



INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA PANEIA NA TEMPERATURA DO AÇO DURANTE O REFINO SECUNDÁRIO E LINGOTAMENTO¹

André Carlos Contin²
Bayard Beling Morales²
José Ernesto de Azevedo Nadalon³
Leonardo Barboza Trindade⁴
Antônio Cezar Faria Vilela⁵

Resumo

Durante o refino secundário do aço e seu lingotamento, o metal perde temperatura continuamente através dos refratários da panela e da escória. Dentre os diversos fatores que podem influenciar essa perda de temperatura, figura a geometria da panela. No presente trabalho, estudou-se a relação entre o diâmetro da panela e perdas térmicas do aço durante o refino secundário e lingotamento. Para isso, foi empregado um modelo numérico através do qual é possível calcular os fluxos térmicos do aço para os refratários. Utilizou-se como caso de referência uma panela cilíndrica de 100 t, descrita na literatura, e foram analisados casos com acréscimo e decréscimo do diâmetro da mesma (ou seja, diferentes bordas livres). Os resultados mostram que o acréscimo de diâmetro provoca um aumento das perdas térmicas do aço. Isso ocorre devido ao aumento da área de contato metal-escória e ao fato de na etapa de desgaseificação a vácuo o fluxo térmico através dessa superfície é muito maior do que nas demais etapas.

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

MATHEMATICAL MODEL APPLICATION FOR PREDICTION OF STEEL TEMPERATURE DURING CONTINUOUS CASTING

Abstract

During secondary steelmaking and casting, the molten steel gradually loses temperature through ladle refractories and slag. Among other factors that may influence the behavior, the ladle geometry plays an important role. In the present paper, the relation between ladle diameter and steel thermal losses during secondary refining and casting were studied. A numerical model, to compute the steel thermal fluxes to refractories, was employed. A typical 100 t ladle, described in literature, was chosen for the reference data to simulations, where the rise and decrease in diameter were evaluated. The results show that the rise in diameter leads to a higher steel thermal losses. This happens because the increase in the metal-slag interface area and due to the fact that during the vacuum degassing the heat flow through this interface is much higher than others process stages.

Key words: Secondary steelmaking; Continuous casting; Steel temperature

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Físico, Mestre em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS – Equipe Técnica – STE.

³ Eng. Civil, Doutorando em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS – Equipe Técnica – STE.

⁴ Físico, Dr. Eng. Metalúrgica – Diretor Geral – Science, Technology & Engineering – STE.

⁵ 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, avaliou-se o comportamento da temperatura média do aço durante a etapa de refino para panelas com diferentes geometrias tomando como base uma panela descrita na literatura. Alterou-se o diâmetro e, ao mesmo tempo, a borda livre, mantendo-se fixa a massa de aço presente no reator.

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, vazamento do forno de refino primário, forno-panela, desgaseificador e lingotamento contínuo (Figura 1).

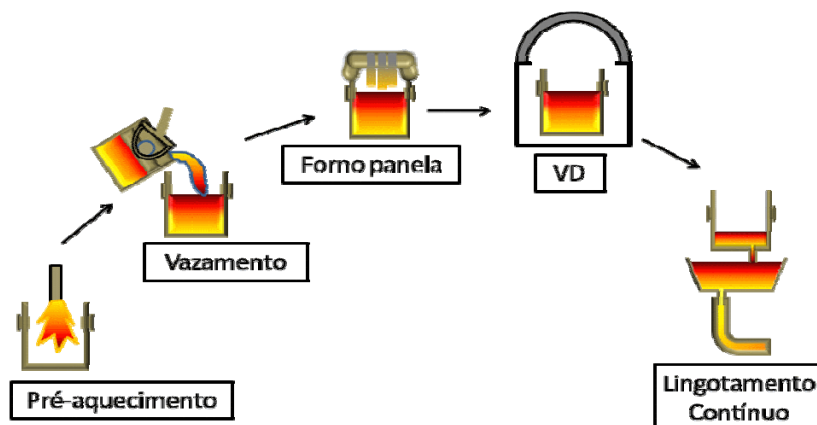


Figura 1. Ciclo típico de uma aciaria de aços especiais.

