

ANÁLISE DO CICLO DE PANEAS DE ACIARIA UTILIZANDO GÁS NATURAL NO AQUECIMENTO E SECAGEM¹

ESTUDO E MODELAGEM DO AQUECIMENTO DAS PANEAS DE AÇO EM UMA ACIARIA LD E DETERMINAÇÃO DO ESTADO TÉRMICO VISANDO À OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Luiz Flávio Mourão Arantes²
Ramon Guelber Martins³
Vicente Aleixo Pinheiro Ribeiro⁴
Alfeu Wiermann⁵
Wanyr Romero Ferreira⁶

Resumo

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

Palavras-chave: Aquecimento; Panela de aço; Modelo térmico; Refratário.

LADLE CYCLE ANALYSIS IN A STEEL SHOP USING NATURAL GAS IN PREHEATING

STUDY AND PREHEATING MODELING OF THE STEEL LADLES IN A LD STEEL SHOP AND DETERMINING THE THERMAL STATE IN ORDER TO OPTIMIZE THE PROCESS

Abstract

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

Key words: Heating; Steel ladle; Thermal model; Refractory.

¹ Contribuição técnica ao 31º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 25º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 17 a 20 de agosto de 2010, Foz do Iguaçu, PR

² Engenheiro Eletricista, Mestrando em Engenharia da Energia (ArcelorMittal Monlevade).

³ Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica (ArcelorMittal Monlevade).

⁴ Gerente de Engenharia (ArcelorMittal Monlevade).

⁵ Engenheiro Mecânico (Consultor ArcelorMittal Monlevade).

⁶ Doutora em Energia (CEFET-MG).

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das perdas térmicas no processo de produção do aço é de fundamental importância no equilíbrio do binômio custo qualidade.

As perdas térmicas no ciclo das painelas têm reflexo direto no tempo de aquecimento do banho e na energia elétrica despendida no forno-painela. Tais perdas estão também relacionadas ao consumo de eletrodos, desgaste do refratário e à qualidade do aço.

Fatores como rendimento metálico, consumo de energia, vida útil de refratários e eletrodos estão diretamente relacionados ao controle de temperatura no processo da aciaria. Outro fator importante é o atraso na produção ocasionado por problemas decorrentes do descontrole dessas temperaturas.

A temperatura do aço líquido que sai do distribuidor para o molde, deve ser controlada por limites bastante estreitos. Essa faixa de temperatura tem influência direta em diversos aspectos do resfriamento e solidificação do aço. Diversos problemas de qualidade do tarugo, tais como romboidade, trincas, porosidades, segregações e macro-inclusões podem ser ocasionados pelo descontrole da temperatura do banho ao chegar à máquina de lingotamento contínuo.

O foco deste trabalho está no aquecimento e secagem das painelas da aciaria com o objetivo de quantificar o estado térmico, e o aporte de calor necessário, durante o aquecimento das mesmas em um aquecedor a gás natural e determinar seus impactos no ciclo destas painelas através de um modelo de baixo custo sem grandes intervenções no processo. Este modelo será capaz de fornecer parâmetros necessários para a otimização da atual curva de aquecimento.

1.1 Ciclo das Painelas de Aço da Aciaria Estudada

Após a secagem e aquecimento a painela com capacidade para 130 t, entra no ciclo, onde irá receber o aço líquido. Ao fim do sopro no conversor LD o aço é vazado na painela. A partir deste ponto começa o que denominaremos de ciclo das painelas, Figura 1. O número de painelas que se encontram no ciclo depende da velocidade de lingotamento. Antes do vazamento a painela que irá receber o aço fica esperando no aquecedor localizado em frente ao Conversor. O foco do trabalho está, principalmente, no aquecimento e secagem de painelas novas.

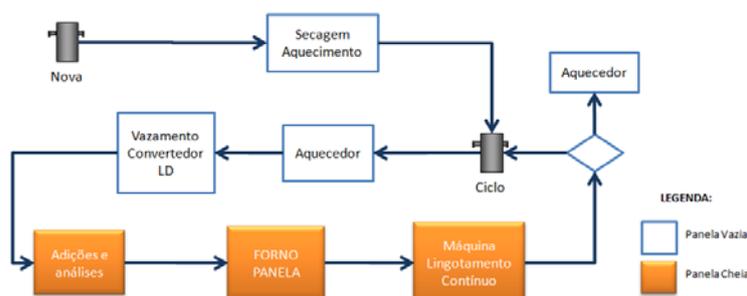


Figura 1. Ciclo resumido das painelas de aço.

1.2 Memória Térmica

O estado térmico dos refratários de uma painela que está recebendo o aço do conversor depende fortemente do calor que ela recebeu ou perdeu nas corridas

anteriores. A este estado, no presente trabalho, daremos o nome de memória térmica ou história térmica da panela.

