

FINOS DE CARVÃO VEGETAL: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO COMO BIO-CARGA EM COMPÓSITOS

Autores: Paula Gomes Siqueira, Amanda Oliveira da Conceição, Hérika Fontes de Almeida, Bruno Fonseca Coelho, Leticia Camilato de Paula, Josinaldo de Oliveira Dias,

Universidade Federal do Espírito Santo - Alto Universitário, s/n, Guararema, CEP 29.500-000 – Alegre -ES, Brasil, paulasiqueira1810@gmail.com, amandadeoliveira1@hotmail.com, herika.almeida@edu.ufes.br, brufon2323@gmail.com, camilatoleticia@gmail.com, josinaldo.dias@ufes.br

Resumo

Este estudo avalia as propriedades dos finos de carvão vegetal obtidos por pirólise de *Eucalyptus* sp. visando seu uso como bio-carga em compósitos poliméricos. O carvão foi produzido em mufla a 800 °C (5 °C min⁻¹; 60 min), e caracterizado por química imediata (ASTM D1762-84), densidades aparente e verdadeira (método da proveta, adaptado de NBR 11941; picnometria, NBR 9165), MEV, BET, TGA e DRX. Densidade aparente = 0,3064 g cm⁻³ e densidade verdadeira = 1,1939 g cm⁻³. A análise imediata indicou voláteis = 10,88 %, cinzas = 0,23 % e carbono fixo = 88,87 %. A TGA evidenciou elevada estabilidade térmica; a MEV/BET revelou microestrutura porosa com alta área superficial; o DRX indicou grafitação parcial. Esses resultados sustentam o potencial dos finos de carvão vegetal como reforço em compósitos, contribuindo para materiais mais leves e alinhados à economia circular.

Palavras-chave: Biomassa florestal. Biocarvão. Compósitos poliméricos.

Área do Conhecimento: Engenharia Química

Introdução

A maioria dos compósitos poliméricos é obtida a partir de materiais orgânicos sintéticos derivados do petróleo (Yildizhan, 2018). Tais materiais são de baixo custo, duráveis e apresentam bom desempenho; contudo, ao fim do ciclo de vida, tornam-se resíduos persistentes, acumulando-se em aterros e ambientes marinhos. O crescimento desse passivo ambiental reforça a necessidade de alternativas que mantenham o desempenho tecnológico com menor impacto ambiental.

Nesse contexto, a literatura tem explorado o aproveitamento de resíduos e o uso de polímeros de base renovável ou reciclada reforçados com cargas naturais (bio-cargas). A proposta é substituir, parcial ou totalmente, insumos petroquímicos ao mesmo tempo em que se promove a valorização de resíduos e a sustentabilidade dos processos (Das, 2018; Sundarakannan, 2019; Delatorre, 2022).

O carvão vegetal é uma dessas alternativas: constituído majoritariamente por carbono, apresenta alta porosidade e relevante capacidade de adsorção (Dias Júnior, 2016). O Brasil destaca-se como maior produtor e consumidor mundial, com produção anual de aproximadamente 4,5 milhões de toneladas, destinadas principalmente ao setor siderúrgico (Brasil, 2019). Entretanto, devido à friabilidade, cerca de 25–30% do material se fragmenta em finos durante as etapas de produção, transporte e manuseio (Rousset, 2011). Quando descartados inadequadamente, esses resíduos geram impactos ambientais, sociais e econômicos (Siqueira, 2015; Rodrigues, 2019).

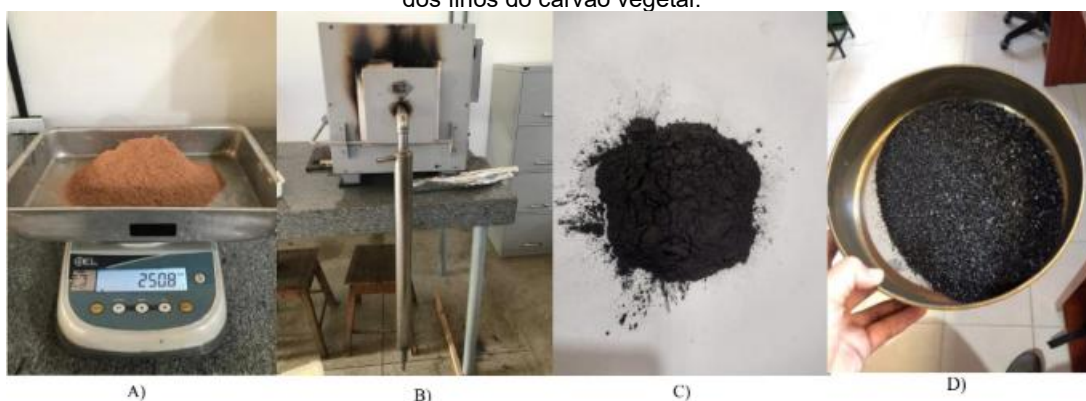
A valorização dos finos de carvão vegetal constitui, portanto, oportunidade de reinseri-los na cadeia produtiva, reduzindo desperdícios e agregando valor ao setor. Diante disso, este trabalho objetiva caracterizar, sob os aspectos físico, químico e estrutural, os finos de carvão vegetal obtidos por pirólise de madeira de *Eucalyptus* sp. e avaliar seu potencial como bio-carga em compósitos de polietileno de alta densidade reciclado.

