

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS PANEIAS DA SINOBRAS UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL<sup>1</sup>

Márcio Corrêa de Carvalho<sup>2</sup>

Daniel Rodrigues Oliveira<sup>3</sup>

Gerson Ceslau Rusky<sup>4</sup>

Bruno Corrêa Pinheiro<sup>5</sup>

Eduardo Magalhães Braga<sup>6</sup>

## Resumo

O controle da temperatura dentro de uma aciaria é essencial para a qualidade do aço produzido, não apenas para a produtividade, como também para o custo de produção. A falta de um controle preciso das temperaturas adequadas para as panelas pode acarretar problemas no processo. O objetivo do presente trabalho consistiu em modelar matematicamente as panelas da Siderúrgica integrada Sinobras S/A, através de cálculos utilizando as equações fundamentais da transferência de calor e de simulação computacional baseada no método dos elementos finitos. Através da modelagem matemática e da simulação computacional, determinou-se a perda de calor das panelas. Os modelos foram validados através de medições de temperatura por pirometria, e a partir daí foram simuladas modificações no processo que culminaram, após testes práticos na área, em um maior acerto nas temperaturas do aço líquido e na diminuição das perdas de calor pelas panelas.

**Palavras-chave:** Panela de aciaria; Simulação computacional; Controle da temperatura em panelas; Ciclo operacional de panelas.

## STUDY OF THERMAL BEHAVIOR OF LADLES OF SINOBRAS USING COMPUTATIONAL SIMULATION

### Abstract

The temperature control on steelmaking is extremely important to the quality of steel, not only for productivity, but also for production cost. The lack of precise control of temperatures suitable to ladles can cause problems in the process. The aim of this work consists in mathematically modeling the ladles of the integrated Steelmaking Sinobras S.A., and also through the fundamentals equations of heat transfer and computational based on the finite element method. Through mathematical modeling and computer simulations one can know the ladle heat loss and thereafter were simulated the process changes that following practical tests that resulted in the increased accuracy at temperature of the liquid steel and the reduction of heat losses through the ladles.

**Key words:** Ladle; Computational simulation; Control temperature on ladles; Operational cycle of ladles.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 44º Seminário de Aciaria – Internacional, 26 a 29 de maio de 2013, Araxá, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Químico, Prof. Msc, FEMAT, UFPA, PA, Brasil.

<sup>3</sup> Graduando da FEMAT, UFPA, estagiário, Sinobras, PA, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro metalúrgico, Gerente de Aciaria, Sinobras; PA, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Processos, Sinobras; PA, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro Mecânico, Prof. Dr., FEM, UFPA, PA, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

As indústrias siderúrgicas atualmente procuram a otimização dos processos com o intuito de diminuir custos e o consumo de energia envolvida nos processos produtivos. As painéis de aço utilizadas em aciaria para o transporte e metalurgia secundária precisam trabalhar em temperaturas adequadas para que não haja grandes perdas de energia calorífica no aço líquido e para que a mesma possua uma vida útil de seus refratários satisfatória.

Um controle de temperatura no ciclo operacional das painéis é de primordial importância para o acerto de temperatura do aço líquido com um menor consumo de energia elétrica no forno painel e também para se diminuir as perdas caloríficas pelas painéis. As maiores perdas de calor se devem as etapas de painel vazia. Estas etapas consistem na limpeza, manutenção, adição de areia de vedação e tempo de espera até o vazamento.

A partir do modelamento matemático e simulação computacional é possível calcular a perda de temperatura das painéis com o tempo e a estratificação térmica em diferentes condições de serviço. Segundo Lopes,<sup>(1)</sup> as perdas térmicas podem ser divididas em perdas térmicas com a painel cheia (perdas térmicas do aço líquido) e perdas térmicas através da painel vazia (perdas térmicas através dos refratários) e demonstra também as modelagens matemáticas sob estas condições. Segundo Minion e Leckie<sup>(2)</sup> estas perdas podem ser minimizadas com uma boa prática de painel quente que consiste em: manter uma alta temperatura do refratário da painel no vazamento, isolar termicamente o refratário e utilização de tampa.

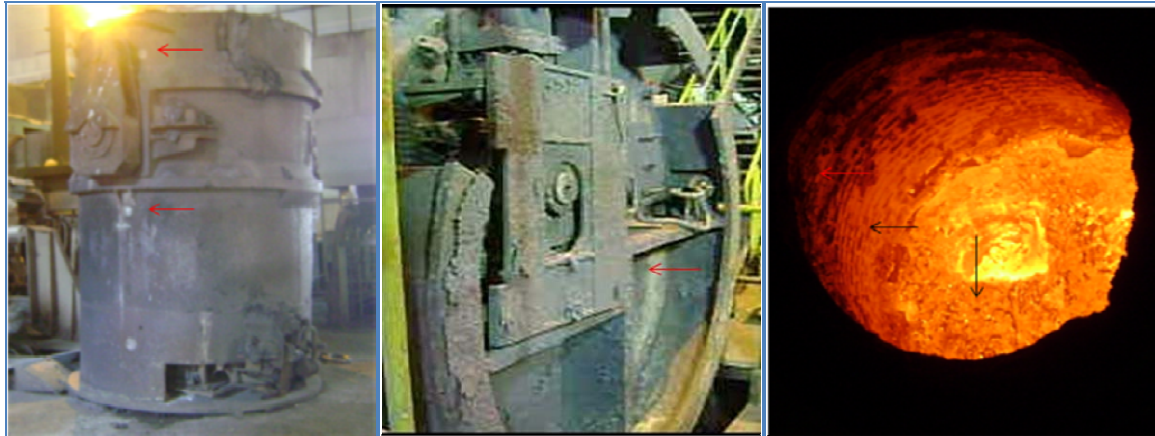
Segundo Ferreira<sup>(3)</sup> as perdas térmicas que com a painel vazia são muito elevadas devido a grande quantidade de energia contida nas camadas refratárias e às elevadas temperaturas da face quente. De acordo com este trabalho existem três formas usuais para reduzir ou compensar as perdas durante o tempo em que a painel está vazia: sobreaquecimento do aço para vazamento, utilização de tampa e utilização de pré-aquecedores.

