

# DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO PROCESSO DE REAQUECIMENTO PARA O FORNO WB2 DA LTQ DA ACESITA <sup>1</sup>

Luciano Lellis Miranda <sup>2</sup>

Márcio Ziviani <sup>3</sup>

Benjamin Fullin Júnior <sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho desenvolveu-se um modelo tridimensional para simular o aquecimento de placas no forno de reaquecimento do tipo soleira caminhante da Laminação de Tiras a Quente da Acesita S.A. No modelo a equação da conservação da energia foi resolvida numericamente para o interior das placas utilizando-se a técnica de diferenças finitas com formulação em Volumes de Controle. Estabeleceram-se as condições de contorno de fluxos de calor radiantes e convectivos nas superfícies das placas. O forno foi dividido em vários segmentos, de acordo com o número de placas em seu interior, dentro dos quais foram calculados os fluxos de calor radiante (através da resolução do circuito elétrico analógico da radiação) e convectivo. Validou-se o modelo com dados medidos no forno em Junho/2002. As temperaturas dos gases e das paredes refratárias, na seção de entrada do forno (recuperação), foram determinadas através de um balanço global de energia em cada segmento. Os perfis de temperatura obtidos apresentaram boa concordância com os dados medidos, com desvios da ordem de 3 a 5%. Nesta seção geralmente não existem muitos pontos de medição e a metodologia proposta apresenta uma boa alternativa para um adequado estabelecimento dos perfis de temperatura. O Modelo é uma importante ferramenta para estudos teóricos da influência de vários aspectos do processo de reaquecimento de placas, como por exemplo, espaçamento entre placas, comprimentos e posicionamento das placas. Além disso, através de seus resultados é possível um estudo mais coerente de ajustes necessários no modelo de controle “on-line” do forno.

**Palavras-chave:** Fornos de reaquecimento; Modelagem matemática; Simulação numérica.

## DEVELOPMENT OF A THREE-DIMENSIONAL SIMULATION MODEL FOR THE WB2 REHEATING FURNACE OF THE ACESITA HOT STRIP MILL

### Abstract

In this paper it was developed a three-dimensional Model to simulate the slabs reheating process in a walking beam furnace of the Acesita Hot Strip Mill. The energy conservation equation was numerically solved inside the slabs, by the finite difference technique with Control Volume formulation. It were determined the boundary conditions of radiant and convective fluxes in the slabs surfaces. The furnace was divided in several segments, according the number of slabs inside it. Inside each segment, the convective and radiant heat fluxes were calculated. The radiant fluxes were calculated by solution of the radiation analogical electric circuit. The Model was validated with data measured in the furnace in June/2002. The temperatures of gases and refractory walls, in the furnace beginning section (recuperative), were determined by a global energy balance in each segment. The found temperature profiles showed good agreement with measured data, with deviations between 3 to 5%. In this section, in general there are not many measurement points, and the proposed methodology shows a good alternative to a better determination of the temperature profiles. The Model is an important tool for theoretical studies of the influence of many aspects of the slabs reheating process, such as, spaces between slabs, length and positioning of slabs, etc. It is also possible a more coherent study of necessary adjustments in the on-line control model.

**Key words:** Reheating furnaces; Mathematical modeling; Numerical simulation.

<sup>1</sup> Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 17 a 20 de outubro de 2006, Curitiba – PR – Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Mecânica (Calor e Fluidos) – Metalurgista de Processo na Gerência Técnica da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica – Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica (Calor e Fluidos) – Gerente na Gerência de Reaquecimento de Placas da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA.

## 1. INTRODUÇÃO

O reaquecimento do material para a laminação a quente é uma das etapas críticas da produção de chapas e bobinas a quente. Esta fase é de extrema importância para obtenção de boas condições de laminação e de uma qualidade superficial adequada no produto final. Tudo isto deve ser obtido com a maior produtividade e o menor consumo energético possíveis. Segundo Hauck e Laia <sup>1</sup> “este tipo de processo consome muita energia, podendo atingir 15 % do consumo total de uma usina integrada. Uma otimização do consumo de energia pode ser atingida mantendo-se as placas o menor tempo possível em um forno à temperatura mais baixa possível, desde que sejam garantidas na saída do forno as condições de desenformamento exigidas pelo processo”.

