

AVALIAÇÃO DE PERDAS TÉRMICAS EM UMA PANELO DE REFINO DE AÇO¹

André Zimmer²
Álvaro Niedersberg Correia Lima³
Rafael Trommer³
Saulo Roca Bragança⁴
Carlos Pérez Bergmann⁴

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de estudar as perdas térmicas em uma panela de aciaria através de medições da temperatura no aço e na panela. A avaliação de perdas térmicas do aço foi realizada com medições de sua temperatura em pontos abrangendo todo processo de refino do aço. Na panela, foram mensuradas as temperaturas nos refratários e na chapa externa. Foram verificadas maiores perdas térmicas no vazamento e no vácuo. As medições de temperatura da panela mostraram que esta apresenta perfis térmicos distintos em cada etapa do refino do aço. O conhecimento das perdas térmicas no aço e dos perfis térmicos da panela permite inferir subsídios para um melhor controle operacional visando à redução das perdas térmicas.

Palavras-chave: Perdas térmicas; Panela de refino do aço; Aço.

EVALUATION OF HEAT LOSSES IN A STEEL LADLE

Abstract

This work has the objective to study the thermal losses in a ladle through measurements of temperature in steel and ladle. The evaluation of thermal losses of steel was carried with measurements of its temperature in points having enclosed all process of refining of the steel and it was verified greater thermal losses in the steel tapping and in vacuum. In the ladle the temperatures in the refractory and the external part of ladle had been measured. The measurements of temperature of ladle had shown that this presents distinct thermal profiles in each step of steel refining. The knowledge of the thermal losses in the steel and the thermal profiles of ladle allow inferring subsidence for one better operational control in favor of reduce heat losses.

Key words: Heat losses; Ladle; Steel.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Mestre em Engenharia*

³ *Engenheiro de Materiais*

⁴ *Doutor em Engenharia*

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores custos no refino de aço são os gastos energéticos. Em face disto, procura-se minimizar as perdas e oscilações térmicas no processo, como meio de se obter uma redução de custos associados ao desgaste de materiais refratários e eletrodos. Por outro lado, um processo termicamente mais estável, significa uma melhoria na qualidade do aço e aumento da produtividade com redução nas perdas de bateladas de aço, menor tempo em paradas e reaquecimento, necessárias para manter o aço na temperatura de lingotamento. Para Nath *et al.*,⁽¹⁾ o controle adequado dos parâmetros de processo no processamento do aço líquido no Forno Panela é essencial.

No refino do aço, a temperatura do aço líquido depende, além das perdas térmicas, das reações físico-químicas no banho devido às adições de ligas e também da composição e quantidade de escória. Além disso, em condições operacionais, uma panela não atinge um estado térmico semelhante à outra, de modo que o montante de troca térmica entre o aço e a panela é variável.

A redução em cascata dos custos de refino de aço é intimamente ligada ao controle da temperatura do aço líquido, deste modo, o conhecimento das perdas térmicas passíveis de serem reduzidas, desprezando-se aquela inerente ao processo, aliado a sua mensuração, é que podem levar a um controle mais eficiente da temperatura do aço e isto confere ao refino do aço melhores resultados em termos de qualidade do aço e redução de custos de produção.

A importância do controle da temperatura do aço líquido foi objeto de muitos estudos, tais como os de Volkova e Janke,⁽²⁾ Jonsson e Jonsson,⁽³⁾ Xia e Ahokainen,⁽⁴⁾ Austin *et al.*⁽⁵⁾ Esses autores desenvolveram modelos para prever as temperaturas no aço. Grosso modo, estes modelos correspondem a partes de todo processo de refino, ou quando abordam a totalidade do processo, são simplificações devido à complexidade do mesmo. Por vezes, apresentam-se boa compatibilidade do modelo com dados encontrados na prática, porém, na sua generalização, incorre-se em erros, devido às peculiaridades de cada aciaria.

A programação e o controle do processo têm um impacto direto na perda de calor do sistema panela-aço conforme a Revisão da Literatura de Fredman.⁽⁶⁾ De acordo com Baker e Irving,⁽⁷⁾ os passos e considerações necessárias para otimizar o controle do processo de fabricação do aço com alta produtividade são: i) prover uma carga corretamente balanceada; ii) minimizar o sobre-carregamento de escória entre a panela de fusão e panela de refino e iii) manter uma temperatura estrita entre as etapas de refino e lingotamento.

