

## Um estudo numérico e experimental do escoamento de aço durante o vazamento de uma panela de aciaria

(A numerical and experimental study of steel fluid flow during draining from a ladle)

Eliana Ferreira Rodrigues

Professora do DECAT/EM/UFOP. E-mail: elianafr@em.ufop.br

Ângelo Máximo Fernandes Marins

Graduando do DEMET/DEMET/EM/UFOP. E-mail: maximomarins@yahoo.com.br

Márcio Rodrigo Solimani

Graduando do DEMET/DEMET/EM/UFOP. E-mail: mrsolimani@yahoo.com.br

### Resumo

O presente trabalho apresenta uma metodologia numérica e experimental para determinação dos parâmetros de controle da temperatura do aço líquido contido na panela de aciaria durante o vazamento para o distribuidor, por ocasião dos seus ciclos normais de operação. Inicialmente os modelos idealizados são resolvidos numericamente com a aplicação da técnica do método de elementos finitos, obtendo-se, como principais resultados, o perfil de temperatura no aço líquido juntamente com a parede refratária e o perfil de velocidade do banho metálico. Os resultados obtidos da simulação são comparados com os retirados de experimentos na indústria realizados pelos autores. Pode-se, assim, identificar os pontos críticos na perda de temperatura do banho metálico e empregar medidas preventivas, de modo a evitar um superaquecimento ou um aquecimento prematuro que resulta em uma série de problemas durante o lingotamento contínuo.

**Palavras-chave:** Panela de aciaria, modelagem matemática, simulação numérica, ANSYS, controle de temperatura.

### Abstract

*The control parameters which establish the liquid steel temperature inside the steel making ladle during teeming (when liquid steel flows from the ladle into the distributor) have been analysed, by means of numerical and experimental procedures. Initially the idealized models are solved with the use of finite element techniques obtaining as main results: the liquid steel temperature profile, the refractory wall temperature profile, and the velocity profile of the melt. The results obtained from the computational simulation are then compared with actual steel plant results measured by the authors. It is possible in this way to obtain the critical points where major temperature losses occur, helping to obtain preventive measures to lessen overheating and premature heating which result in a series of problems during continuous casting.*

**Keywords:** Ladle, numerical simulation, ANSYS, temperature control, liquid steel measurements.

## 1. Introdução

Em tempos em que as empresas lutam por competitividade no mercado, ter o máximo de controle sobre seus processos industriais é fator fundamental para a permanência das mesmas nesse mercado cada vez mais exigente. Visto isso, o objetivo de se medirem e de se controlarem as diversas variáveis físicas em processos industriais e de se obterem os produtos de alta qualidade com melhores, condições de rendimento e segurança nos processos de produção, a custos cada vez menores tem-se tornado uma tarefa muito difícil.

Uma das variáveis de suma importância, durante o processo de fabricação do aço, é a *temperatura*, cujo monitoramento e controle são fundamentais para a obtenção do produto final com qualidade e baixo custo.

Alguns trabalhos quantificaram a temperatura média do aço contido na panela, considerando, apenas, o mecanismo de perda de calor através do revestimento da panela (Watanabe et al., 1991; Hlinka et al., 1985). Essa descrição do fenômeno é incompleta, pois não leva em conta os perfis de velocidade do metal líquido, associados a processos de convecção no interior da panela. Tais trabalhos também analisaram como essas variações influenciam a temperatura do aço durante o vazamento para o distribuidor.

Durante o tempo de permanência do aço na panela, o efeito de estratificação térmica pode influenciar no perfil térmico durante o vazamento (Austin et al., 1992). Do ponto de vista prático, a variação de temperatura do aço é função da vazão do aço líquido. Se a vazão é elevada, a recirculação do aço entre a superfície e a parte inferior da panela é acelerada, resultando em maior homogeneização térmica e, conseqüentemente, em uma menor variação na temperatura do aço vazado. Por outro lado, baixas vazões implicam menor misturamento, com remoção preferencial do aço localizado no fundo da panela, o que irá resultar em grandes variações de temperatura durante o lingotamento. Assim um rápido enchimento do distribuidor irá minimizar o efeito da estratificação de temperatura na panela. (Rodrigues, 1998).