A modelagem matemática permite de forma mais rápida e consideravelmente mais barata, o estudo de vários aspectos do processo de reaquecimento. Modelos físicos ou em escala industrial são na maioria dos casos de custos proibitivos e não conduzem isoladamente ao adequado conhecimento dos fenômenos envolvidos no processo <sup>2</sup>.

A simulação do aquecimento de placas e tarugos em fornos de reaquecimento é uma linha de pesquisa abordada a mais de 20 anos. Ao longo do tempo vários trabalhos já foram desenvolvidos sobre o tema. Muitos trabalhos abordam o problema calculando o aquecimento no interior das peças. Alguns autores tratam o problema de forma unidimensional, outros de forma bidimensional e alguns ainda, de forma tridimensional. Todos consideram as transferências de calor por radiação nas superfícies das peças e por condução no interior das mesmas. A transferência por convecção também é abordada por alguns autores.

O Grupo de Análise e Modelagem de Sistemas e Equipamentos Térmicos (GAMSET) da Escola de Engenharia da UFMG desenvolve pesquisas nesta área também a vários anos. Ao longo do tempo vários modelos de simulação de fornos industriais já foram desenvolvidos e, a cada um deles, novas características são agregadas. Nestes vários trabalhos o problema do aquecimento transiente de placas e tarugos foi inicialmente abordado de forma bidimensional, considerando as transferências de calor por radiação e convecção. Em um dos trabalhos mais recentes o modelo de aquecimento foi adaptado para simulação de paradas de produção. E no mais recente uma abordagem tridimensional do problema foi adotada. Na maioria dos casos os modelos foram validados com dados da literatura e em alguns casos com dados experimentais.

O objetivo deste trabalho é descrever um modelo de simulação numérica, desenvolvido em conjunto com o GAMSET do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da UFMG, para o forno de reaquecimento de placas Walking Beam 2 da Laminação de Tiras a Quente da Acesita S.A., em Timóteo – MG. Neste forno são processados os mais variados tipos de aço, tais como inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos; baixo, médio e alto carbono; carbono ligado; siliciosos GNO e GO.

## 2. PROCESSO DE AQUECIMENTO TRANSIENTE DE PLACAS

### 2.1. O Forno Walking Beam 2 da ACESITA

Os fornos de aquecimento são utilizados na preparação do material para um trabalho a quente. Sua função principal é elevar a temperatura dos produtos semi-acabados (placas) para sua deformação no processo de laminação.

No forno de soleira caminhante a carga é suportada pelos *skids*. Os *skids* são compostos de tubos revestidos de material refratário, por onde circula água para refrigeração de todo o conjunto. Alguns destes *skids* são fixos e outros móveis. É através do movimento sucessivo dos *skids* móveis que a carga avança gradativamente ao longo do forno.

O forno em questão divide-se em 4 seções: recuperação, pré-aquecimento, aquecimento e encharque (Figura 1). Na seção de recuperação não existem queimadores e parte da energia contida nos gases de exaustão, provenientes das demais seções, é transferida para a carga por radiação e por convecção. As zonas das demais seções são providas de queimadores, através dos quais entram no forno o combustível e o ar necessários à combustão.

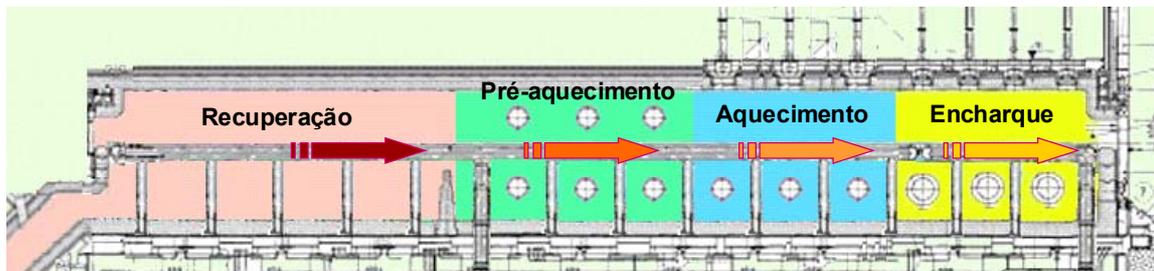


Figura 1 – Corte longitudinal do Forno Walking Beam.