Neste trabalho, objetiva-se investigar as principais fontes de perdas térmicas no refino de um aço do tipo construção mecânica, utilizando as temperaturas do aço líquido, nos materiais de revestimento e carcaça da panela.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma panela de aciaria utilizada no refino de um aço do tipo construção mecânica foi instrumentada com termopares do tipo N na altura da linha de escória. Foi medida a temperatura da face fria do refratário de desgaste da panela, um refratário do tipo MgO-C, o qual faz contato com a escória. Para avaliar os gradientes térmicos e temperaturas em diversos pontos da panela, como a carcaça externa, foi utilizado um pirômetro óptico monocromático.

Concomitantemente, foram medidas as temperaturas do aço nas diversas etapas do refino do aço, ou seja, compreendendo desde o início do vazamento até o final do lingotamento, através de um termopar de imersão.

A partir dos valores de temperatura e medições dos intervalos de tempo no processo, foi calculada a perda térmica em termos de potência média decaída do aço líquido entre o vazamento e o início do aquecimento no Forno Panela e também durante o vácuo. Para isso, fez uso das Equações 1, 2, 3 e 4:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad \text{Equação 1}$$

$$Q = E_t \quad \text{Equação 2}$$

$$P_m = \frac{E_t}{\Delta t_s} \quad \text{Equação 3}$$

$$C = P_m \times \Delta t_h \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

Q = quantidade de calor (GJ)

m = massa (Kg)

c = calor específico do aço fundido (J/Kg.K)

ΔT = variação de temperatura (K)

E_t = energia térmica (J)

P_m = potencia média (MW)

Δt_s = variação do tempo (s)

C = consumo energético (MWh)

Δt_h = variação do tempo (h).

A Equação 1 é a equação clássica da calorimetria e expressa a quantidade de calor fornecida ou recebida por um material sob variação da temperatura. Na Equação 2, faz-se uma simplificação, admitindo-se que toda a energia térmica perdida ou recebida pelo aço líquido (E_t) é convertida e transferida sob a forma de calor (Q). Para conhecer a energia consumida (C, na Equação 4), é necessário conhecer a potência média que é dada pela relação de energia por tempo em segundos (Equação 3) e, a partir desta, multiplicando-a com a variação do tempo em horas, chega-se à energia consumida, conforme a Equação 4.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta a temperatura do aço durante o processo de produção e refino de aço. Inicia no vazamento da panela de fusão de sucata, donde o aço vaza para a panela de transporte e operação, nesta é conduzido para o forno de aquecimento, passa pelo sistema de vácuo (para retirada de gases dissolvidos no aço) e, por fim, é direcionado para o lingotamento. Pode-se notar pela Figura 1 que as maiores perdas térmicas ocorrem no vazamento e no vácuo.

