

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE PP REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS PARA A PRODUÇÃO DE COLMEIAS ARTIFICIAIS

Beatriz Toson Orsi ¹; Juliana Ribeiro Cordeiro ²

¹ Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um compósito a partir da incorporação de partículas de pó de cedro a uma matriz de polipropileno (PP), visando a um produto adequado para a construção de colmeias artificiais. O procedimento consistiu em tratar a madeira de cedro, produzir o compósito por processamento em um homogeneizador termocinético e realizar ensaios para caracterização das matérias-primas e do produto obtido. Foram realizados ensaios de termogravimetria (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), tração mecânica e obtenção de imagens por microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados obtidos indicaram que o compósito produzido apresenta, em relação à matriz pura, resistência térmica de aproximadamente 46 °C mais elevada, temperatura de fusão menor em 11 °C, além de limite de resistência à pressão máxima e alongamento menores. Portanto, foi possível desenvolver o compósito, bem como seu filamento para uso em impressão 3D e protótipo de colmeia artificial com placas prensadas.*

Introdução

Materiais compósitos são estruturas multifásicas, formadas por dois ou mais materiais, sendo constituídos pela combinação de matriz e reforço. Essa junção, geralmente, resulta em propriedades mecânicas superiores às dos componentes isolados. A matriz, que pode ser composta, principalmente, de polímeros, metais ou cerâmicas, exerce a função de manter o reforço no lugar desejado, além de protegê-lo de danos e distribuir o carregamento ao longo da estrutura. Por outro lado, o reforço consiste em fibras ou particulados, na maioria das vezes mais fortes que a matriz, sendo utilizados para conferir resistência ao compósito (Arulprasanna e Omkumar, 2024; Moreira, 2009).

Dentre as principais matrizes apresentadas na indústria, polipropileno (PP) destaca-se como uma das mais utilizadas e estudadas. PP é reconhecido por proporcionar estruturas leves, resistentes e facilmente manipuláveis. Este polímero tem sido estudado como matriz eficaz em compósitos por apresentar grande resistência a rupturas por flexão e fadiga, e por ser um material versátil (Petry, 2011). Deste modo, as fibras podem reforçar essas qualidades quando inseridas na matriz.

Nesse contexto, fibras naturais estão emergindo como alternativa a fibras sintéticas como as de vidro e de carbono. A crescente popularidade pode ser explicada devido a sua capacidade de proporcionar compostos mais sustentáveis, além de serem biodegradáveis, provenientes, principalmente, de fontes renováveis e apresentarem baixo custo. Essas fibras são classificadas como fibras liberianas (juta, linho, etc.), de sementes (algodão, etc.), do caule (bambu, arroz, etc.), de folhas (sisal, palma, etc.) e de frutas (coco, uva, etc.) (Bhat, Kumar e Mural, 2023; Kumar *et al.*, 2018).

Fibras de madeira apresentam diversas vantagens, tais como abundância de matéria-prima, facilidade de processamento e baixa necessidade de manutenção (Feng *et al.*, 2019). A madeira de cedro, por exemplo, é amplamente reconhecida por sua aplicação decorativa e seu uso em diversas construções. Essa madeira possui qualidades devido a sua composição química, que inclui polissacarídeos e lignina, aroma característico e resistência natural à umidade e ao apodrecimento, tornando-o um reforço ideal para compósitos (Sadiki *et al.*, 2015; Trinh *et al.*, 2024).

Existem diversas aplicações de compósitos na indústria, sendo uma delas a fabricação de colmeias artificiais. Essas colmeias consistem em vários favos onde as abelhas armazenam pólen e mel (Hadjur, Ammar e Lefèvre, 2022). Para promover a polinização, instalar colmeias artificiais é uma abordagem eficaz, que proporciona um ambiente controlado e seguro para as abelhas e nesse contexto, de acordo com a Embrapa, o cedro é uma das principais madeiras utilizadas na produção de colmeias (BARBOSA, *et al.*, 2007).

Este trabalho foi desenvolvido em colaboração com Glauco Rossi Monaro Engelmann, fundador da *start-up* Bee My Guardian Tecnologias e Soluções Ambientais, que promove a defesa das abelhas do Brasil. Nesse contexto, este relatório aborda o desenvolvimento de um compósito de matriz de PP reforçado com fibras de cedro, para produção de colmeias artificiais.

