

# ***Modelagem e simulação computacional da injeção de carvão pulverizado no canal adutor da "raceway" de altos-fornos***

**Anderson Willian de Souza Baltazar**

M.Sc. Engenharia Metalúrgica, Escola Engenharia Industrial Metalúrgica Volta Redonda/UFF. Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica - Núcleo de Simulação de Processos e Fenômenos  
Avenida dos trabalhadores, 420 Vila Santa Cecília.  
Volta Redonda, R.J., Brasil CEP 27255-125.  
anderson@metal.eeimvr.uff.br

**José Adilson de Castro**

Ph.D. Ciências, Escola Engenharia Industrial Metalúrgica Volta Redonda/UFF. Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica - Núcleo de Simulação de Processos e Fenômenos.  
Avenida dos trabalhadores, 420 Vila Santa Cecília.  
Volta Redonda, R.J., Brasil CEP 27255-125.  
adilson@metal.eeimvr.uff.br

**Alexandre José da Silva**

Dr. Ing. Engenharia Mecânica, Escola Engenharia Industrial Metalúrgica Volta Redonda/UFF. Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica - Núcleo de Simulação de Processos e Fenômenos.  
Avenida dos trabalhadores, 420 Vila Santa Cecília.  
Volta Redonda, R.J., Brasil CEP 27255-125.  
ajs@metal.eeimvr.uff.br

---

## **Resumo**

O alto-forno é um reator de fluxo contra corrente e tem como principal objetivo a produção de gusa. A injeção de materiais particulados é feita via ventaneiras objetivando diminuir a quantidade de coque carregado via topo do alto-forno. Esta técnica abriu as opções de utilização de matérias-primas de menor valor agregado que o coque, insumo que no Brasil é produzido com misturas de carvões importados. Este trabalho propõe a simulação da injeção de carvão pulverizado utilizando um modelo matemático 3D, multifásico. Como fases consideram-se uma fase gasosa e duas fases sólidas correspondendo a dois tipos de carvões pulverizados, com alto e baixo teor de voláteis respectivamente. Desta forma, as fases sólidas, quando consideradas simultaneamente na injeção, são representadas por diferentes campos de velocidade e temperatura, além de sua própria composição química. As taxas de cinética química das reações foram consideradas através de modelos clássicos da literatura e eventualmente tiveram suas constantes ajustadas para melhor representarem os carvões individualmente no processo industrial. A solução

## **Abstract**

The blast furnace is a counter current flow reactor whose main purpose is to produce hot metal. This process uses as auxiliary fuel the injection of pulverized coal through the equipment termed tuyere. Recently, the price of premium coals became prohibitive for using in the blast furnace, especially in Brazil, where this raw material is imported. The analysis was based on a 3D multi phase mathematical model. Three phases are considered in this model, namely, gaseous phase and two solid phases of pulverized coals. It was analyzed a high volatile and low volatile pulverized coal into different configurations of injection lances. The pulverized coal phases are considered separately pursuing velocity fields, temperature and the chemical composition. The chemical kinetics rates were adapted from literature and eventually the rate constants were adjusted for representing the individual reactivity of the pulverized coal. The numerical solutions of the highly non-linear system of differential equations were obtained in a computational code written in Fortran 90/95, based on finite volume method. Non-orthogonal mesh was used to representing the geometry of experimental apparatus and the raceway channel. The model was validated against experimental results and

numérica foi obtida através de um código desenvolvido em Fortran 90/95, com base no método de volumes finitos utilizado na discretização do sistema de equações diferenciais não lineares. A malha utilizada é não ortogonal para melhor representar a geometria do equipamento experimental descrito na literatura e utilizado para validar o modelo e, posteriormente, a geometria das ventaneiras com diferentes pontos de injeção. Os resultados obtidos de temperatura e composição do gás apresentam uma boa concordância com os resultados experimentais. O modelo também se mostra eficiente para a previsão do efeito de diferentes tipos de carvão injetados via ventaneiras.

**Palavras-chave:** Alto-forno, redução, ventaneiras, injeção de carvão, modelagem matemática, simulação computacional.

afterwards was used to simulate the injection of two pulverized coals into the raceway. The comparison between model results for temperature and gas composition and experimental/industrial data showed very close agreement. The mathematical model proved to be useful to predict the effect of injection of different coal types in the raceway and an efficient tool to evaluate new raw materials for the blast furnace.

**Key words:** Blast furnace, ironmaking, tuyeres, Pulverized coal injection, mathematical modeling, computational simulation.

