

# MODELAGEM MATEMÁTICA DO FLUXO DE LÍQUIDOS NO CADINHO DO ALTO-FORNO<sup>1</sup>

Beatriz Fausta Gandra<sup>2</sup>  
José de Sousa Carvalho<sup>3</sup>  
José Adilson de Castro<sup>4</sup>  
Luiz Fernando Andrade de Castro<sup>5</sup>

## Resumo

O cadinho, região que define a vida útil do alto-forno, é onde ocorre o escoamento de gusa e escória, fenômeno que tem importante função na zona inferior do reator, afetando o seu comportamento operacional. O fluxo desses líquidos pode ser caracterizado usando-se equações gerais de conservação de massa e energia, e é fortemente influenciado pela fração de vazios no interior do reator, pelo fluxo de gás nas vizinhanças do *raceway* e pelo perfil do alto-forno. Em função das dificuldades de se realizar medições que permitam o conhecimento do estado interno do alto-forno, têm sido desenvolvidos modelos matemáticos que buscam simular os fenômenos que ocorrem nessa região. Neste contexto, adaptou-se um modelo de escoamento de fluidos, previamente desenvolvido pela UFF, ao Alto-Forno 3 da Usiminas. Esta adequação foi realizada alterando-se a rotina de previsão da velocidade de saída de material pelo furo de gusa e desenvolvendo-se rotinas para avaliação da granulometria do coque no cadinho, e da fração livre de coque. Para alimentação desta última rotina desenvolveu-se, baseado nos dados reais de processo, um balanço de forças capaz de determinar a posição do homem morto no início de cada corrida. Em simulações realizadas com o modelo, pode-se concluir que a determinação da distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque está intimamente ligada à variação das pressões de sopro e de topo e ao peso da carga no alto-forno; a movimentação do líquido no cadinho é muito influenciada por essa posição do homem morto; a distribuição granulométrica do coque ao longo do raio no interior do cadinho tem forte influência nas linhas de fluxo do líquido, e conseqüentemente, na sua retenção, por outro lado, a variação homogênea do combustível não influencia de forma significativa a distribuição dos líquidos nem o tempo de residência.

**Palavras-chave:** Altos-fornos; Cadinho; Modelagem.

## MATHEMATICAL MODEL OF LIQUID FLOW IN THE BLAST FURNACE HEARTH

### Abstract

Stable blast furnace operational is required to reduce energy consumption in iron and steelmaking industry. For the stable blast furnace operation, precise controlled drainage is one of the important factors. Therefore, in this work, basic characteristic features of drainage in a blast furnace hearth were examined. Three-dimensional mathematical model were developed based on the finite volume method to simulate liquid flow in a hearth of a blast furnace. Dead man position was developed to reflect the influence of same variables in it. The results indicate that the coke free space formed near the bottom of the hearth is intimately linked to the variation of the blow and top pressures and to the weight of the load in the blast furnace; the movement of the liquid is very influenced by that coke free space; the size distribution of the coke inside the hearth has strong influence in the liquid flow, and consequently, in its drainage efficiency.

**Key words:** Blast furnace; Hearth; Modelling.

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

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheira Metalurgista, MSc., Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Superintendência de Coquerias Sinterizações e Altos-Fornos da Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Dr., Universidade Federal Fluminense - UFF; Volta Redonda, RJ.

<sup>5</sup> Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Dr., Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG; Belo Horizonte, MG.

# 1 INTRODUÇÃO

Visando uma produção econômica de ferro-gusa, via altos-fornos, é importante a garantia de uma longa campanha desses reatores, aliada a uma boa estabilidade operacional. Nesse sentido, buscando melhor entendimento e suporte à implementação de melhorias ao controle do processo de alto-forno, esforços têm sido direcionados para o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrever o estado interno desse reator. Em função da complexidade do processo de produção de gusa são utilizados no desenvolvimento destes modelos balanços de massa e de energia, além de equações de cinética química e de transporte de calor e massa.

É fundamental que se tenha um cuidado especial com o cadinho, parte que define a vida útil do equipamento. Além disso, melhor estabilidade e eficiência da operação do forno é obtida quando se consegue uma melhor drenagem de gusa e escória, sendo para isto, necessária uma adequada permeabilidade na região do homem morto. Assim, na busca de fornecer melhores ferramentas de controle ao operador, um desenvolvimento que apresenta grande potencial de aplicabilidade é o modelo matemático (simulação numérica) do fluxo de metal líquido no cadinho para descrever o escoamento de gusa e escória durante a corrida.