As placas são enforadas na maior parte das vezes à temperatura ambiente e desenforadas depois de aquecidas a temperaturas entre 1080 °C e 1280 °C, dependendo do material processado. É também possível o enforamento a temperaturas acima da ambiental (entre 25 e 600°C). A capacidade nominal do forno WB é de 176 t/h e os combustível utilizado é o gás misto, composto de gás de alto forno enriquecido com GLP para 19,259 MJ/Nm<sup>3</sup>. A saída para a chaminé localiza-se logo abaixo da porta de enforamento, de tal modo que o escoamento dos gases de combustão ocorre em contracorrente ao deslocamento das placas.

### 2.2. O Processo de Reaquecimento de Placas (Modelo Matemático)

No processo de reaquecimento as placas são submetidas a uma atmosfera extremamente agressiva (altas temperaturas e ambiente oxidante). A transferência de calor no interior da placa se dá unicamente por condução. Nas superfícies das placas o processo é muito mais complexo, ocorrendo trocas de calor por radiação, convecção e condução. As trocas de calor por radiação ocorrem entre as superfícies das placas, os gases, a chama e as superfícies refratárias do forno (paredes, postes e *skids*). As trocas por convecção ocorrem entre as superfícies das placas e os gases do interior do forno. A condução ocorre entre as superfícies das placas e as almofadas (contatos) com os *skids*.

O cálculo do aquecimento transiente da placa no interior do forno é obtido pela resolução da equação da conservação da energia, juntamente com a condição inicial e as condições de contorno.

Na resolução deste problema são feitas as seguintes hipóteses:

- o movimento da carga no forno ocorre de forma intermitente de acordo com passos de tempos programados com base no ritmo de produção do forno;
- o efeito de isolamento térmico devido à formação de carepa é desprezível;
- o material da placa é isotrópico e homogêneo.

### 2.2.1. Equação de governo no interior da placa (Condução de Calor)

No interior da placa o aquecimento transiente é expresso pela equação da conservação da energia:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde  $\rho$  é massa específica,  $k$  é a condutividade térmica,  $c$  é o calor específico a pressão constante.

Na aplicação desta equação são feitas algumas considerações:

- os efeitos da energia potencial são desprezíveis;
- a geração de energia devido à oxidação na superfície da placa é compensada pelo aumento da resistência ao fluxo de calor através da camada de óxido<sup>3</sup>;
- as propriedades do material são dependentes da temperatura e seus valores obtidos de interpolações polinomiais de dados da literatura<sup>3</sup>.

### 2.2.2. Condição Inicial

A condição inicial é a temperatura de enformamento da placa  $T_0$ :

$$T = T_0, \text{ em } t = 0 \quad (2)$$

Na maioria dos casos a temperatura de enformamento é a temperatura ambiente.

### 2.2.3. Condições de Contorno

As trocas de calor entre uma placa e sua vizinhança podem ser tratadas como:

- fluxo de calor resultante do processo de troca por radiação da superfície da placa com os gases, as placas vizinhas e as superfícies do forno;
- fluxo de calor resultante do processo de troca de por convecção da superfície da placa com os gases; e
- fluxo de calor resultante do processo de troca por condução da superfície inferior da placa com os apoios dos *skids*.

As superfícies das placas recebem calor por radiação e convecção do forno:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q_r + q_c \quad (3)$$

em que  $n$  se refere ao vetor normal à superfície.

Nas regiões de apoio da placa sobre os *skids* esta perde calor por condução para os apoios, que por sua vez perdem calor por convecção para a água de refrigeração dos *skids*, segundo um fluxo considerado constante:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = q_s \quad (4)$$

onde  $y$  é a direção da espessura da placa.

