

DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO REVESTIMENTO REFRAATÁRIO DE UM FORNO DE TRATAMENTO TÉRMICO DE TUBOS DE AÇO*

Arnaud-Guilhem de Loze¹
Luis Fernando Oliveira Rodrigues²
Lis Nunes Soares³

Resumo

Este artigo apresenta um modelo matemático desenvolvido para o estudo das temperaturas dos refratários dos fornos de tratamento térmico de tubos de aço em períodos sem produção. Nesses períodos, o forno é desligado ou conservado em temperatura reduzida, visando economia de energia. O modelo matemático desenvolvido utiliza equações discretizadas para o cálculo da evolução das temperaturas em pontos internos do revestimento refratário em função da evolução da temperatura da atmosfera interna do forno. O modelo foi validado em campanhas de medições experimentais. Vários termopares foram instalados em diferentes profundidades do material refratário, e a evolução de temperaturas nestes pontos foi coletada durante duas semanas. A comparação entre modelo e medidas apresentou erro relativo considerado pequeno para todos os diferentes cenários. O modelo permitiu definir a condição de regime quase permanente do forno para garantir retomada do estado produtivo sem problemas de qualidade do produto. E auxiliou também o desenvolvimento de melhores práticas de controle do forno considerando a melhoria da qualidade dos produtos e economia de energia. O estudo foi considerado bem sucedido, e sua aplicação em outros fornos está sendo estudada.

Palavras-chave: Transferência de calor; Fornos de tratamento térmico; Revestimento refratário.

MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT OF REFRACTORY MATERIALS HEAT TRANSFERS APPLIED TO A STEEL TUBES HEAT TREATMENT FURNACE

Abstract

This paper presents a mathematical model developed to study the refractory materials temperatures of a steel tubes heat treatment furnace during no production periods. During these periods, the furnace is either turned off or either its atmosphere temperature is reduced to save energy. The developed model uses a discretized method of a heat transfer equations system to compute inside refractory materials temperatures evolution in function of furnace atmosphere temperature evolutions. The model was then validated with data from a measurement campaign. Several thermocouples were installed at different depths within refractory materials; temperatures evolutions were collected during about two weeks. Comparison between the model and measurements shows small relative differences for all furnace situations. The model allow to define the almost steady state needed condition of refractory materials to improve production quality after an no production period. It also helps to define furnace control best practices regarding product quality improvement and energy savings. As the developed method was successful, its application to other plant furnaces is considered.

Keywords: Heat transfer; Heat treatment furnaces; Refractory materials.

¹ Engenheiro de Energia, Ecole Centrale Paris, Paris, França.

² Estudante de engenharia mecânica, estagiário, Área de Tecnologia Térmica/Superintendência Geral de Produção, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais.

³ Engenheira Mecânica, Doutora, Engenheira de Processos Sênior, Área de Tecnologia Térmica/Superintendência Geral de Produção, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Fornos são equipamentos essenciais para o processo de laminação de tarugos e tratamento térmico de tubos de aço sem costura. Visando melhoria da qualidade do produto e redução de consumo de energia, é importante o entendimento detalhado dos processos de transferência de calor que ocorrem no forno. Este artigo apresenta um estudo sobre o revestimento refratário de um forno para tratamento térmico de tubos de aço em períodos sem produção.

Durante períodos improdutivos, fornos deste tipo são desligados ou têm a temperatura reduzida para economizar combustível. Porém, é necessário que o equipamento em questão esteja em condição de regime quase permanente para início de produção. O processo de aquecimento dos tubos é controlado através da temperatura, coletada por termopares, instalados na atmosfera do forno. Entretanto, esta variável de controle não considera o estado de temperaturas do revestimento refratário. A condição térmica do refratário fora do estado de temperatura quase permanente faz com que este absorva uma parcela da energia disponibilizada pela combustão e conseqüentemente, a energia disponível para os tubos decresce, e então, a qualidade dos produtos pode ser afetada. Desta forma, o entendimento do fluxo de calor através dos materiais refratários, se faz necessário para a definição da condição de regime quase permanente do forno e contribui para o desenvolvimento de ações estratégicas visando melhores práticas e redução de consumo durante intervalos entre períodos produtivos.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um modelo térmico capaz de descrever as temperaturas internas do revestimento refratário em diferentes momentos principais: durante o resfriamento do forno após um período de produção, durante o período de conservação do forno em temperatura mais baixa que a temperatura de produção (período não produtivo), e durante o aquecimento do mesmo após um período improdutivo.

