

Modelamento da utilização de aglomerado autorredutor em minialto-forno com recirculação de gás de topo

Modeling of self-reducing agglomerates charging in the mini blast furnace with top gas recycling

Ulysses Forastieri de Matos

Engenheiro Metalurgista,
MSc., EEIMVR/UFF,
Volta Redonda - RJ.
ulysses@metal.eeimvr.uff.br

José Adilson de Castro

Professor Adjunto,
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Metalúrgica, EEIMVR/UFF,
Volta Redonda - RJ.
adilson@metal.eeimvr.uff.br

Resumo

Os minialtos-fornos são reatores que, tradicionalmente, produzem gusa a partir de carvão vegetal, utilizando minério granular com alguma substituição de minério por carga elaborada. Nesse trabalho, propõe-se a substituição de carga metálica por aglomerado autorredutor com reaproveitamento de gás de topo reformado em minialtos-fornos com cenários onde o agente redutor seria o CV e retorno de coque de grandes altos fornos (small coque). Essa tecnologia foi avaliada, utilizando-se um código computacional do alto-forno previamente validado, tendo como base fenômenos de transporte. Diversos cenários combinando carregamento de aglomerado autorredutor e reutilização do gás de topo foram simulados. Com base nos resultados de simulação, pode-se concluir que até 45% da carga poderia ser substituída por aglomerado autorredutor combinando reutilização do gás. As melhores condições indicaram aumento de produtividade da ordem de 8% com agente redutor carvão vegetal. Resultados mostraram que reduções da ordem de 30% e 40% de agente redutor podem ser alcançadas para operações com carvão vegetal e small coque, respectivamente.

Palavras-chave: Minialto-forno, autorredução, reforma de gás.

Abstract

Mini blast furnaces are reactors that traditionally produce pig iron from charcoal using granular ore with some agglomerate substitution. This work proposes metallic burden replacement by self-reducing agglomerates and reutilization of cleaned top gas injected into the shaft of the mini blast furnace where charcoal or small coke from a large blast furnace are used as the reducing agent. This technology was evaluated using a previously validated, blast furnace computational code based on the transport phenomena. Several scenarios combining the charging of the furnace with self-reducing agglomerates and reutilization of cleaned top gas were simulated. Based on the simulation results, it can be concluded that up to 45% of the metallic burden could be replaced by self-reducing agglomerate combined with the reutilization of the top gas. The best conditions indicated an increase in productivity of around 8% with charcoal as the reducing agent. Results showed that decreases of 30% and 40% of the reducing agent could be achieved for operations with charcoal and small coke, respectively.

Keywords: Mini blast furnace, self-reduction, recycling gas.

1. Introdução

O processo de produção de gusa em altos-fornos tem atingido performances técnicas, econômicas e ambientais sem precedentes (Castro, 2000). No entanto, muitos dos resíduos gerados atualmente na produção siderúrgica ainda são de difícil reutilização pelos processos existentes, seja por razões econômicas, seja por ordem técnica (como, por exemplo, a granulometria muito fina), seja por composição química inadequada (Noldin Jr & D'Abreu, 2005). O estudo sobre o comportamento de aglomerados autorredutores tem propiciado grande interesse científico, principalmente devido a sua potencialidade para utilização em processos alternativos de produção de ferro primário de forma a substituir ou complementar o processo clássico de redução via alto-

forno (Coelho et al., 2005, Gudenau et al., 2005). As vantagens da utilização de aglomerados autorredutores para a produção de ferro primário são bem conhecidas, principalmente devido a sua cinética de redução e, também, devido possibilitar a utilização de diversos agentes redutores (D'abreu, 2008, Castro, 2005, 2007, Sun, 1999 e Noldin & D'Abreu, 2005).