Materiais e Métodos

Matéria-prima

No desenvolvimento do compósito, foram utilizados madeira de cedro e polipropileno. A madeira foi obtida na forma de bloco (35,0 cm x 4,5 cm x 4,5 cm), e a matriz polimérica (PP) foi obtida na forma de *pellets* através da fornecedora Braskem (RT400NAQ).

Tratamento do reforço

O processamento do bloco de madeira teve início com plaina desengrossadeira portátil Dewalt-DW733, até atingir a menor espessura suportada pelo equipamento, resultando em lascas que, posteriormente, foram trituradas em um moinho de facas SP-31. O pó de cedro obtido passou por análise em balança de umidade Shimadzu MOC63u, e apresentou umidade superior à ideal para continuidade do processo.

Conseqüentemente, o pó foi levado a uma estufa (Nova Ética 400/5NDE 300 °C), onde foi mantido a 50 °C por 24 h e a 65 °C por 4 h, totalizando 28 h de secagem. Após esse período, uma nova análise de umidade foi realizada, exibindo resultado inferior a 4%, condição necessária para dar continuidade ao processo. Assim, foi realizado novo processo de moagem utilizando moinho analítico (IKA A11 Basic).

O produto resultante foi separado em diferentes diâmetros com auxílio de um agitador de peneiras com 9 peneiras com aberturas distintas, conforme indicado na Tabela 1. Foram selecionadas as amostras das 3 aberturas menores (0,062 mm, 0,088 mm e 0,105 mm), desconsiderando o fundo, para obter aproximadamente 70 g de reforço. Para garantir a homogeneidade da amostra final, foi realizado o processo de quarteamento em pilhas cônicas com as amostras selecionadas. Durante este processo, a amostra absorveu umidade, sendo necessário um novo ciclo de secagem a 65 °C por 4 h. Posteriormente, foi realizada análise de umidade que resultou em valor satisfatório, inferior a 4%.

Os resultados das etapas de processamento da madeira podem ser observados na Figura 1.

Tabela 1 – Ensaio em agitador de peneiras.

<i>Mesh</i>	Abertura (mm)	Massa amostra (g)
42	0,350	92,34
48	0,300	30,87
60	0,250	21,61
65	0,210	41,15
80	0,177	23,53
100	0,150	20,24
150	0,105	27,76
170	0,088	19,24
250	0,062	25,87
	fundo	7,20

Figura 1 – (a) Madeira em formato inicial (bloco), (b) lascas após desengrossadeira, produto (c) após moinho de facas e (d) após moinho analítico.



Caracterização das matérias-primas

O pó de cedro foi submetido a ensaios de termogravimetria (TGA) e umidade. Para o polipropileno (PP), foram realizados ensaios de TGA, calorimetria exploratória diferencial (DSC) e tração.

O ensaio de análise termogravimétrica (TGA) do pó de cedro foi conduzido em faixa de temperatura de 25 °C a 700 °C, com taxa de aquecimento igual a 20 °C/min. Já para o PP, o ensaio foi realizado na faixa de temperatura de 25 °C a 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Ambos os ensaios foram conduzidos sob atmosfera de gás inerte, seguindo a norma ASTM E1131. A análise TGA do pó de cedro é importante para determinar se o material irá resistir às próximas etapas do processo, como a homogeneização, sem que haja degradação térmica.

Além disso, foram realizadas análises de amostras de polipropileno puro por meio de DSC, na faixa de temperatura de 40 °C a 200 °C.

Produção do compósito

Antes de iniciar o processo, determinou-se fração mássica de 10% de reforço a ser adicionada a matriz de PP. A porcentagem de fibras foi definida com base em ensaios anteriores, que demonstraram que teores de fibras celulósicas superiores a 10% em matriz de polipropileno comprometem a homogeneização no homogeneizador termocinético. Assim, optou-se pela utilização da fração máxima possível, a fim de garantir a melhor distribuição e qualidade do compósito. Em seguida, foram preparadas 70 amostras com massa de 10 g cada, utilizando balança analítica AB204-S. Cada amostra foi preparada em sacos de polipropileno contendo 1 g de pó de cedro tratado e 9 g de PP, incluindo a massa do próprio saco plástico. Após as medidas de massa, todas as amostras foram seladas a vácuo para evitar absorção de umidade e minimizar a dispersão de material durante o processamento no homogeneizador.