O modelo matemático utilizou um sistema de equações de transferência de calor discretizadas para cálculo das temperaturas internas de diferentes camadas do material refratário. Este modelo possibilitou o cálculo dos valores de temperatura para determinados pontos internos do revestimento refratário da soleira e do teto, em função do tempo e da temperatura da atmosfera interna do forno. Os resultados permitiram a definição do critério de entrada do material refratário em condição de regime quase permanente (condição em que este tem temperatura praticamente constante) adequada para retomada do trabalho após um período de forno desligado ou conservado em baixa temperatura, e a avaliação da influência do aquecimento/resfriamento deste no processo. Com a definição deste critério foi possível estudar formas de controle do forno com menor consumo de energia, para que este estivesse pronto para em condição adequada para início da produção após o período de parada.

A aplicação deste modelo matemático para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para simulação de temperaturas permitiu uma fácil utilização do estudo desenvolvido para a criação de valor para a empresa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de transferência de calor envolvendo o forno de tratamento térmico em questão e o ambiente externo foi profundamente estudado para o desenvolvimento deste estudo.

2.1 Forno de tratamento térmico

Trata-se de um forno retangular de vigas caminhantes, com revestimento refratário interno composto por cimento refratário na região da soleira e nas paredes, até metade inferior de sua altura; e com revestimento refratário de fibra cerâmica na região do teto e nas paredes, na metade superior de sua altura. Externamente, o forno é revestido por chapas de metal.

2.2 Desenvolvimento do Modelo matemático

Desenvolveu-se um modelo matemático baseado nas relações de transferência de calor do forno em períodos não produtivos, Figura 1, para o forno em questão, com o objetivo de calcular o estado térmico do mesmo durante diferentes cenários ao qual este equipamento pode ser submetido.