## 1. Introdução

Nos anos recentes o comportamento das reações do carvão tem sido objeto de muitos estudos, sobretudo na indústria siderúrgica, devido à importância do aço na sociedade (Lin *et al.*, 1994). Este fato deve-se ao aumento do uso de carvões de diferentes origens e classes em diferentes processos industriais. Uma maior ênfase, no entanto, começou a ser dada na década de 80 para a determinação da qualidade dos carvões aplicados em combustão, devido ao fato dos carvões coqueificáveis apresentarem um alto custo (Zolin *et al.*, 1998). Isso elevou gradual e exaustivamente os estudos em altos-fornos visando melhor desempenho e maior produtividade com custos cada vez menores de matérias-primas o que mantém este processo como o maior produtor de ferro primário para a siderurgia mundial. Na busca por essas melhorias, a injeção de carvão pulverizado (PCI) é uma técnica complementar importante, que propiciou a expansão das opções de materiais combustíveis que podem ser utilizados no processo reduzindo custos e mantendo boa estabilidade operacional do processo. Os diversos carvões utilizados na injeção devem obedecer a limitações quanto às suas propriedades para a utilização no processo. Reconhecendo que todas as propriedades são importantes, pode-se citar a limitação do teor de cinzas em torno de 10% como uma das principais junto com um baixo teor de enxofre (Gomes *et al.*, 2003). O presente trabalho visa à determinação do potencial de utilização de carvões fazendo uso de um modelo matemático e da simulação computacional. O modelo leva em conta as propriedades físicas e a fenomenologia envolvida em um 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. Portanto, a metodologia utilizada neste trabalho envolveu uma etapa inicial de desenvolvimento do modelo de escoamento trifásico acoplado ao transporte de calor, aplicação do modelo para simular um ensaio padrão de combustão para avaliar combustividade e cinética química das reações envolvidas, a validação do modelo através de comparação com resultados experimentais e posteriormente a aplicação do modelo para a simulação da injeção de carvões com diferentes teores de carbono, matérias voláteis e composição das cinzas em posições estratégicas no interior do canal adutor da

zona de combustão visando obter alta eficiência de combustão no interior do alto-forno, já que é sabido que o carvão não queimado causa grandes transtornos para a operação estável do processo.

## 2. Modelagem matemática

### 2.1 Equações de transporte

O modelo consiste em descrever os fenômenos que ocorrem no interior do reator como um sistema de três fases que interagem entre si transferindo momentum, massa e energia. A formulação matemática segue a hipótese dos meios contínuos e como tal pode ser formulado através de equações de transporte. Os fenômenos de transferência de calor, momentum e massa no interior do reator são representados pela equação geral de transporte (equação 1). Os índices  $i$  e  $k$  representam as fases consideradas e as espécies químicas de cada fase individualmente. O coeficiente de transferência ( $\Gamma_{\phi}$ ) assume diferentes significados e modelos conforme a equação a ser resolvida. No termo fonte ( $S_{\phi}$ ) são considerados os fenômenos de interação entre as fases, como reações químicas e conseqüente transferência de massa, interações mecânicas e transferência de calor, resultando no acoplamento entre as equações de conservação de momentum, energia e massa de cada fase. Os modelos de transferência de momentum, energia e massa foram obtidos da literatura e são detalhados em trabalhos anteriores sobre a simulação de altos-fornos (Austin *et al.*, 1997; Castro, 2000).

$$\frac{\partial (\rho_i \varepsilon_i \phi_{i,k})}{\partial t} + \text{div} (\rho_i \varepsilon_i \vec{V}_i \phi_{i,k}) = \text{div} (\Gamma_{\phi_{i,k}} \text{grad} (\phi_{i,k})) + S_{\phi_{i,k}} \quad 2.1$$

As fases consideradas são duas fases sólidas, representando dois diferentes tipos de carvões pulverizados: e uma fase gasosa. Na Tabela 1 são apresentadas todas as espécies químicas que são resolvidas para cada fase.

Tabela 1: Espécies químicas e fases consideradas no modelo.

Fases (i)	Componentes (k)
Gás	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , SiO
Carvão Pulverizado Baixo volátil	C, SiO <sub>2</sub> , Voláteis, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO; CaS; FeS; FeS <sub>2</sub>
Carvão Pulverizado Alto volátil	C, SiO <sub>2</sub> , Voláteis, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO; CaS; FeS; FeS <sub>2</sub>

### 2.2 Condições de contorno e iniciais

Ao conjunto de equações diferenciais representadas pela eq. 2.1 devem ser impostas condições de contorno e iniciais que representem os processos a serem simulados. De forma geral, nos processos industriais as condições de entrada são conhecidas através de fluxos ou valores prescritos obtidos através de medições diretas. No caso específico do ensaio de combustão os valores do fluxo de massa, temperatura e composição

química na entrada do reator foram utilizados valores prescritos, bem como composição, temperatura e fluxo de massa de entrada do carvão pulverizado. Nas paredes do reator foram usadas condições de velocidade nula para o gás enquanto que para o carvão pulverizado foi assumido perfeito deslizamento. As condições de contornos térmicas para as três fases foram especificadas um coeficiente global de troca de calor adicionalmente à radiação onde foi utilizada uma emissividade efetiva. Na saída do reator foi admitido escoamento completamente desenvolvido e consequentemente condições de gradientes nulos para todas as variáveis envolvidas. Com relação às condições iniciais para o escoamento gasoso admite-se velocidade nula em todo o domínio e temperatura uniforme igual à temperatura de sopro. Para a simulação do canal da zona de combustão o procedimento foi similar, porém utilizando-se os valores industriais de sopro de um alto-forno comercial de 40 ventaneiras com distribuição uniforme de fluxo e taxa de injeção de PCI de 150 kg/t.

