

# Preparo, caracterização e avaliação de pellets de minério de ferro com biomassa

Palavras-Chave: Biorrefinaria, Biomassa, Reciclagem

Autores/as:

Bruno Amaral Sudré, FEQ – UNICAMP

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Telma Teixeira Franco, FEQ – UNICAMP

MSc. Éricles Vale Nascimento

## INTRODUÇÃO:

A diversidade energética é um tópico de grande debate na atualidade uma vez que o aumento populacional demanda por um aumento da oferta de energia. Este crescimento ocorre alinhado à Revolução 4.0 e à busca por processos industriais mais sustentáveis. Nesse cenário, surgem iniciativas como o *green ironmaking*, que propõem rotas limpas e tecnológicas para a produção de ferro (Kim et al., 2014; Guo et al., 2015, 2017).

Uma das propostas é inserir carbono vegetal na formulação de pellets de ferro. Este carbono vai atuar como redutor direto do minério e pode ser oriundo de biochar ou do bio-óleo. A decomposição dos voláteis presentes na biomassa aumenta a permeabilidade interna do pellet, favorecendo a difusão dos gases redutores. Guo et al. (2015, 2017), alinhando-se ao contexto produtivo nacional.

O bio-óleo possui diversas possibilidades para sua produção, sendo uma de suas principais a sua obtenção por meio de um processo denominado como pirólise. Ele se

baseia na utilização de um substrato, no caso um componente composto por biomassa, para uma decomposição térmica, a qual ocorre na ausência de um agente oxidante. Esse processo também produz outras substâncias de interesse, como o biochar e diversos gases (Varma e Mondal, 2017; Toscano Miranda et al., 2021).

Dessa forma, o presente estudo busca avaliar a viabilidade da utilização do bio-óleo e o biochar obtidos a partir da pirólise do bagaço da cana para aumentar a taxa de redução do minério de ferro.

## METODOLOGIA:

O bagaço de cana foi adquirido de uma usina sucroalcooleira da região de Campinas. O minério de ferro, a hematita, também foi adquirido de uma empresa local (METALTEC®).

Antes de ser pirolizado, o bagaço de cana foi homogeneizado em moinho de martelos CARVOMILL 300 (10 CV trifásico) até apresentar partículas com tamanho menor que 3350  $\mu\text{m}$ , sendo feita a análise da distribuição granulométrica para confirmar tais valores. Após

homogeneizado, o bagaço foi pirolisado em reator de bancada de leito fixo, modus operandi batelada, sob taxa de aquecimento de cerca de 10°C/min, até 400°C, 500°C e 600°C, temperaturas na qual permaneceu durante 0, 15 e 30 minutos. Para produzir o pellet compósito, usou-se apenas os produtos gerados a 500°C durante 15 minutos. O produto de pirólise foi condensado em trocador de calor casco-e-tubo por uma corrente de água a 20°C, gerando o biotar, que foi coletado em erlenmeyer, a fase gasosa, que foi eliminada, e o carvão de pirólise, o resíduo sólido dentro do reator.

A análise imediata do carvão de pirólise foi feita no Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC) da UNICAMP em Analisador Termogravimétrico da marca Navas Instruments, model TGA-1000, seguindo a ABNT/NBR 8112/86.

Foram preparados dois tipos de pellets. O primeiro deles vai ser constituído do minério de ferro desidratado (aquecimento em forno mufla a 500°C durante 1h) e infiltrado com biotar. A infiltração vai ser feita por meio do aquecimento do minério de ferro já desidratado junto ao biotar produzido a 500°C durante 1 hora. Esse procedimento é adaptado em alguns trabalhos na literatura (HATA et al., 2009; HOSOKAI et al., 2012).

O segundo tipo de pellet vai ser compósito do minério com o carvão. Após a moagem de ambos até tamanho menor que 0,074 mm, os materiais serão misturados mecanicamente seguindo uma razão molar C/Fe estequiométrica à redução (igual a 1,50). Será adicionado 10% (m/m) de bio-óleo como ligante de estrutura.

Ambos os tipos de pellet serão densificados sob pressão de 50 kgf/cm<sup>2</sup> durante 5 minutos e terão formato cilíndrico (LxD = 1,0 cm x 0,5 cm). Após a densificação, apenas os pellets compósitos com carvão serão aquecidos em forno mufla a 105°C/24 h para remoção de umidade e depois sinterizados a 900°C durante 30 minutos.

