de caso de Nogueira *et al.* (2019), os arquivos precisaram ser abertos em um editor de texto para ajustar a codificação do tipo de malha para , 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 avaliar 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 1 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.

Tabela 1 – Propriedades termofísicas para a análise de transferência de calor.

Material	Condutividade térmica (W/mm°C)	Calor específico (J/kg°C)	Densidade (kg/mm³)
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

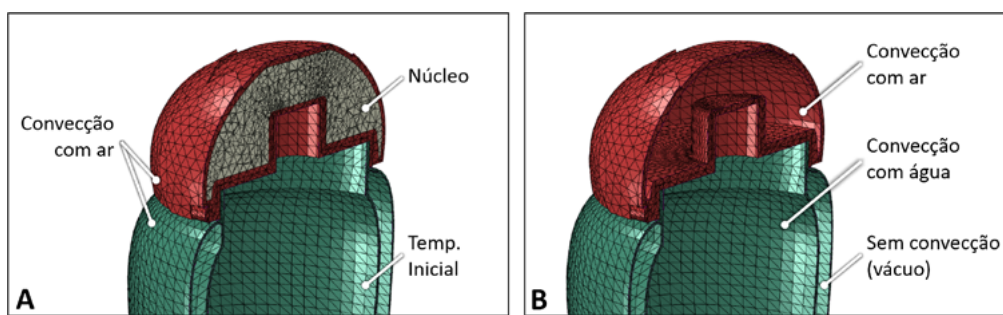
Fonte: Autores (2021).

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 (PALOMBINI, 2020). 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 primeiro estabelece a temperatura homogênea inicial de para a totalidade do modelo, com uma duração de . Já o segundo passo representou a aplicação de uma fonte de temperatura uniforme com magnitude de no interior da garrafa durante , 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*). 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 até chegar à temperatura ambiente definida previamente de .

Novamente adaptando os resultados de Nogueira *et al.* (2019), 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 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 . 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 4 apresenta

um resumo das condições de contorno atribuídas aos modelos com (Figura 4A) e sem (Figura 4B) 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 4B), e por meio do próprio material do qual o núcleo é constituído, quando ele é presente (Figura 4A).

Figura 4 – Condições de contorno atribuídas às análises da garrafa térmica (A) com e (B) sem o núcleo.



Fonte: Autores (2021).

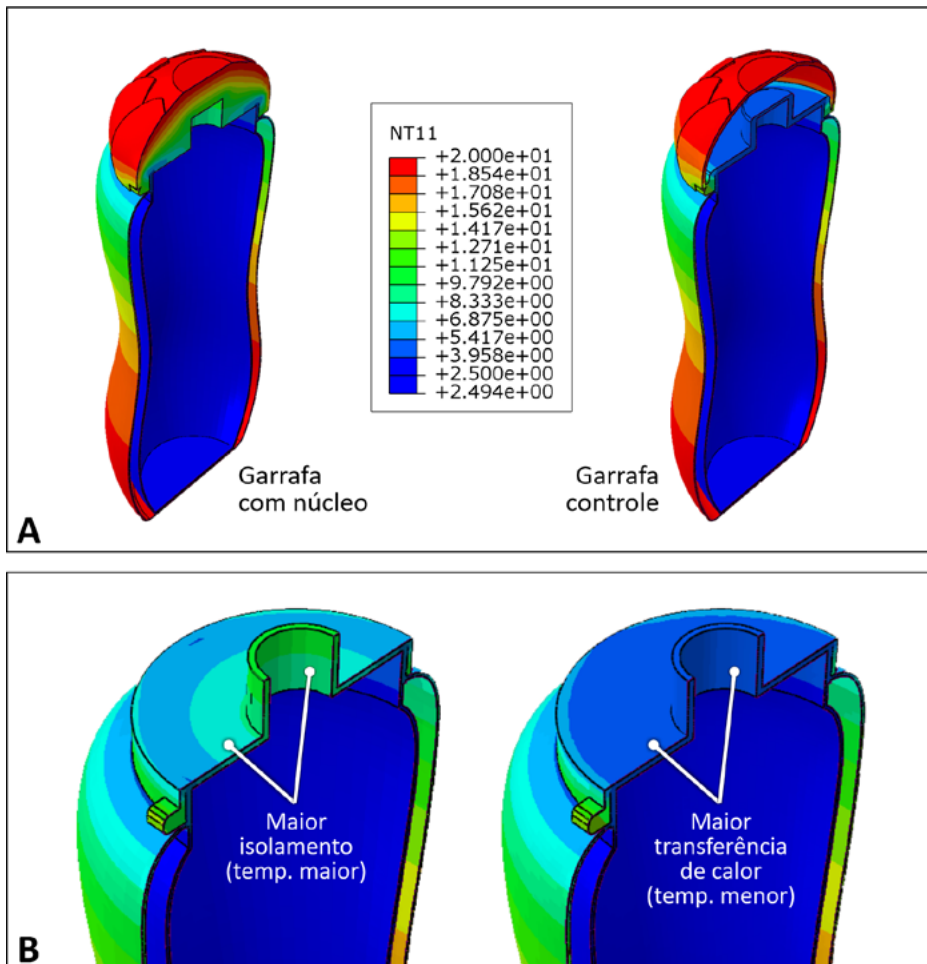
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 ligeiramente superior, de modo a permitir uma menor transferência de calor do interior ao exterior da garrafa. O desempenho ligeiramente melhor entre os materiais reflete os resultados do mapa de seleção de materiais (Figura 3), 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 5. Novamen-