A reutilização de gás de topo ou a injeção de gás redutor na cuba são também alternativas que permitem uma considerável redução no consumo total de redutor com consequente diminuição do custo final do gusa (Souza, 2005, Noldin Jr., 2005, Andahazy, 2005, Nogami, 2007). Essas tecnologias tem se mostrado promissoras e vem sendo estudadas por diversas metodologias que

objetivam desde aspectos fundamentais dos mecanismos de autorredução até propostas de concepção de novos processos (Gudenau, 2005, Sun, 1999, Lucena, 2008, Coelho, 2005, Martins, 2002 e Turkdogan, 1980). O presente trabalho propõe a utilização da técnica combinada de recirculação de gás de topo e substituição parcial da carga ferri-férrica por aglomerado autorredutor em um minialto-forno. Para tal, propõe-se a injeção na cuba de gás reformado proveniente do próprio reator e o carregamento de briquetes autorredutores misturado com granulado e sinter. Esta tecnologia é avaliada teoricamente utilizando-se de um modelo total do alto-forno previamente validado (Austin, 1997, Nogami, 1998, Castro, 2000, 2002, 2004, 2007, 2009).

2. Metodologia

Modelo total aplicado ao minialto-forno

Do ponto de vista de formulação matemática o minialto-forno não difere do alto-forno convencional. Portanto o modelo proposto para grandes altos-fornos pode ser adaptado ao minialto-forno apenas considerando aspectos de cinética de reações e fluidodinâmica (Castro, 2005, Souza, 2005). O modelo total aqui considerado consiste em se formularem os fenômenos que ocorrem no interior do reator como um sistema de quatro fases que interagem entre si trocando momentum, massa e energia e, como tal,

pode ser formulado em termos de equações de transporte, as quais podem ser resolvidas em um domínio discretizado através da técnica de volumes finitos aplicada a uma malha não ortogonal (Castro, 2000). Os fenômenos de transferência de calor, momentum e massa no interior do reator são representados pela equação geral de transporte (equação 1), onde o coeficiente de transferência (Γ_ϕ) assume diferentes significados conforme a equação a ser resolvida (momentum, energia, espécies químicas etc...). No ter-

mo fonte (S_ϕ), introduzirem-se todos os termos não inclusos no lado esquerdo da equação, portanto, no termo-fonte, está o acoplamento entre as fases, tais como reações químicas, forças de interação e transferência de calor por mecanismos de convecção e radiação. Os modelos de transferência de momentum, energia e massa foram coletados da literatura, a partir de trabalhos anteriores do processo reacional de um alto-forno (Castro 2000, Austin, 1997, Souza, 2005 e Nogami, 1998).

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

O modelo compreende mais de 100 equações para os cálculos das fontes de energia, movimento e massa. Fontes de movimento são derivadas do arraste entre as fases, gradientes de pressão ou gravidade. Fontes de energia surgem da transferência

de calor entre as fases, calor sensível acompanhado de transferência de massa, devido às reações químicas e transformações de fase. As fontes de massa surgem devido às reações químicas e transformações de fases. As reações químicas são modeladas uti-

lizando modelos cinéticos da literatura (Austin, 1997, Turkdogan, 1980 e Sun, 1999). As fases consideradas, nesse modelo específico, são: sólido, gás, metal e escória. Na Tabela 1, são apresentadas todas as espécies químicas que são resolvidas para cada fase.

Condições de cálculo

Visando a analisar o comportamento do reator, foram selecionados dois modos típicos de operação do minialto-forno, sendo o primeiro utilizando o carvão vegetal como redutor e o segundo utilizando o small coque (coque de granulometria similar ao carvão vegetal, em

torno de 22mm, proveniente do peneiramento do coque utilizado em grandes altos-fornos). Dois casos-base, que correspondem à experiência operacional desse processo, foram selecionados. Uma condição de operação com carvão vegetal e outro com small coque, ambos como re-

dutores sólidos. Para ambos os casos de referência, o modelo foi ajustado para reproduzir consumo específico de redutor, produtividade e volumes de escória com erro menor que 1%, quando comparado com o dado industrial médio do período de 24 h. Adicionalmente, os parâmetros