A análise de DRX serão feitas no LRAC/UNICAMP em equipamento da marca Philips Analytical X Ray, modelo XPert-MPD com radiação  $\alpha$ Cu e  $\lambda=1,5418$  Å.

Os testes de redução serão realizados em aparato experimental semelhante ao empregado nos trabalhos de Guo et al (2015) e Guo et al (2017). Ele vai ser construído no LEPAC e no Laboratório de Engenharia Bioquímica, Biorrefino e Produtos de Origem Renovável (LEBBPOR), ambos na Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

Após carregado com os pellets, o forno elétrico vai ser purgado com N<sub>2</sub> em fluxo entre 6 e 10 cm/s ao mesmo tempo que será aquecido até a temperatura de redução (1000°C). Quando atingir esta temperatura, o fluxo de inerte será mantido por mais 15 minutos. Em seguida, ele vai ser desligado e a válvula vai permitir a entrada do syngas artificial no mesmo fluxo de inerte. Após 5, 10, 15 e 20 minutos de redução, o syngas artificial vai ser desligado e o fluxo de inerte voltará a passar pelo forno até o resfriamento completo dos pellets. Assim, evita-se a reoxidação do metal.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir da análise da distribuição granulométrica do bagaço da cana, foi possível

compreender que o material utilizado se encontrava no tamanho adequado de acordo com as referências para proceder com o experimento, com uma média de tamanho aproximado de 0,513 mm de diâmetro.

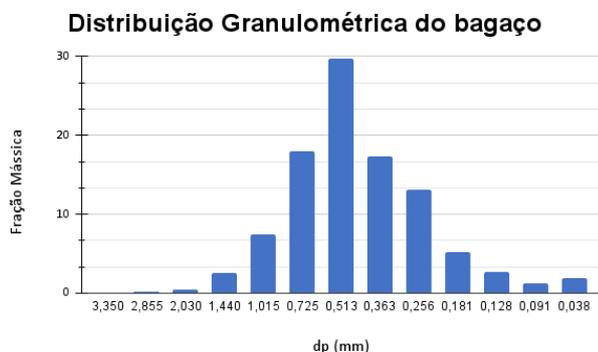


Figura 1 – Distribuição granulométrica do bagaço da cana de açúcar

Foi analisado também o modelo que melhor descrevia a distribuição granulométrica encontrada, sendo por meio de parâmetros estatísticos como  $R^2$ , que foi possível de ser encontrado utilizando a forma linearizada desses modelos, foi inferido que o melhor modelo nesse caso seria o Rosin – Rammler-Bennet (RRB), utilizando como base a ferramenta SciDavis para produzir essa análise.

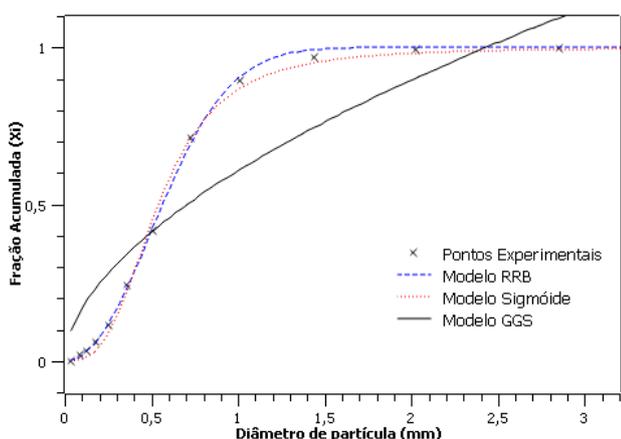


Figura 2 – Modelos de distribuição granulométrica do bagaço da cana de açúcar

	GGs	RRB	Sigmoide
$R^2$	0,9362	0,9997	0,9992
$\text{Chi}^2$	0,3496	0,0019	0,0046
$k(\text{mm})$	2,4307	-	0,5418
$m$	0,5632	-	3,0309
$D'(\text{mm})$	-	0,6725	-
$n$	-	2,1110	-

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos de distribuição granulométrica do bagaço da cana de açúcar

A biomassa apresenta 7,7%, 2,6%, 14,2% e 83,2% de umidade, cinzas, carbono fixo e voláteis, respectivamente, como composição imediata, e 43,32%, 7,00%, 0,51%, 0,11% e 46,46% de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio como composição elementar. Ambas as medições foram feitas em base seca, determinadas conforme as normas ASTM D4239 e ASTM D1762 – 84, respectivamente.

