REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2020, Vol. XX, No. XX
DOI 10.23972/det2020iss20pp01-10

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Biônica e Seleção de Materiais Celulares para projetos de Design: caracterização e análise de cortiça e espumas poliméricas

Felipe L. Palombini[1]; Viviane Pestano[1]; Wilson Kindlein Jr.[2]; Lauren C. Duarte[3]

1 *Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

2 *Programa de Pós-Graduação em Design, Departamento de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

3 *Programa de Pós-Graduação em Design, Departamento de Departamento de Mineralogia e Petrologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

RESUMO

Os materiais celulares possuem propriedades interessantes para aplicação no design. Dentre os mais conhecidos destacam-se a cortiça e alternativas poliméricas sintéticos bioinspirados no material natural. Contudo, pouco tem sido estudado em termos da relação entre a microestrutura e propriedades para aplicações no design de produto. Esta pesquisa apresenta a caracterização e comparação de materiais celulares através de um estudo de caso de rolhas, com foco na seleção de materiais, e relacionando a densidade relativa e porosidade das amostras com as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV), termogravimetria (TGA) e ensaios de compressão. As análises foram realizadas em amostras de rolhas confeccionadas fora do Brasil em cortiça natural e aglomerada, e de alternativas sintéticas de polipropileno expandido e EVA. As imagens via MEV apresentam a replicação do padrão celular da cortiça nas alternativas sintéticas. Os ensaios de compressão foram relacionados e discutidos quanto às propriedades mecânicas e à característica celular dos materiais. Foi, também, discutido como a microestrutura dos materiais celulares, sejam naturais ou sintéticos, reflete diretamente nas suas propriedades termomecânicas, bem como considerações na seleção de materiais para projetos de design. Foi possível concluir, ainda, que a análise por TGA mostrou a cortiça natural como um material mais homogêneo em comparação com a aglomerada, já as amostras sintéticas apresentaram-se mais resistentes à degradação térmica.

PALAVRAS-CHAVE
Seleção de Materiais; Microestrutura; Propriedades Mecânicas; Materiais Naturais; Biônica

Design and Cellular Material Selection: characterization and analysis of cork and polymeric foams

ABSTRACT

Cellular materials present interesting properties for application in design. Among the most well-known are cork and synthetic polymer alternatives, bio-inspired in the plant material. However, little has been studied about the relationship between microstructure and properties for applications in product design. This research aims the characterization and comparison of cellular materials through a case study of stoppers, with focus on material selection, and relating the relative density and porosity of the samples with techniques of scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetry (TGA) and compression tests. The analyzes were carried out on samples of natural and agglomerated cork and synthetic alternatives of expanded polypropylene and EVA. SEM images show the replication of the cork cell pattern in synthetic alternatives. Compression tests were related and discussed regarding the mechanical properties and the cellular characteristics of the materials. How the microstructure of both natural and synthetic cellular materials directly reflects on their thermomechanical properties was discussed, as well as considerations in the materials selection for design projects. Additionally, it could be concluded that TGA analyses showed natural cork as a more homogeneous material in comparison to the agglomerate, whereas the synthetic samples were more resistant to thermal degradation.

KEYWORDS
Materials Selection; Microstructure; Mechanical Properties; Natural Materials; Bionics

CONTATO: Felipe L. Palombini – *felipe.palombini@ufrgs.br*

© 2020 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Os materiais celulares são caracterizados por terem sua microestrutura formada por uma rede de escoras ou placas, que representam as arestas ou faces de células abertas ou fechadas, respectivamente (GIBSON; ASHBY, 1999). Na natureza, tais materiais são encontrados em madeiras, bambu, cortiça, buchas vegetais, ossos, entre outros. Suas propriedades estão relacionadas à configuração de seus elementos constituintes, como a densidade de distribuição de suas células (GIBSON; ASHBY, 1999; PALOMBINI *et al.*, 2016). Essa configuração permite diferentes tipos de desempenho, como resistência à compressão, absorção de impacto, condutividade térmica além de isolamentos diversos (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PERES; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2016). Contudo, para interpretação adequada de suas propriedades e, consequentemente, aplicação em projetos de design e engenharia, torna-se importante um adequado entendimento de sua funcionalidade anatômica (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

A cortiça é um dos materiais naturais mais icônicos e reconhecidos, devido às suas propriedades termomecânicas e à ampla utilização na indústria de vinhos (PEREIRA, 2007). Foi da sua microestrutura que Robert Hooke realizou a primeira descrição de uma célula, em 1665 (figura 1). O cientista inglês, conhecido pela Lei de Hooke e por ser um dos criadores do microscópio (figura 1A), realizou ilustrações da microestrutura de diversos materiais celulares (figura 1B), que foram fundamentais para um entendimento adequado de seu funcionamento mecânico. Em plantas com o chamado crescimento secundário, *i.e.*, plantas que se desenvolvem transversalmente, como árvores lenhosas, o tecido conhecido como xilema secundário é produzido na região interior dos caules (FAHN, 1990). Nas árvores, essa região é conhecida como o lenho ou madeira de lei, sendo rica em fibras e penetrada radialmente por raios vasculares (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). Com o envelhecimento das árvores, e o consequente aumento da espessura da madeira, uma pressão é imposta nas regiões externas das células do tronco, o córtex e a epiderme, que eventualmente se rompem (FAHN, 1990). Com este rompimento, um tecido secundário protetor, chamado de cortiça, toma a função da epiderme, para proteger a planta de exposição externa (FAHN, 1990).

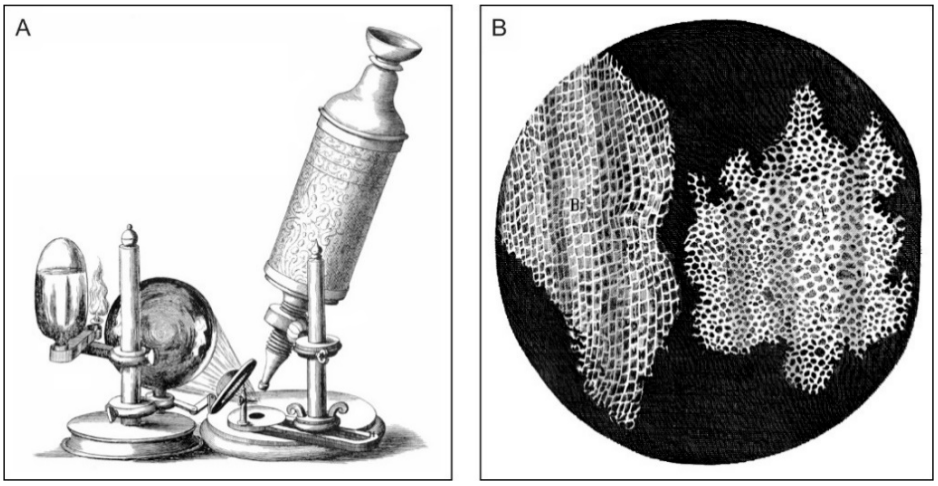


Figura 1 Primeiros registros e ilustrações de materiais celulares realizados por Robert Hooke: (A) equipamento de microscopia desenvolvido; (B) ilustração de cortiça observada e microscopia, através de corte longitudinal e transversal. Fonte: adaptado de HOOKE (1665) – Domínio Público.

