

MODELAMENTO MATEMATICO 3D MULTIFASICO MULTICOMPONENTES DO FORNO DE CUBA PARA AUTO- REDUÇÃO ¹

José Adilson de Castro²
Lesly Jeaneth Mamani Paco³
José Carlos D'Abreu³

Resumo

A demanda por DRI continua crescente devido à escassez de sucata de alta qualidade para a produção de aço via forno elétrico. Neste contexto, o forno de cuba baseado em processo de auto-redução torna-se uma alternativa para suprir a demanda de metálicos permitindo, a reciclagem de rejeitos de finos de indústrias siderúrgicas, metalúrgicas em geral e de mineração, posto que os aglomerados são usualmente produzidos a partir de uma mistura de finos de minério de ferro ou resíduos e um agente carbonoso. A característica marcante aqui é o "ambiente interno dos aglomerados", que resulta em elevadas taxas de redução (extração do oxigênio do minério) graças às condições cinéticas daí resultantes. O presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de simular as condições ótimas de operação de um forno de cuba operando com briquetes auto-redutores, carvão granulado e injeção secundária de gás. A técnica para modelar o sistema de duas fases é a de volumes finitos com a que se pretende resolver as equações de transporte de momentum, energia e espécies químicas. Resultados de simulação indicaram que aproximadamente 70 % de grau de metalização podem ser obtidos neste processo. A produtividade do processo obtida foi de 35 t/m³/dia com um volume de gás de topo de aproximadamente 2840 Nm³/tDRI.

Palavras-chave: Aglomerados auto-redutores; Modelamento matemático; Forno de cuba.

3D MULTIPHASE MULTICOMPONENT MATHEMATICAL MODEL OF THE SHAFT FURNACE FOR SELF-REDUCING PROCESS

Abstract

DRI demand continues increasing due to shortage of high quality scrap iron for the steel production through electric arc furnace. In this context, the shaft furnace based on self-reducing process becomes an alternative to supply the demand of metallic. It is possible to recycle the remainders of iron and steelmaking industries since the self-reducing agglomerate are mixtures of fine ore/ residues and reducing agent. The principal characteristic is the "internal environment of the agglomerate", this results in high rates of reduction (extraction of the oxygen from the ore) due to the kinetic conditions. The present paper aims to develop a mathematical model capable of simulating the operating conditions of the shaft furnace with self-reducing agglomerate, lump coal and secondary gas injection. The model used the technique of finite volume to solve the transport equations of momentum, energy and chemical species of both, solid and gas phases considered in this model. The main finds of this paper are: a) the self-reducing furnace can operates with a mixture of self-reducing briquettes and anthracite, b) the productivity of the process can achieve 35.5 t/m³/day, c) the process produces outlet gas with high calorific value.

Key words: Self-reducing agglomerates; Mathematical modeling; Shaft furnace

¹ Contribuição técnica apresentada na 61^o Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² 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

³ Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica-PUC-RJ, Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro – 22453-900 leslymp@dcmm.puc-rio.br, dabreu@dcmm.puc-rio.br, www.puc-rio.br

1 INTRODUÇÃO

A demanda por DRI continua crescente devido à escassez de sucata de alta qualidade para a produção de aço via forno elétrico. Neste contexto, o forno de cuba baseado em processo de auto-redução torna-se uma alternativa para suprir a demanda de metálicos permitindo, a reciclagem de rejeitos de finos de indústrias siderúrgicas, metalúrgicas em geral e de mineração. Outro grande diferencial é em relação à preservação ambiental porque não necessita de minério granulado e coque. Sem precisar de coqueria e sinterização – as unidades mais poluidoras do processo siderúrgico – o sistema garante uma operação mais limpa.

Os aglomerados auto-redutores são curados a frio, usualmente produzidos a partir de uma mistura de finos de minério de ferro ou resíduos e um agente carbonoso que pode ser in natura ou derivado/subproduto de outros processos¹. A característica marcante aqui é o "ambiente interno dos aglomerados", que resulta em elevadas taxas de redução (extração do oxigênio do minério) graças às condições cinéticas daí resultantes.