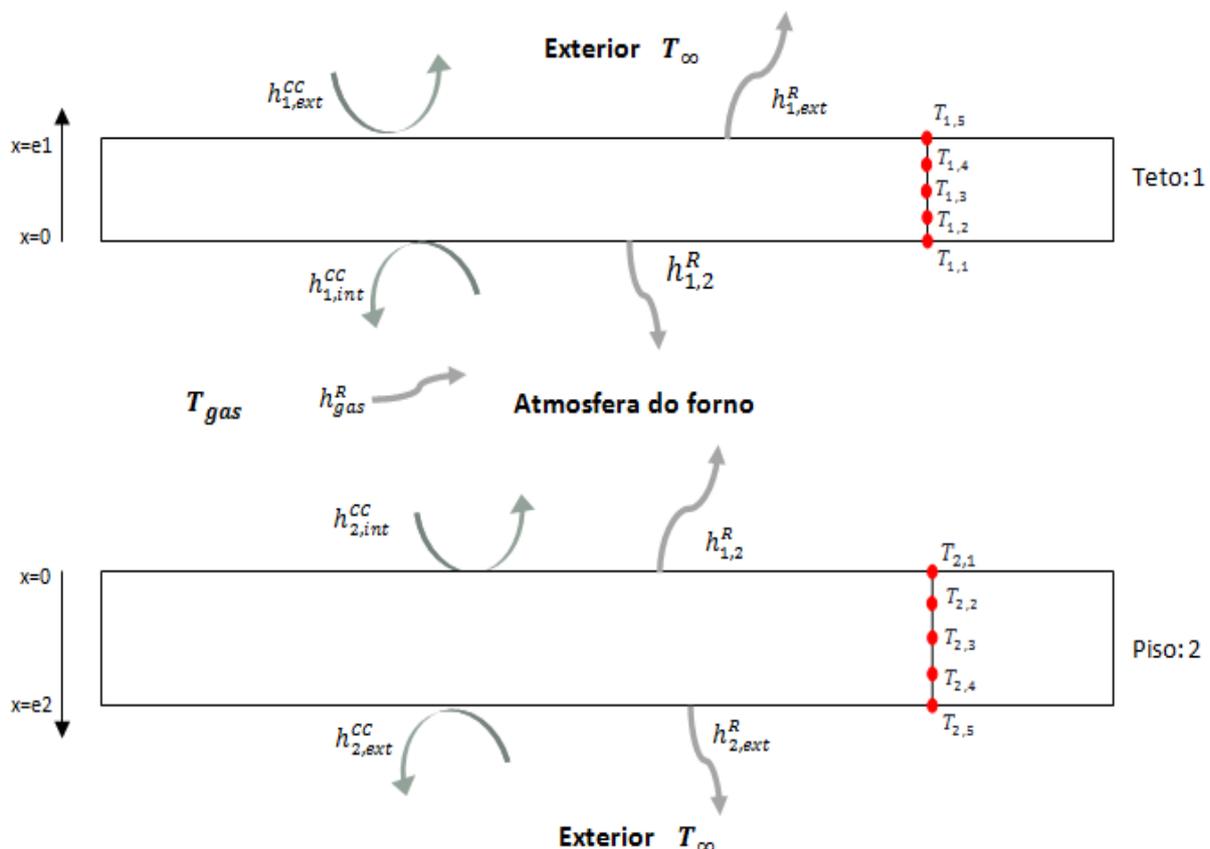


Figura 1. Relações de transferência de calor consideradas no modelo matemático.

Durante o desenvolvimento deste estudo, algumas hipóteses foram assumidas:

- Para simplificar as equações de transferência de calor, a geometria do forno foi assumida como se existissem apenas dois planos, teto e soleira.
- A temperatura da chama de combustão e a temperatura da massa de gás foram consideradas iguais.
- O tempo e os materiais refratários do teto e da soleira foram discretizados, levando em consideração o comportamento térmico do forno e a inércia térmica dos revestimentos refratários.
- A variação da capacidade térmica do revestimento refratário em relação à temperatura não é considerada.

Diferentes fluxos de transferência de calor no forno foram considerados na formulação matemática. Em relação ao forno e o ambiente externo, considerou-se a transferência de calor por radiação e convecção entre teto e soleira e a atmosfera externa. No ambiente interno do forno, várias relações de transferência de calor foram consideradas; transferência de calor por radiação e convecção entre a atmosfera interna do forno (massa de gás e chama de combustão) e as superfícies internas da soleira e do teto; e por fim, considerou-se a condução de calor no interior das paredes dos refratários de teto e soleira. As equações Eq.(1), Eq.(2), Eq.(3), Eq.(4), Eq.(5), Eq.(6) e Eq.(7), apresentam os fluxos de calor considerados no modelo térmico, e o índice 1 nos termos das equações apresentadas se refere ao teto, e o índice 2 à soleira.

$$\varphi_{gas \rightarrow 1} = (h_{gas}^R + h_{int,1}^{CC}) * (T_{gas} - T_{1,1}) \quad (1)$$

$$\varphi_{gas \rightarrow 2} = (h_{gas}^R + h_{int,2}^{CC}) * (T_{gas} - T_{2,1}) \quad (2)$$

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = h_{1,2}^R * (T_1 - T_2) = -\varphi_{2 \rightarrow 1} \quad (3)$$

$$\varphi_{1 \rightarrow \infty} = (h_{ext,1}^R - h_{ext,1}^{CC}) * (T_{1,5} - T_{\infty}) \quad (4)$$

$$\varphi_{2 \rightarrow \infty} = (h_{ext,2}^R - h_{ext,2}^{CC}) * (T_{2,5} - T_{\infty}) \quad (5)$$

$$\varphi_1 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \quad (6)$$

$$\varphi_2 = -\lambda_{2 med} \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (7)$$

