

MODELO DE PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE LIBERAÇÃO DO FORNO PANELA¹

Bayard Beling Morales²
José Ernesto de Azevedo Nadalon³
Bruno Henrique Reis⁴
André Carlos Contin²
Leonardo Barboza Trindade⁵
Antônio Cezar Faria Vilela⁶

Resumo

A temperatura de lingotamento do aço é calculada a partir da temperatura *liquidus* e das perdas térmicas que acontecem durante o processo de fabricação. Dentre essas perdas, pode-se citar as que ocorrem no distribuidor e na panela de refino. O modelo apresentado neste artigo calcula as perdas térmicas em cada um desses reatores e, a partir de uma temperatura objetivada de lingotamento, retorna como resultado a temperatura de liberação do aço no forno-panela. As perdas térmicas são calculadas a partir da solução numérica de equações de transferência de calor e de estimativas de fluxo de calor pela escória. Uma interface gráfica simplificada foi implementada permitindo ao usuário utilizar o algoritmo com facilidade. Neste trabalho é apresentada uma versão demonstração do software, a metodologia utilizada no desenvolvimento do modelo e os resultados da aplicação numa planta siderúrgica.

Palavras-chave: Refino secundário; Lingotamento contínuo; Temperatura do aço.

A LADLE-FURNACE TEMPERATURE PREDICTION MODEL TO CONTROL THE CASTING TEMPERATURE

Abstract

The steel temperature in the continuous casting is calculated from the *liquidus* temperature and the heat losses that occur during the steel production process. Among those losses are the heat losses which occur in the tundish and the refining ladle. The model presented in this article computes the heat losses in each one of these reactors. Thus, it is possible to know the ideal steel temperature in the ladle furnace. The heat losses are calculated through the numerical solution of the heat transfer equation and by heat flux estimates of thermal losses through the slag. A simple Graphical user interface was implemented, enabling the user to test the algorithm in a friendly environment. In this work, a demonstration version of the software is showed, as well as the methodology used in the model development and results of the application in a steel plant.

Key words: Secondary steelmaking; Continuous casting; Steel temperature.

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

² Físico, Mestre em Eng. Metalúrgica, PPGEM, UFRGS, Equipe Técnica, STE, Porto Alegre, Brasil.

³ Eng. Civil, Doutorando em Eng. Metalúrgica, PPGEM, UFRGS, Equipe Técnica, Science, Technology & Engineering – STE, Porto Alegre, Brasil.

⁴ Graduando em Eng. Metalúrgica, UFRGS, Equipe Técnica, Science, Technology & Engineering – STE, Porto Alegre, Brasil.

⁵ Físico, Dr. Eng. Metalúrgica, Diretor Geral, Science, Technology & Engineering – STE, Porto Alegre, Brasil.

⁶ Eng. Metalúrgico, Dr.-Ing, Professor do DEMET, PPGEM, UFRGS, Coordenador do LASID, Porto Alegre, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento nas exigências de qualidade do aço e a pressão para redução de custos que vem ocorrendo nas últimas décadas no setor siderúrgico, torna-se necessário ter um controle cada vez mais preciso do processo de fabricação do aço, especialmente durante o refino e lingotamento. O controle do processo reduz as perdas devido a produtos fora da especificação e paradas não programadas.

Um dos fatores que mais influenciam a estabilidade operacional de uma aciaria é a temperatura do aço líquido nos reatores. Existe uma grande dificuldade em prever com precisão a temperatura adequada para a liberação do aço no forno-panela, uma vez que ela depende de vários fatores, como o estado térmico da panela, as perdas pela escória, tempos de rinsagem e lingotamento etc. Essa imprecisão na temperatura de saída do forno-panela acarreta uma elevada dispersão na temperatura de lingotamento, gerando problemas de lingotabilidade e qualidade.