### 2.3 Termos fonte

Fontes de momentum são devidas ao arraste entre as fases, gradientes de pressão ou gravidade. Fontes de energia surgem da transferência de calor entre as fases, calor sensível devido à transferência de massa, devido às reações químicas e transformação de fases (Castro, 2000). As fontes de massa surgem devido às reações químicas e transformação de fases. As reações químicas são modeladas utilizando modelos cinéticos clássicos que são apresentados nas tabelas de 3 a 8. 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 vaporização da umidade ("water gas shift") é a responsável por restabelecer o equilíbrio na fase gasosa. Esta reação segue uma cinética de 2ª ordem e tem sua equação modelada para esta consideração de acordo com o modelo equacionado e apresentado por (Castro, 2000). 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 (Castro, 2000). O modelo contempla ainda as reações do silício, que são reações de redução, importantes por serem endotérmicas e causarem um resfriamento na temperatura do escoamento. Os mecanismos reacionais apresentados nas tabelas de 3 a 8 são similares aqueles propostos na literatura por diversos autores (Austin, Nogami, Yagi, 1997 e Baltazar, 2004)

Tabela 3: Reações de combustão do carbono.

(1)	$C_{PC} + 1/2O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)}$
(2)	$C_{PC} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$
$R_{(1)PC} = \frac{a}{1+a} R_{ave}; R_{(2)PC} = \frac{1}{1+a} R_{ave};$ $R_{ave} = \left( \frac{\epsilon_g \rho_g \omega_{O_2(g)}}{M_{O_2}} \right) \left\{ \frac{d_i \phi_i}{A_i D_{O_2, \omega_2}^{T_{ave}} Sh_i} + \frac{1}{\eta k_{ave}} \right\}^{-1}$	

Tabela 4: Modelo cinético para a reação de "solution loss".

(3)	$C_{PC} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$
$R_{(3)} = \frac{\rho_g \omega_{CO_2(g)}}{M_{CO_2}} \left( \frac{1}{A_i k_{film, CO_2}} + \frac{1}{\eta k_{(3)}} \right)^{-1}$	

Tabela 5: Modelo cinético para a reação com gás d'água "water gas".

(4)	$C_{PC} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)}$
$R_{(4)} = \frac{\rho_g \omega_{H_2O(g)}}{M_{H_2O}} \left( \frac{1}{A_i k_{film, H_2O}} + \frac{1}{\eta k_{(4)}} \right)^{-1}$	

Tabela 6: Modelo cinético para a reação de "water gas shift".

(5)	$CO_{2(g)} + H_{2(g)} \leftrightarrow CO_{(g)} + H_2O_{(g)}$
$R_{(5)} = \frac{1000}{(101325)^2} \varepsilon_s (f_{PC}) k_{(5)} \left( P_{CO} P_{H_2O} - \frac{P_{CO} P_{H_2O}}{k_{(5)}} \right)$	

Tabela 7: Modelo cinético para a 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)	$Voláteis_{(pc)} + \alpha_5 CO_{2(g)} \rightarrow \alpha_6 CO_{(g)} + \alpha_7 H_{2(g)} + \alpha_8 N_{2(g)}$
$R_{(7)} = 23,6 \left( \frac{\mu_g \varepsilon_t}{\rho_g k_t} \right)^{1/4} \left( \frac{\varepsilon_t}{k_t} \right) \min \left( \varepsilon_{pc} \rho_{pc} \omega_{MVPC}, \varepsilon_g \omega_{CO_2} \frac{M_{MV}}{\alpha_5 M_{CO_2}} \right)$	

Tabela 8: Modelo cinético para a redução da sílica.

(8)	$SiO_{2(PC)} + C_{(PC)} \leftrightarrow SiO_{(g)} + CO_{(g)}$
$R_{(8)} = k_{(8)} \rho_{PC} \left( \frac{2273 - T_s}{200} \right) \left( \omega_{SiO_2(PC)} - \frac{P_{CO} P_{CO_2} / k_{(8)}}{M_{SiO_2}} \right)$	
(9)	$SiO_{2(PC)} + 3C_{(PC)} \leftrightarrow SiC_{(g)} + 2CO_{(g)}$
$R_{(9)} = k_{(9)} \rho_{PC} \left( \frac{2273 - T_s}{200} \right)_0^1 \left( \frac{\omega_{SiO_2(PC)} - \omega_{SiC} P^2_{CO} / k_{(9)}}{M_{SiO_2}} \right)$	
(10)	$SiC_{(PC)} + CO_{(g)} \leftrightarrow SiO_{(g)} + 2C_{(PC)}$
$R_{(10)} = k_{(10)} A_{PC} \rho_{PC} \left( \frac{\omega_{SiC}}{M_{SiC}} \right)$	

