

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM MODELO CFD DO ALTO-FORNO¹

Eider Dutra²
Keiner Alvarenga²
José Adilson de Castro³
Paulo F. Nogueira²

Resumo

A Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) utiliza um modelo matemático baseado em Computação Fluidodinâmica (CFD) para previsão do desempenho dos produtos da CVRD nos altos-fornos dos seus clientes. Este trabalho apresenta os resultados obtidos durante o processo de incorporação, aprimoramento e validação deste modelo, bem como as conclusões sobre a sua utilização. O número mínimo de iterações para garantir a precisão necessária dos resultados foi estabelecido a partir de alterações no código e foi possível reproduzir os dados operacionais de um alto-forno real operando com 22% de pelotas, estimando-se as condições internas da carga metálica e do escoamento dos gases. A avaliação da reprodutibilidade do modelo mostrou que são obtidos os mesmos resultados para o mesmo número de iterações, para uma mesma condição simulada, independentemente do computador utilizado para realizar os cálculos. Em função disto, concluiu-se que o modelo CFD do alto-forno pode ser utilizado de forma satisfatória para prever variáveis operacionais de altos-fornos, bem como estimar as condições internas do reator.

Palavras-chave: Alto-forno; Modelagem; Validação.

DEVELOPMENT AND USE OF A BLAST FURNACE CFD MODEL

Abstract

Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) uses a mathematical model based on computational fluid dynamics (CFD) to forecast the performance of CVRD's products on clients' Blast Furnaces. This paper presents the results of the integration, improvement and validation of the Blast Furnace CFD model accomplished by CVRD and the conclusions on the use of the model. The minimum number of iterations to assure the desired precision was established after certain modifications on the code were made. It was possible to reproduce operational data of a blast furnace running with 22% pellet on the metallic burden and predict cohesive zone position, metallic burden and gas flow profiles. The reproducibility evaluation showed that for a given iteration the results obtained on different computers are the same for the same simulated condition. Due to the exposed above, the Blast Furnace CFD model can be used to predict the response to operational variables of Blast Furnaces as well as inner furnace conditions.

Key words: Blast furnace; Modeling; Validation

¹ *Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.*

² *Pesquisadores, Depto. Tecnologia e Assistência Técnica em Ferrosos - Cia Vale do Rio Doce*

³ *Professor, Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda, EEIMVR-UFF*

1 INTRODUÇÃO

O Departamento de Tecnologia e Assistência Técnica em Ferrosos da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) adquiriu um modelo matemático baseado em Computação Fluidodinâmica (CFD) para aprimorar a capacidade de previsão do desempenho dos produtos da CVRD nos altos-fornos. Os fundamentos do modelo foram publicados na literatura especializada.^(1,2)

O trabalho de desenvolvimento e validação desse modelo foi iniciado na Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento em Simulação Numérica com a entrega da primeira versão do código em linguagem FORTRAN e teve como objetivos:

- determinar o número mínimo de iterações necessárias para atingir a confiabilidade desejada dos resultados;
- avaliar a reprodutibilidade; e
- reproduzir condições operacionais de um Alto-Forno com aproximadamente 1400 m³ de volume de trabalho.

2 PROCEDIMENTO

O alto-forno é abordado como um reator multi-fase no modelo em estudo. As fases: gás, sólidos, metal e escória líquidos e carvão pulverizado, são modeladas como fluidos de acordo com a equação geral de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Cada uma dessas fases pode ser composta por um ou mais componentes com composições e características físicas próprias. A região de avaliação do modelo vai do topo da carga metálica até a interface com a escória. O esquema proposto para resolução do modelo é de acordo com o apresentado na Figura 1. As variáveis de controle operacional e os erros para alguns elementos podem ser monitorados em função do número de iterações.

Dados construtivos e operacionais do alto-forno, tais como o perfil, o número de ventaneiras, o volume de sopro, o enriquecimento do sopro a umidade do ar, a temperatura do sopro, composição química, densidade a granel e fator de forma para todas matérias primas e dados energéticos para os combustíveis e propriedades a altas temperaturas para a carga metálica, assim como a taxa de injeção de carvão pulverizado e a distribuição da carga no topo do forno são necessários para a utilização do modelo.

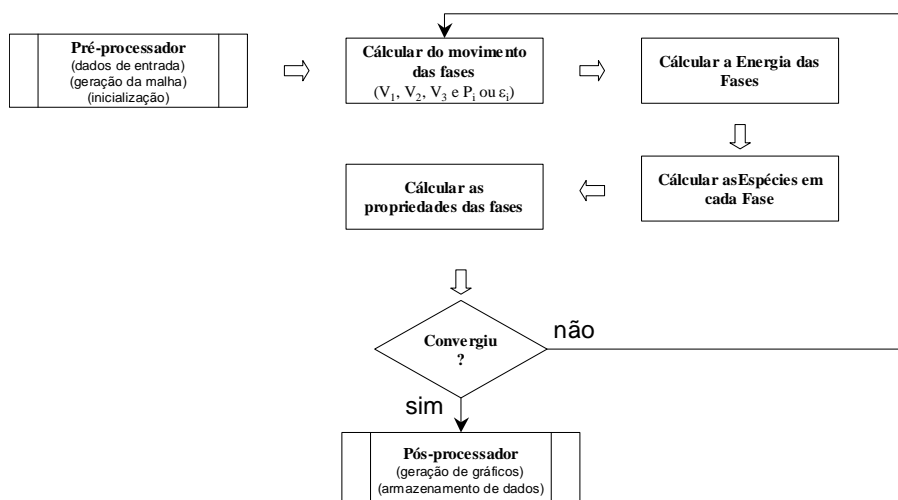


Figura 1: Esquema para resolução do modelo CFD do alto-forno.