No processo de redução em alto-forno, o vazamento de gusa e escória é feito de maneira praticamente contínua, alternando-se apenas os furos de corrida. Desta forma, um reator que trabalha com um número reduzido de corridas, como é o caso do Alto-Forno 3 da Usiminas, exige maior atenção para os problemas de fluxo e esgotamento do cadinho. Observa-se que o acúmulo excessivo de gusa e escória, decorrente de atraso na perfuração, má qualidade do coque, flutuações térmicas do forno e má qualidade da massa de tamponamento, provoca um aumento da pressão de sopro, descida irregular de carga, dentre outros. Além disso, as flutuações do nível de líquido podem, também, provocar um efeito prejudicial na estabilidade do reator.

Nesse contexto, o presente estudo apresenta a adaptação de um modelo matemático do fluxo de metal líquido no cadinho<sup>(1)</sup> para ser utilizado na avaliação da movimentação do líquido no interior dos altos-fornos. As principais variáveis consideradas no modelo são: a vazão do líquido, o nível térmico do cadinho, a fração de vazios do leito de coque, a produção de gusa e a sua velocidade de movimentação no interior do cadinho.

## 2 O MODELO MATEMÁTICO

### 2.1 Descrição do Modelo

O modelo, previamente desenvolvido, é tridimensional, leva em consideração a fração de vazios no interior do cadinho, e pode mostrar a forte influência do coque no fluxo de líquidos. Uma vez que a existência, ou não, de uma camada isenta de sólidos afeta profundamente o fluxo do gusa no cadinho, o modelo permite avaliar o perfil de velocidades para diferentes situações de permeabilidade e de assentamento do homem morto. Nas simulações, utilizam-se como dados de entrada a descrição do estado interno do cadinho, propriedades dos materiais sólidos e líquidos, condições operacionais do alto-forno e uma equação de evolução da vazão de gusa.<sup>(1)</sup>

A forma geral da equação de conservação utilizada no modelo matemático transiente, multidimensional e multifásico é dado pela equação 1. O índice “i” representa a fase a ser considerada na solução. O coeficiente de transferência ( $\Gamma_{\phi_i}$ ) representa o produto da difusividade pela massa específica, e assume significado diferente para cada variável dependente. O termo fonte considera a transferência de momento entre o sólido e o líquido, que é dada pela equação 2, enquanto a transferência de energia, para relacionar a movimentação dos líquidos com suas temperaturas, é apresentada pela equação 3.

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_i\phi_i)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon\rho_i\mathbf{u}_i\phi_i - \varepsilon\Gamma_{\phi_i} \text{grad}\phi_i) = S_{\phi_i} \quad (1)$$

$$\vec{F}_s^i = \frac{\rho_i}{r_h} \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right| (5\beta + 0.4\beta^{0.1}) \left( \vec{U}_i - \vec{U}_s \right) \quad (2)$$

sendo,  $\beta = \frac{\mu_i}{\rho_i \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right| r_h}$ ;  $r_h = \frac{\varepsilon \varphi_s d_s}{6\varepsilon_s}$

$$\dot{Q} = h_{s-i} A_{si} (T_s - T_l) \quad (3)$$

em que,

$$\frac{1}{h_{s-i}} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_i}; \quad A_{si} = \sum_m f_m \frac{6\varepsilon_m}{d_m \varphi_m}$$

$$h_s = 2\sqrt{\frac{k_s C_p \rho_s \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right|}{\pi d_s}}; \quad h_i = \frac{k_i}{d_s} \left[ \frac{2\sqrt{\text{Re}_{s-i} \text{Pr}_i}}{1.55\sqrt{\text{Pr}_i} + 3.09\sqrt{0.372 - 0.15\text{Pr}_i}} \right]$$

O cadinho pode perfeitamente ser representado por uma malha numérica do tipo *body fitted coordinate* (BFC). As equações diferenciais parciais foram discretizadas utilizando o método de volumes finitos. Para solução das equações de pressão juntamente com as de momento, foi utilizado o algoritmo SIMPLE.<sup>(1,2)</sup> Resumidamente, destacam-se as seguintes características para solução do modelo<sup>(2)</sup>:

- ◆ uso de componente de velocidade covariante em diferentes posições;
- ◆ uso do algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) acoplado pressão e velocidade;
- ◆ método completamente implícito para discretização no tempo;
- ◆ TDMA (*Tri-diagonal Matrix Algorithm*), utilizando o método ADI (*Alternate Direction Implicit*), que converte o sistema de equações para um sistema tridiagonal, combinado com o método linha por linha.