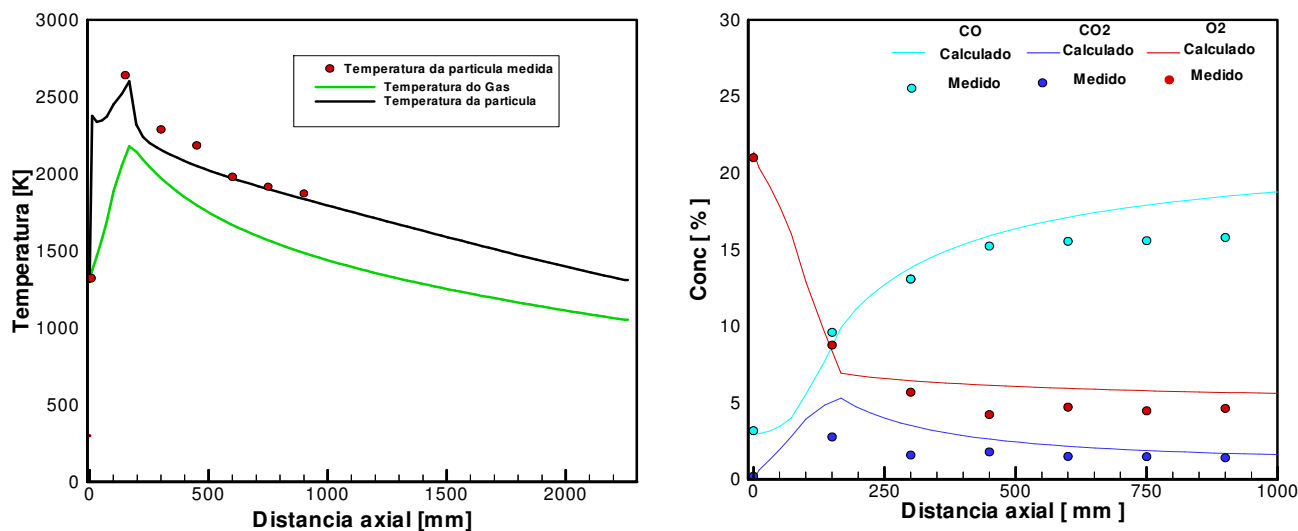
## 2.4 Método de solução

O conjunto de equações diferenciais parciais não lineares com condições de contorno e iniciais definidos nos itens anteriores foi resolvido numericamente através da técnica de volumes finitos. A discretização das equações é feita para uma malha não ortogonal onde cada volume de controle possui um sistema local de coordenadas que por sua vez se relaciona a um sistema global de coordenadas. As equações discretizadas são resolvidas pelo método iterativo linha por linha (ADI) utilizando-se o algoritmo para solução de uma matriz tri-diagonal. Para a solução do acoplamento pressão-velocidade do escoamento da fase gasosa o algoritmo SIMPLE é utilizado em um "grid staggered", enquanto que para as fases de carvão pulverizado a equação da continuidade é utilizada para prever a fração volumétrica das fases. Para a validação do modelo foi utilizada uma malha estruturada de 40x10x120, que após realização de ensaios numéricos de sensibilidade de relação de aspecto e tamanho, mostrou-se a mais adequada para a simulação em questão. Para a simulação do canal adutor uma malha composta de 50x15x100 volumes mostrou-se mais adequada.

## 3. Resultados e Discussões

### 3.1 Validação e determinação de constantes cinéticas características dos carvões em estudo

O modelo contempla inicialmente a análise de um reator tubular de raio igual a 120 mm e comprimento de 2100 mm utilizado por Khairil (Khairil et al., 2001) para a verificação do comportamento reacional do carvão e determinação das constantes cinéticas adequadas para os carvões em estudo.



a) Temperatura do gás e partícula ao longo do reator

b) Composição do gás ao longo do reator

Figura 1: Comparação de resultados medidos por KHAIRIL et al e previstos pelo modelo de temperatura da partícula e composição gasosa

Os resultados apresentados referem-se ao carvão A da tabela 9 usado para validar o modelo, onde se fez

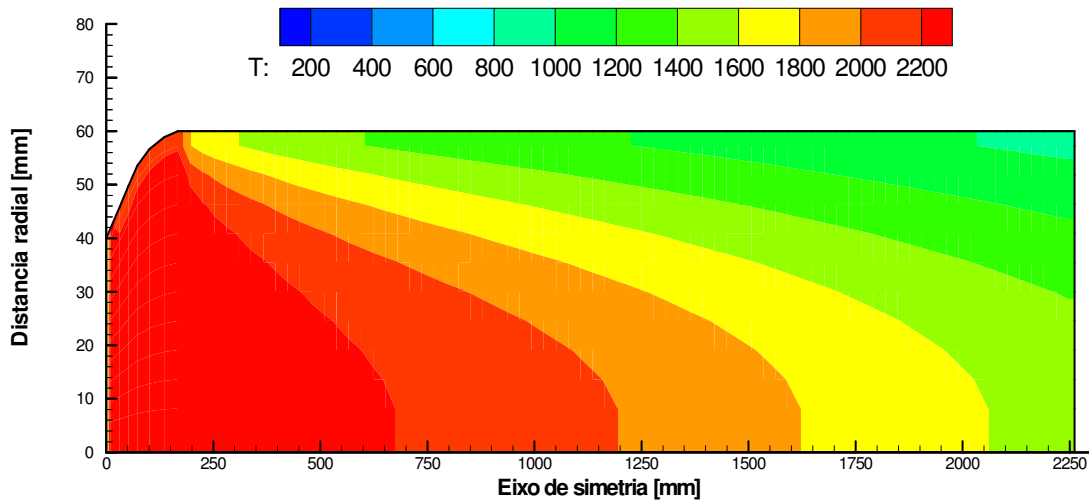
comparação entre os valores calculados e os experimentais obtidos por KHAIRIL (Khairil *et al.*, 2001).