As principais perdas térmicas sofridas pelo aço contido na panela são: a perda por condução para as camadas refratárias e a perda por radiação e convecção através da escória, paredes e fundo para o ambiente.

Um modelo matemático para o aquecimento de panelas dolomíticas de 140 t foi desenvolvido por Saha, Ajmani e Chatterjee⁽¹⁾ para prever as temperaturas em diversas localizações da parede da panela para vários combustíveis, misturas, configurações de refratários e condições iniciais. Outro modelo foi criado por Hlinka, Cramb e Bright⁽²⁾ para descrever a memória térmica da panela; os autores concluíram que a história térmica afeta fortemente as perdas de temperatura durante todo o tempo de residência do aço na panela.

As diferentes condições térmicas encontradas nas panelas para vazamento devem ser compensadas via pré-aquecimento ou ajuste na temperatura de vazamento, mas acima de tudo a melhor prática é aquela que mantém o encharque da panela.⁽³⁾

1.3 Encharque

Um termo comumente utilizado no processo de aciaria é o chamado “encharque da panela”, ou “índice de encharque”. Este termo refere-se à energia armazenada nos refratários da panela. Diversos autores utilizaram este termo nas suas pesquisas, medições e modelagens, mas é importante salientar que não há um consenso para quantificar o encharque, sendo que cada autor utiliza um meio para tal e os resultados são os mais variados possíveis. Por exemplo, alguns autores utilizam os tempos em que a panela fica sem aço para indicar o índice de encharque, mas, segundo Ferreira⁽⁴⁾ esse método incorre em um erro quando desconsidera o tempo de aquecimento das panelas durante o tempo sem aço. Para provar sua teoria comparou duas situações de panela vazia, uma com e outra sem aquecimento, conforme Figura 2, demonstrando a diferença nas perdas térmicas nos dois casos.

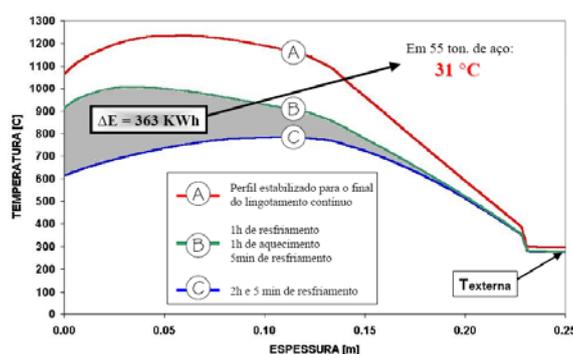


Figura 2. Diferentes perfis térmicos nos refratários para um tempo sem aço, com e sem aquecimento.⁽⁴⁾

Outra conclusão retirada das simulações da Figura 2 é que a temperatura externa da panela tem baixa sensibilidade, sendo praticamente a mesma para a panela com e sem aquecimento, o que inviabiliza a utilização desse parâmetro como índice de encharque.

1.4 Secagem e Aquecimento de uma Panela Nova

Para se ter uma idéia da influência do aquecimento de panelas novas na perda térmica sofrida pelo aço líquido quando o mesmo é vazado na panela foi feito um levantamento estatístico com base nos dados de controle do processo em 2.713 amostras de corridas de aços de baixo teor de carbono comparando a perda térmica média de todas as corridas com as corridas vazadas em panelas novas. O resultado mostra que a diferença da perda em panelas novas é de 9°C a mais do que na média de todas as corridas. Levando em consideração o curto intervalo entre o vazamento e a amostragem desta temperatura esta perda se mostra bastante significativa.

Uma simulação das perdas térmicas em relação ao tempo de residência do aço líquido na panela para várias temperaturas de aquecimento foi feita por Omotani, Heaslip, e McLean.⁽⁵⁾ O resultado está ilustrado na Figura 3. Devemos atentar para o efeito da temperatura do aquecimento sobre comportamento da temperatura do aço na corrida, onde o aquecimento do refratário em temperaturas mais altas resulta em redução da queda de temperatura do banho.

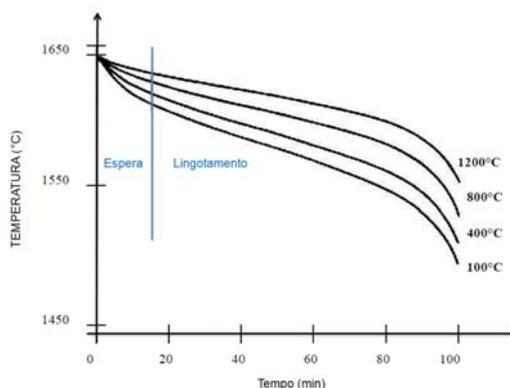


Figura 3. Efeito da temperatura de aquecimento dos refratários sobre a temperatura do aço líquido durante o ciclo.⁽⁵⁾

1.5 Eficiência dos Aquecedores

A temperatura de chama tem influência na quantidade de energia armazenada nos refratários. Desta forma, a qualidade do aquecimento passa pela eficiência dos queimadores dos aquecedores, combustível utilizado, vazão de combustível, mistura ar-combustível, distância do escudo à borda da panela (gap), dentre outros fatores.