Tendo isso em vista, vários pesquisadores despenderam esforços para desenvolver modelos que permitam prever o comportamento da temperatura do aço líquido nas diferentes etapas do processo.⁽¹⁻⁶⁾ Neste artigo, o *MCTL* (Modelo de Cálculo da Temperatura de Liberação) é apresentado. Este software é composto por um modelo matemático capaz de prever a temperatura adequada para a liberação do aço no forno-panela e uma interface gráfica para sua operação. Para o cálculo, são considerados fatores como a temperatura objetivada de lingotamento e parâmetros do processo, entre eles o tempo e temperatura dos aquecedores da panela, perdas térmicas pela escória e refratários na panela e no distribuidor e, ainda, os tempos previstos de processo em cada estação. O modelo vem sendo desenvolvido há aproximadamente dois anos e foi validado com sucesso para um banco de dados de cerca de 1.900 corridas de uma aciaria elétrica de aços especiais.

Na primeira parte do trabalho é apresentada a metodologia empregada, bem como os fundamentos matemáticos. Na segunda parte tem-se uma visão geral do modelo onde são listados os parâmetros e dados do processo necessários para o cálculo da temperatura de liberação. Por fim, resultados da aplicação do *software* numa planta siderúrgica são apresentados.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelo Matemático

O modelo matemático baseia-se na solução da equação de condução de calor unidimensional nas camadas de refratários. Com isso, é possível prever o encharque térmico dos refratários e avaliar efeitos dos tempos sem aço, com aço e aquecimento da panela.

Para estimar as perdas térmicas pela escória, medidas de temperatura realizadas em planta permitiram estimar o fluxo de calor nas etapas de transporte, rinsagem, vácuo e lingotamento.

Para o distribuidor, medidas de temperatura nos diferentes sequenciais foram realizadas com o objetivo de estimar os fluxos de calor em função do estado térmico do reator. Um modelo matemático acoplado entre a panela e o distribuidor foi desenvolvido para incluir o efeito de capacitor térmico que esse reator possui. Maiores detalhes podem ser encontrados em trabalhos anteriores publicados pelos autores do presente trabalho.^(7,8)

Por fim, a temperatura do aço na saída do forno-panela pode ser calculada, de forma aproximada, a partir do somatório das perdas (Equação 1).

$$T_{lib} = T_{liq} + \Delta T_{superheat} + \Delta T_{dist} + \Delta T_{panela(LC+rinsagem+v\u00e1cuo+transporte)} \quad (1)$$

Onde:

- T_{lib} = temperatura de liberação no FP;
- T_{liq} = temperatura líquidos do aço;
- $\Delta T_{superheat}$ = temperatura de sobreaquecimento (perdas entre distribuidor e molde);
- ΔT_{dist} = perdas para o distribuidor; e
- ΔT_{panela} = perdas na panela durante as etapas de lingotamento (LC), rinsagem, vácuo e transporte.

2.2 Visão Geral do Software

O modelo foi desenvolvido com o objetivo de diminuir a dispersão da temperatura do aço no distribuidor durante o processo de lingotamento contínuo.

A interface do *software* é dividida em quatro abas (Figura 1). Em cada uma delas, o usuário introduz dados necessários para o cálculo da temperatura de liberação no forno-panela.

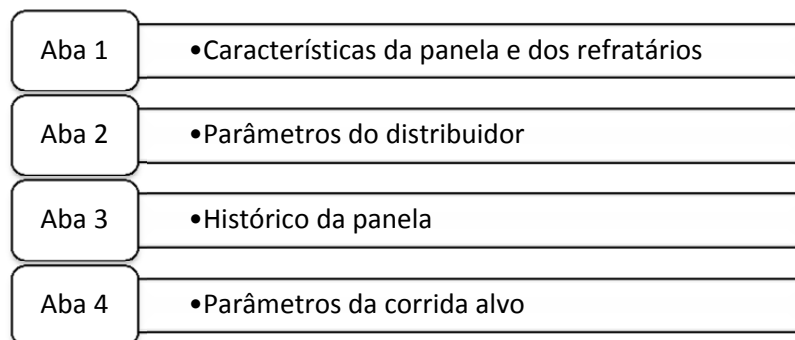


Figura 1. Estrutura de abas do software.