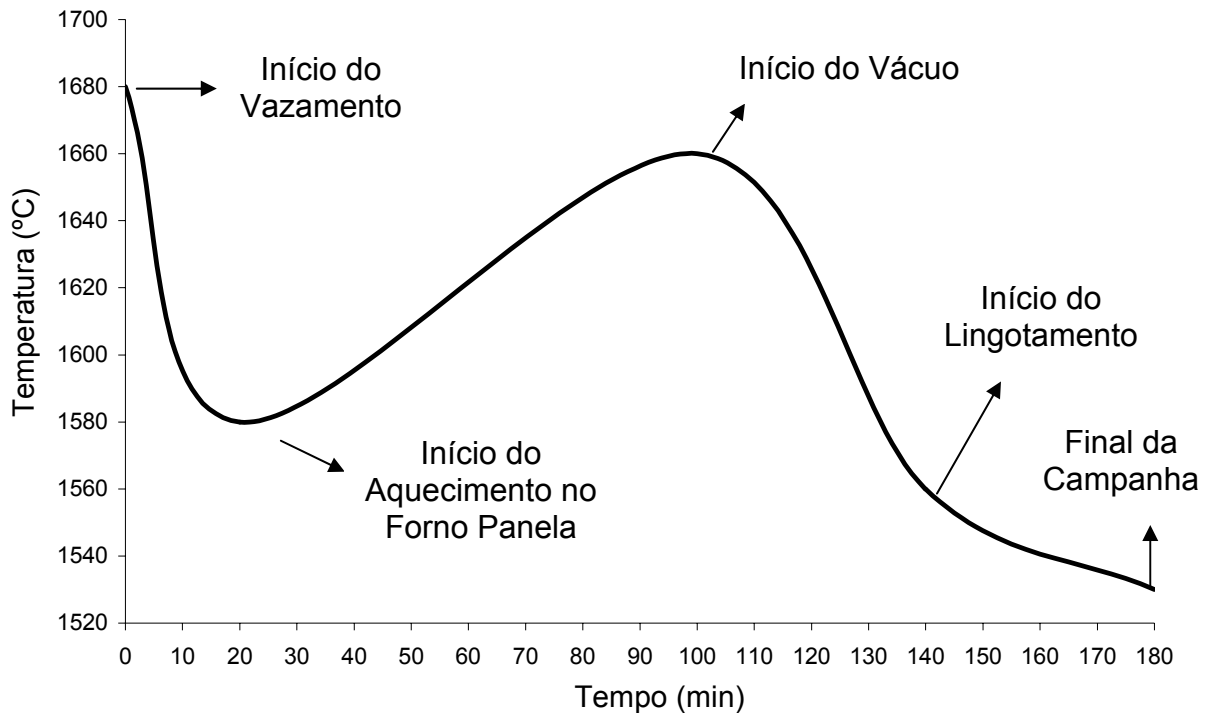


Figura 1. Variação da temperatura do aço durante uma corrida da panela.

No vazamento, o aço que está a $\sim 1680^{\circ}\text{C}$ perde calor para o ambiente de trabalho e, principalmente, para os refratários da panela, devido à menor temperatura destes, como pode ser visto na Figura 2. No sistema de aquecimento da panela para receber o vazamento de aço do forno de fusão tem-se um aquecimento heterogêneo, no qual a temperatura resultante nos refratários da panela, Figura 2, pode ser inferior a 1000°C a do aço líquido. No aquecimento da panela ocorre a formação de tensões térmicas na direção da face de contato com o aço para a chapa da panela⁽⁸⁾ e isto pode ser agravado, como no caso em estudo, se a panela apresentar elevados perfis térmicos entre o fundo e o bocal da panela, agravando-se mais ainda durante o vazamento, onde a variação de temperatura que os refratários da panela irão sofrer podem ser superiores a 1000°C .

Portanto, no vazamento, as panelas com menores temperaturas são as que provocam as maiores perdas térmicas. Estas panelas são aquelas fora do ciclo, diferente das que estão no ciclo, ou seja, as panelas que saem diretamente do lingotamento para uma nova campanha. Porém, mesmo as panelas que estão no ciclo podem ficar em espera por longo período, o que propicia também uma elevada perda térmica. Portanto, o histórico térmico de uma panela é variável e a conseqüente heterogeneidade térmica entre panelas, dificulta o planejamento e controle das temperaturas de todo processo. Por conseguinte, pode-se concluir que a padronização do estado térmico de cada panela é passo primordial para o controle e redução das perdas térmicas.

Destaca-se ainda, observando as Figuras 1 e 2, que quanto menor for o tempo de transporte da panela para o vazamento e maior o isolamento da parte superior da panela (bocal da panela), por exemplo, com o uso de uma tampa, menor será a perda de temperatura da panela. Do mesmo modo, quanto menor for o tempo de vazamento e o tempo de transporte da panela para aquecimento no Forno Panela, menor será a perda térmica, já que estes intervalos correspondem a uma forte diminuição de temperatura, expressa pela declividade da curva na Figura 1.



Figura 2. Perfil térmico de uma panela no final de seu aquecimento para entrar no ciclo e receber vazamento do aço.

