

# SIMULAÇÃO DA COMBUSTÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM REATOR TUBULAR NAS CONDIÇÕES DAS VENTANEIRAS DO ALTO-FORNO

Anderson Willian de Souza Baltazar <sup>1</sup>

José Adilson de Castro <sup>1</sup>

Alexandre José da Silva <sup>1</sup>

## Resumo

A injeção de carvão pulverizado através das ventaneiras é uma boa maneira de substituir coque e manter a estabilidade de um alto-forno. Esta técnica abriu opções para usar matérias-primas de menor valor agregado que o coque, insumo que no Brasil é importado. Desde o surgimento da técnica, esforços têm sido feitos para reduzir o uso de coque, substituindo-o por carvões menos nobres, reduzindo custos na produção do aço. Este trabalho propõe a simulação da injeção de carvão utilizando um modelo matemático bifásico em 3 dimensões. O movimento relativo, a energia e espécies químicas das fases são modelados por equações de transporte. As interações das fases utilizam correlações semi-empíricas e as equações de transporte são resolvidas baseadas no método de volumes finitos em malha não ortogonal. A solução computacional é feita em código desenvolvido em Fortran 90/95. No modelo, as taxas de reações químicas provêm da literatura e as constantes são ajustadas para representar o processo industrial. Os resultados obtidos para temperatura e composição mostraram-se em excelente concordância com dados experimentais. Os resultados do modelo para simular o canal adutor da raceway mostraram-se condizentes com apresentados em escala industrial.

**Palavras-chave:** Ventaneiras; PCI; Modelo matemático; Simulação computacional.

## SIMULATION OF THE COMBUSTION OF PULVERIZED COAL IN TUBULAR REACTOR UNDER BLAST FURNACE RACEWAY CONDITIONS

### Abstract

The pulverized coal injection is a good manner not only to substituting coke, but also for keeping the blast furnace stability. The injection of particulated raw material is performed by tuyere. This technique allowed the utilization of raw materials with lower cost than coke, which in Brazil is imported. Since this technique appeared several efforts have been made to minimize coke consumption by replacing the coke by another fuels, such as the lower rank coals. This work deals with the simulation of coal injection using a mathematical model in 3D. The model uses a two phase system, where the movement, heat and chemical species are described by transport equations and solved using the finite volume method in a non orthogonal grid. The chemical kinetic rates were adapted from literature and had constants adjusted to represent the industrial process. The results of temperature and composition showed closed agreement with experimental data. The results of the model to simulate the raceway channel revealed good agreement with industrial results.

**Key words:** Tuyere; PCI; Mathematical modeling; Computational simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos anos recentes o comportamento das reações do carvão tem sido objetos de muitos estudos, sobretudo na indústria siderúrgica, devido à importância do aço na sociedade.<sup>(1)</sup> Este fato deve-se ao aumento do uso de carvões de diferentes origens e classes nos processos industriais.<sup>(2)</sup> Fato este, que elevou gradualmente os estudos em altos-fornos, para buscar um melhor desempenho e maior produtividade, visto que a maior parte do aço produzido no mundo provém deste processo.<sup>(2)</sup> Os estudos dos fornos visam um melhor controle do processo, reduzindo

perdas de matérias-primas e redução do impacto ambiental. Na busca por essas melhorias, a injeção de carvão pulverizado (PCI) é uma técnica complementar importante. Esta técnica abriu as opções de materiais que podem ser utilizados no processo reduzindo custos, além de assegurar a estabilidade da operação. A técnica permite o uso de materiais com qualidade inferior ao coque. Os carvões injetáveis devem obedecer a limitações quanto às suas propriedades para uso no processo. No tocante às propriedades reque-

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

ridas para utilização no alto-forno, as limitações do teor de cinzas em torno de 10% e baixo teor de enxofre são as variáveis críticas.<sup>(3)</sup> O presente trabalho visa determinar o potencial de utilização de carvões fazendo uso de um modelo matemático e da simulação computacional. O desenvolvimento consiste em um modelo capaz de considerar as propriedades e a fenomenologia envolvida no processo de combustão gás-sólido. A finalidade é obter resultados do comportamento de carvões na região das ventaneiras de um alto-forno, através da simulação de um ensaio de combustão. A simulação propõe uma ferramenta capaz de auxiliar na identificação de matérias-primas para injeção sem que para isto seja necessário um alto investimento em experimentos. O modelo utiliza dados experimentais da literatura.<sup>(4-6)</sup> Após a simulação do ensaio de combustão, o modelo foi expandido para uma geometria representativa do canal adutor da raceway de um alto-forno.