Este trabalho realizou um estudo das condições térmicas das painéis da aciaria Sinobras S.A. através da coleta de dados na área, modelagem matemática e simulação computacional das painéis em operação a fim de se determinar as perdas de calor. Através dos resultados soluções são propostas a partir de simulações computacionais de transferência de calor pelas painéis e também mudanças operacionais que minimizem as perdas caloríficas, diminuindo conseqüentemente o gasto energético no Forno Painel.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Determinação das Perdas de Temperatura das Painéis

Para se conhecer o comportamento térmico das painéis quando vazias assim como as perdas de temperatura se realizou medições de temperatura da carcaça e o interior das painéis. Estas medições foram realizadas nas seguintes etapas do processo: painel antes da limpeza, painel após limpeza, painel após adição de areia de vedação e painel antes do vazamento. Para as medições foi necessária a utilização de um pirômetro infravermelho com faixa de medições de 50°C-2.200°C. Os pontos de medida na carcaça foram marcados em todas as painéis para padronização dos pontos de medida. A Figura 1 mostra os pontos de retirada de temperatura adotados.



**Figura 1.** Fotos de uma panela mostrando os locais de retirada de temperatura.

A partir dos valores encontrados foi montado um banco de dados em planilha de Excel como visto em parte na Tabela 1 em resultados e discussões. O importante a destacar é que este acompanhamento foi feito com a utilização da tampa e sem a utilização da tampa durante o ciclo operacional para fins de comparar as temperaturas nas duas condições distintas.

## 2.2 Determinação das Perdas de Calor do Aço Líquido Durante o Vazamento

Como o principal objetivo do presente trabalho é diminuir as perdas caloríficas das panelas no período em que a mesma está vazia para que se tenha uma panela mais quente durante o vazamento se analisou a perda de temperatura do aço líquido existente entre o vazamento e a chegada da panela no forno panela. O objetivo desta análise foi determinar se havia uma relação entre a temperatura dos refratários das panelas antes do vazamento com a perda de temperatura do aço líquido durante o tempo já mencionado.

Para se determinar as temperaturas foram utilizados os valores inseridos no Sistema de Gestão do processo de Produção da empresa e a partir daí montada uma planilha de dados em Excel.

## 2.3 Modelamento Matemático das Panelas

Foram feitas algumas considerações que serão as condições de contorno. As transferências de calor consideradas foram: Condução de calor pelos refratários e chapa metálica; Convecção e radiação pela chapa metálica em contato com o ambiente; Convecção e radiação pelo interior da panela através da face quente; Reirradiação das paredes internas da panela.

A transferência de calor na panela obedecerá à geometria cilíndrica nas paredes laterais e retangulares no fundo. Foi considerado que as taxas de transferência de calor eram constantes com o tempo, isto é, em regime estacionário como mostrado em Gupta e Chandra<sup>(4)</sup> As equações gerais para geometria retangular e cilíndrica de acordo com Incropera e Dewitt<sup>(5)</sup> e Seshadri et al.<sup>(6)</sup> são mostradas respectivamente nas Equações 1 e 2:

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( k r \frac{dT}{dr} \right) \quad (2)$$

Para a panela sem tampa se fez a modelagem matemática das transferências de calor existentes na panela vazia de acordo com as teorias mostradas em Incropera e Dewitt<sup>(5)</sup> e Seshadri et al.<sup>(6)</sup> para paredes compostas. Estas foram:

a) Taxa de transferência de calor por condução e convecção pelas paredes laterais apresentado na Equação 3:

$$Q_r = \frac{(T_{oo,i} - T_{oo,e})}{\frac{1}{2.3,14 \cdot R_i \cdot L \cdot h_i} + \frac{\ln(R1/Ri)}{2.3,14 \cdot L \cdot K_t} + \frac{\ln(R2/R1)}{2.3,14 \cdot L \cdot K_p} + \frac{\ln(Re/R2)}{2.3,14 \cdot L \cdot K_c} + \frac{1}{2.3,14 \cdot Re \cdot L \cdot h_e}} \quad (3)$$

Onde:

$T_{oo}$  = temperatura ambiente  
 $T_e$  = temperatura da carcaça  
 $T_i$  = temperatura da face quente  
 $Re$  = raio externo da panela  
 $Ri$  = raio interno da panela  
 $R1$  = raio do tijolo de trabalho  
 $R2$  = raio do tijolo permanente

$h_e$  = coeficiente de convecção ar ambiente ext  
 $h_i$  = coeficiente de convecção ar ambiente int  
 $L$  = altura da panela  
 $K_t$  = condutividade térmica do tijolo de trabalho  
 $K_p$  = condutividade térmica do tijolo permanente  
 $K_c$  = condutividade térmica carcaça metálica

b) Taxa de transferência de calor por condução e convecção pelo fundo como apresentado na Equação 4:

$$Q_r = \frac{(T_{oo,i} - T_{oo,e})}{\frac{1}{h_{ar} \cdot A_f} + \frac{K}{K_t} \cdot A_f + \frac{K}{K_p} \cdot A_f + \frac{K}{K_c} \cdot A_f + \frac{1}{h_{ar} \cdot A_f}} \quad (4)$$

