

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM E AQUECIMENTO DE PANEAS DE AÇO

Luiz Flávio Mourão Arantes ¹

Ramon Guelber Martins ²

Vicente Aleixo Pinheiro Ribeiro ³

Alfeu Wiermann ⁴

Wanyr Romero Ferreira ⁵

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para quantificar o calor armazenado em panelas de aço de uma Aciaria LD com o objetivo de calcular o aporte de calor necessário nas etapas de secagem e aquecimento, empregando-se um aquecedor a gás natural. A situação atual do sistema de aquecimento é modelada matematicamente de forma a se obter os balanços de energia na combustão. Por meio da modelagem por elementos finitos em estado transiente é possível obter o perfil térmico da panela, quantificar as perdas inerentes ao processo e propor ajustes às curvas de secagem e aquecimento.

Palavras-chave: Aquecimento; Panela de aço; Modelo matemático; Refratários.

MATHEMATICAL MODEL OF STEEL LADLE DRYING AND HEATING PROCESS

Abstract

This paper presents a methodology to quantify the stored heat in a steel ladle in a Steelmaking Shop in order to calculate the heat input required by the drying and heating process by using a natural gas heater. The current situation is mathematically modeled in order to obtain the combustion energy balance. Through finite element modeling in transient state it is possible to obtain the thermal profile, measure process losses and propose adjustments to the drying and heating curves.

Key words: Heating; Steel ladle; Mathematical model; Refractories.

I INTRODUÇÃO

O conhecimento das perdas térmicas no processo de produção do aço é de fundamental importância ao equilíbrio do binômio custo - qualidade. As perdas térmicas no ciclo das panelas têm reflexo direto no tempo de aquecimento do banho e na energia elétrica despendida no forno panela. Tais perdas estão também relacionadas ao consumo de eletrodos, desgaste do refratário e à qualidade do aço.

A temperatura do aço líquido, que sai do distribuidor para o molde, deve ser controlada em faixas

estreitas. Essa faixa de temperatura tem influência direta sobre diversos aspectos do resfriamento e solidificação do aço. Diversos problemas de qualidade do tarugo, tais como romboidade, trincas, porosidades, segregações e macroinclusões podem ser ocasionados pelo descontrole da temperatura do banho ao chegar à máquina de lingotamento contínuo.

Vários trabalhos foram desenvolvidos com finalidade de se estudar o comportamento das panelas de uma aciaria. Entre os trabalhos pesquisados, destacam-se o modelo matemático⁽¹⁾ para o aquecimento de panelas dolomíticas de 140 t, desenvolvido para prever as tempe-

¹ Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia da Energia (ArcelorMittal Monlevade), Rua Vinte e Um, 262, Vila Tanque, Cep 35930-422, João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: luiz.arantes@arcelormittal.com.br

² Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica (ArcelorMittal Monlevade), Rua Santa Lucia, 77, Ap. 402, Aclimação, Cep 35930-117, João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: ramon.martins@arcelormittal.com.br

³ Gerente de Engenharia (ArcelorMittal Monlevade), Av. Aeroporto, 38, Vila Tanque, Cep 35930-438, João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: vicente.ribeiro@arcelormittal.com.br

⁴ Engenheiro Mecânico (Consultor ArcelorMittal Monlevade), Rua Aimorés, 615, Ap. 902, Funcionários, Cep 30140-070, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: alfeu.w@uol.com.br

⁵ Doutora em Energia (CEFET-MG), Rua Paula Cândido, 237, Ap. 202, Gutierrez, Cep 30430-260, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: wanyr@terra.com.br

raturas em diversas localizações da parede da panela para vários combustíveis, misturas, configurações de refratários e condições iniciais, o modelo criado para descrever a memória térmica da panela, onde os autores⁽²⁾ concluem que a história térmica afeta fortemente as perdas de temperatura durante todo o tempo de residência do aço na panela e um outro modelo para manter o controle das temperaturas durante o lingotamento contínuo.⁽³⁾

O foco deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para quantificar o calor armazenado nas painéis de aço em uma Aciaria, com o objetivo de calcular o aporte de calor necessário nas etapas de secagem e aquecimento, utilizando-se um aquecedor a gás natural e determinar seus impactos sobre o ciclo das painéis, por meio de um modelo de baixo custo e sem grandes intervenções no processo. Este modelo é capaz de fornecer os parâmetros necessários à otimização da curva de secagem e aquecimento.