Christ⁽³⁾ realizou ensaios para obtenção e avaliação das curvas de secagem, ensaios de homogeneidade de aquecimento e ensaios de descarbonetação na secagem dos refratários e propôs medidas para a otimização da utilização dos aquecedores. Dentre os resultados obtidos, a Figura 4 (a) apresenta a curva de secagem de um dos aquecedores e conclui que a temperatura de secagem está muito acima da temperatura objetivada, sendo necessários ajustes neste aquecedor. A partir desses resultados, com a injeção de 20% de ar auxiliar, pôde-se ajustar a temperatura média de secagem à temperatura objetivada, conforme Figura 4 (b).

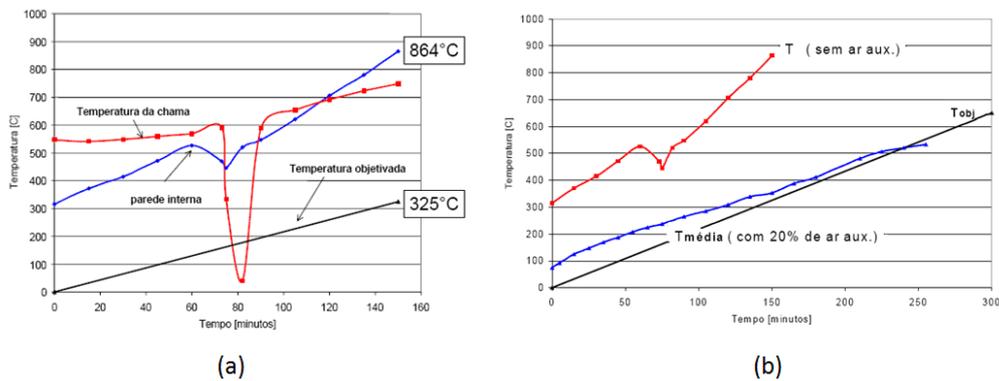


Figura 4. (a) Temperaturas da parede interna e de chama durante o teste de secagem para a condição de chama sem ar auxiliar em um aquecedor vertical. (b) Comparativo das curvas de temperatura média da parede para os dois ensaios em relação à curva padrão.⁽³⁾

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/combustível 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 e são selecionadas pelo operador no momento em que a panela é posicionada abaixo do aquecedor.

O estudo em questão analisou a secagem e aquecimento de uma panela nova de acordo com a sua curva teórica de aquecimento, conforme Figura 5:

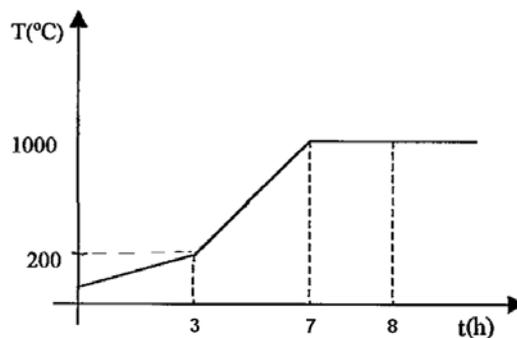


Figura 5. Curva do controlador de temperatura para secagem e aquecimento de panelas novas.

Em inspeções feitas no processo de aquecimento foi constatado que o aquecedor não estava respondendo à curva de secagem e aquecimento da Figura 5 e atrasos eram observados neste processo, o que, em alguns casos, resultava na inserção de uma panela “fria” no ciclo. A partir desta observação, algumas suspeitas foram levantadas, tais como: Erro na medição do termopar, funcionamento incorreto do controlador de temperatura, funcionamento incorreto da válvula proporcional acarretando uma mistura incorreta de ar/combustível.

Após verificação das condições do termopar e do controlador de temperatura, foram conduzidas análises da combustão para mensurar o excesso de ar através da determinação da massa molecular da base seca em efluentes gasosos, utilizando um analisador de gás de Orsat. Tais análises apontaram para um excesso de O₂ na combustão.

2.1 O Modelo de Elementos Finitos

Foram utilizados na modelagem e simulação os pacotes SolidWorks e CosmosWorks. Nestes foi criado um modelo em elementos finitos da panela e simuladas as diversas condições de aquecimento e trocas térmicas durante o processo de aciaria.

Considerações gerais:

- regime transiente;
- simetria axial – possibilidade de simulação com uma fatia 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; e
- malha de elementos tetraédricos parabólicos.

