



APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DO AÇO DURANTE O PROCESSO DE LINGOTAMENTO¹

André Carlos Contin²
Bayard Beling Morales³
José Ernesto de Azevedo Nadalon⁴
Leonardo Barboza Trindade⁵
Antônio Cezar Faria Vilela⁶

Resumo

Entre a liberação de uma corrida da estação de forno panela e o lingotamento, a temperatura do aço sofre perdas decorrentes de diversas origens: refratários da panela, escória, adição de ligas, distribuidor, etc. Um grande número de estudos tem como alvo controle dessas perdas, pois elas acabam por determinar a temperatura de liberação necessária no forno panela. No presente trabalho, demonstra-se a aplicação de um modelo matemático que calcula a temperatura do aço durante o esgotamento da panela. São simulados cenários considerando diferentes velocidades de lingotamento, tempos de rinsagem e dois tipos de refratários de trabalho. Os resultados mostram que a queda de temperatura do aço durante seu lingotamento pode ser prevista com o uso do modelo, reduzindo a imprecisão do cálculo da temperatura de liberação do forno panela, melhorando sua eficiência energética e reduzindo a dispersão da temperatura de lingotamento.

Palavras-chave: Controle de temperatura; Lingotamento contínuo; Eficiência energética.

MATHEMATICAL MODEL APPLICATION FOR PREDICTION OF STEEL TEMPERATURE DURING CONTINUOUS CASTING

Abstract

After the ladle furnace treatment, the steel continually loses temperature due to several factors: ladle refractories, slag, alloy additions, tundish operation etc. A considerable number of research studies seek the control and evaluation of these losses, since they determine the steel temperature at the end of ladle furnace treatment. The present work demonstrates the application of a mathematical model on the steel temperature evaluation during the ladle drainage. The simulated scenarios account for different casting velocities, bubbling times and two types of refractories. The results show that the temperature loss during casting can be predicted employing the mathematical model, reducing the uncertainty of the final ladle furnace temperature, bringing to a better overall efficiency.

Keywords: Temperature control; Continuous casting; Energetic efficiency.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Físico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS.

³ Físico, Mestre em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS – Equipe Técnica – STE

⁴ Eng. Civil, Doutorando em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS – Equipe Técnica – STE

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

⁶ Eng. Metalúrgico, Dr.-Ing, Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS, Coordenador do LASID.



1 INTRODUÇÃO

O controle da temperatura do aço na etapa de refino e lingotamento é fundamental para a produtividade da aciaria e para a qualidade de seus produtos. O lingotamento com temperatura excessiva pode levar ao aumento da segregação no centro do tarugo/placa, afetar o tamanho do grão, e, em casos extremos, causar o rompimento da casca solidificada (*break out*). De outro modo, se o aço lingotar com temperatura muito baixa pode ocorrer problemas de *clogging*, formação de macro-inclusões, *freezing* e aumento da probabilidade do lingote prender no molde.^(1,2) Além desses fatores, a eficiência energética do processo pode ser prejudicada se não houver um controle adequado da temperatura de lingotamento. Devido à importância do problema, vários autores despenderam esforços para conhecer e modelar o comportamento da temperatura do aço líquido durante as diversas etapas de refino e lingotamento.⁽³⁻⁸⁾ Dentre essas etapas, o esgotamento da panela durante o lingotamento contínuo é particularmente complexo, devido à variação de nível de aço na panela.

Neste trabalho, demonstra-se que é possível a aplicação de um modelo matemático para previsão da temperatura do aço na panela e no distribuidor durante o lingotamento. São verificadas a influência do tipo de refratário da panela, a ocorrência de rinsagem na torre de lingotamento contínuo e a velocidade de lingotamento, além do efeito do encharque térmico das painelas.

2 METODOLOGIA

Durante o ciclo de aciaria, o aço interage termicamente com os refratários da panela e o ambiente (através da escória) continuamente, determinando as suas variações de temperatura. Um ciclo típico de uma aciaria de aços especiais pode ser sintetizado nas seguintes etapas: pré-aquecimento da panela, vazamento do forno de refino primário, forno-panela, desgaseificador e lingotamento contínuo (Figura 1).

