

## MODELO MATEMÁTICO PARA O CÁLCULO DA TEMPERATURA DO FERRO-GUSA EM PANELA\*

Angelo Gontijo da Silva<sup>1</sup>  
Danilson Gonçalves de Melo e Silva<sup>2</sup>  
Sanderson Fiuza Borba<sup>3</sup>

### Resumo

O presente trabalho tem como objetivo descrever o comportamento térmico do ferro-gusa dentro da panela durante o percurso entre o alto-forno e a aciaria. Para a avaliação desta condição, implementou-se um programa utilizando equações semi-empíricas desenvolvidas para o cálculo da perda térmica do ferro gusa em panelas de aço. Para a verificação do modelo foram realizadas medições em diferentes cenários durante a produção. Os valores de temperatura medidos e calculados tiveram uma diferença máxima de 3,14%. O modelo foi aprovado e inserido no sistema de controle logístico do processo, para determinar se o ferro-gusa produzido no alto-forno deve ser enviado para a aciaria ou para o lingotamento de gusa. Através destes resultados, foi possível determinar o número ideal de panelas a serem utilizadas no processo, tendo como finalidade o aumento do consumo de ferro-gusa na forma líquida no forno elétrico a arco.

**Palavras-chave:** Ferro-gusa; Temperatura; Alto-forno; Aciaria.

### MATHEMATICAL MODEL TO CALCULATE HOT METAL TEMPERATURE INSIDE LADLE

#### Abstract

The present work aims to describe hot metal thermal behavior inside ladle during the path between the blast furnace and the steel mill. In order to evaluate this condition, semi-empiric equations were used and solved to calculate hot metal thermal losses inside the steel ladles. To verify and to compare the simulated results, temperature measurements were made in different scenarios during production. The maximum gap between the calculated and the real temperature values was 3,14%. The model was considered validated and was embedded in the process control center in order to determine if the pig iron made in the blast furnace shall be delivered to the steel mill or to the pig iron casting machine. According to the results, the optimal number of ladles to be used in the process was determined, in order to increase hot metal consumption in the electric arc furnace.

**Keywords:** Hot metal; Temperature; Blast furnace; Steel mill.

<sup>1</sup> Estudante de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte – MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Químico, Doutor, Engenheiro, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte – MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte – MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário da economia mundial, onde os preços da energia e dos insumos utilizados nos processos industriais estão cada vez mais voláteis, é de suma importância o controle rigoroso de todas as etapas do processo produtivo.

Para o processo de produção de aço, a temperatura do metal no estado líquido é um dos parâmetros mais importantes a serem avaliados, uma vez que o seu descontrole afeta negativamente a qualidade final do produto. Na literatura científica, muitos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de criar ferramentas para a predição da temperatura do aço na aciaria e durante o processo de lingotamento contínuo.

Uma das contribuições mais relevantes foi o modelo semi-empírico desenvolvido por OMOTANI et al.<sup>1</sup>. Neste modelo através do balanço de energia feito no volume de controle (aço) dentro da panela (equação 1) e de suas perdas térmicas (equação 2, equação 3 e equação 4), pode-se determinar a taxa com que a temperatura do aço, dentro de uma panela revestida com materiais refratários, varia com o tempo.

$$\rho_m \cdot C_m \cdot V \cdot \frac{dT_m}{dt} = q_w + q_b + q_s \quad (1)$$

$$q_w = -A_w \cdot K_r \cdot (T_m - T_r) \cdot \left( \frac{1}{2R} + \frac{1}{\sqrt{\pi \alpha_r t}} \right) \quad (2)$$

$$q_b = -A_b \cdot K_r \cdot \left( \frac{T_m - T_r}{\sqrt{\pi \alpha_r t}} \right) \quad (3)$$

$$q_s = 0,083 \cdot A_s \cdot K_s \cdot (T_m - T_s)^{\frac{4}{3}} \cdot \left( \frac{g \cdot \beta_s}{v_s \cdot \alpha_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Onde:

$\rho_m$  é a densidade do aço ( $\text{kg/m}^3$ );

$C_m$  é o calor específico do aço ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ );

$T_m$  é a temperatura do aço (K);

$V$  é o volume de aço dentro da panela ( $\text{m}^3$ );

$t$  é o tempo (s);

$q_w$  é a perda de calor para o revestimento refratário da parede da panela (W);

$q_b$  é a perda de calor para o revestimento refratário do fundo da panela (W);

$q_s$  é a perda de calor para a escória (W);

$A_w$  é a área de contato do aço com a parede da panela ( $\text{m}^2$ );

$K_r$  é a condutividade térmica do revestimento refratário ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ );

$T_r$  é a temperatura do revestimento refratário (K);

$R$  é o raio da panela (m);

$\alpha_r$  é a difusividade térmica do revestimento refratário ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$A_b$  é a área de contato do aço com o fundo da panela ( $\text{m}^2$ );

$A_s$  é a área de contato do aço com a escória ( $\text{m}^2$ );

$K_s$  é a condutividade térmica da escória ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ );

$T_s$  é a temperatura da escória (K);

$g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );

$\beta_s$  é o coeficiente de expansão térmica da escória ( $\text{K}^{-1}$ );

$v_s$  é a viscosidade cinemática da escória ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$\alpha_s$  é a difusividade térmica da escória ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Neste trabalho o modelo supracitado foi utilizado, com algumas adaptações, para o cálculo da temperatura do ferro-gusa durante o transporte entre o alto-forno e a aciaria. O ferro-gusa, no percurso em questão, é transportado dentro de uma panela, revestida por materiais refratários classificados como sílico-aluminoso e aluminoso. Para atenuar as perdas térmicas através da escória, cinza de palha de arroz foi utilizada. Este produto foi aplicado logo após o vertimento do ferro-gusa na panela. A cinza funciona como isolante térmico devido ao seu alto teor de sílica ( $94,95\%^2$ ), tendo a finalidade de cobrir toda a superfície superior da panela, reduzindo as perdas por radiação da escória para o ambiente.

O modelo desenvolvido foi acoplado ao sistema de controle logístico do processo, desempenhando um papel chave na decisão entre o envio do ferro-gusa para o forno elétrico a arco (FEA) da aciaria ou direto para o lingotamento de gusa. Esta decisão é tomada em três etapas. Primeiramente o sistema de controle do processo, considerando as condições de operação, calcula o tempo que o ferro-gusa terá que esperar na panela para ser consumido. Em seguida o modelo estima a temperatura final do ferro-gusa durante o tempo de espera fornecido. Por último, a temperatura obtida é comparada com a temperatura crítica do FEA.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

#### 2.1.1 Implementação do Modelo

Para a formulação do modelo matemático, a panela em estudo foi considerada perfeitamente cilíndrica (figura 1) e a espessura do revestimento refratário constante.

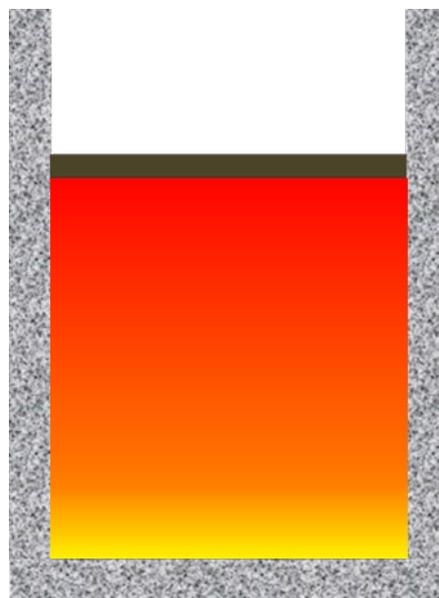


Figura 1. Panela de ferro-gusa.