Tabela 9: Propriedades dos carvões utilizados para as simulações. (Fonte, Khairil *et al.*, 2001)

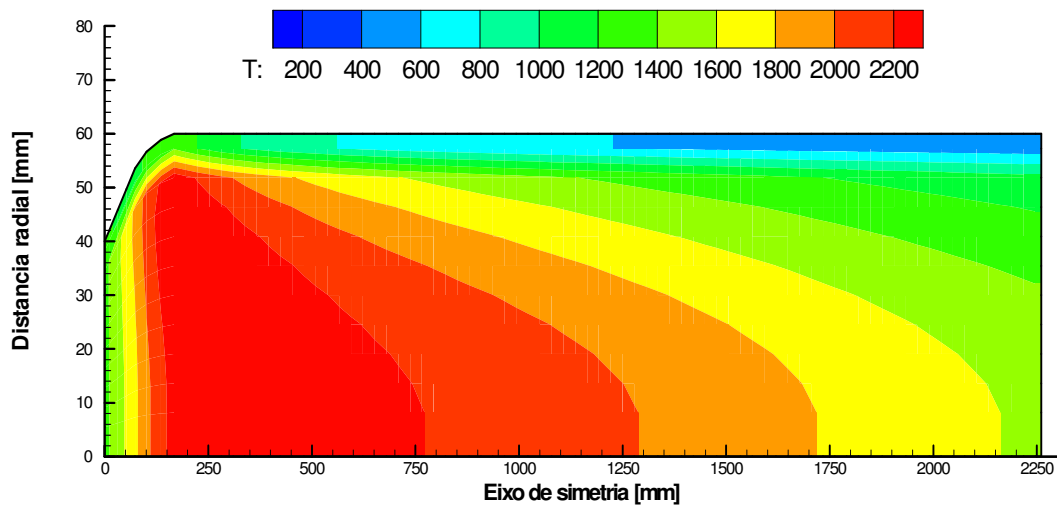
Carvões		A	B	C	D	E
Análise imediata (massa seca)	Cinzas	2,70	6,50	10,50	7,30	8,80
	Matéria volátil	41,20	34,00	18,90	34,80	26,30
	Carbono fixo	56,10	59,50	70,60	57,90	64,90
Razão de combustível		1,36	1,75	3,74	1,66	2,46
Análise elementar (%massa seca livre de cinzas)	C	75,10	83,80	88,40	84,47	85,01
	H	5,20	4,80	4,70	5,29	4,49
	N	1,50	2,20	0,80	7,87	7,99
Cinza na massa cinza como óxido (%)	SiO <sub>2</sub>	50,00	37,60	43,40	59,43	48,37
	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	3,60	9,10	7,86	6,40
	MgO	1,50	2,40	7,50	1,14	0,93
	CaO	1,80	10,60	1,30	1,29	1,05

Os valores simulados mostram uma boa concordância com os experimentais como pode ser visto na figura 1. Na figura 1a apresenta-se a comparação entre os valores medidos e calculados pelo modelo para a temperatura da partícula de carvão pulverizado. Na figura 1b comparam-se os valores previstos para a composição do gás em diversos pontos no interior do reator. Em ambas observa-se uma boa concordância entre os valores medidos e calculados pelo modelo. Como resultado deste ajuste obteve-se os parâmetros cinéticos do carvão A e B que caracterizam a reatividade dos mesmos nas condições das ventaneiras de um alto-forno.

Na Figura 2 apresenta-se um plano radial do campo de temperaturas para o gás e partícula. Conforme pode-se concluir o aumento rápido da temperatura da partícula ocorre na região de entrada do reator (Figura 2a), por causa da combustão da matéria volátil que é uma função da temperatura do ar soprado. A temperatura da partícula tende a ser maior na região central do reator, porque é a região de maior acúmulo de partículas devido a injeção, ocorrência de reações exotérmicas no interior da partícula e menor perda de calor. A transferência de calor na região central ocorre devido à troca entre gás e partículas e entre as partículas por radiação. Na região mais próxima da parede e distante da entrada ocorre um menor acúmulo de partículas e troca de calor com ambiente pelas paredes do reator e, conseqüentemente, menos reação química, fatos que explicam a menor temperatura desta região. O gás entra aquecido previamente no reator e tem sua temperatura aumentada na região central, devido a liberação dos gases de combustão nesta região (Figura 2b). Porém, a temperatura do gás decai próximo da parede, por causa da perda de calor pela parede, ocasionada pela refrigeração imposta para manter a integridade do refratário. A partir da região mediana do reator a temperatura do gás diminui consideravelmente também por causa da reação de "solution loss", que ocorre nesta região absorvendo calor do sistema.



(a)



(b)

Figura 2: Comportamento da temperatura da partícula(a) e Comportamento da temperatura do gás (b).-  
Unidade: Kelvin

### 3.2 Simulação do canal adutor da zona de combustão

Com o intuito de analisar o comportamento de dois diferentes tipos de carvão pulverizado injetados em dois diferentes pontos dentro do canal adutor da raceway a evolução no tempo das principais variáveis do processo é apresentada. Na figura 3 a evolução temporal do campo de pressão é mostrado. A queda de pressão ao longo do canal da raceway é devida principalmente à interação da fase com as fases pulverizadas, o que no início é bastante alta devido ao acúmulo de partículas e que ao atingir o estado estacionário representa aproximadamente 0,08 atm. Também na figura 3 é observada uma assimetria na distribuição de pressão devido à inclinação central de 6 graus na injeção do escoamento da fase pulverizada para os dois tipos de carvão pulverizado, o que estabelece um escoamento não uniforme em torno dos pontos de injeção. A figura 4 mostra o padrão da temperatura do gás para o plano radial e o vetor velocidade do gás para um



