

Potencial energético de cavacos de madeira sob tratamento térmico de torrefação

Jhonatan Willian Moreira¹; Luiza Catarina Lobo de Godoi¹; Carlos Eduardo Barbosa da Silva¹; Arthur Pedro Alves Fernandes¹; Macksuel Fernandes da Silva¹; Carlos Roberto Sette Júnior¹

¹ Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia/GO, Brasil – jwm.forest@gmail.com

Resumo: A torrefação refere-se a um tratamento térmico suave conduzido à pressão atmosférica com uma temperatura entre 200 °C e 300 °C num determinado momento, num ambiente inerte ou com baixo teor de oxigênio. Cavacos de madeira de *A. mangium* foram submetidos ao processo de torrefação, utilizando-se temperaturas de 200 e 300 °C, com 30min e 60min de tempo de residência no forno. Na sequência, foi realizada a análise imediata e determinados o poder calorífico superior e teor de umidade. Foi observado um aumento do teor de carbono fixo, de cinzas e do poder calorífico com o aumento da temperatura e do tempo de residência. Houve um aumento de PCS em todos os tratamentos submetidos a torrefação. Os cavacos submetidos a torrefação com 300 °C a 60min de tempo de residência foram os que demonstraram as melhores características energéticas.

Palavras-chave: Biomassa, Chips, Energia renovável, Pré-tratamento.

Energy potential of forest residues under thermal roasting treatment

Abstract: Torrefaction refers to a gentle heat treatment conducted at atmospheric pressure with a temperature between 200 °C and 300 °C at a given time, in an inert or low-oxygen environment. *A. mangium* wood chips were subjected to the torrefaction process, using temperatures of 200 °C and 300 °C, with 30min and 60min of residence time in the oven. Immediate analysis was then carried out and the higher calorific value and moisture content were determined. An increase in fixed carbon, ash and calorific value was observed as the temperature and residence time increased. There was an increase in HHV in all the treatments subjected to torrefaction. The chips subjected to roasting at 300 °C and 60min residence time had the best energy characteristics.

Keywords: Biomass, Woodchip, Renewable energy, Pre-treatment.

1. INTRODUÇÃO

Como consequência do uso exacerbado de recursos fósseis, as altas emissões de CO₂ e outros gases tóxicos intensificam a poluição atmosférica que, por sua vez, gera sérias mudanças climáticas como o efeito estufa. Embora haja interesse mundial em implantar alternativas de baixo carbono, a maior parte da matriz energética

mundial – cerca de 80% – ainda é proveniente do carvão, petróleo e gás extraídos de combustíveis fósseis (HOSSAIN, 2023; COLPANI *et al.*, 2023).

A biomassa é a alternativa mais viável aos combustíveis fósseis devido à sua oferta abundante e capacidade de reposição (Dai *et al.*, 2019). Mais de 180 bilhões de toneladas de biomassa lignocelulósica são produzidas todos os anos, tornando-a uma matéria-prima potencialmente útil (Deng *et al.*, 2023). De acordo com o fator de conversão de matérias-primas, 1 kg de biomassa pode ser transformado em 6 MJ de energia (Deng *et al.*, 2023).

A torrefação refere-se a um tratamento térmico suave conduzido à pressão atmosférica com uma temperatura entre 200 °C e 300 °C num determinado momento, num ambiente inerte ou com baixo teor de oxigênio (Hidayat *et al.*, 2024). Após a torrefação, as propriedades da biomassa, ou seja, hidrofobicidade, rendimento energético, rendimento de massa, moagem, densidade energética, inflamabilidade e reatividade de gaseificação melhoraram significativamente (Niu *et al.*, 2019). Portanto, o objetivo do estudo é investigar os efeitos da torrefação na melhoria das características energéticas dos cavacos de *A. mangium* em diferentes temperaturas e tempos de residência no forno.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Torrefação

Cavacos de madeira de *A. mangium* foram dispostos dentro do forno mufla utilizando-se bandejas com quantidades iguais de cavacos (200 g). Os tratamentos utilizados consideraram variações na temperatura e tempo de residência, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Tratamentos de torrefação utilizados nos cavacos de *A. mangium*.