Onde:

$T_{oo,i}$  = temperatura do ambiente interno  
 $T_{oo,e}$  = temperatura do ambiente externo  
 $T_{si}$  = temperatura da face quente  
 $T_{se}$  = temperatura da chapa metálica

$h_{ar}$  = coeficiente de convecção do ar  
 $A_f$  = área circular do fundo da panela (considerada a área interna da panela):

c) Taxa de transferência de calor por radiação pela carcaça metálica como apresentado na Equação 5:

$$Q_{ch_{rad}} = \frac{\sigma(T_{ch}^4 - T_{oo,e}^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_{ch}} + \frac{1}{\epsilon_{ar}} - 1\right)} \quad (5)$$

Onde:

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman =  $5,67E-8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$   
 $T_{ch} = T_{se}$

$\epsilon_{ch} = 0,80$  (emissividade da carcaça)  
 $\epsilon_{ar} = 1$  (emissividade do ar)  
 $T_{oo,e} = 50^\circ\text{C}$

d) Taxa de transferência de calor por radiação e convecção pela face quente considerando a reirradiação no interior da panela mostrado na Equações 6 e 7:

$$Q_{fq_{rad}} = \frac{A \sigma (T_{st}^4 - T_{oo,e}^4)}{\left(1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r} + \frac{1}{F_{12} + \left(\frac{1}{F_{1r}} + \frac{1}{F_{2r}}\right)} + 1 - \frac{\epsilon_{ar}}{\epsilon_{ar}}\right)} \quad (6)$$

Onde:

$A$  = área lateral interna  
 $\epsilon_r$  = emissividade do refratário  
 $\epsilon_{ar}$  = emissividade do ar ambiente  
 $F_{12}$  = fator de forma

$$Q_{fq_{conv}} = h_{r-ar} (T_{fq} - T_{oo,i}) A \quad (7)$$

$F_{1r}$  = fator de vista  
 $F_{2r}$  = fator de vista  
 $h_{r-ar}$  = coeficiente de convecção refratário - ar ambiente

## 2.4 Mudanças Propostas

Segundo Minion e Leckie<sup>(2)</sup> e Andrade et al.<sup>(7)</sup> apud Lopes<sup>(1)</sup> para se ter a conservação de energia da panela é necessário que ela trabalhe o maior tempo possível e que é possível eliminar até mesmo o pré-aquecimento. Propuseram mudanças operacionais e físicas para se otimizar o processo. As mudanças operacionais consistiram em:

Mudar a prática da logística das panelas. As panelas vazias que necessitassem ficar em espera pelo vazamento permaneceriam tampadas logo após a limpeza e estas só deveriam ser destampadas e colocadas no carro de movimentação 10 minutos antes de realizar o vazamento, tempo estimado para colocar panela no carro, adicionar areia e movimentar até o local de vazamento. Outra mudança foi a subida da panela para o lingotamento já tampada minimizando as perdas caloríficas.

As mudanças físicas propostas foram duas: A primeira consistiu na mudança na colocação de material isolante térmico nas panelas para diminuir as perdas de energia pelos refratários. A segunda consistiu no uso da base para manutenção das sedes e do carro de movimentação de panelas para a área de manutenção de refratários para manter a panela aquecida. Desta forma, assim que a panela saísse da limpeza esta permaneceria no carro e sob a proteção térmica da base para manutenção. Para isto a base deveria ser revestida com manta isolante térmica. A Figura 2 mostra um esquema da mudança operacional proposta.

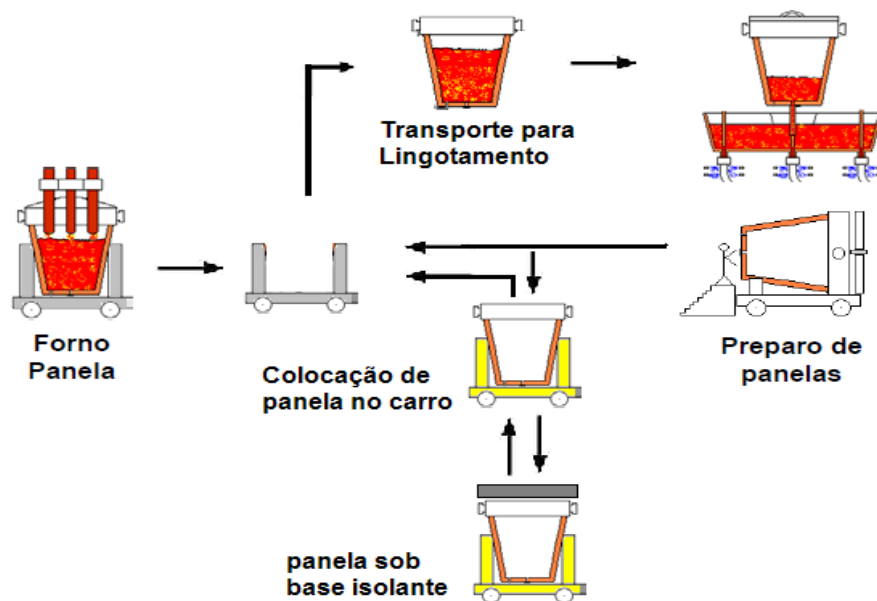


Figura 2. Esquema da mudança operacional proposta.

