

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

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

Arnaud-Guilhem de Loze, arnaud-guilhem.de_loze@centraliens.net¹

Luis Fernando Oliveira Rodrigues, luisfernandollf@live.com²

Dr. Lis Nunes Soares, lis.soares@vallourec.com²

¹Ecole Centrale Paris, Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France.

²Vallourec Tubos do Brasil, Av. Olinto Meireles, 65 - Barreiro de Baixo 30640-010 - Belo Horizonte - MG, Brasil.

Resumo: Fornos são equipamentos essenciais para o processo de laminação e tratamento térmico de tubos de aço sem costura. Visando melhoria da qualidade dos produtos e reduzir o consumo de energia, o entendimento dos processos de transferência de calor do revestimento refratário do forno é considerado crucial. Este trabalho apresenta um estudo realizado sobre a evolução de temperatura do refratário, durante período improdutivo, de um forno de tratamento térmico de tubos de aço. Durante esses períodos, para economizar energia, o forno é desligado ou conservado em temperatura mais baixa que a de regime de trabalho. Entender a transferência de calor do material refratário permite definir uma condição de temperatura adequada do mesmo, caracterizando o forno em estado de regime quase permanente, para retomada do processo produtivo considerando a qualidade da produção e economia de combustível durante período improdutivo. Assim, foi desenvolvido um modelo matemático para calcular a evolução das temperaturas dos materiais refratários. Este modelo utiliza um sistema de equações de transferência calor discretizadas, para o cálculo da evolução da temperatura em pontos internos do refratário, em função da evolução de temperatura da atmosfera do forno. A validação do modelo matemático foi realizada baseada nos resultados de uma campanha de medição de temperatura. Termopares foram instalados em diferentes profundidades, no interior do revestimento refratário, e a evolução da temperatura foi coletada durante duas semanas. A comparação entre resultados do modelo e temperaturas reais apresentou pequena diferença para diferentes cenários do forno. O modelo possibilitou avaliar, considerando a qualidade dos produtos, a manutenção do refratário em boas condições e o consumo de energia, diferentes cenários de evolução de temperatura da atmosfera do forno e o impacto desta no processo de produção. Em particular, os resultados apresentados pelo modelo matemático permitiram definir uma condição de temperatura do refratário, necessária para início do regime de trabalho. Essa condição foi definida como uma temperatura mínima que o material refratário deve atingir para início da produção com melhor qualidade do aquecimento dos produtos. Objetivando facilitar a utilização do modelo matemático foi desenvolvida uma ferramenta computacional, capaz de simular a evolução das temperaturas internas do refratário, em função da temperatura da atmosfera interna. O modelo matemático desenvolvido foi bem-sucedido, e a aplicação deste em outros fornos está sendo considerada.

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

1. INTRODUÇÃO

Fornos são equipamentos térmicos amplamente utilizados no ambiente industrial. Durante o processo de produção de tubos de aço sem costura estes equipamentos desempenham papel fundamental, fornecendo energia térmica para aquecimento do aço para o processo de laminação, e para o tratamento térmico de tubos já laminados. Por outro lado, máquinas térmicas como fornos também são grandes consumidores de energia e produtores de gases poluentes. Com o objetivo de reduzir o consumo de energia e a emissão de gases poluentes, melhorar qualidade dos produtos e conservar o refratário em bom estado funcional; através da otimização do controle de temperatura destes equipamentos em períodos não produtivos, foi desenvolvido um modelo matemático para planejamento das temperaturas de processo dos períodos com e sem produção.

O desenvolvimento do trabalho em questão foi pautado, basicamente, no estudo das relações de transferência de calor no ambiente do forno, levando em consideração o estado térmico do revestimento refratário e a troca de calor do forno com o ambiente externo. Realizou-se este trabalho, em um forno de tratamento térmico.

2. FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O Forno de tratamento térmico de tubos considerado é 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 de chapas de metal.

2.1. Hipóteses do modelo

Desenvolveu-se um modelo matemático baseado nas relações de transferência de calor do forno em períodos não produtivos, para o forno em questão, com o objetivo de simular a evolução de temperaturas internas do mesmo durante diferentes cenários ao qual este equipamento pode ser submetido, e assim caracterizar seu estado de regime permanente ou quase permanente. A Fig. 1 representa os fluxos de calor considerados no modelo considerado.

Durante o desenvolvimento deste estudo, algumas hipóteses foram assumidas para facilitar os cálculos:

- Para simplificar as equações de transferência de calor, a geometria do forno foi assumida como se existissem apenas dois planos, um plano do teto do forno, e outro da 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 a inércia térmica do revestimento refratário.
- Não foi considerada a variação da capacidade térmica destes materiais em relação à temperatura.