## 2 MODELAMENTO

O modelo consiste em se formular os fenômenos que ocorrem no interior do reator em um sistema de duas fases que interagem entre si transferindo "momentum", massa e energia. Este pode ser formulado em termos de equações de transporte, que são resolvidas em um domínio discretizado pela técnica de volumes finitos aplicada a uma malha não ortogonal. Os fenômenos de transferência de calor, "momentum" e massa no interior do reator são representados pela equação geral de transporte (eq.1). O coeficiente de transferência ( $\Gamma_{\rho}$ ) assume diferentes significados conforme a equação a ser resolvida. Nos termos fontes ( $S_{\rho}$ ) estão os acoplamentos entre as fases, tais como: transferência de "momentum", energia e massa por processos que envolvem reações químicas. Os modelos de transferência de "momentum", energia e massa foram coletados da literatura a partir de trabalhos anteriores sobre o processo reacional em altos-fornos.<sup>(5-6)</sup>

$$\frac{\partial(\rho c A_{\rho})}{\partial t} + \text{div}(\rho c \vec{v} A_{\rho}) = \text{div}(\Gamma_{\rho} \text{grad}(\phi_{\rho})) + S_{\rho} \quad (1)$$

As fases consideradas neste modelo específico são: carvão pulverizado (PCI) e gás. Na Tabela 1 estão as espécies químicas que são resolvidas para cada uma das fases. O modelo contempla a análise de um reator tubular utilizado por KHAIRIL<sup>(4)</sup> para a verificação do comportamento da queima de carvão Figura 1. A região em análise pode ser vista na malha de volumes finitos mostrada na Figura 2.

No modelo fontes de massa surgem devido às reações químicas e transformação de fases. As reações químicas são modeladas utilizando modelos cinéticos da literatura.<sup>(5-6)</sup> A oxidação do carbono ocorre de duas formas, uma parcial produzindo CO e outra total que produz CO<sub>2</sub>. As reações de Boudouard ("solution loss") e a reação de gás d'água consomem carbono ocorrendo na faixa de temperatura de 900°C. A reação na fase gasosa é a responsável por restabelecer o equilíbrio entre carbono e hidrogênio. O consumo da matéria volátil é decorrente de duas reações com O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, a estequiometria das reações dos voláteis depende da composição de matéria volátil.<sup>(5)</sup> O modelo contempla ainda as reações do silício, que são reações de redução, importantes por serem endotérmicas e causarem um resfriamento na temperatura do reator. As composições dos carvões testados estão mostradas na Tabela 2.<sup>(1,4)</sup>

Os parâmetros operacionais utilizados para o experimento e para a simulação estão na Tabela 3.<sup>(1,4)</sup>

O detalhamento das reações consideradas e respectivas taxas são mostrados a seguir.<sup>(1,5)</sup>

Tabela 1. Espécies químicas e fases do modelo.

Fases	Componentes
Gás	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , SiO
PCI	C, SiO <sub>2</sub> , Voláteis, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO, CaS, S, FeS, FeS <sub>2</sub>

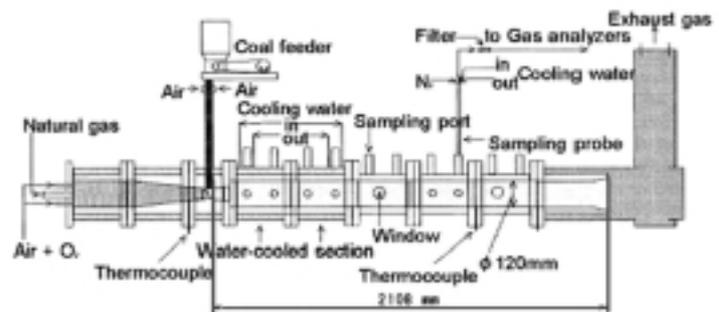


Figura 1. Modelo do reator utilizado por Khairil.<sup>(4)</sup>

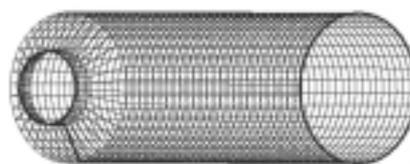


Figura 2. Malha de volumes finitos considerada para simular o reator tubular.