Dispondo dos resultados dos testes de pirólise (rendimento *versus* tempo de processo e temperatura), pode-se determinar os parâmetros cinéticos do processo (Tabela 2), considerando que o mesmo segue a cinética descrita por Stremel & Cordeiro (2023). A Figura 4 apresenta o caso a 500°C e 30 min.

	$A_i \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$E_a \text{ (kJ/mol)}$
<b>R1</b>	$1,16 \times 10^4 - 1,3 \times 10^8$	120 – 140
<b>R2</b>	$1 \times 10^6 - 2 \times 10^8$	110 – 135
<b>R3</b>	$3,6 \times 10^5 - 1,1 \times 10^7$	106,5 – 130
<b>R4</b>	$3 \times 10^4 - 1,5 \times 10^6$	110 - 144

Tabela 2 – Parâmetros cinéticos da pirólise do bagaço de cana.

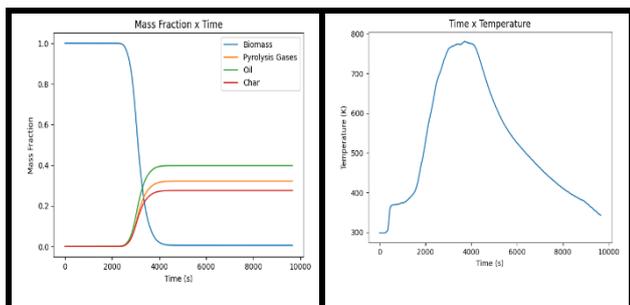


Figura 3 – Perfis de temperatura e de frações dos produtos de pirólise no experimento realizado a 500°C e 15 minutos.

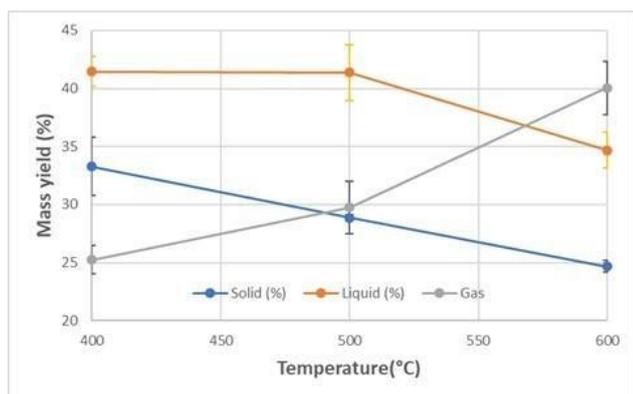


Figura 4 – Rendimentos em relação as temperaturas de pirólise

O aumento da temperatura provoca aumento no rendimento dos gases, diminuição no rendimento do carvão e um máximo rendimento para o bio-óleo em temperatura intermediária. De fato, o aumento da temperatura favorece reações de decomposição da matriz sólida e da matéria volátil, gerando produtos fluidos. Em temperaturas ainda maiores, o bio-óleo começa a sofrer reações de decomposição secundárias, sendo decomposto em frações sólidas ou gasosas. O aumento da temperatura pode levar, ainda, a processos de recombinação e repolimerização dos produtos primários, conforme reportado pela literatura (KIM et al., 2014; VARMA & MONDAL, 2017; TOSCANO MIRANDA et al., 2021). Contudo, como a decomposição dos sólidos continua, percebe-se apenas uma diminuição em seu rendimento,

Os experimentos que conseguiram manter a melhor média de rendimento de bio-óleo enquanto produziam a menor quantidade de sólidos, os quais são difíceis de serem tratados, com também o menor erro percentual foram os experimentos 12, 13 e 14, os quais foram realizados mantendo a temperatura máxima em 500°C por 15 minutos, podendo então ser considerado as condições ótimas considerando a composição e as propriedades físicas do substrato em questão.

O DRX do minério de ferro (Figura 5) confirma a presença de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como fase principal (ICSD nº 7797) e apresenta picos secundários referentes ao  $\text{CaCO}_3$  (ICSD nº 252901) e  $\text{SiO}_2$  (ICSD nº 127419).