Para a reprodução das condições operacionais foram obtidos dados de um forno em um período de operação estável com utilização de 22% de pelota na carga, por meio de uma parceria com um cliente da CVRD. Os valores para a condição operacional selecionada estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Condições operacionais selecionadas para simulação.

	Produção (kg/s)	PCI (kg/t gusa)	Coke Rate (kg/t gusa)	Volume de Sopro (Nm ³ /min)	Si no Gusa (%)	CaO/SiO ₂ na escória (-)
Caso 22% Pelota	44,0	151	306	2248	0,39	1,22

Para avaliar a reprodutibilidade do modelo foram executados os programas com os mesmo arquivos de entrada em três computadores diferentes. Essa situação foi avaliada para verificar se haveriam impactos das sub-rotinas de alocação de memória sobre os resultados do modelo em diferentes computadores ou verificar se existe qualquer aleatoriedade que poderia afetar esses resultados, uma vez que existem diversas máquinas preparadas para executar o programa. As respostas de cada uma das simulações foram comparadas.

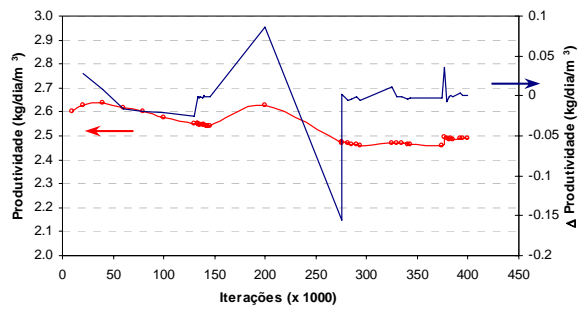
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação do número mínimo de iterações necessárias para estabilização da resposta do modelo iniciou-se com a primeira versão do modelo recebida. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2 com os resultados do modelo representados pela linha vermelha e as diferenças entre iterações sucessivas pela linha azul. Os resultados apresentados nestas figuras mostram que a resposta do modelo apresenta-se instável não havendo convergência dos resultados. Em função desses resultados foram realizadas alterações no modelo, principalmente com modificações nas restrições de relaxação. Essa relaxação controla o tamanho do passo que cada variável pode ser alterada entre as iterações.

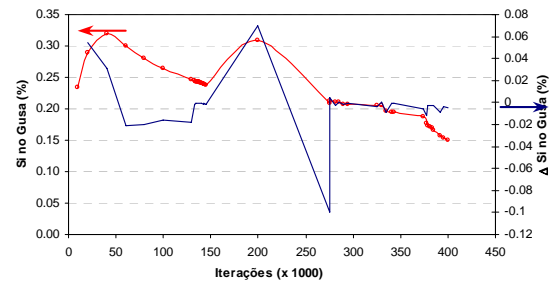
Foram realizadas alterações nos valores das relaxações para as variáveis e os resultados da nova implementação são apresentados na Figura 3. Pode-se verificar que o modelo converge de forma mais estável para a maioria das variáveis avaliadas. Entretanto, o número mínimo de iterações para garantir erros aceitáveis aumenta consideravelmente. As sub-rotinas relacionadas ao cálculo do consumo de combustíveis (coque, *small coke*, gás natural e carvão pulverizado) foram identificadas como as responsáveis pelos erros observados neste e no caso anterior. Dessa forma, alteraram-se essas sub-rotinas.

As sub-rotinas para os cálculos do consumo de combustíveis foram separadas realizando-se cálculos individuais para as reações envolvendo carvão pulverizado (PCI), coque, *small coke* e gás natural, visando melhor controle das variáveis associadas a estes componentes, e permitindo a mudança da relaxação separadamente para cada uma destas variáveis, com conseqüente aceleração da convergência.

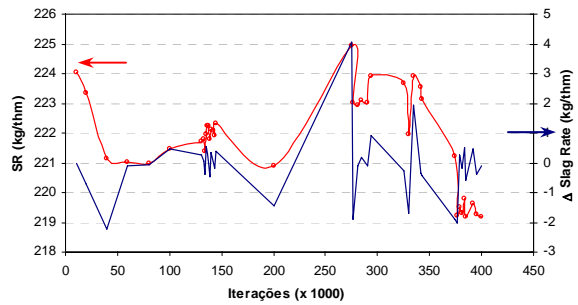
Os resultados obtidos para essas alterações são apresentados na Figura 4. Percebe-se pela análise desta Figura uma melhora na convergência do modelo. Entretanto, ajustes ainda poderiam ser realizados para reduzir as oscilações verificadas no início das simulações.