Tabela 2. Propriedades dos carvões testados por Khairil.<sup>(5)</sup>

Carvões	Cinzas	A	B	C	D	E
		voláteis	2,70	6,50	10,50	7,30
Análise (média)		41,20	34,00	18,90	34,90	26,90
(massa seca)	C fixo	56,10	59,50	70,60	57,90	64,90
Razão de combustível		1,38	1,75	3,74	1,68	2,45
Análise elemental (% massa seca livre de cinzas)	C	75,10	83,60	88,40	84,47	86,01
	H	5,20	4,80	4,70	5,29	4,49
	N	1,50	2,20	0,80	7,87	7,99
	SiO <sub>2</sub>	50,00	37,60	43,40	59,43	48,37
Cinza (% massa na cinza como óxido)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,80	31,60	26,90	28,00	22,79
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,70	3,80	9,10	7,88	6,40
	MgO	1,50	2,40	7,50	1,14	0,83
	CaO	1,80	10,60	1,30	1,29	1,05

Tabela 3. Parâmetros usados no experimento por Khairil<sup>(4)</sup> e nas simulações.

Variáveis	Temp. (K)	Veloc. (m/s)	Razão de O <sub>2</sub>	Conc. O <sub>2</sub> (%)	Tempo de residência (s)
Gás	1300, 1500	20	1,2; 0,8	21	-
PCI	300	10	-	-	0,01

### Combustão

(1)	$C_{FC} + 1/2O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)}$
(2)	$C_{FC} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$
$R_{(1)FC} = \frac{a}{1+a} R_{ave}; R_{(2)FC} = \frac{1}{1+a} R_{ave}; R_{ave} = \left( \frac{\varepsilon_g \rho_g \omega_{O_2(g)}}{M_{O_2}} \right) \left\{ \frac{d_i \varphi_i}{A_i D_{O_2, O_2}^{T_{ave}}} Sh_i + \frac{1}{\eta k_{ave}} \right\}^{-1}$	
$a = 2500 \exp\left(-\frac{12400}{1.987T_i}\right); k_{ave} = 7260RT_g \exp\left(-\frac{17980}{T_{ave}}\right)$	

### Boudouard "Solution Loss"

(3)	$C_{FC} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$
$R_{(3)} = \frac{\rho_g \omega_{CO_2(g)}}{M_{CO_2}} \left( \frac{1}{A_i k_{film, CO_2}} + \frac{1}{\eta k_{(3)}} \right)^{-1}$	
$k_{(3)} = \frac{k_1}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}} \rho_i \varepsilon_i \omega_i, 82,056 \times 10^{-3} T_g; k_1 = \frac{1}{60} \exp\left(19,875 - \frac{66350}{1,987T_i}\right);$	
$k_2 = \exp\left(-6,688 + \frac{21421}{1,987T_i}\right); k_3 = \exp\left(31,615 - \frac{88168}{1,987T_i}\right); k_{film, CO_2} = D_{CO_2, N_2}^{T_{ave}} \frac{Sh_i}{d_i \varphi_i}$	

### Reação com gás d'água

(4)	$C_{FC} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_2_{(g)}$
$R_{(4)} = \frac{\rho_g \omega_{H_2O(g)}}{M_{H_2O}} \left( \frac{1}{A_i k_{film, H_2O}} + \frac{1}{\eta k_{(4)}} \right)^{-1}$	
$k_{(4)} = \frac{k_4}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2} + k_5 P_{H_2O}} \omega_{CO} \rho_i \varepsilon_i, 82,056 \times 10^{-3} T_g; k_{film, H_2O} = D_{H_2O, N_2}^{T_{ave}} \frac{Sh_i}{d_i}; k_2 = 10,3 \frac{M_{H_2O}}{M_{CO}};$	
$k_3 = \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} \exp\left(14,24 - \frac{18350}{T_i}\right); k_4 = \frac{1}{3600M_c} \exp\left(22,35 - \frac{26320}{T_i}\right); k_5 = \exp\left(29,59 - \frac{36760}{T_i}\right);$	

### Reação "Water gas shift"

(5)	$CO_{2(g)} + H_{2(g)} \leftrightarrow CO_{(g)} + H_2O_{(g)}$
$R_{(5)} = \frac{1000}{(101325)^2} \varepsilon_i (f_{FC}) k_{(5)} \left( P_{CO} P_{H_2O} - \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{k_{(5)}} \right)$	
$P_{O_2} = \frac{82,056 \times 10^{-3} \rho_g T_g \omega_{O_2}}{M_{O_2}}; k_{(5)} = \exp\left(-3,5414 + \frac{3863,7}{T_i}\right); k_1 = 93,3 \exp\left(\frac{-7,32}{8,3146 \times 10^{-3} T_g}\right)$	
$k_{(5)} = \alpha k_1 + (1 - \alpha) k_3; k_2 = 136 \exp\left(\frac{-7,75}{8,3146 \times 10^{-3} T_g}\right); k_{(5)} = [\alpha k_2 + (1 - \alpha) k_4] k_{(5)}$	
$k_3 = 1,83 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{7,84 \times 10^{-3}}{8,3146 \times 10^{-3} T_g}\right); k_4 = 8,83 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{4,56}{8,146 \times 10^{-3} T_g}\right)$	

