

OPERAÇÃO DO ALTO-FORNO COM ALTA TAXA DE INJEÇÃO DE PCI E CAPTURA DE CO₂¹

Emanoel do Nascimento Ferreira Junior²

Anderson Willian de Souza Baltazar³

José Adilson de Castro³

Resumo

Nos altos-fornos atuais a injeção de materiais pulverizados pelas ventaneiras combinados com outros gases tem se tornado cada vez mais importante no processo produtivo. Esta técnica viabiliza e melhora parâmetros operacionais, econômicos e até ambientais no processo, sem perdas no ritmo da produção. Neste trabalho a injeção simultânea de finos auto-redutores e CO₂ foram analisados, oferecendo resultados atrativos. A injeção de CO₂ visa controlar a temperatura da região de combustão possibilitando um aumento na injeção de PCI e conseqüentemente um aumento na produtividade. Este trabalho utiliza um modelo matemático tridimensional para o alto-forno, baseando-se em um conjunto de reações multifásicas, onde todas as fases interagem entre si trocando massa, momentum e energia. Para o estudo, quatro condições diferentes foram consideradas na simulação: (1) Caso base, operação real do forno; (2) Caso 1, injeção de 5 kg de finos auto-redutores, enriquecimento de 8,5%; (3) Caso 2, injeção de 15 kg de finos, enriquecimento de 10% e aumento na injeção de PCI em 10 kg; (4) Caso 3, injeção de 35 kg de finos, adicional de 10 kg de PCI, enriquecimento de 13%. Os resultados apresentaram um comportamento similar à operação real do alto-forno, mostrando-se, assim, compatíveis com o processo industrial.

Palavras-chave: Alto-forno; Injeção de combustíveis; Recirculação de gás; Simulação computacional.

BLAST FURNACE OPERATION WITH HIGH INJECTION RATE OF PCI AND CO₂ CAPTURE

Abstract

In the current blast furnaces the injection of powdered materials by tuyeres combined with other gases has turned most important in the process of production. This technique makes possible and improve operational parameters, economics and even environmental in the process, without losses in the production. In this work the simultaneous injection of fine self-reducing and CO₂ were analyzed, offering results attractions. The injection of CO₂ seeks to control the temperature in the combustion area that turns possible an increase in the injection of PCI and consequently an increase in the productivity. This work uses a three-dimensional mathematical model of the blast-furnace, which is based in a group of multiphase reactions, where all phases interact among them exchanging mass, momentum and energy. Four different conditions were considered for simulations. (1) Base case; real operation of the blast-furnace; (2) Case 1; injection of 5 kg of self-reducing fines, enrichment 7.8%; (3) Case 2; injection of 15 kg of fines, enrichment 10% and an increase in the injection PCI in 10 kg; (4) Case 3; injection of 35 kg of fine, additional of 10 kg of PCI and enrichment 13%. The obtained results show behavior in close agreements with real operation of the blast furnace, being shown compatible for the industrial process.

Key Words: Blast furnace; Injection of fuels; Use of gas; Computational simulation.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Estudante de Engenharia Metalúrgica – EEIMVR – UFF, ferreira_jr_1@hotmail.com .*

³ *Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica – EEIMVR – UFF, Av. dos Trabalhadores 420 – Vila Sta. Cecília – 27255-125 – Volta Redonda – RJ anderson@metal.eeimvr.uff.br .*

