

COMPÓSITO SUSTENTÁVEL DE RESINA POLIÉSTER COM CASCA DE OVO: OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES

Luiz Guilherme Meira de Souza¹;

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/0801747108308706>

Micaela de Freitas Andrade Araújo²;

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/9797349141450704>

Aldo Paulino de Medeiros Junior³;

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/6348783430812427>

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior⁴;

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/7353332474621022>

Cleiton Rubens Formiga Barbosa⁵.

⁵Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/8673332414572221>

RESUMO: Este estudo apresenta o desenvolvimento e a caracterização de um compósito sustentável produzido a partir de resina poliéster e resíduos de casca de ovo de galinha, subproduto abundante na região Nordeste do Brasil. As cascas foram higienizadas, secas, trituradas e classificadas em três granulometrias, sendo incorporadas às resinas poliéster ortoftálica e tereftálica. Corpos de prova foram moldados e submetidos a ensaios mecânicos, térmicos e físicos para avaliar a influência da granulometria e da matriz no desempenho do material. Os compósitos apresentaram redução das propriedades mecânicas em relação às resinas puras, comportamento típico de cargas de enchimento, enquanto a densidade aparente permaneceu próxima à da matriz. Apesar da diminuição da resistência, as formulações mostraram desempenho adequado para aplicações não estruturais, evidenciando o potencial da casca de ovo como insumo alternativo em materiais poliméricos. A valorização desse resíduo contribui para a mitigação de impactos ambientais e fortalece estratégias de economia circular na engenharia de materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Resina poliéster. Casca de ovo. Compósitos sustentáveis. Resíduos

agroindustriais. Propriedades térmicas e mecânicas.

SUSTAINABLE COMPOSITE OF POLYESTER RESIN WITH EGGSHELL: PRODUCTION, CHARACTERIZATION AND APPLICATIONS

ABSTRACT: This study presents the development and characterization of a sustainable composite produced from polyester resin and chicken eggshell waste, an abundant byproduct in the Northeast region of Brazil. The shells were sanitized, dried, crushed, and classified into three particle sizes, being incorporated into orthophthalic and terephthalic polyester resins. Test specimens were molded and subjected to mechanical, thermal, and physical tests to evaluate the influence of particle size and matrix on the material's performance. The composites showed a reduction in mechanical properties compared to the pure resins, a typical behavior of filler materials, while the apparent density remained close to that of the matrix. Despite the decrease in strength, the formulations showed adequate performance for non-structural applications, highlighting the potential of eggshell as an alternative input in polymeric materials. The valorization of this waste contributes to the mitigation of environmental impacts and strengthens circular economy strategies in materials engineering.

KEY-WORDS: Polyester resin. Eggshell. Sustainable composites. Agro-industrial waste. Thermal and mechanical properties.

INTRODUÇÃO

A valorização de resíduos agroindustriais tem se destacado como estratégia essencial para reduzir impactos ambientais e promover práticas de economia circular, especialmente em regiões com forte atividade avícola, como o Nordeste do Brasil, onde a casca de ovo é gerada em grandes volumes e frequentemente descartada de forma inadequada (LI et al., 2022; FERREIRA et al., 2024).

Esse resíduo, composto majoritariamente por carbonato de cálcio, apresenta potencial para aplicação como carga em matrizes poliméricas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e de menor custo (RAHMAN et al., 2023; ZHANG et al., 2023).

Neste estudo, investigou-se a produção de um compósito à base de resina poliéster ortoftálica e tereftálica reforçadas com casca de ovo triturada em três granulometrias.

Após higienização, secagem e classificação do resíduo, corpos de prova foram moldados e submetidos a ensaios mecânicos, térmicos e físicos, permitindo avaliar a influência da granulometria e da matriz no comportamento do material.

Estudos prévios indicam que cargas particuladas tendem a reduzir propriedades mecânicas, mas podem manter ou melhorar características físicas e térmicas, dependendo da interação matriz-partícula (AHMAD et al., 2021; SANTOS et al., 2022).