Como a altura da panela é grande em relação à sua espessura, controles de malha foram necessários para adaptar a malha às camadas mais finas de forma a atender um dos objetivos da simulação que é o conhecimento da distribuição de temperatura ao longo da parede. Desta forma a malha foi cuidadosamente dimensionada para cada espessura de refratário para que tivéssemos no mínimo 5 pontos por camada como mostrado na Figura 6 (a).

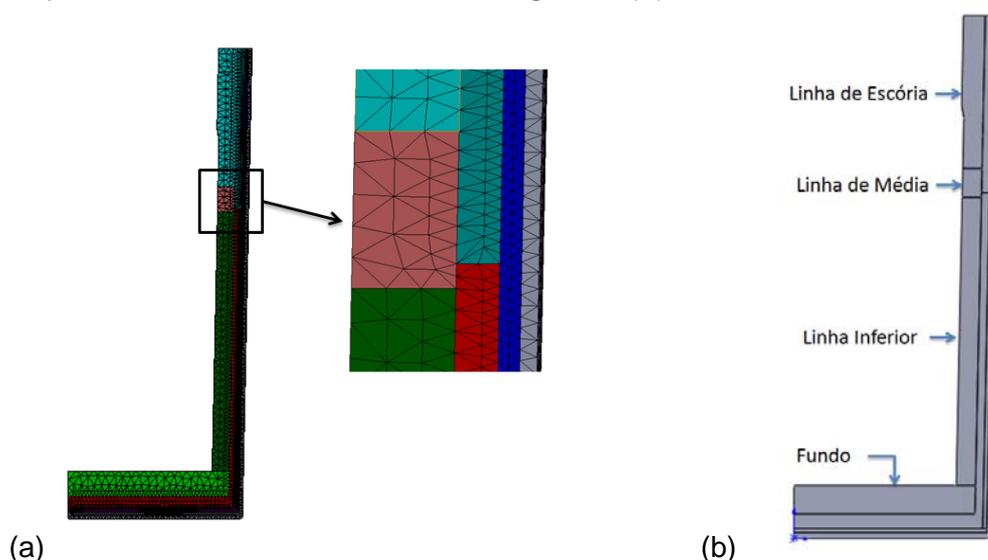


Figura 6. Perfil da fatia da panela (a) Detalhe da construção do modelo e malha (b) Localização dos sensores para o levantamento das temperaturas no interior das camadas refratárias.

No modelo de elementos finitos foram inseridos sensores virtuais em várias alturas e profundidades da parede e fundo da panela o que possibilitou a plotagem das temperaturas dos nós relativos a esses sensores nestas camadas refratárias em cada simulação realizada, conforme Figura 6 (b).

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 e a partir delas a condição de contorno, fluxo de calor que entra através das paredes refratárias, a ser utilizada na simulação do COSMOS foi obtida, Figura 7.

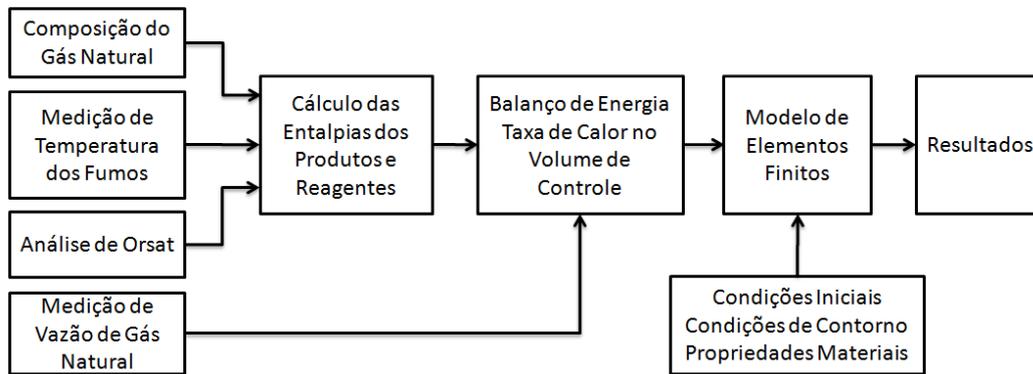


Figura 7. Metodologia utilizada na modelagem do processo de aquecimento e secagem da panela.

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

Para o levantamento desta condição de contorno foi feita uma análise de primeira lei da termodinâmica para sistemas reagentes e para obtenção da energia que entra no refratário após a combustão foi adotado 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:⁽⁶⁾

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

Onde:

- \dot{Q}_s : Taxa de saída de calor do processo de combustão;
- \bar{h}_f^o : Entalpia de formação no estado de referência padrão;⁽⁷⁾
- \bar{h} : Entalpia sensível no estado especificado;⁽⁷⁾
- \bar{h}^o : Entalpia sensível no estado de referência padrão a 25°C e 1atm;⁽⁷⁾ e
- \dot{n}_r , \dot{n}_p : Taxas de fluxo molar dos reagentes r e produtos p , respectivamente.