1.1 Ciclo das Painéis de Aço da Aciaria Estudada

Após secagem e aquecimento, a panela com capacidade para 130 t, entra no ciclo, onde recebe o aço líquido. Ao fim do sopro no Convertedor LD, o aço é vazado na panela. A partir desse ponto, inicia-se o ciclo das painéis (Figura 1). O número de painéis no ciclo depende da velocidade de lingotamento. Antes do vazamento, a panela que irá receber o aço fica aguardando no aquecedor, localizado em frente ao Convertedor. O foco do trabalho reside, principalmente, no aquecimento e secagem de painéis novas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de combustão do aquecedor estudado é composto por uma válvula redutora de pressão, uma válvula proporcional, pilotada pela pressão do ar de combustão, e um queimador. A relação ar/gás natural é regulada pela válvula proporcional, sendo a vazão de ar controlada pelo sistema de controle de temperatura, que mede a temperatura através de um termopar localizado

na tampa da panela e atua na válvula borboleta na saída do ventilador. O controlador de temperatura funciona segundo curvas de aquecimento pré-programadas, que são selecionadas pelo operador no momento em que a panela é posicionada no aquecedor.

O estudo em questão analisa a secagem e aquecimento de uma panela nova de acordo com a sua curva teórica, conforme apresentado na Figura 2.

Em inspeções realizadas no processo de aquecimento, constatou-se que o aquecedor não estava respondendo à curva de secagem e aquecimento programada (Figura 2), e eram observados atrasos nesse processo, o que, em alguns casos, resultavam na inserção de uma panela “fria” no ciclo. Após verificação das condições do termopar e do controlador de temperatura, conduziram-se análises da combustão para mensurar o excesso de ar, através de um analisador de gás de Orsat. Tais análises apontaram para um excesso de O_2 na combustão.

2.1 O Modelo de Elementos Finitos

Na modelagem e simulação, foram utilizados os pacotes SolidWorks e COSMOSWorks. Desenvolveu-se um modelo em elementos finitos da panela e simularam-se as diversas condições de secagem, aquecimento e trocas térmicas durante o processo de aciaria. O modelo desenvolvido é baseado nas seguintes condições:

- regime transiente;
- simetria axial – possibilidade de simulação com um setor vertical de 10° ;
- temperatura do meio externo e coeficiente de convecção constantes;
- temperatura inicial da panela homogênea;
- resistências térmicas de contato entre as camadas desprezadas;
- uma condição inicial e três condições de contorno;
- malha de elementos tetraédricos parabólicos.

No modelo de elementos finitos foram inseridos termopares virtuais para várias alturas e profundidades da parede e fundo da panela, o que possibilitou a plotagem

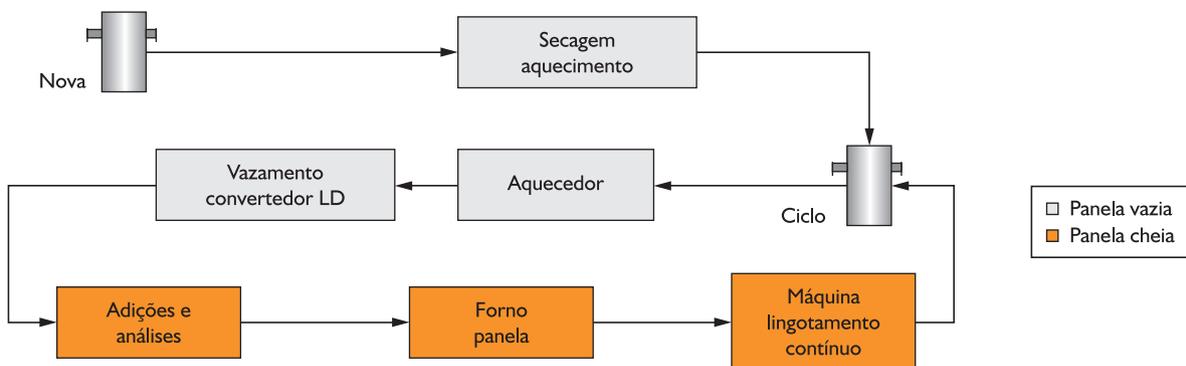


Figura 1. Ciclo resumido das painéis de aço.

