



Estudo térmico e cinético de resíduos madeireiros da Amazônia como precursores na produção de bioenergia

Florência João Macamo^{1*}; Maria Fernanda da Silva Vieira²; Luiz Kleber Carvalho de Souza¹

¹Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Química, Laboratório de Pesquisas e Ensaio de Combustíveis, Av. Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 6200, Coroado I, 69080-900, Manaus AM, Brasil

²Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Engenharia e Ciências de Materiais, Laboratório de Pesquisas e Ensaio de Combustíveis, Av. Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 6200, Coroado I, 69080-900, Manaus AM, Brasil

* florenca.macamo@ufam.edu.br

Palavras-Chave: Resíduos madeireiros, cinética, conversão energética, bioenergia.

Introdução

O aproveitamento de resíduos madeireiros amazônicos representa uma alternativa sustentável para diversificar a matriz energética e reduzir impactos ambientais. A pirólise é um processo termoquímico capaz de converter biomassa lignocelulósica em produtos energéticos sólidos, líquidos e gasosos, dependendo das condições de reação. O estudo da degradação térmica e dos parâmetros cinéticos é essencial para compreender o comportamento das madeiras durante o aquecimento e avaliar sua aptidão para conversão em bioenergia. As madeiras amazônicas, reconhecidas por sua alta densidade e teor de lignina, apresentam estabilidade térmica superior e elevado potencial energético (Oliveira et al., 2023). Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento térmico e determinar os parâmetros cinéticos e termodinâmicos de resíduos de madeiras amazônicas por meio de análise termogravimétrica (TG/DTG) e do método isoconversional de Flynn–Wall–Ozawa (FWO).

Material e Métodos

As amostras de resíduos madeireiros amazônicos foram coletadas na região amazônica, secas em estufa a 105 °C por 24 h e posteriormente moídas e peneiradas para obtenção de granulometria de 40 mesh.

As análises termogravimétricas foram realizadas em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 50 mL/min, nas taxas de aquecimento de 10, 15 e 20 °C/min, até 900 °C. As curvas TG e DTG permitiram observar o comportamento térmico das amostras e identificar as faixas de degradação dos principais constituintes lignocelulósicos.

O cálculo da energia de ativação (E_a) foi realizado pelo método de Flynn–Wall–Ozawa, a partir das curvas de conversão (α) obtidas em diferentes taxas de aquecimento, utilizando 17 pontos de conversão entre 0,1 e 0,9. A partir dos valores de E_a e do fator pré-exponencial (A), determinaram-se os parâmetros termodinâmicos entalpia (ΔH), energia livre de Gibbs (ΔG) e entropia (ΔS), associados ao processo de pirólise (Tibola et al., 2023).

Resultados e Discussão

O perfil de degradação térmica (Figura 1) indicou três regiões principais: a primeira, entre 50 e 120 °C, relacionada à perda

de umidade; a segunda, entre 200 e 400 °C, correspondente à degradação das frações hemicelulósica e celulósica; e a terceira, acima de 400 °C, associada à decomposição da lignina e formação do resíduo carbonáceo. O pico máximo da curva DTG foi observado próximo de 350 °C, evidenciando o estágio predominante da decomposição da celulose.

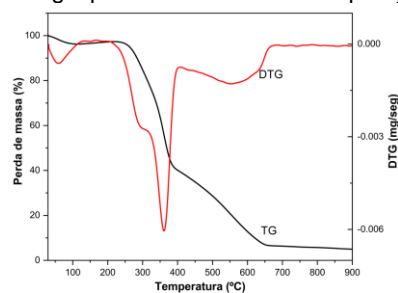


Figura 1. Perfil de degradação térmica das madeiras da Amazônia

A aplicação do modelo de Flynn–Wall–Ozawa resultou em valores de energia de ativação variando de 150 a 210 kJ/mol, com coeficientes de correlação (R^2) superiores a 0,98 em quase toda a faixa de conversão, indicando boa linearidade e confiabilidade dos dados Santos et al., (2022).

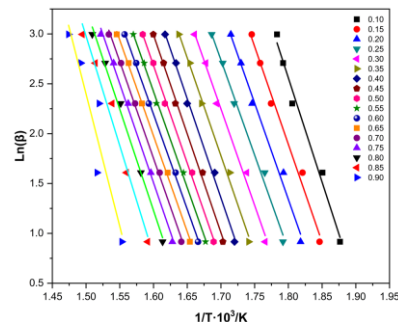


Figura 2. Determinação da energia de ativação pelo método de FWO

A energia média de ativação obtida foi de aproximadamente 159 kJ/mol (Tabela 1), valor compatível com o intervalo reportado na literatura para biomassa lignocelulósica densa, o que confirma a estabilidade térmica elevada das madeiras amazônicas. O aumento de E_a em níveis de conversão mais altos ($\alpha > 0,8$) sugere o predomínio de reações secundárias

associadas à decomposição da lignina e à formação de estruturas mais estáveis do biochar Colpani et al., 2023).