tempo de 0,002 s após o início da injeção. Como pode ser observada, a temperatura do gás é aumentada a aproximadamente 1900°C após os pontos de injeção devido às reações exotérmicas de combustão do carbono. Por outro lado, nos pontos de injeção a temperatura do gás é reduzida por causa da forte transferência de calor entre o gás e as fases de carvão pulverizado que foram injetados na temperatura ambiente de 30°C, enquanto o gás é pré-aquecido a 1200°C. Observa-se que o campo de velocidade do gás é fortemente afetado pela injeção do carvão em torno do ponto de injeção devido à alta diferença de velocidade entre a corrente gasosa e a velocidade de injeção dos particulados. A figura 5 mostra a fração volumétrica do carvão pulverizado injetado no primeiro ponto de injeção, é perceptível que ocorre uma concentração de partículas imediatamente após o bico da lança de injeção. Após este ponto ocorre uma dispersão das partículas que começam a se misturar com o gás e tendem a preencher todo o canal adutor da "raceway". Na figura 6 a distribuição de temperatura da partícula de carvão pulverizado é mostrada.

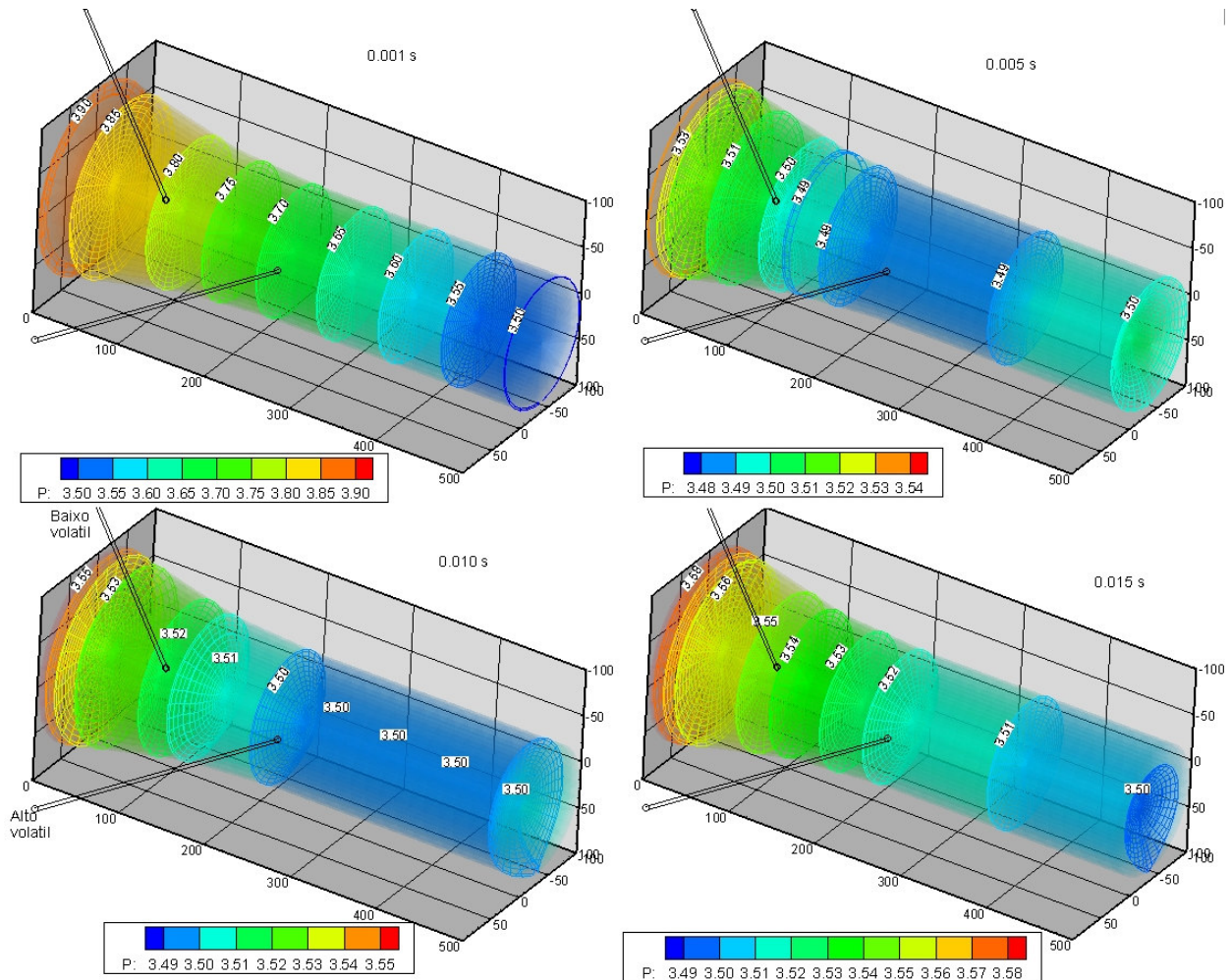


Figura 3: Evolução do campo de pressão no interior do canal adutor da ventaneira – unidade: atm

Pode-se perceber que a temperatura da partícula aumenta muito a temperatura da corrente de escoamento. Este é um parâmetro tecnológico importante desde que à integridade do canal e da lança de injeção é

fundamental para a estabilidade da operação. Portanto, o modelo é uma importante ferramenta para averiguar pontos de injeção de carvão pulverizado convenientes que garantam operação estável do sistema de injeção. Neste ponto é importante enfatizar o comportamento transiente das matérias-primas no interior da raceway do alto-forno. Na operação da quantidade de injeção e a taxa de sopro que são fortemente influenciadas pela permeabilidade interna do forno, as quais por sua vez determinam a produtividade do forno. Conseqüentemente, os resultados obtidos neste estudo foram realizados para a condição inicial de nenhuma injeção e o comportamento transiente foi previsto até a obtenção do estado estacionário que ocorreu após aproximadamente 15 milissegundos. Para o caso de operação com duas lanças observou-se que em torno de 90% da matéria volátil dos carvões foi liberado no canal da "raceway", enquanto que o carbono fixo não reagiu significativamente nesta região (< 2% em massa).