### Transferência de Calor por Radiação das Paredes Refratárias e dos Gases para as Placas

Para o cálculo das trocas de calor por radiação algumas considerações devem ser feitas:

- as chamas são consideradas não luminosas;
- numa mesma seção as paredes laterais superiores e teto do forno ou paredes laterais inferiores e soleira do forno apresentam a mesma temperatura, e estas superfícies se comportam como cinzentas;
- o gás é um meio que não reflete e a identidade de Kirchhoff pode ser aplicada, ou seja,  $\alpha_g + \tau_g = 1 = \varepsilon_g + \tau_g$ , onde  $\alpha_g$ ,  $\tau_g$  e  $\varepsilon_g$  são, respectivamente, a absorptividade, a transmissividade e a emissividade do gás.

Uma das dificuldades nos cálculos das trocas de calor radiante é a modelagem das trocas entre os gases e as demais superfícies presentes no forno. Na maioria dos casos o conceito de comprimento efetivo de feixe é utilizado ao calcular a emissividade dos gases ( $\varepsilon_g$ ). Porém para isto os gases são considerados isotérmicos, o que não é muito representativo da situação encontrada no interior de fornos de reaquecimento. Normalmente as temperaturas, tanto dos gases quanto das paredes refratárias, variam entre 700 °C e 1300 °C ao longo do comprimento do forno. Silva propôs uma metodologia adequada para a realidade de um forno de reaquecimento<sup>4</sup>. Em sua metodologia o forno é dividido em vários segmentos isotérmicos limitados por superfícies (paredes) fictícias. Dentro de cada um destes segmentos a placa troca calor com as paredes refratárias, com os gases e com suas superfícies fictícias.

Neste trabalho os cálculos das trocas de calor radiantes baseiam-se na metodologia desenvolvida por Silva<sup>4</sup>. A Figura 2 mostra um esquema da divisão do forno em vários segmentos, dentro dos quais realiza-se a análise das trocas de calor.

Para a representação do fluxo líquido de calor radiante,  $q_r$ , é adotado o método de análise por circuitos proposta por Oppenheim em 1956<sup>5</sup> aplicado dentro de cada um dos segmentos do forno. Representa-se na Figura 3 o circuito analógico para a radiação no interior de um segmento. Consideram-se as paredes fictícias como paredes gasosas e se comportando como superfícies cinzentas.

O poder emissivo é dado pela seguinte equação:

$$E = \sigma T^4 \quad (5)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ) e  $T$  é temperatura absoluta.

