

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO ALTO-FORNO COM A UTILIZAÇÃO DE PELOTA AUTO-REDUTORA, ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

*José Adilson de Castro*¹

*Anderson Willian de Souza Baltazar*¹

*Alexandre José da Silva*¹

*José Carlos D'Abreu*²

*Jun-Ichiro Yag*³

Resumo

Neste trabalho propõe-se uma nova técnica operacional que consiste na substituição gradativa do sinter carregado no alto-forno por pelotas auto-redutoras. Esta técnica é investigada usando o modelo total do alto-forno, que consiste em uma formulação de cinco fases e multicomponente com transporte de energia, "momentum" e massa. Tradicionalmente, o desenvolvimento de matérias-primas auto-redutoras é direcionado aos processos de redução direta, entretanto estas poderiam ser utilizadas no alto-forno melhorando sua performance. Neste trabalho um modelo da cinética de reações, no interior da pelota auto-redutora, é adicionado ao modelo total do alto-forno. Os efeitos na operação do mesmo são investigados, visando parcial substituição do sinter e coque. Os resultados obtidos são um menor consumo de coque e aumento da produtividade.

Palavras-chave: Auto-redução; Modelamento matemático; Alto-forno.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF THE BLAST FURNACE OPERATING WITH SELF-REDUCING PELLET USING THE COMPUTATIONAL SIMULATION

Abstract

In this work a new operation technique that changes gradually sinter at blast furnace by self-reducing pellets with low slag volume and narrow softening and melting temperature is investigated using a blast furnace total model aiming to drastically reduce the coke rate. Traditionally, the development of raw materials is driven to direct reduction processes, however, this can be used to increase the blast furnace performance and substitute coke and sinter as raw materials. In the present paper, self-reducing pellets kinetics reactions are incorporated into the blast furnace total model and the operation effects are investigated. Partial change of sinter and coke by self-reducing pellets is possible, since pellets increase gas permeability and allows increasing the blast rate, as results, the coke decreases and productivity increases.

Key words: Self-reducing pellets; Mathematical modeling; Blast furnace.

I INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, a procura por um processo de produção de ferro ambientalmente aceitável e livre da utilização do coque tem se tornado crescente. Uma das alternativas possíveis é a redução de misturas minério/carvão que apresentam a vantagem de eliminar parcialmente o uso do coque. Tal alternativa tem sido objeto de investigações e por diversas razões tecnológicas estes processos estão se tornando um ponto estratégico para o desenvolvimento da siderurgia mundial. A construção de novas

coquerias é um investimento de capital muito elevado, além do fato que o processo de coqueificação atualmente praticado na maioria das siderúrgicas é altamente poluidor. Processos de coqueificação limpos demandam altos investimentos em equipamentos de tratamento dos resíduos gerados. Dentro deste panorama, a legislação ambiental de diversos países tem imposto diversas restrições e em alguns casos, coquerias em final de campanha têm sido desa-

¹ Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica-EEIMVR-UFF, Av. dos Trabalhadores 420 – Vila Sta. Cecília – 27255-125 – Volta Redonda – RJ
adilson@metal.eeimvr.uff.br www.eeimvr.uff.br

² Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica-PUC-RJ, Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro – 22453-900 www.puc-rio.br

³ IMRAM-Institute for Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University yagi@tagen.tohoku.ac.jp

tivadas. Somando-se a isto, a China, um tradicional fornecedor de coque, tem elevado significativamente a demanda interna, o que causou aumento no preço deste insumo no mercado internacional. Portanto, surge a necessidade do desenvolvimento de novos processos ou modificações radicais nos processos atualmente em uso para a produção do gusa. Tendo em vista a perspectiva apresentada, este trabalho visa contribuir no sentido de investigar e desenvolver novas matérias-primas para o alto-forno, visando à redução no consumo de coque e um melhor aproveitamento energético e de material no processo. Para tal, sugere-se a substituição parcial do sinter atualmente carregado por pelotas auto-redutoras com baixo volume de escória e com faixa de amolecimento e fusão estreita, objetivando melhorar o desempenho do alto-forno, possibilitando uma utilização maior de finos de carvão e otimização das reações que ocorrem no interior do mesmo. A utilização de pelotas auto-redutoras também é desejável por não requerer o uso de alta temperatura para a preparação do material bruto, evitando passos tais como produção de coque e sinterização.⁽¹⁾