## 2.5 Desenvolvimento das Simulações Computacionais

As discretizações foram feitas no programa Ansys Workbench v11 para a panela com tampa e sem tampa, com todos os seus refratários e também com material isolante a fim de se simular os efeitos de colocação de material isolante. Foram simuladas condições de aquecimento e resfriamento de acordo com os cálculos obtidos na modelagem matemática e dados recolhidos na planta. As discretizações da panela completa sem tampa e com tampa foram feitas utilizando respectivamente uma malha hexaédrica refinada de 162.924 e 138.417 nós e 156.659 e 123.323 elementos. As discretizações para as simulações de resfriamento levaram em conta

somente o refratário de trabalho e o método utilizado foi o do tipo tetraédrico com alta relevância e com 1.460.388 nós e 606.617 elementos como mostrados respectivamente na Figura 3.

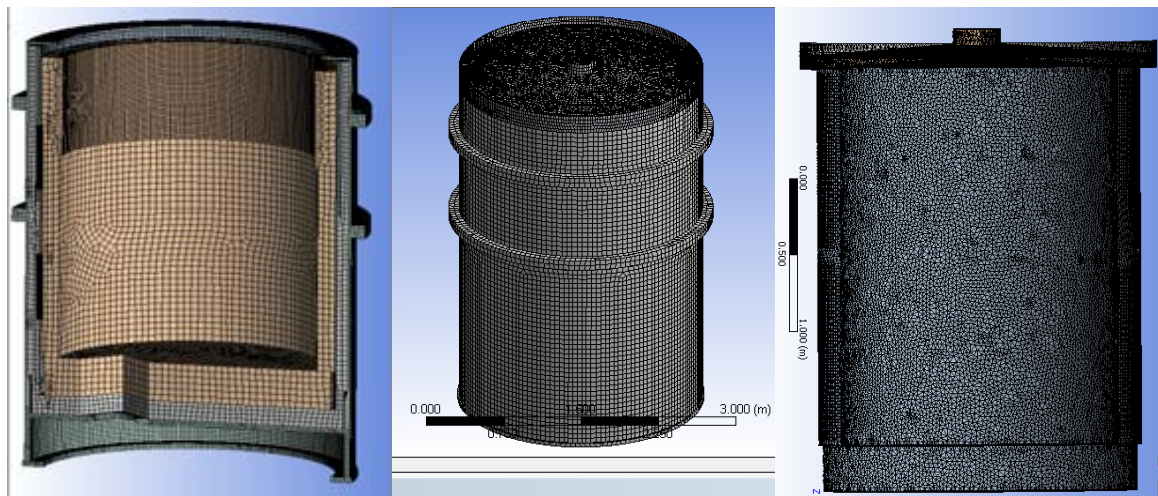


Figura 3. Malhas computacionais da panela com tampa e sem tampa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Perdas de Calor com Panela Destampada e Tampada

Os resultados das medidas de temperatura colocados em uma planilha de dados como já mencionada é vista em parte na Tabela 1.

Tabela 1. Levantamento das temperaturas das panelas durante ciclo operacional (exemplo)

Dia	Corrida	Panela	Horário	Etapa	Linha de esc. externa (°C)	Linha de esc. Interna. (°C)
20/11/2012	126.939	4	16:04	Antes da limpeza	327	980
20/11/2012	126.939	4	16:13	Depois da limpeza	320	900
20/11/2012	126.939	4	16:39	Após da. Areia	316	750
20/11/2012	126.939	4	16:56	Antes do vazamento	316	726

A partir dos dados da planilha foram retirados os seguintes resultados mostrados na Figura 4. Levando em consideração as quedas de temperatura na linha de escória (LE) e linha de metal (LM) durante o tempo em que a panela permanece em espera até a adição de areia de vedação e o tempo até o vazamento constatou-se que os valores médios, máximos e mínimos de perdas para as panelas que permaneceram tampadas foram consideravelmente menores. As panelas que permaneceram destampadas perderam até 340°C, enquanto que as panelas tampadas até 235°C, enquanto que os valores médios foram 161°C e 114°C respectivamente.

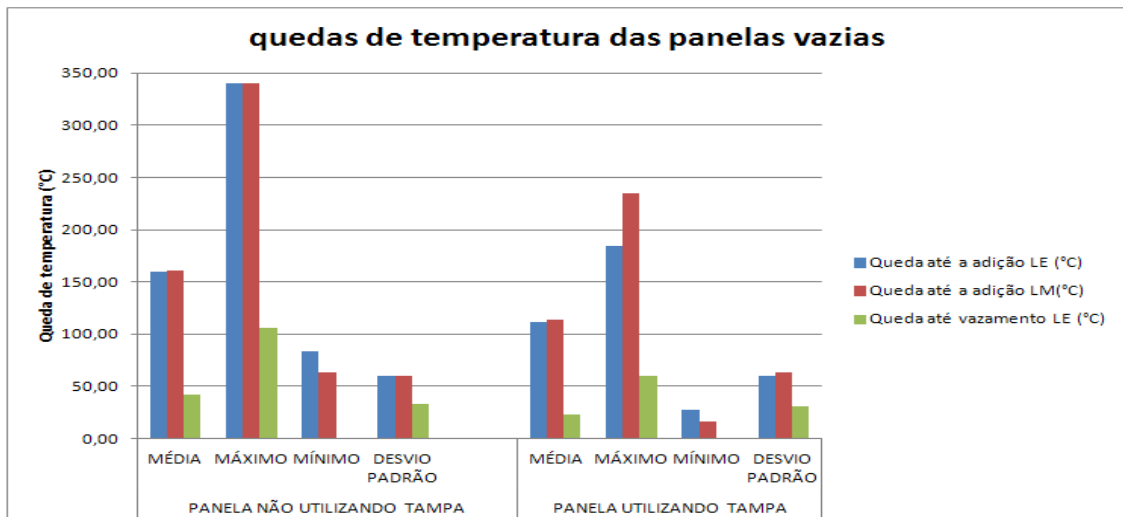


Figura 4. Valores calculados de perdas de temperatura para as panelas destampadas e tampadas.