As amostras foram processadas em homogeneizador termocinético MH-25, nas seguintes condições: 8 s em velocidade mínima a 4000 rpm e 12 s em velocidade máxima a 4000 rpm. Após a retirada do equipamento, enquanto ainda maleáveis, as amostras foram moldadas em formato de disco com o auxílio de uma espátula. Após o resfriamento, as placas foram cortadas em pedaços de aproximadamente 1 cm² utilizando uma tesoura de bancada manual (Metalcava N°5). Posteriormente, esses pedaços foram triturados em um moinho de facas SL-31. Todos os produtos estão ilustrados na Figura 2.

O produto obtido do moinho foi fracionado em porções. Parte foi utilizada em máquina injetora MAQ-INJET 6000P para produzir 7 corpos de prova em um molde, que foram posteriormente testados em ensaio mecânico de tração e analisados na região de fratura em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Outra parte foi processada em máquina extrusora Filmac3D para produção de filamento que foi testado em impressora 3D. Por fim, o restante do material foi processado novamente no homogeneizador e as placas obtidas foram prensadas a 150 °C, por 2 minutos e sob pressão de 3 ton.

A máquina injetora operou a uma temperatura de 190 °C, aplicando pressão de 2 bar e tempo de 4 s, e a extrusora operou em temperatura de 190 °C.

Figura 2 – Produtos do processo: (a) compósito em forma de placa, (b) pedaços da placa após uso da tesoura e (c) pedaços após moimho de facas.



Caracterização do compósito

Foram realizados ensaios mecânicos de tração, TGA, DSC e MEV do compósito preparado.

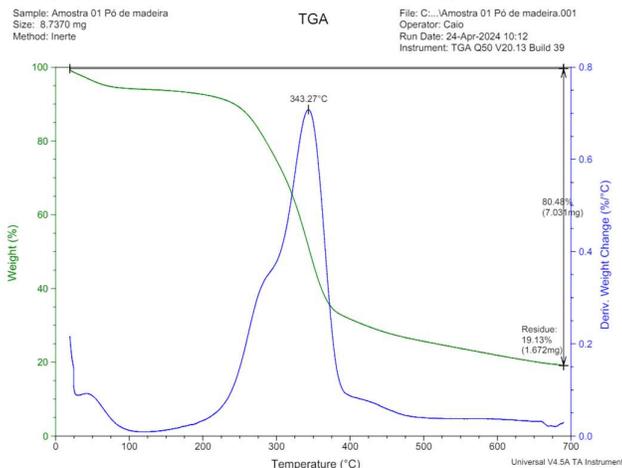
O ensaio de análise termogravimétrica (TGA) foi realizado em faixa de temperatura de 25 °C a 700 °C, com taxa de aquecimento de 20 °C/min, sob atmosfera de gás inerte e conforme a norma ASTM E1131. A análise de DSC foi realizada na faixa de temperatura de 40 °C a 200 °C, e a análise de FTIR, na faixa de número de onda de 500 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} . Para as imagens no MEV, foi necessário metalizar as amostras antes da análise e foram utilizadas magnitudes de 100 x a 4000 x.

Resultados e Discussão

Análises Termogravimétricas (TGA)

A Figura 3 representa o gráfico de TGA do pó de madeira. Esse tipo de gráfico permite observar os eventos de perda de massa da amostra quando submetida a aquecimento controlado. A curva verde indica a perda de massa percentual. Abaixo de 100 °C, essa perda está relacionada a eliminação de água, refletindo o comportamento higroscópico da amostra, com um percentual consistente com o esperado. A partir de aproximadamente 225 °C, inicia-se o evento de degradação térmica da amostra, indicando segurança para utilização das máquinas contidas no processo, já que a temperatura máxima de operação é de 190 °C. A análise da primeira derivada revela dois eventos térmicos significativos, sendo o principal centrado em torno de 343 °C, com resíduo de 19% de cinzas.

Figura 3 - Gráfico de TGA da amostra de pó de madeira.