Na botânica, a cortiça é considerada um tecido de células mortas e achatadas, cujas membranas, ou paredes celulares primárias, são totalmente suberificadas, ou seja, preenchidas com suberina (SCHULTZ, 1972). A suberina é um polímero formado por longas cadeias de ácidos graxos e álcoois (PEREIRA, 2007). A substância, juntamente com ceras presentes na cortiça, é completamente impermeável à água, ar e álcool (SCHULTZ, 1972). Por ser uma barreira impermeável, a cortiça não permite contato com o interior da planta, causando a morte dos tecidos situados à parte externa. Desse modo, o material divide a casca das árvores entre o tecido vivo, interno, e o morto, externo à camada de cortiça (FAHN, 1990). Estruturalmente, a cortiça pode ser considerada como uma espuma polimérica de baixa densidade e de células fechadas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Isso leva às propriedades termoisolantes do material, de modo que há cerca de 40 milhões de células de ar fechadas dentro de uma região de 1 cm^3 (LEFTERI, 2014). Ainda, macroscopicamente, a cortiça é um material elástico, isolante elétrico e acústico, além de possuir boas propriedades de absorção de vibrações (PEREIRA, 2007). Mecanicamente, o material é notável por sua capacidade de ser tensionado axialmente e apresentar pouca ou nenhuma deformação no sentido perpendicular à solicitação, conhecido como o baixo valor do coeficiente de Poisson (ASHBY, 2012; GIBSON; EASTERLING; ASHBY, 1981; LEFTERI, 2014).

A cortiça começou a ser empregada como rolha no século XVIII, por possuir característica flexível, ausência de aroma ou sabor, e por permitir, assim, que o vinho amadureça com mais segurança (PEREIRA, 2007). Apesar de a cortiça ser encontrada em diversas espécies, o sobreiro (*Quercus suber*), da família do carvalho (Fagaceae), caracteriza-se por este tecido ser produzido em uma camada de diversos centímetros de espessura, ao redor do tronco, na maturidade da planta (PEREIRA, 2007). A planta é nativa da região mediterrânea e sua vida útil para exploração do material é de aproximadamente 150 anos. A primeira remoção da cortiça do sobreiro ocorre a partir do seu décimo-quinto ano, com intervalo de oito a dez anos entre as extrações seguintes (PEREIRA, 2007). A cortiça é extraída, principalmente, em sete países do mediterrâneo com valores de produção anual total superior a 201 mil toneladas (APCOR, 2018). Cerca de 50% da produção é proveniente de Portugal (APCOR, 2018), 31% da Espanha, com o restante dividido entre Marrocos (6%), Argélia (5%), e Tunísia, Itália e França (3%). Em Portugal, a rolha é o produto dominante da exploração do sobreiro, sendo fabricadas, aproximadamente, 40 milhões de unidades diariamente (APCOR, 2018). Essa indústria possui três setores: preparador, para a extração e preparo da cortiça; transformador, na manufatura da rolha; e aglomerador, para manufatura de subprodutos dos resíduos das aparas do material (APCOR, 2018). Esses resíduos são

também empregados para a fabricação de novas rolhas, de menor valor comercial, além de diversos outros produtos, como painéis fixadores, placas isolantes, utilidades domésticas, bem como na indústria de mobiliário e inclusive a aeroespacial (LEFTERI, 2014).

Atualmente, diferentes materiais celulares têm sido empregados como alternativas sintéticas bioinspiradas na cortiça (ASHBY; JOHNSON, 2011). Esses consistem em materiais que mimetizem a configuração microscópica da cortiça de modo a se aproximar de suas funções estruturais. Em sua maioria, são encontrados como espumas poliméricas devido à maior similaridade com o material. Para se aproximar das propriedades naturais da cortiça, os materiais sintéticos são feitos de polímeros expandidos por meio de agentes químicos (ASHBY; JOHNSON, 2011). Desse modo, faz-se necessário que o material possua o máximo de células fechadas e de tamanho homogêneo. Os materiais utilizados são termoplásticos e elastômeros, os quais foram introduzidos na indústria no início dos anos 1990 (PEREIRA, 2007).

A utilização de padrões da natureza em materiais criados pelo homem é estudada dentro da ciência da Biônica. Ela consiste na observação, estudo, adaptação e emprego de características, mecanismos, formas e estruturas de elementos naturais, com aplicação no design de soluções mais eficientes (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005; PALOMBINI *et al.*, 2016). Além de propriedades de desempenho (PALOMBINI *et al.*, 2018a), a biônica pode basear-se na natureza para imitar padrões estéticos e funcionais inovadores (CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015) e, para isso, diferentes tecnologias podem ser empregadas na observação de materiais naturais (CIDADE *et al.*, 2018; NOGUEIRA *et al.*, 2017; PALOMBINI *et al.*, 2017, 2018b). Dentre as técnicas de visualização de estruturas microscópicas, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma das ferramentas mais utilizadas (CALLISTER *et al.*, 2006). Com o MEV, é possível visualizar detalhes em amostras com ampliação de milhares de vezes, auxiliando etapas de caracterização e, posteriormente, de seleção de materiais. Para mimetizar e substituir produtos específicos, a seleção de materiais auxilia na comparação de desempenho de propriedades, para determinação das melhores alternativas (ASHBY, 2012; PALOMBINI, 2016). Ainda que estudos tenham sido realizados sobre as propriedades mecânicas da cortiça (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; GIL, 2009, 2012; PEREIRA, 2007), poucas análises comparativas com o material e alternativas sintéticas foram realizadas. Essa relação pode, então, auxiliar na compreensão da relação entre as propriedades termomecânicas e sua microestrutura, favorecendo a aplicação materiais celulares naturais e sintéticos no desenvolvimento de novos produtos.

Este trabalho aborda o ponto de vista do design e seleção de materiais celulares, através da caracterização, análise e comparação das propriedades da cortiça com as alternativas sintéticas. O objetivo é associar as propriedades termomecânicas dos materiais com suas microestruturas, visando a aplicações no design. Inicialmente, é brevemente abordado o processo de fabricação das rolhas de cortiça natural e aglomerada, e das alternativas sintéticas. O desempenho termomecânico e a configuração da microestrutura dos materiais são relacionados. As resinas poliméricas utilizadas nos materiais sintéticos foram identificadas via Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FT-IR). A seguir, são comparadas as microestruturas dos materiais, via MEV, e realizadas Análises Termogravimétricas (TGA), para comparação do comportamento dos materiais em diferentes níveis de temperatura. Por fim, as amostras foram submetidas a ensaios de compressão, para verificar o desempenho mecânico.

2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS CELULARES

A rolha é o produto mais nobre da extração da cortiça, assim o processo de fabricação de demais produtos com este material natural deriva dessa linha produtiva. Após sua fabricação, uma grande quantidade de material, relativo às aparas da fabricação da rolha, não é utilizado (PEREIRA, 2007). Com esses resíduos, entretanto, é possível a fabricação de diversos novos produtos, aproveitando-se das propriedades naturais do material original. Entre os subprodutos dos resíduos encontram-se a cortiça aglomerada, a qual possui etapas específicas de fabricação (PEREIRA, 2007). Já as alternativas sintéticas consistem em um processo distinto, partindo-se de matérias-primas consideradas *commodities*. Os processos de fabricação da cortiça natural, aglomerada e de alternativas sintéticas bioinspiradas são descritos a seguir.