### Combustão dos Voláteis

(6)	$Voláteis_{(PC)} + \alpha_1 O_{2(g)} \rightarrow \alpha_2 CO_{2(g)} + \alpha_3 H_2O_{(g)} + \alpha_4 N_{2(g)}$
	$R_{(6)} = 23,6 \left( \frac{\mu_g \varepsilon_t}{\rho_g k_t} \right)^{1/4} \left( \frac{\varepsilon_t}{k_t} \right) \min \left( \varepsilon_{PC} \rho_{PC} \omega_{MVPC}, \varepsilon_g \omega_{O_2} \frac{M_{MV}}{\alpha_1 M_{O_2}} \right)$
(7)	$Voláteis_{(PC)} + \alpha_5 CO_{2(g)} \rightarrow \alpha_6 CO_{(g)} + \alpha_7 H_{2(g)} + \alpha_8 N_{2(g)}$
	$R_{(7)} = 23,6 \left( \frac{\mu_g \varepsilon_t}{\rho_g k_t} \right)^{1/4} \left( \frac{\varepsilon_t}{k_t} \right) \min \left( \varepsilon_{PC} \rho_{PC} \omega_{MVPC}, \varepsilon_g \omega_{CO_2} \frac{M_{MV}}{\alpha_5 M_{CO_2}} \right)$
$k_t = (0.03  \vec{U}_g )^2$ ; $\varepsilon_t = \frac{k_t^{0.5}}{0.01}$	

### Redução da sílica

(8)	$SiO_{2(PC)} + C_{(PC)} \leftrightarrow SiO_{(g)} + CO_{(g)}$
	$R_{(8)} = k_{(8)} \rho_{PC} \left( \frac{2273 - T_s}{200} \right) \left( \omega_{SiO_2(PC)} - \frac{P_{CO} P_{CO_2} / K_{(8)}}{M_{SiO_2}} \right)$
	$k_{(8)} = 2 \times 10^4 \exp \left( \frac{-2,89 \times 10^5}{8,314 T_s} \right)$ ; $K_{(8)} = \exp \left( 17,957 - \frac{35896}{T_s} \right)$
(9)	$SiO_{2(PC)} + 3C_{(PC)} \leftrightarrow SiC_{(g)} + 2CO_{(g)}$
	$R_{(9)} = k_{(9)} \rho_{PC} \left( \frac{2273 - T_s}{200} \right)_0 \left( \frac{\omega_{SiO_2(PC)} - \omega_{SiC} P^2_{CO} / K_{(9)}}{M_{SiO_2}} \right)$
	$k_{(9)} = 2,7 \times 10^4 \exp \left( \frac{-2,76 \times 10^5}{8,314 T_s} \right)$ ; $K_{(9)} = \exp \left( 17,760 - \frac{31600}{T_s} \right)$
(10)	$SiC_{(PC)} + CO_{(g)} \leftrightarrow SiO_{(g)} + 2C_{(PC)}$
	$R_{(10)} = k_{(10)} A_{PC} \rho_{PC} \left( \frac{\omega_{SiC}}{M_{SiC}} \right)$
	$A_{PC} = \frac{6 \varepsilon_{PC}}{d_{PC} \varphi_{PC}}$ ; $k_{(10)} = 1,91 \times 10^6 \exp \left( \frac{-379000}{8,314 T_s} \right)$

### 3 RESULTADOS/DISCUSSÕES

Os primeiros resultados apresentados são referentes à validação do modelo, onde ajustes foram feitos para obtenção de parâmetros mais próximos do processo. Os ajustes dos parâmetros reacionais foram hierarquizados, para obter uma metodologia de alteração dos valores. As reações da matéria volátil são as primeiras a serem variadas por ocorrerem primeiro. Posteriormente, ajustam-se as reações de combustão do carbono fixo, seguida da reação de "solution loss". A reação de "water gas shift" não é alterada por se tratar de uma reação de equilíbrio.<sup>(1)</sup> A Tabela 4 mostra os valores adotados para a função de correção da cinética das reações de

combustão usadas no modelo. Esses valores adotados são parâmetros, que se multiplicam as equações de taxa reacionais.<sup>(1)</sup>

**Tabela 4.** Valores adotados para a função de correção da cinética das Reações de combustão apresentadas no modelamento.