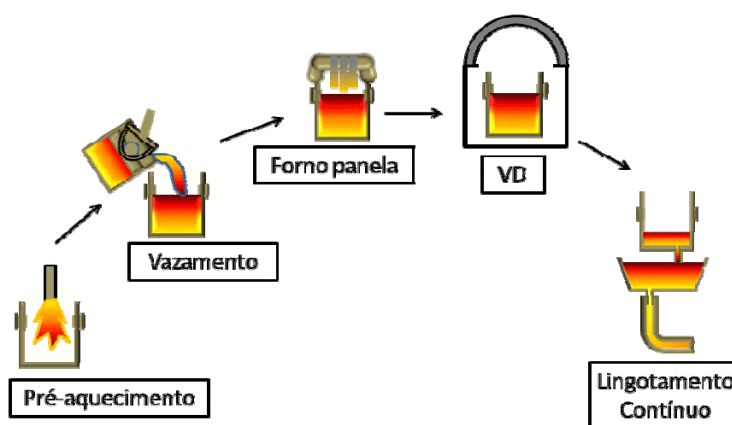


Figura 1. Ciclo típico de uma aciaria de aços especiais.

A partir da liberação do forno-panela, a temperatura do aço cai continuamente, pois, em geral, não há mais fornecimento de energia para o aço. Desta maneira, a temperatura de liberação do aço depende de uma estimativa de queda de temperatura que ocorrerá nas etapas subsequentes.

Na última fase (lingotamento contínuo), apresentada na Figura 1, a panela é levada à torre de lingotamento e é esgotada, vazando para o distribuidor. O aço do



distribuidor é escoado para os moldes, nos quais começa a ocorrer a solidificação. Nessa etapa, à medida que o lingotamento procede, o nível de aço na panela diminui, o que altera a interação deste com os refratários. A temperatura do aço no distribuidor também é afetada devido à mistura de um aço mais frio com um mais quente, por ocasião da operação de sequenciamento. Dessa maneira, o controle e cálculo da temperatura durante o lingotamento tornam-se complexos. A modelagem matemática apresenta uma alternativa viável para essa tarefa.

O modelo apresentado é parte do desenvolvimento de uma ferramenta que busca calcular a temperatura do aço líquido em todo o ciclo de aciaria. Neste módulo, a atenção é voltada para o cálculo da temperatura do aço durante o lingotamento, tanto na panela quanto no distribuidor. A Figura 2 ilustra as entradas e saídas deste módulo.

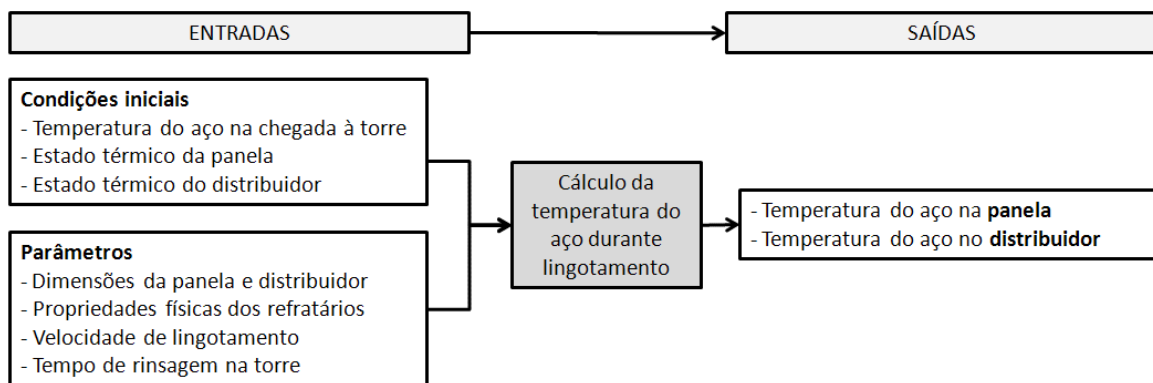


Figura 2. Estrutura esquemática do modelo de previsão de temperatura do aço.

A base do modelo matemático para o cálculo da temperatura no lingotamento consiste em estimar o fluxo de energia do aço para os refratários da panela e distribuidor e para a escória. Conhecendo esses fluxos, é possível determinar a temperatura (média) do aço em função do tempo. A metodologia para estimar tais fluxos na panela é similar à empregada por Ferreira, Henriques e Severo⁽⁸⁾ equações diferenciais unidimensionais de transferência de calor são solucionadas utilizando método diferenças finitas,⁽⁹⁾ considerando as seguintes hipóteses:

- a transferência de calor nos refratários da panela ocorre somente na direção radial;
- as propriedades físicas dos refratários não variam com a temperatura;
- os refratários são os mesmos em toda altura da panela – isto é, considerou-se que a linha de escória é idêntica à de aço.
- a temperatura do aço é considerada uniforme, ou seja, não é considerada a estratificação do aço dentro da panela; e
- o fluxo de calor através da escória é considerado constante durante o processo.