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) (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. 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 média do aço durante as etapas de desgaseificação a vácuo (VD), flotação e lingotamento contínuo.

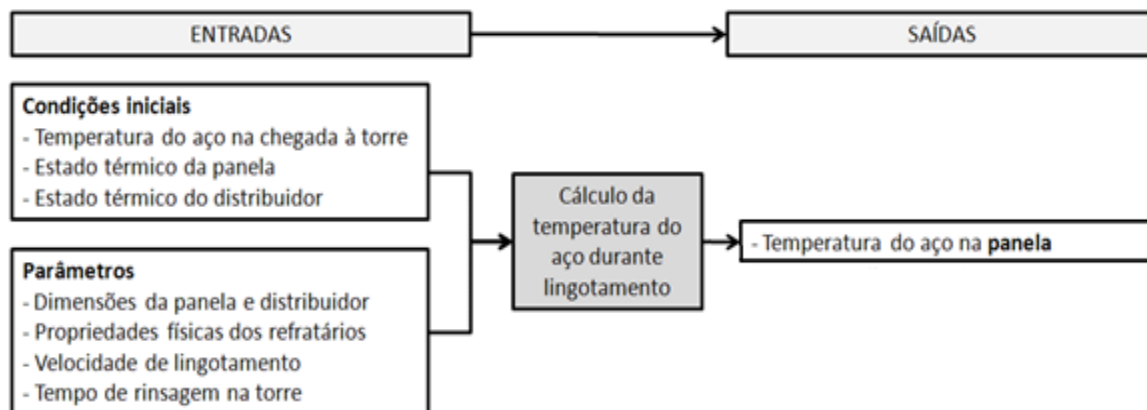


Figura 2. Estrutura esquemática do modelo de previsão de temperatura do aço.

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 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.

2.1 Condições Simuladas

Para comparação das panelas foram utilizados dados da literatura. Foi considerada uma panela de 100 toneladas e os refratários utilizados foram de Pan, Grip e Björkman.⁽⁶⁾

Considerou-se que o aço sai do forno panela com uma temperatura média de 1.650°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: 50 minutos;
- desgaseificador (VD): 15 minutos;
- flotação: 50 minutos (inclui 10 minutos de transporte); e



- esgotamento da panela: 60 minutos.

Na Figura 3, podem-se observar as geometrias consideradas neste trabalho. A panela mostrada na Figura 3b tem dimensões idênticas à panela utilizada no trabalho de Pan, Grip e Björkman.⁽⁶⁾

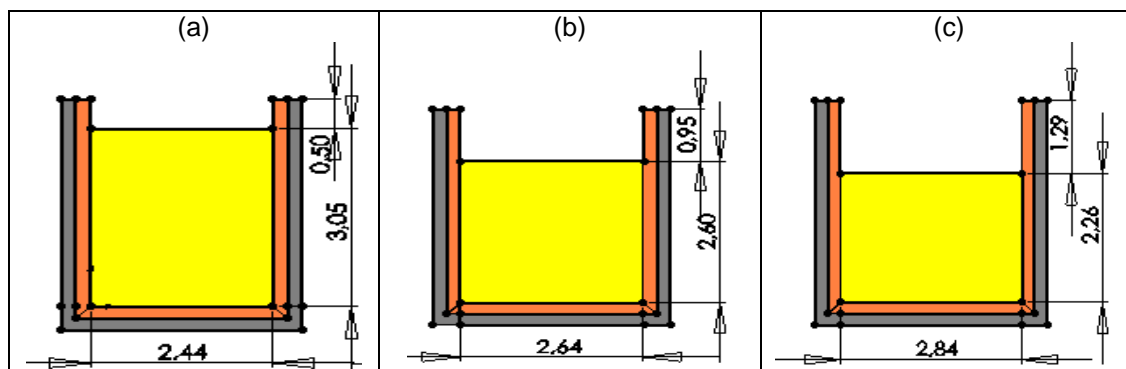


Figura 3. Vista transversal das três panelas consideradas: (a) $r = 1,22$ m; (b) $r = 1,32$ m; e (c) $r = 1,42$ m.