Outro efeito sobre a variação da temperatura de vazamento é fluxo de calor perdido pelo banho pela superfície superior. Chakraborty e Sahai (1992) simulou duas situações. Na primeira situação, considerou-se uma espessa camada de escória, o que resultou em uma perda de calor maior pelas paredes. Isto resultou em um elevado gradiente de temperatura entre as regiões superiores e inferiores, visto que as velocidades de misturamento são reduzidas. Conseqüentemente, em condições de vazamento, a temperatura do aço permanece quase que constante. Para uma segunda situação, foi considerado uma fina camada de escória, logo a perda de calor pela superfície da panela é elevada em relação às perdas através dos refratários. Ao iniciar-se o vazamento do aço, há uma diminuição contínua da temperatura de vazamento de aço na panela. Com isso, a quantidade de calor perdido, através da superfície superior do banho, dentro da panela, é um dos parâmetros que influenciam a variação de temperatura de vazamento de metal durante o lingotamento. Deseja-se uma temperatura de vazamento de metal uniforme durante o período de lingotamento.

O presente artigo descreve uma metodologia numérica e experimental para controlar a temperatura do aço em uma panela de aciaria, por ocasião dos seus ciclos normais de operação, fazendo o uso de modelos matemáticos mediante a aplicação da técnica do método de elementos finitos.

## 2. Modelagem matemática

O modelo físico da panela foi considerado como: simétrico axial; bidimensional, em coordenadas cilíndricas; as reações químicas foram ignoradas, o orifício de vazamento é central; a temperatura do meio ambiente externo é constante; todos os corpos que emitem radiação são emissores difusos.

As equações de Navier-Stokes, para continuidade, quantidade de movimento e energia, juntamente com o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ , foram utilizadas para descreverem os fenômenos ocorridos no *aço líquido* contido na panela durante vazamento. A seguinte equação diferencial parcial descreve os fenômenos da transferência de calor e do escoamento do fluido dentro da panela, durante o processo de vazamento:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_z \phi)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u_r \phi)}{\partial r} = \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right] + S_\phi \quad (1)$$

onde  $\Gamma_\phi$  e  $S_\phi$  são coeficientes de difusão e termo fonte da variável específica  $\phi$ , respectivamente, e seus valores são fornecidos na Tabela 1.

Nas equações da Tabela 1,  $\mu_{ef}$  é a viscosidade turbulenta efetiva, e  $\kappa$  e  $\epsilon$  são a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, respectivamente.

As equações diferenciais da Tabela 1 são resolvidas numericamente, utilizando-se técnicas de elementos finitos. Os valores das constantes do modelo de turbulência são os recomendados por Launder e Spalding (1974).

A distribuição de temperatura nos revestimentos refratários é descrita pela lei de Fourier da condução de calor em coordenadas cilíndrica, bidimensional e em regime transiente.

As *Condições de contorno* para o *aço líquido* junto à *parede*, hipótese de não deslizamento para as componentes da velocidade, são adotadas para o modelo de turbulência, fazendo-se  $\kappa$  e  $\epsilon$  nulos. No eixo de simetria, a componente axial da

**Tabela 1** - Equações que descrevem o comportamento do aço líquido dentro da panela, durante o processo de vazamento.

Equação	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Continuidade	1	0	0
Momentum em z	$u_z$	$\mu_{ef} = \mu_t + \mu$	$= -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{ef} \left[ \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \right] + (\rho - \rho_0)g$
Momentum em r	$u_r$	$\mu_{ef}$	$= -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{ef} \left[ \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial r} + \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \right\} - \frac{u_r}{r^2} \right]$
Energia Térmica	T	$\mu / \sigma + \mu_t / \sigma_t$	0
Energia cinética turbulenta	k	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$G - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta g \mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z}$
Dissipação da energia cinética turbulenta	$\varepsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{C_1 \varepsilon G}{k} - \frac{C_2 \rho \varepsilon^2}{k} + \frac{C_1 C_\mu (1 - C_3) \beta g \rho k}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z}$