2.1 Cortiça natural

A produção da cortiça natural, sob a forma primária de rolhas, dá-se quando o sobreiro (*Q. suber*), em sua idade adulta, tem esse tecido colhido em um processo que retira apenas a região da casca, não causando qualquer tipo de dano à parte viva da árvore. Devido à cortiça ser considerada um tecido morto, o crescimento de novas células na região periférica do tronco permite o cultivo renovável da planta, e sem a necessidade de cortá-la (FAHN, 1990; KARANA; PEDGLEY; ROGNOLI, 2014). O processo é realizado com cuidado para não ser atingida a região interna, a qual contém tecidos vivos e elementos condutores essenciais (PEREIRA, 2007), permitindo que a planta continue a desenvolver novas camadas de cortiça.

As cascas de cortiça retiradas das árvores são estocadas para a secagem natural ao ar livre. Após este período, a cortiça é encaminhada para um processo de cozimento em vapor, para que as placas sejam amolecidas, tornando-as mais elásticas e higienizadas, além de garantir o extermínio de agentes contaminantes (PEREIRA, 2007). Em seguida, as cascas são prensadas, esticadas e submetidas à primeira inspeção. Posteriormente, a cortiça é perfurada sobre um formato cilíndrico em uma prensa específica, com o alinhamento do processo podendo ser manual ou semiautomatizado. O corte em formato de rolha é realizado transversalmente à casca considerando a posição relativa da casca – ou axialmente em relação ao tronco da árvore. Desse modo, tem-se a rolha proveniente de uma região inteira com a mesma espessura. Além disso, eventuais defeitos que possam existir no material estarão localizados no sentido transversal da rolha, não comprometendo sua capacidade de vedação do sentido longitudinal (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). As cortiças perfuradas passam por uma seleção mecânica no leitor óptico manualmente como controle de qualidade, eliminando as que possuem imperfeições (PEREIRA, 2007). Por fim, a rolha pode ser marcada com as informações da empresa ou vinícola.

2.2 Cortiça aglomerada

No processo de produção de rolhas de cortiça natural, grande quantidade de material não é aproveitada diretamente. Os cortes cilíndricos priorizam a produção de uma peça inteira, por possuir maior valor comercial (PEREIRA, 2007). Na maior parte, os resíduos consistem no material que não foi perfurado pela prensa. Este tipo de material é chamado de secundário e pode ser reutilizado para a fabricação de cortiça aglomerada (PEREIRA, 2007).

Além de aparas, os resíduos da produção de rolha natural incluem rolhas defeituosas e demais fragmentos de cortiça que não foram utilizados. Tais resíduos são triturados em moinhos para se obter grânulos de 3 a 7 mm. Com os diversos usos da cortiça secundária, como para materiais de construção, mobiliário e produtos de modo geral, os resíduos podem ser

moídos e peneirados até se obter as dimensões desejadas, com diferentes granulometrias (GIL, 2009; PEREIRA, 2007). Após a secagem, o material moído é aglomerado com o uso de diferentes resinas poliméricas, para ser agregado no formato desejado (GIL, 2009; PEREIRA, 2007). Contudo, especificamente para aplicações em produtos que possuam contato com alimentos, como no caso de vinhos, por regulamentação, usam-se resinas, como de poliuretano sem aditivos tóxicos, bem como alternativas de resinas naturais, como o látex (APCOR, 2018). Por fim, o material aglutinado é compactado e extrudado no formato desejado da aplicação.

2.3 Espumas poliméricas

Materiais alternativos ao uso da cortiça são fabricados utilizando-se resinas termoplásticas expandidas. O processo de fabricação consiste na adição de agentes espumantes nos *pellets* poliméricos. Esses aditivos, considerados um produto convencional e de baixo custo, reagem com o calor do processo de termoformagem (ASHBY; JOHNSON, 2011), liberando dióxido de carbono (CO_2). O processo é realizado sobre baixa pressão em moldes de alumínio, fazendo com que o material se expanda, aumentando em mais de 20 vezes seu volume original.

Devido à presença de um bom condutor térmico no molde, como o alumínio, o material conformado pode adquirir uma película mais lisa e uniforme na sua parte exterior (ASHBY; JOHNSON, 2011). Essa propriedade, permite simular o fechamento celular externo, natural da cortiça, aumentando sua proximidade com o material natural, incluindo em termos de desempenho mecânico e propriedades isolantes (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; SCHULTZ, 1972).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo foram analisadas amostras de cortiça natural e aglomerada (provenientes de rolhas confeccionadas fora do Brasil), sendo comparadas com alternativas sintéticas, de polímero expandido. Foram utilizadas imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV), análises termogravimétricas (TGA) e ensaios de compressão, em função das características de materiais celulares, como densidade relativa e porosidade. Por fim, os resultados foram discutidos com foco na seleção de materiais celulares para aplicação em projetos de design.

3.1 Amostras utilizadas

O aspecto típico das amostras de cortiça utilizadas no estudo pode ser visualizado na figura 2, correspondendo a rolhas do material natural (figura 2A) e aglomerado (figura 2B). Com relação às alternativas sintéticas, foram analisadas rolhas de espuma polimérica. As amostras foram preliminarmente caracterizadas via FT-IR (espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier), para determinação dos tipos de resinas utilizadas. A técnica baseia-se na identificação de características do material polimérico, como ligações e grupos funcionais. A análise identificou o material da amostra da figura 2C como de espuma de polipropileno expandido (EPP), e o da 2D como de espuma vinílica acetinada (EVA).

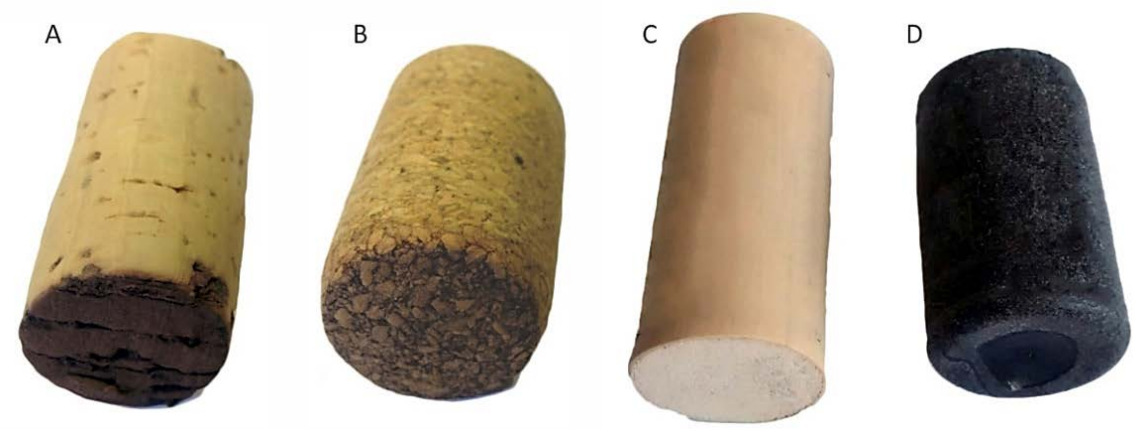


Figura 2 Aspecto geral das amostras analisadas: (A) cortiça natural; (B) cortiça aglomerada; (C) polipropileno expandido (EPP); e (D) espuma vinílica acetinada (EVA). Fonte: autores (2020).