Segundo a literatura,<sup>(3,4)</sup> a saída do fluido está bastante relacionada às condições do furo de gusa. Assim, para se determinar a velocidade de saída, foram assumidas algumas considerações. O furo de gusa, considerado como um tubo, permitiu que se determinasse o fator de fricção segundo a equação 4. A equação 5 expressa a velocidade do líquido, e, multiplicando a equação da velocidade pela área do furo de gusa, pode-se obter a equação da vazão de saída do líquido, equação 6. Ressalta-se que, além da altura de líquido no cadinho, o diâmetro do furo de gusa varia com o tempo, equação 7.

$$f = \frac{0,0626}{\left[ \log \left( \frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

$$u = \sqrt{\frac{2 \left( gh + \frac{P}{\rho} \right)}{1 + 2f \frac{L}{D}}} \quad (5)$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2 \left( gh + \frac{P}{\rho} \right)}{1 + 2f \frac{L}{D}}} \quad (6)$$

$$D = D_i + (D_f - D_i) \times \left[ 1 - \exp \left( -1,2 \times \frac{t}{t_R} \right) \right] \quad (7)$$

O valor “1,2” usado na equação 7 foi estimado a partir do perfil de desgaste de massa refratária encontrado na literatura.<sup>(4)</sup>

Baseado então nas variáveis de entrada e nas equações apresentadas, o modelo calcula a temperatura, a velocidade, a pressão e o tempo de residência do material.

## 2.2 Condições de Cálculo

As condições utilizadas nos cálculos que levam aos resultados apresentados neste trabalho são destacadas na Tabela 1, sendo que a seguinte situação foi imposta como condição de contorno:

- ◆ a superfície do gusa na entrada, com temperatura igual à da saída, é plana e horizontal, e se mantém num nível constante;
- ◆ a velocidade de entrada do líquido é uniforme, relacionada ao ritmo de produção;
- ◆ não há transferência de massa através das paredes refratárias, sendo considerada condição de não deslizamento na face quente;
- ◆ equações de entalpia e de velocidade foram utilizadas para definir condições de contorno do fluxo na saída;
- ◆ foi especificada a temperatura inicial na face fria do refratário e a sua face superior foi considerada adiabática;
- ◆ a pressão fora do furo de gusa igual a 1 atm;
- ◆ a flutuação do homem morto é considerada como sendo a altura calculada por um balanço de forças, descrito no item 2.4, para cada corrida.

**Tabela 1** – Condição padrão para cálculo no modelo.

Variável	Unidade	Valor
Temperatura do gusa	°C	1510
Densidade do gusa	g/cm <sup>3</sup>	6700
Rugosidade do furo de gusa	mm	0,02
Diâmetro inicial do furo de gusa	mm	55 / 55 / 55
Comprimento do furo de gusa	mm	3400 / 3200 / 3000
Pressão de sopro	Pa	3,50*10 <sup>5</sup>
Pressão de saída do material	Pa	1,00*10 <sup>5</sup>
Malha	(#)	60(r)x20(z)x20(θ)
Diâmetro de coque no cadinho	mm	30

## 2.3 Validação do Modelo

Era esperado que a validação do modelo pudesse ser feita pela variação da velocidade na saída do furo de gusa. No entanto, devido a dificuldades na obtenção

desses dados industrialmente, foi considerada a vazão média de saída como sendo uma alternativa para validação, Figura 1. Vale ressaltar que, embora tenha apresentado um erro relativamente baixo, esse valor pode ser melhorado quando se obtiver a real equação de velocidade de saída do material líquido.

