

SIMULAÇÃO DO AQUECIMENTO DE TARUGOS DE AÇO EM UM FORNO DE REAQUECIMENTO – MODELO EM TEMPO REAL

Cynara V. Magalhães – cynara@demec.ufmg.br

Márcio Ziviani – ziviani@demec.ufmg.br

Ricardo J. Silva – junco@demec.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte, MG, Brasil

***Resumo.** No presente trabalho, investiga-se o aquecimento de tarugos de aço em um forno de reaquecimento de soleira caminhante. A partir de um modelo numérico validado pela confrontação de dados experimentais obtidos na indústria, é simulado o aquecimento de toda a carga no interior do forno em tempo real. São apresentadas temperaturas de todos os tarugos no forno em tempos distintos, com o objetivo de avaliar o aquecimento diferenciado das peças durante o teste. O conhecimento do processo térmico permite controlar a operação do forno visando economizar energia e melhorar a qualidade do produto final.*

***Palavras-chave:** Forno de reaquecimento, Soleira caminhante, Volumes finitos, Indústria siderúrgica*

1. INTRODUÇÃO

Os fornos de reaquecimento são utilizados para aquecimento do aço preparando-o para um trabalho a quente. Sua função é aumentar a temperatura dos produtos semi-acabados, tarugos ou placas, até que o aço torne-se suficientemente plástico para ter-se uma economia do trabalho de laminação ou forjamento na qual a seção da peça é reduzida. Estes fornos são projetados para aquecer o aço uniformemente, até a temperatura adequada por um espaço de tempo fixo.

Neste trabalho estuda-se o processo de reaquecimento no forno de soleira caminhante (walking beam), Italmimpianti, em operação na laminação contínua de tubos sem costura da Usina Barreiro da Mannesmann S. A., em Belo Horizonte.

O algoritmo anteriormente desenvolvido analisava o aquecimento de uma única barra e tinha como variável independente a posição da mesma ao longo do forno ou o tempo gasto para a barra atingir essa posição, o referencial estava localizado na própria barra. Apesar desse resultado ser importante, o mesmo impedia a observação da carga (67 barras) ao longo do tempo durante a operação do forno. Uma operação implica no aquecimento de diferentes materiais, com raios e comprimentos variados que impõe diferentes ritmos de produção. Além disso, ocorrem paradas imprevisíveis devido a problemas na linha de produção nas fases subsequentes ao aquecimento.

No algoritmo desenvolvido o modelo anteriormente definido é utilizado simultaneamente para cada posição do forno, ao longo do tempo, ou seja, o referencial é localizado fora do forno. Isso permite o controle do aquecimento de todo o material enfiado tendo como dados de entrada aqueles de operação do equipamento.

O objetivo dessa nova versão do código é controlar a operação do forno em tempo real. Permitindo aos operadores os procedimentos necessários para manter a qualidade do material processado.

O forno, mostrado na Fig. 1, tem 21,45 m de comprimento útil de aquecimento, 8,90 m de largura interna e 5,15 m de altura. Aquece, simultaneamente, duas filas paralelas com 67 posições cada. A carga é composta de tarugos de aço de diâmetro entre 180 a 230 mm e comprimento entre 1,90 e 6,00 m, sendo que para comprimentos acima de 4,00 m as duas filas operam sincronizadas, como apenas uma. As peças são enfiadas à temperatura ambiente e desenfiadas depois de aquecidas a uma temperatura de 1240°C a 1280°C, dependendo do material processado.

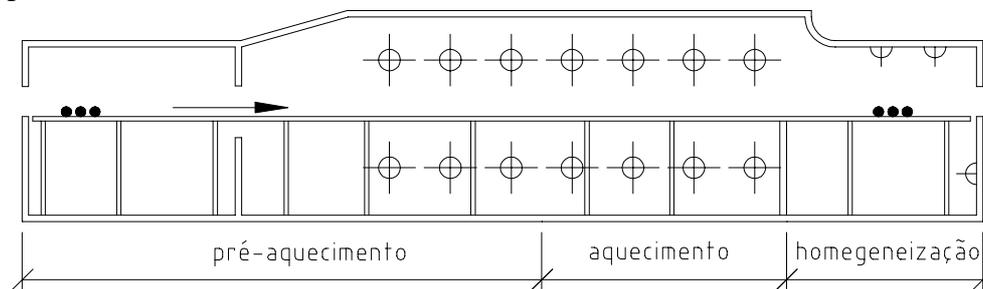


Figura 1 - Corte do forno Italimpianti.

