

Impacto do carvão vegetal nas propriedades físicas e mecânicas de biocompósitos

Bruna da Silva Cruz¹; Fabiola Martins Delatorre¹; Állison Moreira da Silva¹; Ananias Francisco Dias Júnior¹; Emilly Soares Gomes da Silva¹; Mariana Alves Ferreira¹

¹ Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Jerônimo Monteiro/ES, Brasil; –
brunacruzufes@gmail.com

Resumo: O objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar biocompósitos termofixos com diferentes matrizes poliméricas e diferentes proporções de finos de carvão vegetal, produzidos em temperatura de pirólise de 800°C, com taxa de aquecimento de 6°C.min⁻¹. Foram executados os ensaios de flexão, tração e absorção de água. Os dados evidenciaram a boa adesão das cargas da matriz polimérica aos finos de carvão vegetal nos biocompósitos produzidos com resina epóxi, já os tratamentos contendo a resina poliuretano foram considerados insatisfatórios, pois seu desempenho mecânico foi inferior quando comparado ao tratamento controle e as outras resinas. A análise de absorção de água, demonstrou que os biocompósitos de resina poliuretano com finos de carvão vegetal absorveram 3,59% de água e os tratamentos de resina epóxi absorveu somente 0,23%. Os dados demonstram a viabilidade do uso de finos de carvão vegetal como material de incorporação a matrizes poliméricas epóxi, evidenciando as suas características físicas e mecânica.

Palavras-chave: Meio ambiente, Resinas poliméricas, Resíduos, Compósitos Verdes.

Impact of charcoal on the physical and mechanical properties of biocomposites

Abstract: The objective of this work was to develop and characterize thermoset biocomposites with different polymeric matrices and different proportions of charcoal fines, produced at a pyrolysis temperature of 800°C, with a heating rate of 6°C.min⁻¹. Flexure, traction and water absorption tests were performed. The data showed the good adhesion of the polymeric matrix fillers to the charcoal fines in the biocomposites produced with epoxy resin, while the treatments containing the polyurethane resin were considered unsatisfactory, because its mechanical performance was lower when compared to the control treatment and the other resins. The water absorption analysis showed that the polyurethane resin biocomposites with charcoal fines absorbed 3.59% of water and the epoxy resin treatments absorbed only 0.23. The data demonstrate the feasibility of using charcoal fines as a material for incorporation into epoxy polymeric matrices, evidencing their physical and mechanical characteristics.

Keywords: Environment, Polymer Resins, Waste, Green Composites.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU) em 2023, estima-se que entre 19 e 23 milhões de toneladas de materiais oriundos de polímeros acabem anualmente em lagos, rios e mares, onde causam danos imensuráveis. Novos

materiais têm sido estudados como alternativa para minimizar os impactos ambientais causados pelos compósitos convencionais. Dentre essas alternativas, destacam-se os biocompósitos, que são materiais formados por uma matriz polimérica reforçada com fibras ou partículas de origem natural. Nesse contexto, a incorporação de finos naturais como reforço em compósitos poliméricos tem se mostrado crucial para o progresso na criação desses materiais. Recentemente, tanto a indústria quanto a comunidade científica têm concentrado esforços significativos na busca e avaliação de soluções que não só reduzam o impacto ambiental, mas também impulsionem o desenvolvimento de uma nova geração de compósitos, os biocompósitos, que representam uma abordagem mais sustentável e inovadora na ciência dos materiais (Bahrami; Abenojar; Martínez, 2020; Ortega et al., 2022; Shanmugam et al., 2021)

A utilização de finos naturais como bio-reforço tem se expandido rapidamente devido à sua capacidade de aumentar significativamente a resistência à flexão, tração e rigidez dos compósitos, ao mesmo tempo em que reduz os custos de produção (Delatorre et al., 2023). A produção de carvão vegetal, além de gerar o produto principal, resulta na formação de resíduos conhecidos como finos de carvão vegetal, que são partículas finas sem valor agregado e sem destino específico, tornando-se assim um material de baixo custo (Bernardini et al., 2020). Com o objetivo de desenvolver um novo material que combine elevada resistência mecânica e redução dos impactos ambientais associados aos polímeros convencionais, foram criados biocompósitos utilizando matrizes poliméricas combinadas com finos de carvão vegetal. Foram analisadas diferentes composições, empregando resinas epóxi, poliéster e poliuretano, com frações variando de 0% a 20% de finos de carvão vegetal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Preparo e caracterização dos biocompósitos I