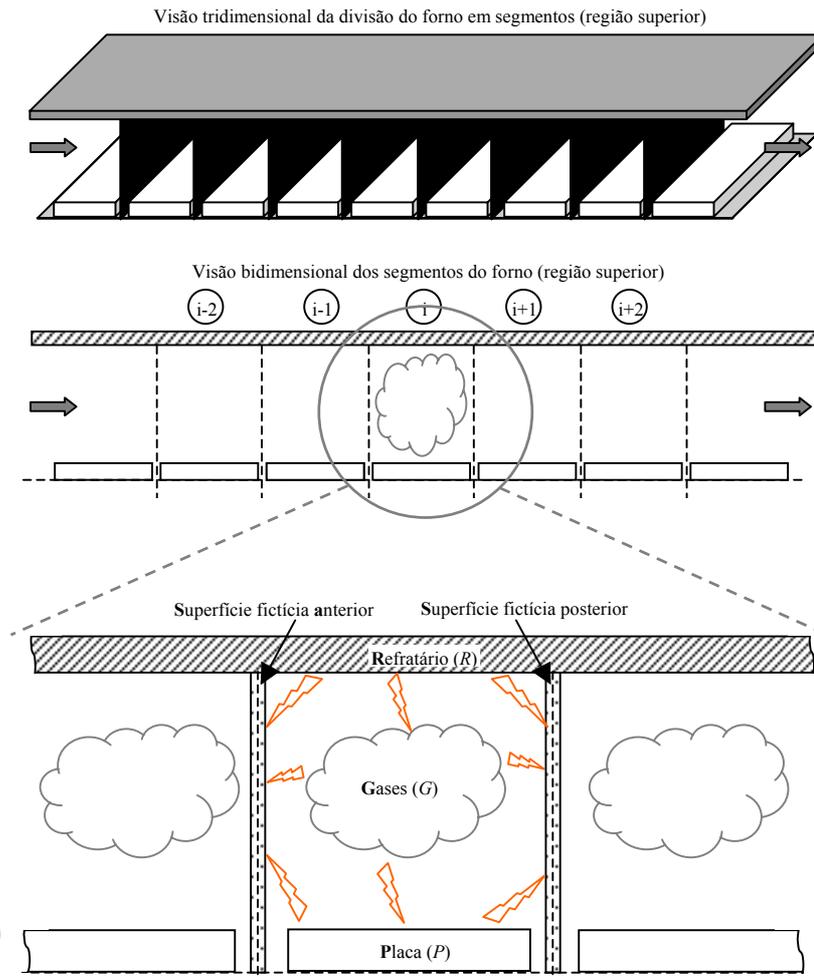
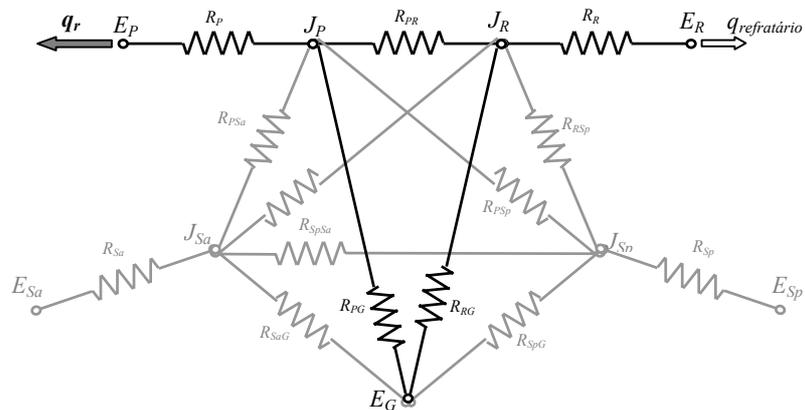


Figura 2 – Segmentos do forno para cálculos das trocas de calor radiantes.



$E_P, E_R, E_G, E_{Sa}$  e  $E_{Sp}$  são os poderes emissivos, respectivamente, da placa, do refratário, dos gases, das superfícies (paredes) fictícias anterior e posterior;

$J_P, J_R, J_{Sa}$  e  $J_{Sp}$  são as radiosidades, respectivamente, da placa, do refratário, das superfícies fictícias anterior e posterior;

$R_P, R_R$  e  $R_G$  são as resistências superficiais, respectivamente, da placa, do refratário e dos gases;

$R_{PG}, R_{PR}, R_{PSa}$  e  $R_{PSp}$  são as resistências espaciais entre a placa e, respectivamente, os gases, o refratário, as superfícies fictícias anterior e posterior;

$R_{RG}, R_{RSa}$  e  $R_{RSp}$  são as resistências espaciais entre o refratário e, respectivamente, os gases, as superfícies fictícias anterior e posterior;

$R_{GSa}$  e  $R_{GSp}$  são as resistências espaciais entre os gases e, respectivamente, as superfícies fictícias anterior e posterior.

$R_{SaSp}$  é a resistência espacial entre as superfícies fictícias anterior e posterior;

$q_{refratário}$  é o fluxo líquido de calor condutivo e convectivo trocado com o refratário;

$q_r$  é o fluxo de calor radiante para a placa.

Figura 3– Circuito analógico para a radiação no interior de um segmento do forno.

As várias resistências ( $R$ ) e fluxos térmicos ( $q$ ) apresentados na Figura 3 são descritos a seguir. Nas equações 6 a 8  $\varepsilon$  é a emissividade da “superfície”,  $A$  é a área de troca térmica e  $F$  é o fator de forma (ou de visão) entre as “superfícies”; os índices inferiores  $P$ ,  $R$ ,  $G$ ,  $Sa$  e  $Sp$  se referem, respectivamente, à placa, às paredes refratárias, aos gases e às superfícies fictícias anteriores e posteriores.