Na primeira aba são definidos parâmetros geométricos da panela, como o raio e espessura dos refratários. Também nessa aba são inseridas as propriedades físicas de cada refratário (Figura 2).

Aba1 - Características da Panela e dos Refratários

Panela Cilíndrica
Raio da Panela [m]

Refratários na Parede da Panela

Camadas	Tipo	Espessura [m]
Refratário 1 (de Trabalho)	A	<input type="text"/>
Refratário 2	B	<input type="text"/>
Refratário 3	C	<input type="text"/>
Refratário 4 (Carça)	D	<input type="text"/>

Refratários no Fundo da Panela

Camadas	Tipo	Espessura [m]
Refratário 1 (de Trabalho)	G	<input type="text"/>
Refratário 2	B	<input type="text"/>
Refratário 3	D	<input type="text"/>
Refratário 4 (Carça)	H	<input type="text"/>

Tipos de Refratários

Refratários	Densidade [Kg/m³]	Calor Especifico [J/Kg.K]	Condutividade [W/m.K]
A			
B			
C			
D			
E			
F			
G			
H			

Figura 2. Aba 1 – Características da panela e dos refratários.

Parâmetros do distribuidor é a segunda aba do código. Nela, são definidos os principais parâmetros geométricos e valores estimados de fluxos de calor pela escória e as laterais do distribuidor, em função da posição no sequencial (Figura 3).

Aba2 - Parâmetros do Distribuidor

Calcula Temperatura de Liberação do Forno Panela

Preenchimento Automático

Área lateral [m ²]	
Área fundo [m ²]	
Área escória [m ²]	
Massa do distribuidor [t]	
Fluxo de calor da escória [kW/m ²]	
Fluxo de calor lateral para sequencial 1 [kW/m ²]	
Fluxo de calor lateral para sequencial 2 [kW/m ²]	
Fluxo de calor lateral para sequencial 3 [kW/m ²]	

Figura 3. Aba 2 – Parâmetros do distribuidor.

Para que seja calculado o estado térmico dos refratários da panela, considera-se o histórico das últimas N corridas. Entende-se como histórico os tempos com aço e sem aço, bem como os valores de temperatura do aço, para cada panela. Essa variável é de suma importância para a correta avaliação do estado térmico dos refratários e irá influenciar diretamente como a panela irá perder calor a partir da liberação no forno-panela. O número de corridas necessário para que uma panela atinja um estado termicamente estável depende de vários fatores, entre eles o tempo sem aço e varia de panela para panela.

Na terceira aba do *software* (Figura 4), devem ser informados os respectivos tempos de secagem e aquecimento (queimadores), a temperatura de vazamento e tempo com aço e tempo sem aço da panela.

Aba3 - Histórico da Panela

Número de corridas

Calcula Temperatura de Liberação do Forno Panela

Preenchimento Automático

Dados	Unidade	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Tempo de Aquecimento	[min]			
Temperatura de Vazamento	[°C]			
Tempo Com Aço	[min]			
Tempo Sem Aço	[min]			

Figura 4. Aba 3 – Histórico da panela.

A última aba pode ser vista na Figura 5. Nela devem ser inseridos os parâmetros da corrida alvo (corrida cuja temperatura de liberação se deseja calcular), como os tempos estimados de vácuo, flotação ou rinsagem, tempo de lingotamento e transportes. Essas estimativas também são fundamentais para o correto emprego do modelo, uma vez que um erro considerável nos tempos previstos de processo leva a erros nas estimativas do mesmo.