Vários trabalhos têm sido realizados para ter um melhor entendimento dos fenômenos que acontecem no processo de autoredução. D'Abreu e colaboradores realizaram várias pesquisas com o intuito de analisar o comportamento das pelotas auto-redutoras.⁽¹⁻⁴⁾ Apresentaram uma análise do impacto das variáveis, temperatura, tipo de atmosfera e composição dos materiais ferrosos e carbonosos, sobre a cinética da auto-redução, em dois tipos de briquetes auto-redutores, na faixa de temperatura de 1000 a 1300°C.⁽²⁾ Por outro lado, estudaram a fenomenologia da metalização de briquetes auto-redutores durante a reação de redução na faixa de temperatura de 1000 à 1350C, variando o tipo de atmosfera gasosa e o tempo de redução.⁽³⁾ Realizaram-se, também, esforços para quantificar a fase metálica do ferro usando técnicas digitais de microscopia nos briquettes compostos de magnetita-carvão reduzidos sob uma atmosfera do N₂ em 1200°C de 5 a 45 minutos. Além disso, pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de modelar matematicamente os fenômenos de transferência de calor e massa, assim como a cinética da auto-redução. Neste contexto, Castro et al. desenvolveram um modelo total, baseado na técnica de volumes finitos, para simular a região superior do reator de auto-redução.⁽¹⁾ O modelo proposto consistiu na formulação de um modelo bifásico (sólido e gás) através de equações de transporte de momentum, energia e espécies químicas para as duas fases presentes na cuba do reator. A fase sólida consistiu de briquettes autoredutores.

O presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de simular as condições ótimas de operação de um forno de cuba operando com briquetes auto-redutores, carvão e injeção secundária de gás. A energia produzida na queima secundária do monóxido de carbono é utilizada para o pré-aquecimento e a redução da carga aglomerada. Dentro do forno ocorre a auto-redução e os fenômenos de troca de calor e momentum do gás ascendente com o sólido descendente (briquete e carvão). As cinéticas das diversas reações de auto-redução e combustão-gaseificação do carvão tanto do interior do briquete quanto o carregado na forma de granulado foram modeladas segundo adaptações de modelos obtidos na literatura.⁽¹⁻¹⁶⁾

2 MODELAMENTO MATEMÁTICO

O modelo da cuba superior do processo de auto-redução, aqui apresentado, consiste em se formular os fenômenos que ocorrem no interior do reator como um sistema bifásico que interagem entre si transferindo momentum massa e energia. Como tal pode ser formulado em termos de equações de transporte, sendo resolvidas em um domínio discretizado através da técnica de volumes finitos. De modo geral, os fenômenos de transferência de calor, momentum e massa no interior da cuba superior do 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 as 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 forno em trabalhos anteriores^{1,5,10} Os modelos e mecanismos das cinéticas das principais reações de auto-redução¹²⁻¹⁶, combustão de voláteis e combustão do carvão foram apresentados em trabalhos anteriores, sendo apenas adaptados para as condições de operação do forno de auto-redução.^(1,5-16)

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

As fases consideradas neste modelo são: sólidos, que compreende o aglomerado auto-redutor e o carvão granulado, que são carregados pelo topo. A fase gasosa corresponde ao sopro e gases gerados devidos às diversas reações químicas. Na Tabela 1 são apresentadas todas as espécies químicas que são resolvidas para cada fase, cada espécie química corresponde a uma equação diferencial parcial, conforme apresentado na eq. 1.

Tabela 1. Modelo bifásico proposto para descrever a cuba superior do processo de auto-redução (total de 40 equações diferenciais parciais, eq.1)

Fases	Espécies químicas	
Gás (u_1, u_2, u_3, p, T)	CO, CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, N ₂ , SiO	
Sólido (u_1, u_2, u_3, p, T)	Briquetes auto-redutores	C, Voláteis, SiC, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, ganga
	Carvão granulado	C, Voláteis, S, SiC, H ₂ O, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , ganga

O domínio de cálculo foi adotado o de um forno em escala industrial com volume interno de 3,36 m³. A malha de volumes finitos gerada para simular o processo está apresentada na Figura 1.