onde:

$$G = \mu_t \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{u_r}{r} \right)^2 \right\} + \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$$

velocidade e os gradientes das componentes radiais de temperatura, energia turbulenta e taxa de dissipação de energia são nulos. Para o orifício de vazamento, a componente de velocidade radial é nula e a componente axial é igual à velocidade fornecida pelo balanço de massa. Os valores de  $\kappa$  e  $\varepsilon$ , no orifício de vazamento *da panela*, assumem os mesmos valores empíricos aplicados à entrada do bocal do distribuidor, utilizados por Yeh et alii.(1993). No topo, o fluxo de calor e os valores de  $\kappa$  e  $\varepsilon$  e a componente da velocidade radial foram considerados nulos.

### 3. Procedimento Experimental

Os procedimentos experimentais foram realizados para uma corrida típica durante o processo de fabricação com o auxílio de uma câmara digital, um pirômetro ótico e uma sonda fixada a uma tampa da panela. A câmara registrou as seqüências das etapas do processo operacional e auxiliou no levantamento de variáveis que afetam o processo. Com o pirômetro ótico retiraram-se os perfis térmicos da caraça da panela para se conhecerem as condições de contorno do problema. A sonda que foi imersa no banho metálico registrou a temperatura de um ponto estabelecido no aço, vide esboço na Figura 1. Em processos atuais, a medição e o controle da tempe-

ratura no processo de ciclo de panela são feitos de modo pontual e de forma instantânea, não se considerando a variação da temperatura com o tempo, o que foi realizado com o auxílio da sonda.

A sonda foi fixada à tampa, à base de um material refratário ( $Al_2O_3$ ) e com bordas em aço carbono. Essa tampa tem uma “alça” para que o sistema tampasonda pudesse ser içado pela ponde rolante e colocado dentro da panela de aço líquido. Sobre essa tampa, também foi acoplado o sistema de aquisição de dados, juntamente com um sistema de refrigeração a ar comprimido. A uma distância de 80 mm da ponta inferior da sonda foi colocado um termopar do tipo K, para registrar, durante o maior tempo de vazamento, a temperatura do aço.

Após o fim do vazamento o sistema de refrigeração é desligado e a tampa juntamente com a sonda são retiradas da torre de vazamento, sendo inseridas novamente a outra corrida.

## 4. Procedimentos computacionais

A análise numérica consiste em simular as condições operacionais durante o processo de fabricação, através do método dos elementos finitos (FEM), o qual é empregado pelo software ANSYS/FLOTRAN. Esse software permite uma análise integrada da área fluida com a térmica. Um modelo bidimensional assimétrico, em coordenadas cilíndricas, representa o modelo de panela de aciaria utilizada. Pelo esquema da malha, vide Figura 1, verificam-se os diversos tipos de materiais refratários constituintes do revestimento da panela e, também, o aço líquido que é o enfoque dessa pesquisa. Tais materiais se dispõem ao longo da estrutura de acordo com a solicitação fluida térmica. Foi feito um levantamento de dados operacionais para incluir, no software, as condições de contornos apropriadas.

O modelo da panela discretizado é constituído de 5157 elementos e 5310 nós, conforme ilustra a Figura 2, onde se têm as seguintes variáveis para o aço líquido: temperatura, componente da velocidade axial, componente da velocidade radial, pressão e energia cinética e taxa de dissipação da energia cinética turbulenta. Já para o revestimento refratário há apenas uma variável: a temperatura. Utilizaram-se pequenos intervalos transientes durante o processo de vazamento para situações de panela cheia, 4/5, 2/3, 1/2, 1/3 e 1/5. O critério de convergência estabelecido foi quando a variável temperatura atingia um valor de 0,001, o que equivale a 300 interações para o equilíbrio. Esse critério foi usado em todas etapas estudadas durante o vazamento.