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 contido na panela, bem como do costado e a Equação (2) foi aplicada para cada simulação:

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

Onde:

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

O resultado da equação acima nos dá uma idéia do encharque da panela.

Com tais informações foram determinadas as condições de contorno e tempos em cada etapa do aquecimento.

3 RESULTADOS

Diversos ensaios aplicando o modelo foram realizados e resultados mostraram a situação atual dos aquecedores e a partir delas 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 estava resultando em um resfriamento da chama. Desta forma, grande parte da energia deixa a panela com os gases. A Figura 8 mostra o perfil térmico e a Figura 9, define o perfil de temperatura da parede da panela nas diversas linhas dos sensores virtuais do modelo.

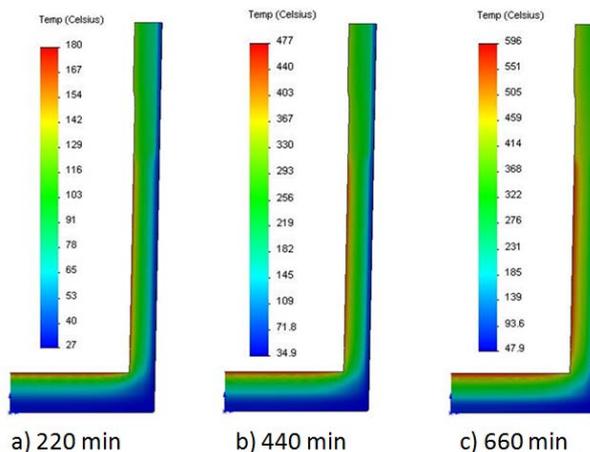


Figura 8. Perfil térmico da panela em 220, 440 e 660 minutos de aquecimento para a condição de 115% de excesso de O₂.

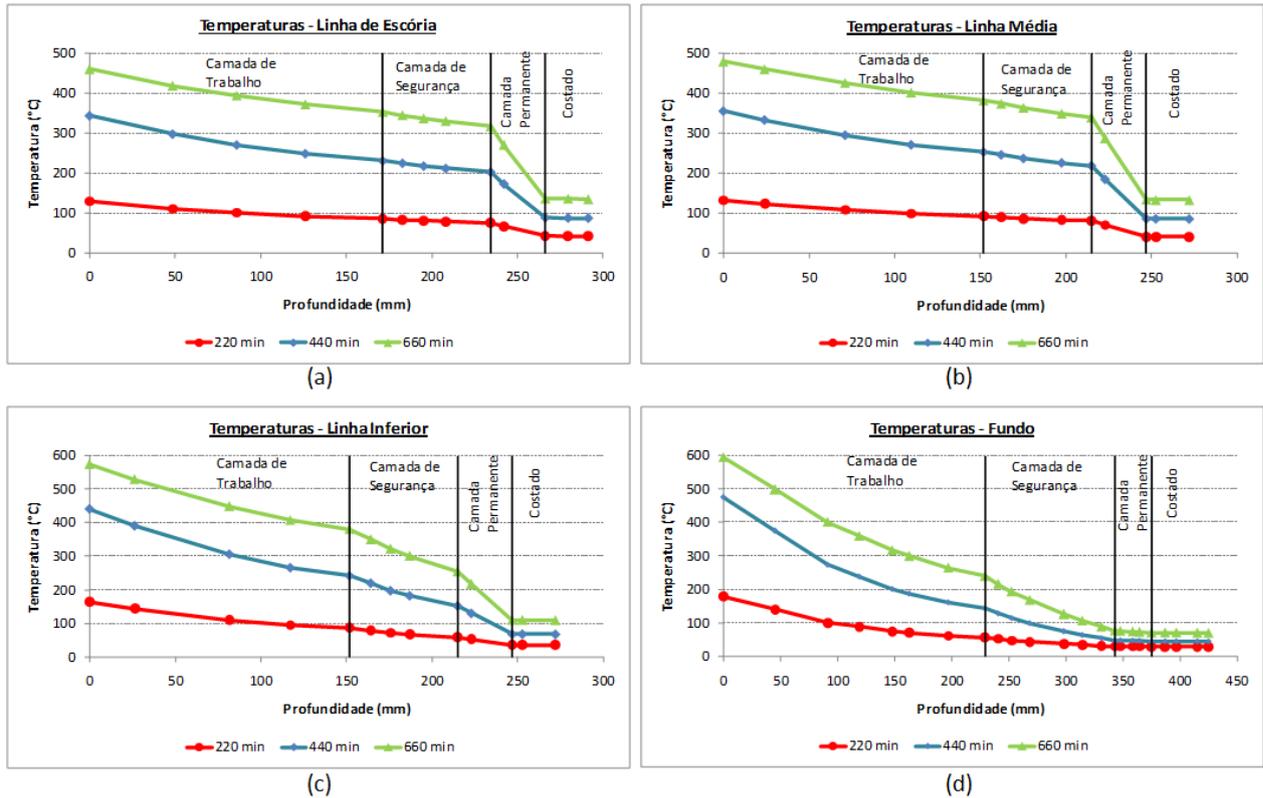


Figura 9. Temperatura interna dos refratários nas linhas dos sensores em três instantes da simulação do aquecimento com 115% de excesso de O₂ e vazão atual de gás natural.