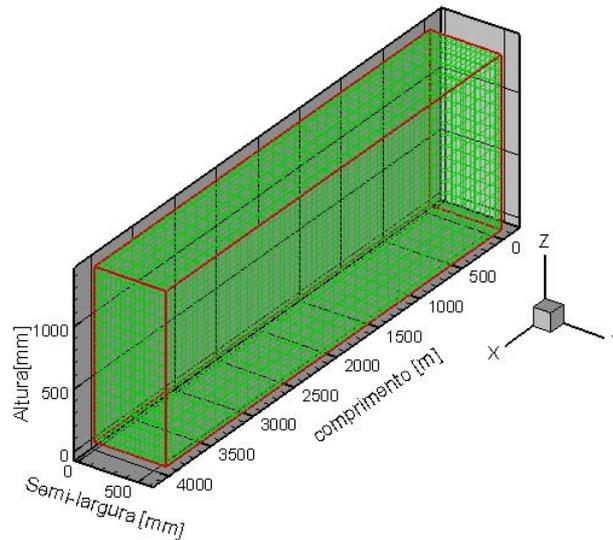


Figura 1. Malha de volumes finitos associada à cuba superior de um forno de auto-redução

O carregamento de carvão granuloso adiciona ao processo características peculiares de transferência de calor e massa, sobretudo devido à liberação da matéria volátil no interior do leito granular. Modelos de devolatilização de carvões para PCI são amplamente divulgados na literatura.^(6,7,9,11) Neste trabalho foi adaptado um modelo para representar a volatilização em carvão granular conforme segue:

Combustão de voláteis

1	$\text{volateis(carvão, finos)} + \alpha_1 \text{O}_2 \rightarrow \alpha_2 \text{CO}_2(\text{g}) + \alpha_3 \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \alpha_4 \text{N}_2(\text{g})$
	$R_1 = 23,6 \ k_{\text{eff}} \left(\frac{\mu_g \varepsilon_t}{\rho_g k_t} \right)^{1/4} \left(\frac{\varepsilon_t}{k_t} \right) \min \left(\varepsilon_c \rho_c \omega_{\text{VM}_{\text{pc}}}, \varepsilon_g \rho_g \omega_{\text{O}_2} \frac{M_{\text{VM}}}{\alpha_1 M_{\text{O}_2}} \right)$
2	$\text{volateis(carvão, finos)} + \alpha_5 \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_6 \text{CO}(\text{g}) + \alpha_7 \text{H}_2(\text{g}) + \alpha_8 \text{N}_2(\text{g})$
	$R_2 = 23,6 \ k_{\text{eff}} \left(\frac{\mu_g \varepsilon_t}{\rho_g k_t} \right)^{1/4} \left(\frac{\varepsilon_t}{k_t} \right) \min \left(\varepsilon_c \rho_c \omega_{\text{VM}_c}, \varepsilon_g \rho_g \omega_{\text{CO}_2} \frac{M_{\text{VM}}}{\alpha_5 M_{\text{CO}_2}} \right)$
	$k_t = (0,03 \vec{U}_g)^2; \quad \varepsilon_t = \frac{k_t^{0,5}}{0,01}$
	$k_{\text{eff}} = 1,5 \times 10^{-4} (T_{\text{film}})^{1,25} \text{EXP} \left(\frac{-25300}{8314 T_{\text{film}}} \right)$