	$f(\psi) = A_1 \psi^{\pi} \exp \left( -\frac{A_2}{T} \right)$		
	$A_1$	$\pi$	$A_2$
<b>Carvão A</b>			
$C(s) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO(g)$	0,003	0	12400
$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$	0,003	0	12400
$Voláteis(s) + \alpha_1 O_2(g) \rightarrow \alpha_2 CO_2(g) + \alpha_3 H_2O(g) + \alpha_4 N_2(g)$	25	0	12400
$Voláteis(s) + \alpha_5 CO_2(g) \rightarrow \alpha_6 CO(g) + \alpha_7 H_2(g) + \alpha_8 N_2(g)$	25	0	12400
$C(s) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$	0,80	0	12400
<b>Carvão B</b>			
$C(s) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO(g)$	0,003	0,18	5400
$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$	0,00009	0,12	5300
$Voláteis(s) + \alpha_1 O_2(g) \rightarrow \alpha_2 CO_2(g) + \alpha_3 H_2O(g) + \alpha_4 N_2(g)$	4	0,94	5300
$Voláteis(s) + \alpha_5 CO_2(g) \rightarrow \alpha_6 CO(g) + \alpha_7 H_2(g) + \alpha_8 N_2(g)$	10	1,13	4000
$C(s) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$	0,005	0,15	7400

Os resultados apresentados na validação do modelo referem-se ao carvão A da Tabela 2. Os resultados calculados foram comparados com os valores experimentais obtidos por KHAIRIL.<sup>(4)</sup> Os valores simulados mostram-se em excelente concordância com os resultados obtidos experimentalmente, como pode ser verificado na Figura 3. Na Figura 3 apresenta-se a comparação entre as temperaturas da partícula medida experimentalmente (pontos) e os valores calculados (linha escura), a linha clara representa a temperatura do gás calculada pelo modelo. Na Figura 4 pode-se verificar o comportamento dos gases de reação. Os pontos representam os valores medidos e as linhas os valores calculados uma boa concordância é verificada entre os resultados obtidos. Os resultados apresentados, a partir da Figura 5 são extensões do modelo. Estas têm por objetivo avaliar o modelo diante de condições reais de injeção de carvão no canal adutor do "raceway" de um alto-forno.

A Figura 5 é uma mudança na geometria do modelo para simular o canal adutor da raceway de um alto-forno.<sup>(1)</sup> Na Figura 5 apresenta-se a geometria do canal adutor da raceway. As Figuras 6 a, b, c, d mostram o comportamento dos gases  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  e da fração de finos no canal adutor da raceway.<sup>(1)</sup>

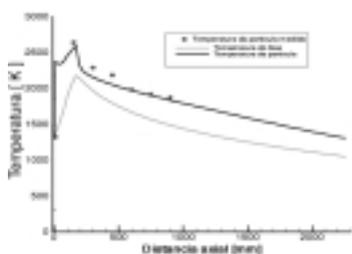


Figura 3. Temperatura da partícula simulada contra temperatura da partícula experimental (pontos) e temperatura simulada do gás.

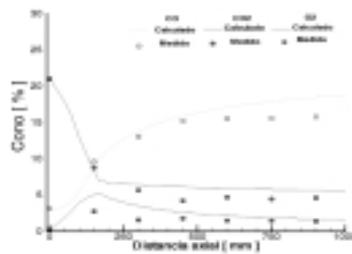


Figura 4. Variação das concentrações dos gases entre valores simulados (linhas cheias) e experimentais (pontos).

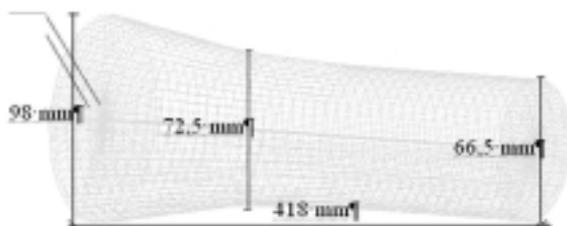


Figura 5. Malha em volumes finitos do canal adutor da raceway.