1 INTRODUÇÃO

Nos altos-fornos atuais as técnicas de injeção de materiais pulverizados pelas ventaneiras vêm sendo amplamente aplicadas e têm sido de grande importância para a produção do ferro gusa e para o setor siderúrgico. Com a injeção, a redução nos custos de produção (finos são mais baratos), o aumento da produtividade, a diminuição do consumo de coque e o atendimento às exigências ambientais, são fatores atrativos que determinam um estudo aprofundado nesse ramo de pesquisa.⁽¹⁾ Dentre estes estudos, uma técnica está em franca ascensão, que é a injeção múltipla de finos auto-redutores com PCI e enriquecimento do sopro com O₂.⁽²⁾ Sendo que a temperatura na região de combustão é controlada com a injeção de CO₂, recuperado dos gases gerados pelo alto-forno. Esta manutenção da temperatura possibilita um aumento na taxa de injeção de PCI, objetivando diminuir o consumo de coque nos altos-fornos, aumentando a produtividade sem acarretar perdas no desempenho operacional do alto-forno. Salienta-se também com a recuperação dos gases, uma total importância no ponto de vista ambiental, pois se reduz a emissão dos gases do efeito estufa. O enriquecimento do sopro com O₂ é uma técnica apurada e bem desenvolvida atualmente sendo utilizada em todos os casos simulados. O enriquecimento tem por finalidade compensar a perda térmica do forno causada pela substituição do coque pelos finos, finos estes que possuem um menor poder calorífico que o coque. Os finos auto-redutores utilizados na injeção são materiais compostos por finos carbonosos e finos metálicos.^(3,4) São obtidos através da recuperação de resíduos da própria siderurgia, onde os finos de carbono são provenientes dos rejeitos de fornos elétricos, por exemplo, e os finos de minério obtidos de rejeitos siderúrgicos, onde estes são aglomerados por meio de ligantes líquidos. Para a injeção, os finos são homogeneizados e em contato com os aglomerantes são micropelotizados e uma etapa de volatilização controlada dos finos carbonosos é realizada visando eliminar os mesmos do aglomerado auto-redutor. Os finos são separados por faixa granulométrica entre 100 microns - 150 microns, sendo estes utilizados no processo de injeção. É importante ressaltar a granulometria utilizada, pois uma faixa maior que 180 microns os finos não reagiriam no interior do forno, sendo arrastados pelos gases ou acumulados próximo à zona de combustão que provocaria a formação dos chamados “ninhos de pássaro”. Para estudo e cálculos, neste trabalho é apresentado um modelo matemático para o alto-forno a fim de simular e analisar a injeção simultânea dos materiais citados. Quatro condições diferentes foram consideradas na simulação: (1) Caso base, operação real do forno; (2) Caso 1, injeção adicional de 5 kg de finos auto-redutores, enriquecimento de 8,5 %; (3) Caso 2, Injeção de 15 kg de finos auto-redutores, enriquecimento de 10,5% e aumento na injeção de PCI em 10 kg; (4) Caso 3, injeção de 35 kg de finos auto-redutores, adicional de 10 kg de PCI, enriquecimento de 13% de O₂.

O modelo utilizado para os cálculos foi desenvolvido em trabalhos anteriores e baseia-se na teoria do multifluido.⁽⁵⁻⁸⁾ Fazendo com que cada fase tenha sua composição e propriedades características, considerando todas as reações entre as fases.⁽⁷⁻¹¹⁾ A fim de simular o processo no interior do reator do alto-forno cinco fases foram consideradas: gases, sólidos graúdos, metal fundido e escória fundida, finos de carvões, auto-redutores e fluxantes/agentes escorificantes pulverizados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo matemático utilizado para o estudo é tri dimensional e analisa toda a região do leito dentro do alto-forno. No sistema cinco fases são consideradas: gás, sólidos aglomerados (minério de ferro, sinter, pelota, coque), metal líquido, escória fundida e finos (carvões pulverizados e finos auto-redutores). Todas as fases consideradas são tratadas de forma simultânea, ou seja, como reações químicas multifásicas, onde todas as fases interagem entre si, trocando massa, momentum e energia. As equações constitutivas de todas interações são resolvidas simultaneamente e em código computacional desenvolvido em linguagem Fortran 90/95 utilizando a técnica de volumes finitos para a solução em uma malha não-ortogonal discretizada. Neste modelo, as equações de conservação de quantidade de movimento, energia, e espécies químicas são consideradas e acopladas com reações químicas e propriedades físicas. A equação de conservação para todas as fases é expressa via uma equação geral,⁽⁵⁻¹⁰⁾ a qual pode ser representada pela equação (1).