Para determinar a evolução das temperaturas do gás e do material refratário de teto e piso, é necessário resolver o sistema de equações apresentado a seguir. Primeiro, é realizado um balanço energético transiente sobre o volume de gás do forno Eq.(14). Depois, são consideradas as equações para conservação do fluxo de calor através das paredes internas e externas, Eq.(15) e Eq.(16), Eq.(17) e Eq.(18). Por ultimo, são escritas as equações de balanço energético transiente no interior do material refratário do teto e do piso do forno, Eq. (19) e Eq.(20), com os fluxos de condução.

$$\text{Gás e atmosfera do forno} \quad m_{gas} C_{p,gas} \frac{\partial T_{gas}}{\partial t} = \varphi_{1 \rightarrow gas} + \varphi_{2 \rightarrow gas} \quad (8)$$

$$\text{Superfícies internas 1 e 2} \quad \varphi_{gas \rightarrow 1} + \varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi_1(x=0) \quad (9)$$

$$\varphi_{gas \rightarrow 2} + \varphi_{1 \rightarrow 2} = \varphi_2(x=0) \quad (10)$$

$$\text{Superfícies externas 1 e 2} \quad \varphi_{\infty \rightarrow 1} = \varphi_1(x=e_1) \quad (11)$$

$$\varphi_{\infty \rightarrow 2} = \varphi_2(x=e_2) \quad (12)$$

$$\text{Condução interna 1 e 2} \quad \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{\rho_1 * C_{p,1}} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_{2 med}}{\rho_{2 med} * C_{p,2 med}} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad (14)$$

Adotou-se o método de discretização das equações em intervalos de tempo, Δt , e de espaço, Δe_1 para a espessura do teto, Δe_2 , para a espessura da soleira. A evolução da temperatura atmosfera interna do forno, $T_{gás}$, é o parâmetro de entrada para o cálculo da evolução da temperatura ao longo das camadas internas do revestimento refratário. O resultado dos cálculos são os valores das temperaturas internas do refratário do teto e da soleira em função do tempo, em pontos específicos ao longo de sua espessura.

A estrutura de cálculo desenvolvida abordou diferentes cenários do forno para o cálculo das temperaturas internas da soleira e do refratário, são eles:

- Elevação da temperatura do forno (forno sendo ligado); este cenário foi denominado *Ramp Up*.
- Redução da temperatura do forno (redução controlada da temperatura de trabalho do forno); este cenário foi denominado *Ramp Down*.
- Desligamento do forno (corte do fornecimento de energia ao forno, resfriamento do equipamento de maneira não controlada), denominado *Turn Off*.
- Conservação do forno em temperatura constante, geralmente temperatura mais baixa que a utilizada em regime de trabalho, denominada *Maintain*.

Características técnicas do revestimento refratário, do teto e da soleira, como capacidade térmica e densidade, foram considerados nos cálculos.

2.3 Validação do modelo matemático

A validação do modelo foi realizada através de uma campanha de medição de temperatura. As medidas de temperatura levantadas durante a campanha foram comparadas com os valores de temperatura calculados, sob a mesma condição, pelo modelo matemático desenvolvido.

2.3.1 Campanha de medição de temperatura

Para melhor entendimento do forno em diferentes cenários de temperatura, e validação do modelo de cálculo desenvolvido, realizou-se uma campanha de medições de temperaturas em camadas interiores dos revestimentos refratários do teto e da soleira do forno. Todos os procedimentos necessários foram cuidadosamente realizados para garantir a confiabilidade dos dados.

Esta campanha de medições consistiu na instalação de termopares em camadas internas, a determinadas profundidades (medidas em relação à superfície externa do forno), do material refratário. Os dados foram coletados pelos termopares, a cada intervalo suficientemente pequeno para representar a evolução de temperaturas ao longo do tempo. Os valores de temperatura foram armazenados em loggers apropriados.

Os pontos para medição de temperatura foram definidos, levando em consideração características do forno e do processo de trabalho dos produtos no mesmo, com o intuito de obter uma visão representativa. O forno de tratamento estudado neste trabalho é dividido em três diferentes regiões; geralmente, cada região trabalha a uma temperatura diferente, e é subdividida em cinco zonas. Desta forma, foram escolhidas três zonas, uma em cada região do forno, para a coleta de temperaturas. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático do forno, ilustrando as zonas onde foram instalados os termopares.