A evolução das temperaturas com o decorrer do ciclo operacional para as panelas que utilizaram tampa a maior parte do tempo e as que não utilizaram são mostrados na Figura 5.

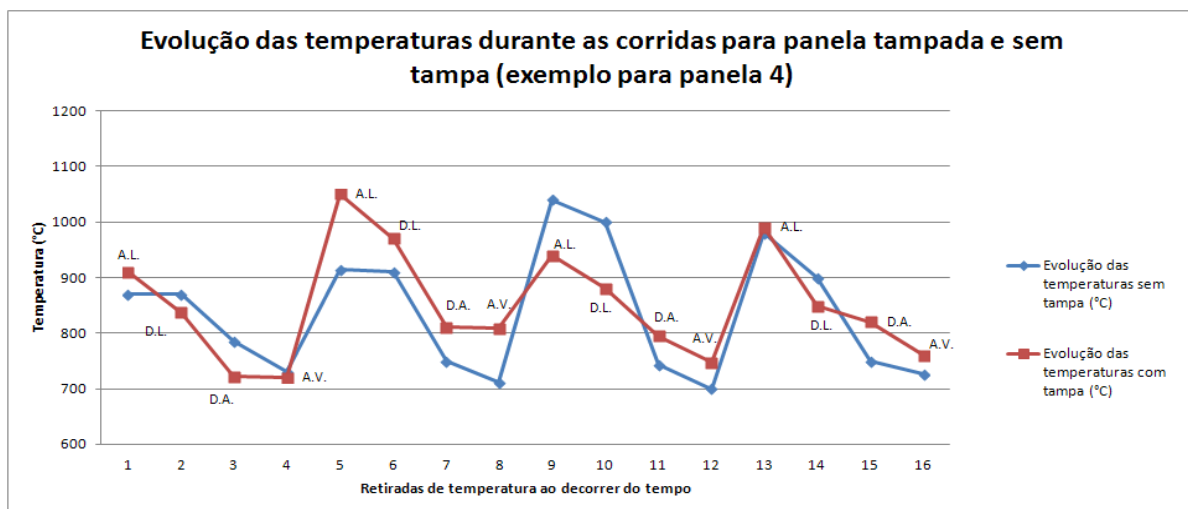


Figura 5. Evolução das temperaturas durante as corridas para panela destampada e tampada: AL= antes da limpeza; DL= depois da limpeza; DA= depois da adição de areia; AV= antes do vazamento.

Para a panela nº4, por exemplo, sob as condições destampadas e tampadas constataram-se que para as panelas que permaneceram destampadas após a limpeza até o momento do vazamento possuíam uma menor temperatura na linha de escória antes do vazamento, mesmo que a mesma tenha saído do lingotamento contínuo com uma temperatura interna maior evidenciando a eficiência quando se utiliza por mais tempo a tampa na panela.

### 3.2 Energia Elétrica Consumida no Forno Panela

Com os dados adquiridos no Sistema de Gestão de processo de Produção se obteve as perdas de temperatura do aço líquido e se fizeram relações entre a perda de temperatura da panela vazia e a perda de temperatura do aço líquido e a energia elétrica consumida no forno panela. Parte da planilha é vista na Tabela 2 e as

relações existentes entre a temperatura interna da panela antes do vazamento e a queda de temperatura do aço líquido entre o vazamento e a chegada da panela no forno panela e esta queda de temperatura do aço líquido com a energia elétrica consumida no forno panela são mostrados respectivamente nas Figuras 6 e 7.

**Tabela 2.** Levantamento das temperaturas do aço líquido durante ciclo operacional (exemplo)

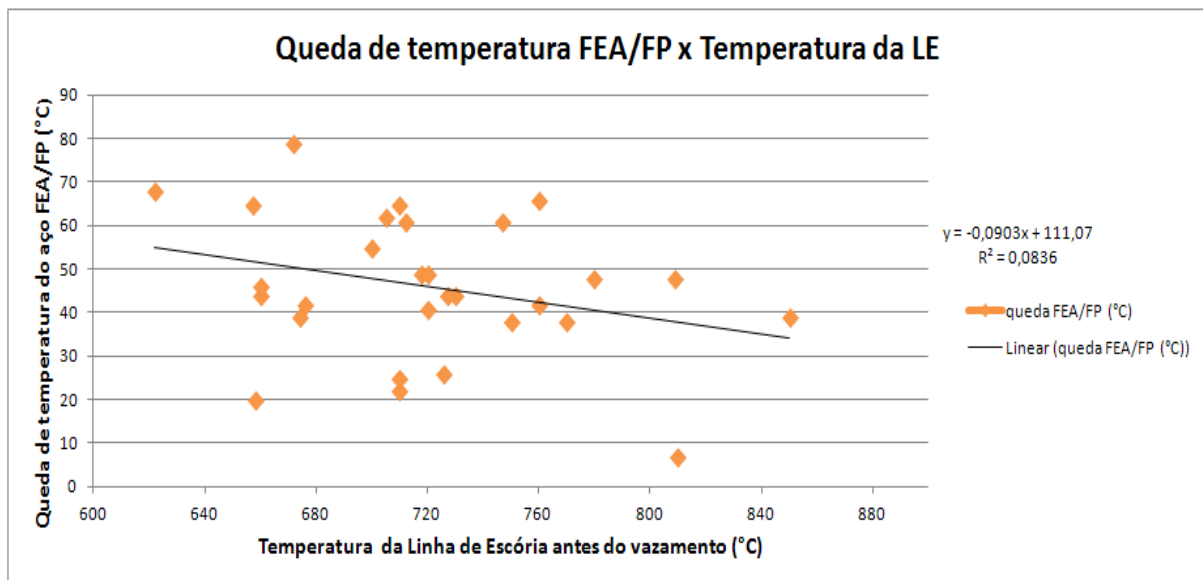
Dia	Corrida	Etapa	Horário	Temp. antes Vazamento (°C)	Temp. Chegada FP (°C)	Temp. Liberação FP (°C)
20/11/2012	126.935	Vazamento	10:39	1674		1.000
20/11/2012	126.935	Chegada Panela FP	10:46		1620	
20/11/2012	126.935	Liberação Panela FP	10:59			1.612