A temperatura de aço calculada serve como parâmetro de entrada no modelo do distribuidor. Nele, os fluxos são prescritos a partir de estimativas da literatura, considerando que o fluxo de calor através das paredes do distribuidor é constante, isto é, um distribuidor encharcado termicamente.

Após estimar os fluxos térmicos na panela e distribuidor, o modelo calcula a queda de temperatura do aço durante o lingotamento, tanto na panela quanto no distribuidor, considerando os efeitos do esgotamento da panela.



O modelo matemático foi implementado em um software, no qual é possível verificar rapidamente o impacto da alteração de parâmetros de processo nas temperaturas de lingotamento.

2.1 Condições Simuladas

Para demonstrar a aplicação do modelo, dados da literatura foram coletados para alimentar o modelo. Foi considerada uma panela de 100 toneladas, utilizando a mesma geometria e propriedades de refratários de Pan, Grip e Björkman.⁽⁶⁾ Considerou-se que o aço chega à torre com temperatura média de 1.600°C. Para estimativa dos fluxos térmicos, foi considerado um ciclo típico de produção de aços especiais, compreendendo as seguintes etapas:

- pré-aquecimento;
- vazamento do forno de refino oxidante;
- forno panela: 60 minutos;
- desgaseificador (VD): 30 minutos de tratamento;
- rinsagem pós-VD: 10 minutos;
- rinsagem na torre de LC;
- esgotamento da panela;
- intervalo entre duas corridas: 60 minutos.

A geometria do distribuidor utilizada foi a de Morales et al.,⁽¹⁰⁾ sendo os fluxos térmicos os mesmos de Jormalainen e Louhenkilpi.⁽⁵⁾ Considerou-se, também, que no início do esgotamento da panela o distribuidor já está cheio, com temperatura de aço média de 1.550°C.

Para demonstrar os efeitos do estado térmico da panela, cada simulação foi realizada considerando uma panela na primeira corrida do ciclo (panela nova) e uma na quinta corrida, que já possui um estado de encharque térmico elevado (panela no ciclo)

Foram selecionados os seguintes casos para demonstrar a utilização do modelo:

Tabela 1. Casos simulados no presente trabalho

Caso	Parâmetro testado	Condições	
1	Tipo de refratário de trabalho	Tipo A (aluminoso) 1,67 t/min 10 minutos	Tipo B (alta condutividade)^[6] 1,67 t/min 10 minutos
2	Vazão de lingotamento	Tipo A (aluminoso) 1,67 t/min 10 minutos	Tipo A (aluminoso) 2,20 t/min 10 minutos
3	Rinsagem na torre de lingotamento	Tipo A (aluminoso) 1,67 t/min 10 minutos	Tipo A (aluminoso) 1,67 t/min Sem rinsagem



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado do modelo, ilustrado na forma de curva de variação da temperatura na panela em função do tempo (Figura 3), busca avaliar o efeito do encharque dos refratários da panela. Nesse caso, foram simuladas duas situações: primeira corrida de panela contra a mesma panela após cinco corridas.

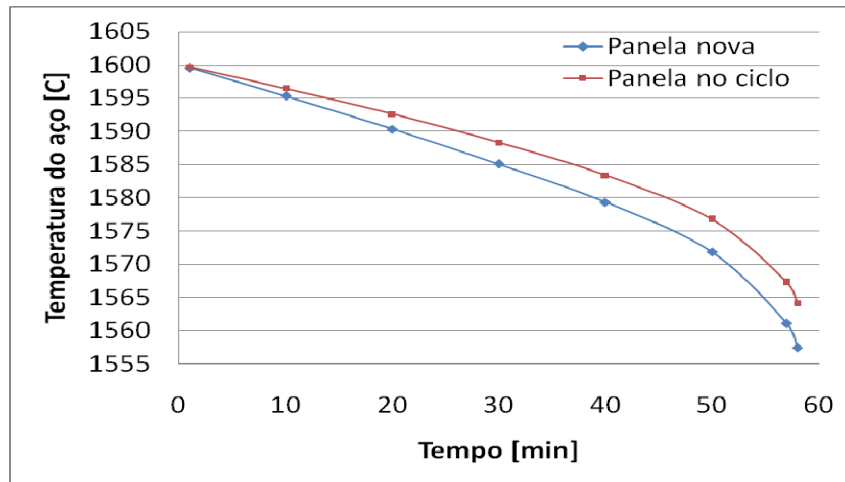


Figura 3 Variação da temperatura do aço na panela – Caso com refratário A, velocidade de lingotamento de 1,67 t/min, sem rinsagem.