Tratamento	Temperatura (°C)	Tempo (Min)
T1	<i>in natura</i>	-
T2	200	30
T3	200	60
T4	300	30
T5	300	60

2.2 Caracterização dos cavacos de *A. mangium*

Para a análise imediata, composta pelo teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, foi utilizada parte da fração do material retida na peneira de 60 mesh que foi seca (0% de umidade). Os ensaios de teor de voláteis e teor de cinzas serão realizados com três repetições, utilizando cadinhos de porcelana previamente calcinados.

O teor de voláteis foi baseado na norma ASTM E872-82. Em cada cadinho e tampa de massas conhecidas, serão colocados aproximadamente 1,0 g de material, sendo levado para a mufla a 900 °C, permanecendo em seu interior durante três minutos com a porta da mufla aberta e nos próximos sete minutos com a porta fechada. Por fim o cadinho foi resfriado em dessecador por 30min e pesado em temperatura ambiente. O teor de voláteis foi calculado conforme a Equação 1.

$$MV = (M_i - M_f) / M_a * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

MV: Teor de materiais voláteis da biomassa (%);

M_i: Massa inicial do cadinho + amostra (g);

M_f: Massa final do cadinho + amostra (g);

M_a: massa da amostra (g).

O teor de cinzas foi realizado conforme a norma ASTM D1102-84. Assim como no teor de voláteis, aproximadamente 1,0 g de biomassa foi adicionada em cada cadinho, sem tampa. O cadinho com a biomassa foi inserido na mufla em 600 °C por cinco horas. Posteriormente, resfriado em dessecador e pesado em temperatura ambiente, sendo o cálculo do teor de cinzas calculado pela Equação 2.

$$CZ = (M_f - M_c) / M_a * 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

CZ: Teor de cinzas no carvão, em %;

M_f: Massa final do cadinho + amostra (g);

M_c: Massa do cadinho (g);

Ma: amostra inicial (g).

O teor de carbono fixo é uma medida indireta, dependente dos teores de materiais voláteis e teor de cinzas para sua determinação, obtido através da Equação 3.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

CF = Teor de carbono fixo (%);

CZ = Teor de cinzas (%);

MV = Teor de materiais voláteis (%).

O poder calorífico superior foi determinado por meio de uma bomba calorimétrica marca IKA WORKS, modelo C-200, conforme a Norma ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984). O teor de umidade foi obtido de acordo com a norma ABNT NBR 14929 (ABNT, 2003) determinado de acordo com a equação 7:

$$U = (M_i - M_f) / (M_f * 100) \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:

U: Teor de umidade (%);

M_i: Massa inicial (g);

M_f: Massa final (g).

Análise estatística

Na análise estatística dos resultados foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, sendo aferidos os “outliers”, distribuição dos dados e heterogeneidade da variância. Para as características dos cavacos *in natura*, serão obtidas as médias e calculado o coeficiente de variação. Nos demais resultados foi aplicada a análise de variância (ANOVA) através do software Sisvar, para verificar o efeito da condição do material (*in natura* e torrefado), a 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os maiores teores de carbono fixo foram observados nos tratamentos T6 e T5. Vale ressaltar que houve um aumento nos teores de carbono fixo com o aumento da temperatura e tempo de residência em todos os tratamentos. Além disso, foi observada uma queda nos teores de material volátil com o aumento da temperatura e do tempo de residência, com uma redução de aproximadamente 50 % em relação aos cavacos *in natura* (Tabela 2). Durante o processo de torrefação ocorrem alterações nos principais componentes da biomassa devido ao aumento da temperatura, afetando inicialmente a hemicelulose e, posteriormente, a celulose e a lignina (Romão e Conte, 2021).