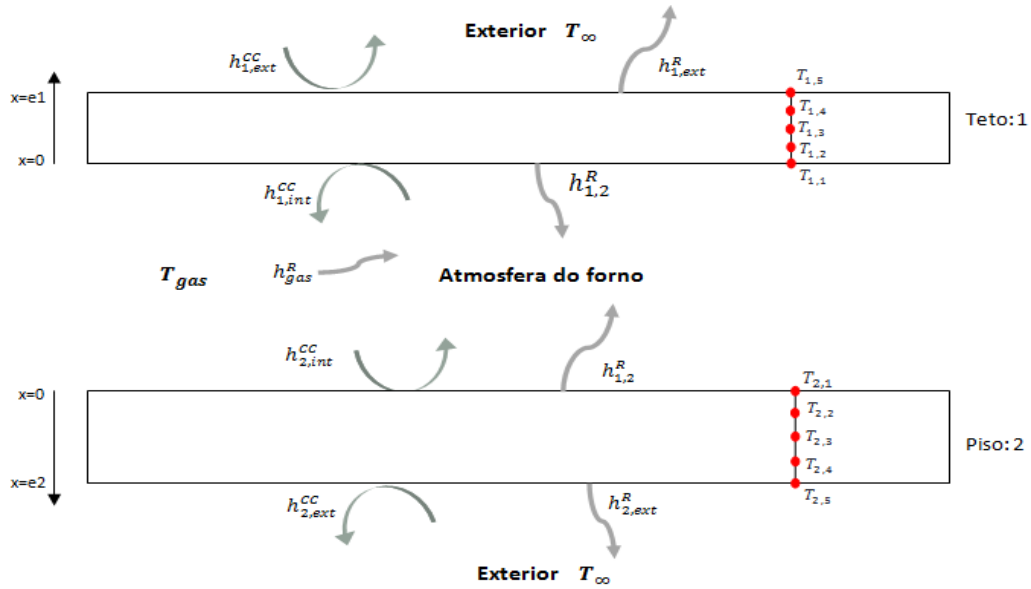


Figura 1. Fluxo de calor considerado no modelo matemático

2.2. Formulação das equações para transferência de calor

O modelo matemático leva em consideração diferentes fluxos de transferência de calor. Considera-se transferência de calor por radiação e convecção entre teto e soleira e a atmosfera externa. Assumiu-se que o fluxo de energia por radiação poderia ser linearizado, pois as temperaturas da superfície externa do teto e soleira apresentam pequenas diferenças. No ambiente interior do forno, várias relações de transferência de calor foram consideradas; transferência de calor por radiação entre teto e soleira, que foi linearizada para simplificar as equações; 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, Fig.1, considerados no modelo matemático.

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

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

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

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

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

$$\phi_1 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \quad (6)$$

$$\phi_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (7)$$

Para Eq.(1), $\varphi_{gas \rightarrow 1}$ é o fluxo de calor do gás para o teto; h_{gas}^R a energia transferida por radiação pelo gás; $h_{int,1}^{CC}$ a energia transferida por convecção do ambiente do forno para a superfície interna do teto; T_{gas} a temperatura do gás e $T_{1,1}$ a temperatura do teto no ponto 1.

Para Eq.(2), $\varphi_{gas \rightarrow 2}$ é o fluxo de calor do gás para a soleira; h_{gas}^R a energia transferida por radiação pelo gás; $h_{int,2}^{CC}$ a energia transferida por convecção do ambiente do forno para a superfície interna da soleira; T_{gas} a temperatura do gás e $T_{2,1}$ a temperatura da soleira no ponto 1.

Para Eq.(3), $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ é o fluxo de calor do teto para soleira; $h_{1,2}^R$ a energia transferida por radiação do teto para a soleira; $h_{int,2}^{CC}$ a energia transferida por convecção do ambiente do forno para o ponto 1 da soleira; T_1 a temperatura do teto e T_2 a temperatura da soleira; e $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ o fluxo de calor da soleira para o teto.

Para Eq.(4), $\varphi_{1 \rightarrow \infty}$ é o fluxo de calor do teto para o ambiente externo; $h_{ext,1}^R$ a energia transferida por radiação pelo teto para o ambiente externo; $h_{ext,1}^{CC}$ a energia transferida por convecção pelo teto para o ambiente externo do forno; $T_{1,5}$ a temperatura da superfície externa do teto e T_∞ a temperatura do ambiente externo.

Para Eq.(5), $\varphi_{2 \rightarrow \infty}$ é o fluxo de calor da soleira para o ambiente externo; $h_{ext,2}^R$ a energia transferida por radiação pela soleira para o ambiente externo; $h_{ext,2}^{CC}$ a energia transferida por convecção pela soleira para o ambiente externo do forno; $T_{2,5}$ a temperatura da superfície externa da soleira e T_∞ a temperatura do ambiente externo.

Para Eq.(6), φ_1 é o fluxo de calor transferido por condução através do teto; λ_1 a condutividade térmica do teto; e $\partial T_1 / \partial x$ a variação de temperatura em relação à espessura do teto.

Para Eq.(7), φ_2 é o fluxo de calor transferido por condução através da soleira; λ_{2med} a condutividade térmica média da soleira e $\partial T_1 / \partial x$ a variação de temperatura em relação à espessura da soleira.

Os fatores com notação h, indicados nas equações Eq.(1) até Eq.(5) são calculados segundo as equações a seguir.

$$h_{ext}^R = 4\varepsilon_i \sigma \left(\frac{T_{ext,i}^n + T_\infty}{2} \right)^3 \quad (8)$$

$$h_{1,2}^R = F_{1,2} 4\varepsilon_{1,2} \sigma \left(\frac{T_{int,1} + T_{int,2}}{2} \right)^3 \quad (9)$$

$$h_{gas}^R = 4\varepsilon_{gas,i} \sigma \left(\frac{T_{int,i} + T_{gas}}{2} \right)^3 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{gas,i} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{gas}} + \frac{1}{\varepsilon_i} - 1} \quad (11)$$

$$Nu_{L,int} = \frac{h_{int}^{CC} L}{\lambda} = 0,14 Pr^{0,33} Gr^{0,33}, \text{ com } 2 * 10^7 < Gr < 3 * 10^{10} \quad (12)$$

$$Nu_{L,ext} = \frac{h_{ext}^{CC} L}{\lambda} = 0,14 Pr^{0,33} Gr^{0,33}, \text{ com } 2 * 10^7 < Gr < 3 * 10^{10} \quad (13)$$

Para Eq.(8), ε_i é a emissividade da superfície do teto ou soleira do forno (assumida como uma superfície cinza); σ é a constante de Stefan Boltzman, igual a $5,67 * 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$. $T_{ext,i}$ é a temperatura da superfície do forno na face externa; e T_∞ é a temperatura ambiente externa ao forno.

Para Eq.(9), $\varepsilon_{1,2}$ é a emissividade das superfícies internas do teto e soleira; $F_{1,2}$ é o fator de forma de radiação entre teto e soleira; $T_{int,i}$ é a temperatura da superfície interna do teto e da soleira.

Para Eq.(10), $\varepsilon_{gas,i}$ é a emissividade do gás de combustão em relação à superfície de teto ou soleira, e $T_{int,i}$ é a temperatura interna do teto ou soleira. O valor de $\varepsilon_{gas,i}$ é calculado pela equação Eq.(11).