O revestimento refratário foi considerado um sólido semi-infinito, visto que o fluxo de calor vindo do ferro-gusa não atinge sua extremidade exterior. Este fato pode ser verificado, utilizando a formulação proposta por Incropera et al.<sup>3</sup> (equação 5), onde considera-se que a face quente do revestimento refratário ( $T_s$ ) está com a mesma temperatura inicial do ferro-gusa.

$$\frac{T_{(x,t)} - T_s}{T_i - T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (5)$$

Onde:

$T_{(x,t)}$  é a temperatura do ponto x no tempo t (K);

$T_s$  é a temperatura superficial constante (K);

$T_i$  é a temperatura inicial do revestimento refratário (K);

x é a espessura do revestimento refratário (m);

$\alpha$  é a difusividade térmica do refratário ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

t é o tempo (s).

Para avaliar quanto tempo é necessário para que o fluxo de calor chegue à face fria do refratário, considera-se que a temperatura da extremidade ( $T_{(x,t)}$ ) aumentou 1 K em relação a temperatura inicial ( $T_i$ ). Assim, a função erf(w) é igual a 0,9991, resultando em w igual a 2,30.

O revestimento da panela avaliada possui 185 mm de espessura e suas propriedades estão definidas na tabela 1. Para estas condições, o tempo necessário para que o fluxo de calor atinja a face fria (equação 6) é de 50 minutos.

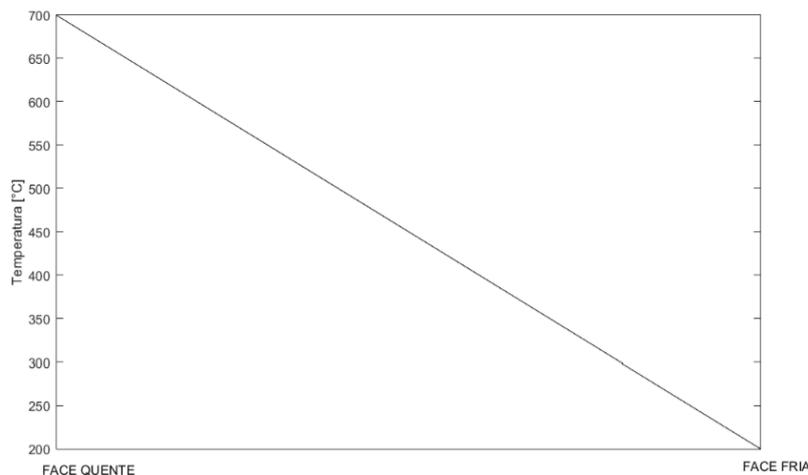
**Tabela 1.** Propriedades do revestimento refratário

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	C [J/kg.K]	K [W/m <sup>2</sup> *K]
Refratário sílico-aluminoso (parede)	2430	1005	$8 * 10^{-8} * T^2 + 7 * 10^{-5} * T + 1,2959$
Refratário aluminoso (fundo)	2605	1005	$5 * 10^{-7} * T^2 + 9 * 10^{-4} * T + 1,8303$

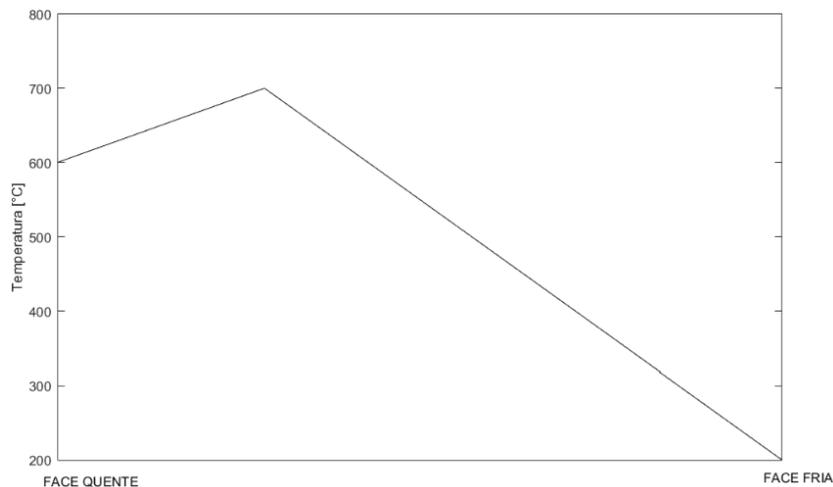
Para o cálculo da condutividade térmica utiliza-se a temperatura do refratário (T) em °C.

