

## Estudo cinético e efeito catalítico do óxido de cálcio na co-pirólise de resíduos urbanos

Lucas M. Vieira<sup>1</sup>, Grazielle E. S. Santos<sup>1</sup>, Karen A. Resende<sup>1</sup>, Carla E. Hori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Minas Gerais, [cehori@ufu.br](mailto:cehori@ufu.br)\*

### Resumo/Abstract

**RESUMO** - O presente estudo investigou a co-pirólise catalítica de resíduos urbanos abundantes em Uberlândia-MG, especificamente o lodo de esgoto e o resíduo florestal, com o objetivo de mitigar os impactos ambientais quanto ao descarte inadequado. Utilizou-se óxido de cálcio como catalisador, devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e eficácia na intensificação do processo pirolítico. Foram realizadas análise termogravimétrica, o estudo cinético e a pirólise analítica para compreender a decomposição térmica das biomassas, determinar a energia de ativação aparente e avaliar o desempenho catalítico do CaO. Os resultados mostraram que o uso do catalisador reduziu em média 30% a energia de ativação, evidenciando sua contribuição para a eficiência do processo. A pirólise analítica a 550 °C indicou que o CaO favoreceu a conversão completa dos ácidos carboxílicos e aumentou o rendimento de hidrocarbonetos para 43% em relação à co-pirólise não-catalítica.

*Palavras-chave:* lodo de esgoto, serragem, catalisador, CaO.

**ABSTRACT** - This study investigated the catalytic co-pyrolysis of urban residues abundant in Uberlândia-MG, specifically sewage sludge and forest residue, aiming to mitigate the environmental impacts associated with improper waste disposal. Calcium oxide was used as a catalyst due to its low cost, wide availability, and effectiveness in enhancing the pyrolysis process. Thermogravimetric analysis, kinetic studies, and analytical pyrolysis were performed to understand the biomass thermal decomposition, determine the apparent activation energy, and evaluate the catalytic performance of CaO. The results showed that the catalyst use reduced the activation energy by an average of 30%, highlighting its contribution to process efficiency. Analytical pyrolysis at 550 °C indicated that CaO promoted the complete conversion of carboxylic acids and increased the hydrocarbon yield to 43% compared to non-catalytic co-pyrolysis.

*Keywords:* sewage sludge, sawdust, catalyst, CaO.

### Introdução

A biomassa que é uma fonte renovável recebe destaque devido à sua ampla disponibilidade e ao potencial de suprir a crescente demanda energética. Nesse cenário, a utilização de resíduos florestais, agrícolas e urbanos como alternativa aos combustíveis fósseis ganha relevância. Entre os resíduos urbanos, destacam-se os provenientes da indústria madeireira e o lodo de esgoto, ambos com boas propriedades energéticas e aptos à conversão termoquímica (1-2).

A pirólise é uma tecnologia eficiente para a conversão de biomassas, permitindo a recuperação de energia em diferentes formas (gasosa, líquida e sólida) e a redução do volume de resíduos. A co-pirólise, em especial, se mostra uma estratégia promissora para aumentar o rendimento e a qualidade dos produtos (3). A aplicação dessa técnica a resíduos urbanos como o lodo de esgoto e resíduos florestais representa uma solução viável tanto do ponto de vista energético quanto ambiental (1-2).

Nesse processo, o uso de catalisadores tem papel fundamental na melhoria da eficiência e da qualidade dos produtos obtidos (4). O óxido de cálcio destaca-se entre os catalisadores por ser barato, abundante e eficaz (3-5). Além de intensificar o processo pirolítico, o CaO contribui para a

desoxigenação do bio-óleo e redução de compostos indesejáveis, como ácidos graxos, o que resulta em produtos de maior valor agregado. Ele também apresenta potencial de capturar parte do CO<sub>2</sub> gerado, favorecendo a composição dos vapores produzidos (3-4).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo investigar a co-pirólise catalítica de resíduos urbanos disponíveis no município de Uberlândia-MG, tendo como foco o lodo de esgoto, a serragem residual da indústria madeireira e o CaO como catalisador. O trabalho inclui o estudo cinético e testes de pirólise analítica para avaliar o desempenho do catalisador e a qualidade dos produtos gerados.

### Experimental

#### *Biomassas e Catalisador*

O lodo de esgoto (LE) da ETE Uberabinha foi seco de 79% para 1% de umidade e triturado até um diâmetro médio de Sauter (D<sub>s</sub>) de 4,23 mm. A serragem residual (SR), da Deckor Madeiras composta, principalmente, por *Dipteryx odorata*, *Lecythis lurida* e *Handroanthus spp.*, continha 5% de umidade e D<sub>s</sub> de 5,81 mm. O óxido de cálcio (CaO), com 97% de pureza (Dinâmica Química), apresentou traços de Ca(OH)<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub>, conforme análises de ATG, FRX e DRX.

### Estudo Cinético e Pirólise Analítica

A análise termogravimétrica (ATG-DTG) foi conduzida para a mistura das biomassas na proporção 3:1 (LE-SR) e com a adição de CaO na razão 1:1 biomassas-catalisador (LE-SR-Ca). O estudo cinético da co-pirólise foi conduzido com diferentes taxas de aquecimento (5, 10 e 15 °C/min) e os parâmetros cinéticos foram estimados pelo método isoconversional de Flynn-Wall-Ozawa (FWO) (4-6). Para avaliar os efeitos catalíticos, testes de pirólise analítica a 550 °C foram realizados em um pirolisador acoplado ao GC-MS. Os vapores gerados foram analisados e identificados de acordo com a biblioteca NIST 11 para determinar o rendimento relativo dos produtos.

### Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta o processo de decomposição térmica das amostras LE-SR e LE-SR-Ca, dividido em seis estágios (E1-E6), sendo três comuns entre as duas amostras (2-6) e três específicos do CaO (5). As etapas compreendem: perda de umidade (E1), decomposição de compostos voláteis (E2), carbonização (E3), decomposição do Ca(OH)<sub>2</sub> (E4), captura de CO<sub>2</sub> (E5) e decomposição do CaCO<sub>3</sub> (E6). Além disso, a amostra LE-SR-Ca apresentou maior perda mássica total (83%) do que a LE-SR (71%), o que evidencia o papel do catalisador na intensificação da decomposição térmica.

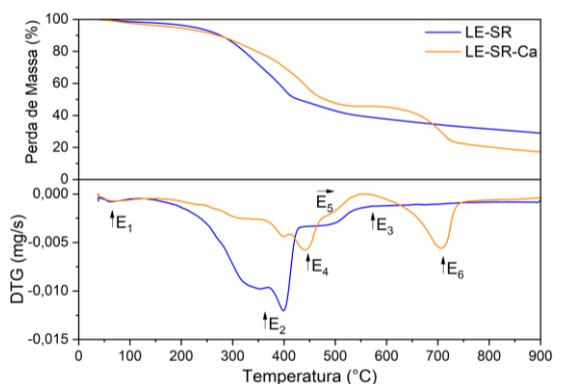


Figura 1. Curvas ATG e DTG para LE-SR e LE-SR-Ca.

O estudo cinético foi realizado para avaliar o efeito do CaO na co-pirólise, utilizando o modelo FWO, que apresentou bom ajuste aos dados ( $R^2 > 0,98$ ). A presença do catalisador reduziu a energia de ativação ( $E_a$ ) em média 30%, com valores entre 115,77 a 178,19 kJ·mol<sup>-1</sup>, em comparação aos 149,91 a 243,99 kJ·mol<sup>-1</sup> do processo não-catalítico. A elevação da  $E_a$  ao longo da conversão reflete a complexidade composicional dos materiais e das reações envolvidas, indicando que o CaO contribuiu para tornar o processo mais energeticamente eficiente (4-6).

A distribuição dos produtos da pirólise analítica, mostrada na Figura 2, revelou que LE-SR reduziu a presença de compostos nitrogenados e aumentou levemente a quantidade de hidrocarbonetos em relação às biomassas

puras (efeito sinérgico). No entanto, houve alta produção de ácidos carboxílicos (50%), associada à decomposição de lipídeos e proteínas presentes no lodo (1). Esses dados destacam a necessidade da utilização de catalisadores básicos, como o CaO, para reduzir a acidez do bio-óleo gerado na pirólise convencional (3-4).

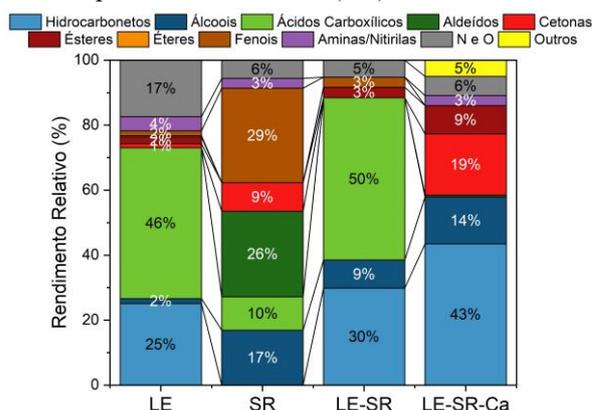


Figura 2. Pirólise e co-pirólise catalítica das biomassas a 550 °C.

Com o uso do CaO, a co-pirólise catalítica demonstrou melhorias significativas na composição dos produtos. O teor de hidrocarbonetos aumentou de 30% para 43%, os compostos oxigenados foram reduzidos de 65% para 43% e os ácidos carboxílicos foram completamente eliminados, o que demonstra a capacidade de desoxigenação do catalisador (1). Assim, o CaO favoreceu a conversão de intermediários pirolíticos em álcoois, cetonas e ésteres, com destaque para a formação de cetonas (5).

### Conclusões

Os perfis de ATG e DTG permitiram identificar as faixas de decomposição térmica das biomassas e do CaO. A amostra LE-SR-Ca apresentou maior perda mássica que LE-SR, o que indica melhora no processo de decomposição. O uso do CaO reduziu em média 30% a energia de ativação, aumentou o rendimento de hidrocarbonetos para 43% e eliminou a produção de ácidos carboxílicos da co-pirólise. Esses resultados reforçam o potencial do CaO como catalisador na pirólise, contribuindo para a obtenção de um bio-óleo de melhor qualidade e menor acidez.

### Agradecimentos

A CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

### Referências

1. C. Wang et al., *Fuel*. **2025**, 380, 133213.
2. L. Taboada-Ruiz et al., *Env. Res.* **2024**, 249, 118388.
3. Y. Wu et al., *Energy*. **2025**, 314, 134182.
4. W. Zhang et al., *C. J. of Chem. Eng.* **2025**, 80, 303-314.
5. X. Pan et al., *Ren. Energy*. **2023**, 215, 118946.
6. C. C. Oliveira et al., *E. Conv. and Manag.* **2025**, 327, 119582.