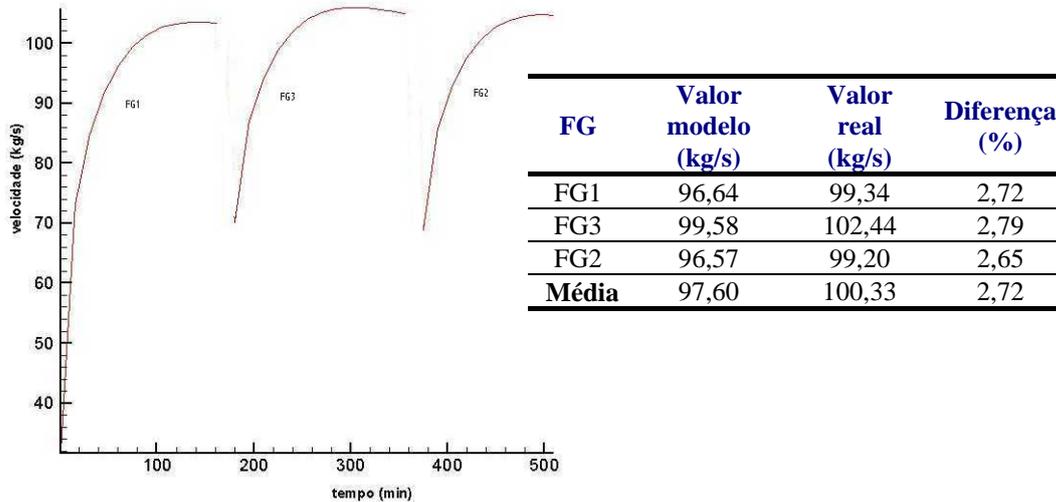


Figura 1 – Velocidade de saída do material no furo de gusa.

## 2.4 Descrição do Modelo de Flutuação do Homem Morto

Sabe-se que a distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque pode sofrer alterações durante o processo devido à quantidade de material líquido dentro do cadinho e, conseqüentemente, à força de empuxo, além das demais variáveis que atuam no núcleo do alto-forno. Assim, baseado no balanço de forças atuando no homem morto, foi realizado, em Excel®, um modelo simplificado que determina a flutuação, ou não, do homem morto, em função das condições operacionais do forno no início de cada corrida, Tabela 2.

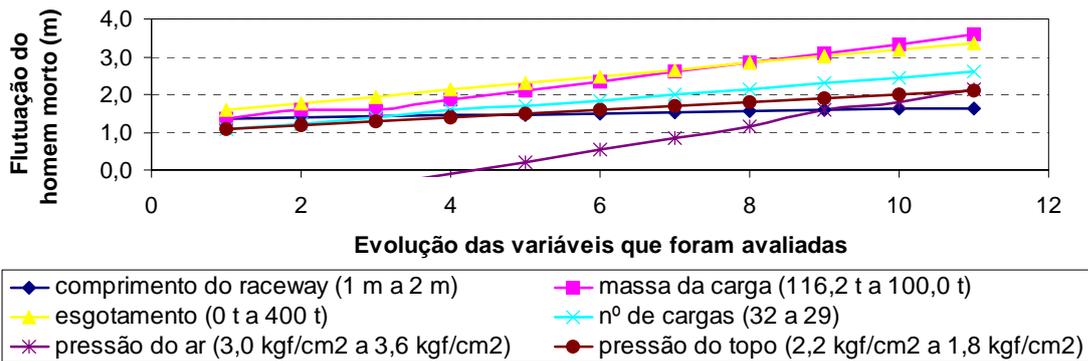
Tabela 2 – Balanço de forças para determinação da flutuação do homem morto.

FORÇAS ATUANDO PARA BAIXO	FORÇAS ATUANDO PARA CIMA
<b>Peso do material sólido</b> Força = massa da carga * gravidade	<b>Pressão do ar injetado pelas ventaneiras</b> F = pressão de injeção * área no ventre
<b>Contra-pressão no topo</b> Força = contrapressão * área da goela	<b>Força de empuxo do líquido</b> (influenciada pelo nível de esgotamento) F = densidade do gusa * volume deslocado * g
<b>Volume ocupado pelo homem morto</b> (influenciado pela dimensão do <i>raceway</i> ) F = m * g m = densidade do coque * V V = área do cadinho * H H = altura total (ventaneira até fundo) x = flutuação do homem morto F = densidade do coque * $([D_{\text{cadinho}}^2 * D_{\text{raceway}}] \wedge 2) / 4 * \pi * [H-x] * g$	

### 3 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES UTILIZANDO OS MODELOS

#### 3.1 Flutuação do Homem Morto

Utilizando o modelo do balanço de forças apresentado pode-se avaliar a influência do comprimento do *raceway*, da massa da carga, do esgotamento, da pressão de injeção do ar e da contrapressão na flutuação do homem morto, considerando uma mesma produtividade do alto-forno, Figura 2.

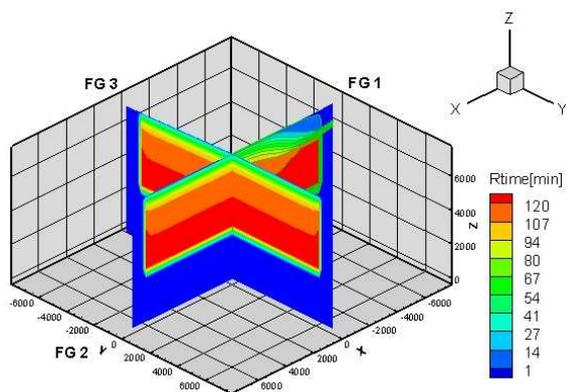


**Figura 2** – Influência das diversas variáveis na distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque estagnado.