Aba4 - Parâmetros da Corrida Alvo	
Calcula Temperatura de Liberação do Forno Panela	Preenchimento Automático
Tempo de aquecimento no FP [min]	
Temperatura chegada no FP [°C]	
Tempo de vácuo no VD [min]	
Tempo de flotação [min]	
Tempo de lingotamento da panela [min]	
Temperatura liquidus da corrida alvo [°C]	
Superheat [°C]	
Temperatura inicial (corrida anterior) do distribuidor [°C]	
Sequencial do distribuidor	
Vida (Campanha) da Panela	
Massa de aço na panela [ton]	

Figura 5. Aba 4 – Parâmetros da corrida alvo.

Um fluxograma simplificado do cálculo é mostrado na Figura 6. Com os dados do histórico e os parâmetros da panela, é possível saber qual a energia armazenada em cada camada de refratários (encharque da panela) por meio de equações de transferência de calor em regime transiente.

Conhecido o estado térmico da panela, o mesmo é usado como condição inicial dos refratários da panela para o cálculo da temperatura de liberação. Além do estado térmico da panela é necessário conhecer os parâmetros do distribuidor e os parâmetros da corrida alvo. Com essas informações, é possível calcular a temperatura de liberação do aço no forno-panela por meio de equações de balanço de energia.

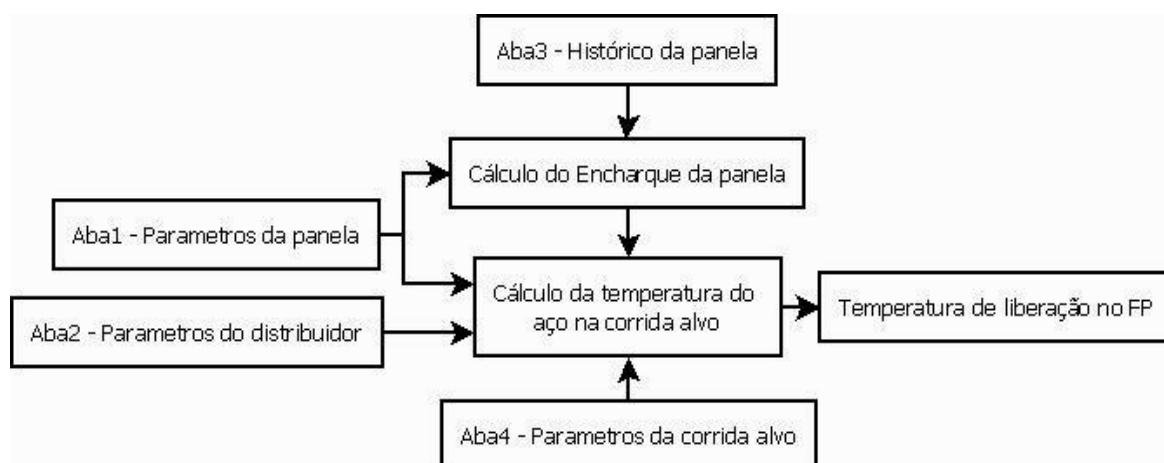


Figura 6. Fluxograma simplificado das informações para o cálculo da temperatura de liberação no FP.

2.3 Desenvolvimento e Implementação do Modelo em Planta

O fluxograma da metodologia para desenvolvimento e implementação do modelo em uma aciaria está apresentado na Figura 7.

Na primeira parte do trabalho, foi realizado o mapeamento da planta para conhecer cada etapa do processo na aciaria (aquecimento, FP, VD, LC etc.). Isso é realizado com o intuito de adaptar o modelo matemático à uma usina específica.

Na segunda etapa foi feita a coleta e tratamento dos dados da planta. O objetivo foi obter informações para a validação do modelo matemático.

A última etapa do trabalho foi a comparação dos resultados do código com medições de temperatura na saída do desgaseificador a vácuo (VD) e no distribuidor. Nela foi simulada a temperatura do aço para um conjunto de aproximadamente 1.900 corridas realizadas anteriormente.