Para o caso em estudo, tem-se, utilizando a Equação 2, para um total de 55 toneladas de aço líquido durante o vazamento e o início do aquecimento no Forno Panela, que a quantidade de calor perdida pelo aço líquido (Q) chega a 3,5 GJ, considerando o calor específico do aço líquido de 630 J/Kg.K. A perda térmica durante esta etapa, aqui calculada por meio da energia consumida pelo aço líquido na forma de calor (C) na Equação 4, foi de aproximadamente 1 MWh. Boa parte desta perda não pode ser evitada, tais como perdas devido às adições de ligas ao banho metálico, adições de escorificantes, trocas de calor com a panela e também com o ambiente durante o vazamento. Entretanto, como visto, tempos menores de vazamento e de transporte da panela ao Forno Panela, aliados a uma maior temperatura inicial nos refratários da panela, podem trazer grandes reduções nas perdas térmicas.

No aquecimento do aço no Forno Panela há uma perda energética expressiva. No caso em estudo, o Forno Panela usa aproximadamente 3 MWh de energia da sua fonte energética (rede elétrica). Empregando a Equação 4 e as temperaturas na Figura 1, para o intervalo entre o início do aquecimento no Forno Panela e início do vácuo, somente 0,8 MWh de energia gera aquecimento no aço, o restante da energia são perdas térmicas. Novamente, a maior parte destas perdas é de difícil redução, ocorrendo principalmente fuga de calor para os eletrodos (sistema de arrefecimento) e, em menor escala, transferência de calor do aço líquido para as paredes da panela. Estas perdas totalizam cerca de 73% da energia consumida entre o início do aquecimento do Forno Panela e o início do vazamento.

Outro ponto de grande perda térmica é no tratamento do aço no sistema à vácuo. Nesta etapa, a quantidade de calor fornecida (perdida) pelo aço foi calculada em 3,5 GJ. A energia perdida pelo aço em forma de calor para a sua vizinhança corresponde a 1 MWh, segundo a Equação 4. Para minimizar este valor, são válidos esforços para reduzir o tempo de vácuo, e isto pode ser obtido com um rígido controle na fusão referente a qualidade da carga, das ligas adicionados ao aço e materiais formadores de escória, minimizando a quantidade de gases presentes no sistema.

Durante o aquecimento no Forno Panela, há uma expressiva elevação da temperatura dos refratários de trabalho da panela, como pode ser visto na Figura 3. Mas este aumento de temperatura altera somente os refratários da panela, não ocorrendo ainda uma mudança em todo perfil térmico dos refratários ao longo da espessura da parede da panela. Evidência disso é dada pela temperatura praticamente inalterada na chapa externa da panela (Figura 3).

A Figura 3 mostra também que o aquecimento do refratário de desgaste é crescente com o tempo de processo de aquecimento no Forno Panela, e de modo similar ocorre o aumento da temperatura da escória. Deste modo, caso se eleve o isolamento térmico da panela com camadas de refratários mais isolantes, pode ocorrer sobre-aquecimento dos refratários da linha de escória e da escória e isto pode comprometer o desempenho e durabilidade dos mesmos. Como foi constatado no estudo de Akkurt e Leigh,⁽⁹⁾ a corrosão química dos refratários MgO-C na linha de escória é fortemente dependente da temperatura, podendo ser proporcional a exponencial da temperatura.⁽¹⁰⁾ Por este ponto de vista, o aumento do isolamento térmico da panela para minimizar perdas térmicas fica limitado à temperatura que pode ser alcançada pelos refratários da linha de escória e o custo do aumento de desgaste destes refratários. Isto leva a crer, que certas perdas térmicas da panela pelos refratários são de difícil minimização, o que aumenta a complexidade da abordagem.

Baseado no que foi explicado anteriormente, um projeto de controle das perdas térmicas da panela deve considerar questões que vão além da perda térmica propriamente dita pelos refratários. Ou seja, seria necessária uma mudança que envolveria o perfil térmico dos materiais, que por sua vez pode alterar condições de corrosão e choque térmico, além das limitações metalúrgicas, referentes à qualidade do aço.