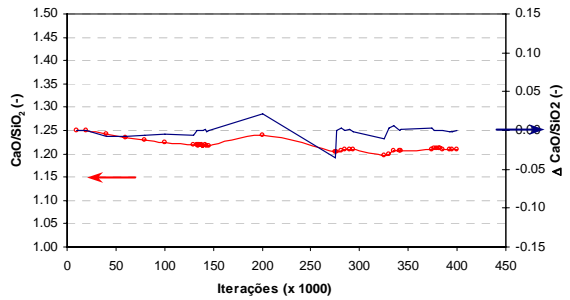
(a)



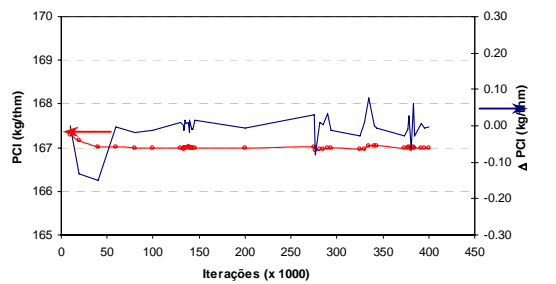
(b)



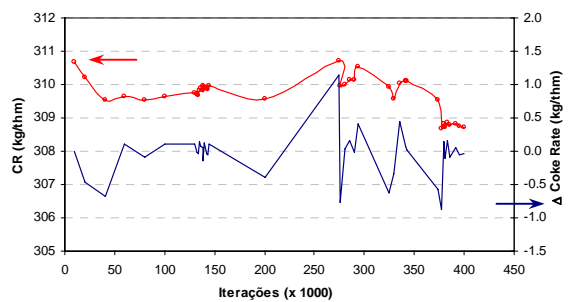
(c)



(d)



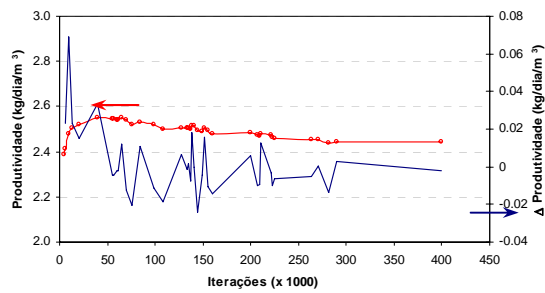
(e)



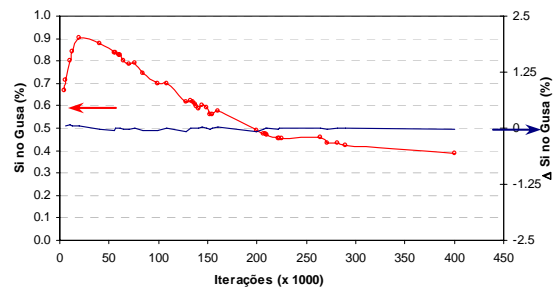
(f)

Figura 2: Evolução da resposta do modelo: (a) produtividade, (b) Si no gusa, (c) *Slag Rate* e (d) basicidade, (e) PCI e (f) *Coke Rate* para a versão recebida do código.

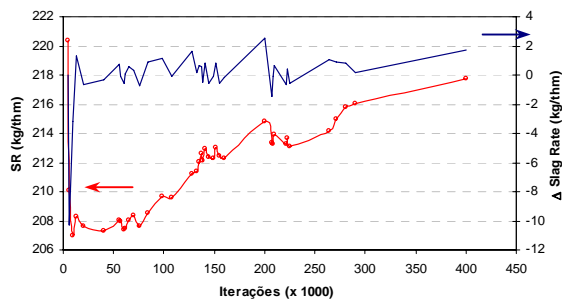
Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos após o ajuste fino das relaxações. Os resultados apresentados nestas figuras mostram que o valor atualmente utilizado de sessenta mil iterações apresenta a melhor relação entre os erros associados ao modelo e o tempo de cálculo, garantindo baixos erros entre as principais variáveis resposta do modelo. Após essas alterações este código tornou-se o padrão para simulações na CVRD.



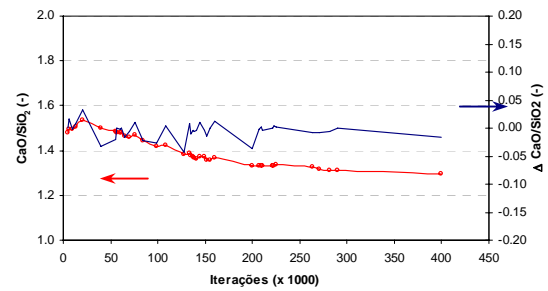
(a)



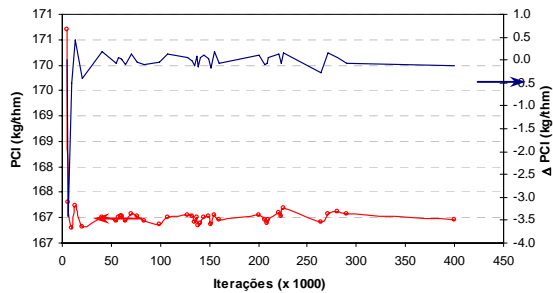
(b)