A cada batelada de simulações era verificado um parâmetro físico, avaliada a importância dele para o processo e, além disso, medido o índice de acerto do modelo frente aos dados da planta. Após alcançar o índice de acerto objetivado, o algoritmo foi considerado validado.

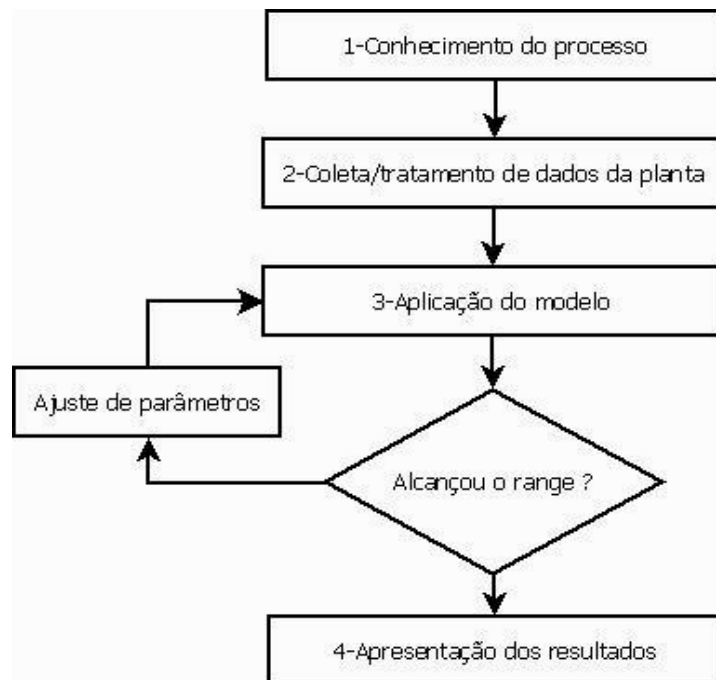


Figura 7. Metodologia para desenvolvimento e implementação do *software*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 8, pode-se observar um gráfico com o banco de corridas testadas em função da diferença entre a temperatura medida no distribuidor e a calculada pelo modelo. A faixa considerada de acerto foi de mais ou menos x° C em relação a temperatura objetivada.

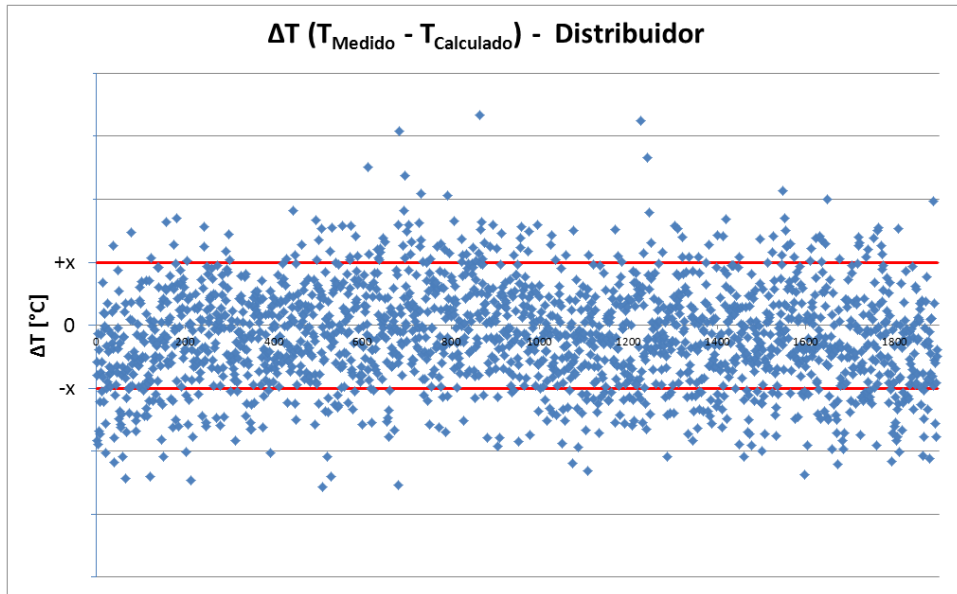


Figura 8. Diferença entre a temperatura medida e a calculada pelo modelo.