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

Nesta equação, Φ é a variável dependente, assumindo a componente da velocidade para as equações de momentum, energia e espécies químicas para cada fase, i representa a fase a ser considerada e k a variável da fase. O coeficiente Γ_{ϕ_i} é o coeficiente efetivo de transferência, o qual assume diferentes significados para cada variável dependente a ser resolvida. Os termos fonte S_{ϕ} surgem devidos a interações entre as fases que podem ser através de reações químicas, interações superficiais e forças externas. Cada fase é composta de um número de espécies químicas e as equações gerais de conservação são calculadas para o movimento da fase, energia e fração mássica das espécies químicas. A Tabela 1 mostra as fases consideradas no processo e suas respectivas espécies químicas.

Tabela 1: Fases e espécies químicas consideradas no modelo		
Fases	Componentes	
Gás	CO, CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , H ₂ O, N ₂ , SiO	
Sólidos	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 , CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, MnO, TiO ₂ , P ₂ O ₅
	Pelota	Fe ₂ O ₃ , CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , MnO, TiO ₂
	Coque	C, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, S ₂ , H ₂ O, Voláteis
Metal Líquido	Fe, C, Si, S, P, Mn	
Escória	FeO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, ganga	
Finos	PCI	C, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, S ₂ , ganga, voláteis
	Fluxantes	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , ganga
	Auto-redutores	FeO, Fe, C, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO

Para entendimento e melhor visualização do progresso no processo do alto-forno, quatro séries de cálculos foram selecionados e calculados. No primeiro caso (caso base), foi simulada e estabilizada a operação do alto-forno como é na indústria atual, portanto todos os seus dados serviram de parâmetros para os casos subseqüentes. Nos demais casos variaram-se o percentual de enriquecimento de O₂, quantidade de injeção dos finos, auto-redutores e PCI, e quantidade de injeção de CO₂. Todos os casos utilizaram como carga metálica 20% sinter e 80% pelota. As variações dos valores dos parâmetros operacionais de entrada comparados ao caso base podem ser visualizadas na Tabela 2.

Parâmetros Analisados	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Enriquecimento de O₂ no sopro	6,5	8,5	10,5	13,5
Injeção de finos auto-redutores kg/t	-	5,0	15	30
Injeção de CO₂ kg/s	-	0,75	1,5	3
Injeção de PCI kg/t	94	94	104	114

Os valores controlados para validação dos casos analisados, foram o percentual de Si no gusa entre 0,2-0,3, basicidade (CaO/SiO₂) entre 1,2-1,3, temperatura de gás e taxa de coque. Sendo que a temperatura do gás foi controlada com a injeção de CO₂, obedecendo a uma variação máxima de até 100 °C. A produtividade também recebeu uma atenção visto que era esperado seu aumento gradativo em todos os casos posteriores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo de monitorar a temperatura da região de combustão do alto-forno com a injeção de CO₂, permite uma maior estabilidade no ritmo de trabalho do forno. Assim tendo como base os dados do caso real de operação do alto-forno (caso base) e com o controle da temperatura do gás na região de combustão, isso possibilitou uma maior injeção de finos auto-redutores e PCI. Conseqüentemente esta maior injeção com um aumento do enriquecimento do sopro com oxigênio nos forneceu um aumento da produtividade do alto-forno. Oxigênio este, que tem por objetivo compensar a perda térmica no forno, causada pela substituição do coque carregado pelo topo do forno pela injeção de finos que possuem menor poder calorífico que o coque. Pôde-se observar também, uma diminuição na taxa de consumo de coque por tonelada de metal líquido produzido, devido a esta substituição.

Depois de realizadas as simulações, deram-se maiores prioridades á análise dos principais parâmetros operacionais de saída do alto-forno, sendo estes os mais utilizados e mais críticos na siderurgia em si. Na tabela 3 são apresentados os casos calculados com seus respectivos resultados. Os primeiros resultados apresentados na tabela 3 são referentes ao caso base, onde ajustes foram feitos para obtenção de parâmetros mais próximos do processo na realidade. Os dados obtidos são os da operação real do alto-forno e serviram de base para todos os casos posteriores. O caso base mostrou-se estável e com excelentes valores para comparações em futuras alterações nos valores de saída dos casos simulados subseqüentes.