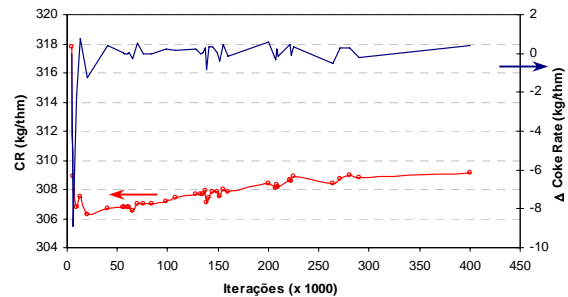
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3: Evolução da resposta do modelo: (a) produtividade, (b) Si no gusa, (c) *Slag Rate*, (d) basicidade, (e) PCI e (f) *Coke Rate* após a restrição da relaxação.

Os resultados para o primeiro teste de validação são apresentados na Tabela 2 e nas Figuras 6(a) e (b), onde T_g e T_s são as temperaturas dos gases e dos sólidos em $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Observa-se que a produção prevista pelo modelo foi menor e o teor de silício no gusa foi maior que o valor obtido industrialmente. Isto se deve simplesmente ao desajuste dos diversos parâmetros cinéticos do modelo. Neste primeiro teste utilizou-se parâmetros originalmente medidos para outro forno.⁽²⁾

Visando ajustar a incorporação de silício, ajustaram-se no modelo os parâmetros relacionados com a área de reação de redução do óxido de silício e, conseqüentemente, a incorporação do silício ao gusa. Deve-se ressaltar que estes parâmetros variam de forno para forno, podendo ser objeto de acerto para um grupo de simulações, não devendo, em hipótese alguma, ser alterado para avaliações em um mesmo alto-forno.