O controle da temperatura no interior do forno é feito pela diferença entre um valor pré-fixado (set-point) e o valor medido por uso de termopares Chromel-Alumel, encapsulados num tubo cerâmico, instalados nas paredes e teto do forno. O sistema, com base nesta diferença, atua diretamente nas válvulas de controle dos queimadores, aumentando ou diminuindo a entrada de combustível e ar para a combustão. No forno distingui-se três regiões distintas. O pré-aquecimento, onde o material é aquecido por convecção e radiação, a região de aquecimento onde a presença dos queimadores tornam a radiação térmica predominante e finalmente a região de homogeneização cujo objetivo é uniformizar as temperaturas da carga garantindo uma temperatura homogênea no desenfiamento.

Os problemas que ocorrem no aquecimento do aço são: perdas do material na superfície por oxidação e descarbonetação, tensões térmicas e superaquecimento.

Conquistar a qualidade do aquecimento implica em conhecer primeiramente o comportamento térmico da barra ao longo do forno. Neste trabalho é demonstrado o desenvolvimento e validação de um modelo numérico capaz de prever o campo de temperaturas de um tarugo de aço sendo aquecido em um forno de reaquecimento, semelhante ao trabalho de Lindholm e Leden (1999), num forno do tipo empurrador. O objetivo final da simulação computacional é de adequar as temperaturas do gás do forno para que a carga tenha uma boa homogeneidade térmica, baixas perdas por oxidação e descarbonetação, com o menor consumo energético envolvido para a construção de um sistema de controle otimizado do forno como relata Fontana et alii, (1983).

2. MODELAMENTO MATEMÁTICO

Dentro do forno de reaquecimento a barra cilíndrica é envolvida por uma atmosfera composta de gases provenientes da queima de gás natural ou gás misto (gás natural e de alto

forno) a temperaturas entre 700 e 1300°C. O processo térmico pode ser descrito por um balanço de energia conforme apresentado a seguir (Silva, 1996).

2.1 Equação de governo

O processo de transferência de calor por condução no interior da barra, admitindo-se o material da barra isotrópico e homogêneo, em regime transiente, para um sistema bidimensional em coordenadas cilíndricas axissimétricas, pode se descrito pela equação da energia da seguinte forma:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} \quad (1)$$

em que T é a temperatura, c o calor específico, ρ a massa específica e k a condutividade térmica da barra de aço, variáveis com a temperatura.

Como o aquecimento da barra é feito uniformemente ao longo de sua superfície não há variação da temperatura na direção angular.

2.2 Condição inicial

Na entrada do forno considera-se a temperatura da barra uniformemente distribuída, ou seja:

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

sendo T_0 a temperatura da barra na entrada do forno.

2.3 Condições de contorno

Considera-se o eixo do cilindro como uma região de simetria, portantoo:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ para } 0 \leq z \leq L, r = 0 \quad (3)$$

A superfície da barra troca calor por convecção com o gás e por radiação com o gás, com as superfícies internas das paredes do forno e com as barras vizinhas. Isso é representado por:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = q_r + q_c \text{ para } r = R \text{ e } 0 \leq z \leq L \quad (4)$$

em que q_r é o fluxo de calor por radiação, q_c o fluxo de calor por convecção.