## 5. Síntese principal da simulação numérica e experimental

Os principais resultados a serem apresentados da simulação numérica foram obtidos das simulações considerando uma espessa camada de escória no topo. As unidades utilizadas estão no

Sistema Internacional de Medidas. A simulação iniciou-se com a panela cheia e finalizou-se após 40 minutos de vazamento, embora o tempo real de vazamento foi de minutos.

Os perfis de temperatura do banho metálico resultantes da simulação são mostrados na Figura 3. Ela ilustra os perfis de temperaturas para as situações de panela cheia, até a posição de 1/5 de volume de aço contido na panela. Observa-se que a temperatura mínima atingiu 1829K no final do lingotamento. Pode-se observar, ainda, que há um núcleo central uniforme no metal líquido com gradientes acentuados nas paredes laterais da panela, onde ocorre maior perda térmica para os refratários. À medida que o aço é vazado, esses gradientes também são acentuados. No início há uma queda de cerca de 2 K e, na posição de 1/5, cerca de 10 K, da região central para a parede lateral.

A Figura 4 ilustra os perfis de temperatura na parede refratária lateral inferior da panela durante o vazamento. O perfil térmico que representa a panela cheia está em contato com o banho metálico, o restante das curvas já não estão mais representando o perfil do refratário



Figura 1 - Esquema de montagem da sonda na tampa da panela.