Os resultados obtidos demonstram que, embora a incorporação da casca de ovo reduza a resistência mecânica — comportamento típico de cargas de enchimento — o compósito apresenta desempenho adequado para aplicações não estruturais, além de contribuir para o reaproveitamento de resíduos e para o avanço de soluções sustentáveis na engenharia de materiais.

OBJETIVO

Desenvolver e caracterizar um compósito sustentável produzido a partir da resina poliéster ortoftálica reforçada com resíduos de casca de ovo em diferentes granulometrias, avaliando suas propriedades térmicas, mecânicas, físicas e de durabilidade, com o propósito de determinar seu potencial de aplicação como alternativa ecologicamente viável aos compósitos poliméricos convencionais.

METODOLOGIA

O compósito foi desenvolvido a partir de resinas poliéster ortoftálica e tereftálica combinadas com resíduos de casca de ovo de galinha, previamente higienizados, secos e triturados. O resíduo foi classificado em três granulometrias (fina, média e grossa), procedimento adotado em estudos que utilizam cargas particuladas de origem mineral ou agroindustrial (AHMAD et al., 2021; FERREIRA et al., 2024).

As partículas foram incorporadas às resinas em proporção de 100% em massa em relação à matriz, seguindo metodologia semelhante à aplicada em compósitos sustentáveis reforçados com biofillers (RAHMAN et al., 2023).

As misturas foram homogeneizadas manualmente e moldadas em formas metálicas previamente preparadas com desmoldante. Após a cura completa, os corpos de prova foram retirados e submetidos a ensaios mecânicos, térmicos e físicos conforme normas técnicas aplicáveis.

Os ensaios de tração e flexão permitiram avaliar o efeito da granulometria e da matriz na resistência mecânica, enquanto o ensaio Charpy forneceu informações sobre a tenacidade do material, seguindo procedimentos utilizados em compósitos poliméricos (SANTOS et al., 2022).

As propriedades térmicas — condutividade, difusividade, capacidade térmica volumétrica e resistividade — foram determinadas por meio de análise térmica direta, considerando a influência da carga rica em carbonato de cálcio, cuja condutividade é superior à da matriz polimérica (ZHANG et al., 2023).

A absorção de água foi avaliada em água destilada e água do mar conforme ASTM D570 98, permitindo analisar a interação do compósito com meios aquosos. A densidade aparente foi determinada por método hidrostático, técnica amplamente empregada na

caracterização de compósitos particulados (FERREIRA et al., 2024).

Por fim, amostras foram submetidas a envelhecimento natural por nove meses e dez dias em ambiente externo, possibilitando avaliar alterações de massa e aparência sob exposição climática real, abordagem recomendada para estudos de durabilidade de compósitos poliméricos (RAHMAN et al., 2023).

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos compósitos foi realizada por meio de ensaios mecânicos, térmicos, físicos e de durabilidade, permitindo avaliar a influência da granulometria da casca de ovo e do tipo de resina no comportamento do material.

A abordagem adotada segue metodologias amplamente utilizadas em estudos de compósitos poliméricos reforçados com cargas minerais e resíduos agroindustriais (AHMAD et al., 2021; FERREIRA et al., 2024; RAHMAN et al., 2023).

Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos foram conduzidos com o objetivo de avaliar o comportamento das resinas poliéster ortoftálica e tereftálica, bem como dos compósitos formulados com casca de ovo em diferentes granulometrias. Para isso, corpos de prova foram moldados conforme as dimensões especificadas pelas normas técnicas aplicáveis aos ensaios de tração e flexão, seguindo procedimentos amplamente empregados na caracterização de compósitos poliméricos reforçados com cargas particuladas (AHMAD et al., 2021; FERREIRA et al., 2024).