O escoamento dos gases de combustão pode ser considerado laminar, já que em todo o comprimento do forno encontramos número de Reynolds (Re_D) da ordem de 10^3 . A troca de calor por convecção entre o gás e a carga pode ser calculada pela correlação de Zhukauskas para o escoamento transversal sobre cilindros (Incropera e DeWitt, 1990):

$$\overline{Nu}_D = 0,26 Re_D^{0,6} Pr^{0,37} \quad (5)$$

na qual \overline{Nu}_D é o número de Nusselt médio, Re_D o número de Reynolds, ambos baseados no diâmetro das barras e nas vazões da mistura ar combustível, e Pr o número de Prandtl do gás de combustão.

Para determinação dos números de Reynolds as velocidades dos gases de combustão foram calculadas a partir das vazões de ar e gás consumidos pelos queimadores localizados nas diversas zonas do forno. Os valores dessas vazões de pré-aquecimento, aquecimento e homogeneização são respectivamente 22640, 19640 e 10640 m³/h.

O fluxo de calor por radiação em uma barra é calculado pelo método de análise por circuito das trocas entre o gás de combustão, as paredes do forno e as barras vizinhas (Incropera e DeWitt, 1990), com as seguintes considerações:

- a perda pelas paredes do forno é conhecida,
- o gás de combustão é homogêneo, sua temperatura é constante na seção transversal e conhecida em cada posição do forno;
- a emissividade do gás de combustão é determinada pela metodologia de Hottel;
- a emissividade das barras é constante e igual a 0,8 e a temperatura das superfícies das barras vizinhas são consideradas uniformes.

A condição de contorno radiativa é linearizada e os valores de h_r são calculados pelo algoritmo desenvolvido. As contribuições da radiação e convecção e o número de Biot podem ser observadas na Fig. 2.

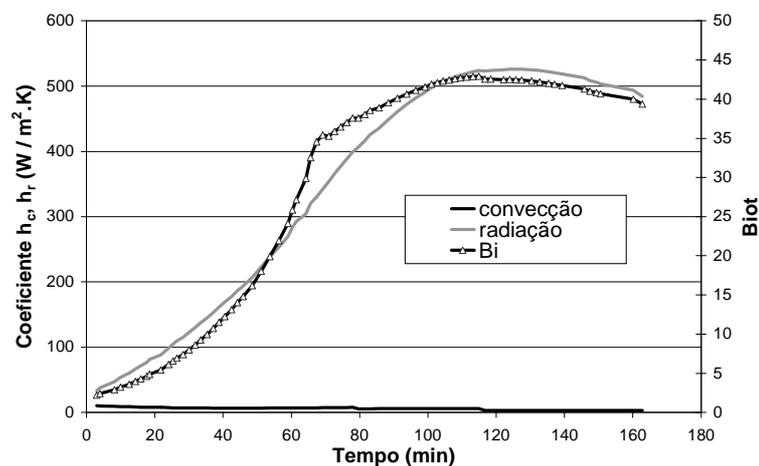


Figura 2 - Número de Biot e coeficientes de radiação e convecção, ao longo do tempo em que o tarugo permaneceu no interior do forno.

3. VALIDAÇÃO

Neste trabalho utiliza-se o método de volumes finitos descrito por Patankar (1980). O sistema de equações algébricas resultante é resolvido iterativamente pelo algoritmo TDMA linha por linha com correção por blocos. A cada iteração as propriedades físicas do aço (k , c e ρ) são redefinidas no domínio computacional. O ciclo é então repetido até a obtenção da convergência, que é atingida quando o máximo resíduo local for menor que 10^{-5} . Utiliza-se formulação implícita de interpolação na coordenada temporal apresentada no programa “UNSTEAD” desenvolvido por Ziviani e Paula (1993). No início de cada iteração temporal o campo de temperatura é inicializado com as temperaturas encontradas no instante anterior.

O algoritmo desenvolvido utilizou um sistema de coordenadas axissimétricas com 21 malhas na direção radial e 7 malhas na direção axial. O teste de malhas realizado a partir dos valores acima até uma malha de 35 X 35 malhas apresentou desvios inferiores a 0,3 %.