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} = 2,30 \quad (6)$$

Foram considerados dois perfis de temperatura para o revestimento refratário, o primeiro apresentado quando a panela vem do aquecedor (figura 2) e o segundo apresentado quando a panela está no ciclo (figura 3).



**Figura 2.** Perfil de temperatura do revestimento refratário para panela vinda do aquecedor.



**Figura 3.** Perfil de temperatura do revestimento refratário para panela vinda do ciclo.

Para a estimativa do primeiro perfil foram medidas, por termografia, as temperaturas de face quente e de face fria de panelas vindas do aquecedor. Neste caso, a média das temperaturas de face quente foi de aproximadamente 700°C e de face fria 200°C. Tendo em vista que as panelas vindas do aquecedor são enviadas imediatamente para o vazamento de gusa e considerando que os refratários estão encharcados, foi estipulado que o revestimento refratário possui um perfil de temperatura linear. Já para o segundo perfil, as temperaturas de face quente e de face fria, de panelas que estavam no ciclo, foram medidas logo após o vertimento do ferro-gusa e a cada 10 minutos durante o período que a panela ficou vazia. Assim, observou-se que a temperatura de face fria da panela se mantém em aproximadamente 200°C durante todo o período. Já a temperatura de face quente, decresce de aproximadamente 900°C para 600°C. A partir da evolução das temperaturas medidas estimou-se o segundo perfil para as panelas vindas do ciclo. O modelo desenvolvido considera que a temperatura do revestimento refratário é uniforme. Para determinar o valor de temperatura que representa os perfis apresentados foram seguidos três passos. O primeiro passo consiste em dividir o revestimento em anéis com 1 mm de espessura e calcular a energia armazenada em cada anel (equação 7).

$$E = \rho * c_p * (r_e^2 - r_i^2) * T \quad (7)$$

Onde:

E é a energia armazenada no anel (J/m);

$\rho$  é a densidade do refratário (kg/m<sup>3</sup>);

$c_p$  é o calor específico do refratário (J/kg\*K);

$r_e$  é o raio externo do anel (m);

$r_i$  é o raio interno do anel (m);

T é a temperatura do anel (K).

No segundo passo calcula-se a energia total armazenada em todo o revestimento refratário (equação 8).

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \quad (8)$$

Obtido o valor da energia armazenada no revestimento refratário, determina-se no terceiro passo a temperatura que representa o perfil (equação 9).

$$T = \frac{E_t}{\rho * c_p * (r_e^2 - r_i^2)} \quad (9)$$

Onde:

T é a temperatura usada na simulação (K);

$E_t$  é a energia total armazenada no refratário (J/m);

$\rho$  é a densidade do refratário ( $\text{kg/m}^3$ );

$c_p$  é o calor específico do refratário ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ );

$r_e$  é o raio externo da panela (m);

$r_i$  é o raio interno da panela (m).

Com as propriedades do refratário estudado (tabela 1) e considerando uma panela com raio interno igual a 1,137 m e com raio externo igual a 1,322 m, os valores de temperatura encontrados foram 453,87 °C para a panela vinda do aquecedor e 516,08 °C para a panela vinda do ciclo.

A temperatura do ferro-gusa foi considerada uniforme em toda panela, negligenciando os efeitos de estratificação térmica.