Tabela 3: Parâmetros operacionais de saída dos casos calculados				
Parâmetros operacionais	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Produtividade (t/dia/m³)	2,12	2,19	2,26	2,31
Teor de Si no gusa (%)	0,26	0,20	0,22	0,22
Basicidade (CaO/SiO₂)	1,25	1,25	1,26	1,28
Taxa de carvão pulverizado (kg/t)	93,90	93,99	103,94	113,89
Coke rate (kg/t)	416,55	414,51	408,78	395,65
Enriquecimento de oxigênio (%)	6,57	8,76	10,94	13,67
Temperatura gás (°C)	2144,62	2166,32	2211,20	2235,32
Taxa de combustível (kg/t)	510,45	510,43	518,51	523,03
Volume Injetado (Nm³/t)	-	3,12	6,04	11,79

Considerando os valores de saída, tem-se na Figura 1 os principais parâmetros globais analisados em cada caso, especialmente àqueles correlacionados à produtividade e ao comportamento do forno com as múltiplas injeções. A priori, observou-se um aumento de 10% na produtividade do caso 3 comparado ao caso base (Figura 1a). Este aumento pode ser explicado por vários fatores, um deles é pelo enriquecimento do oxigênio no volume de ar soprado, com o objetivo de compensar a perda térmica do alto-forno causada pela substituição do coque pelos finos. Outro fator interessante a ser citado é pelo aumento da injeção de PCI, conseqüente da manutenção da temperatura na zona de combustão com injeção de CO₂. Um dos parâmetros que serviram para análise e para validação dos casos simulados foi o teor de silício no gusa líquido. O teor de silício manteve-se estável e dentro da faixa esperada de 0,2-0,3 (Figura 1b). Isto se explica porque a reação de incorporação do silício é endotérmica, ela consome energia. Assim, quanto maior a temperatura no leito maior o percentual de Si no gusa, como a temperatura foi controlada com a injeção de CO₂, a quantidade de Si manteve-se dentro do esperado. Como citado acima, a temperatura foi controlada com a injeção de CO₂, obedecendo a uma variação máxima de até 100°C entre o caso base sem nenhuma injeção de CO₂ e o caso 3 com uma injeção de 3 kg/s (Figura 1c). Em escala industrial pode-se parecer um valor pequeno para injeção, porém com a reação de redução do CO₂ em CO na zona de combustão este valor toma proporções consideráveis em nível de volume injetado, chegando no trabalho a um valor de até 12 Nm³/t_{gusa} (Figura 1d). Com a injeção de finos, com altos percentuais de carbono em suas composições era evidente esperar uma diminuição significativa do consumo de coque entre os casos (Figura 1e). Esta redução no consumo se deu pela substituição do carbono do coque correspondente a porcentagem de carbono dos finos auto-redutores injetados. Os finos possuem menor poder calorífico que o coque, assim a necessidade do enriquecimento do sopro com oxigênio para suprir esta perda térmica causada pela substituição do coque. O enriquecimento também visa substituir o nitrogênio pelo oxigênio no sopro, isto ocorre porque o nitrogênio consome calor, assim o enriquecimento de oxigênio tende a causar uma redução no consumo de energia causada pelo nitrogênio.

