

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO PERFIL DE TEMPERATURA DE TARUGOS DE AÇO DURANTE SEU AQUECIMENTO EM UM FORNO ROTATIVO

**Ricardo Junqueira Silva**

**Márcio Ziviani**

**Geraldo Augusto Campolina França**

**Cynara Vianna de Magalhães**

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 experimentalmente o aquecimento de um tarugo de aço em um forno de reaquecimento de soleira rotativa. Os resultados experimentais foram obtidos com um sistema de medição de temperaturas adquirido da Datapaq Inc, adequado para operar no interior de fornos. São apresentados os perfis de temperatura em diversas posições do tarugo durante sua passagem pelo forno, com o objetivo de avaliar o aquecimento do tarugo. O conhecimento do processo térmico permite otimizar a operação do forno para economizar energia e melhorar a qualidade do produto final.*

**Palavras-chave:** *Forno de reaquecimento, Soleira rotativa, Determinação experimental, Indústria siderúrgica*

### 1. INTRODUÇÃO

Fornos de reaquecimento são largamente utilizados no aquecimento de peças para posterior tratamento térmico ou conformação mecânica na indústria siderúrgica. Nestes fornos as peças são aquecidas até uma temperatura acima da linha AR<sub>3</sub> do diagrama equilíbrio Fe-C, com as fases do aço transformando-se em austenita, com o objetivo de reduzir a resistência mecânica e evitar concentração de tensões na laminação a quente (Silva, 1996).

Neste trabalho mede-se o perfil térmico do aquecimento de tarugos no forno de soleira rotativa DHO, em operação na laminação contínua de tubos sem costura da Usina Barreiro da Mannesmann S. A. em Belo Horizonte. O forno aquece, simultaneamente, 154 tarugos. A carga é composta de tarugos de aço de diâmetro entre 140 a 230 mm e comprimento entre 1200 e 2800 mm. As peças são enforçadas à temperatura ambiente e desenforçadas depois de aquecidas a uma temperatura entre 1200 e 1300°C, dependendo do material processado.

A barra cilíndrica quando entra no forno de reaquecimento 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 900 e 1300°C. O aquecimento da barra ocorre por um processo de transferência de calor transiente por convecção e radiação entre os gases e a superfície da mesma, por condução no contato da barra com a soleira e por condução da

superfície para o núcleo da barra.

O forno DHO é dotado de queimadores nas paredes interna e externa com raio médio da soleira de 8 m e distância entre paredes de 3,5 m conforme Fig. 1. Possui cinco zonas de controle de temperatura e é dividido em três regiões visando um aquecimento gradual dos tarugos. As duas paredes divisórias reduzem as perdas de calor para o ambiente através das portas e há um ângulo morto de 24° entre as portas de enforçamento e desenforçamento.

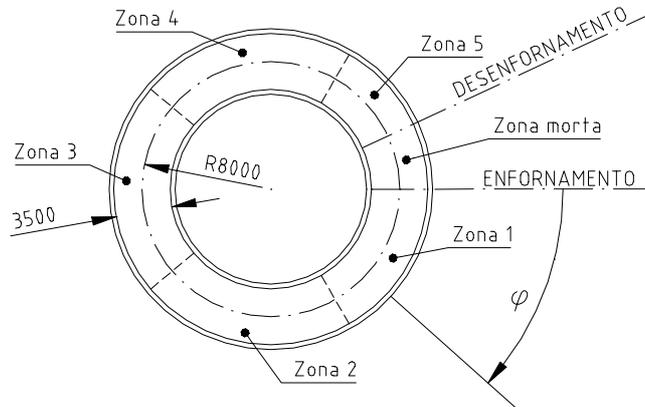


Figura 1 – Planta do forno DHO.