A madeira oriunda do estudo foi retirada de um plantio experimental de *Eucalyptus* spp. com dez anos de idade. As amostras foram pirolisadas em um cilindro metálico no interior de uma mufla, sob temperaturas finais de 800°C, taxa de aquecimento de 6°C.min⁻¹ e tempo de permanência na temperatura final de duas horas. Com a finalidade de se obter um material mais homogêneo os finos de carvão vegetal foram peneirados, obtendo granulometria final de 250 mesh (0,056 mm). Os biocompósitos foram confeccionados com a fração mássica de 0% e 20% de finos de carvão vegetal, com a finalidade de avaliar a sua influência nas propriedades dos

biocompósitos. Os ensaios de flexão foram realizados aplicando uma carga em um corpo de prova e medindo a deformação resultante. Esse ensaio foi conduzido em uma máquina de ensaio universal (modelo Instron 5582) com uma velocidade de 1 mm.min⁻¹, conforme a normativa ASTM D-7264 (ASTM, 2021). Com o objetivo de avaliar as propriedades de resistência máxima à tração, foram realizados ensaios de tração para cada uma das composições estudadas seguindo as diretrizes da norma ASTM D-3039 (ASTM, 2017). Para avaliar as alterações nas propriedades dos corpos de prova, submergimos os biocompósitos em água destilada até atingirem peso constante. Em seguida, calculamos a taxa de absorção de água das amostras, seguindo a norma ASTM D-570 (ASTM, 2018).

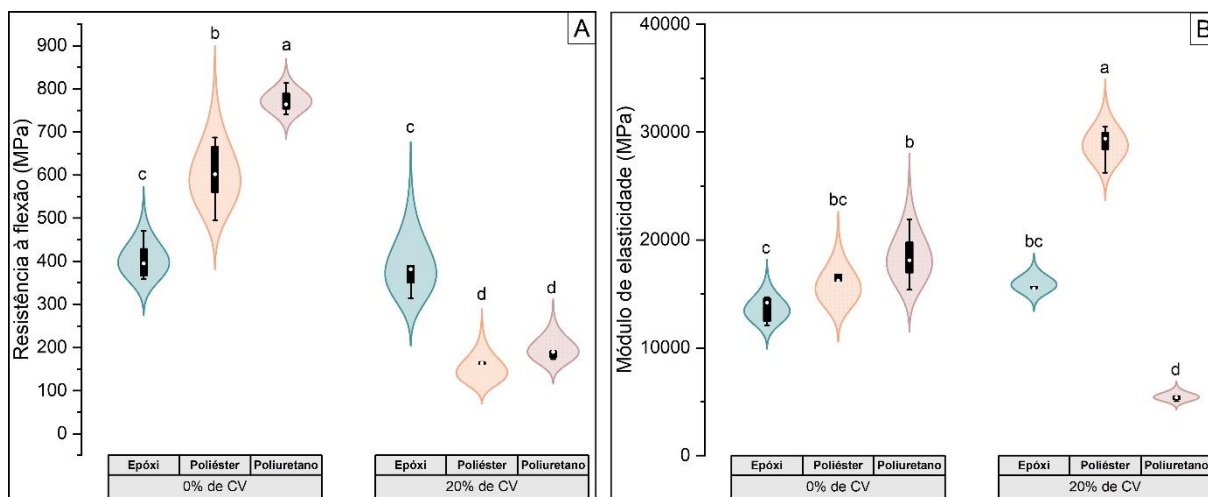
2.2 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Foi realizada a análise de variância seguindo delineamento inteiramente aleatorizado, com seis tratamentos relacionados a combinação de resinas e adição de carvão vegetal. Identificando diferença significativa, foi realizado teste de Tukey. Medidas de dispersão do erro padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. O software R Core Team foi utilizado para as análises citadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