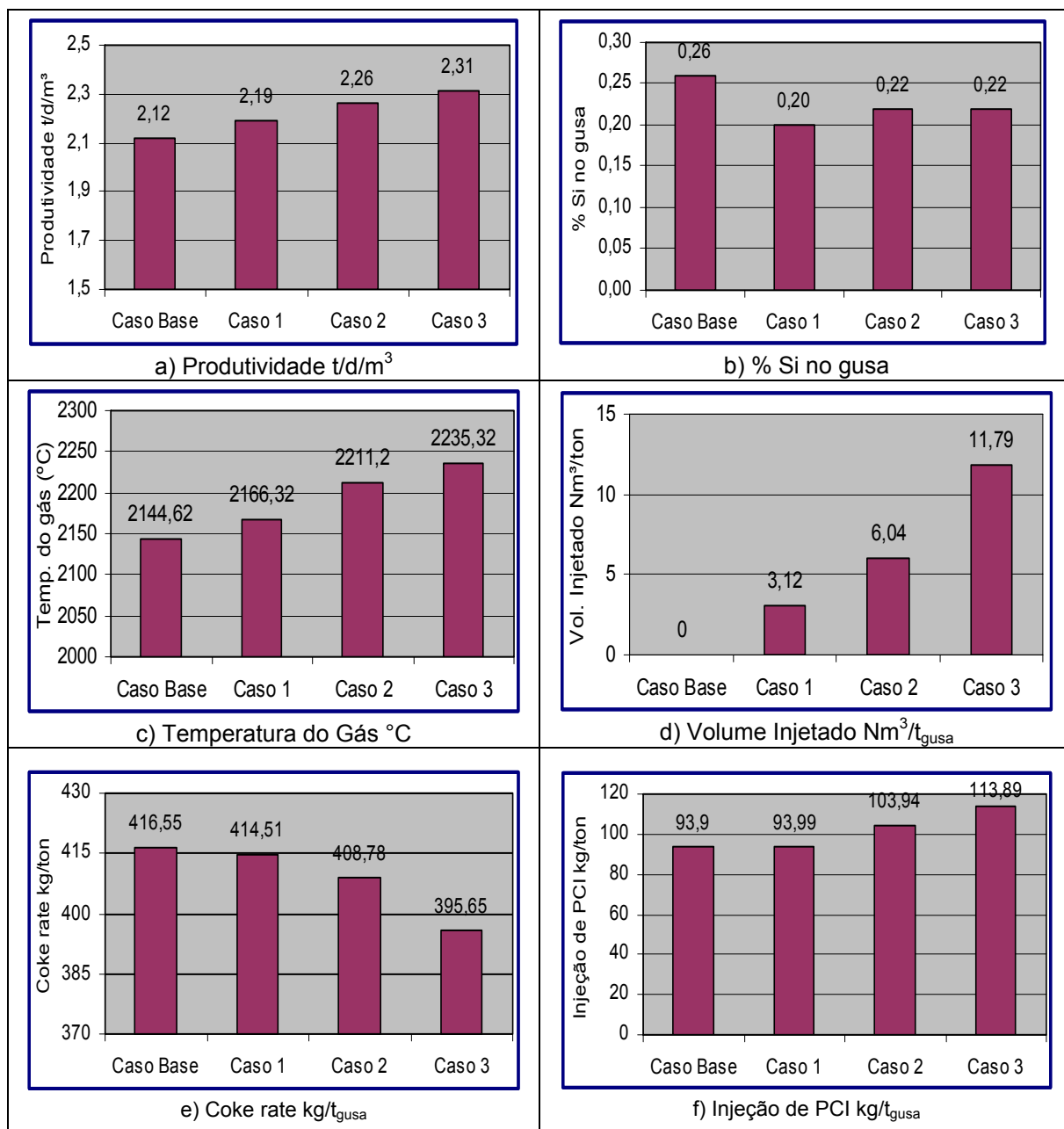


Figura 1: Parâmetros globais analisados

Na Figura 2 são apresentados os campos de temperaturas no interior do leito do alto-forno para os quatro casos analisados. Para a situação de pequena injeção de material auto-redutor pela ventaneira (Figura 2b/caso 1), não houve alteração do campo de temperatura, pois 5 kg/t representa uma pequena contribuição no ritmo de produção do forno e conseqüente substituição de aproximadamente 1kg/t de coque, não necessitando de significativo aumento do oxigênio. Para os casos 2 (Figura 2c) e 3 (Figura 2d) era esperado um abaixamento da zona coesiva, visto que a substituição do coque pelos finos foi em maior quantidade diminuindo assim as espessuras das janelas de coque que se formariam. Porém não ocorreu este abaixamento, isto se deve porque a injeção de oxigênio adicional promoveu uma recuperação da temperatura inferior do forno junto com a injeção de CO₂, sendo estes dois fatores fundamentais para manutenção da região. Possibilitaram assim, uma maior injeção de finos auto-redutores e PCI sem perdas na produção e manteve estável a temperatura no interior do forno. Tais situações representam,

portanto, uma condição operacional possível e com excelentes resultados, embora ainda não consolidada em escalas industriais.