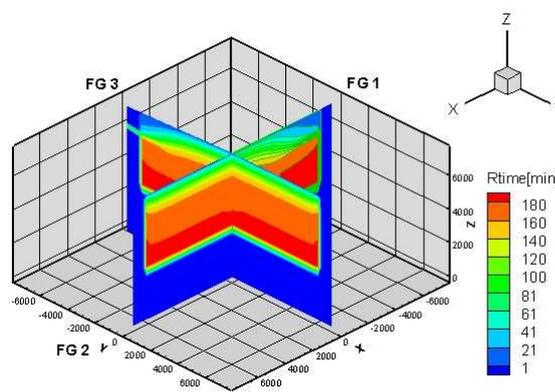
Por meio da Figura 2, é possível observar que a variável que mais influencia na flutuação do homem morto é a pressão de injeção do ar, seguida do peso da carga. Esse fato reforça a teoria de que paradas emergenciais no alto-forno (variação brusca da pressão de sopro) devem ser evitadas ao máximo, pois causam alteração extremamente significativa na distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque, e conseqüentemente em toda movimentação do fluido no interior do cadinho. Além disso, o comprimento do *raceway* não apresentou influência considerável na flutuação do homem morto.

#### 3.2 Fluxo de Líquidos no Cadinho

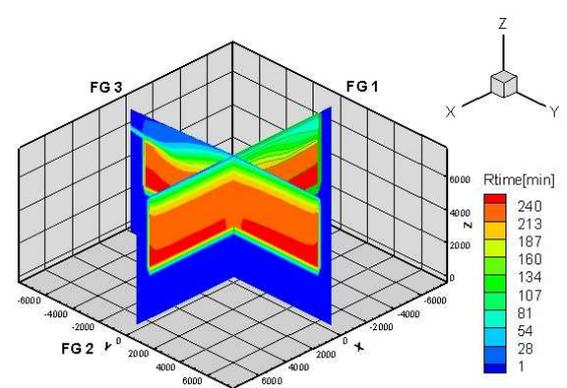
Considerando uma condição operacional padrão para o Alto-Forno 3, determinou-se que a altura de flutuação do homem morto é de 1,59 m. Este valor foi utilizado para alimentar o modelo do fluxo de líquidos. A evolução do tempo de residência do material líquido no cadinho foi obtida numa simulação realizada considerando-se o ciclo de três corridas consecutivas, áreas 1, 3 e 2, respectivamente, figura 3. Por esta figura, pode-se observar uma tendência de acúmulo de material na região onde não se tem vazamento, no caso, no ângulo de 0°. Também se observa uma saída mais rápida do material que chega sobre o furo de corrida que está em vazamento, independente de qual seja esse furo.