- Resistências superficiais:

$$R_P = \frac{1 - \varepsilon_P}{\varepsilon_P A_P}, R_R = \frac{1 - \varepsilon_R}{\varepsilon_R A_R}, R_{Sa} = \frac{1 - \varepsilon_{Sa}}{\varepsilon_{Sa} A_{Sa}}, R_{Sp} = \frac{1 - \varepsilon_{Sp}}{\varepsilon_{Sp} A_{Sp}} \quad (6)$$

- Resistências espaciais ou geométricas:

$$R_{PR} = \frac{1}{A_P F_{PR} (1 - \varepsilon_G)}, R_{PSa} = \frac{1}{A_P F_{PSa} (1 - \varepsilon_G)}, R_{PSp} = \frac{1}{A_P F_{PSp} (1 - \varepsilon_G)} \quad (7a)$$

$$R_{RSa} = \frac{1}{A_R F_{RSa} (1 - \varepsilon_G)}, R_{RSp} = \frac{1}{A_R F_{RSp} (1 - \varepsilon_G)}, R_{SpSa} = \frac{1}{A_{Sp} F_{SpSa} (1 - \varepsilon_G)} \quad (7b)$$

$$R_{PG} = \frac{1}{A_P F_{PG} \varepsilon_G}, R_{RG} = \frac{1}{A_R F_{RG} \varepsilon_G}, R_{SaG} = \frac{1}{A_{Sa} F_{SaG} \varepsilon_G}, R_{SpG} = \frac{1}{A_{Sp} F_{SpG} \varepsilon_G} \quad (7c)$$

- Fluxo líquido de calor condutivo e convectivo que sai através paredes refratárias:

$$q_{refratário} = q_{condutivo}^{refratário} - q_{convectivo}^{refratário} \quad (8)$$

### Transferência de Calor por Convecção dos Gases para as Placas

O fluxo de calor por convecção para a placa é expresso pela lei de Newton do resfriamento:

$$q_c = h (T_g - T_s) \quad (9)$$

onde  $T_s$  e  $T_g$  são, respectivamente, as temperaturas da superfície da placa e do gás circunvizinho e  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

### Cálculo da Temperatura do Gás no Segmento

No circuito analógico da radiação mostrado na Figura 3 assume-se que a temperatura do gás é conhecida. Nas seções de pré-aquecimento, aquecimento e encharque as temperaturas das paredes refratárias são conhecidas através das medições por termopares no forno. As temperaturas dos gases foram então, iterativamente ajustadas de forma que as temperaturas medidas das paredes refratárias fossem obtidas.

Entretanto, na seção de recuperação, a inexistência de queimadores e a maior proximidade da entrada do forno geram grandes variações de temperaturas. Além disso, não se conhece satisfatoriamente a temperatura, pois somente alguns pontos ao longo desta seção são medidos e, em muitos casos, as medições não representam diretamente a temperatura desejada. Em virtude disso, um cálculo mais apurado das temperaturas do gás nesta seção é necessário. Optou-se, neste trabalho, por calcular a cada iteração a temperatura em cada segmento considerado através de um balanço de energia em seu interior.

### 2.3. Procedimento Numérico

O problema do aquecimento de placas de aço durante sua passagem por um forno de reaquecimento é, neste trabalho, resolvido numericamente pelo método de Diferenças Finitas com formulação em Volumes de Controle desenvolvido por Patankar<sup>6,7</sup>. Um sistema de equações é obtido pela aplicação das equações governantes aos volumes de controle. Neste trabalho a resolução das equações discretizadas é realizada através do programa C3D, elaborado por Silva<sup>4</sup>. Este programa consiste em uma versão tridimensional do programa CONDUCT<sup>6,7</sup> e segue a mesma filosofia e arquitetura do mesmo.

### 2.4. Procedimento de Cálculo

O forno é dividido em segmentos correspondentes a cada placa no forno. Dentro de cada segmento são determinadas as condições de contorno (radiação e convecção) que são atribuídas às placas para resolução da equação da energia. As temperaturas do gás e das paredes refratárias em cada segmento do forno são recalculadas ao final de cada iteração.