3.2 Densidade relativa

Devido à propriedade isolante da aplicação, é necessário que os materiais celulares empregados para fabricação sejam espumas de células fechadas, com a presença de ar no interior. Desse modo, a densidade relativa (ρ^*/ρ_S) é um importante fator para avaliar o desempenho desses materiais (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). O índice é adimensional e definido pela fração volumétrica da amostra, segundo a relação:

$$\frac{\rho^*}{\rho_S} = \frac{M_S}{V_T} \cdot \frac{V_S}{M_S} = \frac{V_S}{V_T} = 1 - \varphi \qquad (1)$$

onde ρ^* é a densidade da amostra de material celular e ρ_S a densidade do material do qual a amostra é fabricada; e M_S é a massa da amostra. Desse modo, tem-se que a razão ρ^*/ρ_S é definida pelo volume V_S ocupado pela amostra divido pelo volume total do sólido V_T, incluindo os espaços preenchidos e vazios (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PALOMBINI, 2016). O índice também é utilizado para cálculo da porosidade (φ), uma vez que determina a quantidade de material preenchido dentro de um volume (PALOMBINI *et al.*, 2016). Para este estudo, a densidade relativa das amostras foi determinada através da sua massa, com o auxílio de uma balança analítica modelo Q-500L210C (Quimis®) com precisão de 0,1 mg, e do seu volume utilizando-se de paquímetro para dimensionar os corpos de prova, comparando com dados de densidade dos materiais brutos, encontrados na literatura (ASHBY; JOHNSON, 2011; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PEREIRA, 2007).

3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a caracterização da microestrutura, as amostras foram analisadas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no equipamento TM3000 (Hitachi® High-Technologies Corp.). A aceleração do feixe de elétrons utilizada foi de 15 KeV. O objetivo foi a comparação visual da microestrutura das amostras.

3.4 Análise Termogravimétrica (TGA)

As propriedades isolantes da cortiça devem-se, entre outros, à sua organização celular definida por microcompartimentos bem como à presença de compostos químicos que fortalecem a resistência ao calor, sendo a suberina o principal (FAHN, 1990; SCHULTZ, 1972). Além disto, este composto é responsável por manter a estabilidade física do material perante variações de temperatura (PEREIRA, 2007). Para verificação destas propriedades, bem como na comparação com as alternativas biônicas, foram realizadas análises termogravimétricas no equipamento TGA-50 (Shimadzu® Corp., com uso de nitrogênio). O ensaio permite verificar a gradual perda de massa do material conforme aumento na temperatura, dentro de uma faixa estabelecida. Para este trabalho, foi determinada a faixa até 500°C.

3.5 Ensaios de compressão

Do ponto de vista de sua função estrutural da rolha, como produto, uma das principais características da qualidade é sua propriedade de resistência à compressão, durante o engarrafamento (PEREIRA, 2007). Nesse sentido, para verificar o desempenho mecânicos das amostras a este tipo de solicitação, foi realizado um ensaio de compressão (figura 3) para compará-lo com informações da microestrutura. Os ensaios de compressão foram realizados com base na norma ASTM C365/C365M – 11a (ASTM, 2011), com velocidade de compressão de 0,5 mm/min, no equipamento EZ Test EZ-LX/EZ-SX series (Shimadzu® Corp.). Na figura 3, as setas indicam o sentido da aplicação da força de compressão nas amostras.

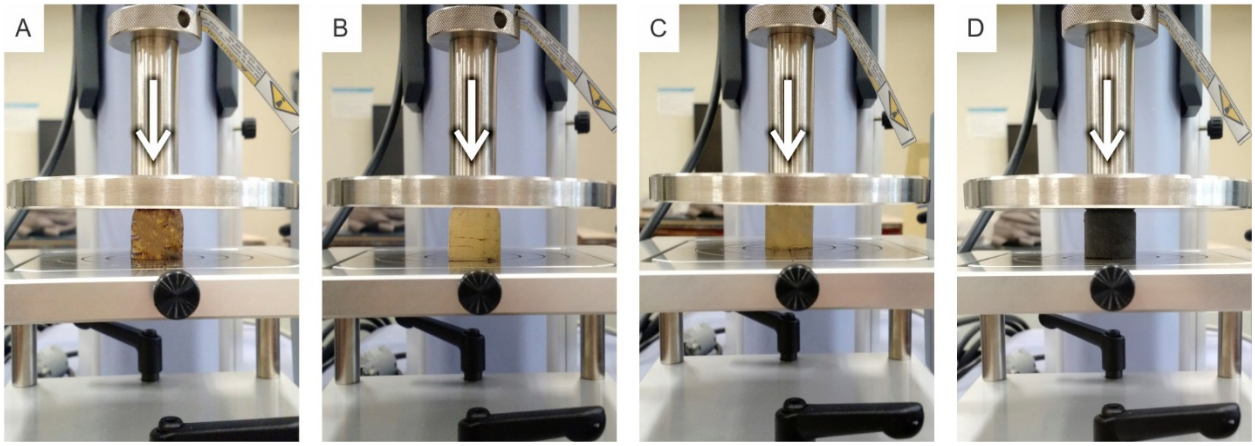


Figura 3 Ensaios de compressão: (A) cortiça natural; (B) cortiça aglomerada; (C) EPP; (D) EVA. As setas indicam o sentido da aplicação da força nas amostras. Fonte: autores (2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados.

4.1 Organização microestrutural: densidade relativa e porosidade

Com a identificação dos tipos de resina das amostras sintéticas, a massa e o volume das amostras foram calculados para determinação da densidade relativa e porosidade, de acordo com a Eq. (1). Os valores de ρ_S, correspondendo às densidades brutas do material sólido das células suberizadas de cortiça natural e aglomerada, polipropileno e EVA foram obtidos baseados em ASHBY; JOHNSON (2010), GIBSON; ASHBY; HARLEY (2010) e PEREIRA (2007). Os valores de ρ_S para a cortiça natural e aglomerada relatados na literatura não consideram a influência dos aglutinantes na composição. Os resultados das medições são vistos na tabela 1.

Tabela 1 Resultados da determinação dos valores médios de volume, massa, densidade relativa (ρ^*/ρ_S) e porosidade (φ) das amostras. Fonte: autores (2020); ASHBY; JOHNSON (2011), GIBSON; ASHBY; HARLEY (2010) e PEREIRA (2007).

Material	Massa (g)	Volume (cm³)	ρ^* (kg/m³)	ρ_S (kg/m³)	ρ^*/ρ_S	φ (%)
Natural	0,146	0,704	207,39	1150	0,180	82,0
Aglomerada	0,171	0,465	367,94	1150	0,320	68,0
EPP	0,138	0,560	246,43	960	0,257	74,3
EVA	0,099	0,338	293,33	920	0,319	68,1

De um modo geral, as amostras de cortiça natural foram as que apresentaram o menor valor de densidade relativa e, consequentemente, a maior porosidade. Foi verificado que mais de 80% do material é composto por espaços vazios preenchidos por ar, o que reflete em suas interessantes propriedades isolantes. Os resultados encontrados foram próximos a dados da literatura, para o material (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Por outro lado, amostras de cortiça aglomerada apresentaram a maior densidade relativa e menor porosidade. Desse modo, pode ser inferido que a aplicação de materiais aglutinantes, como látex e resina de PU na união do material primário moído leva a um aumento considerável na densidade relativa. Dentre as alternativas sintéticas, as amostras de EVA apresentaram densidade relativa e porosidade muito próximas à cortiça aglomerada, demonstrando que, nestas propriedades, a espuma assemelha-se ao material natural. Já a espuma de EPP manteve-se com valores intermediários de densidade relativa e porosidade, entre as amostras de cortiça primária (natural) e a secundária (aglomerada).