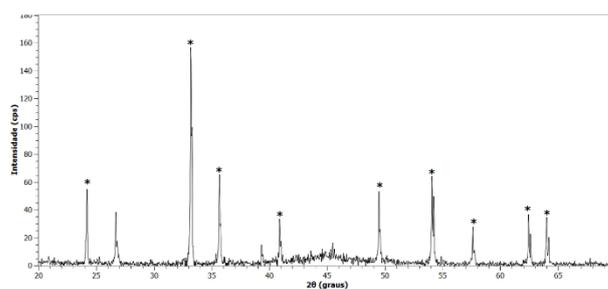


Figura 5 - Difratoograma de raios-X (DRX) da hematita. (\*):  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

A linha de gases do sistema de redução ainda está sendo montada. Alguns reagentes para determinação do percentual de redução ainda estão sendo adquiridos. Até o momento, foram realizadas simulações sobre o processo aplicando *Machine Learning* (Nascimento et al., 2025), os primeiros desta natureza aplicados a esta linha de pesquisa, e um teste preliminar com o pellet em estudo e um pellet apenas de minério de ferro (Figura 6) na temperatura e tempo planejados. A presença do carbono deixou a estrutura quebradiça, indicando que a

saída de voláteis, de fato, ocorre e aumenta a porosidade do pellet.

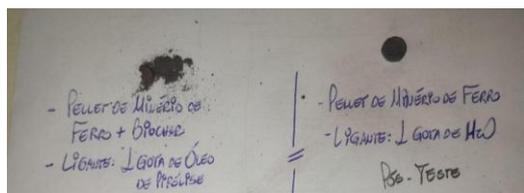


Figura 6- Pellets de ferro compósito com biochar e bio-óleo (esq.) e apenas de ferro (dir.) após teste de redução.

## CONCLUSÕES:

A biomassa apresenta tamanho de partícula e composição imediata propícias a obtenção de bio-óleo por pirólise. Os testes de pirólise geraram rendimentos de produtos de acordo com a literatura. Através do código produzido, foi possível obter os parâmetros cinéticos da pirólise.

O minério de ferro adquirido apresenta-se na forma básica necessária aos testes de redução. As referências bibliográficas indicam a que o carvão de pirólise deve funcionar para auxiliar na redução do minério de ferro quando for realizado no laboratório.

## BIBLIOGRAFIA

- HATA, T.; SAKANOU, H.; OGAWA, Y.; MAEDA, T. *Utilization of biomass tar and char for iron ore sintering*. ISIJ International, Tóquio, v. 49, n. 12, p. 1817–1825, 2009.
- HOSOKAI, S.; KASAI, E.; ITO, Y.; MORITA, K.; TATSUMI, K. *Reduction behavior of iron ore composite with biomass char*. ISIJ International, Tóquio, v. 52, n. 6, p. 1053–1059, 2012.
- GUO, X.; ZHANG, Y.; GAO, L.; ZHANG, W. *Reduction of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using biomass-derived syngas*. Fuel, Amsterdam, v. 144, p. 662–667, 2015.

GUO, X.; ZHANG, Y.; GAO, L.; ZHANG, W. *Reduction kinetics of iron oxide by biomass-based syngas in a fixed-bed reactor*. Renewable Energy, Amsterdam, v. 101, p. 1091–1098, 2017.

KIM, J.; OH, S.; HWANG, H.; MOON, Y.; CHOI, J. W. *Assessment of miscanthus biomass (Miscanthus sacchariflorus) for conversion and utilization of bio-oil by fluidized bed type fast pyrolysis*. Energy, Amsterdam, v. 76, p. 284–291, 2014.

NASCIMENTO, É. V.; FRANCO, T. T.; VALENÇA, G. P. Machine learning applied in the reduction simulation of the iron ore pellets composite with renewable carbon. In: 25 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2025, Belo Horizonte. Submetido e Aprovado. Data do evento: out. 2025.

TOSCANO MIRANDA, N. et al. *Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties*. Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier Ltd, , 1 out. 2021.

VARNA, A. K.; MONDAL, P. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization products. *Industrial Crops and Products*. v. 95, p. 704-717, 2017.

STREMEL, D. P.; CORDEIRO, L. A. Modeling and optimization of the kinetics of the pyrolysis process of forest biomass. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*. V. 16, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n1e10005>.