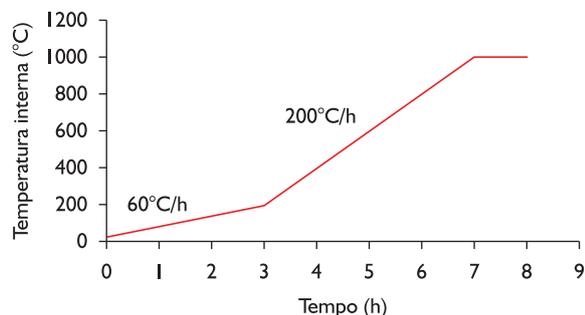


Figura 2. Curva do controlador de temperatura para secagem e aquecimento de painéis novos.

das temperaturas dos nós relativos a esses termopares nos diferentes revestimentos refratários para cada simulação realizada, conforme apresentado na Figura 3 (a).

A malha foi cuidadosamente dimensionada para cada camada do revestimento refratário, de forma a se obter no mínimo cinco pontos por camada conforme mostrado na Figura 3 (b). As propriedades termofísicas de cada revestimento (Figura 3 c), foram consideradas no modelo.

2.2 Calibração do Modelo

As análises da composição do gás natural, dos gases de exaustão e as medições de temperatura dos fumos foram utilizadas para o cálculo das entalpias dos produtos e reagentes da combustão. A partir das entalpias, calculou-se o fluxo de calor que entra através das paredes refratárias, que foi utilizado como uma condição de contorno na simulação feita no software COSMOSWorks (Figura 4).

Um medidor mássico foi instalado para medir a vazão do gás natural e foi necessária a análise de Orsat para determinar a composição dos produtos da combustão, bem como o excesso de oxigênio na combustão.

Para o levantamento da condição de contorno, durante o aquecimento e secagem da panela, foi feita uma análise considerando a primeira lei da termodinâmica para sistemas reagentes. Na obtenção da energia que entra no volume de controle (refratário+carcaça) após a combustão adotou-se o regime permanente em cada intervalo, para simplificação, tendo em vista que as análises dos gases, tomadas de vazões e temperaturas são discretas.

Desta forma, o balanço de energia do processo de combustão com escoamento em regime permanente torna-se:⁽⁴⁾

$$\dot{Q}_s = \sum \dot{n}_r (\bar{h}_r + \bar{h} - \bar{h}^\circ) - \sum \dot{n}_p (\bar{h}_p + \bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (1)$$

onde:

- \dot{Q}_s : taxa de saída de calor do processo de combustão;
- \bar{h}_r : entalpia de formação no estado de referência padrão;⁽⁵⁾
- \bar{h} : entalpia sensível no estado especificado;⁽⁵⁾
- \bar{h}° : entalpia sensível no estado de referência padrão a 25°C e 1 atm;⁽⁵⁾
- \dot{n}_r , \dot{n}_p : taxas de fluxo molar dos reagentes r e produtos p , respectivamente.

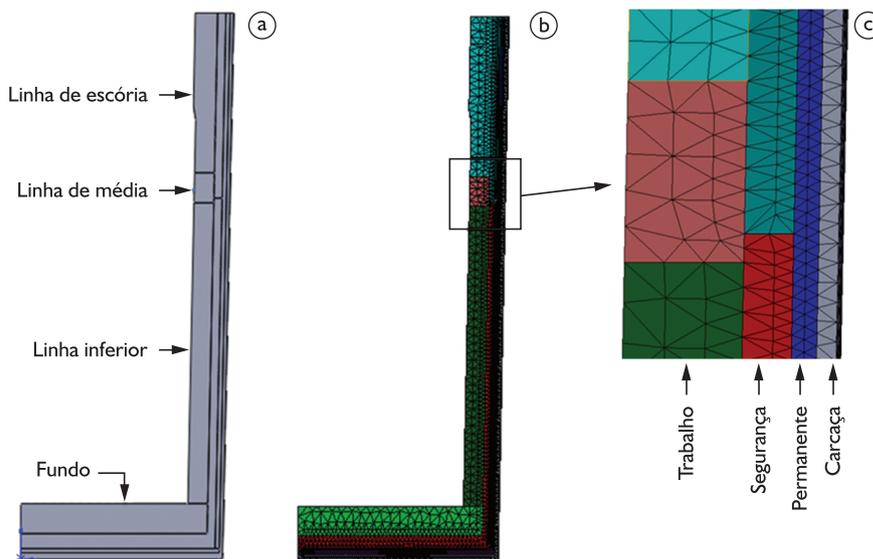


Figura 3. Perfil do setor vertical da panela: a) localização dos termopares para o levantamento das temperaturas no interior dos revestimentos refratários; b) modelo e malha de elementos finitos; e c) detalhe da construção da malha com os diversos revestimentos refratários.