Verificou-se a existência de uma relação entre a temperatura da linha de escória antes do vazamento e a queda de temperatura que acontece no aço líquido durante o tempo em que acontece o vazamento até o momento em que a panela chega ao forno panela. O gráfico da Figura 6 mostra que à medida que a temperatura da linha de escória na hora do vazamento seja maior, há uma tendência de uma menor queda de temperatura sofrida no aço líquido e vice-versa. Pela regressão linear vemos esta tendência e que esta teoricamente obedece a seguinte Equação 8.

$$\Delta T_{\text{aço líq.}} = -0,0903 * T_{LE} + 111,07 \quad (8)$$

Onde:

- $\Delta T_{\text{aço líq.}}$  = Queda de temperatura do aço líquido.
- $T_{LE}$  = Temperatura da linha de escória antes do vazamento.



**Figura 6.** Relação entre queda de temperatura entre Forno Elétrico e Forno Panela e a temperatura da linha escória antes do vazamento.



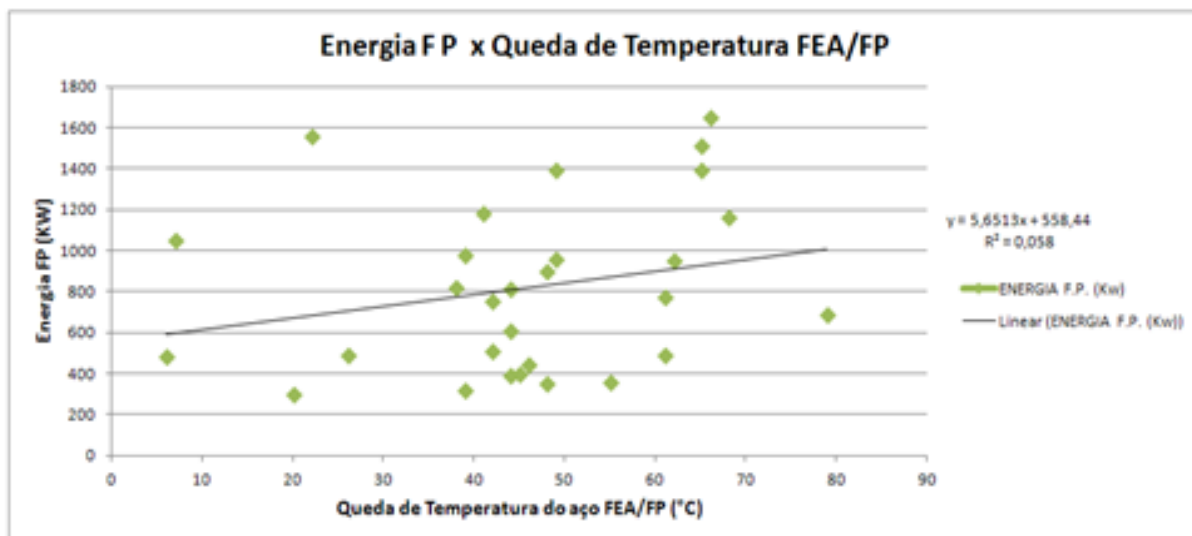


Figura 7. Relação entre a energia gasta no FP e a queda de temperatura entre FEA/FP.

A energia elétrica gasta no Forno Panela durante a metalurgia secundária também guardou uma relação com a queda de temperatura do aço líquido. Na Figura 7 através da regressão linear vemos a tendência de se necessitar uma maior energia à medida que seja maior a queda de temperatura. Teoricamente esta tendência obedece à Equação 9:

$$E_{FP} = 5.65 * \Delta T_{aço\ liq.} + 558,44 \quad (9)$$

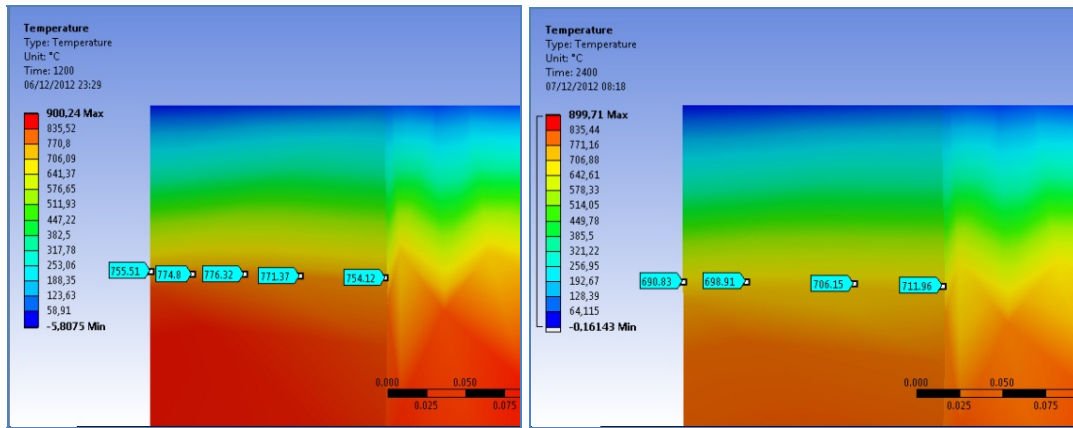
Onde:

- $\Delta T_{aço\ liq.}$  = Queda de temperatura do aço líquido.
- $E_{FP}$  = Energia elétrica gasta na metalurgia secundária.

Com relação aos refratários segundo Andrade<sup>(8)</sup> deve-se evitar as quedas de temperatura para que não haja degradação nos refratários, assim como a alternância das temperaturas que ocasionam fadigas térmicas. Ainda segundo Andrade,<sup>(8)</sup> a operação do forno panela que utiliza arco elétrico é agressiva à parede refratária pela irradiação do arco causando desgaste prematuro e quanto maior o tempo de forno ligado, maior será a taxa de aquecimento da escória e, como consequência, a sua agressividade sobre os refratários.

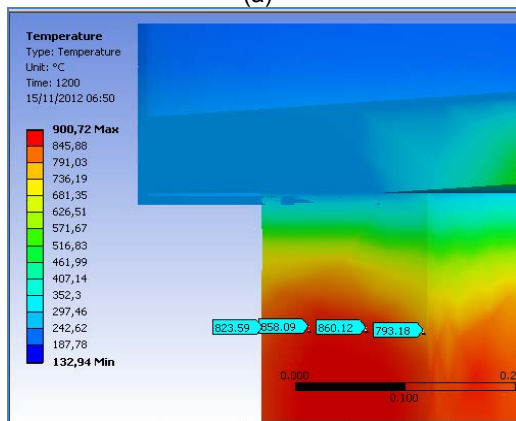
### 3.3 Simulações Computacionais

Os resultados das simulações de resfriamento mostraram quais seriam os resultados de perfis de temperatura esperados para as panelas durante as etapas de panela vazia mantendo a panela sem tampa ou tampada (Figura 8). A Figura 8 mostra o resultado da colocação de placas isolantes nas laterais das panelas entre a carcaça metálica e os tijolos permanentes.



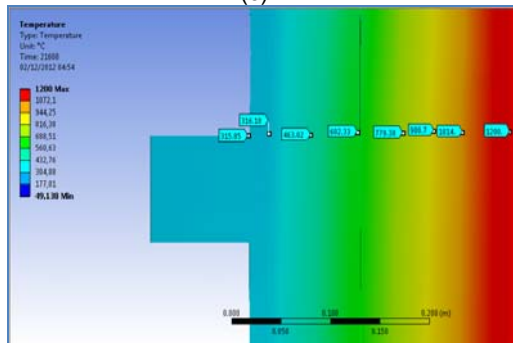
(a)

(b)

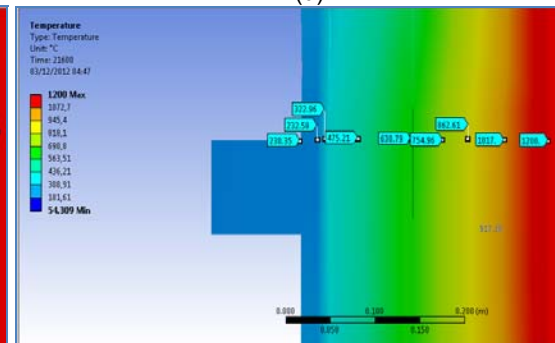


(c)

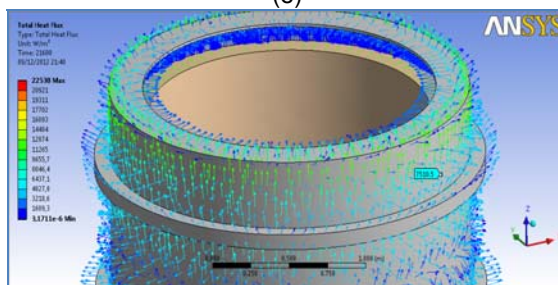
(d)



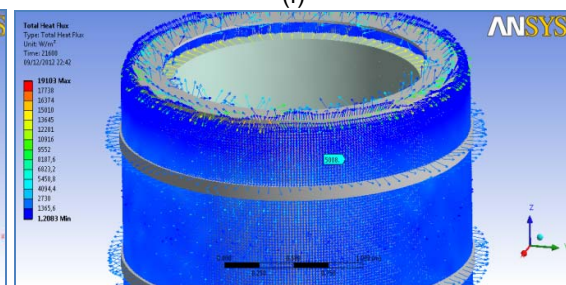
(e)



(f)



(g)



(h)

**Figura 8.** (a) e (b) perfil de temperatura em regime transiente para resfriamento sem tampa à 1.200 s e 2.400 s respectivamente; (c) e (d) perfil de temperatura em regime transiente para resfriamento com tampa à 1.200 s e 2.400 s respectivamente; (e) perfil de temperatura em regime transiente 21.600 s para panela normal; (f) perfil de temperatura em regime transiente 21.600 s para panela com isolante; (g) fluxo de calor na linha de escória em regime transiente 21.600 s para panela normal; (h) fluxo de calor na linha de escória em regime transiente 21.600 s para panela com isolante.