Para valores de Gr , número de Grasshof, no intervalo de $2 * 10^7 < Gr < 3 * 10^{10}$, $h_{int,i}^{CC}$ é calculado pela Eq.(12). Onde, $Nu_{L,int}$ é o número de Nusselt para o comprimento interno do forno; λ é a condutividade térmica da superfície interna do forno (teto ou soleira); L é o comprimento da superfície; e Pr é o número de Prandtl. Para o cálculo de $h_{ext,i}^{CC}$ foi utilizada a mesma formulação, segundo Eq.(13).

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 nas 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.

$$\text{Gás e atmosfera do forno} \quad m_{gas} C_{p,gas} \frac{\partial T_{gas}}{\partial t} = \varphi_{1 \rightarrow gas} + \varphi_{2 \rightarrow gas} \quad (14)$$

$$\text{Superfícies internas 1 e 2} \quad \varphi_{gas \rightarrow 1} + \varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi_1(x=0) \quad (15)$$

$$\varphi_{gas \rightarrow 2} + \varphi_{1 \rightarrow 2} = \varphi_2(x=0) \quad (16)$$

$$\text{Superfícies externas 1 e 2} \quad \varphi_{\infty \rightarrow 1} = \varphi_1(x=e_1) \quad (17)$$

$$\varphi_{\infty \rightarrow 2} = \varphi_2(x=e_2) \quad (18)$$

$$\text{Condução interna 1 e 2} \quad \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{\rho_1 * C_{p,1}} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_{2med}}{\rho_{2med} * C_{p,2med}} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad (20)$$

Nestas últimas equações, ρ_i é massa, em específica, $C_{p,i}$ capacidade térmica dos revestimentos refratários e $\partial T_i/\partial t$ a variação de temperatura em relação ao tempo.

2.3. Resolução do modelo

Para a resolução das equações do modelo matemático adotou-se o método de discretização. Desta forma, as equações foram resolvidas para intervalos de tempo, Δt , e de espaço, Δe_1 para a espessura do teto, Δe_2 , para a espessura da soleira. Considerou-se $\Delta t = 15$ minutos, pois este intervalo é considerado suficientemente pequeno para observar a dinâmica de variação de temperaturas do forno, além de possibilitar a resolução dos cálculos de maneira mais rápida. As espessuras do teto e da soleira foram divididas em quatro camadas, como apresentado na Fig. 1.

Para determinar a evolução da temperatura do gás, a evolução das temperaturas da soleira e do teto, o sistema de equações foi resolvido em a ordem seguinte: T_{gas} , $T_{1,1}$ e $T_{2,1}$. A temperatura $T_{1,1}$, do teto, foi calculada primeiro que $T_{2,1}$, pois os queimadores do forno estão mais próximos ao teto. Após estes cálculos, foi calculada a condução de calor através da espessura da soleira e do teto, e posteriormente foram realizados os cálculos das temperaturas das superfícies externas do forno. Estes cálculos foram resolvidos, em função da evolução de T_{gas} , para certo intervalo de tempo.

A estrutura desenvolvida oferece a possibilidade para o cálculo das temperaturas considerando três diferentes cenários de evolução da temperatura T_{gas} do forno:

- Elevação da temperatura do forno; forno sendo ligado, denominado *Turno on*; ou aumento considerável da temperatura, *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, e ocorre o resfriamento do equipamento de maneira não controlada), denominado *Turn off*.
- Conservação do forno em temperatura praticamente constante

A seguir, estão equações discretizadas para os cálculos de temperatura em função da temperatura da atmosfera interna.

1- Evolução da temperatura da atmosfera do forno

$$\text{Forno aquecendo} \quad T_{gas}^{n+1} = T_{gas}^n + \Delta T_{Ramp up} \quad (21)$$

$$\text{Forno resfriando} \quad T_{gas}^{n+1} = T_{gas}^n - \Delta T_{Ramp down} \quad (22)$$

$$\text{Forno desligado} \quad m_{gas} C_{p,gas} \frac{T_{gas}^{n+1} - T_{gas}^n}{\Delta t} = (h_{1,int}^{R,n} + h_{1,int}^{CC,n}) S_1 (T_{1,1}^n - T_{gas}^{n+1}) + (h_{2,int}^{R,n} + h_{2,int}^{CC,n}) S_2 (T_{2,1}^n - T_{gas}^{n+1}) \quad (23)$$

2- Evolução da temperatura do teto do forno

$$T_{1,1} \quad m_{1,int} C_{p,1} \frac{T_{1,1}^{n+1} - T_{1,1}^n}{\Delta t} = (h_{1,gas}^{R,n} + h_{1,int}^{CC,n}) S_1 (T_{gas}^{n+1} - T_{1,1}^{n+1}) + h_{2,1}^{R,n} S_1 (T_{2,1}^n - T_{1,1}^{n+1}) + \frac{\lambda_1 (T_{1,1}^n)}{\Delta e_1} S_1 (T_{1,2}^n - T_{1,1}^{n+1}) \quad (24)$$

$$T_{1,j} \ (j=2,3,4) \quad m_{1,j} C_{p,1} \frac{T_{1,j}^{n+1} - T_{1,j}^n}{\Delta t} = + \frac{\lambda_1 (T_{1,j-1}^n)}{\Delta e_1} S_1 (T_{1,j-1}^{n+1} - T_{1,j}^{n+1}) - \frac{\lambda_1 (T_{1,j+1}^n)}{\Delta e_1} S_1 (T_{1,j+1}^n - T_{1,j}^{n+1}) \quad (25)$$

$$T_{1,5} \quad m_{1,5} C_{p,1} \frac{T_{1,5}^{n+1} - T_{1,5}^n}{\Delta t} = (h_{1,ext}^{R,n} + h_{1,ext}^{CC,n}) S_1 (T_{\infty} - T_{1,5}^{n+1}) + \frac{\lambda_1 (T_{1,4}^n)}{\Delta e_1} S_1 (T_{1,4}^n - T_{1,5}^{n+1}) \quad (26)$$