Fases	Componentes	
Gás	CO, CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, N ₂ , SiO, CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , SiS, SiC, SO, SO ₂	
Sólido	Minério autorredutor	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, P ₂ O ₅ , MnO, ganga
	Sinter	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, P ₂ O ₅ , MnO, ganga
	Pelota	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, P ₂ O ₅ , MnO, ganga
	Small Coque	C, S, SiC, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, H ₂ O, P ₂ O ₅ , ganga
	Carvão Vegetal	C, S, SiC, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, H ₂ O, P ₂ O ₅ , ganga
Gusa	Fe, C, Si, S, Mn, P	
Escória	FeO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, P ₂ O ₅ , CaS, MnO	

Tabela 1
Fases e espécies químicas consideradas no modelo.

de sopro, tais como umidade, enriquecimento, volume de sopro e temperatura de sopro, são dados de entrada do modelo e foram considerados os valores médios correspondentes. Portanto, para os cenários simulados, foram tomados como base, casos simulados e validados com resultados industriais de um minialto-forno que possui histórico de operação com ambos os redutores (Pereira, 2005). Em seguida, diferentes cenários com crescente injeção de gás redutor e carga autorredutora foram analisados com base nos casos-base. Para todos os casos, sempre foi utilizada injeção de gás reformado no

segundo nível de ventaneiras, coincidente com o início da cuba (Nogami, 1998).

As composições da carga metálica considerada nos cenários simulados estão nas Tabelas 2 e 3. Foi mantido, em todos os casos, 10% de pelota na carga metálica, visando a garantir permeabilidade do leito (Pereira, 2005). Os percentuais de briquetes autorredutores na carga metálica propostos são os seguintes: Receita 1 = 15% de briquetes + 75% de sinter. Receita 2 = 25% de briquetes + 65% de sinter. Receita 3 = 35% de briquetes + 55% de sinter.

Os resultados apresentados a seguir referem-se à análise qualitativa da influ-

ência da variação percentual de briquetes autorredutores nos parâmetros teor de silício no gusa, produtividade, consumo de redutor, volume de escória e consumo de sinter do reator para os diferentes redutores. Para tal, foram adotados, como parâmetros ajustáveis, a espessura relativa das camadas de coque, a carga metálica, a vazão de sopro e o enriquecimento de oxigênio do ar.

Foi mantida, em todos os casos, a basicidade da escória entre 1,0 e 1,20, de forma a permitir a flexibilidade sem necessidade de alterações nos refratários do reator.

3. Resultados e discussão

Resultados globais

A Tabela 2 apresenta dados calculados para diferentes cenários, onde o agente redutor sólido é o carvão vegetal. Observa-se que um aumento da injeção de gás redutor foi possível com adição de oxigênio de enriquecimento e consequente aumento de produtivi-

dade. Deve ser ressaltado, entretanto, que o aumento de produtividade se deve à combinação dos fatores aumento de gás redutor, diminuição do carvão na carga devido ao suprimento de carbono na carga através do aglomerado autorredutor e maior cinética

de redução da carga na cuba do reator. Observa-se que a injeção de gás e a utilização de carga autorredutora permitem uma diminuição da geração de gás de topo, entretanto deve ser ressaltado que a quantidade de CO₂ diminui drasticamente, contribuindo

Tabela 2
Parâmetros globais para os cenários com carvão vegetal.

		Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Produtividade (tgusa/dia/m ³)		2,88	2,82	3,01	3,12
Consumo de carvão (kg/tgusa)		536	516	465	368
Enriquecimento(%)		3,84	4,98	13,67	19,13
Gás reformado	Volume (Nm ³ /tgusa)	148,4	148,4	148,4	148,4
	CO (kg/tgusa)	49,11	49,11	49,11	49,11
	H ₂ O (kg/tgusa)	15,83	15,83	15,83	15,83
	H ₂ (kg/tgusa)	9,82	9,82	9,82	9,82
	Temperatura de injeção (°C)	1145	1145	1145	1145
Temperatura do gás de topo (°C)		88	100	90	87
Volume de gás gerado (Nm ³ /tgusa)		2195,3	1780,0	1750,5	1778,9
Composição do gás gerado	CO ₂ (%)	16,30	13,40	11,66	9,17
	CO(%)	33,49	39,44	47,43	54,67
	H ₂ O(%)	3,74	3,53	3,26	2,99
	H ₂ (%)	4,44	4,34	4,19	4,09

para um aumento do poder calorífico do gás.