As iterações são interrompidas quando as variações no campo de temperaturas no interior das placas e no perfil de temperaturas do gás e das paredes refratárias se tornam não significativas.

## 3. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para utilização do Modelo na análise teórica do processo é necessário inicialmente que este seja validado. Neste caso a validação foi realizada com os dados coletados durante um experimento com uma “placa de teste”, realizado no forno de reaquecimento de placas Walking Beam 2 da ACESITA em Junho/2002.

O sistema de medição usado neste experimento é constituído de um registrador (**Data Logger**), isolado termicamente através uma barreira térmica evaporativa e mantas refratárias, e de termopares tipo K com isolamento mineral. Este conjunto entra no forno montado em uma “placa de teste” e armazena os valores medidos em uma memória durante sua passagem pelo mesmo.

A condição de processamento dos aços inoxidáveis austeníticos foi escolhida para o teste. O forno foi preparado com as temperaturas e o ritmo de produção normais destes aços. Com o forno devidamente estabilizado a “placa de teste” foi enfiada e passou a registrar as temperaturas durante seu percurso pelo forno. Ao final do processo de aquecimento a “placa de teste” foi desenfiada e o registrador de temperatura extraído. Os dados coletados foram recuperados e transferidos para um computador, através do qual a análise de resultados passou a ser realizada. Ao mesmo tempo outras informações do processo foram coletadas: temperaturas e vazões de combustível das zonas, posições da placa ao longo do comprimento do forno, entre outros.

Pela análise dos dados obtidos observou-se uma concordância muito boa entre os valores calculados e medidos para a temperatura média da placa. Baseado nisto considerou-se o modelo validado, sendo este capaz simular de forma adequada o processo de reaquecimento de placas no forno de soleira caminhante.

## 4. RESULTADOS DO MODELO

### 4.1. Temperatura do gás na seção de recuperação

A Figura 4 apresenta os perfis calculados para as temperaturas do gás e das paredes refratárias ao longo do forno, e as temperaturas medidas no forno. As posições para as quais as temperaturas na seção de recuperação foram calculadas correspondem às posições onde os termopares estão instalados ao longo do comprimento da mesma.

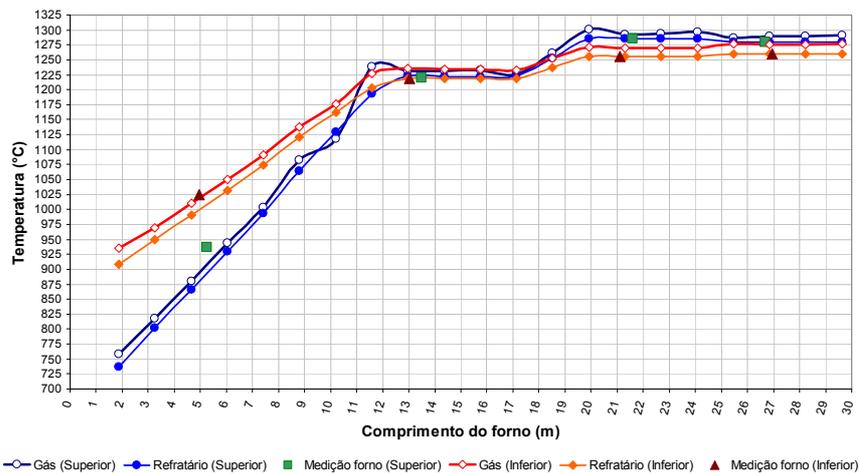


Figura 4 – Perfis de temperatura dos gases e das paredes refratárias ao longo do comprimento do forno.

### 4.2. Curva de aquecimento da placa no forno

A Figura 5 mostra a curva de aquecimento obtida para as condições de teste consideradas.