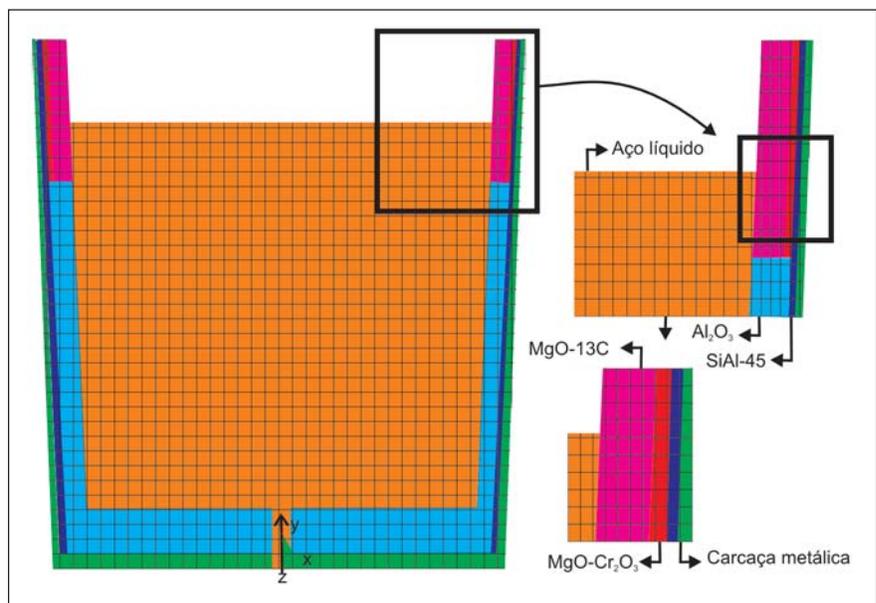
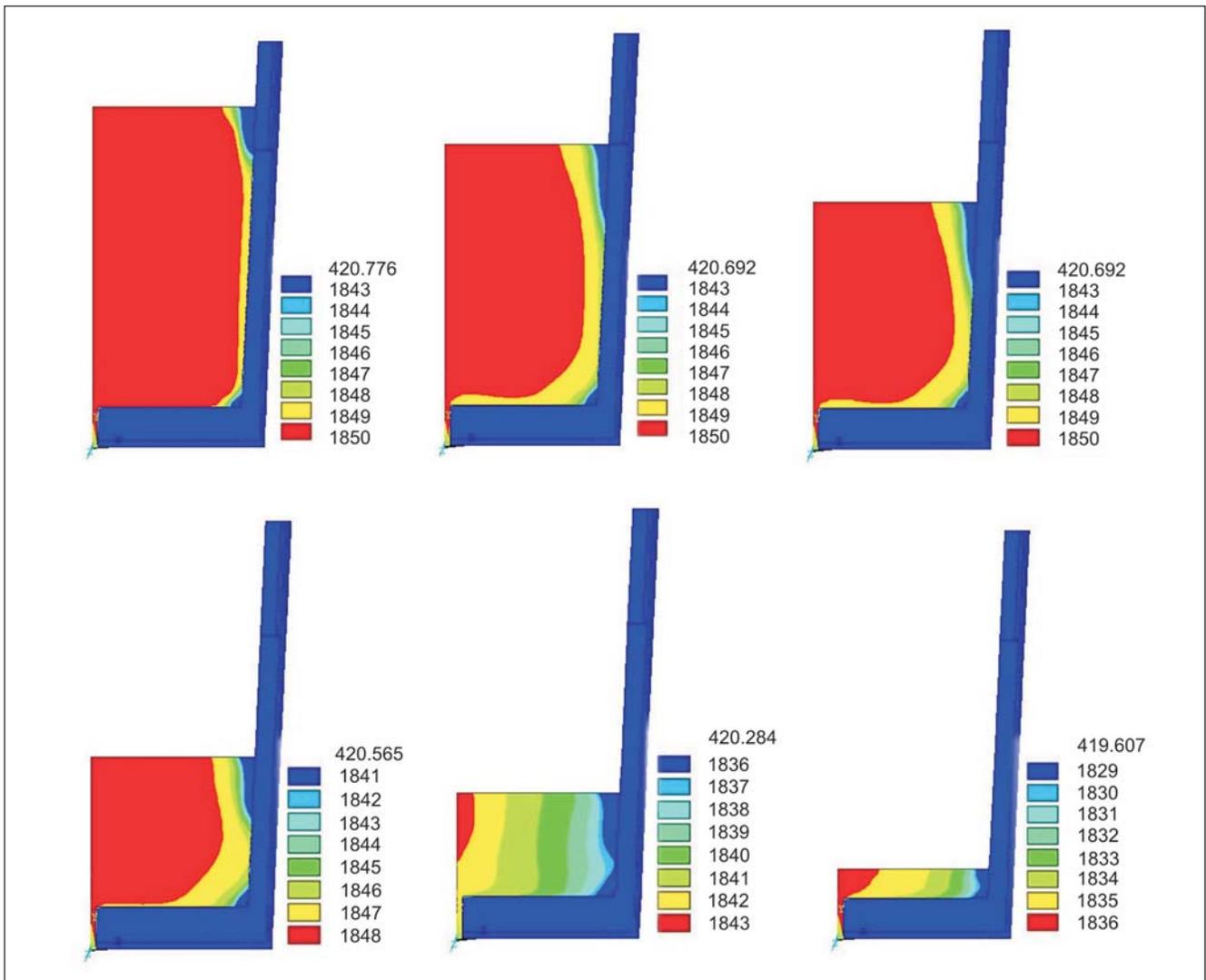


Figura 2 - Modelo discretizado da panela gerado pelo ANSYS.