te, 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 (garrafa com núcleo) em comparação com uma garrafa regular (garrafa controle), *i.e.*, sem a presença de um elemento de núcleo termoisolante (Figura 5A). Os resultados são apresentados em função de temperatura em cada nó (*nodal temperature*, ou NT11).

Figura 5 - Resultados da análise de transferência de calor com temperatura nodal (NT), em escala variando de 2,5°C a 20°C: (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: Autores (2021).

Ao avaliar a garrafa inteira (Figura 5A), como esperado, observou-se que o corpo não apresentou nenhuma diferença de temperatura nodal entre um modelo e o outro, quando a temperatura

do interior da garrafa está em e o exterior está em . Contudo é possível notar que a tampa com a adição do elemento de núcleo apresenta um gradiente bastante pronunciado entre a temperatura do interior e do exterior. Ao avaliar, em detalhes, a região da tampa inferior apenas (Figura 5B), a qual fica em contato mais próximo com o líquido gelado, é possível observar que a garrafa com núcleo resultou em temperaturas externas cerca de a 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 frio por um período maior.

É importante ressaltar que apesar das partes externas de ambas as tampas (modelos com e sem núcleo) encontrarem-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°C. Assim, como o seu material (polipropileno) não é um bom condutor, mesmo após a adição do líquido frio (como visto na Figura 5A), 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.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou um desenvolvimento de uma garrafa térmica conceitual baseada nas propriedades de isolamento térmico encontrada em inflorescência-tanque de *N. innocentii* (Bromeliaceae). De acordo com estudos com microtomografia de raios X e análise por elementos finitos realizados anteriormente (NOGUEIRA *et al.*, 2019; PALOMBINI, 2020), a água da região do tanque de determinadas bromélias apresenta-se com a capacidade de um regulador térmico, de modo a evitar oscila-

ções de temperatura no interior da inflorescência, preservando o desenvolvimento de suas flores. O atributo da planta foi aplicado no modelo seguindo a metodologia de biônica (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005), em que a característica natural desejada (regulamento térmico determinado pela acumulação de água na região do tanque), uma vez confirmado seu desempenho, foi adaptada para um projeto de design.

Com o modelo proposto pretendeu-se transpor a propriedade de isolamento na região de uma garrafa térmica em que mais ocorre troca de temperatura com o exterior, a tampa. Uma vez que o corpo formado por paredes duplas de aço inox, com interior das mesmas estabelecido por uma região a vácuo, consiste em uma solução formal já com boas propriedades isolantes, a tampa é a região pela qual a garrafa mais perde ou ganha calor. Desse modo, essa região foi projetada para possuir um núcleo em seu interior, simulando a água na inflorescência-tanque. Ao realizar um processo de seleção de materiais, utilizando como objetivo encontrar as propriedades de alta calorimetria e baixa condutividade térmica, foi definido que o material do núcleo corresponderia a uma borracha de poli-isopreno.