Os coeficientes estequiométricos das equações de combustão dos voláteis são determinados como segue:

$$\delta = \frac{\omega_{C_{VM}}}{M_C} + \frac{\omega_{H_{VM}}}{M_H} + \frac{\omega_{O_{VM}}}{M_O} + \frac{\omega_{N_{VM}}}{M_N}; \quad \alpha_1 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} + \frac{\omega_{H_{VM}}}{4\delta M_H} - \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \quad \alpha_2 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C};$$

$$\alpha_3 = \frac{\omega_{H_{VM}}}{4\delta M_H}; \quad \alpha_4 = \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \quad \alpha_5 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} - \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \quad \alpha_6 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} + \alpha_5; \quad \alpha_7 = \frac{\omega_{H_{VM}}}{\delta M_H};$$

$$\alpha_8 = \frac{\omega_{N_{VM}}}{2\delta M_N}$$

3 RESULTADOS/DISCUSSÕES

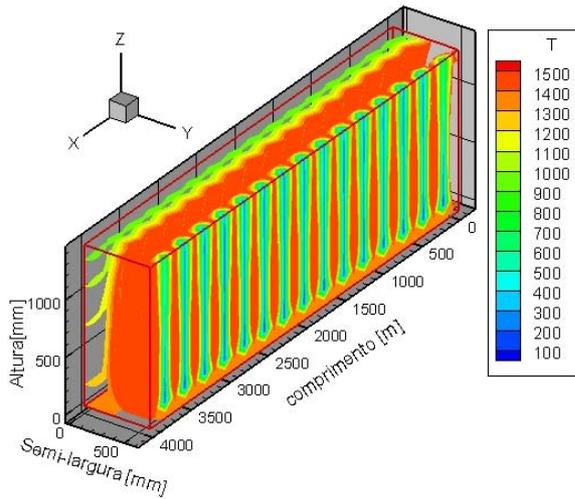
Objetivando a construção de um modelo capaz de prever o comportamento do forno de auto-redução operando com uma mistura de aglomerado auto-redutor e carvão granulado, nesta secção serão apresentados e discutidos os principais aspectos internos do forno e as previsões dos principais parâmetros operacionais. A Tabela 2 mostra as características químicas das matérias-primas utilizadas nesta simulação. A carga metálica é um típico briquete auto-redutor e o carvão utilizado é um antracito com baixo volátil.

Tabela 2. Composição do aglomerado auto-redutor e do carvão granulado carregado [%]

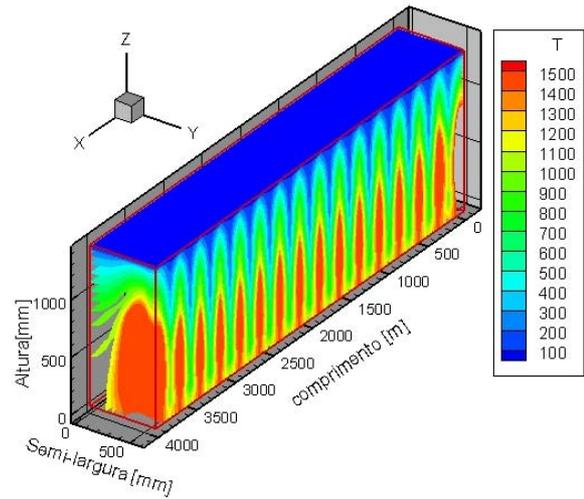
Componentes do briquete											
C	volateis	Fe2O3	Fe3O4	FeO	Fe	H2O	ganga	SiO2	Al2O3	MgO	CaO
14,8	0,5	66,2	-	1,1	-	4,4	-	2,8	2,7	4,0	4,0
Componentes do carvão granulado (antracito)											
C	volateis	H2O	ganga	S	SiC	SiO2	Al2O3	MgO	CaO		
70,8	15,11	-	7,05	0,5	-	3,02	-	2,0	2,03		

Na Figura 2 os campos de temperaturas para as fases gás e sólida previstas pelo modelo são apresentadas. Observam-se elevação considerável das temperaturas do gás e do sólido na região das ventaneiras secundárias devido à injeção do oxigênio que reage com o CO proveniente da zona inferior do forno, liberando calor que é imediatamente transferido à carga sólida descendente.