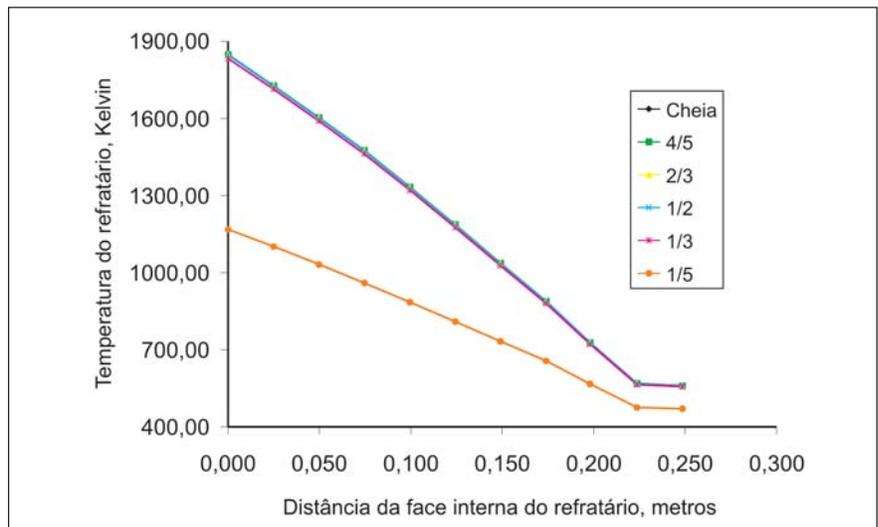


**Figura 3** - Perfis de temperatura no aço durante o vazamento do aço para o distribuidor, para as posições de panela cheia, 4/5, 2/3, 1/2, 1/3 e 1/5.

em contato com o banho. É interessante notar, nesse gráfico, que a temperatura do refratário decai até um certo valor, onde se estabiliza.

Os campos de velocidade, para as situações de panela cheia, 4/5, 2/3, 1/2, 1/3 e 1/5 do nível de aço contido na panela, são mostrados na Figura 5. Observa-se, para todas situações, que a magnitude de velocidade, nas proximidades da boca de saída do aço, é maior em relação ao restante do banho. O vórtice formado tem uma tendência de se localizar sempre próximo ao refratário na parte superior.

Os resultados experimentais estão ilustrados na Figura 6. Observa-se uma



**Figura 4** - Perfil de temperatura ao longo da parede refratária lateral na região de  $Al_2O_3$  durante o vazamento.

variação de temperatura com o tempo de vazamento. O gradiente de temperatura é cerca de 15°C/minutos. Nessa figura, pode-se comparar os resultados obtidos da simulação numérica e os obtidos experimentalmente. As curvas do gráfico representam um ponto nodal da simulação numérica. Esse ponto corresponde ao mesmo posicionamento do termopar, cerca de 0,70m do fundo da panela.

A queda de temperatura, durante as medições, atingiu cerca de 14,8°C, entre 5 e 40 minutos de vazamento, e cerca de 14,3°C dos resultados obtidos da simulação numérica no mesmo intervalo de