Estudos fundamentais para o desenvolvimento de novos processos e dos fenômenos que envolvem a redução de misturas de minério e finos de carvões tem sido exaustivamente investigado por diversos pesquisadores,⁽¹⁾ seja na forma de aglomerados tais como pelotas e briquetes ou materiais particulados. O comportamento de misturas minério/carvão sob várias condições é de fundamental importância no desenvolvimento do processo.⁽¹⁻⁴⁾ Visando elucidar o comportamento destas matérias-primas em condições operacionais compatíveis com práticas industriais os mecanismos e as taxas de reações dos sistemas minério/carvão têm sido estudados.⁽³⁻⁴⁾

Na tentativa de desenvolver modelos matemáticos que representem de maneira acurada cinéticas e mecanismos das diversas reações, bem como elucidar os principais fenômenos de troca de calor e massa, pesquisadores⁽¹⁾ realizaram diversos experimentos no sentido de determinar o comportamento de pelotas auto-redutoras e briquetes em processos industriais de redução direta. Outros trabalhos direcionados ao modelamento destes fenômenos são vastos na literatura. Neste trabalho será apresentado um modelamento conciso de tais fenômenos com o objetivo de prever o comportamento da pelota auto-redutora no interior de um alto-forno de grande porte. Finalmente os resultados serão apresentados e comparados com a operação normal do alto-forno.

2 MODELAMENTO

O modelo do alto-forno, aqui apresentado, consiste em se formular os fenômenos que ocorrem no interior do reator como um sistema de cinco fases que interagem entre si transferindo “momentum”, massa e energia.⁽⁵⁾ Como tal pode ser formulado em termos de equações de transporte, sendo resolvidas em um domínio discretizado através da técnica de volumes finitos. De

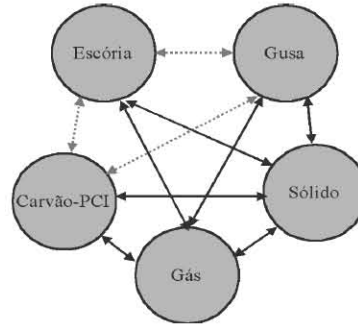


Figura 1. Diagrama de interação entre as fases.

modo geral, os fenômenos de transferência de calor, “momentum” e massa no interior do alto-forno são representados pela equação geral de transporte (Eq. 1). Nesta equação os chamados termos fontes representam as interações com as outras fases, seja através de transferência de “momentum”, energia e massa por processos envolvendo reações químicas. O coeficiente de transferência (Γ) assume diferentes significados conforme a equação a ser resolvida. No termo fonte (S_ϕ) introduz-se todos os termos não incluídos no lado esquerdo da equação. A Equação 1 é uma típica equação resolvida pelo método de volumes finitos. No termo fonte, portanto, estão contemplados os acoplamentos entre fases tais como transferência de momentum, energia e massa. Os modelos de transferência de momentum e energia foram coletados da literatura e adaptados para as condições do alto-forno em trabalhos anteriores.⁽¹⁻⁴⁾ A cinética de redução dos óxidos de ferro, bem como os modelos de incorporação do silício e carbono foram mantidos, conforme a formulação apresentada para altos-fornos a coque.

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon_i \phi_{i,k})}{\partial t} + \text{div}(\rho_i \epsilon_i \vec{V}_i \phi_{i,k}) = \text{div}(\Gamma_{\phi_{i,k}} \text{grad}(\phi_{i,k})) + S_{\phi_{i,k}} \quad (1)$$

As fases consideradas são: sólido, a fase gasosa correspondente ao sopro e gases gerados devido às diversas reações químicas, carvão pulverizado e as fases líquidas gusa e escória. As cinco fases são apresentadas na Figura 1 com suas respectivas interações. Na Tabela 1 são apresentadas todas as espécies químicas de cada fase.

Tabela 1. As cinco fases para o modelo do alto-forno com pelota auto-redutora.