Na Figura 3 apresenta-se a distribuição dos óxidos de ferro pré-reduzidos no interior do forno de auto-redução. Observa-se que a hematita é rapidamente reduzida a magnetita e a magnetita perdura até aproximadamente a metade da altura da cuba sendo finalmente reduzida a wustita e ferro. A região onde predominantemente encontra-se a wustita é a periferia da cuba enquanto o ferro reduzido se localiza na região central como resultado do escoamento gasoso, do campo de temperaturas de sólido e gás e concentração de CO resultante da combustão secundária que impõem condições fortemente redutoras na região central. Conforme se pode observar a composição do DRI varia fortemente do centro para a periferia.

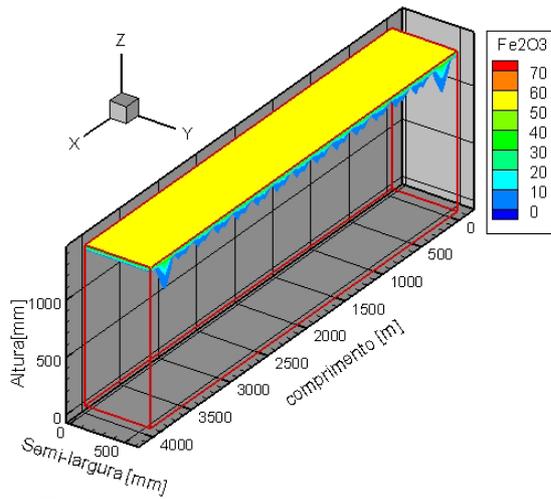


a) Temperatura do gás

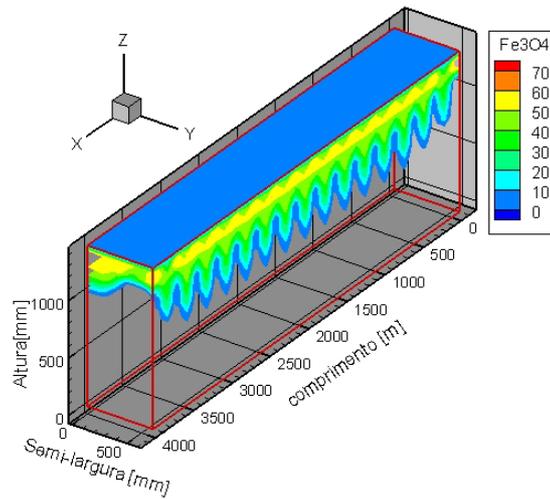


b) Temperatura do sólido

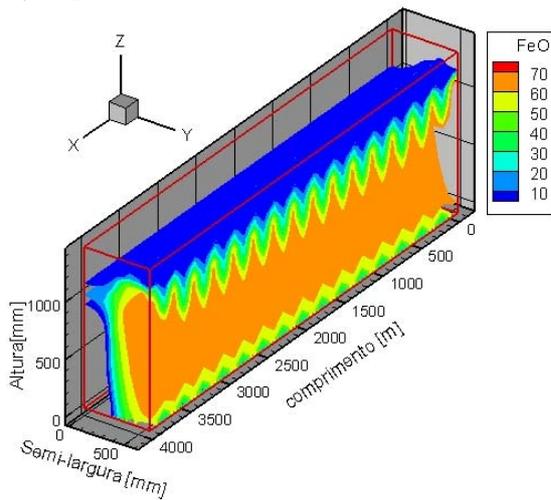
Figura 2. Evolução das temperaturas no interior do forno de auto-redução