3- Evolução da temperatura na soleira do forno

$$T_{2,1} \quad m_{2,int} C_{p,2} \frac{T_{2,1}^{n+1} - T_{2,1}^n}{\Delta t} = (h_{2,gas}^{R,n} + h_{2,int}^{CC,n}) S_2 (T_{gas}^{n+1} - T_{2,1}^{n+1}) + h_{1,2}^{R,n} S_2 (T_{1,1}^{n+1} - T_{2,1}^{n+1}) + \frac{\lambda_2 (T_{2,1}^n)}{\Delta e_2} S_2 (T_{2,2}^n - T_{2,1}^{n+1}) \quad (27)$$

$$T_{2,j} \ (j=2,3,4) \quad m_{2,j} C_{p,2} \frac{T_{2,j}^{n+1} - T_{2,j}^n}{\Delta t} = + \frac{\lambda_2 (T_{2,j-1}^n)}{\Delta e_2} S_2 (T_{2,j-1}^{n+1} - T_{2,j}^{n+1}) - \frac{\lambda_2 (T_{2,j+1}^n)}{\Delta e_2} S_2 (T_{2,j+1}^n - T_{2,j}^{n+1}) \quad (28)$$

$$T_{2,5} \quad m_{2,ext} C_{p,2} \frac{T_{2,5}^{n+1} - T_{2,5}^n}{\Delta t} = (h_{2,ext}^{R,n} + h_{2,ext}^{CC,n}) S_2 (T_{\infty} - T_{2,5}^{n+1}) + \frac{\lambda_2 (T_{2,4}^n)}{\Delta e_2} S_2 (T_{2,4}^n - T_{2,5}^{n+1}) \quad (29)$$

S_1 é a superfície do teto e S_2 superfície da soleira.

Para a conservação do forno com temperatura da atmosfera praticamente constante, a evolução de temperatura interna na soleira e teto, equações da Eq.(24) a Eq.(29), após certo tempo com forno ligado, e em estado de regime permanente, têm comportamento similar ao da fase de carga de um circuito RC (resistor-capacitor). Depois de certo tempo submetido ao mesmo nível de temperatura da atmosfera interna do forno, as camadas internas da soleira e do teto assumem um estado de temperatura de “carga completa”, caracterizando regime permanente, ou seja, a energia recebida continuamente não reflete em variações de temperatura do refratário significativas.

3. AQUISIÇÃO DE DADOS

Com o intuito de aprimorar o estudo, melhorar o entendimento sobre a evolução de temperaturas no refratário e validar o modelo matemático desenvolvido, dados reais foram levantados e analisados detalhadamente.

3.1 Metodologia de coleta de dados de temperatura interna dos refratários

As características técnicas e as dimensões das diferentes camadas de materiais que compõem o revestimento refratário do forno foram retiradas das respectivas fichas técnicas. Com o intuito de aproximar o modelo matemático da condição real do forno, as demais informações necessárias foram levantadas de maneira experimental.

Para melhorar o entendimento da evolução de temperaturas no forno e validar o 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. A coleta desses valores de temperatura possibilitou a caracterização do fluxo de energia através do revestimento refratário. Todos os procedimentos para promover esta campanha foram cuidadosamente realizados para garantir a confiabilidade dos dados.

A 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 coletados pelos termopares, a cada intervalo de 15 minutos, foram armazenados em loggers.

Os locais 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 geral representativa. O forno de tratamento térmico 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 Fig. 2 apresenta um desenho esquemático do forno, ilustrando as zonas onde foram instalados os termopares.

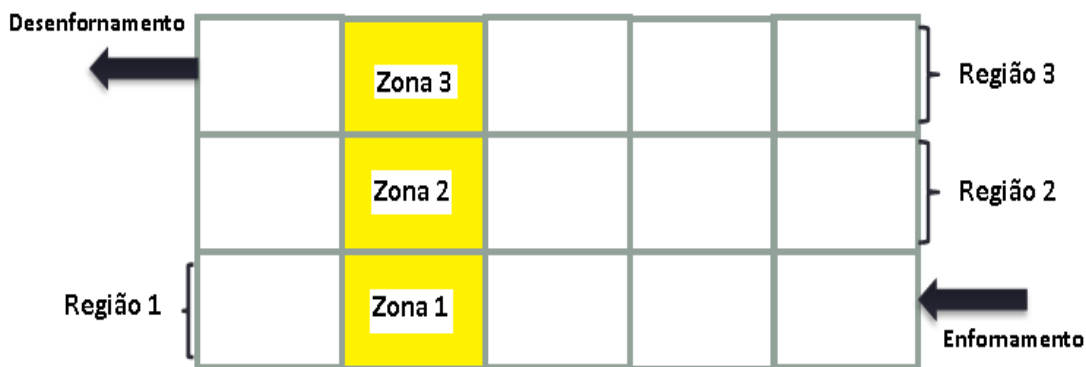


Figura 2. Desenho esquemático do forno com destaque aos pontos de coleta de temperatura interna no revestimento refratário.

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 por duas semanas, com poucos períodos sem registro de dados neste intervalo. Durante o período de coleta foram levantados dados para diferentes cenários do forno (*Ramp up*, *Ramp down*, *Turn off*, *Turn on* e *Conservação* a temperatura constante), possibilitando ter uma visão geral. A Fig. 3 apresenta as profundidades de instalação dos termopares no teto e na soleira.