4.2 MEV

As semelhanças dos materiais também podem ser avaliadas por meio de análise topológica da microestrutura das amostras. Nesse sentido, as microscopias eletrônicas de varredura das amostras natural e aglomerada são visualizadas na figura 4. É possível constatar que as membranas celulares, em ambos os materiais primário e secundário, estão dispostas de modo

compacto e sem espaços livres. Observando as microscopias das amostras de cortiça natural e aglomerada com aumento de 100x (respectivamente, figuras 4A e 4D, com detalhes de setas brancas), observa-se clara diferença no efeito da aglomeração do material, mantendo conjuntos agrupados de células, dispostas em diversas orientações. As paredes celulares apresentam-se com aspecto flexionado e torcido, devido ao efeito da moagem e extrusão do processo de aglomeração (figuras 4E e 4F, com detalhes nas setas brancas), em comparação com a amostra de cortiça natural (figuras 4B e 4C).

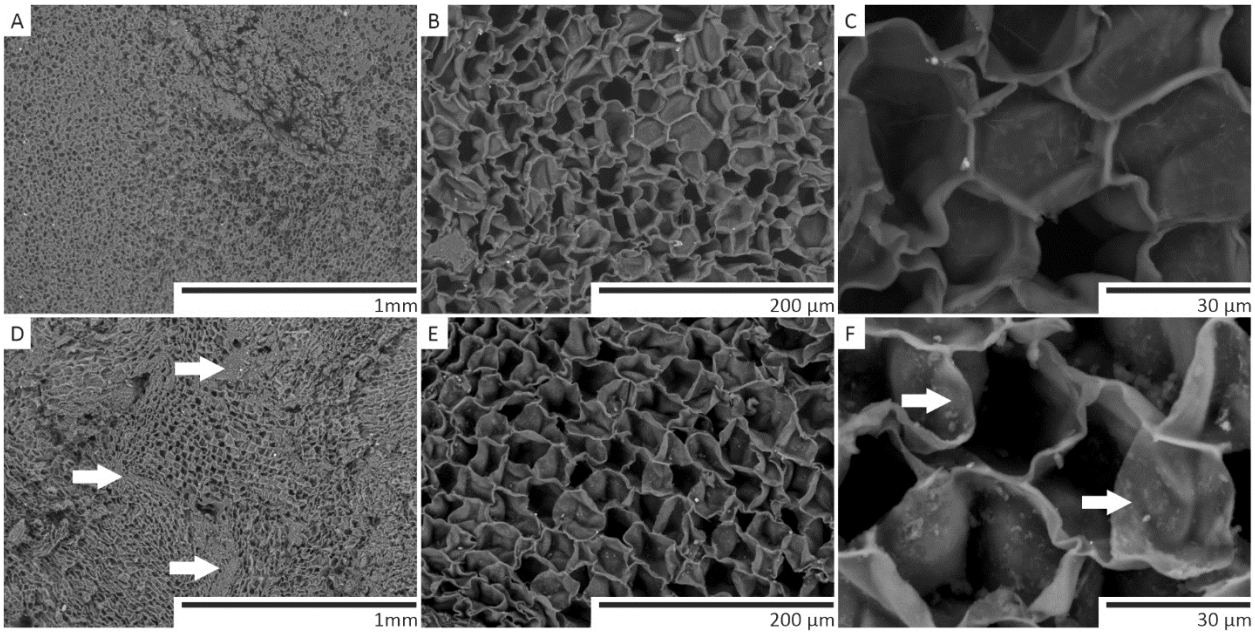


Figura 4 Imagens via MEV das amostras de: cortiça natural com aumento de (A) 100x, (B) 500x e (C) 2.000x; e cortiça aglomerada com aumento de (D) 100x com detalhes (setas brancas) das regiões aglomeradas, (E) 500x e (F) 2.000x com detalhes (setas brancas) das paredes celulares flexionadas. Fonte: autores (2020).

A parede celular da cortiça apresenta cinco camadas (GIL, 2012; PEREIRA, 2007): duas de natureza celulósica que forram as cavidades celulares, duas interiores suberificadas e uma camada média lignificada (que confere rigidez e estrutura). Esta característica é presente também na cortiça aglomerada; porém, um pouco desforme, uma vez que os formatos poligonais originais das células das cortiças são prejudicados devido ao processo de fabricação (ASHBY; JOHNSON, 2011; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PEREIRA, 2007), como visto na micrografia das figuras 3D e 3F. Tal como a suberina, a lignina (também conhecida como lenhina) é um polímero natural presente em células vegetais (FAHN, 1990; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2013). Essa resina possui, relativamente, uma densidade maior que a suberina. É também responsável pelas propriedades e características do lenho nos tecidos vegetais, incluindo seu aspecto alaranjado e maior resistência estrutural (SCHULTZ, 1972). De um modo geral, sua maior presença em paredes celulares, através da incrustação, representa um aumento da densidade do material e, consequentemente, propriedades mecânicas mais elevadas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010).

Com a análise nas microscopias de varredura, também é possível inferir que as amostras de cortiça natural analisadas foram formadas entre os meses do verão e da primavera, uma vez que suas paredes celulares possuíam espessura variando entre 1,34 e 1,42 µm, as quais são característica para o período mais quente (GIL, 2009; PEREIRA, 2007). Já durante o outono e o inverno as membranas tornam-se mais espessas, com dimensões variando de 2 a 2,5 µm (GIL, 2009; PEREIRA, 2007). Isso se deve ao maior acúmulo de suberina nas paredes celulares de tecidos de cortiça durante este período, para aumentar, entre outros, a proteção térmica do tecido à planta, devido às propriedades da substância (PEREIRA, 2007; SCHULTZ, 1972). A espessura das paredes celulares com acúmulo de suberina, juntamente com maior ou menor dimensão das células do tecido, interferem diretamente nas propriedades físico-mecânicas do material (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; PEREIRA, 2007). Cortiças com camadas suberificadas de maior espessura, tendem a ser mais densas, possuem uma maior capacidade de compressão, além de serem menos elásticas do que as com camadas mais delgadas (FAHN, 1990; GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; GIL, 2012; PEREIRA, 2007). Consequentemente, tais atributos, juntamente com a presença ou não de defeitos, refletem diretamente na qualidade e nos valores de mercado dos produtos (PEREIRA, 2007).