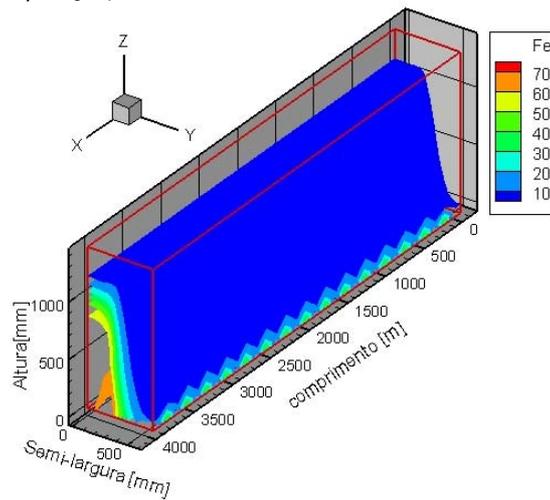
a) Fe_2O_3



b) Fe_3O_4



c) FeO



d) Fe

Figura 3. Evolução dos óxidos de ferro para as diversas etapas de auto-redução

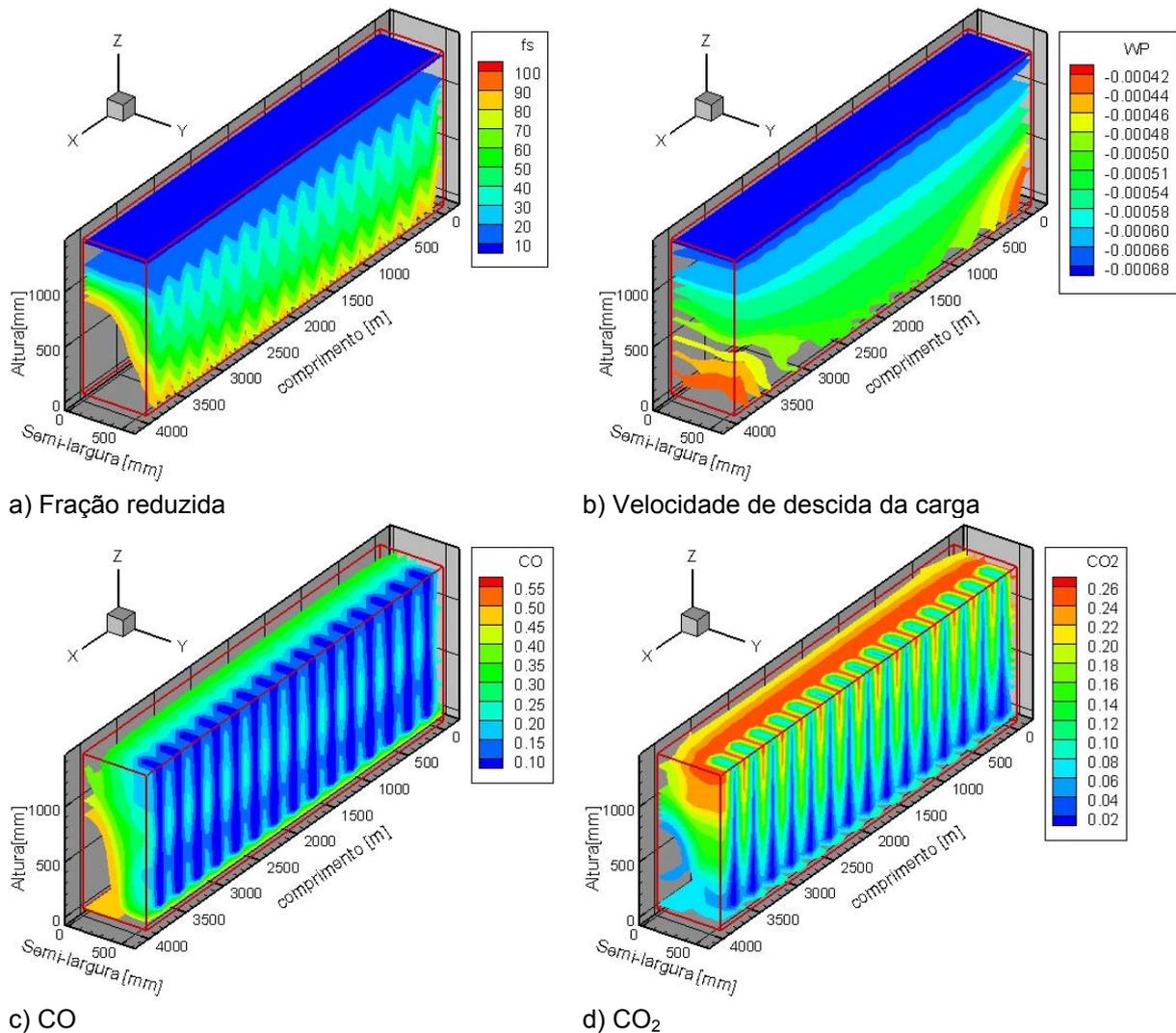


Figura 4. Condições internas de redução no forno de cuba com carga auto-redutora

Na Figura 4 apresentam-se os campos tridimensionais de fração reduzida, velocidade descendente da carga conjuntamente às condições de redução na atmosfera gasosa. A fração reduzida concentra-se na região central como resultado da atmosfera rica em CO (c), por outro lado, o CO₂ resultante da redução dos óxidos de ferro é consumido através da reação de “solution loss” e a parcela remanescente sai pelo gás de topo (d). A velocidade de descida da carga apresenta um padrão de menor velocidade junto às paredes do forno (b), não deslizando perfeitamente devido ao atrito da carga com a parede.

Parâmetros globais de funcionamento do forno calculados pelo modelo são apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5. Observa-se que altas produtividades podem ser obtidas através deste processo, embora a escala de produção ainda seja pequena quando comparada ao alto-forno, porém altas quando comparadas com processos típicos de produção de DRI.

Tabela 3. Principais parâmetros operacionais

Carga [kg/t DRI]	1555	Temperatura gás de topo [°C]	590
Produtividade [t/m ³ /dia]	34,5	Produção de gás [Nm ³ /t DRI]	4000
Produção [t/dia]	118	Injeção secundária [Nm ³ /t DRI]	1650
Tempo de residência médio [min]	35	Produção de char [kg/t DRI]	56
Grau de metalização [%]	80	CO/CO ₂	1,9

Tabela 4. Composição do gás produto

N ₂ [% vol]	O ₂ [% vol]	CO [% vol]	CO ₂ [% vol]	H ₂ [% vol]	H ₂ O [% vol]
53,4	4,5	24,5	12,8	1,69	3,10