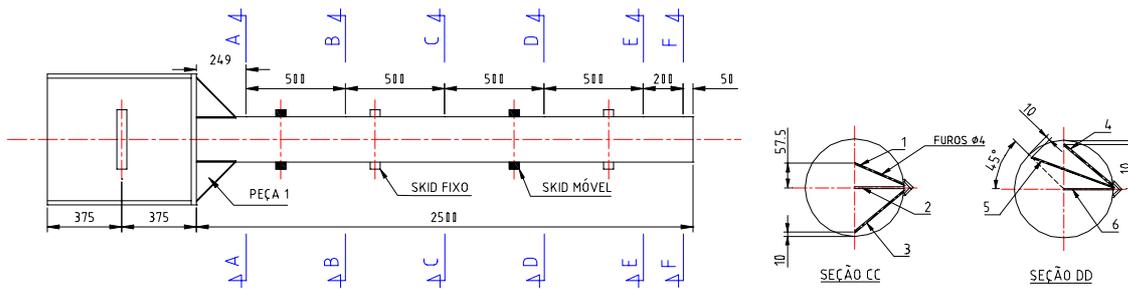


Figura 3 - Croqui do Tarugo para as medições

A validação do modelo numérico foi realizada comparando os resultados com valores experimentais obtidos (Silva et alli, 1999) a partir da medição feita no forno Italimpianti da Mannesmann. Foi utilizado o sistema de medição e aquisição de temperatura, adquirido da Datapaq Inc, conforme descrição feita no Manual de Operação Datapaq Inc. Utilizou para as medições um tarugo de aço carbono de 2,50 m de comprimento e 230 mm de diâmetro, usinado para introdução dos termopares em diferentes seções conforme Fig. 3. As temperaturas no interior do tarugo nas seções centrais, CC e DD, foram tomadas para confrontação com os resultados numéricos. Para uma variação da precisão do modelo desenvolvido destacamos o gráfico (Fig. 4) de um ponto do cilindro apresentando os resultados experimentais e numéricos. Apresentamos ainda um gráfico (Fig. 5) das propriedades físicas do material ensaiado.

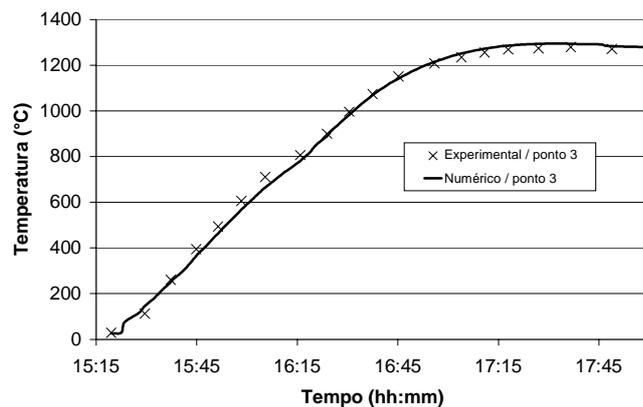


Figura 4 - Comparação entre os resultados medidos e numéricos na superfície inferior da seção CC (ponto 3).

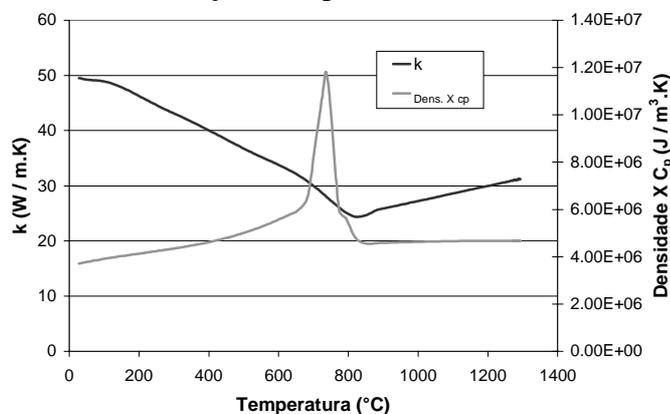


Figura 5 - Propriedades físicas do aço em função da temperatura do tarugo.