A temperatura na primeira região é mais baixa que nas posteriores para evitar tensões ocasionadas por grandes gradientes térmicos. Na região de aquecimento, a temperatura do forno é mantida em um valor máximo, observando-se os limites de superaquecimento. Quando submetida a altas temperaturas, a taxa de oxidação do aço aumenta ocasionando perda de material sob forma de carepa, motivo pelo qual, é desejável o menor tempo possível de permanência da barra nesta região. O objetivo da região de homogeneização é garantir uma temperatura uniforme da barra num tempo mínimo possível (Silva e Ziviani, 1996).

O trabalho contínuo de otimização dos fornos visa a redução do consumo de energia e a garantia da qualidade final do produto. Estas duas metas estão fortemente relacionadas entre si. A redução no consumo de energia é conseguida com a diminuição das temperaturas das zonas e a busca de um tempo mínimo de permanência da carga no forno, desde que as necessidades físico-químicas do material sejam atingidas. Entende-se por busca da qualidade do produto a tentativa de reduzir os problemas do aquecimento do aço, ou seja, perdas do material por oxidação e descarbonetação, tensões térmicas e superaquecimento. Para atingir essas metas é necessário conhecer o comportamento térmico da barra ao longo do forno (Koinis e Meyer, 1982; Klima, 1997).

Para auxiliar no projeto e controle do processo, são desenvolvidos modelos de simulação (Chapman et al., 1991; Ziviani e Paula, 1993; Silva e Ziviani, 1996). Esses modelos devem ser verificados através de dados obtidos do processo real para gerarem resultados confiáveis no estudo da operação do forno (Veslocki, 1982). Essa é, portanto, a importância desse experimento no posterior estudo de modelagem do forno.

Os experimentos no forno de soleira rotativa DHO são realizados com um sistema de medição e aquisição de temperatura adequado para operar no interior de fornos, adquirido da Datapaq Inc.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O objetivo deste trabalho é o levantamento do perfil térmico real da barra ao longo do forno. Neste tipo de medição existem duas técnicas: a remota e a local (Klima, 1997). Na técnica remota o sistema de aquisição de dados encontra-se fora do forno, fios de tempar

com comprimento superior ao do forno são fixados na carga de teste. A vantagem está na leitura instantânea. No entanto, em um forno rotativo o manuseio no interior do forno é bastante complicado podendo comprometer a fixação dos sensores ou mesmo romper os cabos. Neste trabalho utiliza-se a técnica local, com o sistema de aquisição de dados acompanhando a carga ao longo do forno enquanto registra os valores medidos pelos termopares estrategicamente instalados na carga. Essa técnica exige um isolamento eficiente do sistema de medição.

O processo experimental para obtenção da temperatura da carga é extremamente complicado em função das condições e dimensões do forno que dificultam as medições: temperaturas da ordem de 1300 °C, atmosfera muito agressiva em função dos gases produzidos pela combustão, comprimento do forno somado à baixa velocidade translacional da barra ocasionando um longo período de exposição do sistema. Além disso as dimensões do sistema dificultam as operações de manuseio, enforamento e desenforamento.

## 2.1. Sistema de medição

O sistema de aquisição de dados, fornecido pela Datapaq Inc., é constituído por 2 coletores de dados acondicionados no interior de uma barreira térmica e envolvida com camadas de manta isolante. O conjunto é colocado numa armação de Nicrobel para prender a manta e proteger o equipamento. As dimensões externas do sistema são: 700 × 650 × 300 mm (Datapaq Ltd, 1997).

Cada coletor possui oito canais de aquisição de dados de temperatura e memória EPROM com capacidade para armazenar 16.000 valores de medições. A barreira térmica é preenchida com 15 ℓ de água cuja evaporação mantém uma temperatura máxima de 100 °C no compartimento onde se encontram os coletores. Um material compacto isolante no interior desta caixa bem como a manta na região externa completam o sistema de isolamento.

São utilizados termopares do tipo K (cromel-alumel) com revestimento de Nicrobel e junta quente isolada com óxido de magnésio (MgO<sub>2</sub>), com 3 mm de diâmetro. Esses termopares calibrados apresentam erros da ordem de 0,75 % da medida (Figliola e Beasley, 1991). O erro do coletor de dados é desprezível.