Observa-se, durante o lingotamento, o efeito do estado térmico da panela na temperatura do aço – uma diferença de 7°C ao final do vazamento. Na realidade da aciaria, para duas panelas com encharques diferentes haveria temperaturas distintas ao chegarem à torre. Salienta-se que essa diferença é para uma situação ideal, onde só foi alterado o estado térmico dos refratários, o que na prática pode ser ligeiramente diferente, pois os procedimentos nunca se repetem. O caso simulado mostra que, mesmo em um caso ideal, é evidente a importância deste encharque.

Ainda, observa-se que no final do vazamento ocorre uma queda mais acentuada na temperatura – isso se deve ao fato que à medida que a panela esvazia a razão entre o volume de aço restante e a área de refratário em contato com ele diminui. Na Figura 4, é ilustrada a variação de temperatura do aço no distribuidor durante o lingotamento.

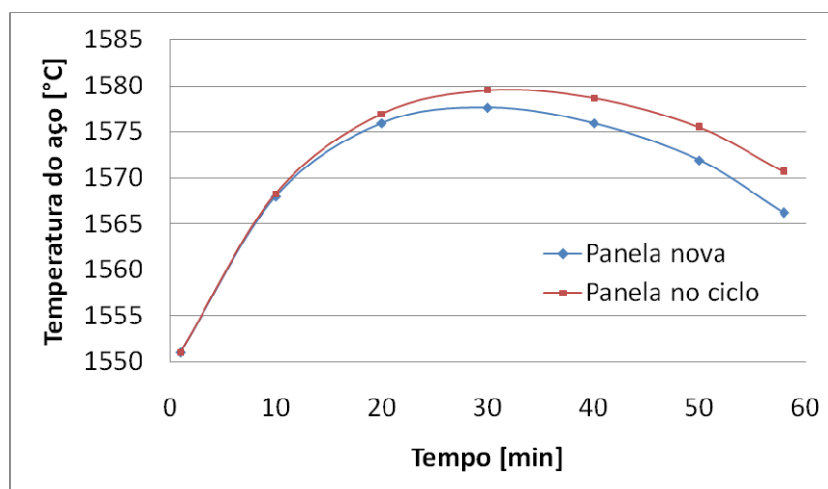


Figura 4 Variação de temperatura do aço no distribuidor – Caso com refratário A, velocidade de lingotamento de 1,67 t/min, sem rinsagem.



Na Figura 4 verifica-se que a temperatura do aço no distribuidor aumenta rapidamente durante os primeiros minutos do lingotamento. Tal fenômeno ocorre devido à mistura do aço mais frio, que já estava no distribuidor, com o aço mais quente, que vem da panela com a temperatura vista na Figura 3.

A variação de temperatura de aço na panela é descrita nas Tabelas 2, 3 e 4 para diferentes refratários, velocidades de lingotamento e rinsagem na torre, respectivamente.

Tabela 2. Temperatura do aço na panela ao término do esgotamento – diferentes refratários na panela

Tipo de refratário	Panela nova	Panela no ciclo
A	1557,41	1564,12
B	1548,37	1557,61

É possível observar que o uso do refratário de alta condutividade térmica acaba levando a fluxos térmicos maiores e, conseqüentemente, quedas mais acentuadas de temperatura do aço. Nota-se, também, que o encharque térmico é mais importante para o refratário de maior condutividade, pois a redução na queda de temperatura é de 9,24°C, enquanto para o refratário A é de 6,71 °C.

Tabela 3 Temperatura de aço na panela ao término do vazamento– diferentes velocidades de lingotamento

Vazão de lingotamento (t/min)	Panela nova	Panela no ciclo
1,67	1557,41	1564,12
2,20	1568,29	1574,89

No caso de diferentes velocidades de lingotamento, os efeitos do encharque térmico são similares (utiliza-se o refratário de trabalho tipo A) - aproximadamente 6,6°C, como visto na Tabela 3 Ao aumentar a velocidade de lingotamento o vazamento ocorre 15 minutos mais rápido, fazendo com que a diferença de temperatura seja de aproximadamente 11°C ao final do vazamento tanto para corrida 1 quanto para corrida 5.