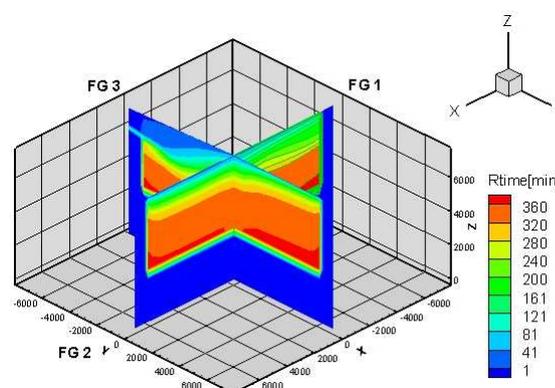
a)  $t = 120$  min



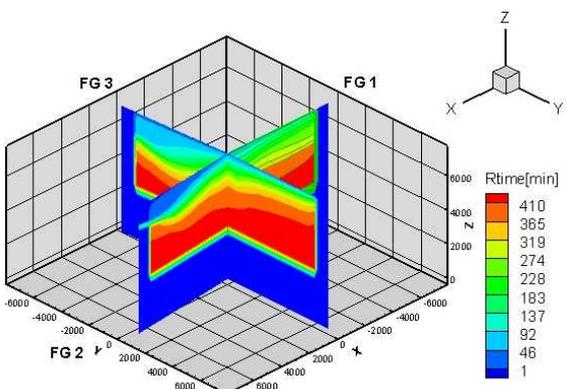
b)  $t = 180$  min



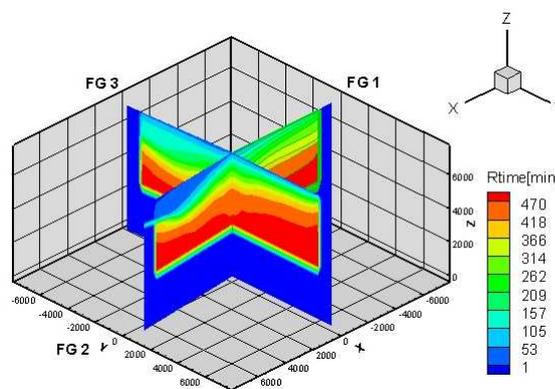
c)  $t = 240$  min



d)  $t = 360$  min



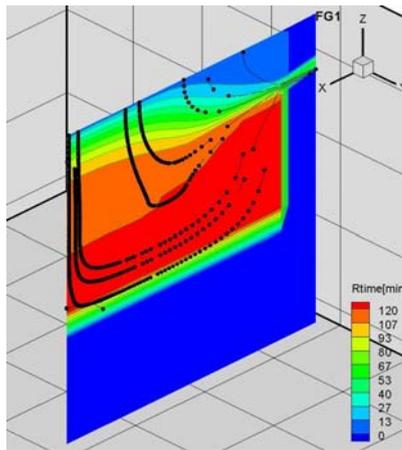
e)  $t = 410$  min



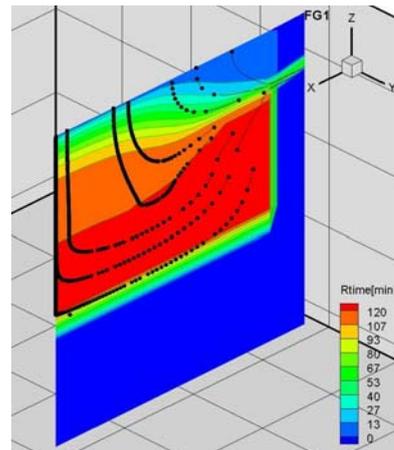
f)  $t = 470$  min

**Figura 3** – Evolução do tempo de residência do material líquido.

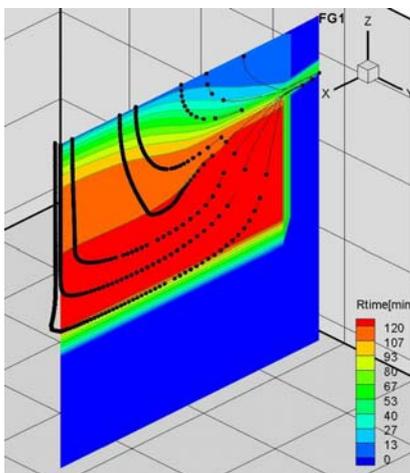
Escolhendo o tempo de 120 min e FG1, que foi um período de estabilização da velocidade, pode-se observar a variação das linhas de fluxo e do tempo de residência do material, para diferentes valores de diâmetro do coque, Figura 4. Não se observa influência notável da granulometria do coque no tempo de residência, nem nas linhas de fluxo, desde que o homem morto esteja sempre flutuando e a distribuição do coque seja homogênea.