As microscopias das alternativas poliméricas bioinspiradas são visualizadas na figura 5. Nas imagens é possível observar a tentativa industrial de adaptação do arranjo celular do tecido vegetal nas espumas, ao observar a quantidade de células fechadas presentes em ambas as amostras de EPP e EVA (respectivamente, figuras 5A e 5C). Nas microscopias são visíveis os espaçamentos oriundos da liberação de CO_2, durante a fabricação do material, para isolamento térmico, gerando a porosidade no material (ASHBY; JOHNSON, 2011). É também possível observar que o processo de manufatura das espumas buscou mimetizar as dimensões próximas das cavidades das células do tecido vegetal. Isso pode ser visto através dos poros da amostra de EPP (figuras 5A e 5B), as quais possuem aspecto e dimensões semelhantes às amostras de cortiça. Por outro lado, as amostras de EVA (figuras 5C e 5D) apresentam poros menores e mais numerosos, com um aspecto prensado e menos uniforme. Esse tipo de configuração torna este material mais semelhante à cortiça aglomerada, conforme mostrou também os resultados da determinação da densidade relativa e porosidade.

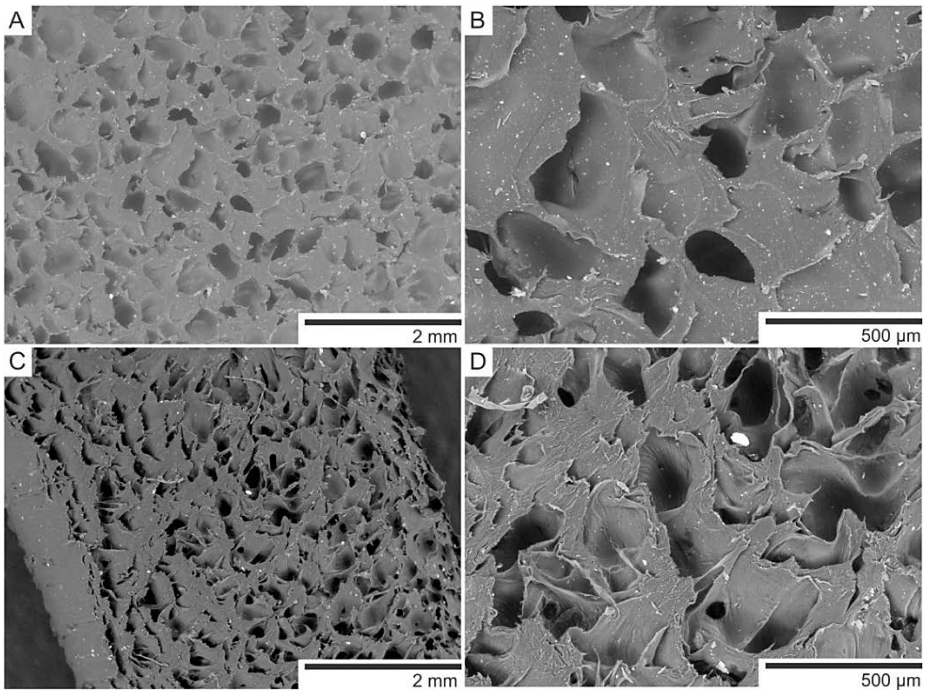


Figura 5 Imagens via MEV das amostras sintéticas: Amostra de EPP, com aumentos de (A) 50x e (B) 150x; e amostra de EVA, com aumentos de (C) 50x e (D) 150x. Fonte: autores (2020).

4.3 TGA

O isolamento térmico é uma das principais características da cortiça natural e aglomerada (ASHBY; JOHNSON, 2011; LEFTERI, 2014). Contudo, esta propriedade não está relacionada diretamente com a temperatura máxima de resistência do material (PALOMBINI; RISSATO; ROLDO, 2016). Estas propriedades também são importantes para se conhecer as faixas limites de trabalho de um material, visando a sua aplicação industrial (ASHBY, 2012).

Seja com a presença de polímeros naturais, como a suberina e látex nas amostras de cortiça primária e secundária, ou de resinas sintéticas como EPP e EVA, nas alternativas biônicas, é importante avaliar a resistência do material a grandes temperaturas como fator limitador em projetos de design (ASHBY, 2012). Este tipo de análise pode ser realizado como o ensaio de termogravimetria. As amostras foram aquecidas a temperaturas até a faixa de 500°C para verificar a perda de massa resultante em cada temperatura. Esta técnica possibilita conhecer a faixa de temperatura em que a amostra se decompõe (perdendo massa), bem como o andamento das reações de desidratação, oxidação, combustão e decomposição (AZAPAGIC; EMSLEY; HAMERTON, 2003; MORTENSEN, 2007). O resultado da análise termogravimétrica (TGA) é visto na figura 6.

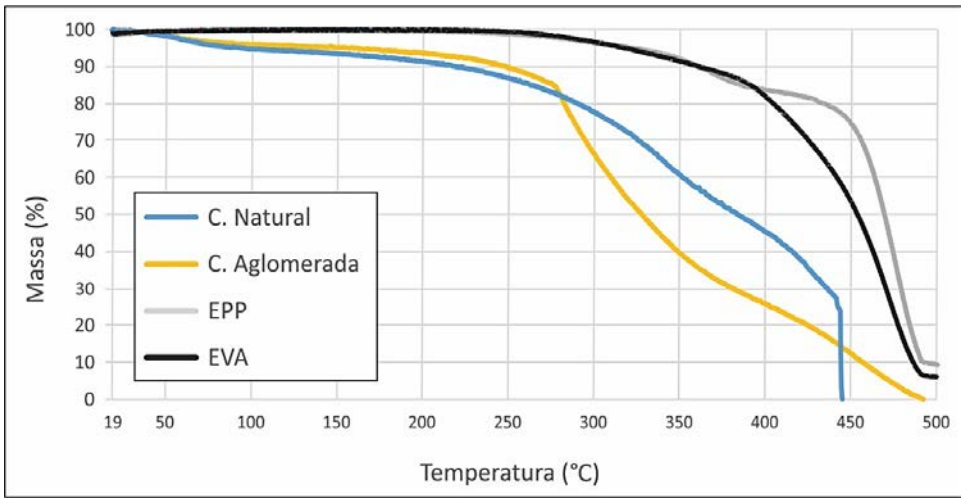


Figura 6 TGA para amostras de cortiça natural e aglomerada, e sintéticas de EPP e EVA. Fonte: autores (2020).

Apesar das amostras de cortiças natural e aglomerada possuírem comportamentos diferentes durante o decorrer da análise, ambas apresentam ligeiro declínio de massa em uma faixa inicial de temperatura (em torno de 75°C), onde se estabilizam. Pode-se visualizar que ambas as amostras perderam massa de forma significativa na faixa de 200°C a 440°C. Entretanto, a amostra de cortiça aglomerada teve sua perda de massa muito mais abrupta a partir da faixa de 275°C, em comparação à amostra natural. Isto se deve à presença de resinas utilizadas na aglutinação do material. Como a amostra de cortiça natural não possui aditivos, sua perda de massa ocorreu de forma mais gradual e contínua até a faixa de 440°C,

degradando-se completamente. Por outro lado, após a queda de massa mais acentuada da cortiça aglomerada, na faixa de 275°C, seu comportamento nas temperaturas seguintes seguiu uma perda de massa mais suave, até a degradação completa próximo aos 490°C. Os resultados foram semelhantes aos encontrados na literatura para cortiça natural (ŞEN *et al.*, 2014) e aglomerada (PILAO; RAMALHO; PINHO, 2006).