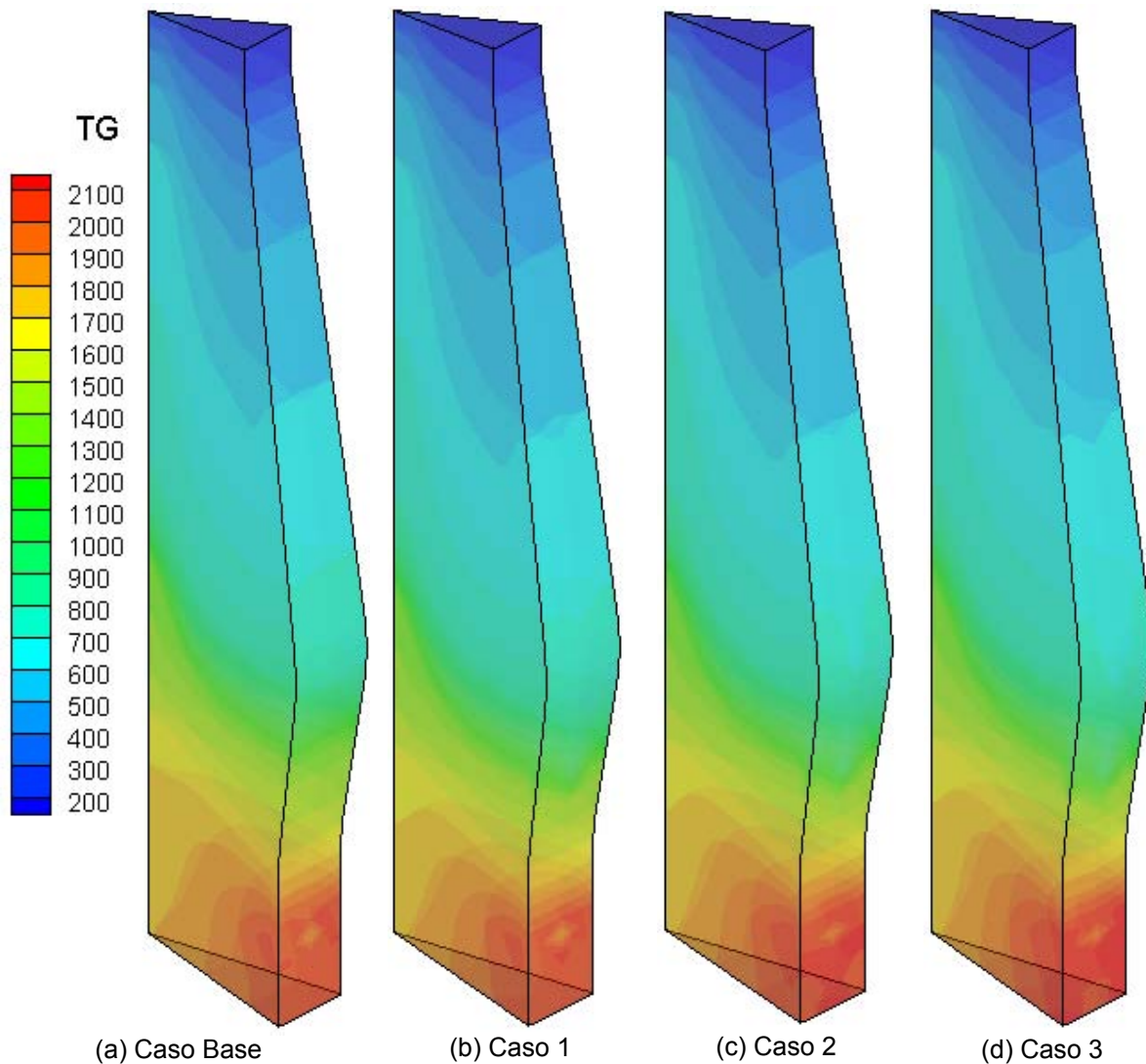


Figura 2: Perfil térmico do forno para os casos simulados.