## 2.2. Tarugo de teste

Foi utilizado para as medições um tarugo de aço carbono grau B (0,18 a 0,21% C, 0,45 a 0,55% Mn e 0,20 a 0,30% Si) com 1,9 m de comprimento e diâmetro de 0,194 m, furado conforme a Fig. 2. Os termopares são conectados aos coletores de dados e as pontas de medição são introduzidas nos furos. Na extremidade da barra é soldada uma chapa para a sustentação do sistema de medição. A parte exposta dos termopares (entre a barra e a barreira térmica) é protegida por uma cantoneira “L” soldada na barra.

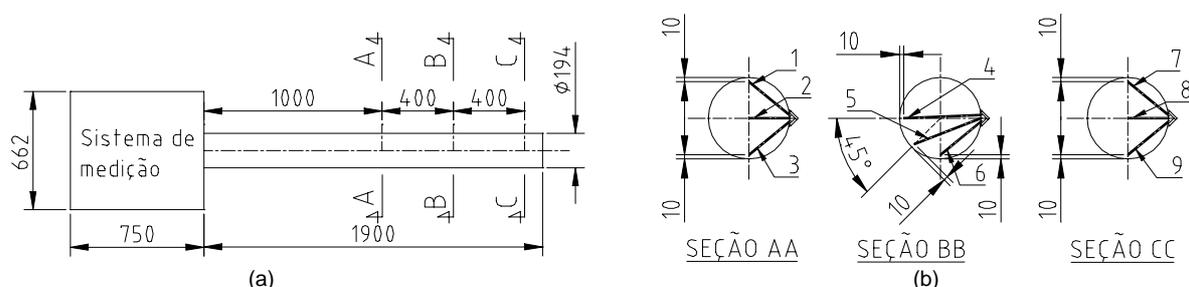
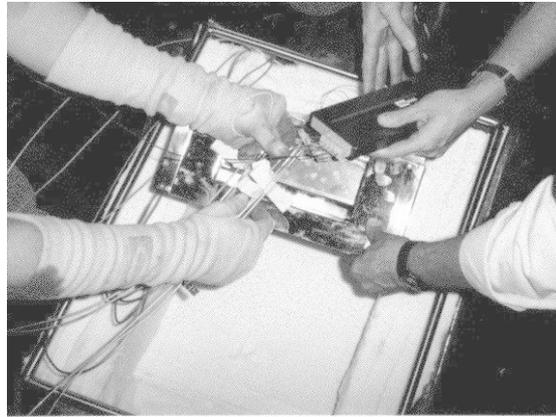


Figura 2 – Tarugo de teste. a) Seções de medição. b) Posicionamento de termopares.

Os termopares são dispostos na barra como mostrado na Fig. 2b. Além desses, um

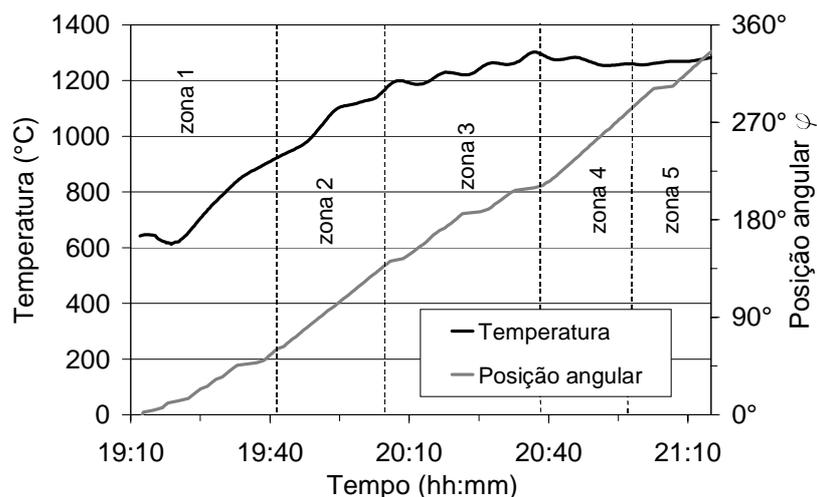
termopar foi usado como antena, para medir a temperatura da atmosfera do forno. Sua extremidade foi protegida da radiação direta dos gases de combustão por uma blindagem radiativa construída com três tubos concêntricos de cerâmica refratária, com 100 mm de comprimento e diâmetros internos de 5 mm, 10 mm e 12 mm. Na Fig. 3 vemos o sistema de medição sendo preparado, com a ligação dos termopares em um dos coletores de dados. Observa-se também na figura a barreira térmica, a manta isolante e a armação protetora de Nicrobel.