Para simular o efeito isolante ocasionado pela cinza de palha de arroz foi utilizada a mesma formulação proposta para o fundo da panela (equação 3). As propriedades da palha de arroz (tabela 2) foram determinadas por Mishra et al.<sup>4</sup>.

**Tabela 2.** Propriedades da palha de arroz

Material	K [W/m.K]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]
Cinzas de palha de arroz	0,6973	1005

Um programa foi implementado para o cálculo da taxa de perda de temperatura do ferro-gusa em cada instante de tempo ( $\frac{dT_m}{dt}$ ). Para o cálculo foram utilizadas as equações para determinação das perdas de calor (equações 2 e equação 3) e o balanço de energia (equação 1) considerando o ferro-gusa como volume de controle. Com o valor de ( $\frac{dT_m}{dt}$ ) em cada instante de tempo e com a temperatura inicial do ferro-gusa, foi possível determinar a curva que caracteriza a variação de temperatura do ferro-gusa no tempo.

### 2.1.2 Verificação

A verificação do modelo foi feita a partir de medições realizadas no processo. Para isso, foram escolhidos quatro cenários (tabela 3).

**Tabela 3.** Cenários escolhidos

Cenário	Quantidade de ferro-gusa na panela	Origem da panela
1	57 t	Aquecedor
2	40 t	Aquecedor
3	57 t	Ciclo
4	40 t	Ciclo

Foram executadas dez corridas distribuídas nos diferentes cenários. Em cada corrida foi medida a temperatura do ferro-gusa logo após o vertimento e a cada 10 minutos durante um período de 1 hora.

As medições das temperaturas foram feitas através de termopares descartáveis. Estes foram acoplados a uma lança que permitiu que as medições fossem feitas de uma localização segura para o operador.

## 2.2 Resultados

Os valores medidos das temperaturas iniciais, bem como as características de cada cenário, foram inseridos no programa e os resultados das simulações foram comparados com as medições ao longo do tempo (figuras 4, 5, 6 e 7).

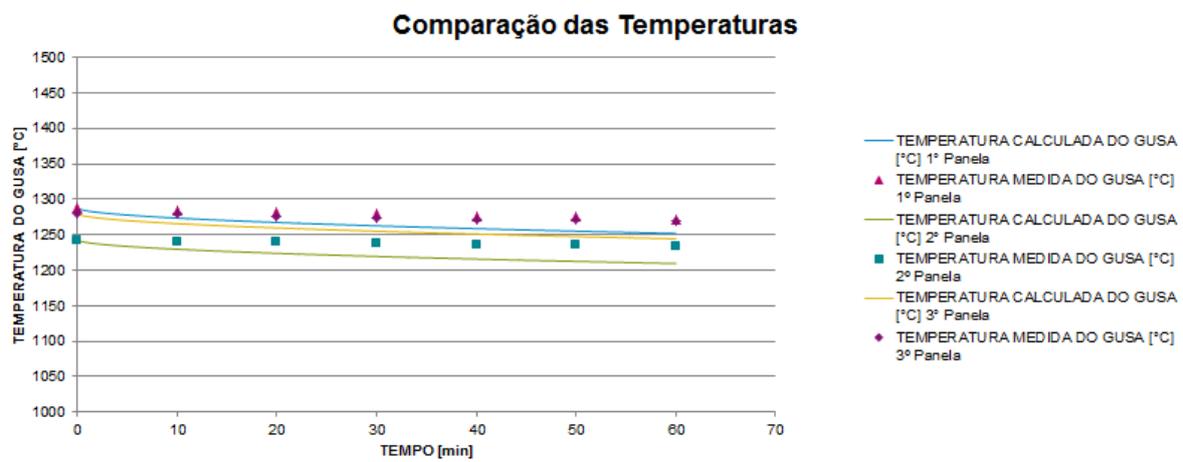


Figura 4. Comparação entre temperaturas simuladas e medidas para o cenário 1.