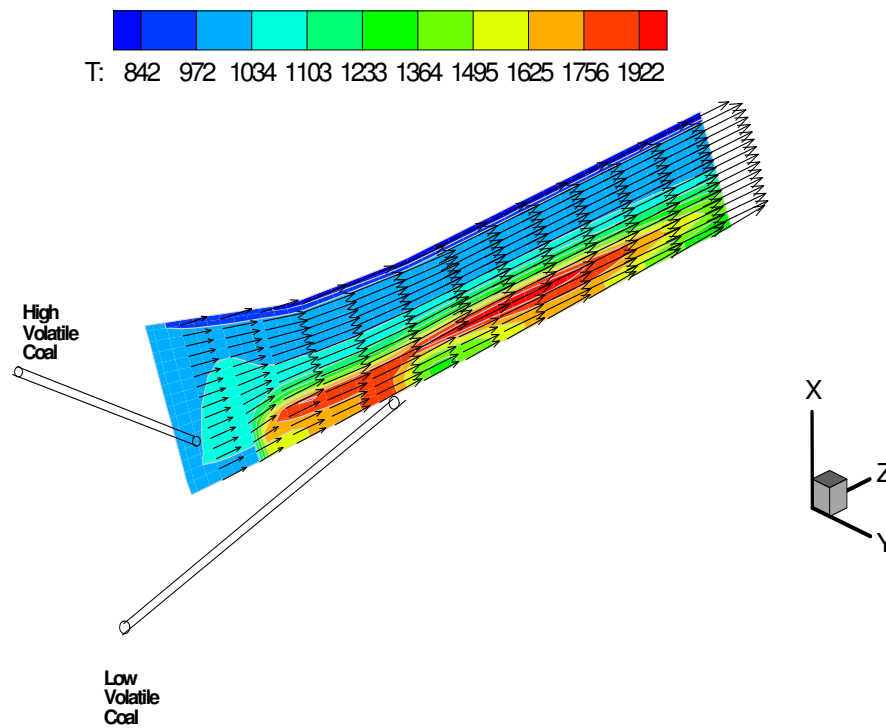


Figura 4: Distribuição da temperatura, em kelvin, do gás e vetores de velocidade (tempo= 0,002s).

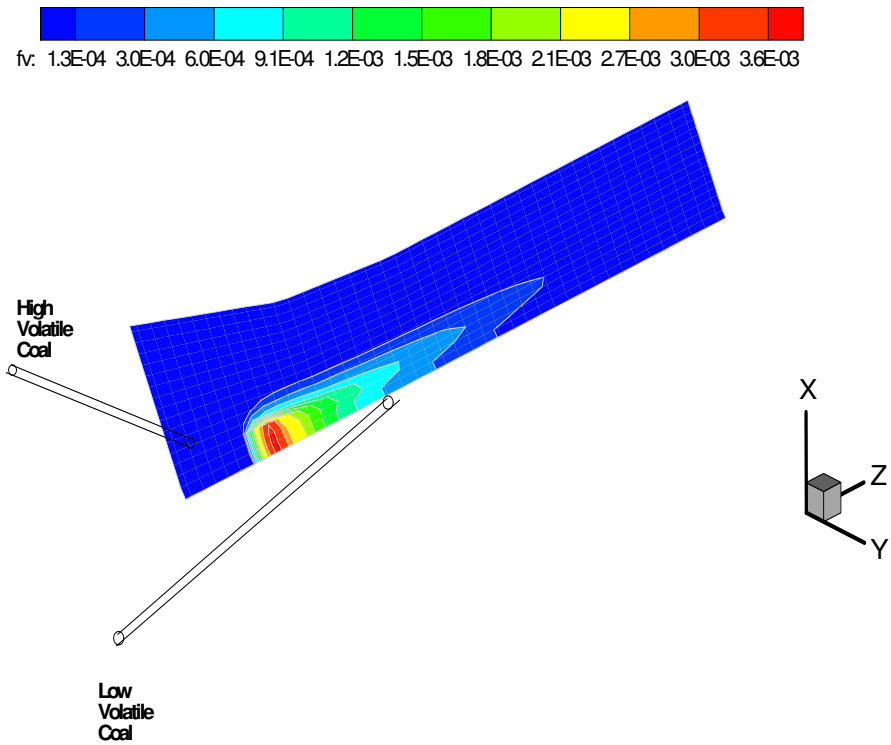


Figura 5: Distribuição da fração volumétrica para o carvão pulverizado com baixo teor de voláteis (tempo= 0,002s).