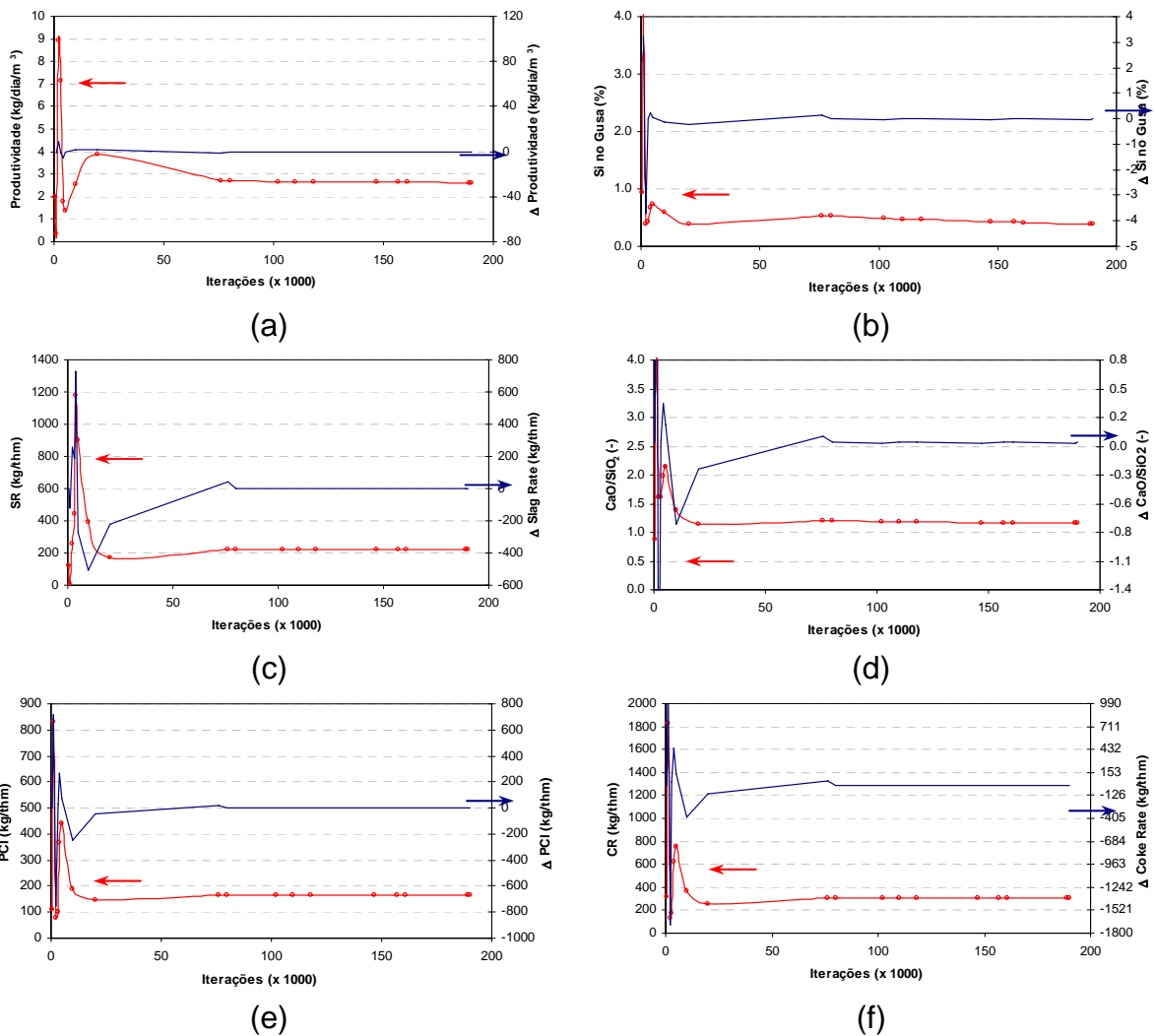


Figura 4: Evolução da resposta do modelo: (a) produtividade, (b) Si no gusa, (c) *Slag Rate*, (d) basicidade, (e) PCI e (f) *Coke Rate*, após a separação das sub-rotinas de cálculo dos combustíveis.

No entanto, este ajuste não foi suficiente para reproduzir os valores operacionais. Análises dos resultados mostram que a posição aproximada da zona de amolecimento e fusão estava elevada, refletindo uma operação diferente daquela realmente praticada. Uma das formas de se obter esta alteração é atuando-se na distribuição da carga no topo do alto-forno. Entretanto, como essa informação não é conhecida, foram propostas diversas seqüências de distribuição inicial de carga para determinar a que resultasse nos valores operacionais e de qualidade do gusa mais próximos dos dados reais do forno, na condição de análise. A distribuição de carga foi simulada de várias formas, alterando-se as frações de coque e carga metálica na parte central do reator e a distribuição individual dos constituintes da carga metálica ao longo da posição radial do reator. Os resultados para os diversos testes realizados são apresentados na Tabela 3 e mostram que em função dos dados de entrada utilizados o modelo converge para diferentes condições operacionais. Com isso foram obtidos diferentes perfis de fluxo de gases e de posicionamento da zona coesiva no interior do forno. A Figura 7 apresenta o detalhe da posição da zona de amolecimento e fusão para alguns dos testes de distribuição inicial de carga. Entretanto, nenhuma dessas condições operacionais representa o reator industrial em relação aos dados de processo avaliados.