**Figura 3** – Preparação do sistema de medição.

### 2.3. O experimento

O tarugo, juntamente com o sistema de medição, foi enfiado às 19:12 h e desenfado às 21:15 h do dia 17 de agosto de 1998. O tarugo estava pré-aquecido a cerca de 250 °C. A Fig. 4 mostra a evolução da temperatura dos gases de combustão medida pelo termopar antena e a variação da posição do tarugo no forno ao longo do tempo. Pode-se ver que a corrida em que foi realizada o teste foi normal, com um ritmo de corrida praticamente uniforme. Os patamares da curva representam paradas que não afetaram o aquecimento da peça por terem sido inferiores a 5 minutos.



**Figura 4** – Corrida em que foi realizado o experimento.

A temperatura dos gases de combustão, no início do teste, na região próxima à entrada do forno, sofre uma queda porque conjunto ficou muito tempo estacionado em frente à porta, trocando calor com o ambiente frio.

Durante a corrida, a inclinação da curva da temperatura da antena tende a zero a medida que o tarugo se aproxima da zona 5 de homogeneização. A radiação direta influencia a temperatura da antena causando picos em sua leitura quando o sistema passa em frente aos queimadores.

As zonas de 1 a 5 do forno são setores angulares de 60°, 80°, 80°, 80° e 36° respectivamente. O tempo de permanência do tarugo em cada uma das zonas foi de 29, 24, 38, 22 e 10 minutos. Estes tempos mostram que, numa corrida normal, a velocidade angular do tarugo no interior do forno não é constante.

Na Fig. 5 vemos o tarugo de teste sendo desenformado. Nesta foto podem ser observadas as cantoneiras de proteção dos termopares e o suporte do sistema de medição.

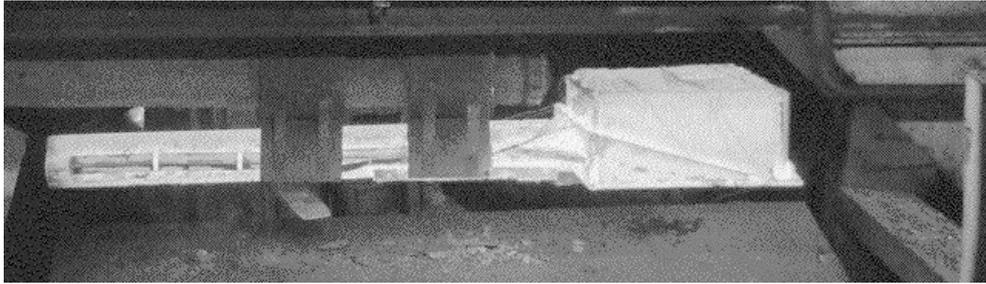


Figura 5 – Desenformamento do tarugo de teste.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O perfil de temperatura dos gases de combustão é repetido nas Fig. 6 a 10 para auxiliar a análise. Na Fig. 6 são apresentados os resultados para a seção AA (ver Fig. 2). As curvas de temperatura no centro e no ponto inferior do tarugo praticamente coincidem. Durante o aquecimento o perfil térmico do ponto superior apresenta valores mais elevados que os outros dois pontos. Isso porque está mais exposto à radiação direta da chama produzida pela queima do combustível. Observa-se, também, que esse perfil apresenta picos nas mesmas regiões do perfil térmico dos gases de combustão.