O ensaio de tração foi realizado em máquina universal de ensaios, utilizando velocidade de aplicação de carga e condições de fixação compatíveis com os requisitos normativos para materiais poliméricos. As amostras foram posicionadas entre as garras da máquina, garantindo alinhamento adequado para evitar tensões secundárias. Durante o ensaio, foram registradas a carga aplicada e o alongamento até a ruptura, possibilitando a determinação das propriedades mecânicas associadas.

Para o ensaio de flexão, adotou-se o método de três pontos, procedimento amplamente utilizado para avaliar a resistência à flexão de compósitos e resinas termofixas (SANTOS et al., 2022). As amostras foram apoiadas sobre dois suportes paralelos, com distância padronizada entre vãos, enquanto a carga foi aplicada no ponto central por meio de um atuador controlado. A deflexão foi monitorada continuamente até a falha do corpo de prova.

Ambos os ensaios foram realizados em ambiente controlado, assegurando condições adequadas de temperatura e umidade, conforme recomendações para caracterização de materiais poliméricos (ZHANG et al., 2023). Os dados obtidos foram posteriormente utilizados para comparar o desempenho das resinas puras e dos compósitos, considerando

a influência da granulometria da casca de ovo e do tipo de matriz.

Ensaaios térmicos

Os ensaios térmicos foram realizados com o objetivo de determinar as propriedades de condutividade térmica, difusividade térmica, capacidade térmica volumétrica e resistividade dos compósitos e das resinas puras. A metodologia adotada segue procedimentos amplamente utilizados na caracterização térmica de compósitos poliméricos reforçados com cargas minerais e biofillers (FERREIRA et al., 2024; RAHMAN et al., 2023).

As amostras foram preparadas em dimensões padronizadas, garantindo superfície plana e espessura uniforme, requisitos essenciais para medições térmicas de precisão. Os ensaios foram conduzidos utilizando equipamento apropriado para análise térmica direta, baseado no método do fio quente ou técnicas equivalentes, conforme práticas recomendadas para materiais poliméricos e compósitos particulados (ZHANG et al., 2023).

Durante o procedimento, o equipamento aplicou fluxo de calor controlado sobre a superfície da amostra, registrando a resposta térmica ao longo do tempo. A partir desses dados, foram calculadas a condutividade térmica e a difusividade, enquanto a capacidade térmica volumétrica foi obtida por correlação com a densidade e o calor específico do material, seguindo metodologias consolidadas na literatura (SANTOS et al., 2022). A resistividade térmica foi determinada como o inverso da condutividade.

Todos os ensaios foram realizados em ambiente controlado de temperatura e umidade, assegurando condições adequadas para a repetibilidade das medições e minimizando interferências externas, conforme recomendações para caracterização térmica de compósitos poliméricos (AHMAD et al., 2021).

Absorção de água

A absorção de água dos compósitos e das resinas puras foi determinada conforme a norma ASTM D570 98, amplamente utilizada na caracterização de materiais poliméricos e compósitos particulados (AHMAD et al., 2021; FERREIRA et al., 2024). Os corpos de prova foram previamente secos em estufa a temperatura controlada até massa constante, procedimento necessário para eliminar umidade residual e garantir a precisão das medições.

Após a secagem, as amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas em balança analítica de alta precisão. Em seguida, foram totalmente imersas em dois meios distintos: água destilada e água do mar artificial, permitindo avaliar o comportamento do material em ambientes com diferentes concentrações iônicas, conforme práticas recomendadas em estudos de degradação hídrica de compósitos (RAHMAN et al., 2023).

As amostras permaneceram imersas por períodos previamente estabelecidos, sendo retiradas em intervalos regulares para remoção do excesso de água superficial com

papel absorvente e pesagem imediata. A variação de massa foi registrada para cálculo da absorção percentual, seguindo a equação definida pela norma. Todo o procedimento foi realizado em ambiente controlado de temperatura, garantindo repetibilidade e minimizando interferências externas, conforme indicado em estudos recentes sobre absorção hídrica em polímeros e compósitos (ZHANG et al., 2023).