Ambas as amostras sintéticas foram influenciadas pela temperatura de modo semelhante, apresentando pouca perda de massa para temperaturas até a faixa de 280°C. Na faixa em torno de 280°C a 390°C, tanto a amostra de EPP quanto a de EVA apresentaram declínio mais significativo. Contudo, após esta faixa, a amostra de EVA apresentou uma perda de massa mais acentuada em comparação à de EPP, a qual iniciou apenas na faixa aproximada de 450°C. Isso indica uma faixa de temperatura relativamente mais abrangente para o EPP, quando em aplicações que exijam tais condições. Ambas as amostras de EPP e EVA mantiveram-se constantes com 10% e 5% de massa, respectivamente, a partir da faixa de 500°C, aproximadamente, até a temperatura de 750°C, quando a análise foi encerrada. Os resultados para as amostras sintéticas também foram considerados condizentes com dados da literatura para EPP (LIU *et al.*, 2006) e EVA (ZATTERA *et al.*, 2005).

De um modo geral, tanto as amostras naturais quanto sintéticas apresentaram estabilidade em massa nas temperaturas até a faixa de 100°C a 200°C. Nesse sentido, em aplicações projetuais cujas solicitações térmicas não excedam esses valores, ambas as alternativas poderão ser consideradas na seleção de materiais para um projeto. Já para temperaturas superiores, até 300°C as alternativas sintéticas apresentam-se como alternativas. Por outro lado, para a seleção de materiais com critérios baseados nos comportamentos estruturais de cada amostra, é preciso considerar o desempenho mecânico dos materiais.

4.4 Ensaios de compressão

Os resultados dos ensaios de compressão são apresentados na tabela 2. Foram analisados dados da tensão elástica (σ_e), que apresenta os limites da fase elástica do material, de acordo com a Lei de Hooke; a tensão máxima (σ_{max}), que apresenta a força máxima suportada pela amostra; e a força máxima (F_{max}), representada pelo valor máximo registrado pelo equipamento, relacionando com a área da seção de cada material. Os valores são mostrados nas médias ($\bar{x}$) e desvios-padrão (s) para as amostras.

A cortiça aglomerada apresentou-se como a alternativa com a maior tensão elástica, suportando valores maiores tanto de tensão quanto de força antes de atingir a fase plástica (escoamento), em comparação aos demais materiais. Isto se deve ao material comportar-se de maneira reforçada, como um compósito, com a presença de duas fases: o material moído e resinas aglutinantes (GIBSON; ASHBY, 1999). Em seguida, para o limite elástico, encontra-se a cortiça natural, e as espumas de EVA e EPP, com valores próximos. A menor elasticidade para as amostras de cortiça primária está de acordo com informações da literatura, pelo efeito da suberina nas paredes celulares (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; GIBSON; EASTERLING; ASHBY, 1981; SCHULTZ, 1972). Cabe ressaltar, também, que o desvio-padrão da cortiça primária foi o maior dentre as amostras ensaiadas, comportamento típico para materiais naturais devido às variações naturais das suas microestruturas (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010). Desse modo, pode-se inferir que um material natural como a cortiça, apesar de isotrópico (ASHBY; JOHNSON, 2010), apresentou uma maior variação no desempenho, em comparação com os demais materiais fabricados, conforme também verificado na literatura (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; GIBSON; EASTERLING; ASHBY, 1981).

Tabela 2 Resultados das médias ($\bar{x}$) e dos desvios-padrão (s) dos ensaios de compressão, relacionados à tensão elástica (σ_e), à tensão máxima (σ_{max}) e à força máxima (F_{max}). Fonte: autores (2020).

Parâmetro		Cortiça natural	Cortiça aglomerada	EPP	EVA
σ_e (MPa)	$\bar{x}$	1,054	2,232	0,842	0,919
	s	0,205	0,149	0,102	0,099
σ_{max} (MPa)	$\bar{x}$	5,864	4,664	3,342	2,194
	s	1,180	0,917	0,499	0,206
F_{max} (N)	$\bar{x}$	1.542,1	1.225,4	949,0	794,3
	s	144,5	123,2	76,8	50,2

Ao avaliar os valores de tensão máxima, por outro lado, observa-se uma resistência à compressão 25% maior nas amostras de cortiça natural em comparação à aglomerada. O mesmo comportamento foi observado na força máxima suportada. Este fato se deve às regiões aglutinadas da cortiça aglomerada, apesar de influenciarem em um maior módulo elástico, determinados pelos valores de σ_e, consequentemente tornam o material mais suscetível à falha, suportando menos tensão durante os ensaios (GIBSON; EASTERLING; ASHBY, 1981). As regiões aglutinadas no material correspondem, portanto, a um compósito ao combinar a cortiça moída com o aditivo aglutinante utilizado para unir e conformar o material. Ambos as amostras de cortiça apresentaram desempenho mecânico superior às alternativas poliméricas sintéticas. Por serem materiais mais homogêneos, devido aos processos de fabricação controlados, novamente os desvios-padrão foram menores, ainda que com desempenho mecânico médio inferior aos materiais naturais. Considerando apenas as alternativas sintéticas, da mesma forma que a análise de densidade relativa, as microscopias de varredura e a termogravimetria, a espuma de EPP novamente mostrou um comportamento mecânico mais próximo à cortiça natural, com valor inferior de σ_e e superior de σ_{max} e F_{max}, ao comparar com a amostra de EVA.

5. SELEÇÃO DE MATERIAIS CELULARES E IMPLICAÇÕES PARA PROJETOS DE DESIGN

Os materiais celulares apresentam propriedades interessantes em diversas aplicações em que se necessita de isolamento térmico e resistência à compressão, aliados à baixa densidade oriunda de sua característica modular e porosa (GIBSON; ASHBY, 1999). O desenvolvimento e o estudo de aplicações destes materiais estão vinculados à biônica, uma vez que sua composição deriva de padrões naturalmente encontrados em materiais de origem animal, vegetal e mineral (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010; KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005; PALOMBINI *et al.*, 2018a).

Os resultados dos ensaios mostraram uma interessante relação entre o arranjo microestrutural dos materiais celulares e suas propriedades termomecânicas. De um modo geral, o principal atributo que relaciona esses fatores é a densidade relativa e o modo com que o material é organizado internamente (GIBSON; ASHBY; HARLEY, 2010), sendo confirmado pelos ensaios realizados. A cortiça natural apresentou baixos valores de densidade relativa e uma distribuição das células com propriedades termomecânicas interessantes. Contudo, devido à condição de extração da casca do sobreiro, o material torna-se inviável para projetos com componentes de maior volumetria, exigindo a utilização da cortiça aglomerada. Por outro lado, ambos os materiais naturais apresentaram-se como alternativas para aplicações em que é requerida uma maior fase elástica e resistência térmica, juntamente com baixa densidade.

Os materiais celulares sintéticos de EPP e EVA surgem como opções acessíveis em uma seleção de materiais para projetos, uma vez que seu processo de fabricação utiliza resinas poliméricas convencionais, não requerendo o acesso à cortiça, considerada uma matéria-prima com produção limitada às condições geográficas de plantio (PEREIRA, 2007). Desse modo, com a homogeneização do processo de fabricação, é possível obter materiais celulares uniformes e de custo inferior (ASHBY, 2012). Ainda, apesar de apresentarem propriedades mecânicas inferiores, os materiais sintéticos possuem maior resistência térmica, devendo ser a escolha de aplicação em projetos com este tipo de requerimento, além das características de baixa densidade e permitirem adaptações a formas e volumes variados.