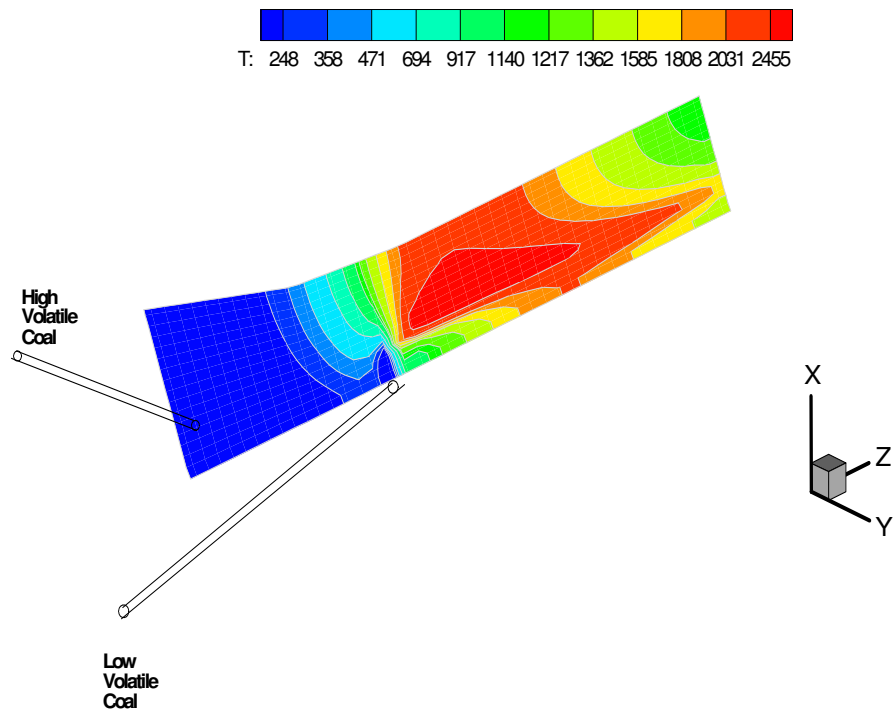


Figura 6: Distribuição da temperatura, em Kelvin, das partículas no interior do canal da raceway (tempo= 0,002s).

## 6. Considerações finais e conclusões

O modelo desenvolvido mostrou-se eficiente para a simulação da combustão de carvão, visto que o mesmo apresentou resultados compatíveis com os resultados experimentais extraídos da literatura para as mesmas condições de operação de uma ventaneira de altos-fornos. As equações de conservação são resolvidas pelo modelo, utilizando o método de volumes finitos em uma malha não ortogonal estruturada. Resultados em 3D foram apresentados para elucidar o padrão de escoamento e distribuição de temperatura das três fases modeladas. O modelo também apresenta resultados compatíveis para a operação atual de altos-fornos, visto que a temperatura interna do canal adutor da raceway atingiu temperaturas acima de 2000°C, o que é observada na operação deste equipamento durante o processo de injeção de materiais particulados em processos de produção de gusa via altos-fornos. O modelo desenvolvido se mostra, ainda, como uma ferramenta capaz de auxiliar na verificação de pontos de injeção de combustíveis auxiliares em altos-fornos. O ponto de injeção e o posicionamento da lança são parâmetros tecnológicos importantes para uma operação estável e segura do equipamento industrial, pois irá determinar a eficiência da combustão dos materiais injetados via ventaneiras e o modelo mostrou-se eficaz no auxílio para determinação do lugar geométrico ideal para se introduzir material particulado em uma ventaneira. Para o caso de injeção através de duas lanças sendo a primeira com carvão de alto volátil posicionada a 1/3 do comprimento do canal e a de baixo volátil posicionada a 1/2 do mesmo observou-se que a matéria volátil dos 2 carvões foi liberada e queimou aproximadamente 90% em peso, enquanto que o carbono fixo praticamente não sofreu combustão ou gaseificação. Por outro lado a introdução do carvão no canal adutor impôs uma perda de carga adicional de aproximadamente 40% quando comparado com apenas o escoamento do gás, além de induzir desvios do fluxo gasoso próximos dos pontos de injeção.

## 7. Referências

- AUSTIN, P.R.; NOGAMI, H. e YAGI, J.I. 1997. A mathematical model for blast\_furnace reaction analysis based on the four fluid model. *ISIJ*, **8**:748-755.
- BALTAZAR, A.W.S. 2004. *Modelamento matemático e simulação computacional de um Ensaio de combustão de carvão pulverizado*. Rio de Janeiro, RJ. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Industrial metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense.
- CASTRO, J.A. 2000. *A multi-dimensional transient mathematical model of blast\_furnace based on mult-fluid model*. Japão. Tese Doutorado. Institute for advanced material processing, Tohoku University.
- GOMES, M.L.I. et al. 2003. Avaliação de carvões gaúchos e importados para PCI. In: XXXIII Seminário de redução de minério de ferro e matérias primas, Ouro Preto, MG. *Anais...*
- KHAIRIL et al. 2001. Fundamental\_reaction characteristics of pulverized coal at high temperature. *ISIJ*, **2**:136-141.

LIN, S.Y.; HIRATO, M. e HORIO, M. 1994. The characteristics of coal char\_gasification at around ash melting temperature. *Energy & Fuels*, **8**:598-606.

ZOLIN *et al.* 1998. A comparison of coal char Reactivity determined from Thermogravimetric and laminar flow\_reactor experiments. *Energy & Fuels*, **12**:268-276.