Os dados obtidos na saída do forno são de extrema importância para a indústria pois fornece a temperatura final do tarugo. Como mostra a Tab. 1, obteve-se ótimos resultados. A menor diferença entre os valores previstos pelo modelo e os obtidos experimentalmente na última posição de *skid* foi de 4,1 °C e a maior de 15,1 °C . A diferença percentual nos pontos se encontra abaixo da discrepância de 0,75% prevista para termopares tipo K (Figliola e Beasley, 1991). Pelos resultados apresentados pode-se concluir que as técnicas numéricas de solução da equação de conservação da energia desenvolvidas são perfeitamente válidas na solução deste problema.

Tabela 1 – Temperaturas na saída do forno.

Pontos	Temperatura (°C)					
	Seção CC			Seção DD		
	Centro (pt.1)	Meio (pt. 2)	Inferior (pt.3)	Superior (pt.4)	45° (pt.5)	Centro (pt.6)
Experimento	1278,8	1281,8	1269,8	1277,9	1273,8	1271,9
Numérico	1287,0	1285,6	1282,0	1282,0	1282,0	1287,0
Diferença	8,2°C	3,8°C	12,2°C	4,1°C	8,2°C	15,1°C

4. SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL

O tempo do processo de aquecimento da carga no forno varia de acordo com o ritmo de produção estabelecido pelo operador e com a demanda exigida pela linha de laminação. Numa usina siderúrgica, imprevistos, mudança de programação, reparos, manutenção de equipamentos são fatos que ocorrem corriqueiramente, independentes da eficiência e vontade do homem. O modelo numérico proposto inicialmente prevê uma situação ideal de um aquecimento de uma única peça a uma velocidade constante e uniforme ao longo do forno.

No entanto, o que ocorre com o aquecimento é que além da variação do ritmo, ocorre também uma variação na temperatura do gás. Pedidos de lotes pequenos de peças diferentes quanto ao tamanho e tipo de aço ocasiona mudanças na temperatura do forno para atender aquecimentos diferenciados. Isto faz com que haja mudanças na programação das temperaturas das diferentes zonas. Outra ocorrência refere-se às paradas na linha de laminação, quando a marcha é interrompida e reduz-se as temperaturas de set-point do sistema, de acordo com o tempo estimado de duração da parada por um padrão pré-definido. Há portanto uma necessidade de adequação da simulação para prever o campo de temperatura de todas as barras enfiadas ao longo do tempo de residência.

Foi desenvolvido um algoritmo para simular o aquecimento de todas as barras numa operação real do forno Italmimpianti. Este algoritmo calcula o campo de temperatura de todas as barras nas 67 posições do forno a cada movimentação da soleira (entrada de cada peça).

A cada avanço no tempo todos os valores convergidos das temperaturas de cada barra são armazenados e na posição seguinte são utilizados para inicializar o cálculo das temperaturas da barra na nova posição. Isso permitirá a intervenção dos operadores do forno em tempo real durante o processo de aquecimento.

5. ESTUDO DE UM CASO

Os dados necessários para a simulação de um caso em tempo real foram colhidos em Janeiro de 2000, no forno Italmimpianti da Mannesmann, das 9:24 h até às 21:52 h. Nos gráficos apresentados neste trabalho o início do teste é considerado como tempo igual a zero.

Ao longo do dia a temperatura do gás foi mantida constante por um longo período de tempo conforme a Fig. 6. Após sete horas de operação as temperaturas das zonas 3 a 8 foram diminuídas para 1250°C, durante 30 minutos. Em seguida foram aumentadas para 1280°C,

zonas 3 e 4, e 1260°C nas zonas de 5 a 8. Estas temperaturas foram mantidas até 11:36 h e em seguida diminuídas para 1260°C, zonas 3 e 4, e para 1240°C, zonas 5 a 8. Após quarenta e cinco minutos, estes valores passaram para 1290°C e 1270°C respectivamente. Esse é um comportamento típico da operação desse forno para evitar superaquecimento e suas consequências.