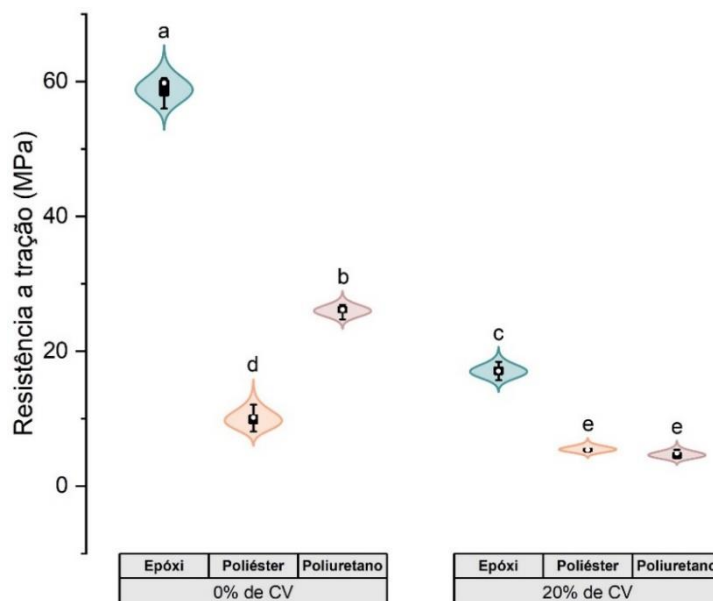
Na Figura 1 estão apresentados os dados das propriedades de flexão dos três tipos de resinas estudadas.

Figura 1 – (A) Resistência à flexão e (B) módulo de elasticidade dos biocompósitos com frações de 0 e 20% de finos de carvão vegetal com diferentes matrizes poliméricas.



Os biocompósitos com resina de poliuretano sem adição de carvão vegetal (0% de CV) apresentaram a maior resistência à flexão, seguidos pelos biocompósitos com resina poliéster e epóxi (Figura 1A). A adição de 20% de carvão vegetal (20% CV) resultou em uma redução de 74,5%, 74,79% e 3,41%, nas propriedades das resinas de poliuretano, poliéster e epóxi, respectivamente, em comparação às amostras sem carvão vegetal. Os biocompósitos com resina epóxi apresentaram a menor variação 3,41% entre as composições com e sem carvão vegetal, tendo uma melhor compatibilidade com os finos de carvão vegetal. As partículas finas podem preencher espaços vazios entre as moléculas da resina, melhorando a coesão e resistência do biocompósito (Amroune et al., 2022; Karthikeyan et al., 2022). Na Figura 2 os resultados do módulo de elasticidade mostram que a adição de 20% de carvão vegetal teve efeitos distintos nas diferentes resinas. A resina poliuretano apresentou uma queda significativa no módulo de elasticidade, com uma redução de 70,31%, indicando uma perda substancial de rigidez. A falta de grupos funcionais reativos nos finos de carvão vegetal dificulta a adesão química com a resina de poliuretano, a diferença na estrutura também afeta a dispersão e a integração dos finos de carvão na matriz polimérica (Dunky, 2021; Formela; Kurańska; Barczewski, 2022). A resina epóxi também demonstrou um aumento moderado de 17,09%, mostrando uma melhoria na rigidez com a adição de carvão vegetal. De acordo com Ahmed *et al.* (2024) a adição de partículas melhora a resistência mecânica dos biocompósitos a base de matriz epóxi. Os finos de carvão vegetal atuam como uma nanopartícula, aumentando a resistência e rigidez do material, quando disperso na matriz polimérica, os finos de carvão vegetal exercem a função de um bio-reforço, transferindo carga e resistência para o material compósito (Dinesh et al., 2020; Wondmagegnehu, 2023). Os dados de resistência a tração estão demonstrados a seguir na Figura 2.

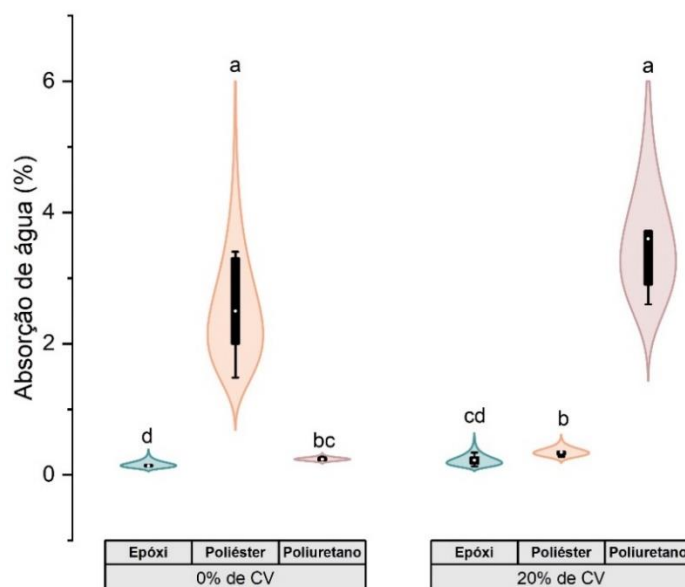
Figura 2 – Resistência a tração dos biocompósitos com frações de 0 e 20% de finos de carvão vegetal com diferentes matrizes poliméricas.