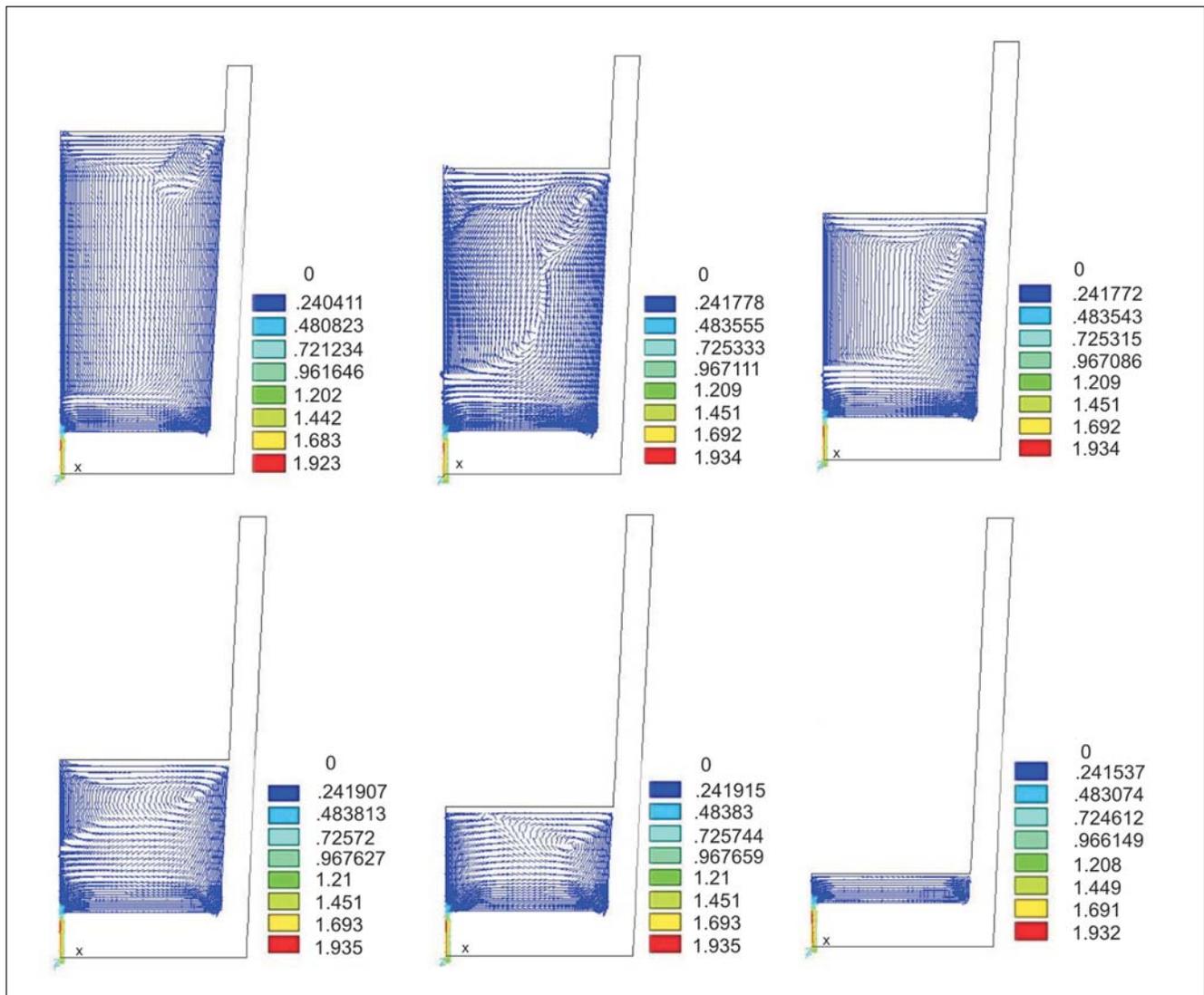
tempo. Como pode ser visto nessa figura, existe uma grande proximidade entre os dois resultados, havendo, entre eles, uma diferença de cerca de 3 a 5°C.

O perfil térmico do aço obtido experimentalmente apresenta uma tendência mais linear, enquanto o perfil térmico obtido da simulação numérica apresenta uma tendência mais exponencial com uma inclinação mais acentuada a partir de 30 minutos de vazamento. Para essa corrida podemos observar uma queda de temperatura no aço líquido dentro da panela de aciaria de aproximadamente 20°C durante o vazamento.

## 6. Conclusões

As conclusões que podem ser tiradas a partir desse trabalho são:

- As soluções para esse modelo podem ser desenvolvidas através de técnicas de elementos finitos e com o auxílio do software ANSYS/FLOTRAN, permitindo obter resultados com precisão satisfatória, como pode se observar através do estudo comparativo com dados reais da empresa.
- O método apresentado permite, além da determinação de parâmetros glo-



**Figura 5** - Campos de velocidade no aço durante o vazamento do aço para o distribuidor, para as posições de panela cheia, 4/5, 2/3, 1/2, 1/3 e 1/5.

bais, uma boa avaliação local dos perfis de temperatura e de velocidade, bem como de outras propriedades para os refratários da panela e o aço durante o período de vazamento para o distribuidor.

- A velocidade de vazamento é um fator muito importante. Ela define, além do movimento do aço líquido dentro da panela, o perfil de temperatura dentro da panela.
- Os fatores determinantes para essa variação são, principalmente, o fluxo de calor dissipado pela camada de escoria e refratários, o tempo de vazamento (velocidade de vazamento do aço para o distribuidor) e a capacidade térmica da panela.

A temperatura final de vazamento, não é uma variável fácil de ser administrada na operação de vazamento do aço da panela para o distribuidor, pois essa temperatura depende de muitas outras, como vimos anteriormente, além de ser intrinsecamente ligada ao tipo de aço que será produzido.