As perdas pela escória podem ser vistas na Tabela 1. Para o VD realizou-se estimativas segundo o trabalho desenvolvido por Szekely, Carlsson e Helle.⁽¹⁰⁾ As perdas no processo de flotação e lingotamento foram feitas extrapolando os dados do trabalho de Barber, Zoryk e Walker.⁽¹¹⁾ Ressalta-se que as perdas térmicas pela escória devem ser analisadas caso a caso, pois dependem de vários fatores, dentre eles: espessura de escória, tipo de escória etc.

Tabela 1. Estimativa das perdas pela escória nas etapas de VD, flotação e lingotamento contínuo

VD [KW/m ²]	Flotação [KW/m ²]	Lingotamento [KW/m ²]
350	78	10

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 é mostrada a temperatura média do aço para três panelas com raios distintos durante o processo de desgaseificação a vácuo, flotação e lingotamento. Observa-se que quanto maior for o raio da panela maior é a queda de temperatura durante o processo. 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.

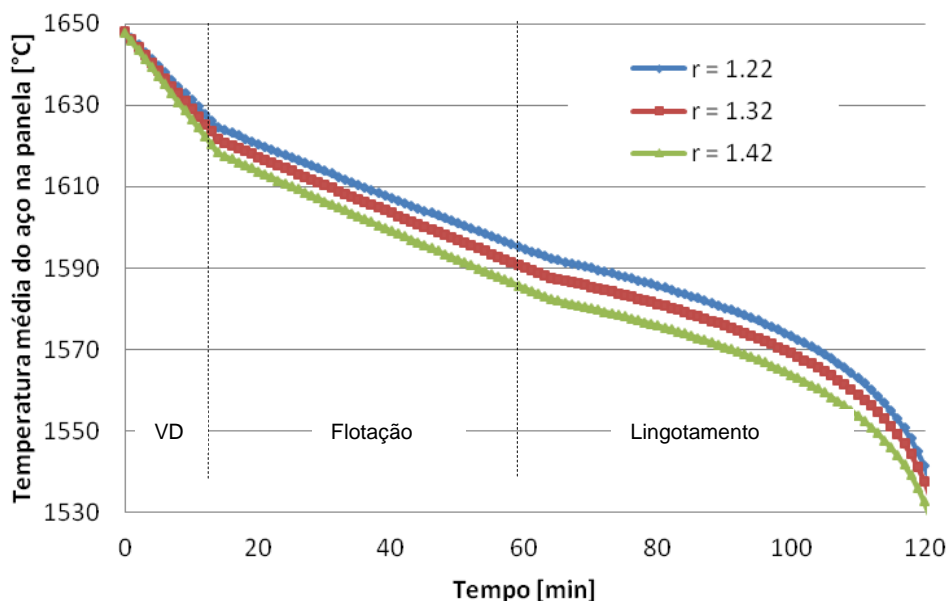


Figura 4. Temperatura média do aço na panela durante vácuo, flotação e lingotamento.

Na Tabela 2, é mostrada a temperatura média do aço no final de cada processo. Nota-se que durante o processo de VD ocorre uma diferença de 6,28°C comparando o caso com raio de 1,22 m e 1,42 m. Na etapa de flotação essa diferença aumenta para 10°C e no processo de lingotamento a diferença na temperatura média de aço na metade do esgotamento foi de 9,62°C.

A queda da temperatura média do aço devido ao aumento do raio é causada, principalmente, por um aumento da área de escória. Pois, enquanto os fluxos de calor para os refratários variam de 16 kW/m² a 21 kW/m², o fluxo de calor na escória varia de 78 kW/m² a 350 kW/m² nas etapas de VD e flotação.

Tabela 2. Temperatura final do aço em cada processo

Raio	Forno panela	VD	Flotação	Lingotamento (panela = 50 t)
1.22	1650.00	1624.62	1592.34	1577.8
1.32	1650.00	1621.64	1587.7	1573.43
1.42	1650.00	1618.34	1582.34	1568.18

Observa-se (Figura 5), a taxa média com que o aço perde temperatura durante o processo de VD e flotação, separada em escória e refratário. Enquanto a taxa devido ao refratário permanece praticamente constante, a escória aumenta à medida que se estende o raio da panela. Pode-se afirmar, também, que as perdas pela escória variam de 70% e 80% no processo de desgaseificação e 40% a 50% na etapa de flotação.