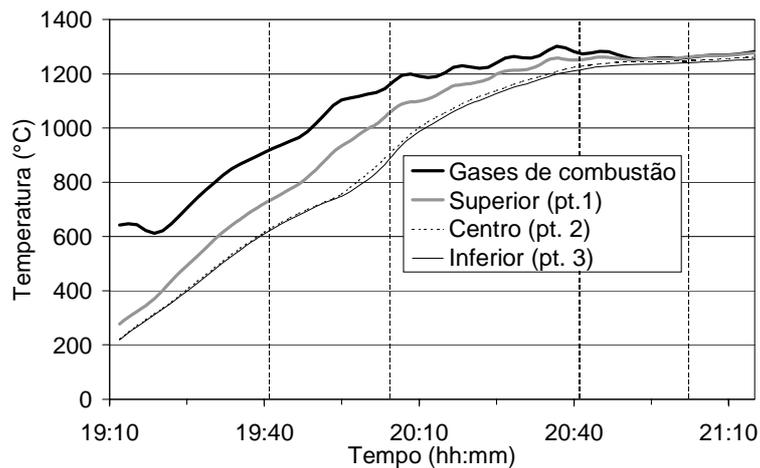


Figura 6 – Temperaturas na seção AA.

A temperatura do tarugo aumenta gradualmente até a região de homogeneização, onde praticamente atinge o equilíbrio térmico com os gases de combustão. O maior gradiente de temperatura encontrado nessa seção ocorreu às 20:08 h, na zona 3 do forno, e foi de 189 °C entre as medições dos pontos superior e inferior, conforme Tabela 1. Nessa mesma tabela, são

apresentados as temperaturas na região de homogeneização. Observa-se que o perfil térmico do tarugo já estava praticamente homogeneizado às 20:50 h. O desenformamento foi realizado às 21:15 h., embora o menor gradiente de temperatura tenha ocorrido às 20:52 h.

Tabela 1 – Temperaturas na seção AA.

Tempo	Temperatura (°C)			
	superior	central	inferior	maior diferença
20:08	979,9	810,9	790,9	189,0
20:50	1253,3	1243,9	1233,0	20,3
20:52	1252,3	1244,3	1234,5	17,5
21:15	1277,8	1261,3	1253,9	23,9

Na Fig. 7, as curvas traçadas representam as temperaturas na seção CC do tarugo. Estes pontos encontram-se nas mesmas posições da seção AA mas em posição longitudinal diferente (ver Fig. 2). Observa-se que as Fig. 6 e 7 apresentam um mesmo comportamento indicando que a influência da extremidade é mínima e que o fluxo de calor axial não influencia o processo. O maior gradiente de temperatura ocorreu no final da zona 2, às 20:04 h, e foi de 161,2 °C, conforme Tabela 2. Nessa mesma tabela pode-se observar que a partir de 20:50 h o tarugo está homogeneizado, com um gradiente de temperatura ainda menor que o encontrado na seção AA.

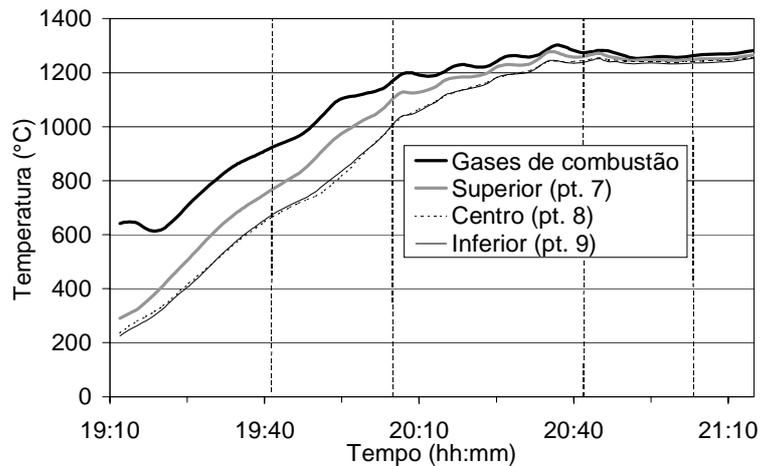


Figura 7 – Temperaturas na seção CC.