O modelo proposto foi comparado com um modelo de uma garrafa controle, a qual corresponde a uma tampa com a ausência de um material de núcleo. Após serem transformados em malha, ambos os modelos foram avaliados em uma análise de elementos finitos de transferência de calor, em que foi simulada a aplicação de uma temperatura baixa no interior das garrafas – representando um líquido cuja temperatura desejava-se manter isolada. Os ensaios mostraram que o núcleo bioinspirado auxiliou para uma troca menor de temperatura entre o interior e o exterior, validando a aplicação da funcionalidade estudada da inflorescência-tanque, de acordo com a metodologia seguida.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- 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.
- BOYD, S. K. Image-Based Finite Element Analysis. In: **Advanced Imaging in Biology and Medicine**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 301–318. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-68993-5_14
- 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.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.2579>
- GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems**. 5. ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- HANKE, R.; FUCHS, T.; SALAMON, M.; ZABLER, S. 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>
- 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>
- KREITH, F.; BLACK, W. Z. **Basic Heat Transfer**. New York: Harper & Row, 1980.
- NOGUEIRA, F. M.; KUHN, S. A.; PALOMBINI, F. L.; RUA, G. H.; ANDRELLO, A. C.; APPOLONI, C. R.; MARIATH, J. E. A. 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.; PALOMBINI, F. L.; KUHN, S. A.; OLIVEIRA, B. F.; MARIATH, J. E. A. 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>
- PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JUNIOR, W.; OLIVEIRA, B. F. DE; MARIATH, J. E. DE A. 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.; KINDLEIN JÚNIOR, W.; SILVA, F. P. DA; MARIATH, J. E. DE A. 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. DOI: <https://doi.org/10.23972/det2017iss13pp46-56>
- PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JUNIOR, W.; OLIVEIRA, B. F. DE; MARIATH, J. E. DE A. 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. DOI: <https://doi.org/10.5151/9788580393491-15>

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) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

PALOMBINI, F. L.; LAUTERT, E. L.; MARIATH, J. E. DE A.; DE OLIVEIRA, B. F. 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. 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01146-4>

PALOMBINI, F. L.; NOGUEIRA, F. M.; KINDLEIN JUNIOR, W.; PACIORNIK, S.; MARIATH, J. E. DE A.; OLIVEIRA, B. F. DE. 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. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.117>

PALOMBINI, F. L.; PESTANO, V.; KINDLEIN JR., W.; DUARTE, L. DA C. Biônica e Seleção de Materiais Celulares para projetos de Design. **Design e Tecnologia**, v. 10, n. 20, p. 01–10, 30 jun. 2020c. DOI: <https://doi.org/10.23972/det2020iss-20pp01-10>

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>

ROTH, R. R. The Foundation of Bionics. **Perspectives in Biology and Medicine**, v. 26, n. 2, p. 229–242, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1353/pbm.1983.0005>

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

TEEGARDEN, D. M. **Polymer Chemistry : Introduction to an Indispensable Science.** Arlington: NSTA Press, 2004.

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

Como citar este capítulo (ABNT):

PALOMBINI, F. L., OLIVEIRA, B. F., MARIATH, J. E. A. Biônica e Seleção de Materiais: Design de garrafa térmica bioinspirada na inflorescência-tanque de bromélias. In: OLIVEIRA, G. G. de; NÚÑEZ, G. J. Z. **Design em Pesquisa – Volume 4.** Porto Alegre: Marcavivisual, 2021. cap. 16, p. 310–326. E-book. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iicd/publicacoes/livros>. Acesso em: 5 ago. 2021 (exemplo).

Como citar este capítulo (Chicago):

Palombini, Felipe Luis, Branca Freitas de Oliveira e Jorge Ernesto de Araujo Mariath. 2021. "Design de garrafa térmica bioinspirada na inflorescência-tanque de bromélias." In *Design em Pesquisa - Volume 4*, edited by Geísa Gaiger de Oliveira and Gustavo Javier Zani Núñez, 310–326. Porto Alegre: Marcavivisual. <https://www.ufrgs.br/iicd/publicacoes/livros>.