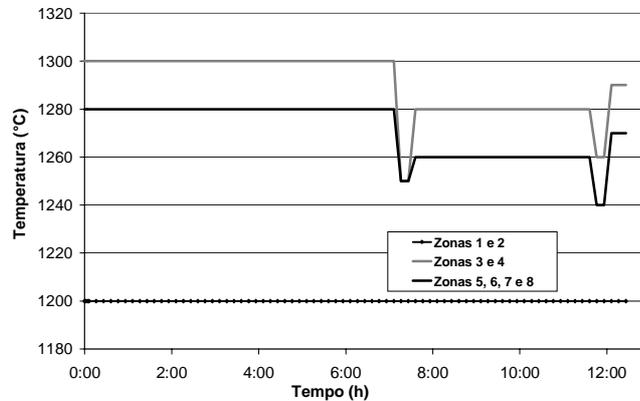


Figura 6 - Temperaturas de controle das zonas nas doze horas corridas de produção

Essa operação do forno (Fig.7) foi considerada bastante regular pois houve apenas duas paradas de 23 e 36 minutos respectivamente no final do teste. No início o ritmo de avanço dos tarugos no forno foi quase uniforme de 90 peças por hora. Transcorridas sete horas de produção o ritmo diminuiu para 50 peças por hora, voltando a um ritmo maior de 88 a 90 peças por hora a partir de 10:30 h.

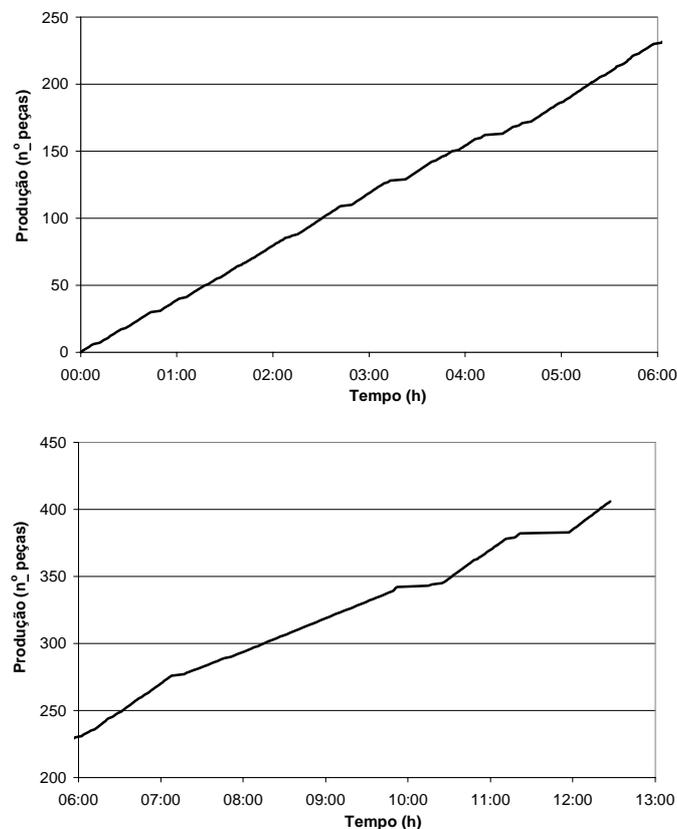


Figura 7 - Ritmo de produção durante as doze horas de operação

Cada corrida tem seu ritmo de produção dependendo do material e da dimensão do cilindro. Neste caso foram realizadas 6 corridas de lotes de peças com dimensões e materiais diferentes (Tab. 2). As especificações dos materiais processados estão na Tab. 3.

Tabela 2 – Relação dos diferentes pedidos

Corrida	N. peças	Material	Dimensão
1	322	X42	2000 x 180
2	10	X42	2060 x 180
3	19	Grau B	2060 x 180
4	13	X42	2040 x 180
5	5	Grau B	2060 x 180
6	35	Grade290	2060 x 180

As propriedades físicas dos materiais ensaiados foram controlados pelo algoritmo desenvolvido.