A Tabela 1 apresenta o índice de acerto do modelo. Considera-se que os índices de acerto obtidos são muito positivos, em especial por ser uma aplicação utilizando dados reais de planta.

Tabela 1. Índice de acerto em cada etapa do processo

Acerto no VD	86,7%
Acerto no distribuidor	79,4%

Além da temperatura de liberação do aço, o modelo é capaz de mostrar a temperatura do aço na panela durante todo o processo de refino e lingotamento (Figura 9). Nota-se, também, que a temperatura média do aço cai diferentemente em cada etapa do processo. No VD e flotação verifica-se que a queda da temperatura é aproximadamente linear. Já na etapa de lingotamento, observa-se, uma queda mais acentuada da temperatura média no final do processo não apresentando uma forma linear.

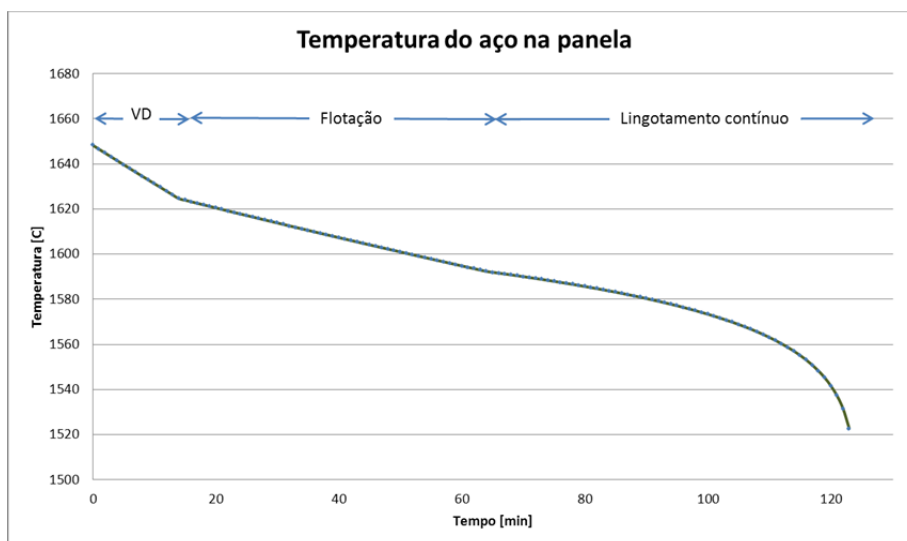


Figura 9. Temperatura média do aço na panela durante vácuo, flotação e lingotamento.

O modelo também armazena a temperatura no centro de cada refratário. Na Figura 10 pode-se observar o comportamento da temperatura dos refratários durante a etapa de secagem e aquecimento e para cada corrida da panela. Isso abre possibilidade para serem realizadas várias análises paramétricas como, por exemplo, qual tempo ideal de secagem e aquecimento, número de corridas necessárias para a panela atingir o encharque máximo, influência do tempo sem aço na temperatura dos refratários.