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados para os cenários com *small* coque na carga e crescente aumento de injeção de gás. Comparativamente aos cenários com carvão vegetal, as margens para incremento de produtividade foram menores, devido, principalmente, à menor reatividade do *small* coque. Contrariamente aos cenários anteriores, o volume específico de gás gerado foi aumentado, indicando que a demanda de energia foi maior para esses cenários. Os resultados apresentados pelo modelo apontam, em ambos os casos, um aumento de produ-

tividade e uma redução no consumo de redutor e matéria-prima elaborada, sem causar grandes alterações nos indicadores de qualidade do gusa e de controle operacional. Na Figura 1, são apresentados os resultados de %Si do gusa e produtividade do reator, principais itens de controle do processo. Os resultados relacionados ao custo operacional são apresentados na Figura 2. Nota-se que, em ambos os combustíveis, o aumento no uso de briquete autorredutor favorece um menor consumo de sinter e redutor, mantendo o volume de escória dentro dos limites usuais de operação. No caso da operação com *small* coque, o volume de

escória foi maior, devido ao ajuste feito para se obter basicidade intermediária, o que garantiria flexibilidade operacional sem desgaste excessivo de refratários.

É interessante notar que maior redução no consumo de redutor pode ser verificado no *small* coque. Esse fato deve ser justificado, devido ao abaixamento da temperatura da zona de reserva térmica, devido ao carregamento de aglomerado autorredutor. A redução do consumo específico de sinter foi devido à sua substituição por aglomerado autorredutor na carga na razão de 1.2 kg de aglomerado/kg de sinter.

	Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	
Produtividade (tgusa/dia/m ³)	2,38	2,22	2,35	2,41	
Consumo específico do small coque (kg/tgusa)	541	461	382	320	
Enriquecimento (%)	3,84	3,84	4,93	13,03	
Gás reformado	Volume (Nm ³ /tgusa)	148,4	148,4	148,4	148,4
	CO (kg/tgusa)	49,11	49,11	49,11	49,11
	H ₂ O (kg/tgusa)	15,83	15,83	15,83	15,83
	H ₂ (kg/tgusa)	9,82	9,82	9,82	9,82
	Temperatura de injeção (°C)	1145	1145	1145	1145
Temperatura do gás de topo (°C)	98	228	218	223	
Volume de gás gerado (Nm ³ /tgusa)	1735,3	1942,5	1833,1	1794,3	
Composição do gás gerado	CO ₂ (%)	15,93	16,95	17,30	16,78
	CO (%)	33,49	25,70	26,67	28,60
	H ₂ O (%)	3,80	5,21	5,04	4,83
	H ₂ (%)	4,40	5,17	4,93	4,71

Tabela 3
Parâmetros globais para os cenários com *small* coque.

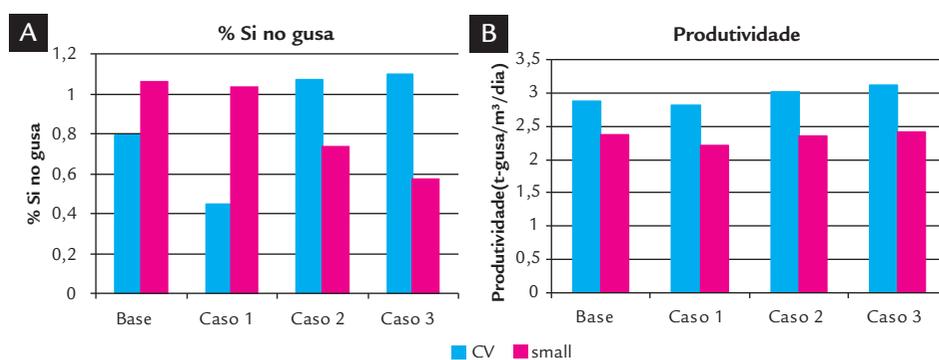


Figura 1
Parâmetros operacionais do processo (CV: carvão vegetal, *small*: *small* coque).
A) %Si no gusa.
B) Produtividade.