Tabela 5. Composição química do aglomerado auto-redutor e do char granulado produzidos [%]

Briquetes produzidos											
C	voláteis	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	FeO	Fe	H ₂ O	ganga	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
4,87	-	0,47	1,01	2,42	70,3	-	-	4,32	4,22	6,18	6,18
Char granulado											
C	voláteis	H ₂ O	ganga	S	SiC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO		
84,2	-	-	7,29	-	-	3,65	-	-	4,86		

4 CONCLUSÕES

Um modelo capaz de prever de forma satisfatória o comportamento interno de um forno de auto-redução foi desenvolvido. O modelo prevê a evolução das variáveis de estado pressão, temperatura e composição química das fases presentes. O modelo prevê ainda os aspectos relevantes do escoamento do gás através da carga, bem como o movimento da carga no interior do forno e tempo de residência dos sólidos no interior do reator. Parâmetros operacionais tais como produtividade, temperatura do gás de topo e composição química dos produtos obtidos foram calculados com sucesso. Resultados de simulação indicaram que aproximadamente 70 % de grau de metalização podem ser obtidos neste processo. A produtividade do processo obtida foi de 35 t/m³/dia com um volume de gás de topo de aproximadamente 2840 Nm³/tDRI.

5 NOMENCLATURA

D- Difusividade efetiva da fase (m ² /s)	ε _i - fator de forma da fase i
d- Diâmetro médio da partícula (m)	ω _j - fração molar da fase j
M _j - Peso molecular das espécies gasosas (Kg/mol)	S _φ - Termos fonte(vários)
P- Pressão (Pa)	Sh- número de Sherwood(-)
R _i - Taxa de reação total (mol/m ³ /s)	φ _i - fração reagida do óxido de ferro
T- temperatura (K)	ρ- Densidade
α- coeficiente estequiométrico	Γ- coeficiente de transferência