Tabela 2 – Temperaturas na seção CC.

Tempo	Temperatura (°C)			
	superior	central	inferior	maior diferença
20:04	956,6	795,4	817,2	161,2
20:50	1248,3	1242,7	1234,9	13,4
20:53	1247,2	1241,4	1233,9	12,8
21:15	1265,2	1257,2	1253,8	11,4

Na Fig. 8 e Tabela 3, faz-se uma confrontação das temperaturas do ponto central do tarugo em ambas as seções com o objetivo de verificar a importância do fluxo de calor na

direção axial. Observa-se que as maiores diferenças de temperatura aparecem nas zonas 2 e 3 do forno, enquanto nas restantes o gradiente de temperatura longitudinal no tarugo é praticamente nulo.

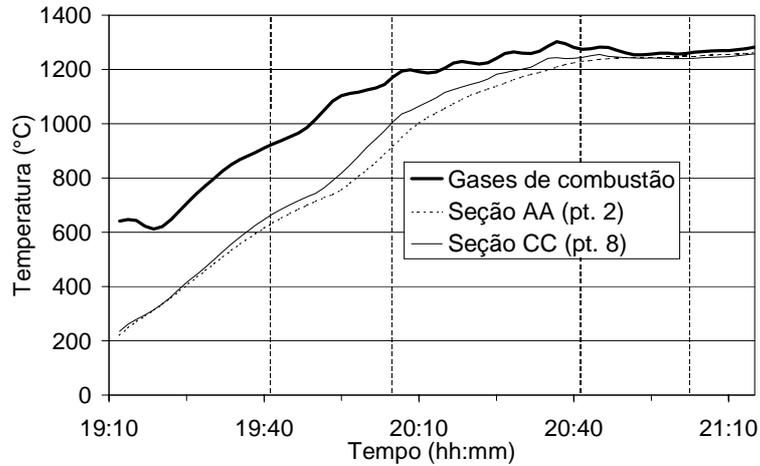


Figura 8 – Temperaturas do centro do tarugo nas seções AA e CC.

Tabela 3 – Temperaturas no centro do tarugo.

Tempo	Temperatura (°C)		
	seção AA	seção CC	diferença
20:06	930,6	1024,4	93,8
20:50	1243,9	1242,7	1,2
21:15	1261,3	1257,2	4,1

Na Fig. 9, foram traçados os perfis de temperatura do tarugo na seção BB (ver Fig. 2). Estes pontos foram escolhidos para avaliar a variação do perfil de temperatura com o ângulo no interior do tarugo. Durante o aquecimento, existe um gradiente considerável, tanto entre o ponto lateral e o a 45° quanto entre o ponto a 45° e o inferior, conforme Tabela 4.

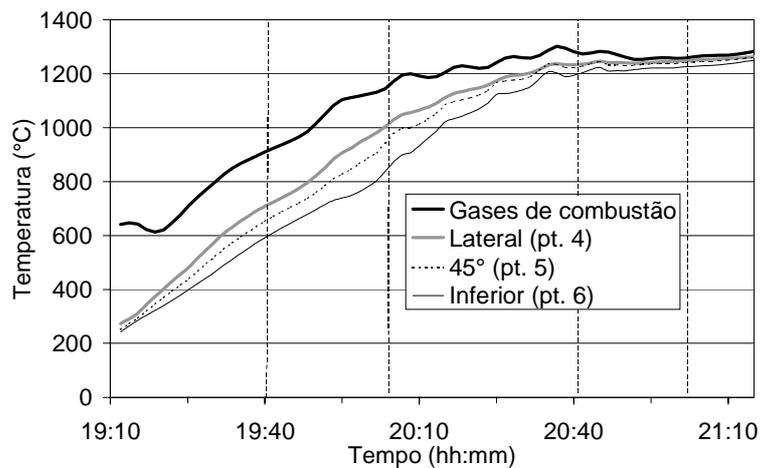


Figura 9 – Temperaturas na seção BB.