Os gráficos de TGA do PP puro e do compósito produzido estão apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente. O PP puro exibe um evento térmico que se inicia em aproximadamente 300 °C, com resíduo de cinzas de 0,04%, demonstrando degradação quase completa, com o principal evento de degradação centrado em 431 °C. No compósito, o principal evento térmico está centrado em 477 °C, indicando resistência térmica superior à da matriz de PP, sendo aproximadamente 46 °C mais elevada. Após a degradação do composto, restaram 1,81% de cinzas, considerando que o PP praticamente não apresenta resíduo de cinzas, a presença no compósito provavelmente está associada à madeira, que representa 10% em massa da composição inicial da amostra.

Figura 4 – Gráfico TGA do PP puro.

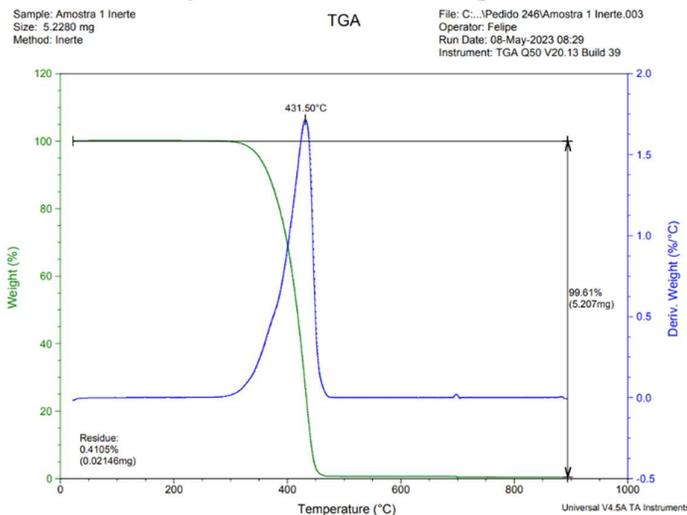
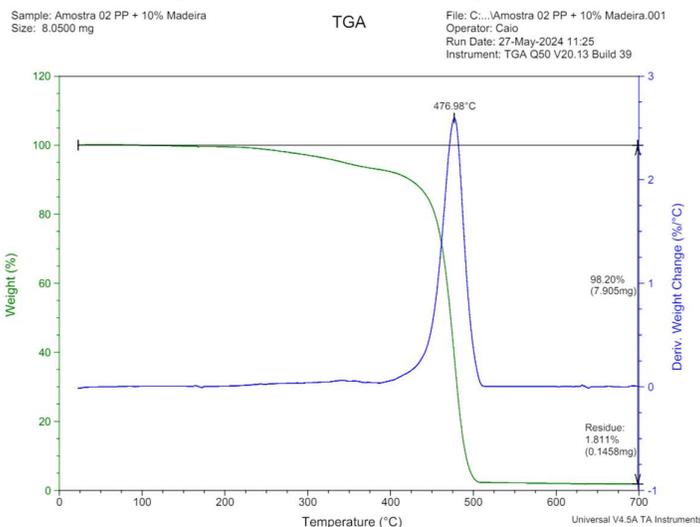


Figura 5 – Gráfico TGA do compósito.



Ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC)

O fluxo de calor em função da temperatura foi analisado por meio do DSC, que submete a amostra a aquecimento e, em seguida, a resfriamento, como apresentado nas Figuras 6 e 7 para o PP e o compósito, respectivamente. No aquecimento, observa-se evento endotérmico associado a fusão, centrado em 161 °C para o PP e em 150 °C para o compósito, com uma diminuição de cerca de 11 °C do compósito em relação à matriz, em sua temperatura de fusão. Durante o resfriamento, ambos os materiais apresentaram evento exotérmico de cristalização, centrado em 117 °C para o PP e 115 °C para o compósito, sem variações significativas.

Figura 6 – Gráfico DSC do PP puro.