Os biocompósitos à base de resina epóxi sem a adição de CV apresentaram a maior resistência à tração, com um valor de 58,9 MPa. Este resultado reflete a robustez intrínseca da resina epóxi, que se destaca pela alta resistência entre os materiais analisados. No entanto, ao incorporar 20% de carvão vegetal, houve uma significativa redução na resistência à tração para 17,1 MPa, representando uma queda de aproximadamente 71% (Figura 2). Essa diminuição acentuada indica que, embora a resina epóxi apresente uma boa compatibilidade inicial com o carvão vegetal, a adição em grandes proporções compromete substancialmente a capacidade do material de suportar tensões, possivelmente devido à má dispersão do carvão vegetal ou à formação de pontos de tensão dentro da matriz polimérica. A resina poliéster exibiu uma resistência à tração inicial de 10 MPa, que caiu para 5,5 MPa com a adição de 20% de CV, uma redução de 45%, indicando uma menor capacidade de interação com o CV e, conseqüentemente, uma menor resistência. Este comportamento pode ser explicado pela menor capacidade do poliéster de interagir efetivamente com o CV, resultando em um material menos resistente às forças de tração (Gapsari et al., 2022; Sanjay et al., 2018). Já a resina poliuretano apresentou uma queda significativa na resistência à tração de 26 MPa para 4,7 MPa (redução de 81,9%), sugerindo uma forte sensibilidade à adição de CV, possivelmente devido à interrupção na distribuição de tensões, comprometendo a integridade estrutural do material. Essa incompatibilidade pode estar relacionada à estrutura química do poliuretano, que, ao incorporar CV, pode sofrer uma interrupção significativa na sua capacidade de distribuir tensões, comprometendo a integridade estrutural do material (de Souza; Kahol; Gupta, 2021;

Marlina et al., 2020; Peyrton; Avérous, 2021) . A análise de absorção de água foi realizada para demonstrar como os materiais interagem com a água e como essa interação pode afetar suas propriedades. Esses resultados estão ilustrados na Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Resultados da análise de absorção de água dos biocompósitos com frações de 0 e 20% de finos de carvão vegetal com diferentes matrizes poliméricas.



Os biocompósitos contendo resina epóxi e poliuretano com 0% de finos de carvão vegetal, não apresentaram taxas de absorção de água elevadas como apresentados na Figura 3. Isso se deve ao fato de que o poliuretano é formado pela reação de um isocianato com um diol, essa reação cria uma estrutura química que é impermeável à água (Lopes Junior et al., 2021). Quando comparamos os dados de absorção entre as três resinas contendo 20% de finos de carvão vegetal, a resina poliuretano absorveu 90,17% a mais de água em comparação a resina epóxi e 93,56% a mais que a resina poliéster. A resina poliéster tem uma característica que a torna mais permeável à água do que a resina epóxi. Isso ocorre porque a resina poliéster é porosa e absorve água lentamente com o uso, o que pode afetar suas propriedades mecânicas ao longo do tempo (Tejero; Bi, 2020). Essas características de absorção e água presentes nos biocompósitos, se tornam um obstáculo na sua utilização, principalmente quando a utilização desses materiais está sujeita a ação de intempéries como chuva e/ou ventos. A interface entre os materiais de reforço e a matriz polimérica é crítica para a resistência do compósito (Dias de Souza; Nogueira Barelli; Dalcin Osato, 2023), a absorção de água pode causar descolamento ou enfraquecimento dessa interface, levando a falhas prematuras.

4. CONCLUSÃO

A resina epóxi contendo 20% de finos de carvão vegetal, demonstrou maior eficiência mecânica e melhores resultados dentre as outras resinas na análise de absorção de água. Os biocompósitos produzidos com finos de carvão vegetal e a resina epóxi, se destacaram nas análises realizadas, evidenciando que sua produção e uso podem atender variados segmentos do mercado e atender a demanda sustentável crescente no planeta. Para implantar constantemente o uso de compósitos poliméricos menos poluentes ao meio ambiente, ainda se faz necessário estudos aprofundados a respeito das características de novos biocompósitos a base de diferentes matrizes poliméricas que possuem boas qualidades mecânicas, químicas e físicas, assim como estudos mais profundos a cerca do uso de finos de carvão vegetal e/ou outros materiais de origens naturais como material de reforço a essas matrizes.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - (ASTM). **D 3039M - 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials** West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **D-570-18: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics** West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **D 7264M-15: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials** West Conshohocken, 2021.