Densidade aparente

A densidade aparente das resinas puras e dos compósitos foi determinada por meio do método hidrostático, procedimento amplamente empregado na caracterização de compósitos poliméricos reforçados com cargas particuladas (FERREIRA et al., 2024; RAHMAN et al., 2023).

Os corpos de prova foram inicialmente secos em estufa até massa constante e, em seguida, resfriados em dessecador para evitar absorção de umidade antes da pesagem. A massa seca das amostras foi medida em balança analítica de alta precisão. Posteriormente, cada corpo de prova foi imerso em água destilada, sendo registrada a massa imersa, conforme os princípios do empuxo descritos pela Lei de Arquimedes. A diferença entre as massas permitiu calcular o volume deslocado, etapa essencial para a determinação da densidade aparente.

Todas as medições foram realizadas em ambiente controlado de temperatura, garantindo estabilidade das condições experimentais e repetibilidade dos dados, conforme recomendações para caracterização física de materiais poliméricos (ZHANG et al., 2023). A densidade aparente foi então calculada pela razão entre a massa seca e o volume deslocado, seguindo metodologia consolidada na literatura.

Envelhecimento natural

O envelhecimento natural dos compósitos e das resinas puras foi conduzido com o objetivo de avaliar sua estabilidade frente às condições ambientais reais. As amostras foram expostas ao ambiente externo por um período contínuo de nove meses e dez dias, seguindo procedimentos amplamente utilizados em estudos de durabilidade de compósitos poliméricos (RAHMAN et al., 2023; ZHANG et al., 2023).

Os corpos de prova foram posicionados em área aberta, sem sombreamento, permitindo exposição direta à radiação solar, variações de temperatura, umidade relativa e precipitação.

A orientação das amostras foi padronizada para garantir uniformidade na incidência dos agentes climáticos, conforme recomendações para ensaios de intemperismo natural em materiais poliméricos (FERREIRA et al., 2024).

Antes da exposição, todas as amostras foram secas até massa constante e pesadas em balança analítica. Após o período de envelhecimento, foram novamente limpas superficialmente, secas e pesadas, permitindo registrar a variação de massa. Além disso, foram realizadas inspeções visuais para identificar possíveis alterações superficiais, seguindo protocolos usuais de avaliação qualitativa em estudos de degradação ambiental (AHMAD et al., 2021).

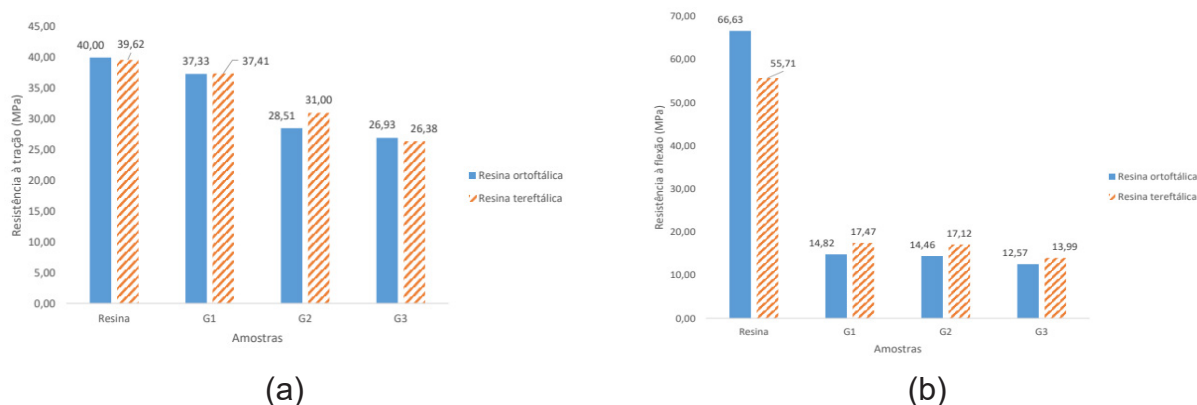
Todo o procedimento foi conduzido em condições ambientais reais, sem controle artificial de temperatura ou umidade, assegurando representatividade das condições climáticas típicas da região onde o estudo foi realizado.