Fases	Espécies químicas	
Gás	CO, CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, N ₂ , SiO	
Sólido	Minério	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, ganga
	Sinter	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, ganga
	Pelota auto-redutora	C, Volateis, SiC, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, ganga
	Coque	C, volatiles, SiC, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, H ₂ O, ganga
Gusa	Fe, C, Si, P, S, Mg	
Escória	FeO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, ganga	
Finos de Carvão	C, volatiles, SiC, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, H ₂ O, ganga	

O modelo total do alto forno considera aproximadamente 120 diferentes possíveis reações, sendo as principais: redução da carga metálica pelo CO e H₂, Combustão do carbono de maneira parcial ou total, conforme a temperatura, as reações de transformação de fases tais como fusão e vaporização ou condensação da umidade, além das reações de incorporação do silício e carbono ao gusa. A cinética de tais reações tem sido exaustivamente estudada e adaptada ao modelo do alto forno (2). Neste trabalho, modelos adicionais de reações para o carbono no interior da pelota e conseqüente redução das mesmas são apresentadas. No interior da pelota ocorrem principalmente, no primeiro estágio, a liberação dos voláteis e posterior gaseificação via CO₂, presente no interior como resultado da redução dos óxidos. Simultaneamente, ocorrem as reações de "solution loss" e "water gas" devido à

presença do carbono em contato com atmosfera rica em CO₂ e H₂O ambos resultados da redução ou liberação de umidade no interior da pelota. Embora seja admitido que as reações no estado sólido possam desempenhar papel importante no estágio inicial, este mecanismo foi desconsiderado no presente modelamento. Entretanto, as reações na fase gasosa como "gás shift" desempenha papel importante na homogeneização da fase gasosa e foi considerada neste modelamento. A seguir serão apresentadas as cinéticas das reações envolvidas neste modelamento que são específicas da auto-redução.

Volatilização no interior da pelota

<p>1 volateis(carvão da pelota) + α_5CO₂(g) → α_6CO(g) + α_7H₂(g) + α_8N₂(g)</p> $R_1 = 23.6 \left(\frac{\mu_g \varepsilon_i}{\rho_g k_i} \right)^{1/4} \left(\frac{\varepsilon_i}{k_i} \right) \min \left(\varepsilon_{pc} \rho_{pc} \omega_{VM_{pc}}, \varepsilon_g \rho_g \omega_{CO_2} \frac{M_{VM}}{\alpha_5 M_{CO_2}} \right); k_i = (0.03 U_g^D)^2; \varepsilon_i = \frac{k_i^{0.5}}{0.01}$ <p>Os coeficientes estequiométricos são determinados como segue:</p> $\delta = \frac{\omega_{C_{VM}}}{M_C} + \frac{\omega_{H_{VM}}}{M_H} + \frac{\omega_{O_{VM}}}{M_O} + \frac{\omega_{N_{VM}}}{M_N}$ $\alpha_5 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} - \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \alpha_6 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} + \alpha_5; \alpha_7 = \frac{\omega_{H_{VM}}}{\delta M_H}; \alpha_8 = \frac{\omega_{N_{VM}}}{2\delta M_N}$

"Solution loss"

<p>2i C (pelota) + CO₂(g) → 2CO(g)</p> $R_{2i} = \frac{\rho_g \omega_{CO_2(g)}}{M_{CO_2}} \left(\frac{1}{A_i k_{film,CO_2}} + \frac{1}{\eta k_{10i}} \right)^{-1}; k_{10i} = \frac{k_i}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}} \rho_i \varepsilon_i \omega_i 82.056 \times 10^{-3} T_g$ $k_1 = \frac{1}{60} \exp \left(19.875 - \frac{66350}{1.987 T_i} \right); k_2 = \exp \left(-6.688 + \frac{21421}{1.987 T_i} \right); k_3 = \exp \left(31.615 - \frac{88168}{1.987 T_i} \right)$ $P_{\omega_j} = \frac{82.056 \times 10^{-3} \rho_g T_g \omega_j}{M_{\omega_j}}; (j=CO, CO_2); k_{film,CO_2} = D_{CO_2,N_2}^{T_{ave}} \frac{Sh_i}{d_i \varphi_i}; A_i = \frac{6\varepsilon_i}{d_i \varphi_i}; \delta_{pelota} = 1$ $\eta = \left[\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta_i D_{O_2,N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \left\{ \left[\tanh \left(\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta_i D_{O_2,N_2}^{T_{ave}}}} \right) \right] - \left[\frac{d_i}{2 \sqrt{\zeta_i D_{O_2,N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \right\}; T_{ave} = \frac{T_g + T_i}{2}$