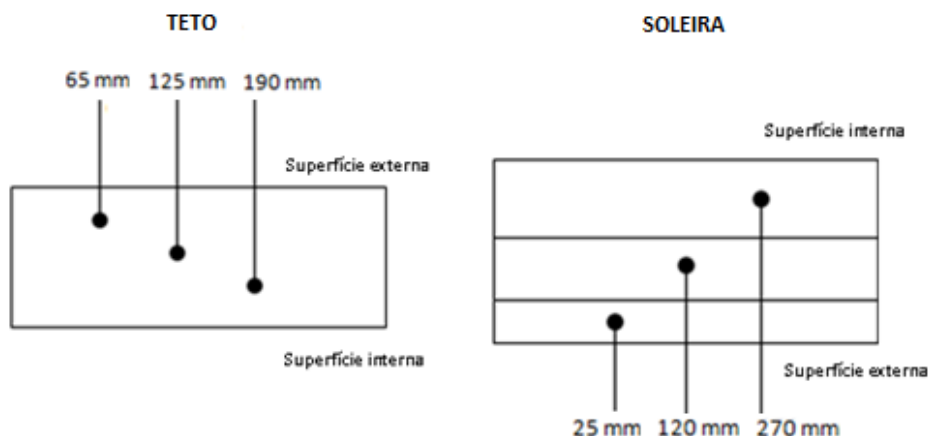


Figura 3. Pontos de coleta de temperatura interna no revestimento refratário do teto e soleira.

3.1.1. Resultados da análise de dados de temperatura dos refratários

Após a campanha de medições realizadas foi possível analisar profundamente os dados coletados com o objetivo de entender melhor o processo de aquecimento e resfriamento do forno, e aproximar o modelo matemático desenvolvido da condição real de funcionamento do equipamento. Alguns dados foram desconsiderados, pois se apresentaram inconsistentes, sugerindo possíveis erros nos instrumentos de medição ou na instalação dos termopares.

Inicialmente foram realizadas três comparações com os dados levantados. A Fig. 4 apresenta a evolução das temperaturas no forno durante uma semana, e serve como base para estas comparações. Os dados apresentados na Fig. 4 são relativos à Zona 1. Esta zona foi escolhida para representar o resumo de dados obtidos na campanha, pois se trata da maior zona do forno. O intuito deste trabalho é desenvolver um modelo matemático capaz de descrever o estado de temperaturas do forno para um cenário de início de produção após um período inativo, sem problemas de qualidade dos produtos e com controle de temperatura para reduzir o consumo de energia. Desta forma, a Zona 1 representaria a zona mais crítica, ou seja, estando pronta para receber produtos, as outras, por consequência, também estariam.

A primeira comparação que pode ser observada na Fig. 4 é sobre a evolução das temperaturas dos pontos de medidas internos da soleira e teto, em função da temperatura da atmosfera interna da zona considerada. Os valores de temperatura da atmosfera interna foram coletados por termopares no interior do forno, posicionados em pontos próximos à soleira e ao teto. Foi possível observar que, normalmente, os valores de temperatura coletados pelos termopares próximos ao teto são maiores que os coletados próximos à soleira, isto acontece devido ao escoamento do gás quente na direção do teto e também, pela maior proximidade dos queimadores ao teto. Em momentos de produção (forno cheio) a diferença entre a temperatura da atmosfera do forno medida próximo ao teto e à soleira é maior.

A segunda comparação é sobre a velocidade de aquecimento e resfriamento dos materiais refratários. O material do teto, composto de fibra cerâmica, com densidade e capacidade térmica diferentes dos materiais que constituem a soleira, que são à base de cimento refratário, responde mais rapidamente às variações de temperatura na atmosfera do forno. No momento de ligamento do forno, *Turn on*, o revestimento teto é aquecido aproximadamente três vezes mais rápido que a soleira. Notou-se também que as curvas de aquecimento e resfriamento do refratário do teto nas três profundidades analisadas seguem perfis semelhantes, o que pode ser explicado pela constituição homogênea deste revestimento. O mesmo comportamento não é observado no revestimento da soleira, pois como dito anteriormente, este é composto por três camadas de diferentes refratários.