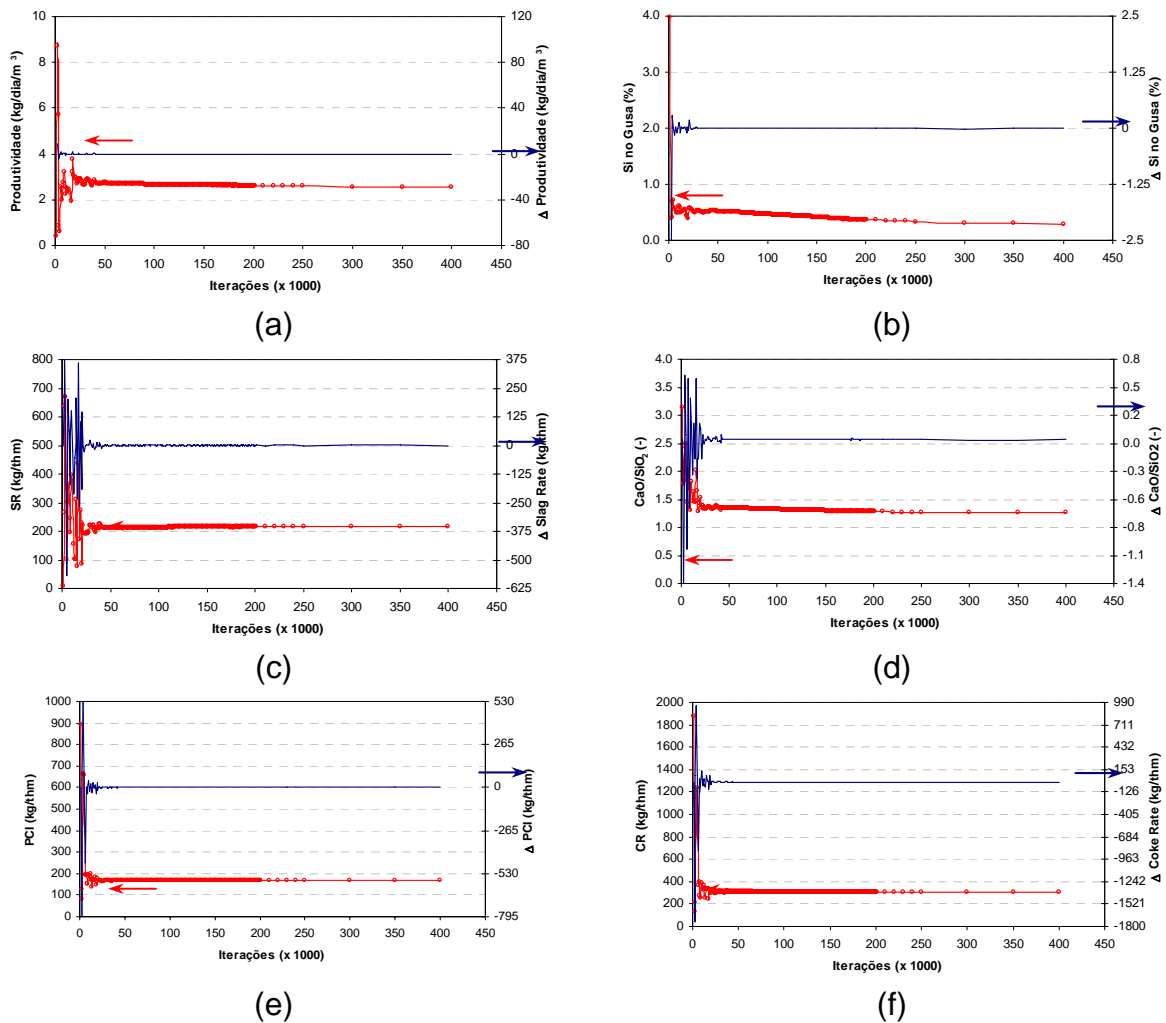


Figura 5: Evolução da resposta do modelo: (a) produtividade, (b) Si no gusa, (c) *Slag Rate*, (d) basicidade, (e) PCI e (f) *Coke Rate*, após a separação das sub-rotinas de cálculo dos combustíveis e ajuste dos coeficientes de relaxação.

Pelos resultados apresentados na Tabela 3 verifica-se que o Teste 33 foi o que mais se aproximou dos dados operacionais, com uma diferença de 9% na produção, 7% no *Coke Rate*, 1% no *Slag Rate* e 10% no Si. A zona de amolecimento e fusão para o Teste 33, apresentada na Figura 7, ficou ligeiramente inclinada, com a parte superior no centro do forno e, com a menor espessura.

Observou-se também uma eficiência de queima do PCI próxima de 100%, sendo que o normal para o modelo oscila em torno de 95%. Este erro poderia estar associado aos parâmetros de reatividade dos combustíveis utilizados e que não foram quantificados independentemente. Em função disto, executou-se novamente o Teste 33, após alguns ajustes na reatividade do carvão injetado. Os resultados são apresentados na Tabela 4. A Figura 8 apresenta o perfil térmico dos gases e posicionamento da zona de amolecimento e fusão resultantes.

Tabela 2: Comparação dos resultados reais (R) com os simulados (S).

	R	S
Produção (kg/s)	44,0	38,6
PCI (kg/t gusa)	151	149
Coke-Rate (kg/t gusa)	306	303
Volume de Sopros (Nm ³ /min)	2248	2248
Si no Gusa (%)	0,39	0,54
CaO/SiO ₂ na escória (-)	1,22	1,33

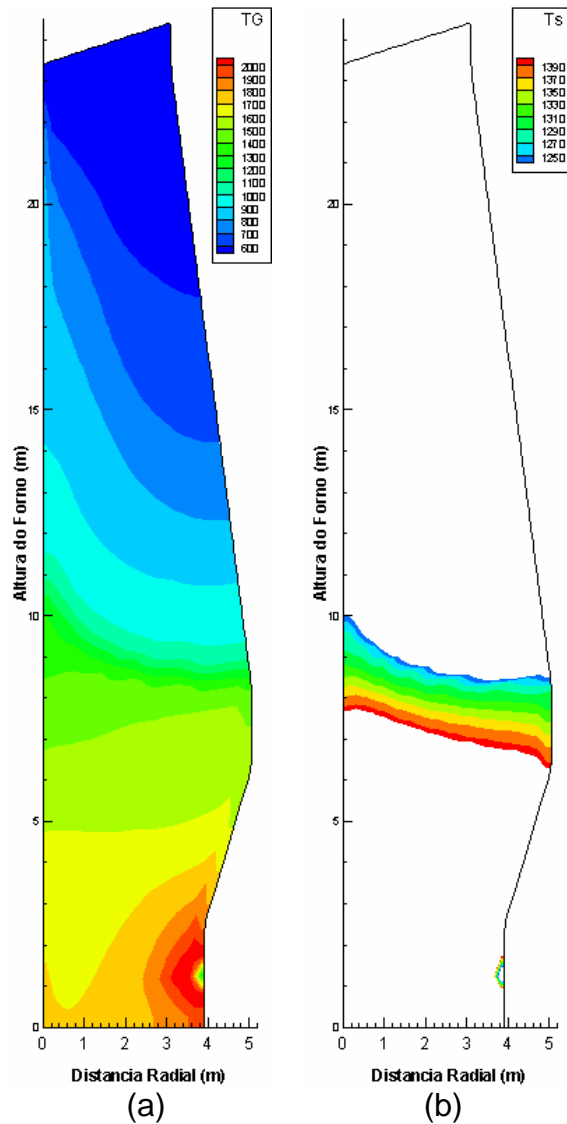


Figura 6: Comparação do perfil de temperatura dos gases (a) e posição da zona de amolecimento e fusão (b).