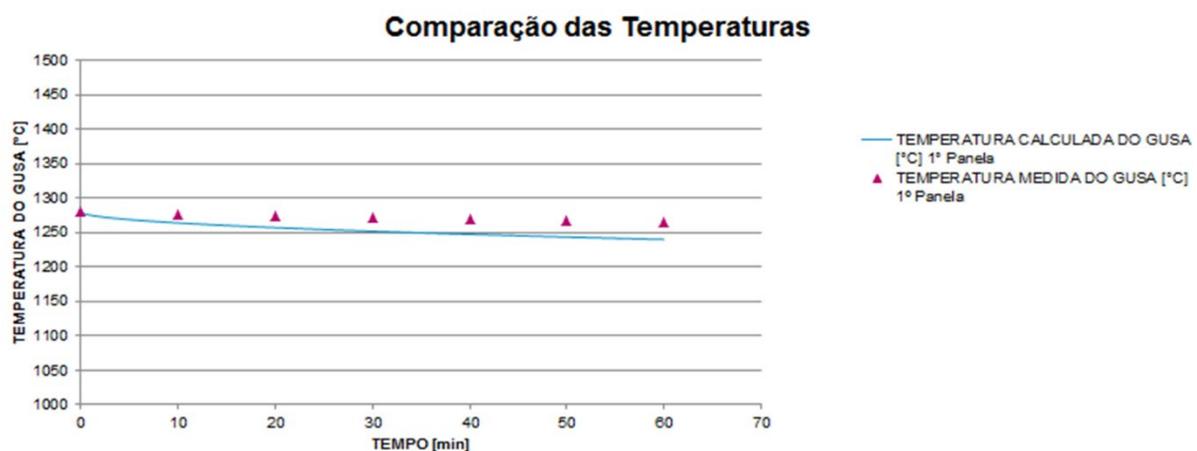


Figura 5. Comparação entre temperaturas simuladas e medidas para o cenário 2.

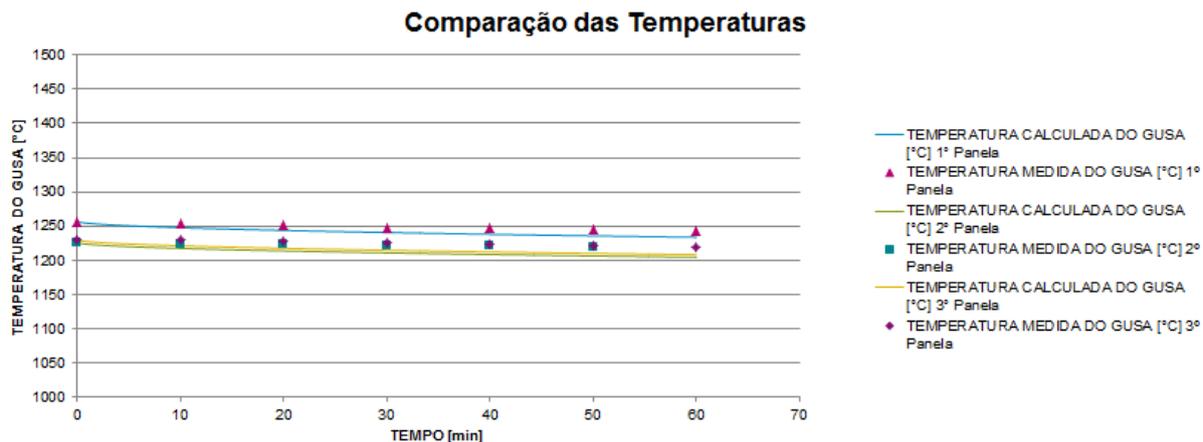


Figura 6. Comparação entre temperaturas simuladas e medidas para o cenário 3.