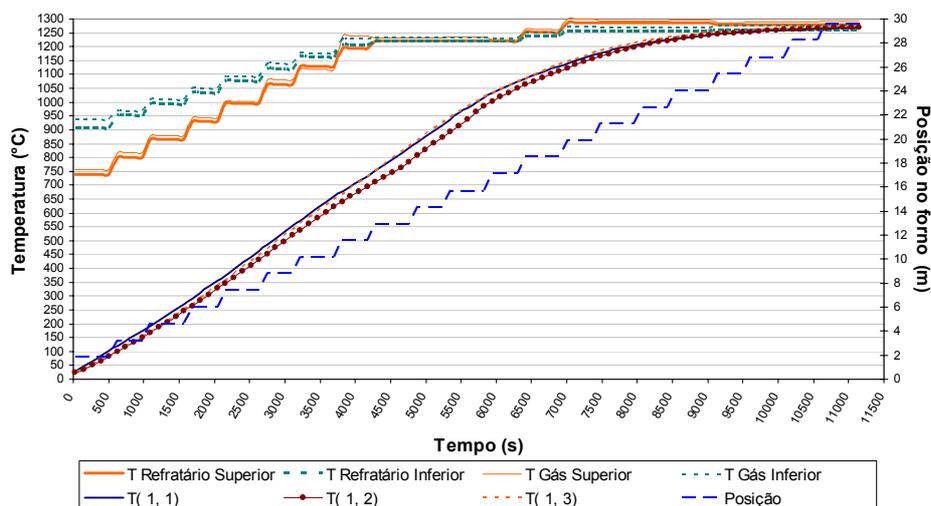


Figura 5 – Evolução das temperaturas no interior da placa.

Na Figura 5 são mostradas as evoluções de temperaturas em 3 pontos da placa: T(1,1), T(1,2) e T(1,3), que se localizam respectivamente a 50, 100 e 150 mm da face inferior da placa. Esta é uma curva típica obtida com a utilização deste modelo, onde se verificam as evoluções das temperaturas em alguns pontos da placa. Pode-se perceber que os pontos localizados mais próximos às superfícies

da placa,  $T_{(1,1)}$  e  $T_{(1,3)}$  apresentam temperaturas maiores que aquele localizado em seu centro,  $T_{(1,2)}$ , e isto está fisicamente coerente com o processo, já que a energia flui de fora para dentro das placas através de suas faces.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo tridimensional capaz de simular adequadamente o aquecimento de placas no forno de reaquecimento de placas Walking Beam 2 da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA. As temperaturas do gás e das paredes refratárias, nos segmentos da seção de entrada do forno, foram recalculadas de acordo com um balanço global de energia em cada um destes. Os perfis de temperatura obtidos apresentaram boa concordância com os dados medidos, com desvios da ordem de 3 a 5%. Como nesta seção do forno geralmente não existem muitos pontos de medição, a metodologia proposta apresenta uma boa alternativa para um adequado estabelecimento dos perfis de temperatura, evitando-se assim erros grosseiros na estimativa destes perfis.

O Modelo é uma importante ferramenta para estudo teórico do processo de reaquecimento e para ajustes do modelo de controle do forno. As variações de vários aspectos do processo podem ser simuladas e estudadas para uma melhor definição de correções nos padrões do mesmo.

## REFERÊNCIAS

- 1 HAUCK, G. A. C.; LAIA, L. L. **Fornos de reaquecimento**. São Paulo: ABM, 2000. Maio.
  - 2 KLIMA, R. Improved knowledge of gas and heat transfer in reheating furnaces. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v.26, p.25-32, 1997.
  - 3 SILVA, L. B. **Modelamento matemático do aquecimento de barras cilíndricas de aço em um forno de soleira rotativa**. Belo Horizonte, 1996. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
  - 4 SILVA, R. J. **Simulação numérica do aquecimento tridimensional de cilindros e placas em fornos de soleira caminhante**. Belo Horizonte, 2001. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
  - 5 HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**. São Paulo: McGraw-Hill, 1983.
  - 6 PATANKAR, S. V. **Computation of conduction and duct flow heat transfer**. Maple Grove, Minnesota: Innovative Research, Inc., 1991. 354p.
  - 7 PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Washington: Hemisphere Publishing Corp., 1980. 197p.
  - 8 MIRANDA, L. L. **Análise do problema da convecção térmica no interior de fornos de reaquecimento**. Belo Horizonte, 2006. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
-