Tabela 2. Teores de carbono fixo, cinzas e voláteis dos cavacos de madeira de *A. mangium* nos tratamentos.

Tratamento	Cinzas (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fixo (%)
T1	0,43 ± 0,09 d	85,66 ± 3,01 a	13,91 ± 2,90 e
T2	0,70 ± 0,09 c	75,21 ± 3,01 b	24,07 ± 2,90 d
T3	0,72 ± 0,09 c	62,41 ± 3,01 c	36,89 ± 2,90 c
T4	1,46 ± 0,09 a	48,83 ± 3,01 d	50,03 ± 2,90 b
T5	1,14 ± 0,09 b	44,36 ± 3,01 e	54,18 ± 2,90 a
P-valor (teste F)	<0,0001	<0,0001	<0,0001
CV (%)	10,69	0,87	1,51

T1- Cavaco *in natura*, T2- 200 °C 30 min, T3- 200 °C 60 min, T4- 300 °C 30 min e T5- 300 °C 60 min.

Em relação as cinzas, foi observado um comportamento diretamente proporcional, com o aumento da temperatura e tempo de residência. O teor de cinzas aumentou, chegando a 1,46 % no tratamento 6. A proporcionalidade direta entre a intensidade da torrefação e o teor de cinzas do combustível deve-se unicamente à concentração, pois quanto maior a temperatura de torrefação e maior o tempo de residência aplicado, maior a conversão do sólido em voláteis e menor sua fração sólida remanescente. Um alto teor de cinzas (>10 %) é indesejável, pois prejudica a transferência de calor em processos térmicos e causa corrosão em reatores,

aumentando assim a demanda por limpeza e outros tipos de manutenção (Colpani *et al.*, 2022).

Os maiores valores observados para o PCS, correspondem aos maiores valores de carbono fixo dos tratamentos em estudo. Não houve diferença significativa para os tratamentos para T2 e T3. O tratamento de torrefação mostrou-se eficaz no aumento do PCS, com incremento em todos os tratamentos. A torrefação proporcionou maiores valores de CF e de PCS em comparação com os cavacos *in natura*. Observou-se um aumento de 23,75% no PCS dos cavacos sob torrefação a 300 °C a 60 min no forno, em relação aos cavacos *in natura* (Tabela 3).

Tabela 3. Teor de umidade e poder calorífico superior dos cavacos de *A. mangium*.

Tratamento	U %	PCS (MJ.kg ⁻¹)
T1	32,03 ± 0,4 a	18,85 ± 0,1 d
T2	9,97 ± 0,4 b	19,87 ± 0,1 c
T3	4,93 ± 0,4 c	20,03 ± 0,1 c
T4	2,91 ± 0,4 e	22,73 ± 0,1 b
T5	2,32 ± 0,4 e	23,33 ± 0,1 a
P-valor (teste F)	<0,0001	<0,0001
CV (%)	5,92	0,64

T1- Cavaco *in natura*, T2- 200 °C 30 min, T3- 200 °C 60 min, T4- 300 °C 30 min e T5- 300 °C 60 min.

Houve uma redução do teor de umidade em todos os tratamentos, com o aumento da temperatura e do tempo de residência. A maior umidade foi observada nos cavacos *in natura*, como esperado. Esta redução pode mitigar os problemas de armazenamento, como a liberação de gases e o e o auto aquecimento e facilitar o armazenamento a longo prazo (Pah *et al.*, 2021). A maior redução foi observada no tratamento 6, com 92,75% na umidade em 300 °C a 60 min. Os menores teores de umidade observados se relacionam diretamente com os maiores PCS, o que pode estar relacionado pode à carbonização e desidratação em maiores temperaturas de torrefação e tempos de residência mais longos. Além disso, a biomassa processada termicamente tem mais carbono e menos oxigênio, aumentando assim seu PCS (Khairy *et al.*, 2023).