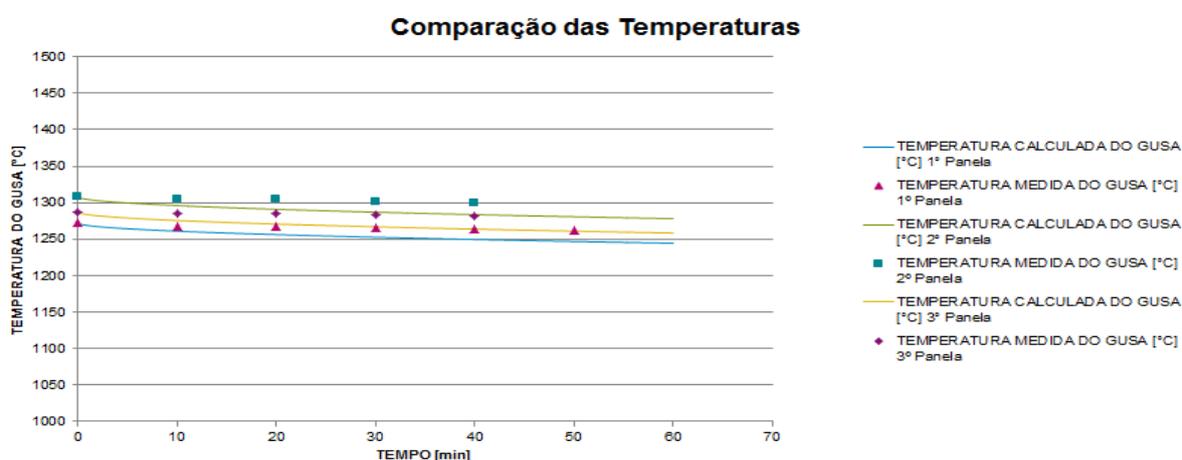


Figura 7. Comparação entre temperaturas simuladas e medidas para o cenário 4.

A máxima diferença encontrada entre as temperaturas medidas e calculadas foi de 3,14%. Os dados foram plotados em um diagrama de dispersão (figura 8) para análise da correlação entre os valores. O valor do coeficiente de correlação de Pearson calculado foi igual a 0,96. O valor do coeficiente varia entre -1 e 1, sendo que 1 indica uma correlação positiva perfeita entre as variáveis (se uma aumenta a outra sempre aumenta), -1 indica uma correlação negativa perfeita (se uma aumenta a outra sempre diminui) e 0 indica que não existe uma correlação linear entre os valores, necessitando assim a investigação por outros métodos.

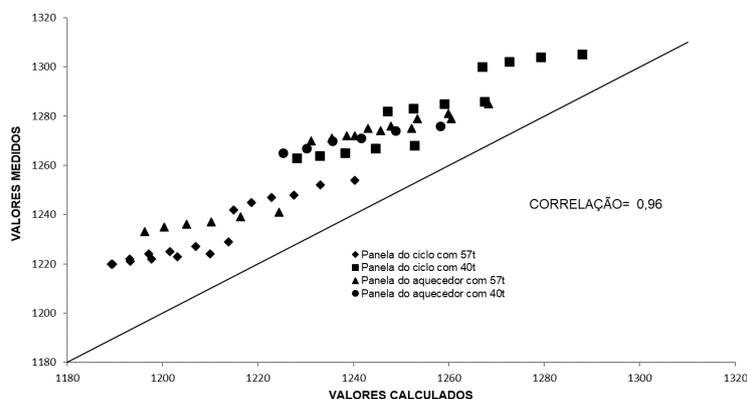


Figura 8. Análise da correlação entre os dados medidos e calculados.

## 2.3 Discussão

O máximo erro de 3,14% encontrado na comparação entre os valores medidos e calculados foi considerado aceitável, demonstrando que o modelo possui uma boa precisão na estimativa da temperatura do ferro-gusa. O coeficiente de correlação de Pearson apresentou um resultado igual a 0,96, indicando que os valores calculados ajustam-se muito bem aos valores medidos.