Tabela 4 – Temperaturas na seção BB.

Tempo	Temperatura (°C)			
	lateral	45°	inferior	maior diferença
20:09	952,4	875,2	769,1	183,3
20:50	1240,2	1230,3	1211,2	29,0
20:53	1238,9	1231,9	1215,9	23,0
21:15	1263,5	1262,5	1249,4	14,1

Na Fig. 10, comparam-se as temperaturas dos pontos na região inferior do tarugo nas diferentes seções analisadas. Como previsto, na extremidade as temperaturas são superior às temperaturas nas outras seções, pois nessa região o material está mais exposto à radiação e à convecção dos gases produzidos pela combustão. Os perfis de temperatura nas seções AA e BB apresentam boa concordância. Conclui-se, portanto, que a variação do fluxo de calor na direção axial nesta região é pequena.

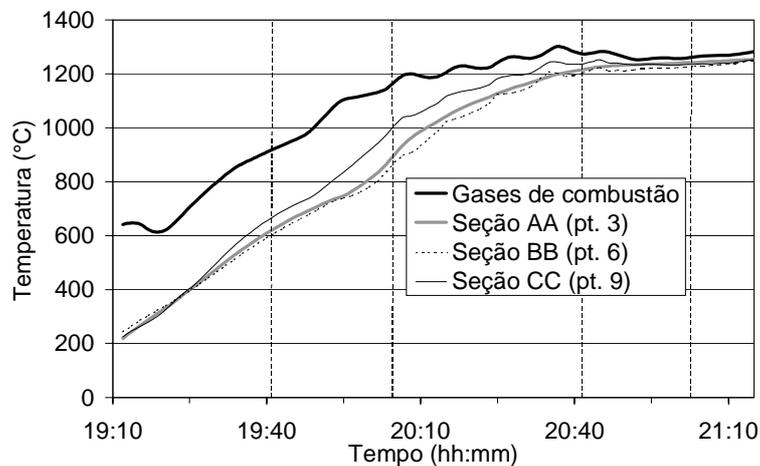


Figura 10 – Temperaturas no ponto inferior do tarugo.

Tabela 5 – Temperaturas no ponto inferior do tarugo.

Tempo	Temperatura (°C)			
	seção AA	seção BB	seção CC	maior diferença
20:07	942,6	897,7	1038,5	140,8
20:50	1233,0	1211,2	1234,9	23,7
21:15	1253,9	1249,4	1253,8	4,5

Um importante fator no processo posterior de laminação do aço é a homogeneização das temperaturas do tarugo na saída do forno. No final do teste (21:15 h) os gradientes entre os pontos superior e inferior foram de 23,9 °C na seção AA e 11,4 °C na seção CC; na seção BB o gradiente entre os pontos lateral e inferior é de 14,1 °C. Às 20:50 h esses gradientes eram 20,3 °C em AA e 13,4 °C em CC e 29,0°C em BB. Isso leva a concluir que a permanência do tarugo no interior do forno de 20:50 às 21:15 foi desnecessária. A marcha do forno poderia ser acelerada, reduzindo assim o tempo de permanência da carga no seu interior.

Os fluxos de calor médio e máximo nas direções axial, radial e angular no interior do

tarugo estimados nas diversas zonas do forno são apresentados na Tabela 6. Observa-se que a transferência de calor no tarugo ocorre principalmente nas direções radial e angular devido a grande razão entre seu comprimento e diâmetro ( $L/d = 9,8$ ).

Tabela 6 – Fluxo de calor no interior do tarugo nas zonas do forno.