Tabela 4. Temperatura de aço na panela ao término do vazamento– efeito da rinsagem na torre

Rinsagem	Panela nova	Panela no ciclo
Sem Rinsagem	1557,41	1564,12
10 minutos	1552,03	1560,03

A ocorrência de rinsagem antes da abertura da válvula da panela ocasiona uma queda de temperatura (Tabela 5): 5,38°C na primeira corrida e 4,09°C na quinta corrida. A diferença deve-se ao melhor estado de encharque térmico obtido para a panela no ciclo.

Os resultados da temperatura no distribuidor durante o lingotamento são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7 para diferentes refratários, velocidades de lingotamento e rinsagem na torre, respectivamente.



Tabela 5 Temperatura do aço no distribuidor ao término do lingotamento - diferentes refratários na panela

Tipo de refratário	Panela nova	Panela no ciclo
Refratário A	1566,19	1570,58
Refratário B	1559,75	1565,83

Verifica-se que, embora o estado térmico da panela seja importante para a temperatura de aço na saída da panela (conforme Tabela 2), sua relevância é menor para a temperatura do aço no distribuidor – o distribuidor age de forma a atenuar as variações da temperatura que ocorrem na panela. Ressalta-se, no entanto, que foi considerado um distribuidor encharcado termicamente, conforme discutido anteriormente.

Tabela 6 Temperatura do aço no distribuidor – diferentes velocidades de lingotamento

Velocidade de lingotamento (t/min)	Panela nova	Panela no ciclo
1,67	1566,19	1570,58
2,20	1573,65	1577,90

No caso de variações de velocidade de lingotamento (Tabela 6), o efeito do encharque é de aproximadamente 5°C. A variação de velocidade afeta o tempo de residência do aço no distribuidor, diminuindo as perdas térmicas no equipamento. A elevação da velocidade de lingotamento diminuiu a queda de temperatura em, aproximadamente, 7°C.

Tabela 7 Temperatura do aço no distribuidor – efeito da rinsagem na torre

Rinsagem	Panela nova	Panela no ciclo
Sem Rinsagem	1566,19	1570,58
10 minutos	1560,93	1566,59

Na Tabela 7, pode-se observar a influência da rinsagem no distribuidor é de aproximadamente 5°C para a panela nova, enquanto para a panela no ciclo ela é próxima de 4°C.

4 CONCLUSÕES

O modelo apresentado é capaz de calcular a temperatura do aço durante o lingotamento, tendo sensibilidade a diversos parâmetros operacionais e características dos equipamentos. Dessa maneira, pode ser empregado para avaliar como as alterações do lingotamento podem interagir com as demandas de elevação de temperatura no forno-panela, permitindo otimizar a sua utilização.

Os resultados se mostram compatíveis com as observações da literatura e com a experiência na aciaria. Os testes mostram que o modelo responde às variações de parâmetros conforme o esperado.

O desenvolvimento posterior da ferramenta de cálculo de temperatura do aço será conduzido de forma a contemplar as demais etapas de fabricação na aciaria, buscando um *software* que auxilie na melhoria do controle desta variável de processo. Esse *software* pode ser customizado para as particularidades de cada aciaria, de forma a atender as necessidades de cada uma.



Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Siderurgia (LASID) pela colaboração no modelo desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- 1 RIZZO, E. M. S.; Introdução aos processos de lingotamento dos aços. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, ABM, 2006.
- 2 GASTÓN, A., SARMIENTO, G. S., BEGNIS, J. S. S. Thermal analysis continuous casting tundish by an integrated FEM code. Latin American Applied Research. 38, p. 259-266. 2008.
- 3 FREDMAN T.P., Heat Transfer in Steelmaking Ladle Refractories and Steel Temperature: A Literature Review. Scandinavian Journal of Metallurgy, 29, p. 232-258. 2000.
- 4 GUPTA, N. CHANDRA, S. Temperature prediction model for controlling casting superheat temperature. ISIJ International, 44, p.1517-1526, 2004.
- 5 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.
- 6 PAN, Y., C.E. GRIP; 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.
- 7 GASTÓN, A.; LAURA R.; MEDINA M.; "Model for predicting steel temperature and thermal state of casting tundishes," Ironmaking and Steelmaking, 18, p.370-373, 1991.
- 8 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.
- 9 INCROPERA, F. P.; Witt, D. P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 4^aed. Rio de Janeiro, Editora LTC, 1998.
- 10 MORALES, R. D.; ALONSO, E. T.; DEMEDICES, L. G.; RAMOS, J. P. Vortex growth and vortex elimination in a slab tundish. AISTech 2005 Proceedings, Volume II, p.118-119, 2005.