Para objetivos de comparações, são apresentados na Figura 3 os gráficos representativos de cada caso considerado, as temperaturas das fases ao longo do leito do alto-forno são apresentadas. O caso base na altura de aproximadamente 9 metros ao longo do forno mostra valores maiores de temperatura, quando comparado aos outros casos. Isto se deve ao fato de todos os outros casos receberem a injeção de CO₂ com o intuito de se controlar a temperatura na região. Devido a isto, é perceptível a manutenção da temperatura em todos os outros casos demonstrando uma variação mínima entre os valores de temperatura. Fato este que demonstra e justifica o uso da ferramenta computacional, pois os resultados obtidos concretizam, assim, o objetivo do trabalho.

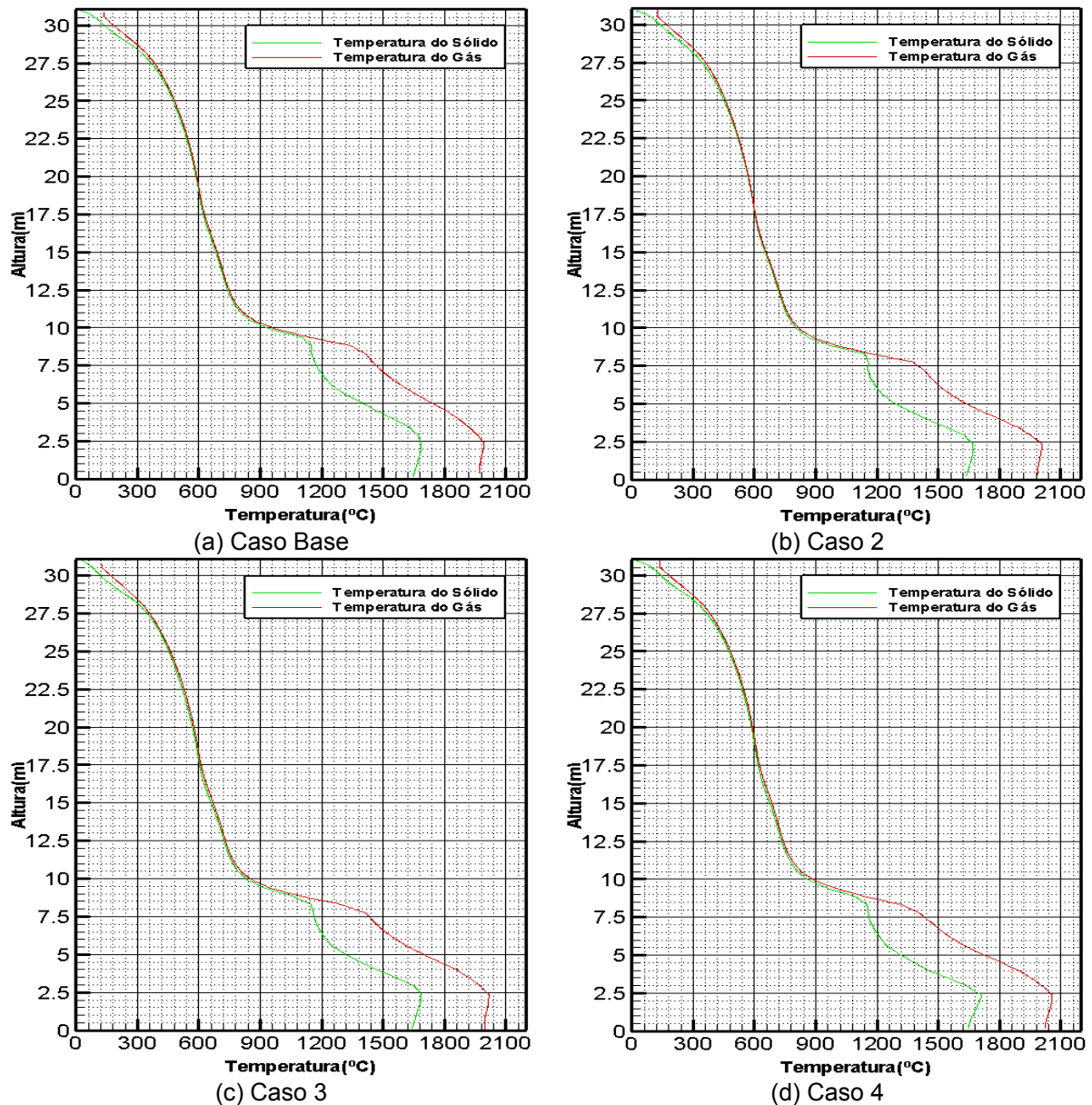


Figura 3: Comparação do perfil de temperatura das fases para cada caso.

5 CONCLUSÕES

O modelo mostrou-se capaz de analisar o desempenho do alto-forno com a múltipla injeção de PCI, finos auto-redutores e CO_2 . As injeções destes materiais com o enriquecimento do sopro com oxigênio nos deram resultados satisfatórios tais como: I) Aumento da produtividade em 10 % (2,12 para 2,31 t/d/m³), II) Diminuição do consumo de coque por tonelada de metal líquido produzido (416,55 para 395,645), III) Estabilidade do alto-forno trabalhando a múltiplas injeções pelas ventaneiras, IV) E como o propósito inicial, pode-se controlar a temperatura com a injeção de CO_2 possibilitando um aumento na injeção PCI sem perdas no ritmo de produção com aumento da produtividade.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da EEIMVR que forneceu toda infra-estrutura para desenvolvimento da pesquisa, ao CNPq e a Capes por fomentar e incentivar o desenvolvimento tecnológico.