Nota-se que, dentro das limitações das informações recebidas, foi possível obter valores simulados próximos aos dados de operação. Entretanto, é importante lembrar que os dados operacionais utilizados nesta validação são médias de médias diárias de operação no período selecionado, expurgando-se os “outliers”, o que pode mascarar situações específicas de operação. Além disso, podem-se melhorar os resultados obtidos conhecendo-se os erros associados a cada uma das medições, bem como por meio do acompanhamento físico de um período operacional e a conseqüente obtenção de parâmetros operacionais subjetivos, como o perfil de distribuição de carga.

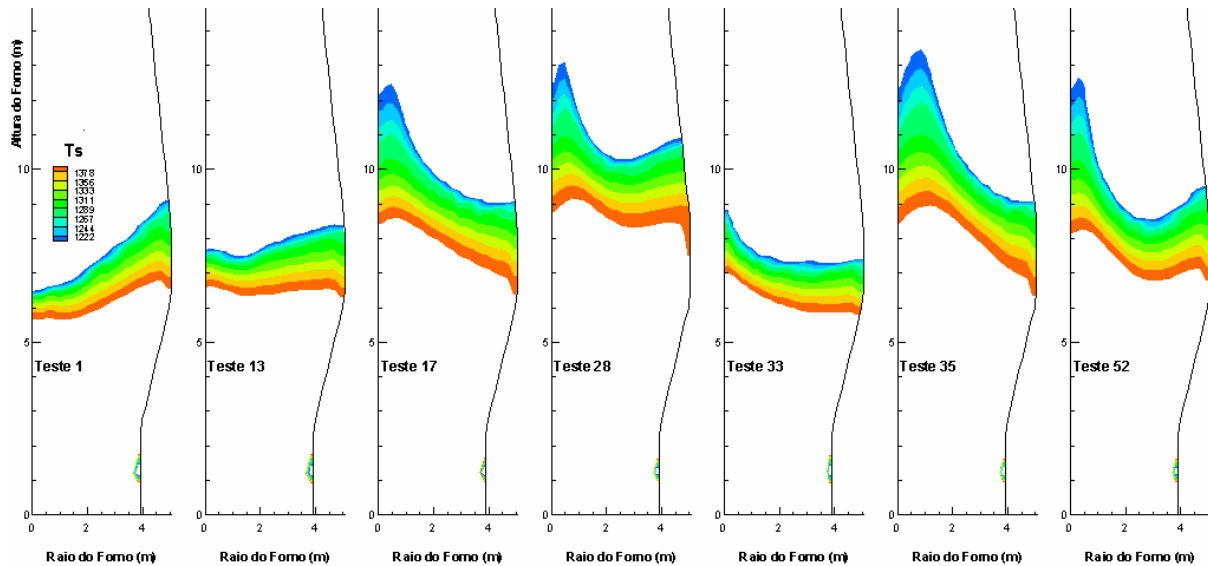


Figura 7: Comparação da posição da zona de amolecimento para alguns dos testes de distribuição de carga realizados.

Tabela 3: Resultados obtidos para alteração da distribuição inicial de carga.

	Expected Values	Testes						
		Teste-01	Teste-13	Teste-17	Teste-28	Teste-33	Teste-35	Teste-52
Hot metal parameters								
Production (kg/s)	44.00	41.01	39.33	38.30	36.90	39.97	36.04	38.58
Productivity (t/day/m ³)		2.58	2.47	2.41	2.32	2.51	2.27	2.43
Temperature (°C)		1656	1656	1664	1691	1665	1671	1664
C (%)	5.06	5.89	5.88	5.78	4.81	6.03	5.49	5.67
Si (%)	0.38	0.45	0.47	0.70	0.88	0.42	0.89	0.67
Mn (%)	0.45	0.56	0.56	0.71	0.78	0.55	0.73	0.66
Top gas parameters								
Flow (kg/thm)		1917	2000	2024	2085	1971	2125	2009
TEMP (°C)		185	186	213	230	180	240	215
CO/(CO ₂) [-]		0.71	0.71	0.78	0.84	0.70	0.89	0.80
Slag Parameters								
Slag rate (kg/thm)	253	255	273	262	241	235	254	248
Temperature (°C)		1752	1758	1777	1791	1766	1788	1777
FeO (%)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂ (%)	34.66	34.49	34.17	33.29	32.19	34.70	32.82	33.57
[CaO/SiO ₂] (-)	1.23	1.31	1.33	1.37	1.44	1.29	1.40	1.36
Fuel consumptions								
PCI Rate (kg/thm)	151	150	155	153	149	151	152	149
Cokerate (kg/thm)	306	305	317	317	314	310	332	310

Tabela 4: Resultados real (R) e simulado (S) obtidos para o ajuste final do Caso 01.