Metodologia

Para a produção do carvão vegetal, foram utilizados resíduos de madeira seca de Eucalipto provenientes do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira – DCFM – UFES. O material foi preparado em serragem, inicialmente passando pelo moinho de martelo, em seguida, o resíduo foi submetido ao moinho de facas atingindo a granulometria média desejada de 0,053. As amostras de madeira moída foram secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 20 horas.

O material seco foi pirolísado em um forno elétrico tipo mufla, com a coleta dos gases condensáveis por meio de um condensador. A temperatura final de pirólise atingiu 800°C , com uma taxa de aquecimento de 5°C min^{-1} e tempo de permanência na temperatura final de 60 minutos. A figura 1 apresenta as etapas do processo. Para a homogeneização das amostras, os finos foram submetidos à peneiração com malha de 60 mesh (0,250 mm).

Figura 1: Etapas do processo de produção de carvão vegetal: A) 250 gramas de resíduo utilizado para pirólise; B) Forno do tipo mufla; C) Resultado da pirólise; D) Peneira de malha de 60 mesh utilizada na homogeneização dos finos do carvão vegetal.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Para caracterização físico-química dos finos de carvão vegetal foi realizado a densidade aparente determinada seguindo as diretrizes da norma NBR 11941 (ABNT, 2003), conforme a Equação 1. Determinou-se a densidade verdadeira da amostra de carvão, em conformidade com a norma NBR 9165 (ABNT, 1985), conforme a equação 2.

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

$$DV = \frac{Ms}{Ms - (MW - MW')} \quad (2)$$

Onde: M= massa de carvão co-pirolítico; V= volume. DV= densidade verdadeira (kg/m^3); Ms= massa do material seco (Kg); Mw= massa do picnômetro + água + material (Kg); Mw'= massa do picnômetro com água (Kg).

Na Análise de química imediata, determinou-se o conteúdo de voláteis, cinzas e carbono fixo, seguiu-se a norma D-1762-84 (ASTM 2007). Conforme as equações 3, 4 e 5, respectivamente:

$$\% \text{Voláteis} = \frac{A - B}{A/100} \quad (3)$$

$$\% \text{Cinzas} = \frac{PC - PZ}{\frac{A}{100}} \quad (4)$$

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

$$\% \text{Carbono Fixo} = 100\% - \% \text{Voláteis} - \% \text{Cinzas} \quad (5)$$

Onde: A = Peso da amostra sem umidade; B = Peso da amostra após-processo a 950 °C.

A análise termogravimétrica (TGA) foi conduzida usando um equipamento Labsys evo Setaram, com uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹, em aproximadamente 318.1 g de carvão com tamanho de partícula de 60 mesh. Os termogramas foram registrados a partir da temperatura ambiente (falta °C), em uma atmosfera de gás nitrogênio com uma taxa de fluxo de 1,8 bar, até atingir 600 °C. A análise teve uma duração total de 200 minutos.

Para análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), as amostras foram metalizadas com ouro por 10 segundos. Por último, as micrografias foram capturadas em um equipamento JEOL JSM, modelo 840A, operando com o feixe de elétrons sob uma tensão de aceleração de 10 kV e uma corrente de 6x10⁻¹¹A.

Para determinar a análise de Brunauer-Emmett-Teller (BET), a amostra passou por um pré-tratamento térmico a 200°C por 2 horas em mufla para a análise de BET. A análise foi conduzida usando o equipamento marca JWGB modelo Meso 112, com gás nitrogênio para a adsorção, a uma temperatura de 200°C.

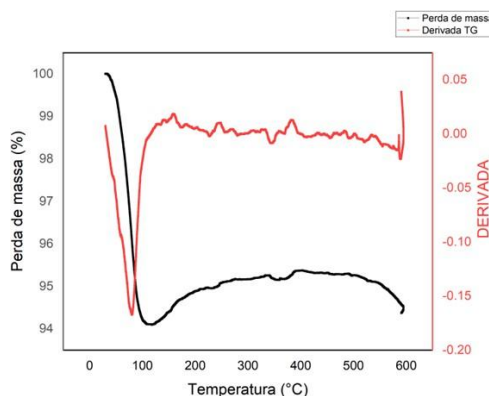
A difração de Raio-x (DRX) foi realizado em um difratômetro da marca Rigaku®, modelo Miniflex 600, operado com uma corrente de 15 mA e tensão de 40kV. As amostras foram submetidas à radiação CuKα (λ = 1,5406 Å) em um intervalo angular de 3 a 80°, com variação de 10° 2θ por minuto e passo de 0,02° 2θ.