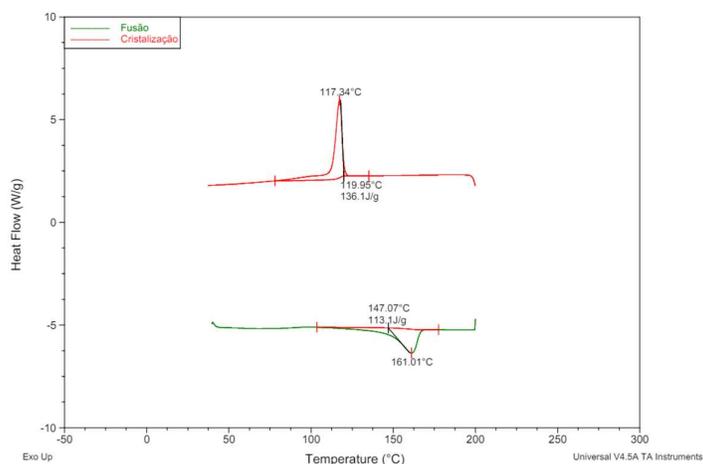
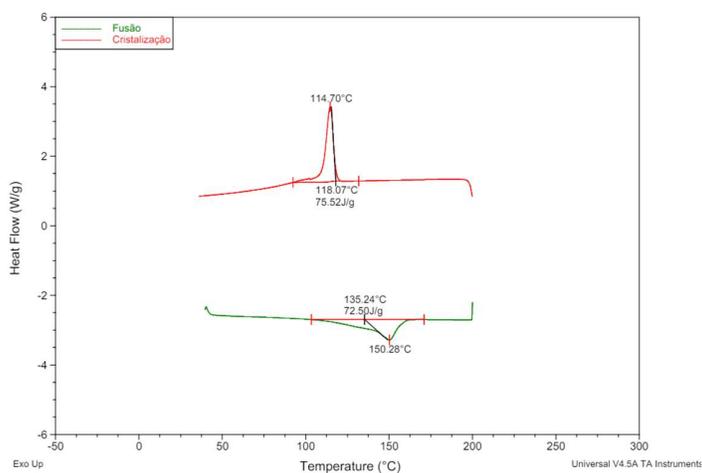


Figura 7 – Gráfico DSC do compósito.



Ensaio mecânico de tração

A partir das Figuras 8 e 9, e das Tabelas 2 e 3, é possível observar que o limite de resistência a tração máxima da matriz pura é superior ao do compósito. Além disso, os valores percentuais relativos à deformação elástica foram de 9,52% para o PP puro e 24,72% para o compósito, portanto, a deformação permanente percentual foi de 90,48% e 75,28% respectivamente. Essa diferença pode ser explicada, também, pela possibilidade de os corpos de prova utilizados terem apresentado bolhas ou falhas devido ao processo de injeção, condições que podem prejudicar a análise, causando uma fratura precoce.

Figura 8 – Gráfico do ensaio de tração para o PP puro.
PP Puro

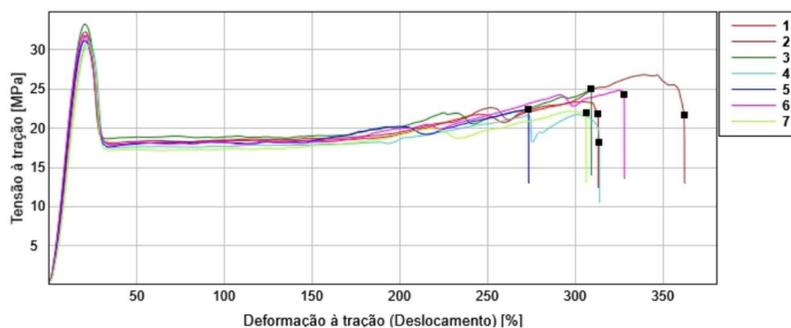


Tabela 2 – Dados obtidos com o ensaio de tração para o PP puro.

	Resistência à tração (N)	Limite de resistência (Mpa)	Alongamento até a fratura (%)
1	340,41	31,84	313,03
2	347,04	32,36	362,01
3	355,85	33,29	309,04
4	334,26	31,17	313,65
5	327,43	31,20	273,28
6	343,71	31,86	327,74
7	333,20	30,64	306,12
Média	340,27	31,77	314,98
Desvio padrão	9,58	0,88	26,56
Coefficiente de variação	2,82	2,76	8,43

Figura 9 – Gráfico do ensaio de tração para o compósito.