## 7. Agradecimentos

Em especial ao gerente da aciaria 2 da USIMINAS, Sr. José Flávio Viana, e à FAPEMIG, pelo suporte financeiro.

## 8. Referências bibliográficas

[1] ANSYS User's manual, version 6.0, 2001, SAS Inc.

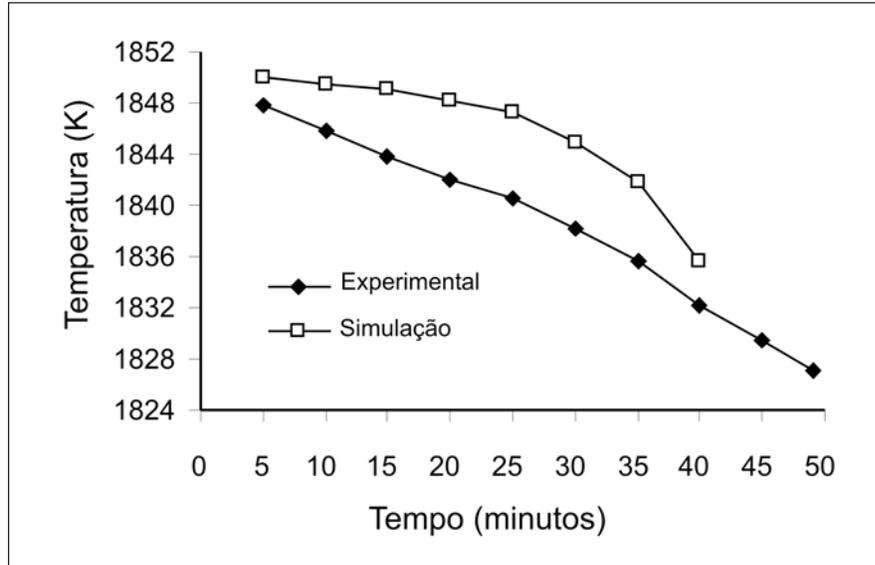


Figura 6 - Comparação de resultados medidos e teóricos.

- [2] AUSTIN, P. R., CAMPLIN, J. M., HERBERTSON, J., TAGGART, I. J. Mathematical modeling of thermal stratification and drainage of steel ladles, *ISIJ International*, v. 32, n. 2, p. 196-202, 1992.
- [3] CHAKRABORTY, S., SAHAI, Y. Effect of slag on heat loss and liquid steel flow in ladles before and during teeming to a continuous casting tundish, *Metallurgical Transactions B*, v.23B, p.135-151, April 1992.
- [4] HLINKA, J. W., CRAMB, A. W. and Bright, D. H. A model for predicting the thermal history of a ladle of steel, *Proceeding of the 68<sup>th</sup> Steelmaking Conference*, v. 68, Detroit-Michigan, April, 14-17, p. 132-133, 1985.
- [5] LAUNDER, B.E. and SPALDING, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, p. 269-289, 1974.
- [6] RODRIGUES, E.F. *Análise e simulação de um ciclo de panela de aciaria*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, junho, 1998. (Tese de Doutorado).
- [7] WATANABE, S., KAWASAKI, S., AOKI, M., ONOE, Y., STO, T., TAKEUCHI, I.M. Une amelioration importante dans la production de fils et barres de qualité em coulée continue de billetes, *La Revue de Métallurgie - CIT*, février, p. 151-158, 1991.
- [8] YEH, J.L., HWANG, W.S., CHOU, C.L. Physical modeling validation of computational fluid dynamics code for tundish design, *Iron making and Steelmaking*, v. 19, n. 6, p. 501-504, 1992.

Artigo recebido em 05/05/2006 e aprovado em 10/02/2007.



\*\*\*\*\*  
**REM - Revista Escola de Minas**  
**71 anos divulgando CIÊNCIA.**

\*\*\*\*\*  
[www.rem.com.br](http://www.rem.com.br)

\*\*\*\*\*