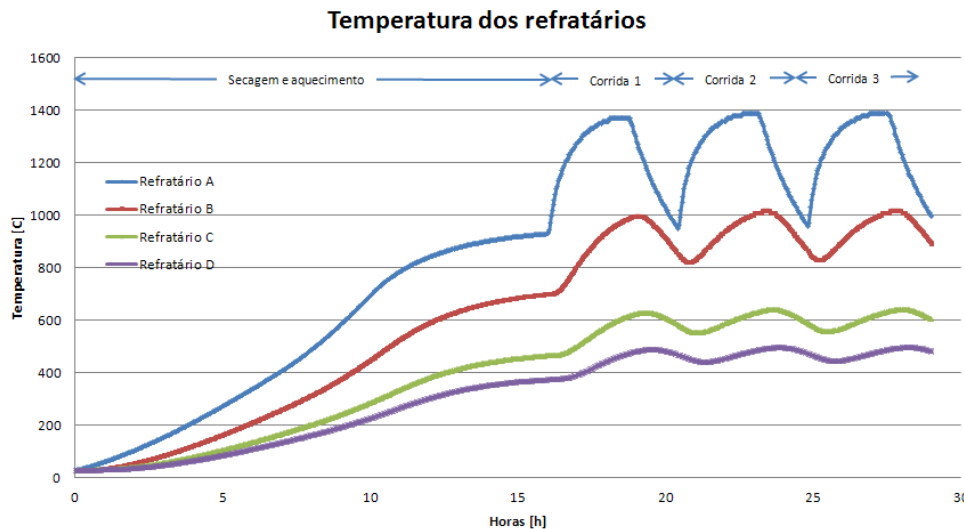


Figura 10. Temperatura dos refratários durante o processo de secagem, aquecimento e fabricação de 3 corridas.

4 CONCLUSÕES

Um novo *software* para auxiliar no controle da temperatura do aço foi desenvolvido e implementado em uma usina siderúrgica. O núcleo do código possui um modelo matemático para previsão da temperatura de liberação do aço no forno-panela, tendo sido validado com dados de uma aciaria de aços especiais. Esse modelo é baseado na simulação dos principais fenômenos físicos relacionados às perdas térmicas e leva em consideração dados geométricos e de processo, permitindo sua aplicabilidade a diferentes *layouts* de aciarias. Para facilitar a interação com o usuário foi desenvolvido uma interface gráfica para o código.

A validação com dados de cerca de 1.900 corridas mostrou um índice de acerto de aproximadamente 80%, demonstrando o potencial da utilização do modelo em condições de planta.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Siderurgia (LASID) pela colaboração no desenvolvimento e execução do projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 FREDMANT.P., Heat Transfer in Steelmaking Ladle Refractories and Steel Temperature: A Literature Review. Scandinavian Journal of Metallurgy, 29, p. 232-258. 2000.
- 2 GUPTA, N.; CHANDRA, S. Temperature prediction model for controlling casting superheat temperature. ISIJ International, 44, p.1517-1526, 2004.

- 3 JORMALAINEN, T.; LOUHENKILPI, S. A model for predicting the melt temperature in the ladle and in the tundish as a function of operating parameters during continuous casting. *Steel Research Int.*, 77, p.472-484, 2006.
- 4 PAN, Y., C.E. GRIP AND B. BJÖRKMAN, Numerical studies on the parameters influencing steel ladle losses rate, thermal stratification during holding and steel stream temperature during teeming. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 32, p.71-85, 2003.
- 5 GASTÓN, A.; LAURA R.; MEDINAM.; "Model for predicting steel temperature and thermal state of casting tundishes," *Ironmaking and Steelmaking*, 18, p.370-373, 1991.
- 6 FERREIRA, N.F.; HENRIQUES, B.R.; SEVERO, D.S. O Modelo matemático das panelas da CST. In: *Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais*. 33, 2002. ABM. Santos. 2002.
- 7 CONTINI, A.C.; MORALES, B.B.; NADALON. J.E.A; *et al.* Aplicação de um modelo matemático para o cálculo da temperatura do aço durante o processo de lingotamento. 42º *Seminário Internacional de Aciaria*, ABM, Salvador-BA, 2011.
- 8 CONTINI, A.C.; MORALES, B.B.; NADALON. J.E.A; *et al.* Influência da geometria da panela na temperatura do aço durante o refino secundário e lingotamento. 43º *Seminário Internacional de Aciaria*, ABM, Belo Horizonte-MG, 2011.
- 9 LOPES, H. L. P. Modelo para Previsão da Condição Térmica de Panelas de Aciaria. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte, 2007.