Para a calibração deste modelo foram realizadas termografias nas paredes interna, Figura 10, e externa, Figura 11, da panela em alguns estágios do aquecimento e os resultados médios dos histogramas das áreas termografadas, Figura 10 (b) e Figura 11 (b) foram comparados com o modelo proposto.

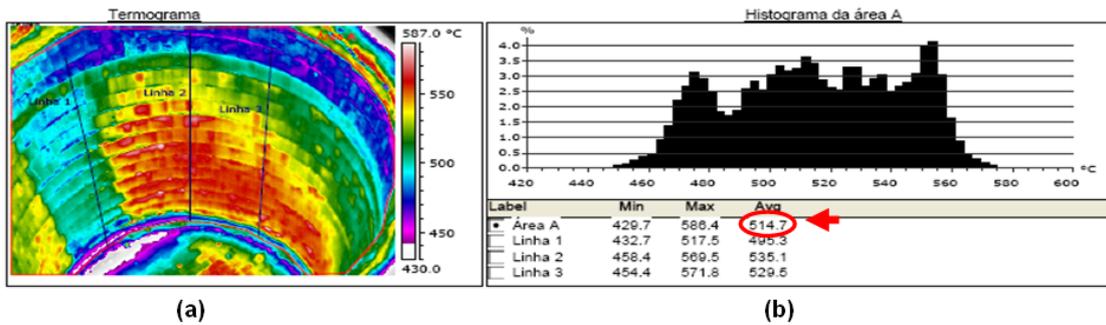


Figura 10. Relatório termográfico da parede interna da panela após 660 min de aquecimento.

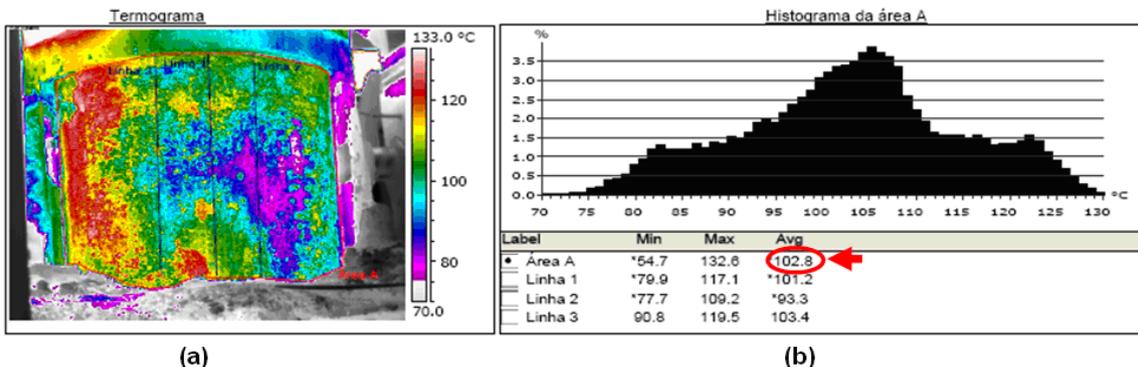


Figura 11. Relatório termográfico da parede externa da panela após 660 min de aquecimento.

De acordo com os resultados obtidos, Tabela 1, podemos perceber que a resposta do modelo condiz com a realidade, sendo, a partir deste ponto utilizado para as simulações e ajustes e otimização da curva de aquecimento.

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

ÁREA	Termografias (°C)	Modelo (°C)	Termopar (°C)
Parede Externa	103	112	538
Parede interna	515	520	

3.2 Ensaio com 15% de Excesso de Oxigênio

A partir do modelo calibrado, com base em referências foi conduzida uma simulação onde ajustou-se o excesso de O₂ para 15% com o objetivo de aumentar a temperatura média final do volume refratário e diminuir a perda pela fumaça.

A simulação com a redução do excesso de oxigênio para 15%, mantendo-se as vazões de gás natural conforme medição anterior não atendeu à curva teórica de secagem e aquecimento de painéis novos, Figura 5. Desta forma foi necessário ajustar as vazões de gás natural com a finalidade de atingir a curva objetivo.