"Water gas"

<p>3i C (pelota) + H₂O(g) → CO(g) + H₂(g)</p> $R_{3i} = \frac{\rho_g \omega_{H_2O(g)}}{M_{H_2O}} \left[\frac{1}{A_i k_{film,H_2O}} + \frac{1}{\eta k_{11}} \right]; k_{film,H_2O} = D_{H_2O,N_2}^{T_{ave}} \frac{Sh_i}{d_i}$ $k_{11} = \frac{k_4}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2} + k_5 P_{H_2O}} \omega_{C(i)} \rho_i \varepsilon_i 82.056 \times 10^{-3} T_g Sh_i = 1.5 Re_g^{0.55}; k_2 = 7.2 \frac{M_{H_2O}}{M_{CO}}$ $; k_3 = \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} \exp \left(14.24 - \frac{18350}{T_i} \right); A_i = \frac{6\varepsilon_i}{d_i \varphi_i}; k_4 = \frac{1}{3600 M_C} \exp \left(22.35 - \frac{26320}{T_i} \right);$ $k_5 = \exp \left(29.59 - \frac{36760}{T_i} \right);$ $\eta = \left[\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta_i D_{H_2O,N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \left\{ \left[\tanh \left(\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta_i D_{H_2O,N_2}^{T_{ave}}}} \right) \right] - \left[\frac{d_i}{2 \sqrt{\zeta_i D_{H_2O,N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \right\}$ $\delta_{pelota} = 1; P_{\omega_j} = \frac{82.056 \times 10^{-3} \rho_g T_g \omega_j}{M_{\omega_j}}$

“Water Shift”

$$4 \quad \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$$

$$R_{12} = \frac{1000}{(101325)^2} \varepsilon_s (f_{\text{ore}} + f_{\text{simer}} + f_{\text{pellets}}) k_{12} \left(P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{K_{12}} \right); P_{\omega_j} = \frac{82.056 \times 10^{-4} \rho_g T_g \omega_j}{M_{\omega_j}}$$

$$; K_{12} = \exp \left(-3.5414 + \frac{3863.7}{T_i} \right); k_{12} = \alpha k_1 + (1 - \alpha) k_3 \quad \text{para} \quad \left(P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{K_{12}} \right) \geq 0;$$

$$k_{12} = [\alpha k_2 + (1 - \alpha) k_4] K_{12} \quad \text{para} \quad \left(P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{K_{12}} \right) < 0; k_1 = 93.3 \exp \left(\frac{-7.32}{8.3146 \times 10^{-3} T_g} \right)$$

$$; k_2 = 136 \exp \left(\frac{-7.75}{8.3146 \times 10^{-3} T_g} \right); k_3 = 1.83 \times 10^{-5} \exp \left(\frac{7.84 \times 10^{-3}}{8.3146 \times 10^{-3} T_g} \right);$$

$$k_4 = 8.83 \times 10^{-2} \exp \left(\frac{4.56}{8.3146 \times 10^{-3} T_g} \right)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados apresentados serão uma comparação de diferentes níveis de substituição do sinter por pelotas auto-redutoras. Na metodologia utilizada para comparação, a temperatura média do gusa foi tomada como base, isto é o resultado da temperatura final do gusa deverá variar no máximo 5°C. Para realização das simulações, foi adotado como parâmetros ajustáveis, a espessura relativa das camadas de coque e carga metálica e a vazão de sopro.

Através de métodos de “tentativa e erro” a simulação completa, que fornece a temperatura desejada do metal, tomada como referência o caso de 100% de sinter na carga metálica, é obtida. Na Figura 2 são apresentados os resultados para os campos de temperatura no interior do alto-forno para três casos típicos calculados, 0%, 20% e 40% de pelota, respectivamente. Observa-se uma pequena elevação e ampliação da zona de reserva térmica conforme se aumenta a percentagem de pelota. Este fenômeno é explicado pela elevação do volume de ar soprado e reações endotérmicas no interior da pelota, as quais ocorrem fortemente nesta região. Na Figura 3, o perfil da fração de redução na carga metálica prevista pelo modelo é apresentado. Observa-se uma elevação do campo da fração reduzida, permitindo um aumento do fluxo de massa do sólido maior em consequência do aumento na vazão de sopro, que consome o coque e faz com que o abaixamento da carga seja ace-