Resultados

A densidade aparente e verdadeira dos finos de carvão resultou nos valores médios de 0,3064±0,0108 g/cm³ (densidade aparente) e 1,1939±0,1251 g/cm³ (densidade verdadeira), respectivamente. Os resultados da análise imediata, relacionados ao teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, foram de 10,88%, 88,87% e 0,23%, respectivamente.

As curvas de termogravimétrica (TGA) e derivada (DTG) dos finos estão representadas na Figura 2, mostrando a perda de massa em função da temperatura.

Figura 2: Curvas TG e DTG dos finos de carvão vegetal produzido.

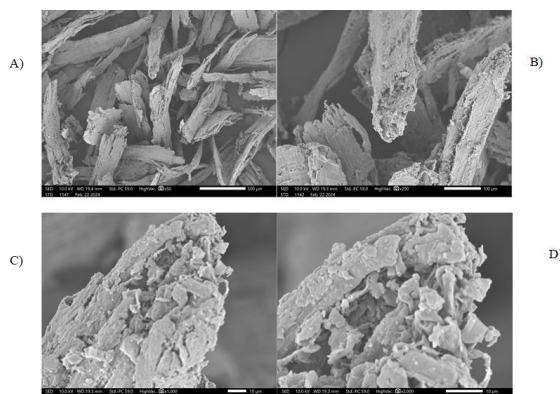


Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

A microestrutura dos finos foi caracterizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme a Figura 3.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

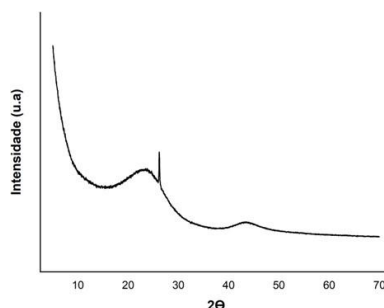
Figura 3: Micrografia dos finos de carvão; A) 50x; B) 200x; C) 1000x; D) 2000x



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

A análise de área superficial (BET) forneceu os valores de diâmetro médio de poros de 2,374 nm, área superficial de 293,136 m².g⁻¹ e volume de poros igual a 0,174 (m³.g⁻¹). O padrão de difração de raios-X (DRX) está ilustrado na Figura 4, evidenciando os principais picos característicos.

Figura 4: Padrões de difração de raios-X do carvão vegetal produzido.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Discussão

As densidades aparente e verdadeira (0,3064 e 1,1939 g cm⁻³, respectivamente) indicam que o carvão vegetal produzido possui estrutura consolidada, o que tende a reduzir a geração de finos em operações industriais, favorecer a transferência de calor e otimizar a reatividade em processos térmicos (Costa, 2017; Assis, 2016). Essas características são determinantes para o desempenho mecânico de compósitos poliméricos, sobretudo em aplicações estruturais de maior exigência (Delatorre, 2022).

A análise imediata revelou alto teor de carbono fixo (88,87%) e baixo teor de cinzas (0,23%). Valores nessa ordem corroboram a literatura que relaciona maior fração carbonácea a estabilidade térmica e resistência mecânica superiores (Mullani, 2020). O baixo teor de cinzas reforça a adequação do material como reforço, uma vez que impurezas minerais podem comprometer a uniformidade do compósito e a interação com a matriz polimérica.

As curvas TGA/DTG mostram que, após a perda inicial de umidade, o carvão vegetal apresenta elevada estabilidade térmica, atributo essencial para compósitos submetidos a temperaturas mais altas, preservando o desempenho sem degradação significativa (Boas, 2010; Protásio, 2017; Pereira, 2021).

A microestrutura observada por MEV evidencia uma rede porosa interconectada, com morfologia de poros bem definida. A análise BET quantificou alta área superficial específica, indicando mesoporosidade desenvolvida. Essa configuração favorece a adesão interfacial entre o carvão vegetal e a matriz polimérica, promovendo melhor desempenho mecânico do compósito (Ayrlmis, 2015).

Por fim, a difração de raios X (DRX) indica grafitação parcial e maior ordenação da fase carbonácea. Essa ordenação estrutural tende a elevar rigidez e resistência do compósito final

(Fernandes, 2020; Li, 2024), reforçando o potencial do carvão vegetal como bio-reforço eficiente em matrizes poliméricas de alto desempenho.