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

ÁREA	Modelo (°C)
Parede Externa	130
Parede interna	643

3.3 Ensaio com Ajuste da Vazão de Gás Natural

Conforme representado na Figura 5, é necessário que a panela saia da temperatura ambiente para 200°C em 3 horas e atinja 1.000°C na superfície interna em 7 horas.

Neste caso uma análise reversa foi feita e a energia necessária para que a panela atingisse as temperaturas nos tempos propostos foi calculada através do modelo de elementos finitos, sendo as vazões de gás natural recalculadas através de processo iterativo.

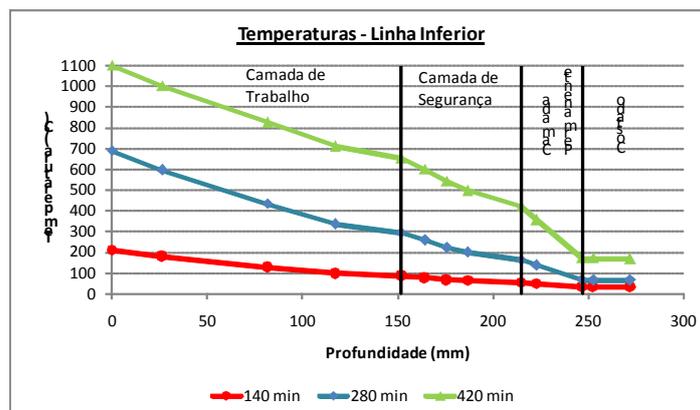


Figura 12. Temperatura interna dos refratários na linha inferior dos sensores em três instantes da simulação do aquecimento com 15% de excesso de O₂ e vazão de gás natural ajustada.

A resposta do modelo aponta para uma vazão média de 50 Nm³/h no primeiro intervalo e 164 Nm³/h na segunda rampa da curva do controlador, como mostra a Tabela 3.

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

Patamar	Tempo (h)	Taxa necessária (kW)	Vazão Média (Nm ³ /h)	Temperatura Atingida Pelo Modelo (°C)
De 25°C a 200°C	3	443	50	220
De 200°C a 1000°C	4	1328	164	1003

3.4 Resfriamento da Panela

Quando a panela está exposta às condições ambientes, vazia e sem tampa, as perdas pelos refratários devido à radiação são bastante significativas. A simulação da Figura 13 mostra os efeitos do tempo de espera de uma panela vazia aquecida à 1.000°C.

Na Figura 13 pode-se notar que a queda de temperatura é mais pronunciada nos primeiros instantes pela elevada temperatura do refratário. Este 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. Daí a importância de se adotar práticas que visem diminuir os tempos de espera nestas condições.

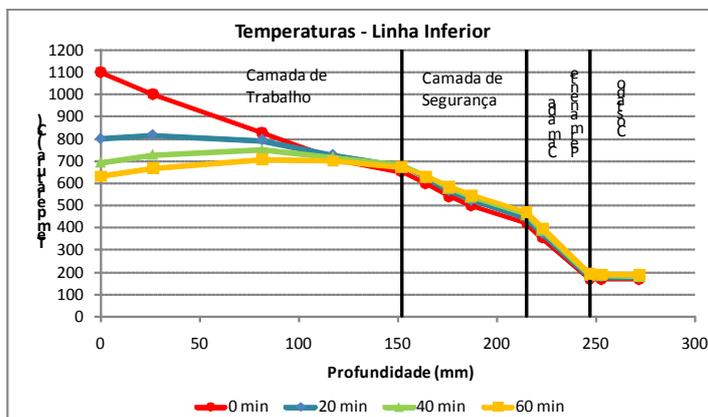


Figura 13. Efeitos do tempo de espera em uma panela aquecida a 1.000°C.

3.5 Energia Armazenada

Foi realizado um ensaio de aquecimento e secagem no qual manteve-se uma panela nova no aquecedor para que a mesma atingisse a temperatura de trabalho utilizando a curva do controlador de temperatura.

Pode-se observar na Tabela 4 que a panela atingiu 857°C, verificado em termografias realizadas após 21h de aquecimento, mostrando a deficiência do processo comparado à sua curva teórica (Figura 5).

Tabela 4. Comparação entre a situação verificada no aquecimento e a curva proposta pelo modelo

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

Comparando a situação real com a curva ajustada, o modelo aponta para uma economia de 799 m³ de gás natural por ciclo de aquecimento de panela nova, além de uma redução de 3 vezes no tempo de aquecimento, favorecendo a flexibilidade e otimização do processo da Aciaria.

A quantidade de energia acumulada no refratário para a curva ajustada é superior à condição atual, conforme Figura 14. Esta condição também minimiza as perdas devido ao menor tempo de exposição da panela aos mecanismos de troca térmica com o ambiente.