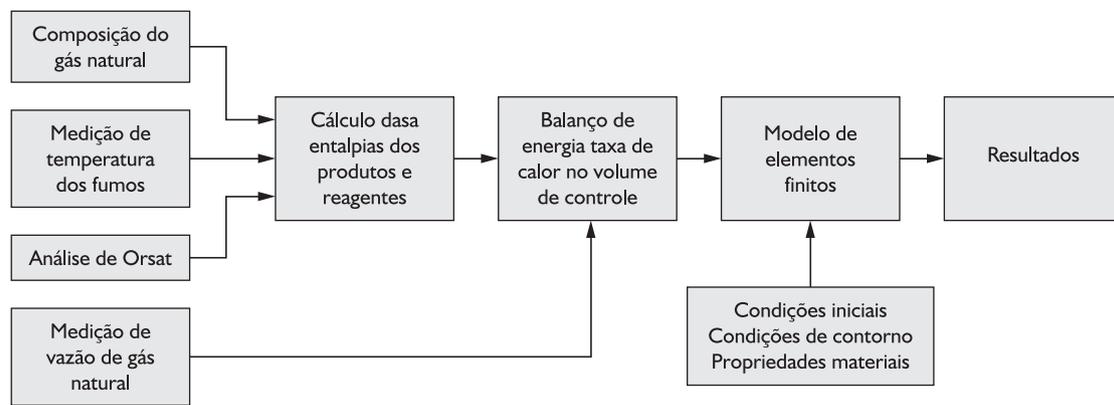


Figura 4. Metodologia utilizada na modelagem do processo de secagem e aquecimento da panela.

2.3 Energia Armazenada no Refratário

O cálculo da energia armazenada nos refratários foi feito com base nas temperaturas médias dos nós de cada tipo de refratário do revestimento da panela bem como da carcaça metálica. A Equação (2) foi aplicada para cada simulação:

$$Q = \sum_{r=1}^9 m_r C_{p_r} \Delta T \quad (2)$$

Onde:

- Q: calor contido nas camadas refratárias [J]
- m_r : massa de cada tipo de refratário e da carcaça metálica da panela [kg]
- C_{p_r} : calor específico de cada camada do revestimento refratário e carcaça metálica da panela [J/(kg.K)]
- ΔT : Diferença de temperatura no período considerado [°C]

O resultado da equação acima dá uma idéia do encharque da panela. A partir dessas informações foram determinadas as condições de contorno e tempos para cada etapa do aquecimento.

3 RESULTADOS

Foram realizadas diversas simulações, aplicando-se o modelo em questão, e os resultados mostraram a situação atual dos aquecedores. Baseado nos resultados das simulações foram propostas novas configurações.

3.1 Ensaio na Condição Atual do Aquecedor

As análises dos gases de exaustão apontaram para um excesso de 115% de oxigênio na combustão, o que resultava em um resfriamento da chama. Desta forma, grande parte da energia deixava a panela com os gases

de exaustão (fumos). A Figura 5 mostra o perfil térmico e a Figura 6 define o perfil de temperatura da parede da panela nas diversas posições dos termopares virtuais do modelo para diferentes tempos de aquecimento.

Nesse ensaio, o aquecedor apresentou uma vazão média de gás natural de 76 Nm³/h.

Para a calibração deste modelo foram realizadas termografias na face quente do revestimento refratário (Figura 7), e na carcaça metálica da panela (Figura 8), após 660 minutos de aquecimento. Os resultados médios dos histogramas das áreas termografadas (Figura 7b e Figura 8b) podem ser comparados com aqueles do modelo proposto.

De acordo com os resultados obtidos (Tabela 1), percebe-se que a resposta do modelo condiz com a realidade. A partir dessa validação utilizou-se o modelo para as simulações, ajustes e otimização da curva de secagem e aquecimento.

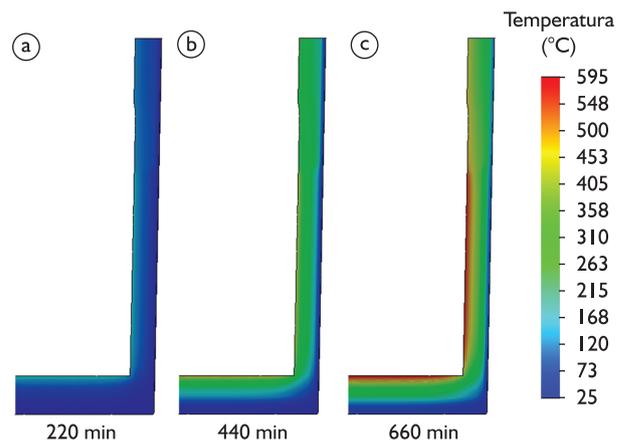


Figura 5. Perfil térmico da panela após 220, 440 e 660 minutos de aquecimento para a condição de 115% de excesso de O₂.