REFERÊNCIAS

- 1 CASTRO, J.A., D'ABREU, J.C. e SILVA, A. J. Modelamento e Simulação Computacional por Volumes Finitos da Auto-redução na Zona Superior do Forno Tecnoed. 60th Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte MG, 19-22 de Julho (2005)
- 2 NOLDIN JR.,. Contribuição ao Estudo da Cinética de Redução de Briquetes auto-redutores, Tese de Mestrado, PUC/DCMM, Rio de Janeiro (2002)
- 3 D'ABREU, J.C., MARTINS, K. M. and JUNIOR, J.H.N. The iron morphology of self-reducing briquettes, 4th Brazil-Japan Symposium on Dust Processing-Energy-Environment in Metallurgical Industries, São Paulo 23-24, September, (2002), pp 89-102.
- 4 NOLDIN JR., PACIORNIK, S., D'ABREU, J.C., PINHO M., M.E., MAMANI P., L.J., ARI. S, M. Quantificação da Fase Ferro Metálico através de Microscopia Digital. 59° Congresso da ABM, São Paulo SP, 19-22 de julho (2004).
- 5 TAKANO, C. and MOURAO, M. B: Comparison of high temperature behavior of self-reducing pellets produced from iron ore with that of dust from sinter plant, **Isij International** (supplement) , Tokyo, v1 , n1 , p S22-S26, 2001.
- 6 CASTRO, J. A., SILVA, A. J., NOGAMI, H. e YAGI, J: Simulação Computacional da Injeção de Carvão Pulverizado nas Ventaneiras de Mini Altos-fornos. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v 1, n 2, p 59-62, out.-dez. 2004.
- 7 CASTRO, J. A., BALTAZAR, A. W. S. and SILVA, A. J: A three dimensional three phase reactive flor for simulating the pulverized coal injection into the channel of the blast furnace raceway. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, UK, v 50, n3, p 207-216, Nov., 2005.
- 8 CHU, M., NOGAMI,H., YAGI,J. Numerical analysis on charging carbon composite agglomerates into blast furnace, **Isij International**, Tokyo, v 44, n 3, p 510-517, march, 2004.
- 9 Sun, S. , Lu, W. K. , A Theoretical investigation of Kinetics and mechanisms of iron ore in an ore/coal composite, **Isij International**, Tokyo, v 39, n 2, p 123-129. Feb., 1999.
- 10 CASTRO, J. A., SILVA, A. J., NOGAMI, H. e YAGI, J: Modelo Matemático Tridimensional Multi-fásico da Geração de Dioxinas no leito de Sinterização. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v 2, n 1, p 45-49, jul.-set. 2005.
- 11 Sun, S. , Lu, W. K. , Building of a mathematical model for the reduction of iron ore in ore/coal composites, **Isij International**, Tokyo, v 39, n 2, p 130-138, Feb., 1999
- 12 SEKI, I. and NAGATA, K.: Reduction Kinetics of Hematite Powder Mechanically Milled with Graphite. **Isij International**, Tokyo, v 46, n 1, p 1-7, jan., 2006.
- 13 BONALDE, A. HENRIQUEZ, A. and MANRIQUE, M.: Kinetic Analysis of the Iron Oxide Reduction Using Hydrogen - Carbon Monoxide Mixtures as Reducing Agent. **Isij International**, Tokyo, v 45, n 9, p 1255-1260, set., 2005.
- 14 CHU, M., NOGAMI,H., YAGI,J. : Numerical Analysis on Blast Furnace Performance under Operation with Top Gas Recycling and Carbon Composite Agglomerates Charging., **Isij International**, Tokyo, v 44, n 12, p 2159-2167, dez., 2004.
- 15 IGUCHI, I and YOKOMOTO, S. : Kinetics of the Reactions in Carbon Composite Iron Ore Pellets under Various Pressures from Vacuum to 0.1MPa. **Isij International**, Tokyo, v 44, n 12, p 2008-2017, dez., 2004.
- 16 MATSUI, Y, SAWAYAMA, M. KASAI, A., YAMAGATA, Y. and NOMA, F.: Reduction Behavior of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette in Shaft Furnace and Scope on Blast Furnace Performance Reinforcement. **Isij International**, Tokyo, v 43, n 12, p 1904-1912, dez., 2003.