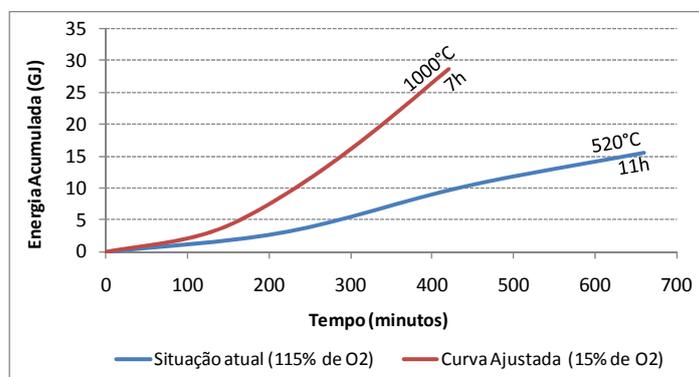


Figura 14. Comparação entre a Energia Acumulada em ensaio realizado na situação atual e modelo com a curva de aquecimento com vazões ajustadas.

4 DISCUSSÃO

Através dos resultados obtidos e das simulações realizadas em modelo numérico, podemos verificar uma redução do consumo de combustível e redução do tempo de aquecimento em relação à atual situação desta Aciaria. Outros ganhos indiretos são:

- redução do consumo de eletrodos;
- redução de energia elétrica no forno panela;
- redução do consumo de refratários;
- ganho de produtividade; e
- ganho na qualidade dos aços produzidos.

Para operacionalização do modelo devem ser instalados medidores de vazão de gás natural e ar de combustão de modo a garantir o atendimento à curva de aquecimento ajustada neste trabalho.

A escolha do ajuste da curva de aquecimento através da redução do excesso de ar e aumento da vazão de gás natural se deu pela facilidade de adequação do sistema atual instalado nesta Aciaria.

Outros autores, como Christ⁽³⁾ utilizaram metodologia semelhante para ajuste da curva de aquecimento à curva de temperatura objetivo, porém este autor tinha como objetivo a redução da temperatura final que foi conseguido através do controle do excesso de ar de combustão, conforme Figura 4.

Durante os ensaios foi verificado que o termopar localizado na tampa do aquecedor apresentava temperaturas superiores às medições da temperatura da fumaça nas medidas realizadas nas análises de Orsat. Este fato pode ser explicado devido à baixa penetração deste termopar no interior da panela o que resulta em uma medição da temperatura do refratário da tampa, e não dos fumos. Propõe-se reposicionar este termopar antes do ajuste da curva do controlador de temperatura de forma que a sua medição seja adequada ao controle do processo.

O parâmetro índice de encharque, que pode ser definido como a energia armazenada nos refratários, segundo Ferreira,⁽⁴⁾ 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 compensar as perdas das etapas subseqüentes do ciclo.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho fornece à ArcelorMittal Monlevade o ajuste necessário ao processo de aquecimento de panelas novas através de um modelo de baixo custo e fácil implementação que aponta para uma considerável redução do consumo de combustível.

Espera-se que esta metodologia possa ser aplicada aos demais aquecedores da usina visando a sua otimização. O ajuste na curva de aquecimento de outros aquecedores deve ser precedida de nova análise e cálculo seguindo a metodologia desenvolvida, visto que as condições de excesso de ar de combustão destes aquecedores podem variar de forma diferente do aquecedor estudado.

O modelo de ajuste proposto deve ser implementado adaptando possíveis restrições do processo, como por exemplo, faixa de atuação do controlador de vazão e posicionamento do termopar, bem como prever inclusão de medidores de vazão de ar e combustível.

REFERÊNCIAS

- 1 Saha, J.K., S.K. Ajmani, and A. Chatterjee, **Mathematical-Model For Determining Preheating Schedule Of Dolomite Ladles In Melt Shops**. Ironmaking & Steelmaking, 1991. 18(6): p. 417-422.
- 2 Hlinka, J.W., A.W. Cramb, and D.H. Bright. **Model For Predicting The Thermal History Of A Ladle Of Steel**. 1985. Detroit, MI, Engl: Iron & Steel Soc of AIME.
- 3 Christ, F.d.S., **Melhorias no Aquecimento de Panelas em uma Aciaria Elétrica**, in Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais. 2000, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre.
- 4 Ferreira, N.F., **Controle da temperatura do aço líquido em uma aciaria elétrica**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, 2000: p. 127.
- 5 Omotani, M.A., L.J. Heaslip, and A. McLean, **Ladle Temperature Control During Continuous Casting**. I & SM, 1983. 10(10): p. 29-35.
- 6 Çengel, Y.A. and M.A. Boles, **Thermodynamics**. An Engineering Approach, ed. M. Hill. 2007.
- 7 McBride, B.J., S. Gordon, and M.A. Reno, **Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species**. NASA Technical Memorandum 4513, 1993.