Com o viés da sustentabilidade, a seleção de materiais apresenta maior favorecimento a matérias-primas de fontes renováveis, como a cortiça (ASHBY, 2012). Apesar de lenta, sua extração não danifica o tecido vivo da planta, permitindo que a cortiça volte a crescer normalmente (SCHULTZ, 1972). Os materiais sintéticos, considerando esse quesito, por serem fabricados a partir de resinas poliméricas de origem fóssil, apresentam um ciclo de vida ambientalmente mais prejudicial (ASHBY; JOHNSON, 2011).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou caracterizar e comparar os materiais celulares incluindo a cortiça natural, cortiça aglomerada e as alternativas poliméricas sintéticas de EPP e EVA. A análise de densidade relativa e porosidade das amostras foi compatível com informações visuais da microestrutura, sendo relacionada com as propriedades termomecânicas avaliadas e em informações levantadas da literatura.

O processo de fabricação da cortiça aglomerada tornou-a mais densa e com maior módulo elástico que a alternativa natural. Foi observado que a amostra de cortiça natural possui um arranjo mais uniforme em comparação à cortiça aglomerada. Já as microscopias das amostras sintéticas apresentaram a tentativa de mimetizar o arranjo celular do tecido vegetal. As análises termogravimétricas mostraram que há uma grande diferença na degradação dos materiais sintéticos para os naturais. Da mesma forma, por apresentar um comportamento mais próximo a um compósito, a cortiça aglomerada apresentou uma perda de massa mais abruta em comparação com a cortiça natural, visto que essa apresentou uma perda mais gradual durante a análise. Já nos ensaios mecânicos, foi verificado que as amostras de cortiça apresentam desempenho superior às alternativas sintéticas. Contudo, tratando-se de um compósito, a cortiça aglomerada, apresentou fase elástica superior, ainda que suportando uma tensão máxima inferior à cortiça natural. Já os materiais sintéticos (EPP e EVA) obtiveram resultados inferiores aos naturais, mesmo com densidades relativas maiores. Desse modo, destaca-se que o desempenho dos materiais celulares está relacionado tanto à densidade relativa, quanto ao arranjo microestrutural e à sua composição.

É importante ressaltar que, de um modo geral, todas as análises de caracterização das amostras de EPP e EVA apresentaram uma tendência de aproximação de propriedades com as amostras de cortiça natural e aglomerada, respectivamente. Essa relação foi observada tanto na determinação da densidade relativa e porosidade e nas micrografias, quanto nas análises termogravimétricas e nos ensaios mecânicos. Isso reforça que as propriedades e características de um material celular estão relacionadas com seu arranjo microestrutural, evidenciando a necessidade de estudar e analisar este fator na seleção de materiais.

A cortiça natural apresentou-se como a principal alternativa para seleção em projetos em que se deseja obter um equilíbrio entre boas propriedades termomecânicas e baixa densidade, aliados à um material de fonte renovável. No caso da cortiça aglomerada, deve-se considerar que mesmo não apresentando propriedades idênticas às do material natural, ainda é uma alternativa muito próxima em termos de desempenho. Da mesma forma, por ser produzida a partir dos refugos de rolhas naturais, a cortiça aglomerada apresenta-se como uma opção favorável para aplicação em projetos por sua característica renovável. Por outro lado, por se tratar de um material processado, a cortiça aglomerada é uma matéria-prima com maior versatilidade em geometrias e dimensões na manufatura. Já os materiais celulares sintéticos, apesar de desempenho mecânico inferior, apresentam melhor resistência térmica, além de manter os atributos de baixa densidade e reprodutibilidade geométrica.

Por fim, torna-se importante o estudo e análise de materiais celulares para seleção e aplicação em projetos de design, visto que modificações na microestrutura refletem diretamente nas propriedades obtidas. O conhecimento dos processos de fabricação e da origem dos materiais celulares naturais e sintéticos, da mesma forma, contribui para as etapas de seleção de materiais, principalmente no que tange aspectos de sustentabilidade, devendo ser incentivado em novos estudos.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Agradecimentos ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela realização das análises termogravimétricas

REFERÊNCIAS

1. APCOR. Anuário 2017/18. Santa Maria de Lamas, PT: APCOR, 2018. Disponível em: <http://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2017/12/Boletim_Estatistico_APCOR_17_18.pdf>.
2. ASHBY, M. F. Seleção de materiais no projeto mecânico. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
3. 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.
4. ASTM. ASTM C365 / C365M - 11a Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores. Washington: ASTM, 2011. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/C365.htm>.

5. AZAPAGIC, A.; EMSLEY, A.; HAMERTON, L. Polymers, the Environment and Sustainable Development. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.

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

7. CIDADE, M. K. *et al.* Investigation of the thermal microstructural effects of CO 2 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

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

9. FAHN, A. Plant anatomy. Fourth ed. Oxford: Pergamon Press, 1990.

10. GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. Cellular solids : structure and properties. 2nd. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.

11. GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F.; HARLEY, B. A. Cellular materials in nature and medicine. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.

12. GIBSON, L. J.; EASTERLING, K. E.; ASHBY, M. F. The Structure and Mechanics of Cork. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 377, n. 1769, p. 99–117, 25 jun. 1981. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.1981.0117

13. GIL, L. Cork Composites: A Review. Materials, v. 2, n. 3, p. 776–789, 16 jul. 2009. DOI: https://doi.org/10.3390/ma2030776

14. GIL, L. Cortiça. In: Ciência e Engenharia de Materiais de Construção. Lisboa: lSTPress, 2012. p. 664–715.

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

16. 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

17. LEFTERI, C. Materials for design. London: Laurence King Publishing, 2014.

18. LIU, C. *et al.* Improving foamability of polypropylene by grafting modification. Journal of Applied Polymer Science, v. 101, n. 6, p. 4114–4123, 15 set. 2006. DOI: https://doi.org/10.1002/app.23474

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

20. 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

21. 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.

22. 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

23. 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

24. 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, 2018a. p. 245–260. DOI: https://doi.org/10.5151/9788580393491-15

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

26. 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/lGEO, 2016. p. 48–57.

27. PEREIRA, H. Cork : biology, production and uses. Amsterdan: Elsevier, 2007.

28. PERES, S. C.; PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JÚNIOR, W. Design e engenharia : desenvolvimento de modelos de células abertas utilizando a técnica de barbotina. Anais do 1º Congresso Internacional - VII Workshop Design & Materiais. Anais... São Paulo: UAM, 2016

29. PILAO, R.; RAMALHO, E.; PINHO, C. Overall characterization of cork dust explosion. Journal of Hazardous Materials, v. 133, n. 1–3, p. 183–195, 20 maio 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.015

30. RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. Raven biology of plants. 8. ed. New York: W. H. Freeman, 2013.

31. SCHULTZ, A. R. Estudo prático da botânica geral. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1972.

32. ŞEN, A. *et al.* Thermal behaviour of cork and cork components. Thermochimica Acta, v. 582, p. 94–100, abr. 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.03.007

33. ZATTERA, A. J. *et al.* Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno-acetato de vinila - EVA. Polímeros, v. 15, n. 1, p. 73–78, mar. 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-14282005000100016