Influência do briquete autorredutor nas condições internas do forno

Conforme observado na Figura 3, o aumento do percentual de briquete na carga, conjuntamente ao aumento da injeção de gás, resultou em leve alteração nas isotermas do gás para o caso do carvão vegetal. No caso do *small* coque, houve uma elevação das isotermas (Figura 4). Entretanto, pode-se concluir que as

condições internas do processo foram afetadas de forma positiva em ambos os cenários, indicando que tais operações seriam possíveis nesses reatores compactos. Os resultados dessa pesquisa indicam que fornos de pequeno porte (aprox. 200 m³ de volume útil) podem desfrutar de grande flexibilidade do ponto de vis-

ta de agentes redutores e carga metálica preparada de forma otimizada, sobretudo se considerarmos que esses reatores podem trabalhar de forma complementar a altos-fornos de grande porte, que demandam cada vez maior controle de distribuição granulométrica do coque (Pereira, 2005 e Pimenta, 2007).

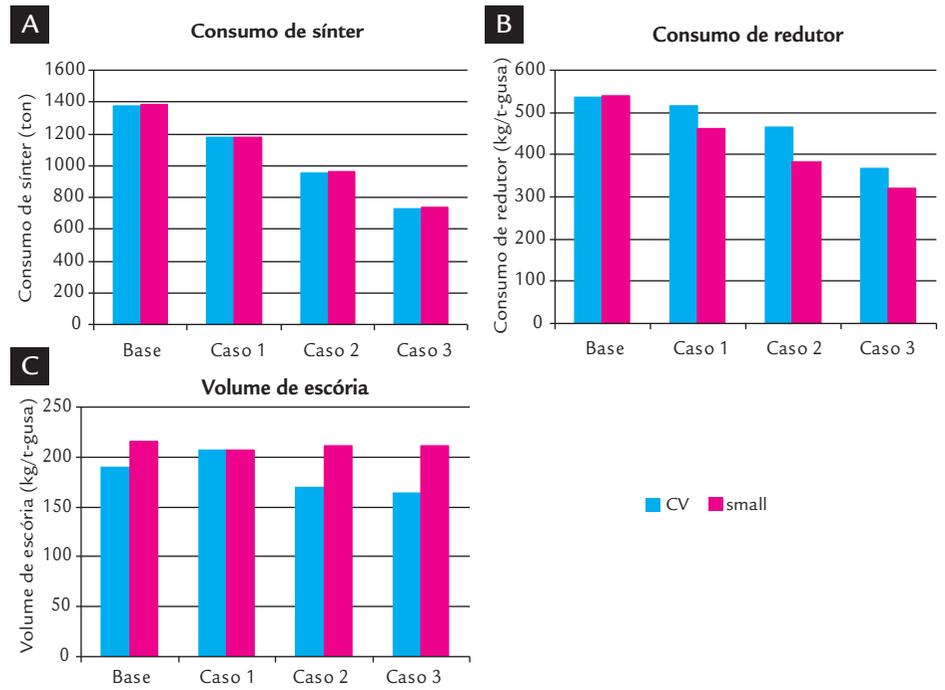
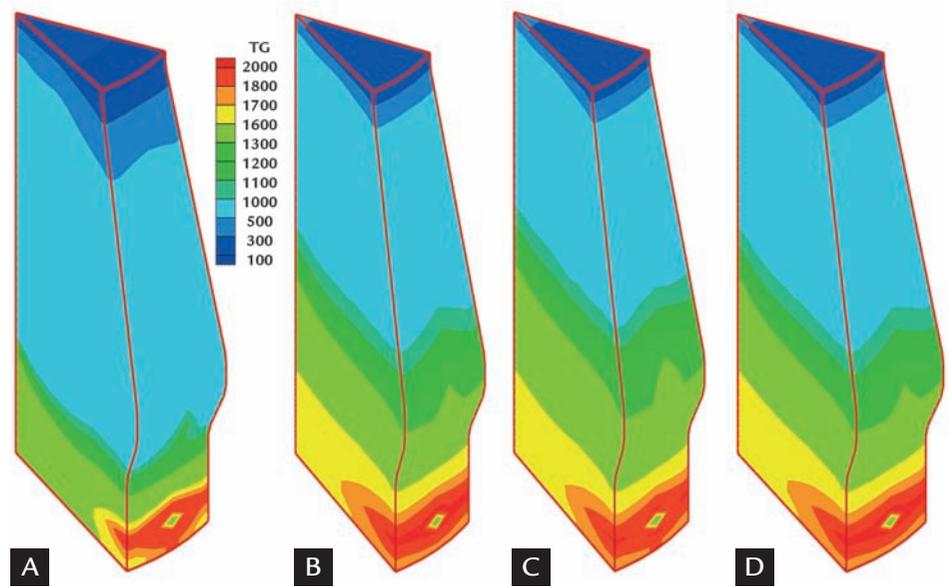
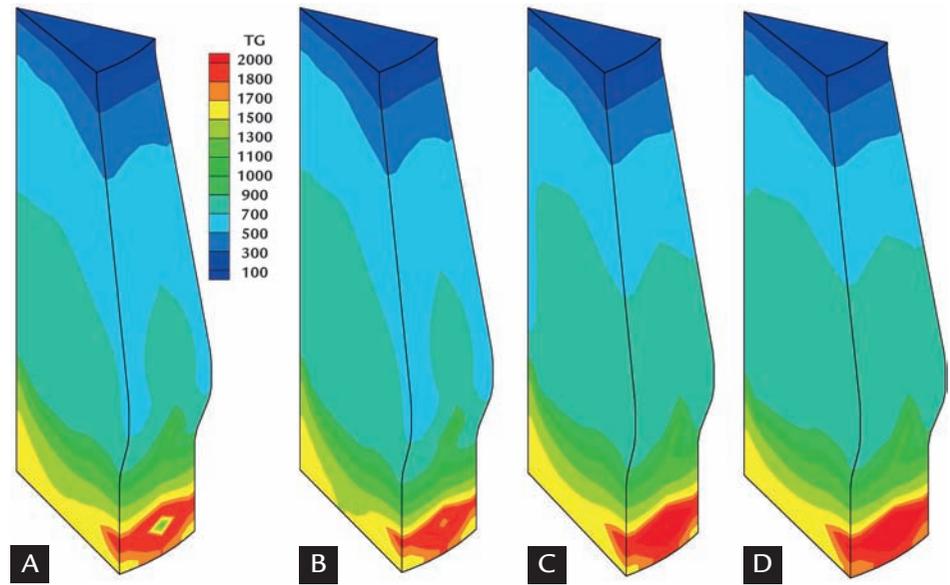