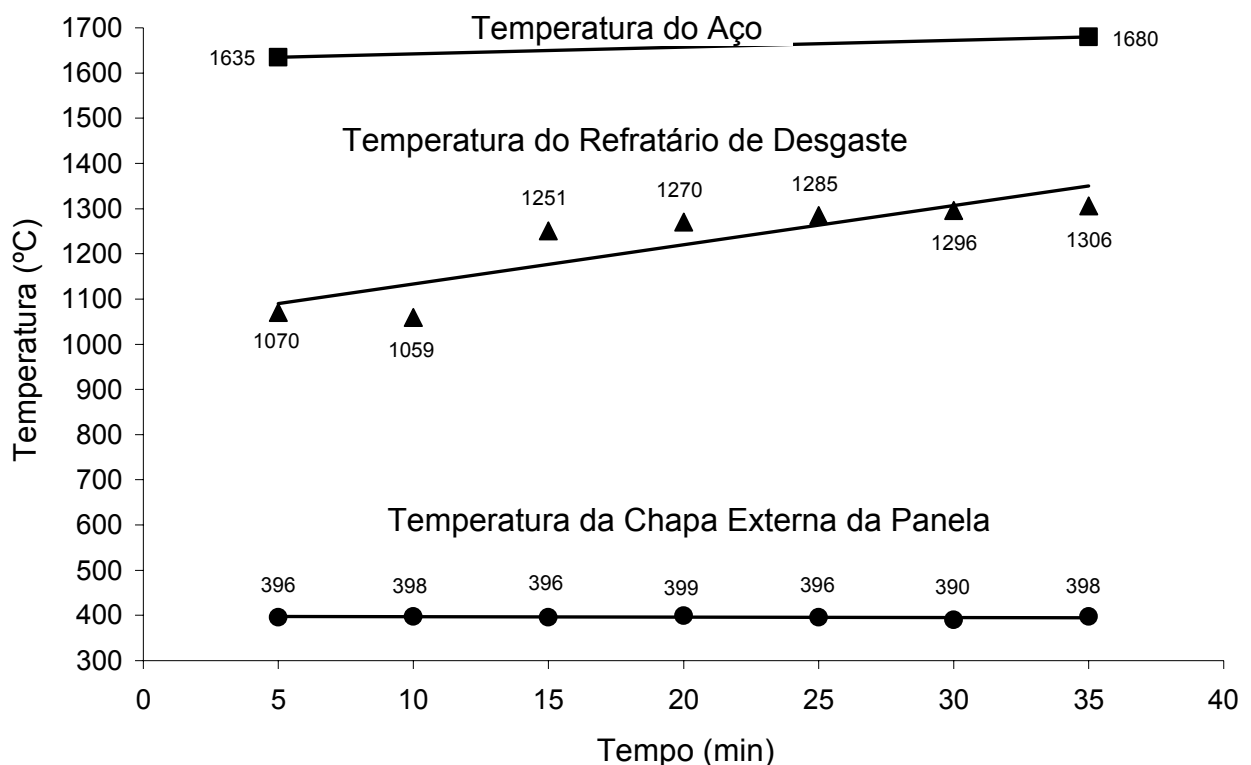


Figura 3. Temperatura dos refratários durante aquecimento no Forno Panela.

Os dados apresentados na Tabela 1 ao serem comparados aos da Figura 2 mostram que os perfis térmicos da panela podem ser distintos entre etapas do ciclo da panela. Após o aquecimento de uma panela fora do ciclo, a maior temperatura é verificada na parte superior da panela, na região acima da linha de escória, enquanto que após o lingotamento, a maior temperatura, conforme a Tabela 1, é verificada no fundo da panela. Esta diferença de temperaturas entre etapas e em cada ponto da panela torna cálculos de perdas térmicas significativamente complexos, pois, os diferentes perfis térmicos, compreendem todos materiais presentes na panela, os quais trocam calor por condução, convecção e radiação com o meio e ou entre si.