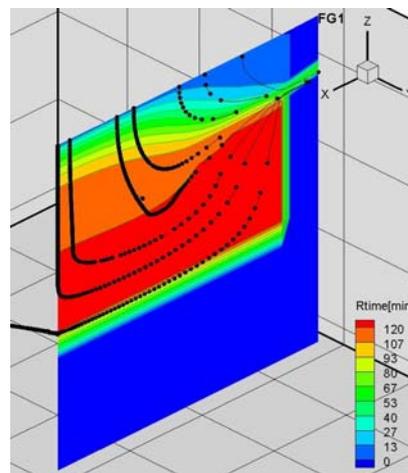
a)  $d_{\text{coque}} = 15 \text{ mm}$



b)  $d_{\text{coque}} (\text{padr\~{a}o}) = 30 \text{ mm}$



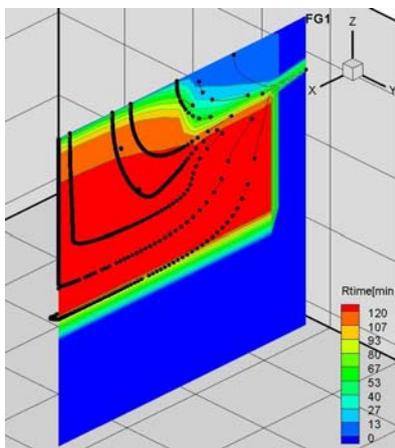
c)  $d_{\text{coque}} = 45 \text{ mm}$



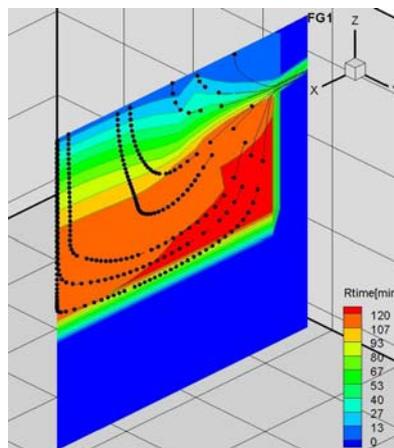
d)  $d_{\text{coque}} = 60 \text{ mm}$

**Figura 4** – Linha de fluxo e tempo de resid\~{e}ncia para diferentes valores de di\~{a}metro do coque.

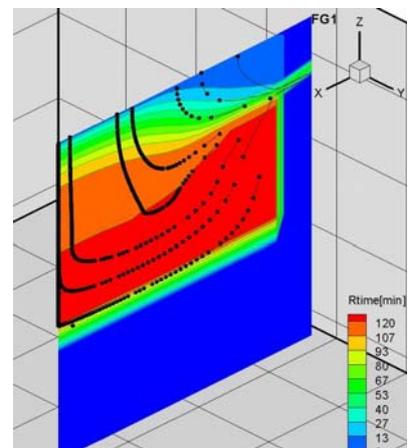
Entretanto, quando se considera varia\~{c}\~{a}o da granulometria do coque ao longo do raio, fica vis\~{i}vel a influ\~{e}ncia desse combust\~{i}vel nas linhas de fluxo, e por conseq\~{u}\~{e}ncia no tempo de resid\~{e}ncia do l\~{i}quido, Figura 5.



a)  $d_{\text{coque}} = 30 \text{ mm e } 60 \text{ mm}$



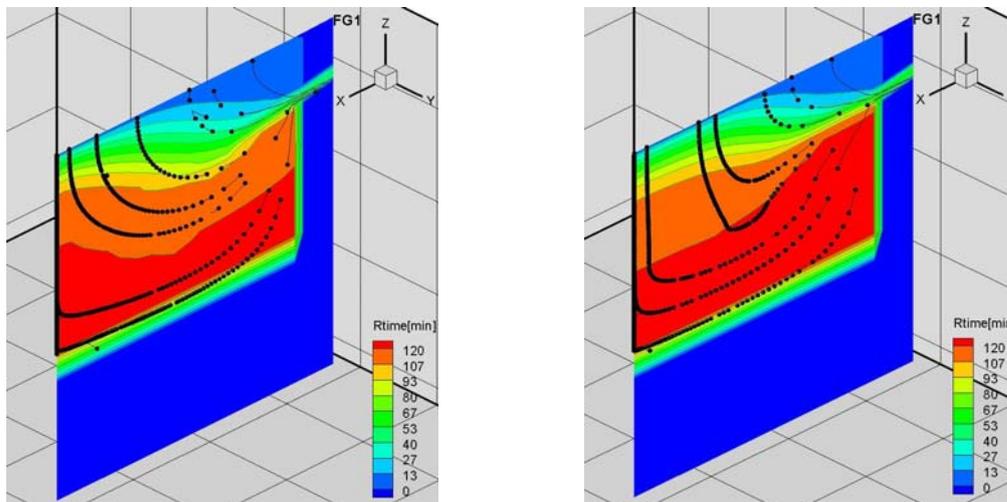
b)  $d_{\text{coque}} = 60 \text{ mm e } 15 \text{ mm}$



c)  $d_{\text{coque}} = 30 \text{ mm (padr\~{a}o)}$

**Figura 5** – Linhas de fluxo, ao avaliar a distribui\~{c}\~{a}o do coque no cadinho.

Também em conformidade com a literatura, pode-se observar uma grande influência da situação do homem morto na velocidade do material e no seu tempo de residência, Figura 6.