Tabela 3 – Composição dos aços empregados

Código material	Composição
X42	C (0,17 - 0,2%) Mn (0,95 - 1,05 %) P (0,02%) S (0,02%) Si (0,2 - 0,3 %) Al (0,02 -0,03%)
Grau B	C (0,0 - 0,3%) Mn (0,29 - 1,06 %) P (0,0 - 0,035%) S (0,0 - 0,035%) Si (0,1 %) Ni (0,0 - 0,4%) Cr (0,0 - 0,4%) Mo (0,0 - 0,15%) Cu (0,0 -0,4%) V (0,0 -0,08%)
Grade 290	C (0,1 - 0,12%) Mn (1,0 - 1,1 %) P (0,015%) S (0,005%) Si (0,15 - 0 25 %) Ni (0,22 - 0,28%) Cr (0,07%) Mo (0,04%) Al (0,02 -0,03%) V (0,03%) Nb (0,03 - 0,04%) N (0,0075%) Ca (0,0015 -0,004%)

6. RESULTADOS

A Tab. 4 apresenta alguns resultados do caso real simulado. Transcorrido 1 minuto havia uma peça apenas no forno e a temperatura era de 37°C e 28°C na superfície e centro, respectivamente. Após 11 minutos já havia sete peças enfiadas e com 19 minutos, 13 peças. O forno foi totalmente preenchido com 67 tarugos após 103 minutos, com temperatura final homogênea de 1278°C. A partir desse momento a cada entrada de uma peça tem-se a saída de outra já aquecida.

Além desses resultados, apresenta-se dois outros momentos, na 6^a hora e no final da operação, na 12^a hora. Comparando a situação do forno após 103 minutos e 362 minutos a temperatura das peças nas posições apresentadas são bem próximas. Até este momento as temperaturas de controle do gás permaneceram inalteradas. No final da operação, após 720 minutos, as temperaturas são diferentes por dois motivos: a carga é constituída por um material diferente do anterior, exigindo portanto outra programação de set-points e a ocorrência de uma parada com conseqüente aumento das temperaturas das peças. Observando as peças nas posições iniciais (7, 13, 19, 25) ao longo do tempo nota-se um superaquecimento nos instantes finais por causa das paradas. Na posição 61 essa peça já estava homogênea, uma vez que a temperatura do núcleo e superfície era de 1259°C.

Tabela 4 – Resultados das temperaturas dos tarugos, na superfície e centro, no interior do forno em diferentes tempos de simulação

Tempo (min)	Posição Tarugo	Posição no forno											
		1	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67
1	Sup.	37											
	Centro	28											
11	Sup.	50	210										
	Centro	39	162										
19	Sup.	37	172	396									
	Centro	28	125	315									
103	Sup.	39	181	391	631	836	1020	1153	1234	1272	1276	1277	1278
	Centro	30	134	308	514	686	848	1066	1185	1251	1272	1276	1278
362	Sup.	54	222	440	665	847	1025	1146	1227	1264	1271	1275	1277
	Centro	43	174	358	549	706	839	1054	1172	1238	1263	1272	1275
720	Sup.	37	515	758	940	1054	1184	1224	1258	1273	1262	1259	1259
	Centro	28	471	699	870	978	1149	1204	1248	1271	1263	1259	1259

O gráfico da Fig. 8 mostra as curvas de temperatura em 3 pontos diferentes ao longo do raio ($r = 0$, $r = R/2$ e $r = R$), em função da posição, no meio do tarugo. Esta peça foi enfiada oito horas após o início da operação e como houve uma mudança na programação dos set points a peça atingiu a temperatura de saída muito antes do que o esperado e as diferenças entre os pontos observados indicam uma perfeita homogeneização. Outro fato importante a ser destacado é que a temperatura é superior à saída da peça, indicando que a mesma perdeu calor para o forno. Ou seja, o material foi aquecido a uma temperatura superior à necessária na saída, além de permanecer por um tempo superior aquele necessário para a homogeneização da peça.