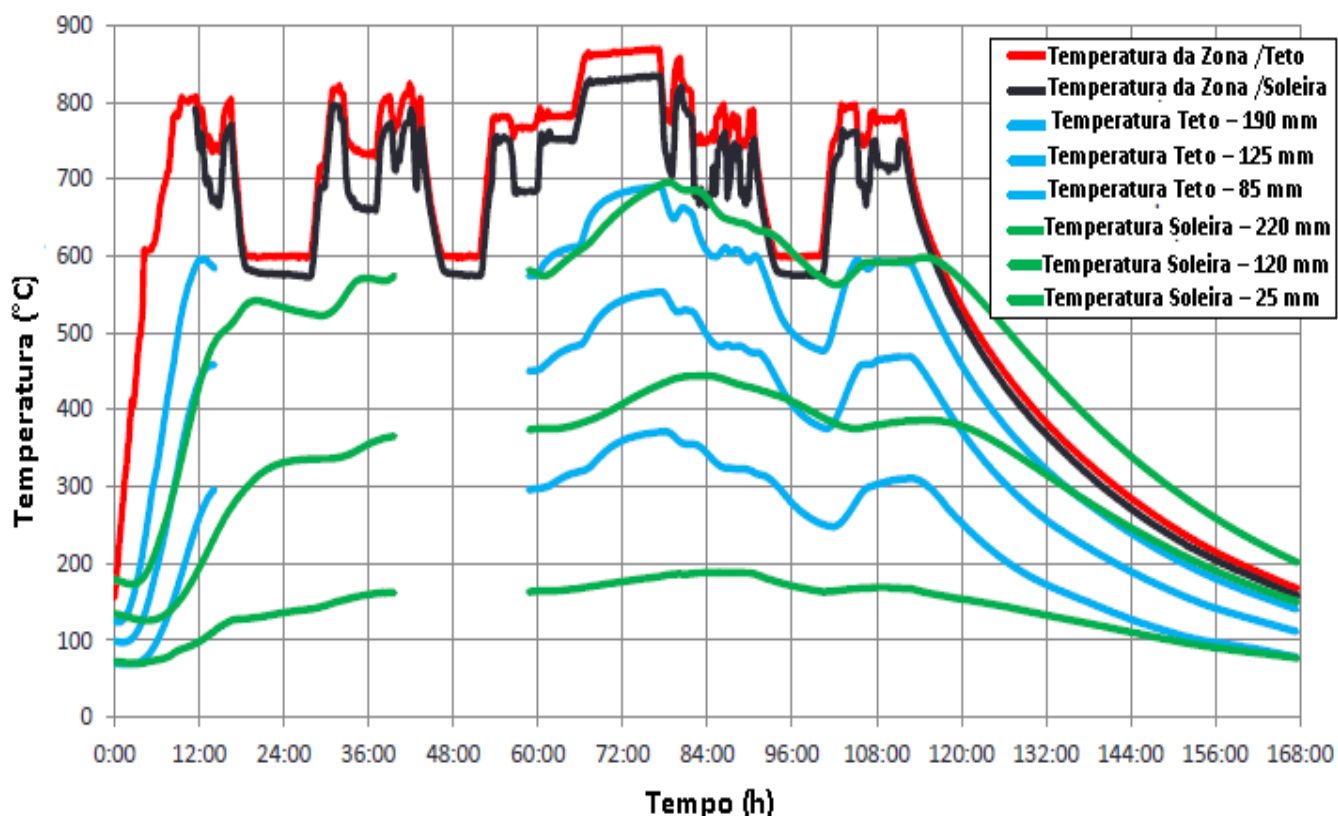


Figura 4. Comparação entre temperatura do teto e da soleira para a Região 1

A terceira comparação é relativa ao perfil de aquecimento do refratário da soleira e do teto para todas as zonas analisadas. Os dados coletados para as diferentes zonas apresentam evolução de temperatura com perfil semelhante para teto e soleira em todas as zonas analisadas.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A fim de validar os cálculos realizados pelo modelo matemático concebido neste estudo, os dados coletados durante a campanha de medição foram confrontados com as respostas oferecidas pelo modelo matemático.

4.1. Diferenças entre modelo e campanha de medição

Realizou-se a comparação entre as temperaturas reais e calculadas para o interior do teto do forno. Pois, as profundidades das temperaturas medidas pelos termopares e calculadas pelo modelo matemático são exatamente as mesmas (85 mm, 125 mm e 190 mm).

Com relação às temperaturas calculadas para o interior do revestimento refratário da soleira, composta por três camadas de materiais diferentes, com condutividades térmicas diferentes, considerou-se, por simplificação, uma condutividade térmica média. Também, as profundidades dos pontos interiores da soleira com temperatura medida e calculada pelo modelo foram diferentes, Fig. 5. Porém, para a temperatura localizada perto da superfície externa da soleira, a diferença de profundidade foi pequena (0 mm de profundidade no modelo, 25 mm de profundidade para temperaturas medidas), e os resultados do modelo são próximos às temperaturas reais. Desta forma, a comparação pode ser considerada para validação do modelo.

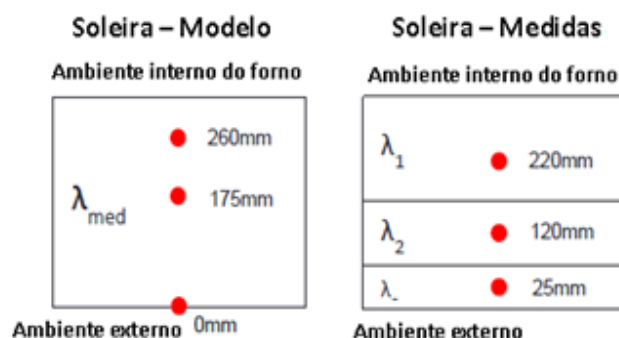


Figura 5. Diferenças entre modelo e campanha de medição para pontos considerados na soleira.

4.2. Metodologia para comparação de resultados

Para a comparação, durante os diferentes cenários, da evolução de temperatura no forno, os resultados do modelo matemático foram confrontados aos valores obtidos na campanha de medição para o tempo de uma semana. A evolução da temperatura da atmosfera do forno foi introduzida como dado de entrada para a rotina de cálculo do modelo. Para a situação de desligamento do forno, o dado de entrada é o período de forno desligado, assim o modelo matemático calcula a evolução da temperatura da atmosfera (resfriamento) ao longo do tempo baseado nas correlações estabelecidas após análise deste cenário.

4.3. Comparação entre resultados do modelo e medidas reais

A comparação entre os resultados obtidos pelo modelo matemático e valores de temperatura reais medidos, foi feita considerando a evolução de temperatura da atmosfera interna durante o período de uma semana para a Zona 1 e Zona 3. Estas zonas foram escolhidas pela maior confiabilidade dos dados levantados durante campanha de medição.

Considerando o teto do forno, para as duas zonas analisadas, os resultados apresentam valores de temperatura calculados, em todas as profundidades, próximos aos valores medidos. Desta forma, o modelo descreveu bem a evolução de temperatura real do forno ao longo dos diferentes cenários de evolução de temperatura da atmosfera interna. Em média, o erro relativo máximo ao longo da semana considerada é menor que 10%. Quanto à curva de resfriamento no momento de desligamento do forno, *Turn off*, houve diferenças entre o resfriamento nas duas zonas. Este fenômeno pode ser explicado por várias razões, como posicionamento da zona dentro do forno, a influência de queimadores e portas, e temperaturas de trabalho diferentes.

Os resultados obtidos para a soleira, devido à configuração um pouco diferente entre modelo e valores reais, apresentaram erro relativo um pouco maior que 30%. Entretanto, é possível observar que a evolução das temperaturas medidas e calculadas é bem semelhante, ou seja, os valores calculados seguem o mesmo perfil de evolução dos valores reais. Quando considerada a temperatura calculada pelo modelo para a superfície externa da soleira (0 mm de profundidade), que apresenta menor diferença entre modelo e temperatura real medida, os valores são próximos e o erro relativo é, em média, menor que 10%.

A disposição das temperaturas apresentadas na Fig. 6 adotou a lógica de que, quanto maior a profundidade do ponto com temperatura calculada, mais próximo este se encontra este da atmosfera do forno e maior é a temperatura do mesmo. Esta mesma comparação foi realizada para teto e soleira do forno para duas zonas consideradas, e serviu como base para o resumo dos resultados comparativos que é apresentado na Tab. 1.