Teste 33	Produtividade (t/dia/m ³)		PCI (kg/t gusa)		CR (kg/t gusa)		SR (kg/t gusa)		Si no Gusa (%)		CaO/SiO ₂ na escória (-)	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
	2,45	2,45	151	151	306	311	253	240	0,38	0,44	1,23	1,22

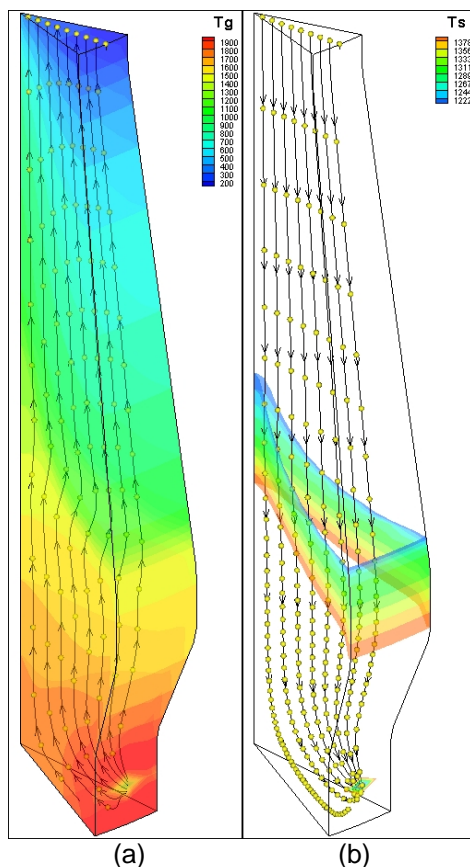


Figura 8: Perfil de temperatura dos gases (a) e posição da zona de amolecimento e fusão (b).

Finalmente, após a avaliação da precisão do modelo e da certificação da sua capacidade em reproduzir uma situação real, foi realizada uma avaliação da reprodutibilidade do modelo. Os resultados são apresentados na Tabela 6. Pode-se perceber que, para uma mesma entrada de dados e com o mesmo número de iterações, o resultado é sempre o mesmo independentemente do computador em que a simulação esteja sendo feita.

Tabela 5: Comparação entre os resultados do modelo alterando-se o computador de execução

	5K M1	5K M2	5K M3	Δ 5K M1 & 5K M2	Δ 5K M2 & 5K M3	10K M1	10K M2	10K M3	Δ 10K M1 & 10K M2	Δ 10K M2 & 10K M3
Produtividade (t/dia/m ³)	2.45	2.45	2.45	0.0E+00	0.0E+00	2.48	2.48	2.48	0.0E+00	0.0E+00
Temperatura do gusa (°C)	1700	1700	1700	0.0E+00	0.0E+00	1711	1711	1711	0.0E+00	0.0E+00
Si (%)	0.40	0.40	0.40	0.0E+00	0.0E+00	0.37	0.37	0.37	0.0E+00	0.0E+00
Queda de Pressão (atm)	0.79	0.79	0.79	0.0E+00	0.0E+00	0.79	0.79	0.79	0.0E+00	0.0E+00
SR (kg/thm)	261	261	261	0.0E+00	0.0E+00	244	244	244	0.0E+00	0.0E+00
Temperatura da escória (°C)	1807	1807	1807	0.0E+00	0.0E+00	1816	1816	1816	0.0E+00	0.0E+00
[CaO/SiO ₂] da escória	1.18	1.18	1.18	0.0E+00	0.0E+00	1.20	1.20	1.20	0.0E+00	0.0E+00
Coke rate (kg/thm)	314	314	314	0.0E+00	0.0E+00	306	306	306	0.0E+00	0.0E+00

4 CONCLUSÕES

Neste relatório foram apresentados todos os trabalhos que foram necessários para a validação do modelo CFD em um Alto-Forno com aproximadamente 1400 m³ de volume interno. As principais conclusões deste trabalho estão dispostas a seguir:

- A avaliação do número de iterações mostrou que após as alterações realizadas, é possível obter um resultado com baixo erro global (boa convergência) após cinquenta mil iterações. Para garantir a segurança dos resultados optou-se por estabelecer sessenta mil iterações como referencia para término das simulações;
- Realizou-se a validação do modelo para o Alto-Forno mencionado operando com 22% de pelotas, após ajustes de variáveis cujas informações não foram disponibilizadas, obtendo-se boa aproximação entre os dados reais e os calculados;
- A diferença entre os resultados real e simulados foi da ordem de 2% no *coke rate*, 5% no *Slag Rate*, 10% no Si do gusa e 1% para a basicidade binária da escória;
- Com os resultados obtidos é possível estimar a posição da zona de amolecimento e fusão, o fluxo gasoso dentro do reator, bem como qualquer variável de interesse para o entendimento dos fenômenos que ocorrem dentro do alto-forno; e
- A avaliação da reprodutibilidade do modelo mostrou que sempre são obtidos os mesmos resultados para uma mesma condição simulada e o mesmo número de iterações, independentemente do computador utilizado para realizar os cálculos.

Estes resultados permitem afirmar que no atual estágio, o modelo é uma ferramenta importante de apoio à missão das áreas de assistência técnica, pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- 1 Castro, J. A., Nogami, H., Jun-Ichiro, Y., *Transient mathematical model of blast furnace based on the multifluid concept, with application to high PCI Operation*, ISIJ international, vol. 40, p. 637-646, 2000.
- 2 Castro, J. A., Nogami, H., Jun-Ichiro, Y., *Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model*, ISIJ international, vol. 42, p. 44-52, 2002.