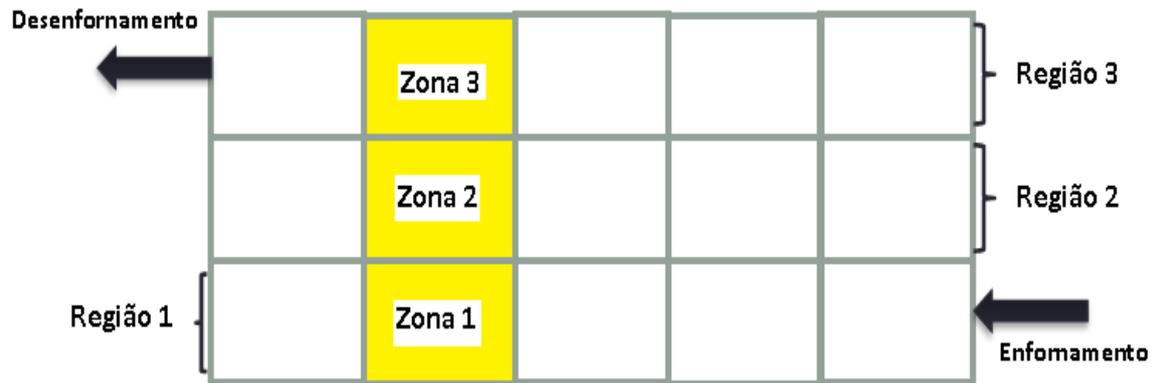


Figura 2. Desenho esquemático do forno com destaque para as zonas com termopares instalados.

Para cada ponto de coleta de temperatura, no teto e na soleira, foram instalados três termopares em três diferentes profundidades. As profundidades na soleira foram definidas levando em consideração as camadas dos diferentes materiais que a compõem, e no teto (composto por apenas um tipo de material) levando em conta uma diferença de profundidade aproximadamente igual entre os pontos. Após a instalação dos termopares, as temperaturas foram coletadas, e durante o período de coleta foram levantados dados para diferentes cenários do forno (*Ramp up*, *Ramp down*, *Turn off*, *Turn on* e *Mantain*). Esta campanha de medição possibilitou uma boa visão geral do estado de temperaturas do refratário do forno em diferentes cenários de evolução. A Figura 3 apresenta o arranjo de instalação dos termopares, no interior do revestimento do teto e da soleira. Os termopares são indicados na figura pela letra T e respectivo número de 1 a 3. Sendo T1 o termopar de menor profundidade medida em relação à superfície externa do forno, e T3 o termopar de maior profundidade em relação à superfície externa.

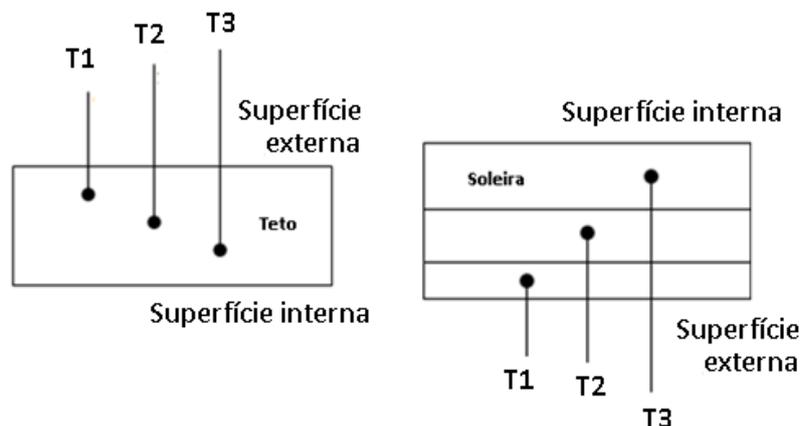


Figura 3. Desenho esquemático dos pontos de instalação dos termopares no teto e soleira.