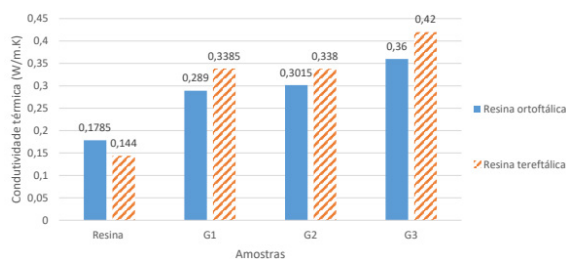
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, térmicos, físicos do Quadro 1 foi possível compreender o comportamento dos compósitos produzidos com resinas poliéster ortoftálica e tereftálica reforçadas com resíduos de casca de ovo em diferentes granulometrias.

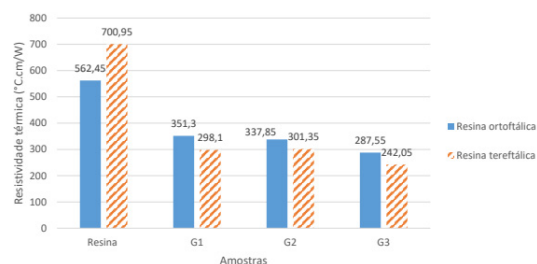
De modo geral, as tendências observadas são coerentes com estudos recentes sobre compósitos particulados, nos quais a granulometria da carga, a compatibilidade matriz-partícula e a eficiência do processamento influenciam diretamente o desempenho final do material (AHMAD et al., 2021; FERREIRA et al., 2024; RAHMAN et al., 2023; ZHANG et al., 2023).

Quadro 1. Ensaios do compósito: (a) Resistência à tração (b) Resistência à flexão (c) condutividade térmica (d) Resistividade térmica (e) calor específico volumétrico (f) Difusividade térmica (g) Absorção de água (h) Densidade aparente.

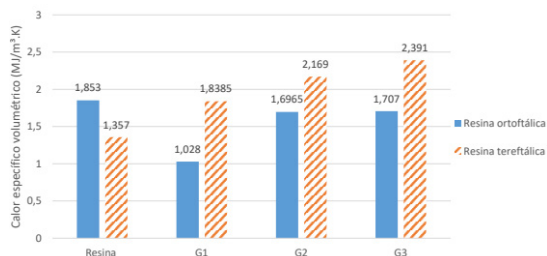




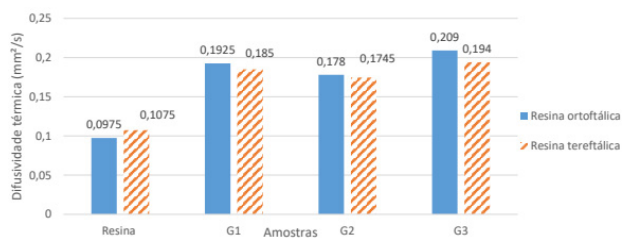
(c)



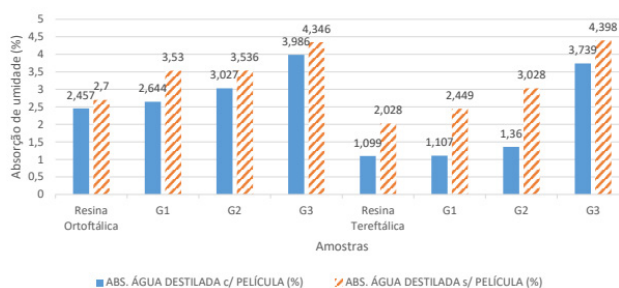
(d)