Tabela 1. Resumo dos resultados da comparação entre modelo e valores reais de temperatura

<i>Zona 1 - Teto</i>	<i>Zona 3 - Teto</i>
Modelo 190 mm – Medidas 190 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.	Modelo 190 mm – Medidas 190 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.
Modelo 125 mm – Medidas 125 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.	Modelo 190 mm – Medidas 190 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.
Modelo 85 mm – Medidas 85 mm Evolução de temperaturas igual: turno on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.	Modelo 190 mm – Medidas 190 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.
<i>Zona 1 - Soleira</i>	<i>Zona 3 - Soleira</i>
Modelo 260 mm – Medidas 200 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 25%.	Modelo 260 mm – Medidas 270 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 30%.
Modelo 175 mm – Medidas 120 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 15%.	Modelo 175 mm – Medidas 120 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.
Modelo 0 mm – Medidas 25 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.	Modelo 0 mm – Medidas 25 mm Evolução de temperaturas igual: turn on/off, ramp up, conservação do forno em temperatura constante. Erro relativo máximo < 10%.

A Fig. 6 ilustra uma das comparações realizadas para a evolução das temperaturas no interior da soleira na Zona 1, em função da temperatura da atmosfera do forno ao longo do tempo.

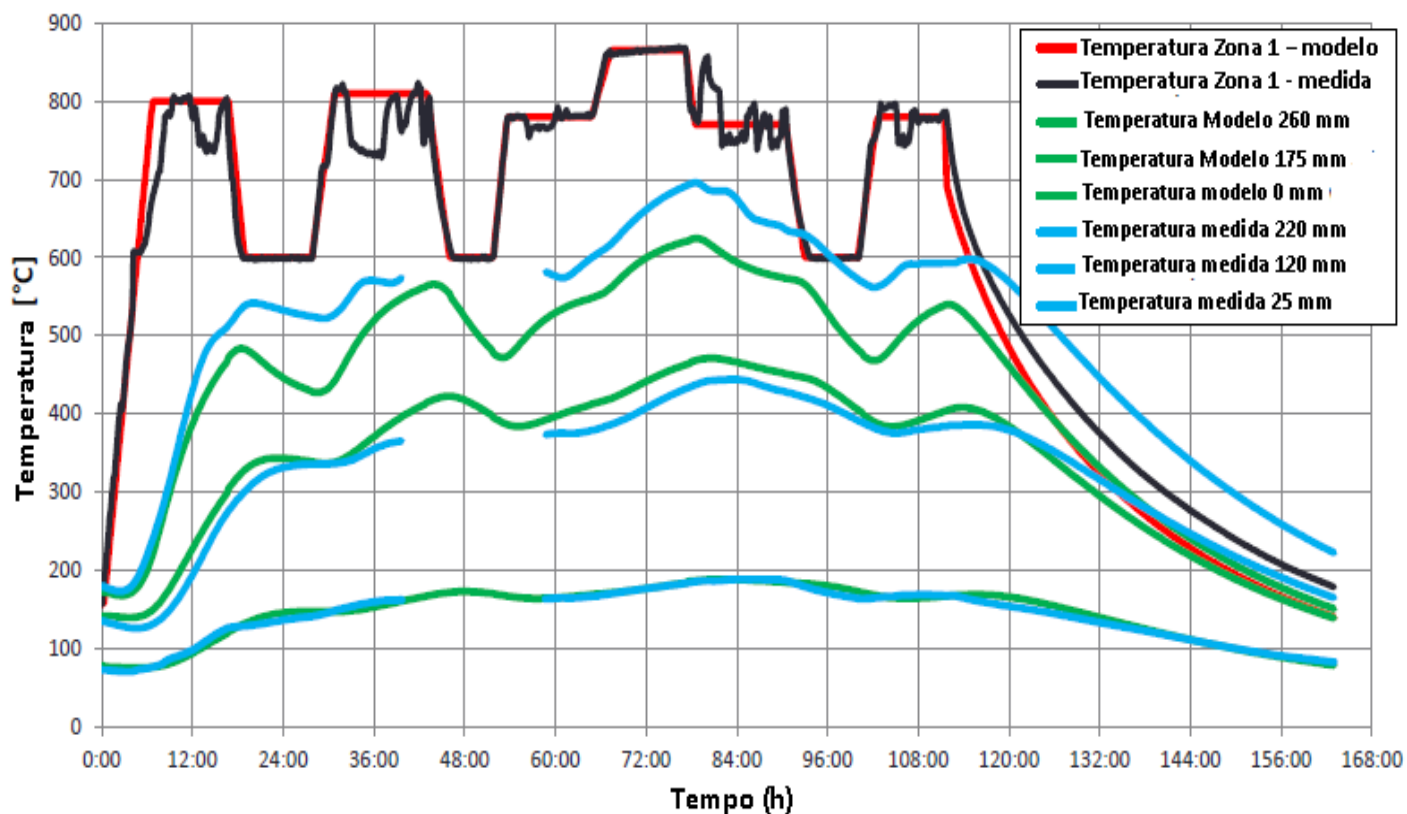


Figura 6. Comparação entre temperatura da soleira calculada pelo modelo e medida – Zona 1

5. DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DE TEMPERATURAS

Visando a aplicação prática do modelo matemático, e sua utilização de maneira mais simples possível, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação computacional baseada no modelo. O objetivo era que a evolução de temperaturas em diferentes pontos internos do revestimento refratário pudesse ser simulada.

5.1. Ferramenta computacional de simulação de temperaturas

A ferramenta de simulação para temperaturas internas do refratário foi desenvolvida com base no modelo matemático desenvolvido. Ela permitiu a simulação da evolução das temperaturas internas do teto e da soleira do forno em diversos cenários ao longo do tempo, em função da temperatura da atmosfera do forno (principal dado de entrada). Com este sistema é possível realizar a simulação das temperaturas internas do revestimento refratário em diferentes cenários e fazer uma análise comparativa.

5.2. Definição da condição de temperatura do refratário para início de produção

A principal resposta oferecida por esta ferramenta é o conhecimento das temperaturas internas do revestimento do forno após um período improdutivo. Avaliou-se a condição de temperatura do revestimento refratário do forno para início do processo produtivo com melhor qualidade do produto.