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSIS, P. S., OLIVEIRA G. M., OLIVEIRA V. A., CÂDIDO L. S., "Estudo do Fluxo de Materiais Pulverizados em Simulador de Injeção de Ventaneiras de Altos-Fornos através de Vídeo-Fotografia", *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.3, n.4, abr.-jun. 2007.
- 2 CASTRO J. A., NOGAMI H. & YAGI J., "Numerical Analysis of Multiple Injection of Pulverized Coal, Reduced Iron Ore and Flux with Oxygen Enrichment to the Blast Furnace", *ISIJ Int.*, 41 (2001), 18.6.
- 3 SUN, S.; LU, W.K. "A theoretical investigation of kinetics and mechanisms of iron ore an 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., et al., "Estudo do comportamento do alto-forno operando com injeções auxiliares de carvões mineral e vegetal pulverizado" *Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas*, 2006.
- 6 CASTRO J. A., NOGAMI H. & YAGI J., "Numerical Investigation of Simultaneous Injection of Pulverized Coal and Natural Gas with Oxygen Enrichment to the Blast Furnace", *ISIJ Int.*, 42 (2002), 1203.
- 7 CASTRO J. A., NOGAMI H. & YAGI J., "Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high PCI operation", *ISIJ Int.*, 40 (2000), 637.
- 8 YAGI J., "Mathematical Modeling of the Flow of Four Fluids in a Packed Bed", *ISIJ Int.*, 33 (1993), 619.
- 9 AUSTIN P. R., NOGAMI H. & YAGI J., "A mathematical model for blast furnace reactions analysis based on the four fluid model", *ISIJ Int.*, 37 (1997), 748.
- 10 CASTRO J. A., NOGAMI H. & YAGI J., "Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based on the Multi fluid Model", *ISIJ Int.*, 42 (2002), 44.
- 11 CHU M., NOGAMI H., & YAGI J., Numerical analysis on charging carbon composite agglomerates into blast furnace, *ISIJ Int.*, 44 (2004), 510.