Zona	Fluxo de calor (kW/m <sup>2</sup> )					
	axial		radial		angular	
	médio	máximo	médio	máximo	médio	máximo
1	0,29	0,56	8,70	10,95	11,57	15,92
2	0,76	0,99	14,56	18,14	17,82	21,50
3	0,55	1,02	6,60	15,15	6,78	16,06
4	0,17	0,22	1,42	2,64	1,92	2,95
5	0,20	0,22	1,48	1,68	1,50	2,05

#### 4. CONCLUSÕES

As curvas de temperatura no centro e no ponto inferior do tarugo praticamente coincidem, tanto em uma seção próximo à extremidade do tarugo, quanto em uma afastada dela. O ponto próximo à superfície superior apresenta temperatura mais elevada porque está mais exposto à radiação direta da chama, apresentando os mesmos picos do perfil dos gases de combustão.

O comportamento térmico do tarugo, durante o aquecimento, é semelhante nas três seções de medição de temperatura consideradas.

Os maiores gradientes de temperatura encontrados em cada seção ocorreram entre o final da zona 2 e o início da zona 3, correspondendo a um tempo de enformamento de cerca de 55 minutos.

Na corrida em que foi realizado este teste, o tarugo atingiu as condições de laminação com 1:38 horas de tempo de aquecimento, mas só foi retirado do forno 25 minutos depois.

O fluxo axial de calor no interior do tarugo, durante o aquecimento, é muito inferior aos fluxos nas direções radial e angular. Conclui-se, assim, que o modelamento numérico desse problema pode ser tratado em coordenadas polares.

capacidade de prever o comportamento térmico da carga durante seu aquecimento, pode-se minimizar o tempo de aquecimento, atingir uma determinada temperatura e grau de encharcamento. Controle eficaz para economizar energia, garantir a qualidade do produto final e reduzir o impacto ambiental provocado pela emissão de poluentes.

A medição contínua da temperatura da carga é impossível, então os modelos de simulação numérica do aquecimento da carga são utilizados nos programas de controle e otimização do forno. Este trabalho experimental produz importantes resultados para a validação dos modelos de simulação.

#### 5. 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.

## REFERÊNCIAS

- Datapaq Ltd, 1997, Tracker System for Windows – Manual de Operação, Datapaq Ltd, Cambridge.
- Chapman, K. S., Ramadhyani, S. e Viskanta, R., 1991, Modeling and parametric studies of heat transfer in a direct-fired continuous reheating furnace, Metallurgical Transactions B, vol. 22B, August, p. 513-521.
- Figliola, R. S. e Beasley, D. E., 1991, Theory and design for mechanical measurements, Wiley, New York.
- Klima, R., 1997, Improved knowledge of gas flow and heat transfer in reheating furnaces, Scandinavian Journal of Metallurgy, vol. 26, p. 25-32.
- Koinis, F. J. e Meyer, R. W., 1982, Improved thermal efficiency in reheat furnaces through heat transfer analysis and correlation, Iron and Steel Engineer, February, p. 43-46.
- 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, L. B. e Ziviani, M., 1996, Modelamento matemático do aquecimento de barras cilíndricas em um forno de soleira rotativa, Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas / VI Congresso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, pp. 395-400, Florianópolis.
- Veslocki, T. A., 1982, Development and verification of an slab reheating furnace mathematical model, Iron and Steel Engineer, April, pp. 46-51.
- Ziviani, M. e Paula, M. R., 1993, Modelamento matemático de uma placa de aço em fornos de reaquecimento, Anais do 48º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, pp. 349-352, Rio de Janeiro.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF STEEL BILLETS TEMPERATURE DURING THE HEATING IN A ROTATIVE FURNACE

**Abstract:** In the present work, the heating of cylindrical steel billets is experimentally investigated in an rotary-hearth reheat furnace. The experimental results are obtained with a temperature measurement system from Datapaq Inc, adapted to operate inside furnaces. The temperature profiles of several positions inside the billet are presented during its passage through the furnace, to evaluate the heating. The knowledge of the thermal process allows one to optimize the furnace operation to save energy and improve the final product quality.

**Keywords:** Reheat furnace, rotary-hearth furnace, experimental determination, metallurgical industry