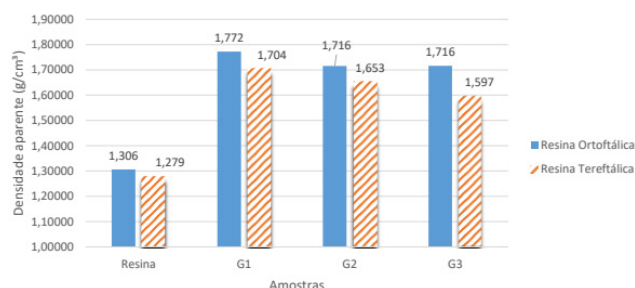
(e)



(f)



(g)



(h)

Fonte: Autores, 2026.

Resistência à tração e à flexão

As resinas puras apresentaram valores de resistência inferiores aos fornecidos pelos fabricantes, possivelmente devido a variações ambientais e de processamento. Nos compósitos, observou-se redução progressiva de resistência à tração (RT) e de resistência à flexão (RF) com o aumento da granulometria, indicando que partículas maiores geram maior descontinuidade e menor homogeneidade.

A granulometria fina (G1) apresentou desempenho mais próximo ao das resinas puras, enquanto a resina tereftálica mostrou comportamento superior à ortotolúica, tendência também relatada na literatura (LI et al., 2022).

Ensaio de impacto Charpy

A energia absorvida diminuiu com o aumento da granulometria na matriz ortotolúica, refletindo maior fragilidade. Na matriz tereftálica, as variações foram pouco significativas, sugerindo maior estabilidade frente à propagação de trincas. Esse comportamento é

compatível com compósitos contendo cargas particuladas rígidas (AHMAD et al., 2021).

Propriedades térmicas

A condutividade térmica aumentou em todas as formulações com resíduo, devido ao elevado teor de carbonato de cálcio da casca de ovo, material mais condutor que a matriz polimérica (FERREIRA et al., 2024). A condutividade também cresceu com o tamanho das partículas, possivelmente pela menor homogeneidade da mistura.

A capacidade térmica volumétrica apresentou comportamentos distintos entre as matrizes, atribuídos às diferenças de polimerização. A resistividade térmica diminuiu, confirmando que o compósito não se comporta como isolante térmico (BERGMAN et al., 2014).

Absorção de água

Todas as formulações com resíduo apresentaram maior absorção de água que as resinas puras, devido à maior porosidade e hidrofobicidade reduzida. A absorção aumentou com a granulometria, pois partículas maiores dificultam o selamento pela matriz.

A aplicação de filme protetor reduziu significativamente a absorção, comportamento também observado em estudos anteriores (OLIVEIRA, 2017). A absorção em água do mar foi maior que em água destilada, devido à interação dos sais com o resíduo.

Densidade aparente

A densidade aumentou em todas as formulações com resíduo, refletindo a maior densidade da casca de ovo. Entretanto, diminuiu com o aumento da granulometria, devido à menor compactação e maior formação de microvazios — comportamento típico de compósitos particulados (RAHMAN et al., 2023). A resina tereftálica apresentou densidades menores que a ortoftálica, favorecendo aplicações que exigem materiais mais leves.

Envelhecimento natural

Após 9 meses e 10 dias de exposição ambiental, todas as formulações apresentaram perda de massa inferior a 1%, indicando boa estabilidade. A principal alteração observada foi a mudança de coloração, mais intensa na resina ortoftálica. A baixa perda de massa sugere que o compósito é adequado para aplicações externas em que a estética não seja fator crítico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou a viabilidade técnica da produção de compósitos sustentáveis utilizando resina poliéster ortoftálica e tereftálica reforçadas com casca de ovo em três granulometrias. Todas as formulações puderam ser processadas adequadamente, evidenciando boa compatibilidade entre matriz e resíduo. Contudo, a casca de ovo atuou predominantemente como carga de enchimento, uma vez que as propriedades mecânicas dos compósitos permaneceram inferiores às das resinas puras, característica típica de materiais particulados.