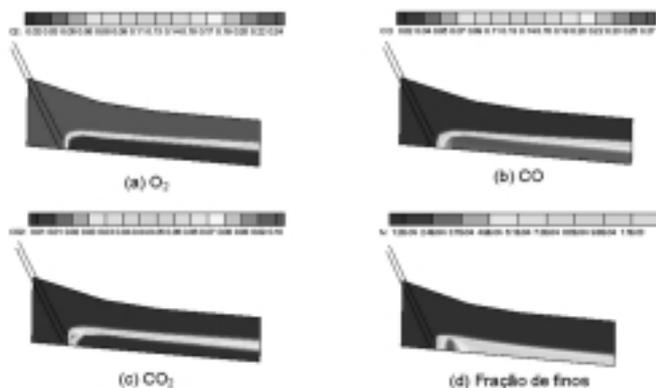


Figura 6. Distribuição de  $O_2$  (a);  $CO$  (b);  $CO_2$  (c); e Fração volumétrica de finos (d) no canal adutor da raceway.

## 4 CONCLUSÕES

O modelo mostrou-se eficiente para a simulação da combustão de carvão pulverizado, visto que este apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais. Para a simulação do canal adutor da raceway obteve-se um consumo de aproximadamente 28 % da massa do carvão pela combustão, principalmente da evolução da matéria volátil. A composição média percentual do gás deixando a raceway foi de: 19,8 de oxigênio, 74,6 de nitrogênio, 1,5 de água, 1,33 de hidrogênio, 2,4 de monóxido de carbono e 0,24 de dióxido de carbono. A queda de pressão obtida foi de 0,23 atm, enquanto que as temperaturas médias atingidas foram de 1118°C para o gás, 1837°C para as partículas e temperatura máxima da partícula 3158°C.

## 5 NOMENCLATURA

A-área superficial ( $m^2/m^3$ )
D-difusividade efetiva da fase ( $m^2/s$ )
d- diâmetro médio da partícula (m)
$f_m$ - fração volumétrica de m na fase sólida
$K_i$ - taxa de reação constante para i
$M_i$ - peso molecular das espécies gasosas (kg/mol)
P-pressão (Pa)
$R_i$ - taxa de reação total ( $mol/m^3/s$ )
T-temperatura (K)
$\Gamma_{e_i}$ - coeficiente de transferência
$\delta$ - coeficiente estequiométrico
$\epsilon_i$ - fração volumétrica da fase i
$\epsilon_{ij}$ - fração molar da fase j
$\eta$ - fator de eficiência da reação
$S_s$ - termos fonte (vários)
Sh - número de Sherwood (-)
$\psi_i$ - fator de forma para a fase i
$\rho$ - densidade
$\alpha$ - coeficiente estequiométrico

## Agradecimentos

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

## REFERÊNCIAS

- 1 BALTAZAR, A.W.S. **Modelamento matemático e simulação computacional de um ensaio de combustão de carvão pulverizado**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2004.
- 2 ZOLIN, A.; JENSEN, A.; PEDERSEN, L.S.; DAM-JOHANSEN, K.; TRSLEV, P. A comparison of coal char reactivity determined from thermogravimetric and laminar flow\_reactor experiments. **Energy & Fuels**, v. 12, n.2, p. 268-276, 1998.
- 3 GOMES, M.L.I.; OSORIO, E.; VILELA, A.C.F.; KALKREUTH, W., Avaliação das propriedades de misturas de carvões gaúchos e importados para PCI. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, 33., 2003, Ouro Preto. **Anais...** São Paulo : ABM, 2003. 1 CD-ROM.
- 4 KHAIRIL, D.; KAMIHASHIRA, D.; NAKAYAMA, D.; NAKAYAMA, K.; NARUSE, I. Fundamental reaction characteristics of pulverized coal at high temperature. **ISIJ International**, v. 41, n. 2, p 136-141, 2001.
- 5 CASTRO, J.A. **A multi-dimensional transient mathematical model of blast\_furnace based on multi-fluid model**. 2000. Tese (Doutorado) - Institute for Advanced Material Processing, Tohoku University, Japan, 2000.
- 6 AUSTIN, P.R.; NOGAMI, H.; YAGI, J.I. A mathematical model for blast\_furnace reaction analysis based on the four fluid model. **ISIJ International**, v.37, n. 8, p 748-755, 1997.

Recebido em: 08/02/06

Aceito em: 07/04/06

Proveniente de: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS, 35., 2005, Florianópolis, SC. São Paulo : ABM, 2005.