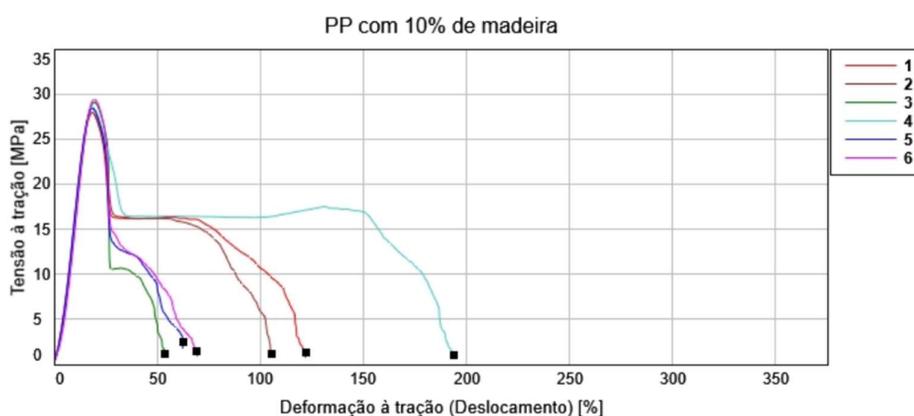


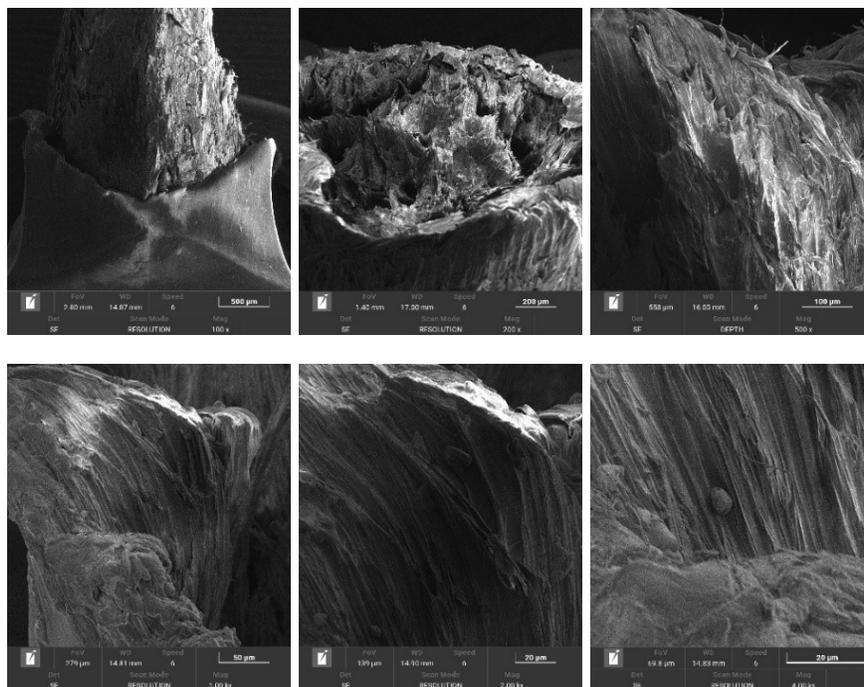
Tabela 3 – Dados obtidos com o ensaio de tração para o compósito.

	Resistência à tração (N)	Limite de resistência (Mpa)	Alongamento até a fratura (%)
1	295,81	27,97	122,16
2	295,66	27,99	105,42
3	307,14	29,08	54,00
4	301,26	28,52	193,64
5	301,97	28,41	62,43
6	312,71	29,42	69,21
Média	302,43	28,56	101,14
Desvio padrão	6,62	0,60	52,45
Coefficiente de variação	2,19	2,08	51,86

Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com a análise das imagens da região de fratura obtidas no MEV (Figura 10), é possível notar partículas com formatos arredondados distintos que podem ser identificadas, possivelmente, como a carga, e a presença desses sinais na região de alongamento sugere boa aderência do reforço com a matriz. Além disso, observa-se alongamento na morfologia da amostra, que está relacionado a ductilidade, ou seja, o quanto o material alonga até a fratura.

Figura 10 – Imagens obtidas no MEV.