a) homem morto assentado

b) homem morto flutuando

**Figura 6** – Linhas de fluxo, avaliando a alteração do homem morto.

#### 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a movimentação do líquido no interior do cadinho do Alto-Forno 3 da Usiminas. Este estudo englobou o desenvolvimento de um balanço de forças que permite avaliar a flutuação do homem morto no cadinho, baseado nas características do reator e em suas condições operacionais. O resultado foi então utilizado para alimentar o modelo matemático previamente desenvolvido. Além disso, foi realizada a implementação, neste modelo, de uma nova rotina para cálculo da velocidade de saída do material, considerando a variação da altura de líquidos e do diâmetro do furo de gusa com o tempo, e uma rotina que permite alterar a distribuição da granulometria do combustível ao longo do raio do cadinho. Nesta etapa, o modelo se mostrou consistente e os resultados alcançados permitiram concluir que: (i) a determinação da distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque está intimamente ligada à variação de pressão de sopro e de topo e ao peso da carga no reator; (ii) a movimentação do líquido no cadinho é muito influenciada pela situação de flutuação, ou não, do homem morto. Quando o homem morto se apresenta assentado no cadinho, o fluido tende a ir diretamente para o furo de gusa. Por outro lado, quando o homem morto está flutuando, o líquido primeiramente vai para a região sem coque e, posteriormente, segue para o furo de gusa; (iii) a variação homogênea da granulometria do coque não influenciou de forma significativa a distribuição dos líquidos nem o tempo de residência. No entanto, a distribuição granulométrica do coque ao longo do raio no interior do cadinho tem forte influência nas linhas de fluxo do líquido, e conseqüentemente, na sua retenção.

## REFERÊNCIAS

- 1 CASTRO, J. A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Modeling of Liquids Dynamics Inside the Blast Furnace Hearth. Spring ISIJ working group Meeting on lower part of blast furnace modeling; Kanazawa, Japan. pp 72-74; July, 2000.
- 2 PATANKAR, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Editora Taylor & Francis, 1980.
- 3 GANDRA, B. F.; SCUDELLER, L. A. M.; CASTRO, J. A.; CASTRO, L. F. A. Fluxo de Líquidos no Cadinho do Alto-Forno. XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, ABM. Florianópolis, SC, 2005.
- 4 GANDRA, B. F. Desenvolvimento de Modelo Matemático do Fluxo de Líquidos no Cadinho do Alto-Forno. Belo Horizonte: CPGEM/UFMG, 2007.86p Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\vec{F}_s^i$	- transferência de momento entre sólidos e líquidos (N);	$f$	- fator de fricção;
$\vec{U}_i$	- vetor de velocidade de entrada (m/s);	FG	- furo de gusa;
$\vec{U}_s$	- vetor de velocidade de saída (m/s);	$g$	- gravidade ( $m/s^2$ );
$\beta$	- coeficiente de arraste hidrodinâmico;	$h$	- altura de material líquido no cadinho (m);
$\rho$	- densidade ( $kg/m^3$ );	$h_i$	- coeficiente de troca de calor na superfície dos líquidos ( $W/m^2K$ );
$\varepsilon$	- fração de vazios do leito;	$h_{s-i}$	- coeficiente de troca de calor entre líquidos e sólido ( $W/m^2K$ );
$\varepsilon_s$	- fração de vazios do sólido;	$h_s$	- coeficiente de troca de calor na superfície do sólido ( $W/m^2K$ );
$\phi$	- variável, temperatura ou velocidade, resolvida pelo modelo;	$k_i$	- condutividade térmica dos materiais, i – líquido, s – sólido ( $W/mK$ );
$\mu_i$	- viscosidade da escória (Poise);	L	- comprimento do furo de gusa (m);
$\rho_i$	- densidade da fase ( $kg/m^3$ );	P	- pressão interna do alto-forno (Pa);
$\Gamma_\phi$	- coeficiente de transferência da variável;	Pr	- número de Prandtl;
$\varphi_s$	- fator de forma do sólido;	Q	- energia (W);
$Cp_s$	- capacidade térmica do sólido ( $J/kg\ ^\circ C$ );	Re	- número de Reynolds;
D	- diâmetro do furo de gusa (m);	$r_h$	- raio hidráulico (m);
$d_{coque}$	- diâmetro do coque (m)	t	- tempo (s);
$D_f$	- diâmetro final do furo de gusa (mm);	t	- tempo de corrida (min);
$D_i$	- diâmetro inicial do furo de gusa (mm);	$t_R$	- tempo total de corrida (min);
$d_s$	- diâmetro do sólido (mm);	u	- velocidade de saída (m/s);
e	- rugosidade (m);	$u_i$	- velocidade (m/s).
		V	- vazão de saída de líquidos ( $m^3/s$ ).