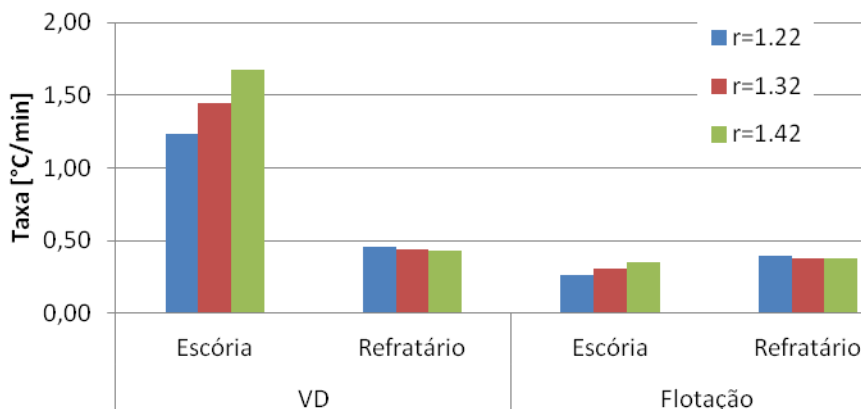


Figura 5. Taxa da temperatura média do aço durante o VD e flotação.

Na Figura 6, verifica-se a taxa com que o aço perde temperatura durante o vazamento. Pode-se observar que, à medida que o aço é vazado da panela para o distribuidor, maior é a taxa que o aço perde temperatura, chegando a valores da ordem de 5°C/min nos últimos minutos de lingotamento.

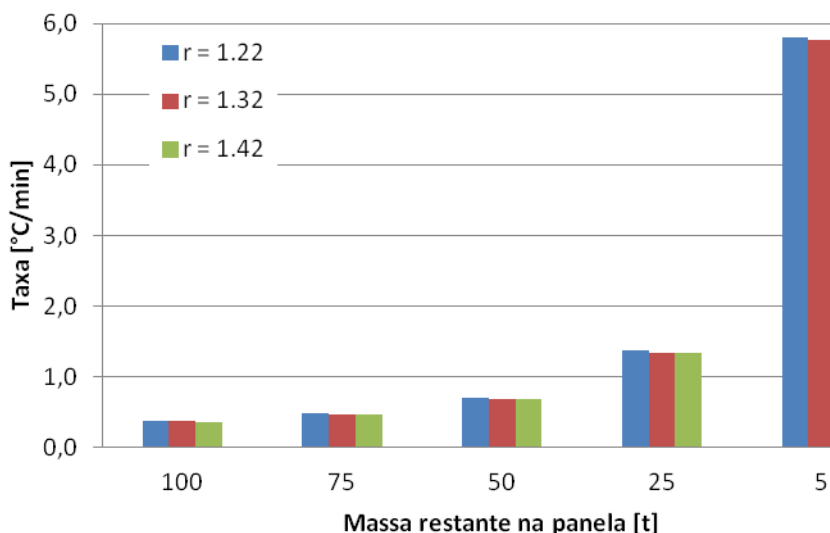


Figura 6. Taxa da temperatura média do aço durante o vazamento.

4 CONCLUSÕES

Observou-se que, sob as condições impostas, à medida que se aumenta o raio da panela maior é a queda de temperatura média do aço durante as etapas de VD, flotação e lingotamento.

Na etapa desgaseificação e flotação, observou-se que as perdas são lineares durante todo o processo. Contudo, durante o esgotamento da panela a queda da temperatura aumenta conforme o aço é esgotado.

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.



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 FREDMANT.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 super heat 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.; MEDINAM.; “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 painéis 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.4ªed. Rio de Janeiro, Editora LTC, 1998.
- 10 SZEKELY, J.; CARLSSON G.; HELLE, L. Ladle metallurgy. 1ª ed. Editora: Springer. 1989.
- 11 BARBER, B.; ZORYK, A.; WALKER, K. D. Process Model for the Determination of Liquid Steel Temperatures in the Ladle and Tundish. Process Technology Conference, vol. 14, Orlando, Florida, USA, 12-15 nov. 1995.