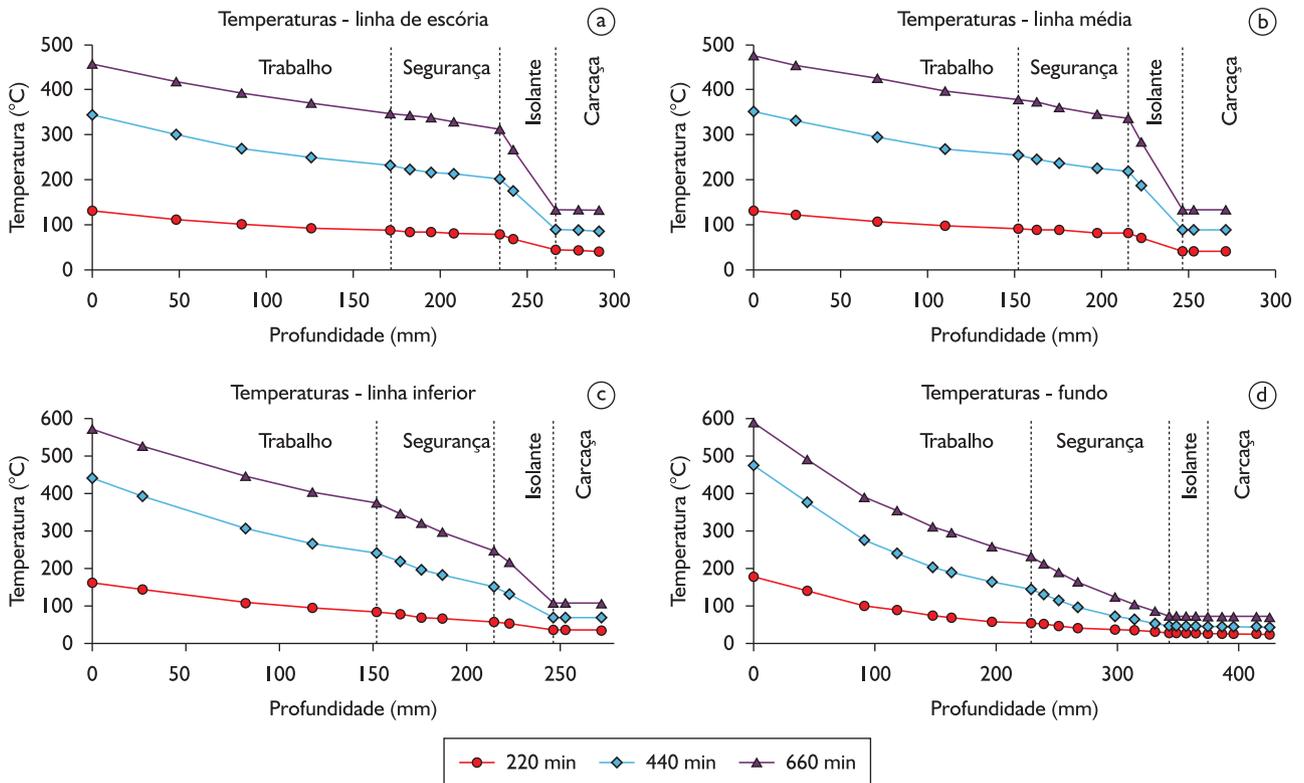


Figura 6. Temperatura dos revestimentos nas linhas dos termopares para diferentes tempos de aquecimento com 115% de excesso de O₂ e vazão atual de gás natural.