2.3.2 Metodologia para a comparação entre os resultados da campanha de medição e resultados obtidos pelo modelo matemático

Para comparar os dados de temperatura coletados durante a campanha de medição com os resultados obtidos através do modelo, foram utilizadas as configurações reais como parâmetros de entrada do modelo. Levantaram-se as temperaturas da atmosfera interna do forno ao longo do período em que a campanha de medição foi realizada. Estes dados alimentaram o modelo matemático e as temperaturas dos pontos internos do revestimento refratário do teto e da soleira foram calculados.

Os valores calculados e reais foram comparados através do cálculo de erro relativo. O valor de erro relativo foi avaliado levando em consideração sua representatividade em valor absoluto e no contexto do processo de aquecimento e resfriamento do forno.

2.3.3 Definição da condição de forno para reinício da produção

A definição da condição do forno adequada para reiniciar a produção foi realizada a partir das observações da campanha de medição. Durante processo de elevação de temperatura do forno, visando o início do regime de produção, definiu-se como critério a variação quase nula da temperatura interna do revestimento refratário como para indicar regime quase permanente do forno. O revestimento da soleira foi utilizado para a definição do critério para reiniciar a produção, pois apresenta maior necessidade energética para entrar em regime quase permanente de temperatura. Haja vista, que densidade e inércia térmica do material da soleira são maiores que do material do teto. Como a temperatura calculada para o ponto mais externo do revestimento refratário da soleira do forno foi a última a atingir o nível de temperatura quase invariável, esta foi utilizada para a caracterização do estado de regime do forno.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados relativos à validação do modelo matemático desenvolvido, e a utilização do mesmo para a definição do estado de regime quase permanente do forno após um período sem produção; permitem avaliar o estudo como bem sucedido.

3.1 Validação do modelo matemático

A comparação entre os resultados obtidos pelo modelo matemático e os valores de temperatura medidos, foi feita considerando a evolução de temperatura da atmosfera interna durante determinado período de tempo. Foram considerados todos os diferentes cenários de evolução de temperatura do forno.

Considerando o teto do forno, para as zonas analisadas, os resultados apresentaram valores de temperatura calculados, em todas as profundidades, próximos aos valores medidos. Em média, o erro relativo máximo ao longo do período analisado foi menor que 10%. Os resultados obtidos para a soleira apresentaram erro relativo um pouco maior que 30% para os pontos de maior profundidade (mais próximos à face quente do revestimento). Este resultado pode ser explicado, entre outras coisas, pelas simplificações adotadas no modelo matemático. Entretanto, foi possível observar que a evolução semelhante das temperaturas medidas e calculadas, ou seja, as evoluções das temperaturas calculadas e reais apresentaram o mesmo perfil. Quando considerada a temperatura calculada pelo modelo para o ponto mais externa da soleira (próximo à face fria do revestimento), os resultados apresentaram menor diferença entre modelo e temperatura real. O erro relativo foi, em média, menor que 10%.

Considerou-se o modelo de cálculo validado. Os resultados apresentaram o mesmo perfil de evolução de temperaturas reais e calculadas. E o erro relativo entre modelo e realidade é considerado pequeno, levando em consideração a complexidade do processo e a representatividade dos resultados para a avaliação da condição energética do forno.

3.2 Definição da condição adequada para reinício da produção

Após certo tempo fora de regime de trabalho, observou-se através da campanha de medições temperatura, que o revestimento refratário do forno apresentava processo gradual de perda de energia.

Com relação ao processo de elevação de temperatura do forno, visando sua preparação para entrar em regime de trabalho, foi observado processo gradual de elevação de temperatura até certo nível. A partir desse ponto, desde que não ocorresse mudança de regime de trabalho do forno, toda a energia recebida pelo material refratário não refletia em variação significativa de temperatura.