O tempo de espera da panela, após o lingotamento, para entrar no ciclo novamente, acarreta uma significativa perda térmica, podendo chegar a cerca de 1% por minuto de temperatura da face quente dos refratários da panela, entre os tempos de 10 e 25 minutos após o lingotamento, de acordo com os dados da Tabela 1. Assim, reduções de tempos de espera, por exemplo, por uma maior velocidade e/ou sincronismos nos transportes da panela entre etapas do processamento, além do recurso de utilização de tampas sobre o bocal da panela. Além disso, não menos importante e recomendável, seria a elevação da temperatura da panela para receber o aço logo após o vazamento, o que poderia ser obtido por um processo de aquecimento mais efetivo de ganho de temperatura por tempo. Portanto, o sistema de aquecimento deve inverter o perfil mostrado na Figura 2, salientando-se que uma maior uniformidade térmica do estado térmico da panela, além de ser a chave para um melhor controle operacional, é extremamente importante também para redução das tensões de origem térmica que são geradas por gradientes térmicos nos materiais de revestimento das panelas.

Tabela 1. Temperaturas medidas com pirômetro ótico na face quente do tijolo refratário após o lingotamento.

Local	Temperatura (°C)	
	10 min após término do lingotamento	25 min após término do lingotamento
Região da Escória	970	846
Região do Banho Metálico (parte superior)	1051	925
Região do Banho Metálico (parte inferior)	1069	975
Fundo da Panela	1095	960

4 CONCLUSÕES

As maiores perdas térmicas na panela de refino de aço ocorrem nas etapas de vazamento e vácuo do aço.

O controle das perdas térmicas de uma panela de refino de aço é bastante complexo. Os perfis térmicos são distintos para cada ponto da panela e para cada etapa do processo. Além disso, como cada etapa do processo depende da anterior, a complexidade do controle térmico é incremental. Deste modo, deve-se considerar que cada margem de tolerância térmica que se permite ao processo tende a aumentar a complexidade operacional, uma vez que o controle das perdas térmicas de todo processo fica mais difícil.

O conhecimento dos valores de perdas térmicas do aço durante o refino tem forte impacto no custo de produção e qualidade do aço, deste modo, para a redução das perdas térmicas são necessários esforços no sentido de aumentar o controle da temperatura do aço através de uma rígida supervisão da carga de aço, menor tempo na operação de vazamento, maiores temperaturas na panela para receber o vazamento do aço, uso de tampas sobre o bocal da panela, menor tempo de vácuo, sincronismo e aumento da velocidade nos transportes da panela.

REFERÊNCIAS

- 1 Nath, N.K.; Mandal, K.; Singh, A.K.; Basu, B.; Bhanu, C.; Kumar, S.; Ghosh, A. Ladle furnace on-line reckoner for prediction and control of steel temperature and composition. *Ironmaking & Steelmaking*, Volume 33, Number 2, April 2006, pp. 140-150 (11).
- 2 Volkova, O.; Janke, D. Modelling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking. *ISIJ INTERNATIONAL*. Volume 43 Number 8, 1185-1190. 2003.
- 3 Jonsson, P.G.; Jonsson L.T.I. The Use of Fundamental Process Models in Studying Ladle Refining Operations. *ISIJ International*, Volume 41, Number 11, pp. 1289-1302. 2001.
- 4 Xia, J.L.; Ahokainen T. Transient flow and heat transfer in a steelmaking ladle during the holding period. *Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science*. Volume 32 Number 4, pp. 733-741. AUG 2001.
- 5 Austin, P.R.; Camplin, J.M.; Herbertson, J.; Taggart, I.J. Mathematical-Modeling of Thermal Stratification and Drainage of Steel Ladles. *ISIJ International*. Volume 32, Number 2, pp. 196-202. 1992.
- 6 Fredman, T.P. Heat transfer in steelmaking ladle refractories and steel temperature. A literature review. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. Volume 29, Number 6, pp. 232-258. 1 December 2000.
- 7 Baker R.; Irving W.R. Steelmaking Control Requirements for High Productivity Continuous Casting. *Ironmaking Steelmaking*. Volume 8, Number 5, pp. 216-224. 1981.
- 8 Nikiforov, A.S.; Prikhod'ko, E.V. Heat Engineering Thermal Stresses Generated in the Lining of a Steel Ladle. *Refractories and Industrial Ceramics* Vol. 46, No. 5, 2005
- 9 Akkurt, S.; Leigh, H.D. Corrosion of MgO-C ladle refractories. *American Ceramic Society Bulletin* 82 (5): 32-40B May 2003.
- 10 Segadães A.M. Refractários. Aveiro: Fundação João Jacinto de Magalhães, pp. 71. 1997.