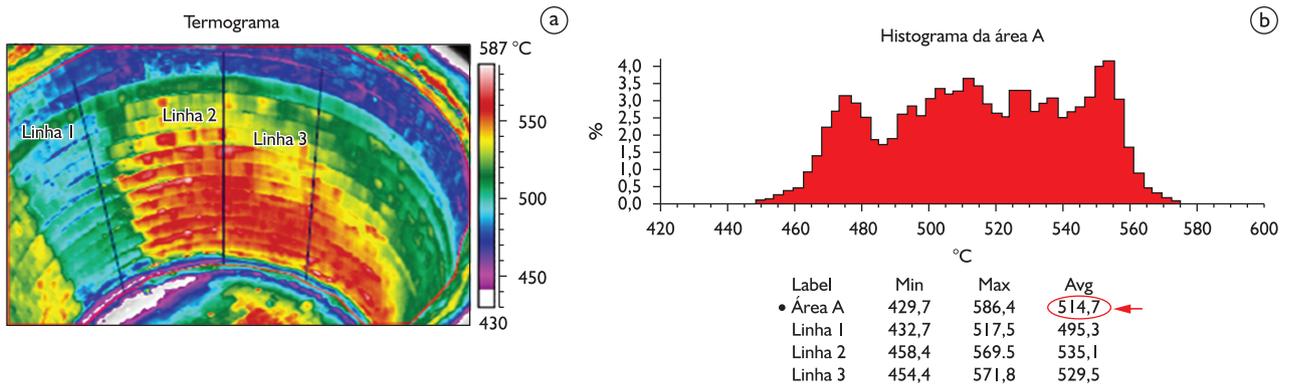


Figura 7. Termografia da face quente do revestimento refratário da panela após 660 min de aquecimento.

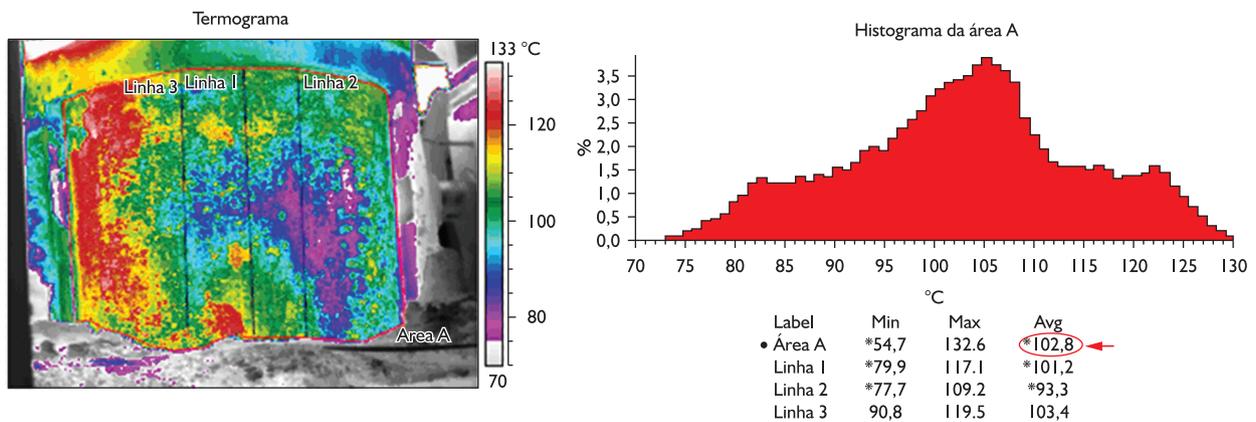


Figura 8. Termografia da carcaça metálica da panela após 660 min de aquecimento.

Tabela 1. Temperaturas médias após 660 min de aquecimento utilizadas para calibração do modelo

ÁREA	Modelo (°C)	Termografias (°C)
Parede externa (carcaça metálica)	112	103
Parede interna (refratário)	520	515

3.2 Ensaio com 15% de Excesso de Oxigênio

A partir do modelo calibrado, realizou-se uma simulação onde o excesso de O₂ foi ajustado para 15%, com o objetivo de aumentar a temperatura média final do revestimento refratário e diminuir a perda pelos gases de exaustão (fumos) (Tabela 2).

A simulação com a redução do excesso de oxigênio para 15%, mantendo-se as vazões de gás natural utilizadas nas etapas de secagem e aquecimento, resultou em temperaturas médias que não atenderam à curva teórica de secagem e aquecimento para painéis novos (Figura 2). Dessa forma, foi necessário ajustar as vazões de gás natural com a finalidade de atingir a curva programada.

Tabela 2. Temperaturas médias após 660 min de aquecimento na simulação com 15% de excesso de O₂

ÁREA	Modelo (°C)
Parede externa (carcaça metálica)	130
Parede interna (refratário)	643

3.3 Ensaio com Ajuste da Vazão de Gás Natural

Conforme representado na Figura 2, é necessário que a panela saia da temperatura ambiente para 200°C em 3 horas – secagem, e atinja 1.000°C na face quente do revestimento em 7 horas - aquecimento.