Conclusão

A pesquisa demonstra que o carvão vegetal de *Eucalyptus sp.* obtido a 800 °C reúne atributos que o qualificam como bio-carga para compósitos poliméricos com alto teor de carbono fixo, estabilidade térmica e microestrutura favorável. Esses resultados indicam potencial para desenvolver compósitos mais leves e sustentáveis, alinhados aos princípios da economia circular. Recomenda-se aprofundar estudos para otimizar a pirólise e avaliar as interações entre a bio-carga e a matriz polimérica, de modo a maximizar as propriedades mecânicas e funcionais dos compósitos.

Referências

- AYRILMIS, Nadir et al. Effect of wood-derived charcoal content on properties of wood plastic composites. *Materials Research*, v. 18, n. 3, p. 654-659, 2015.
- BOAS, M. A. V.; DE CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, p. 481–490, 2010.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional – BEN. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2019.
- DAS, O.; KIM, N. K.; HEDENQVIST, M. S.; LIN, R. J. T.; SARMAH, A. K.; BHATTACHARYYA, D. An attempt to find a suitable biomass for biochar-based polypropylene biocomposites, *Environ. Manage.*, v. 62, p. 403–413, 2018.
- DELATORRE, Fabíola Martins et al. A novel approach to charcoal fine waste: sustainable use as filling of polymeric matrices. *Polymers*, v. 14, n. 24, p. 5525, 2022.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; PIROLA, L. P.; TAKESHITA, S.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O.; ANDRADE, A. M. Higroscopicity of charcoal produced in different temperatures. *Cerne, Lavras*, v. 22, n. 4, p. 423-430, 2016.
- FERNANDES CHAVES, Bruno Caio et al. Impacto da temperatura de pirólise nas propriedades do biochar derivado da madeira de eucalipto. *Materials*, v. 13, n. 24, p. 5841, 2020.
- LI, Chao et al. Effect of fixed carbon on the interfacial compatibility of coal gangue/polyethylene composites was investigated using anthracite as a model compound. *Polymer Composites*, 2024.
- L.J. COSTA, P.F. Trugilho, J.T. Lima, R. Simetti, T.A. Bastos, Mechanic characterization of charcoal of *Corymbia clones* *Sci. For.*, 45 (2017), pp. 629-639.
- M.R. ASSIS, L. Brancheriau, A. Napoli, P.F. Trugilho Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review *Wood Sci. Technol.*, 50 (2016), pp. 519-536.
- MULLANI, N.; Ali, I.; Dongale, TD; Kim, GH; Choi, BJ; Basit, MA; Park, TJ Comportamento de comutação resistiva aprimorado de filme composto de nanotubos de carbono de paredes múltiplas/nanorods de TiO₂ por reservatório de vacância de oxigênio aumentado. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2020, 108, 104907.
- PEREIRA, A. K. S. Relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus spp.* Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Dissertação mestrado. 2021.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

PROTÁSIO, T. D. P.; JUNIOR, M. G.; MIRMEHDI, S.; TRUGILHO, F.; NAPOLI, A.; KNOVACK, K. M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. *Cerne*, v. 23, n. 1, p. 1–10, 2017.

SIQUEIRA, L. C. G. Estudo das emissões de compostos orgânicos persistentes (pops) tóxicos de formação não intencional provenientes da produção de carvão vegetal no estado de São Paulo. Universidade de São Paulo. Relatório de pós-doutorado. São Paulo. p. 1-184. 2015.

SUNDARAKANNAN, R.; ARUMUGAPRABU, V.; MANIKANDAN, V.; VIGNESHWARAN, S. Mechanical property analysis of biochar derived from cashew nut shell waste reinforced polymer matrix, *Mater. Res. Express*, v. 6, p. 125349, 2019.

RODRIGUES, Thaisa; BRAGHINI JUNIOR, Aldo. Technological prospecting in the production of charcoal: a patent study. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, v. 111, p. 170- 183, set. 2019.

ROUSSET, P.; PIRES, A.C.; SABLowski, A.; RODRIGUES, T. LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes. *Journal of Cleaner Production*, v.19, p.1647-1653, 2011.

YILDIZHAN, A.; ÇALIK, M.; ÖZCANLI, H. Serin, Bio-composite materials: a short review of recent trends, mechanical and chemical properties, and applications, *Eu. Mech. Sci.* 2. p. 83–91, 2018. DOI: 10.26701/ems.369005.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Análises Químicas e Caracterização de Materiais (LACMAT/CCAUE/UFES) pelo suporte técnico-científico, bem como ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV/UFES – Alegre) pelo apoio nas análises de microscopia eletrônica.