Para forno em regime permanente em relação à determinada temperatura de trabalho da atmosfera do forno, as temperaturas internas do material refratário se mantêm quase constantes. Para ligamento ou aquecimento do forno (*Turno on* ou *Ramp Up*) após um período sem produção, o ideal seria que o forno atingisse a condição de temperaturas internas do refratário quase constante, assim garante-se que não haveria competição por energia entre a massa do forno e a massa dos produtos. Observações realizadas com a utilização do simulador, principalmente para períodos de forno sendo ligado ou elevando consideravelmente a temperatura de sua atmosfera, permitiram definir uma condição de temperatura de regime quase permanente em que a produção poderia ser iniciada com menores riscos à qualidade do produto. A condição de regime quase permanente foi definida a partir de uma porcentagem da temperatura do ponto mais externo da soleira, em condição de regime permanente. As observações mostraram que quando a temperatura do ponto de menor profundidade da soleira atinge aproximadamente 65% da temperatura em condição de regime permanente, o forno pode ser considerado pronto para receber tubos. Esta condição se refere ao ponto mais externo do revestimento refratário da soleira, pois este necessita de maior tempo para aquecer em relação aos outros pontos de todo o revestimento do forno.

5.3. Utilização do simulador de temperaturas visando redução do consumo de energia

A definição da condição de temperatura do refratário para início de produção permitiu analisar criticamente estratégia de controle do forno. E assim, tornou-se importante para o planejamento do controle de temperatura do forno durante períodos sem produção.

A utilização da ferramenta permitiu acompanhar a evolução da temperatura do revestimento refratário ao longo do período improdutivo, e simular estratégias de controle da temperatura. Desta forma, o planejamento passou a ser feito para que o forno estivesse na condição necessária para início do processo produtivo no horário previsto, e com menor consumo de combustível durante o intervalo sem produção.

6. RESULTADOS E CONCLUSÃO

De maneira geral, os valores de temperatura calculados pelo modelo matemático desenvolvido apresentaram pequeno erro relativo em relação às temperaturas medidas. A comparação entre valores calculados e reais para o teto apresentaram bons resultados. Quanto ao revestimento da soleira, o modelo se aproxima 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 a definição da estabilidade do forno. O desenvolvimento do modelo matemático e sua aplicação em uma ferramenta computacional de simulação possibilitaram definir uma condição de regime quase permanente para retomada do processo produtivo. Definiu-se para esta condição que a temperatura do ponto mais externo do refratário da soleira em questão deve ser de aproximadamente 65% da temperatura calculada para a condição de regime permanente.

A definição da condição de temperatura do refratário do forno para retomada da produção permitiu melhor planejamento do controle de temperatura do forno. Desta forma, foi possível definir estratégias para retomada do processo produtivo do forno assegurando a condição de temperatura desejada, e controle de temperatura durante o período improdutivo otimizado visando redução do consumo.

O desenvolvimento do modelo matemático e a aplicação deste em uma ferramenta de simulação pode ser considerado bem sucedido, pois apresentou ganhos para a melhoria de qualidade dos produtos e redução do consumo de energia.

7. 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 durante o trabalho.

À 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.

Aos colegas de trabalho Kássio Nogueira Cançado e Stephano Joviano Miranda, pelo auxílio em várias etapas do estudo.

8. REFERÊNCIAS

Trinks, W., Mawhinney, M.H., Shannon, R.A., Reed, R.J., Garvey, J.R., Industrial Furnaces, sixth edition, Wiley – John Wiley and sons, INC., Hoboken, New Jersey 2004.

Taine J., Iacona E., Petit J-P., Transferts Thermiques – Introduction aux transferts d'énergie, quatrième édition, 4^a édition, Dunod., Paris 2008.

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.

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.

Mochida A, Kudo K, Mizutani Y, Hattori M, Nakamura Y. "Transient Heat Transfer Analysis in Vacuum Furnaces Heated by Radiant Tube Burners". Energy Conversion and Management Vol. 38, No. 10-13, pp 1169-1176. 1997.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho".

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

Arnaud-Guilhem de Loze, arnaud-guilhem.de_loze@centraliens.net¹

Luis Fernando Oliveira Rodrigues, luisfernando_or10@yahoo.com.br²

Dr. Lis Nunes Soares, lis.soares@vallourec.com²

¹Ecole Centrale Paris, Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France.

²Vallourec Tubos do Brasil, Av. Olinto Meireles, 65 - Barreiro de Baixo 30640-010 - Belo Horizonte - MG, Brasil.

Abstract. Furnaces are essential equipments of rolling and heat treatment processes of steel seamless pipes. To maintain production quality and reduce energy consumption, understanding furnace heat transfers through refractory materials is crucial. This paper presents a study about the thermal behavior in periods of no production of a heat treatment furnace of steel pipes. During those periods, the furnace is either turned off or either its atmosphere temperature is reduced to save energy. Understanding heat transfers through refractory materials enables to define furnace refractory temperature condition to guarantee production quality and contributes to save energy during no production periods. Thus, a mathematical model for temperature of furnace refractory materials was developed. A discretized method of heat transfer equations system is used to compute inside refractory materials temperatures evolution in function of furnace atmosphere temperature evolutions. The model was then validated from data of a measurement campaign; several thermocouples were installed at different depths within refractory materials and temperature evolutions were collected during about two weeks. Comparison between the model and measurements shows small relative differences for all furnace situations. The model facilitates the evaluation of furnace temperature atmosphere situations and their impact on production process, taking into account production quality, refractory materials maintenance and energy consumption. In particular, model results allow to define the needed temperature condition of refractory materials to guarantee production quality after a no production period. This condition is defined as the minimum temperature that the refractory material should have reached to guarantee production quality. To make the model easy to use by production managers, a computer-based tool was created. It permits to simulate temperature evolutions within the refractory materials in function of furnace internal atmosphere temperature situations. As the developed method was successful, its application to other plant furnaces is considered.

Keywords: Heat Transfer, Heat Treatment Furnaces, Refractory Materials