Neste caso, foi feita uma análise reversa e calculada a energia necessária para que a panela atingisse as temperaturas nos tempos propostos, pelo modelo de elementos finitos. As vazões de gás natural para as etapas de secagem e aquecimento foram recalculadas por meio de processo iterativo. O perfil de temperaturas simulado está representado na Figura 9.

A resposta do modelo aponta para uma vazão média de 50 Nm³/h, na etapa de secagem, e de 164 Nm³/h na etapa de aquecimento, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Utilização do modelo para ajuste do sistema à curva de secagem e aquecimento

Etapa	Patamar	Tempo (h)	Taxa necessária (kW)	Vazão média (Nm ³ /h)	Temperatura atingida pelo modelo (°C)
Secagem	De 25°C a 200°C	3	443	50	220
Aquecimento	De 200°C a 1.000°C	4	1328	164	1003

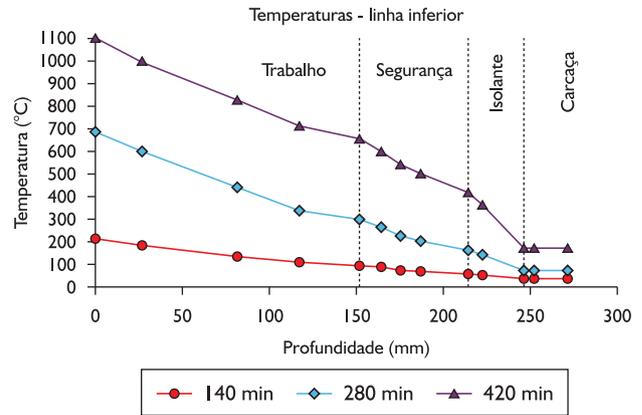


Figura 9. Temperatura interna dos refratários na linha inferior dos termopares virtuais para diferentes tempos de aquecimento com 15% de excesso de O₂ e vazão de gás natural ajustada.

3.4 Resfriamento da Panela

Quando a panela está exposta às condições ambientes, vazia e sem tampa, a perda de calor através do revestimento refratário, devido à radiação, são significativas. A simulação da perda de calor, após o aquecimento a 1.000°C (Figura 10), mostra o efeito do tempo de espera de uma panela vazia sobre a queda de temperatura do revestimento.

Depreende-se que a queda de temperatura é mais pronunciada nos primeiros instantes. Esse fato deve-se ao efeito da radiação que é maximizado, tendo em vista que o calor transferido é proporcional à diferença das temperaturas elevadas à quarta potência, conforme representado pela Equação 3.

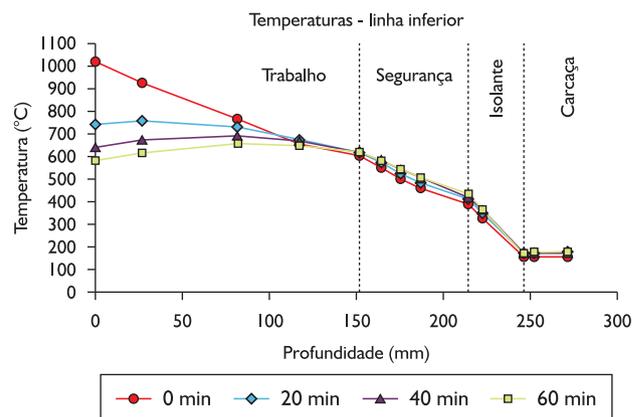


Figura 10. Efeito do tempo de espera sobre a queda de temperatura do revestimento da panela vazia após aquecimento a 1.000°C.

Tabela 4. Comparação das curvas de aquecimento original (21 horas) e ajustada pelo modelo (7 horas)

Condição	Volume consumido de gás natural (m ³)	Temperatura média na parede interna (°C)	Duração do aquecimento (h)
Situação atual	1.602	857	21
Curva ajustada	802	1003	7

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

Daí a importância de se adotarem práticas que visem diminuir os tempos de espera nestas condições.

3.5 Energia Armazenada

Foi realizado um experimento industrial de secagem e aquecimento de uma panela nova com o objetivo de verificar o atendimento do aquecedor à sua curva teórica.

Apesar da curva teórica indicar que a panela deveria estar a uma temperatura de 1.000°C, após 7 horas, constatou-se, por meio de termografias, que em 21 horas de aquecimento a panela atingiu apenas 857°C, mostrando a deficiência do processo comparado à curva teórica da Figura 2. A Tabela 4 compara o experimento realizado com o ajuste proposto pelo modelo, bem como os consumos de gás natural em cada um deles.