Com base nestas informações, o modelo de cálculo desenvolvido foi utilizado para analisar campanhas de produção com problemas de retrabalho de produtos devido à suspeita da condição de forno fora de regime adequado. Estes haviam ocorrido após um período de forno parado com baixa temperatura. A condição de baixa temperatura pode ser considerada para períodos de forno desligado, ou períodos de conservação em temperatura mais baixa que a temperatura de regime de trabalho. A partir desta análise, definiu-se como condição adequada para reinício da produção, uma porcentagem mínima da temperatura calculada para a camada mais externa da soleira, em relação à temperatura desta camada em regime permanente. Portanto, esta temperatura mínima seria o indicador para início do processo produtivo sem riscos de qualidade na produção (tubos desenformados em temperaturas abaixo do esperado).

3.3 Redução de consumo energético

A definição da condição adequada para reinício da produção possibilitou avaliar criticamente o processo de controle do forno para períodos improdutivos. Oferecendo a possibilidade de uma análise estratégica para o controle de temperatura do forno em intervalos improdutivos.

O planejamento do controle de temperatura do forno pode ser feito levando em consideração o valor de temperatura de trabalho necessário para início da produção, a condição de regime quase permanente do forno nesta temperatura e o tempo de duração da parada de produção. O modelo matemático permitiu o cálculo do resfriamento e aquecimento do forno neste período, em função da garantia de retomada do processo produtivo no horário planejado. Com estas informações foi possível otimizar a evolução de temperaturas durante esse período. Definindo assim, a melhor estratégia de controle visando economia de energia (desligamento do forno ou a conservação em temperaturas mais baixas) e a retomada do estado produtivo com o forno preparado para receber tubos.

Para quantificar os ganhos proporcionados pelo modelo desenvolvido, analisou-se a utilização deste para o desenvolvimento de um simulador computacional de evolução de temperaturas. Para períodos de retomada do processo produtivo de determinado material crítico após forno parado. A utilização do simulador proporcionou uma redução anual no consumo de combustível de aproximadamente R\$ 50.000,00.

4 CONCLUSÃO

De maneira geral, os valores de temperatura calculados pelo modelo térmico desenvolvido apresentaram pequeno erro relativo em relação às temperaturas

medidas. A comparação entre valores calculados e reais para o teto obteve bons resultados. Quanto ao revestimento da soleira, o modelo se aproximou bastante das temperaturas medidas para o ponto mais externo da mesma.

Após o desenvolvimento deste modelo de cálculo, e análise aprofundada dos dados relacionados, foi possível determinar a camada mais externa da soleira, como o ponto crítico para retorno do forno ao estado produtivo. O cálculo desta temperatura apresentou pequeno erro relativo. A definição da condição adequada do forno para início da produção permitiu adotar melhores práticas visando à redução do consumo energético durante períodos improdutivos. A utilização do modelo matemático para o desenvolvimento de um simulador de temperaturas, com baixo custo de desenvolvimento, proporcionou ganho anual de aproximadamente R\$ 50.000,00 em redução de consumo de combustível para campanhas de produção de determinado produto crítico. Desta forma, o estudo desenvolvido foi considerado bem sucedido.

Agradecimentos

À empresa Vallourec Tubos do Brasil S.A. (VBR) por apoiar projetos de pesquisa e desenvolvimento.

À Dra. Lis Nunes Soares, engenheira especialista em processos térmicos, pela orientação do projeto.

À equipe de Processos Térmicos da Vallourec, Kássio Nogueira Cançado e Stephano Joviano Miranda, estudantes de engenharia mecânica; pelo auxílio em todas as fases do estudo.

A toda equipe dos setores de Tratamento Térmico, Combustão e Manutenção de Refratários da Laminação Contínua da VBR Usina Barreiro, pelo apoio e confiança no projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 E.P. Keramidaa, H.H. Liakosa, M.A. Fountib, A.G. Boudouvisa, N.C. Markatosa. "Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces", International Journal of Heat and Mass Transfer 43 (2000).
- 2 Incropera, F.P., Dewitt, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 3a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 1990.
- 3 Mullinger Peter and Jenkins Berrie. Industrial and Process Furnaces. Principles, Design and Operation.
- 4 Taine J., Iacona E., Petit J-P., Transferts Thermiques – Introduction aux transferts d'énergie, quatrième édition, Dunod.