Mesmo utilizando cálculos de transferência de calor em regime estacionário como mostrados nas Equações 1 a 5 para a aplicação das cargas térmicas nas simulações computacionais os resultados obtidos foram próximos dos valores médios encontrados nas medições com pirômetro, com uma diferença de aproximadamente 10°C. As Figuras 8a e 8b mostram as perdas de temperaturas no refratário de trabalho se permanecessem sem tampa e com uma condição de contorno de que o tijolo de trabalho estivesse uma temperatura inicial uniforme de 900°C. A Figura 8a mostra que a temperatura da linha de escória após 20 minutos seria de 754°C e a 8b mostra que após 40 minutos a temperatura seria de 712°C. As Figuras 8c e 8d mostram que se a mesma panela permanecesse tampada a temperatura após 20 minutos seria de 793°C e após 40 minutos seria de 751°C. As temperaturas na parte interna do refratário também sofreu um resfriamento mais lento com a colocação da tampa. A Figura 8e mostra o perfil de temperatura na linha de escória com a panela em uma simulação de aquecimento durante 21.600 s considerando que a face interna estivesse uma temperatura constante de 1.200°C. Assim, a carcaça metálica atingiu uma temperatura de 316°C, enquanto que na panela com isolante térmico (Figura 8f), a panela atingiu uma temperatura de 238°C. As Figuras 8g e 8h mostram que o fluxo de calor nas mesmas condições citadas nas Figuras 8e e 8f para a panela normal e com isolante. Observa-se que o fluxo de calor pela panela normal é maior e menos uniforme do que a panela com isolante e que os valores de fluxo de calor na linha de escória são de 7.510 W/m<sup>2</sup> e 5.008 W/m<sup>2</sup> para as panelas sem isolante e com isolante respectivamente.

#### **4 CONCLUSÕES**

Os testes realizados com as panelas trabalhando utilizando e não utilizando tampa mostraram as diferenças de quedas de temperatura nas duas condições distintas. As quedas de temperatura das panelas tampadas obtiveram uma queda de até 31% a menos do que as permaneceram destampadas. Geralmente as panelas que permaneceram tampadas possuíram temperaturas internas maiores antes do vazamento. Para que não haja choque térmico a temperatura ideal dos refratários de trabalho antes do vazamento fica em torno de 800°C. Vê-se que é de primordial importância a utilização de tampa a maior quantidade de tempo possível, pois os resultados mostraram que todas as panelas destampadas chegaram com temperaturas inferiores a ideal.

Para que se obtivesse bons resultados foi necessário mudanças operacionais no intuito de otimizar a logística das tampas e do período em que as panelas permanecessem tampadas. Para se conseguir tal propósito foi proposta a utilização da base de manutenção das sedes e do carro de movimentação da panela para a área de refratários como meio de manutenção da energia calorífica. A queda de temperatura do aço líquido existente no período entre o vazamento e a chegada da panela no forno panela é influenciada pela temperatura interna da panela antes do vazamento sendo inversamente proporcionais. Conseqüentemente a queda de temperatura do aço líquido influencia na energia elétrica consumida no forno panela sendo também inversamente proporcionais.

Os modelos computacionais desenvolvidos foram condizentes com os dados colhidos na planta e mostraram o perfil de temperatura esperado com ou sem a utilização da tampa. A colocação de placas isolantes evita a perda de calor pelos refratários, mantendo uma maior energia térmica dentro da panela por mais tempo, o que é mostrado também pelos valores de fluxo de calor pela carcaça metálica.

Portanto podemos observar que a manutenção de uma maior temperatura no interior das panelas não somente ajuda na diminuição da queda de temperatura do aço líquido e no consumo de energia elétrica consumida no forno panela como também aumenta a vida útil dos refratários.

## **Agradecimentos**

Siderúrgica Norte Brasil – Sinobras S.A.  
Magnesita S.A.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 LOPES, H.L.P. Modelo para previsão da condição térmica de panelas de aciaria. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, 2007.
- 2 MINION, RICHARD L.; LECKIE, CRAIG F. steel temperatura control in the ladle in a high productivity BOF shop. Proceeding of 69th Steelmaking Conference, AIME, Washington. 1986.
- 3 FERREIRA, N.F. Controle da temperatura do aço líquido em uma aciaria elétrica. 2000. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - PPGEM da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- 4 GUPTA, N., CHANDRA, S. Temperature prediction for controlling casting superheat temperature. ISIJ International, Volume 44, p.1517-1526, 2004.
- 5 INCROPERA. F.P., DE WITT. D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Rio de Janeiro, LTC, 5ed, p. 60 e 70-73, 2003.
- 6 SESHADRI, V., TAVARES, R. P., SILVA. C.A., SILVA. I. A. Fenômenos de Transporte: Fundamentos e aplicações nas Engenharias Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 328-333, 417-452 e 467-481, 2010.
- 7 ANDRADE, H.L., et al. O Sistema de tampa de panela articulada da Stelco – Uma tecnologia de alta eficiência energética. Anais do 31º Seminário de Fusão, refino e solidificação dos metais, Vitória, 2000.
- 8 ANDRADE, F. Comparativo entre tijolos MgO-C e dolomítico para aplicação no revestimento refratário da panela para a fabricação de aços de construção mecânica. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia) - PPGEM da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.