A remoção de umidade de materiais sólidos é economicamente desfavorável, pois envolve gasto de energia extra que é necessária para a secagem do precursor.

Assim, o baixo teor de umidade observado nas amostras de cavacos obtidos após a torrefação neste estudo é um fator favorável para a aplicação em larga escala desse material na produção de bioenergia (Yogalakshmi *et al.*, 2022).

4. CONCLUSÃO

A torrefação mostrou-se uma alternativa efetiva para a diminuição dos teores de umidade, aumento do poder calorífico superior e de carbono fixo. Os cavacos de madeira de *Acácia mangium* submetidos a torrefação com 300 °C a 60 min foram os que exibiram as melhores características energéticas, com menores teores de umidade, maior poder calorífico e teor de carbono fixo, aliado ao menor teor de cinzas. Por fim, estudos experimentais de torrefação com diferentes espécies florestais de uso energético ainda são necessários para explicar o seu comportamento termoquímico, de acordo com suas características físico-químicas.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Laboratório de Qualidade da Madeira e Bioenergia (LQMBio) da Universidade Federal de Goiás e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio.

6. REFERÊNCIAS

ABNT (1984) – Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, **NBR 8633**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14929**. Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. 2003.

ASTM **D1102 – 84** (2013), Standard Test Method for Ash in Wood, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM **E872-82** (2013), Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels, ASTM International, Philadelphia, 2013.

COLPANI, D.; SANTOS, V. O.; LIMA, V. M.; ARAÚJO, R. O.; TENÓRIO, J. A.; CHAAR, J. S.; DE SOUZA, L. K. Improving biomass fuel obtained from Brazil nut residues via

torrefaction: A case of kinetic and thermodynamic study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 176, p. 106238, 2023.

DAI, L.; WANG, Y.; LIU, Y.; RUAN, R.; HE, C.; DUAN, D.; ... WU, Q. Bridging the relationship between hydrothermal pretreatment and co-pyrolysis: Effect of hydrothermal pretreatment on aromatic production. **Energy Conversion and Management**, v. 180, p. 36-43, 2019.

DENG, W.; FENG, Y.; FU, J.; GUO, H.; GUO, Y.; HAN, B., ... & ZHOU, H. Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels. **Green Energy & Environment**, v. 8, n. 1, p. 10-114, 2023.

HOSSAIN, E. Energy Sources on Earth. In: **The Sun, Energy, and Climate Change**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 69-122.

HIDAYAT, W.; WIJAYA, B. A.; SAPUTRA, B.; RANI, I. T.; KIM, S.; LEE, S., ... & LUBIS, M. A. R. Torrefaction of bamboo pellets using a fixed counterflow multibaffle reactor for renewable energy applications. **Jurnal Sylva Lestari**, v. 10, n. 1, p. 169-188, 2024.

KHAIRY, M.; AMER, M.; IBRAHIM, M.; OOKAWARA, S.; SEKIGUCHI, H.; ELWARDANY, A. The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-22, 2023.

NIU, Y.; LIU, S.; SHADDIX, C. R. An intrinsic kinetics model to predict complex ash effects (ash film, dilution, and vaporization) on pulverized coal char burnout in air (O₂/N₂) and oxy-fuel (O₂/CO₂) atmospheres. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 37, n. 3, p. 2781-2790, 2019.

PAH, J. M.; SURYANEGARA, L.; HARYANTO, A.; HASANUDIN, U.; IRYANI, D. A.; WULANDARI, C.; ... HIDAYAT, W. Product characteristics from the torrefaction of bamboo pellets in oxidative atmosphere. In: International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019). **Atlantis Press**, 2021. p. 185-189.

ROMÃO, E. L.; CONTE, R. A. Energy gains of Eucalyptus by torrefaction process. Maderas. **Ciencia y tecnología**, v. 23, 2021.

YOGALAKSHMI, K. N. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. **Chemosphere**, v. 286, p. 131824, 2022.