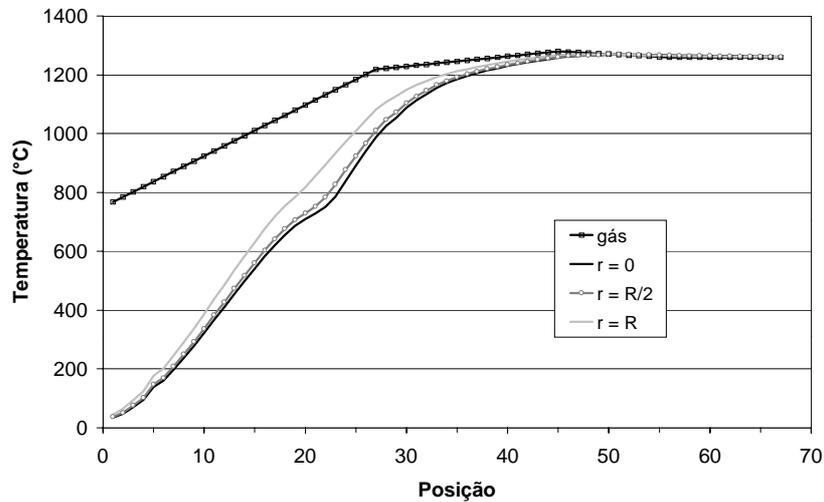


Figura 8 - Resultado da simulação do perfil de temperatura de uma peça enfiada

7. CONCLUSÕES

A simulação apresentada das doze horas seguidas de operação teve como objetivo principal testar o modelo com a realidade encontrada na indústria, analisar a influência do ritmo de produção, bem como os efeitos de paradas sobre os perfis de temperatura da carga. Essas simulações podem trazer importantes informações que auxiliarão os responsáveis no estabelecimento de novos procedimentos operacionais para o aprimoramento do processo.

Uma vez conhecidos as paradas que serão realizadas no dia é possível a simulação de toda uma jornada visando uma programação eficiente e segura das temperaturas do gás e do ritmo do forno. Um modelo operando “on-line” é uma ferramenta eficaz e segura para realização do controle otimizado do forno.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao IEL / FIEMG pelo suporte financeiro e à Mannesmann S. A. pelo suporte financeiro e técnico, fornecidos para a execução deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

- Datapaq Ltd, 1997, Tracker System – Manual de Operação, Datapaq Ltd, Cambridge.
- Figliola, R. S. e Beasley, D. E., 1991, Theory and design for mechanical measurements, Wiley, New York.
- Fontana, P., Boggiano, A., Furinghetti, A., Cabras, G., Simoncini, C. A., 1983, An advanced computer control system for reheat furnaces, Iron and Steel Engineer, August, pp.55-62.
- Incropera, F. P e DeWitt, D. P., 1990, Fundamentos de transferência de calor e massa, Guanabara Koogan, New York.
- Lindholm, D., Leden, B., 1999, A finite element method for solution of the three-dimensional time-dependent heat-conduction equation with application for heating of steels in reheating furnaces, Numerical Heat Transfer, Part A, vol. 35, pp.155-172.
- Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corp., Washington.
- Silva, L. B., 1996, “Modelamento matemático do aquecimento de barras cilíndricas de aço em um forno de soleira rotativa”, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte.
- Silva, R. J., Ziviani, M., França, G. A. C. e Magalhães, C. V., 1999, “Validação do modelo matemático do aquecimento de tarugos de aço em um forno rotativo”, Anais do IV Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, Santiago, Chile.

SIMULATION OF STEEL BILLETS HEATING IN A REHEAT FURNACE - REAL TIME MODEL

Summary. *In this work, the heating of steel billets in a walking beam reheat furnace is investigated. The numerical model is validated with respect to a full-scale experimental data carry out in the industry. The heating of the stocks is simulated inside the furnace in real time. Temperatures of all the billets are presented in the furnace in different times, with the purpose to evaluate the differentiated heating of the pieces during the test. The knowledge of the thermal process proves to be a promising and valuable tool to control the furnace operation aiming to save energy and to improve quality to the final product.*

Keywords: *Reheat furnace, Walking beam, Finite volume, Metallurgical industry*