Figura 2
Principais previsões de balanço material do processo.
A) Consumo de sínter.
B) Consumo de redutor.
C) Volume de escória.



4. Conclusões

Nesse trabalho, foi analisada a possibilidade de operação flexível de redutores de carga preparada em um minialto-forno utilizando-se o modelo total do processo previamente validado e calibrado para o minialto-forno operando com carvão vegetal e *small* coque. Resultados de simulação

indicaram que a combinação da utilização de carga autorredutora permite a substituição de combustível sólido com baixos tempos de residência na zona granular, o que possibilita incrementos consideráveis na marcha do forno com menor degradação da mesma. Resultados obtidos, utilizando-

se o modelo, apontaram para uma maior produtividade quando utilizados o carvão vegetal como combustível e percentuais de briquetes da ordem de 45%. O consumo de coque poderia ser reduzido para até 221kg/t-gusa, utilizando-se *small* coque como combustível.

5. Referências bibliográficas

- ANDAHAZY, D. et al. Theoretical analysis on the injection of H₂, CO, CH₄ rich gases into the blast furnace. *ISIJ International*, v. 45, n. 2, p. 166-174, 2005.
- AUSTIN, P.R. et al. A mathematical model for blast-furnace reaction analysis based on the four fluid model. *ISIJ International*, v. 37, n. 8, p. 748-755, 1997.
- CASTRO, J. A. *A multi-dimensional transient mathematical model of blast furnace based on mult-fluid model*. Tohoku University, Japão, 2000. (Tese de Doutorado).
- CASTRO, J. A. et al. Estudo do comportamento da cuba do forno de auto redução utilizando carvão granulado através do modelo multifásico. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.3, n.3, p. 16-21, 2007.
- CASTRO, J. A. et al. Simulação computacional da injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras de minialtos-fornos. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.1, n.2, p. 59-62, 2004.
- CASTRO, J. A. et al. Avaliação do desempenho do alto-forno com a utilização de pelota autorredutora, através da simulação computacional. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.2, n.2, p. 45-50, 2005.
- CASTRO, J. A. et al. Estudo numérico da reciclagem de CO₂ na zona de combustão do alto-forno. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.6, n.1, p. 13-18, 2009.
- CASTRO, J.A. et al. Numerical investigation of simultaneous injection of pulverized coal and natural gas with oxygen enrichment to the blast furnace. *ISIJ International*, v. 42, n. 11, p. 1203-11, 2002.
- COELHO, L. H. T., MOL, M. P. G., ASSIS, P. S. Seleção de minérios de ferro para utilização nos processos Corex e Far-Tecnored. In: SEMIN. RED. E MAT. PRIM. ABM. *Anais...* Florianópolis: ABM, 2005. v. 1, p. 434-445.
- D'ABREU, J. C. et al. Modelamento matemático da cuba superior do forno tecnored. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.4, n.3, p.69-73, 2008.
- GUDENAU, H.W. et al. Research in the reduction of iron ore agglomerates including coal and C-containing dust. *ISIJ International*, v. 45, n.4, p. 603-608, 2005.
- LUCENA, D.A. et al. Aglomeração de moinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.4, n.4, p.1-6, 2008.
- MARTINS, J. et al. Microestruturas de pelotas feitas com mistura de redutor e finos de minério. *REM- Revista Escola de Minas*, v.55, n.3, p.203-207, 2002.
- NOGAMI, H. et al. Prediction of blast furnace performance with top gas recycling. *ISIJ International*, v. 38, n. 3, p. 239-245, 1998.
- NOGAMI, H., YAGI, J., KITAMURA, S., AUSTIN, P.R. Analysis on material and energy balances of iron making systems on blast furnace operations with metallic charging, top gas recycling and natural gas injection. *ISIJ International*, v. 46, n. 12, p. 1759-66, 2007.
- NOLDIN Jr., J. H., D'ABREU, J. C. Tecnored TRIOS - Convertendo custos em lucro. In: SEMIN. RED. E MAT. PRIM. ABM, 467. *Anais...* Florianópolis: ABM, 2005. v. 1, p. 467-476.
- PEREIRA, M. R. et al. Aumento de produtividade e redução no consumo de combustível através da utilização de pelotas no alto-forno 02 da Saint-Gobain canalização. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.1, n.3, p.1-6, 2005.
- PIMENTA, H.P. et al. Desenvolvimento integrado de carga metálica para sinterização e alto-forno. *TMMM- Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v.4, n.1, p.1-7, 2007.

- SOUZA, F.T. et al. Operação do alto-forno a oxigênio com altas taxas de injeção de carvão e recirculação de gás de topo em dois níveis de ventaneiras. In: SEMIN. RED. E MAT. PRIM. ABM, 35. *Anais...* Florianópolis: ABM, 2005. v.1, p.45-54.
- SUN, S. et al. A theoretical investigation of kinetics and mechanisms of iron ore in an ore/coal composite. *ISIJ International*, v. 39, n. 2, p. 123-129, 1999
- SUN, S. et al. 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
- TURKDOGAN, E. T. et al. Studies of blast-furnace reactions. *Ironmaking Steelmaking*, n.06, p. 268-280, 1980.

Artigo recebido em 17 de dezembro de 2009. Aprovado em 05 de setembro de 2011.