Teste de impressão 3D

O filamento produzido com o compósito foi encaminhado para a realização de testes de impressão e foi possível produzir um disco de 3,5 cm de diâmetro, mostrado na Figura 11. Foi utilizada impressora Creality Ender 3 S1 Pro sob condições de bico de 1 mm, temperatura de bico igual a 230 °C, temperatura da mesa de 90 °C a 100 °C e velocidade de impressão igual a 40 mm/s.

Figura 11 – Disco produzido no teste de impressão.



Protótipo

Para a produção do protótipo, foram utilizadas 6 placas de compósito obtidas após prensagem, 6 placas de madeira compensada de 6 mm de espessura cada, cola de contato, cola instantânea e estilete. Primeiramente, as placas de madeira foram cortadas a *laser* no formato desejado. Com a cola de contato, cada placa de compósito foi colada em uma placa de madeira e, com o auxílio de um estilete, os excessos foram removidos. Por fim, todas as placas foram unidas com cola instantânea para formar uma caixa, que pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 – Caixa protótipo.



Conclusões

Após análise dos resultados obtidos, conclui-se que foi possível incorporar a carga à matriz com sucesso, resultando na produção de um compósito coeso através do processamento em homogeneizador termocinético. A caracterização das matérias-primas utilizadas, tanto da carga, pó de cedro, quanto da matriz, PP, também foi concluída, e foi fundamental para entender as propriedades individuais dos materiais e para garantir a segurança do processo.

A caracterização do compósito permitiu identificar menor resistência a tração, resistência térmica de aproximadamente 46 °C mais elevada e temperatura de fusão menor em 11 °C em relação ao PP puro. Nas imagens obtidas por MEV, notaram-se partículas na região de alongamento que sugerem boa aderência do reforço à matriz. Por fim, foram produzidos, com sucesso, protótipo com placas prensadas do compósito e filamento para uso em impressora 3D, permitindo a utilização do compósito na produção de filamentos que poderão ser utilizados na produção de colmeias artificiais.

Agradecimentos

O projeto contou com o apoio da FAPESP por meio dos processos nº 2020/09163-3 e nº 2019/25707-6.

O projeto contou com a parceria da *start-up* Bee My Guardian Tecnologias e Soluções Ambientais.

Referências Bibliográficas

Adiseshan Arulprasanna; Meenakshisundaram Omkumar (2024) A review on composites: Selection and its applications, *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853.

Barbosa, A. D. L., Pereira, F. D. M., Vieira Neto, J. M., Rego, J. D. S., Lopes, M. D. R., & de Camargo, R. C. R. (2007). Criação de abelhas (apicultura). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/126300/1/00081610.pdf>

Bhat, A. R., Kumar, R., & Mural, P. K. S. (2023). Natural fiber reinforced polymer composites: a comprehensive review of tribo-mechanical properties. *Tribology International*, 108978.

Feng, J.; Dong, P.; Li, R.; Li, C.; Xie, X.; Shi, Q. (2019) Effects of wood fiber properties on mold resistance of wood polypropylene composites, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 140, 152-159.

Hadjur, H., Ammar, D., & Lefèvre, L. (2022). Toward an intelligent and efficient beehive: A survey of precision beekeeping systems and services. *Computers and Electronics in Agriculture*, *192*, 106604.

Kumar, R., Ul Haq, M. I., Raina, A., & Anand, A. (2018). Industrial applications of natural fibre-reinforced polymer composites – challenges and opportunities. *International Journal of Sustainable Engineering*, *12*(3), 212–220.

Moreira, A. M. (2009). Materiais compósitos. *Área de construção*. Disponível em: http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf.

Petry, A. (2011). Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/36895>

Sadiki, M., Elabed, S., Barkai, H., Laachari, F., & Koraichi, S. I. (2015). The impact of *Thymus vulgaris* extractives on cedar wood surface energy: Theoretical and experimental of *Penicillium* spores adhesion. *Industrial Crops and Products*, *77*, 1020-1027.

Trinh, K. T., Khuong, D. A., Viet, D. D., Tsubota, T., Ioannidis, I., Pashalidis, I., Kalderis, D. (2024) Valorization of bamboo and cedar bark residues for the production of biochars as adsorbents of CO₂ and radionuclides, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *41*, 2352-5541.