Tabela 1. Parâmetros cinéticos obtidos pelo modelo isoconversional de FWO

α	E_{α} (kJ/mol)	R^2	A (min ⁻¹)
0.10	165.05	0.98	1.25E+16
0.15	154.99	0.99	7.27E+14
0.20	152.50	0.99	1.64E+14
0.25	150.83	0.99	4.65E+13
0.30	152.96	0.99	3.51E+13
0.35	155.33	0.99	3.44E+13
0.40	157.28	0.99	3.08E+13
0.45	156.80	0.99	1.65E+13
0.50	154.60	0.99	7.01E+12
0.55	152.21	0.99	3.37E+12
0.60	150.49	0.99	2.02E+12
0.65	151.69	0.99	1.92E+12
0.70	153.33	0.99	2.60E+12
0.75	156.49	0.99	4.33E+12
0.80	160.28	0.99	3.76E+12
0.85	173.84	0.98	2.20E+13
0.90	209.99	0.85	2.74E+13
Média	159.33	0.98	8.01E+14

O fator pré-exponencial apresentou variação entre 10^{12} e 10^{16} min⁻¹, refletindo a complexidade reacional típica de materiais lignocelulósicos. A correlação entre E_{α} e A seguiu uma tendência de compensação cinética, característica de sistemas multicomponentes. A análise dos parâmetros termodinâmicos revelou valores médios de $\Delta H \approx 150$ kJ/mol, $\Delta G \approx 170$ kJ/mol e $\Delta S \approx -37$ J/mol·K, indicando que o processo de pirólise ocorre de forma endotérmica e não espontânea, exigindo aporte energético externo. O valor negativo de entropia sugere que a formação do estado de transição é mais ordenada que o estado inicial, coerente com a quebra controlada das ligações poliméricas dos constituintes da madeira (Santos et al., 2022).

Os mecanismos de conversão (Figura 3) indicam predominância de reações de despolimerização e rearranjo molecular, características da decomposição de celulose e lignina (Sahoo, Kumar, & Mohanty, 2021). De modo geral, os resultados apontam que os resíduos madeireiros amazônicos apresentam comportamento térmico adequado para processos de pirólise e potencial promissor para a produção de biocombustíveis sólidos e gaseificados.

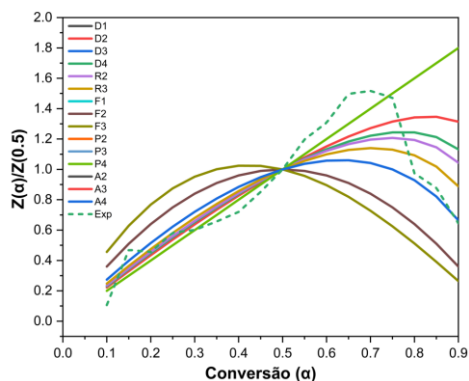


Figura 3. Mecanismos das reações de conversão das madeiras

Conclusões

O estudo térmico e cinético dos resíduos madeireiros da Amazônia mostrou que essas biomassas apresentam elevada estabilidade térmica e comportamento de degradação característico de materiais lignocelulósicos densos. A energia média de ativação de 159 kJ/mol e o perfil termodinâmico obtido indicam que o material requer energia moderada para iniciar sua decomposição, sendo adequado para processos termoquímicos de conversão, como a pirólise lenta ou torrefação. Dessa forma, os resíduos madeireiros amazônicos configuram-se como precursores tecnicamente viáveis para a produção de bioenergia e o desenvolvimento de biocombustíveis sólidos na região.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro. À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), ao Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ/UFAM) e ao Laboratório de Pesquisa em Energia e Catálise (LAPEC) pelo apoio técnico, científico e institucional concedido para a realização desta pesquisa.

Referências

- [1] Colpani, D., Santos, V. O., Lima, V. M. R., Araújo, R. O., Tenório, J. A. S., Chaar, J. S., & de Souza, L. K. C. (2023). Improving biomass fuel obtained from Brazil nut residues via torrefaction: A case of kinetic and thermodynamic study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106238>
- [2] Oliveira, P. R. S., Setter, C., Sousa, N. G., Cardoso, C. R., Trugilho, P. F., & Oliveira, T. J. P. (2023). Kinetic and thermodynamic analysis of açai seeds and insights into bio-oil optimization and composition. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(23), 13427–13439. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12645-9>
- [3] Sahoo, A., Kumar, S., & Mohanty, K. (2021). Kinetic and thermodynamic analysis of Putranjiva roxburghii (putranjiva) and Cassia fistula (amaltas) non-edible oilseeds using thermogravimetric analyzer. *Renewable Energy*, 165, 261–277. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.011>
- [4] Santos, V. O., Araujo, R. O., Ribeiro, F. C. P., Colpani, D., Lima, V. M. R., Tenório, J. A. S., Coleti, J., Falcão, N. P. S., Chaar, J. S., & de Souza, L. K. C. (2022). Analysis of thermal degradation of peach palm (Bactris gasipaes Kunth) seed using isoconversional models. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 135(1), 367–387. <https://doi.org/10.1007/s11144-021-02140-3>
- [5] Tibola, F. L., de Oliveira, T. J. P., Ataíde, C. H., Cerqueira, D. A., Sousa, N. G., & Cardoso, C. R. (2023). Temperature-programmed pyrolysis of sunflower seed husks: application of reaction models for the kinetic and thermodynamic calculation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(15), 13841–13858. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02297-w>