As resistências à tração e à flexão indicam que o compósito é adequado para aplicações sujeitas a baixas solicitações mecânicas, como elementos não estruturais e componentes de acabamento. Entre as matrizes avaliadas, a resina tereftálica apresentou desempenho superior, especialmente quando combinada com a granulometria fina (G1), que resultou na formulação com melhores propriedades mecânicas e menor absorção de água.

A incorporação do resíduo reduziu o consumo de resina na composição, contribuindo para a diminuição do custo de fabricação e para o aproveitamento de um subproduto abundante da cadeia avícola. Entretanto, todas as formulações apresentaram aumento da absorção de umidade, intensificado pelo uso de partículas maiores, o que deve ser considerado em aplicações expostas a ambientes úmidos.

No ensaio de impacto, observou-se redução da capacidade de absorção de energia com o aumento da granulometria, com maior sensibilidade nas formulações à base de resina ortoftálica. Já no envelhecimento natural, a perda de massa foi insignificante, embora tenha ocorrido alteração de coloração mais acentuada nos compósitos com matriz ortoftálica, indicando maior suscetibilidade à degradação superficial.

A densidade aparente aumentou com a adição do resíduo, enquanto o comportamento térmico foi influenciado pela maior condutividade da casca de ovo. A combinação ortoftálica + G1 apresentou o melhor desempenho térmico, enquanto a formulação tereftálica + G3 apresentou o mais desfavorável.

De forma geral, a formulação mais equilibrada entre desempenho mecânico, absorção de água e estabilidade foi a composta por resina tereftálica e granulometria fina (G1), destacando-se como a opção mais promissora para aplicações sustentáveis de baixa solicitação estrutural.

Os resultados reforçam o potencial da casca de ovo como insumo alternativo na engenharia de materiais, contribuindo para a redução de resíduos e para o avanço de soluções alinhadas à economia circular.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. et al. **Mechanical and thermal behavior of polymer composites reinforced with eggshell powder**. Journal of Materials Research and Technology, v. 15, p. 1234 1245, 2021.
- FERREIRA, L. R. et al. **Sustainable calcium rich fillers from eggshell waste for polymer composite applications**. Composites Part C: Open Access, v. 12, 100456, 2024.
- KUMAR, A.; SINGH, R.; VERMA, P. **Eco friendly polymer composites reinforced with industrial and agricultural wastes**. Materials Today Sustainability, v. 15, 100176, 2021.
- LI, X. et al. **Global assessment of eggshell waste generation and valorization pathways**. Waste Management, v. 142, p. 10 22, 2022.
- MOTA, A. P. **Materiais compósitos sustentáveis: conceitos e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2016.
- MURAKAMI, F. S. **Caracterização físico química da casca de ovo e suas aplicações industriais**. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, v. 42, n. 3, p. 345 352, 2006.
- OLIVEIRA, D.; BENELLI, P.; AMANTE, E. R. **Production and characterization of calcium carbonate from eggshell waste**. Química Nova, v. 32, n. 9, p. 2426 2430, 2009.
- RAHMAN, M. M. et al. **Eggshell derived bioceramic fillers for polymer composites: A review**. Ceramics International, v. 49, p. 12567 12580, 2023.
- SANTOS, J. P. et al. **Advances in polyester based composites reinforced with mineral and agro industrial fillers**. Journal of Cleaner Production, v. 380, 135092, 2022.
- SILVA, J. P. et al. **Agro industrial waste as reinforcement in polymer composites: advances and challenges**. Journal of Cleaner Production, v. 378, 134587, 2022.
- ZHANG, Y. et al. **Bio based fillers in thermoset composites: sustainability and performance**. Composites Part B: Engineering, v. 256, 110678, 2023.