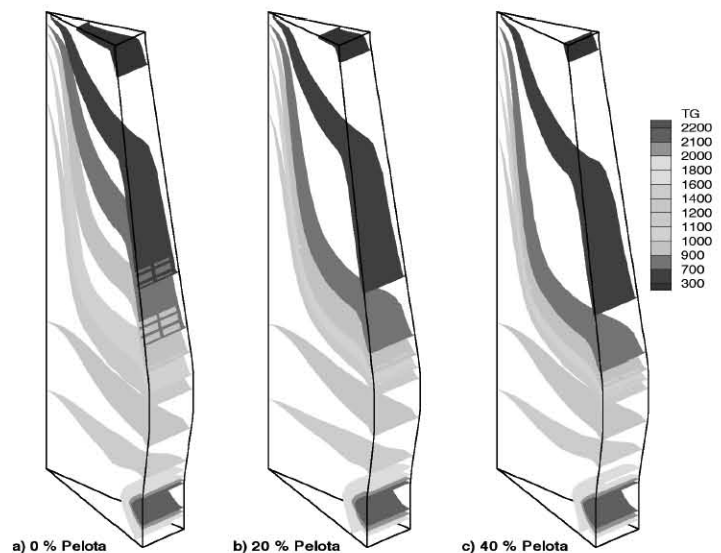


Figura 2. distribuição de temperaturas no interior do alto forno para gradual aumento de pelota auto-redutora na carga.

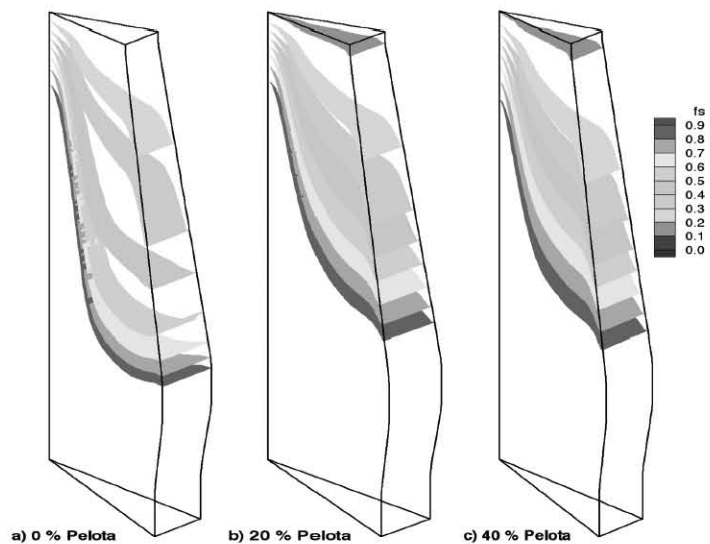


Figura 3. Fração de redução na carga para progressiva substituição de sinter e coque por pelota auto-redutora.

lerado. O aumento do sopro é realizado até que o equilíbrio seja estabelecido para a temperatura final do gusa objetivada, explicando, portanto, o mecanismo de aumento da produtividade. A Figura 4 apresenta alguns dos principais parâmetros globais calculados pelo modelo. Especialmente aqueles relacionados à produtividade e ao consumo específico de coque. Observou-se um aumento de aproximadamente 12% e 20% na produtividade para 20% e 40%, respectivamente, de pelota auto-redutora na carga (Figura 4a). A explicação para tal aumento encontra-se no aumento do volume de ar soprado com o objetivo de compensar a temperatura final do gusa. Embora o “fuel rate” aumente, o consumo específico de coque diminuiu (Figura 4c), devido principalmente à substituição do coque pelo carbono no interior da pelota nas reações de “solution loss” e também devido a diminuição da redução direta, pois para os casos de adição de pelota, praticamente não ocorreu redução direta (Figura 4d).

