



Análise de alternativas mais limpas de combustíveis sólidos e gasosos para máquinas de sinterização de minério de ferro compactas aplicando uma modelagem matemática multifásica

José Adilson de Castro¹; Elizabeth Mendes de Oliveira²; Giulio Antunes de Medeiros¹; Erik Nascimento de Carvalho¹.

¹Universidade Federal Fluminense, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica; ²CEFET Campus Angra dos Reis.

Palavras-chave: *modelagem; processo de sinterização mais limpo; resíduos sólidos; biomassa, hidrogênio.*

INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica tem enfrentado desafios em matéria-prima, combustíveis e, consequentemente, restrições econômicas e ambientais¹. Este trabalho tem como foco a busca de alternativas baseadas em biomassa e combustíveis gasosos adequados para substituir o combustível fóssil coque². Novos conceitos e tecnologias para esse processo têm sido propostos, como reciclagem de gás, injeção de gás combustível e combustíveis de biomassa, além de reciclar resíduos sólidos em substituição a matérias-primas naturais. No entanto, testar essas tecnologias é caro. Portanto, modelos matemáticos abrangentes baseados em fenômenos de transporte são ferramentas essenciais para estudar e indicar novas possibilidades para projetar condições operacionais, bem como redimensionar as máquinas para minimizar as emissões.

Neste estudo são avaliadas propostas para utilização de gases oriundos do processo, utilização de biomassa sólida e hidrogênio em substituição parcial ao coque. Os resultados indicaram que cerca de 20% dos combustíveis fósseis sólidos poderiam ser substituídos por resíduos sólidos de biomassa (processados como pequenas pelotas) gerados durante a produção e manuseio do carvão vegetal e processamento de madeira, ou ainda pela injeção de gases combustíveis como o de coqueria, de alto-forno e hidrogênio¹⁻³.

METODOLOGIA

Neste trabalho é apresentado um modelo matemático baseado em um conjunto de equações diferenciais parciais representando a conservação de quantidade de movimento, energia e espécies químicas para as fases gasosa, sólida (mistura de matéria-prima e líquido solidificado) e fundidas para simular as características do leito interno. O domínio é restrito ao volume de controle do leito em movimento com o gás passando transversalmente pelo mesmo. O conjunto de equações diferenciais, Eq. (1) - (4), são resolvidos usando as condições de contorno que representam o processo de sucção de gás e entrada de sólidos, bem como, as perdas de calor para o ambiente por processos de convecção e radiação. Relações adicionais que representam o momento interfásico e a transferência de energia são apresentadas nas Eq. (5) e (6) enquanto as Eq. (7) e (8) representam os efeitos das propriedades de amolecimento e fusão das matérias-primas, que afetam fortemente a permeabilidade do leito, calor e transferência de massa.

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon_i u_{i,j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i \epsilon_i u_{i,k} u_{i,j})}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_{i,j}}{\partial x_k} \right) - \frac{\partial P_i}{\partial x_j} - F_j^{i-l} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i \epsilon_i u_{i,k})}{\partial x_k} = \sum_{m=1}^{N_{reacts}} M_n r_m \quad \text{Equação (2)}$$

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon_i H_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i \epsilon_i u_{i,k} H_i)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{k_i}{c_{p,i}} \frac{\partial H_i}{\partial x_k} \right) + E^{i-l} + \sum_{m=1}^{N_{reacts}} \Delta H_m r_m \quad \text{Equação (3)}$$

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon_i \phi_n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i \epsilon_i u_{i,k} \phi_n)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(D_n^{eff} \frac{\partial \phi_n}{\partial x_k} \right) + \sum_{m=1}^{N_{reacts}} M_n r_m \quad (4)$$

$$F_j^{g-s} = \left[1, 75 \rho_g + \frac{150 \mu_g}{|u_{g,j} - u_{s,j}|} \left(\frac{\epsilon_s}{d_s \phi_s} \right) \right] \left(\frac{\epsilon_s}{(1 - \epsilon_s)^3 d_s \phi_s} \right) |u_{g,j} - u_{s,j}| (u_{g,j} - u_{s,j}) \quad \text{Equação (5)}$$

$$E^{g-s} = \frac{6 \epsilon_s}{d_s \phi_s} \frac{k_g}{d_s \phi_s} \left[2 + 0, 39 \left(\frac{\rho |U|}{\mu_g} (d_s \phi_s) \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu_g c_{p,g}}{k_g} \right)^{\frac{1}{3}} \right] (T_g - T_s) \quad \text{Equação (6)}$$

$$\epsilon_s = 1 - (0, 403 [100 d_s]^{0,14} \left(1 - \text{MAX} \left(0, \text{MIN} \left(1, \left(\frac{T_s - T_m}{\Delta T_m} \right) \right) \right) \right) \frac{S_m}{100} \quad \text{Equação (7)}$$