AHMED, Zainab W; KADIM, Adil I. The role of Palm Fronds Charcoal Waste Particles On Mechanical, Thermal, and Acoustic Insulation Properties of Epoxy Composite. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2754, n. 1, p. 012007, 2024.

AMROUNE, Salah *et al.* Quantitatively Investigating the Effects of Fiber Parameters on Tensile and Flexural Response of Flax/Epoxy Biocomposites. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 6, p. 2366–2381, 2022.

BAHRAMI, Mohsen; ABENOJAR, Juana; MARTÍNEZ, Miguel Ángel. Recent Progress in Hybrid Biocomposites: Mechanical Properties, Water Absorption, and Flame Retardancy. **Materials**, v. 13, n. 22, p. 5145, 2020.

BERNARDINI, Luara Pires *et al.* VALORIZAÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL NO DESENVOLVIMENTO DE FRITA CERÂMICA PARA FORMULAÇÃO DE ENGOBE. **Cerâmica industrial**, nv. 25, n. 1, 2020.

DE SOUZA, Felipe M.; KAHOL, Pawan K.; GUPTA, Ram K. Introduction to Polyurethane Chemistry, 2021. p. 1–24.

DELATORRE, Fabíola Martins *et al.* Melhoria das propriedades mecânicas de compósitos verdes adicionando carvão vegetal oriundo de florestas plantadas. **Série Técnica IPEF**, [s. l.], v. 26, n. 48, p. 388–392, 2023.

DIAS DE SOUZA, Brenda Isabella; NOGUEIRA BARELLI, Clara; DALCIN OSATO, Luiz Henrique. **Desenvolvimento e caracterização de biocompósitos fúngicos para aplicação na indústria de embalagens**. 2023. 32–102 f. [s. l.], 2023.

DINESH, S. *et al.* Influence of wood dust fillers on the mechanical, thermal, water absorption and biodegradation characteristics of jute fiber epoxy composites. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 1, p. 9, 2020.

DUNKY, Manfred. Wood Adhesives Based on Natural Resources: A Critical Review: Part IV. Special Topics. *In*: PROGRESS IN ADHESION AND ADHESIVES. Wiley, 2021. p. 761–840.

FORMELA, Krzysztof; KURAŃSKA, Maria; BARCZEWSKI, Mateusz. Recent Advances in Development of Waste-Based Polymer Materials: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 5, p. 1050, 2022.

GAPSARI, Femiana *et al.* Flammability and mechanical properties of Timoho fiber-reinforced polyester composite combined with iron powder filler. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, p. 212–219, 2022.

KARTHIKEYAN, R. *et al.* Experimental investigations on tensile and flexural properties of epoxy resin matrix waste marble dust and tamarind shell particles reinforced bio-composites. **Materials Today: Proceedings**, v.68, p. 2215–2219, 2022.

LOPES JUNIOR, Wanley Eduardo *et al.* Avaliação do teor ótimo de resinas orgânicas para produção de painéis OSB de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) residual. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, 2021.

MARLINA *et al.* Polyurethane film prepared from ball-milled algal polyol particle and activated carbon filler for NH₃-N removal. **Heliyon**, v. 6, n. 8, p. e04590, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). “Relatório sobre Soluções para Reduzir a Poluição Plástica”. ONU, 2024

ORTEGA, Florencia *et al.* Biobased composites from agro-industrial wastes and by-products. **Emergent Materials**, v. 5, n. 3, p. 873–921, 2022.

PEYRTON, Julien; AVÉROUS, Luc. Structure-properties relationships of cellular materials from biobased polyurethane foams. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 145, p. 100608, 2021.

SANJAY, M. R. *et al.* **Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review**. Elsevier Ltd, 2018.

SHANMUGAM, Vigneshwaran *et al.* Circular economy in biocomposite development: State-of-the-art, challenges and emerging trends. **Composites Part C: Open Access**, v. 5, p. 100138, 2021.

TEJERO, G; BI, Z. **Composite: matriz de resina poliéster insaturada con fibras de refuerzo vegetales (cáñamo)**Ingenia Materiales. 2020.

WONDMAGEGNEHU, Belay Taye. Investigating the influence of sugarcane bagasse ash volume variation in glass fiber reinforced with epoxy resin matrix composite material. **Polymers and Polymer Composites**, v. 31, 2023.