Avaliando a curva de correlação (figura 8) observa-se que os dados medidos sempre apresentam valores maiores do que os calculados. Este fato corrobora com a segurança na tomada de decisão a respeito da destinação do ferro gusa, ou seja, se ele será enviado ao FEA ou ao lingotamento de gusa. O consumo do ferro-gusa abaixo da temperatura crítica do FEA pode ocasionar a solidificação do mesmo na calha que recebe o material. Caso isso ocorra, a produção deverá ser parada para que se possa limpar ou trocar a calha, acarretando em prejuízos financeiros.

Pelos resultados pôde-se aferir que os parâmetros que mais influenciam a perda térmica são a quantidade de ferro-gusa na panela, a temperatura inicial do ferro-gusa e a temperatura do refratário.

Em relação à quantidade de ferro-gusa na panela, verifica-se que panelas mais cheias apresentam menores perdas e um maior tempo para atingir a temperatura crítica. Este comportamento pode ser explicado por dois motivos. O primeiro é o fato que um maior volume de material, na mesma temperatura, possui uma maior quantidade de energia armazenada. O segundo é a pequena alteração na área onde ocorrem as trocas térmicas, já que as áreas de contato do gusa com a cinza da palha de arroz e do gusa com o refratário do fundo não se alteram. Além disso, o aumento da área de contato do gusa com o refratário da parede é muito pequeno quando comparado com o aumento no volume de gusa na panela.

A temperatura inicial do ferro-gusa sofre grandes variações, sendo que durante as medições foi observada uma diferença de 45°C entre os extremos (menor e o maior valor). Este comportamento é inerente aos processos que ocorrem no alto-forno e por esta razão, para garantir a precisão na determinação da temperatura final, se faz necessário que a temperatura inicial seja medida em todas as panelas.

As perdas calculadas para as panelas vindas do ciclo foram menores do que para as panelas vindas do aquecedor. Esta tendência é decorrente da menor diferença de temperatura entre o ferro-gusa e o revestimento refratário, já que as panelas vindas do ciclo apresentam maiores temperaturas. Para as panelas vindas do aquecedor deve-se garantir que o revestimento refratário esteja encharcado. Esta condição é verificada não somente pelo controle da temperatura de face quente do material, mas também pelo tempo que a panela permanece no aquecedor e pela temperatura definida para o aquecedor.

## 3 CONCLUSÃO

O presente trabalho concluiu que os fatores que mais influenciam a perda térmica do gusa na panela são o volume do produto na panela, a temperatura inicial do metal líquido e a temperatura do refratário. Com o controle destes parâmetros é garantida uma boa precisão na determinação do comportamento térmico do ferro-gusa dentro da panela, durante seu percurso entre o alto-forno e a aciaria.

O modelo foi considerado aprovado pela área de processo, devido à diferença de apenas 3,14% entre os valores medidos e calculados, além do valor do coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,96.

Com os estudos realizados, medidas foram definidas visando o aumento do consumo do ferro-gusa na forma líquida. Por exemplo, a determinação do número ideal de painéis a serem usados durante a operação, bem como o aumento no percentual de material fundido utilizado no FEA, gerando economia de energia elétrica, além de diminuir o desgaste dos eletrodos do forno.

### **Agradecimentos**

À Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., pelo incentivo à pesquisa e desenvolvimento.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Omotani MA, Heaslip LJ, Mclean A. Ladle temperature control during continuous casting. Iron Steelmaker. 1983; 10(10): 29-35.
- 2 Della VP, Kühn I, Hotza D. Rice husk ash as an alternate source for active silica production. Materials Letters. 2002; 57(4): 818-821.
- 3 Incropera FP, Dewitt DP. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6.ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos, Editora S. A.;2008.
- 4 Mishra P, Chakraverty A, Banerjee HD. Studies on physical and thermal properties of rice husk related to its industrial application. Journal of Materials Science. 1986; 21(6): 2129-2132.