$$\epsilon_g = 1 - \epsilon_s \quad \text{Equação (8)}$$

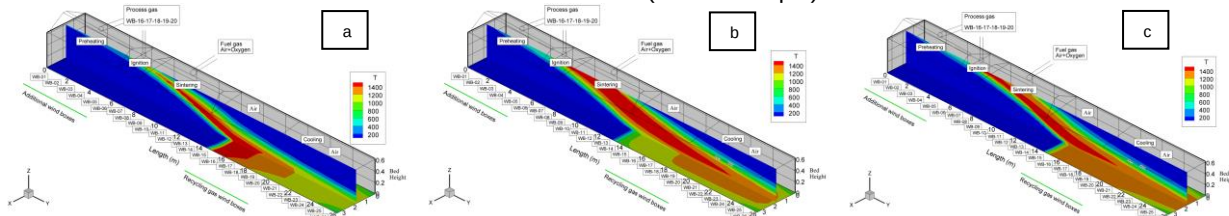


As propriedades termofísicas de cada fase, condutividade térmica (k), capacidade térmica (C_p), viscosidade (μ) e massa específica (ρ) dependem da composição e da temperatura. Os símbolos ϵ_g e ϵ_s representam as frações individuais de volume sólido e gasoso, enquanto d_s é o diâmetro de uma única partícula, S_m é o fator de fusão e contração e T_m é a temperatura inicial de amolecimento e fusão. Esses parâmetros são obtidos usando experimentos padrão de amolecimento e fusão para as matérias-primas¹⁻³.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No estudo, foram investigadas várias abordagens para substituir parcialmente o combustível sólido (finos de coque) no processo de sinterização. O modelo foi validado através de simulações e comparações com corridas de sinterização. Observou-se que o modelo seguiu as curvas térmicas das corridas e, portanto, ele foi validado. Em seguida, foram estudados casos onde houveram substituições do combustível sólido por: injeção de gás combustível proveniente de processos siderúrgicos (Figura 1a), biogás e micropelotas de resíduos de biomassa (Figuras 1b e 1c). Esses casos demonstraram padrões de temperatura favoráveis para a formação de sinter de alta qualidade.

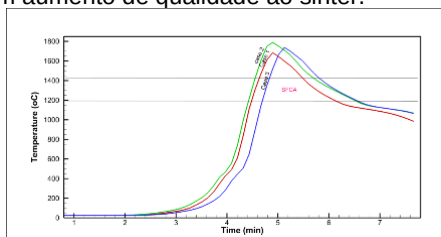
Figura 1 – a) Padrão de temperatura para o caso de mistura de 20% de gás de coqueria e 80% de gás de alto-forno em substituição ao combustível sólido (finos de coque). b) Padrão de temperatura para o caso do biogás produzido a partir da gaseificação da biomassa em substituição ao combustível sólido (finos de coque). c) Padrão de temperatura para as micropelotas de resíduos de biomassa substituindo 20% do combustível sólido (finos de coque).



Fonte: Autor (2023).

O estudo analisou a substituição do combustível sólido por hidrogênio em três subcasos distintos: 1) introdução de ar pré-aquecido na zona de pré-aquecimento e uma mistura de ar pré-aquecido e hidrogênio na zona de sinterização; 2) incluiu-se a injeção de ar pré-aquecido na zona de ignição; 3) injeção da mistura de ar pré-aquecido e hidrogênio nas zonas de ignição e sinterização, mantendo a injeção de ar pré-aquecido na zona de pré-aquecimento. A Figura 2 exibe os perfis de temperatura, destacando-se que o subcaso 2 teve maior intervalo de temperatura para a formação de fases benéficas de cálcio-ferritas (SFCA).

Figura 2 – Perfil de temperatura em função do tempo dos diferentes subcasos analisados considerando a extensão do intervalo de formação das fases SFCA que conferem aumento de qualidade ao sinter.



Fonte: Autor (2023).

CONCLUSÕES

Com o estudo conclui-se que essas abordagens são viáveis e podem melhorar a produtividade, contribuindo para um processo mais sustentável, com previsões de aumento de produtividade entre 5% 25%. E ainda os resultados da simulação indicaram que condições operacionais viáveis poderiam ser obtidas usando a substituição parcial dos finos de coque por gás siderúrgico e biogás.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento CNPq, CAPES e Faperj pelo apoio financeiro parcial.

REFERÊNCIAS

- [1] Castro, J. A. *et al.* Estudo numérico da influência de propriedades de amolecimento e fusão na cinética de formação na sinterização de minério de ferro, **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v.10, n.1, p. 16-27, 2013.
- [2] Naglaa, A. *et al.* Effect of replacement coke breeze by charcoal on technical operation of iron ore sintering. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 6, p. 681-686, 2015.
- [3] Lu, L. *et al.* Substitution of Charcoal for Coke Breeze in Iron Ore Sintering, **ISIJ Int.**, v. 53, n. 9, p. 1607-1616, 2013.