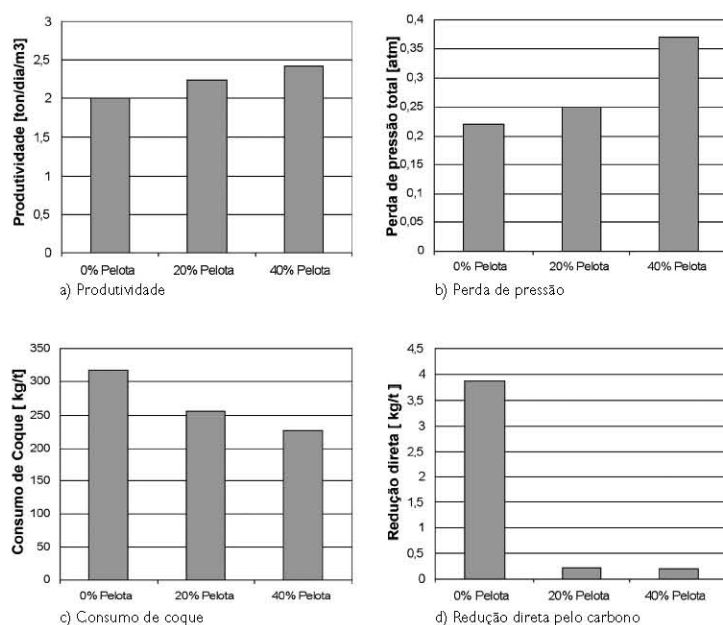


Figura 4. Parâmetros globais calculados pelo modelo para as condições de simulação.

4 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo capaz de analisar o desempenho de pelotas auto-redutoras com baixo volume de escória no interior do alto-forno. O modelo prevê modificações

consideráveis nas variáveis internas do reator. Dentre os principais resultados destacam-se: 1) aumento na produtividade do alto-forno de aproximadamente 20% para uma substituição do sinter de aproximadamente 40% por pelotas com baixo volume de escória, 2) diminuição da zona de reserva térmica e 3) diminuição de aproximadamente 25% do consumo de coque quando comparado com o alto-forno operando com 190 kg/t de injeção de carvão. A redução de coque é devida, sobretudo ao consumo de carvão presente no interior da pelota auto-redutora. Deve ser ressaltado que embora o consumo de coque diminua, o “fuel rate” aumentou aproximadamente 30 kg/t para 40% de substituição do sinter.

5 NOMENCLATURA

A-	Área superficial (m ² /m ³)
D-	Difusividade efetiva da fase (m ² /s)
d-	Diâmetro médio da partícula (m)
f _{mi} -	fração volumétrica do componente i no volume de controle
K _i -	Taxa de reação constante para i
M _i -	Peso molecular das espécies gasosas (Kg/mol)
P-	Pressão (Pa)
R _T -	Taxa de reação total (mol/m ³ /s)
T-	temperatura (K)
α-	coeficiente estequiométrico
δ-	coeficiente estequiométrico
ε _i -	fator de forma da fase i
ω _i -	fração molar da fase j
η-	fator de eficiência para a reação
S _g -	Termos fonte(vários)
Sh-	número de Sherwood(-)
φ _i -	fração reagida do óxido de ferro
ρ-	Densidade
Γ-	coeficiente de transferência

Agradecimentos

Os autores agradecem ao **CNPq** e a **CAPES** por incentivar e fomentar o desenvolvimento tecnológico nacional.

REFERÊNCIAS

- 1 D'ABREU, J.C.; MARTINS, K. M.; NOLDIN JUNIOR, J.H. The iron morphology of self-reducing briquettes. In: BRAZIL-JAPAN SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METTALLURGICAL INDUSTRIES, 4., 2002, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: EPUSP, 2002. p 89-102.
- 2 CASTRO, J.A.; SILVA, A. J.; SALGUEIRO, E.L.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Investigation of the blast furnace top gas recycling by using one stage of reforming and injection into the blast furnace shaft. In: BRAZIL-JAPAN SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METTALLURGICAL INDUSTRIES, 4., 2002, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: EPUSP, 2002. p 17-28.
- 3 SUN, S.; LU W. K. A theoretical investigation of Kinetics and mechanisms of iron ore in na ore/coal composite. **ISIJ International**, v. 39, n. 2, p 123-129, 1999.
- 4 SUN, S.; LU, W. K. Building of a mathematical model for the reduction of iron ore in ore/coal composites. **ISIJ International**, v. 39, n.2, p 130-138, 1999.
- 5 CASTRO, J. A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model. **ISIJ International**, v. 42, n. 1, p 44-52, 2002

Recebido em: 03/03/2005

Aceito em: 20/12/05

Proveniense de: CONGRESSO ANUAL DA ABM - Internacional, 59., 2004, São Paulo. São Paulo: ABM, 2004.