O modelo aponta para uma economia de 799 m³ de gás natural por ciclo de aquecimento de panela nova, além de uma redução de três vezes no tempo de aquecimento, favorecendo a flexibilidade e a otimização do processo da Aciaria. A quantidade de energia acumulada no revestimento refratário, considerando-se a curva ajustada, é superior à condição atual – curva original (Figura 11).

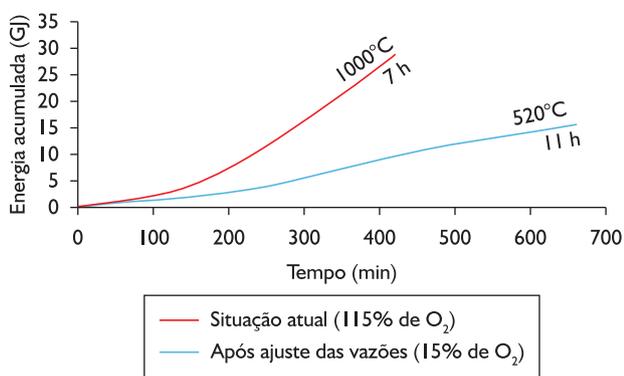


Figura 11. Comparação entre a energia acumulada no volume de controle em ensaio realizado na condição atual e simulação com a curva de aquecimento com vazões de ar e gás ajustadas.

4 DISCUSSÃO

Pelos resultados do experimento industrial e das simulações numéricas realizadas, verifica-se uma redução do consumo de gás natural e do tempo de aquecimento em relação à situação corrente da Aciaria. Outros ganhos indiretos são redução do consumo de eletrodos e de energia elétrica no forno panela, redução do consumo de refratários e ganho de produtividade e qualidade.

Para operacionalização da curva de aquecimento ajustada pelo modelo, há necessidade de instalação de medidores de vazão de gás natural e de ar de combustão visando controlar a mistura ar / gás natural.

A opção do ajuste da curva de aquecimento, pela redução do excesso de ar de combustão e do aumento da vazão de gás natural, deve-se à facilidade de adequação do sistema atualmente instalado na Aciaria em questão. Outros autores⁽⁶⁾ utilizam metodologia semelhante para ajuste da curva de aquecimento.

O parâmetro índice de encharque, definido como a energia armazenada nos refratários,⁽⁷⁾ pode ser utilizado como uma variável de entrada no modelo de sopro do Convertedor LD, de forma a garantir o correto excesso de temperatura no aço líquido antes do vazamento na panela, visando a compensar as perdas nas etapas subsequentes do ciclo.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho fornece à ArcelorMittal Monlevade o ajuste necessário ao processo de secagem e aquecimento de panelas novas por meio de um modelo de baixo custo e fácil implementação, que aponta para uma considerável redução do consumo de gás natural. O ajuste na curva de aquecimento de outros aquecedores deve ser precedida de nova análise e cálculos, seguindo a metodologia desenvolvida.

O modelo de ajuste proposto deve ser implementado adaptando-se às restrições do processo, por exemplo, faixa de atuação do controlador de vazão e posicionamento do termopar bem como prever inclusão de medidores de vazão de ar de combustão e gás natural.

REFERÊNCIAS

- 1 SAHA, J. K.; AJMANI, S. K.; CHATTERJEE, A. A mathematical model for determining preheating schedule of dolomite ladles in melt shops. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 18, n. 6, p. 417-22, July 1991.
- 2 HLINKA, J. W.; CRAMB, A. W.; BRIGHT, D. H. *Model for predicting the thermal history of a ladle of steel*. Detroit: Iron & Steel Society of AIME, 1985.
- 3 CHRIST, F. D. S. *Melhorias no aquecimento de panelas em uma aciaria elétrica*. 2000. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2000.
- 4 FERREIRA, N. F. *Controle da temperatura do aço líquido em uma aciaria elétrica*. 2000. 127 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- 5 OMOTANI, M. A.; HEASLIP, L. J.; MCLEAN, A. Ladle temperature control during continuous casting. *Iron Steelmaker*, v. 10, n. 10, p. p. 29-35, Oct. 1983.
- 6 ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Thermodynamics: an engineering approach*. 5.ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- 7 McBRIDE, B. J.; GORDON, S.; RENO, M. A. *Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species*. Cleveland: Lewis Research Center, 1993. (NASA Technical Memorandum, 4513).

Recebido em: 27/08/2010

Aceito em: 11/05/2011