

# MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO PROCESSO DE DESCARBONETAÇÃO DE TIRAS DE AÇOS SILICIOSOS<sup>1</sup>

Milton Martins da Silva<sup>2</sup>  
Márcio Ziviani<sup>3</sup>

## Resumo

Apresenta-se, neste trabalho, uma investigação teórica dos processos de aquecimento e resfriamento de uma tira de aço silicioso em movimento contínuo dentro de um equipamento térmico siderúrgico tipo túnel. Desenvolveu-se um modelo matemático para simular o processo térmico que ocorre entre a carga contínua (tira de aço) em movimento a velocidade constante e as diversas seções de aquecedores radiantes elétricos e resfriadores forçados. A metodologia proposta avalia a troca radiativa entre a carga e os aquecedores, e a transferência de calor convectiva entre a carga em movimento e a corrente livre de gases do ambiente interno. A validação do modelo matemático é obtida através da confrontação dos resultados simulados com os resultados experimentais obtidos pela ACESITA S.A. Foi realizado, também, um estudo do comportamento de tendências de cálculo do modelo matemático por meio de simulações hipotéticas, onde foram modificados os parâmetros de operação do reator para comprovação da eficiência da metodologia proposta. O algoritmo computacional de simulação desenvolvido neste trabalho, permite determinar a distribuição de temperatura na tira de aço em qualquer posição no interior do equipamento.

**Palavras-chave:** Forno contínuo; Equipamento térmico; Tratamento térmico; Modelagem matemática.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL BEHAVIOUR OF THE SILICON STEEL STRIP DECARBONIZATION PROCESS

### Abstract

In the present work, the heating and cooling phases of a silicon steel strip, has been investigated by means of a theoretical study on tunnel-shaped thermal metallurgical equipment. A mathematical model has been developed to describe the thermal process that occurs between a continuous load (steel strip) at constant conveying speed and the various sections of electrical radiant heaters and forced coolers. The proposed methodology evaluates the radiative exchange between the load and heaters, and the convective transfer between the moving load and gas flow inside the furnace. Model validation was obtained by confronting the simulated and experimental results obtained by ACESITA S.A. The behavior of the mathematical model simulated using modified operation parameters was also analyzed in order to evaluate the performance of the proposed methodology under hypothetical conditions. The computational algorithm developed in this work provides the users with workload temperature distribution in any position inside the equipment.

**Key words:** Continuous furnace; Thermal equipment; Heat treatment; Heat transfer; Mathematical modeling

<sup>1</sup> 43º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos - 17 a 20 de Outubro de 2006 - Curitiba, PR.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, M.Sc.

<sup>3</sup> Professor, Dr.

# 1 INTRODUÇÃO

O aço elétrico é uma classe de aços com propriedades eletromagnéticas nobres, pois apresentam um nível otimizado de perda e permeabilidade magnética, em relação aos outros tipos de aços. A utilização dos aços elétricos (ou aços siliciosos) no núcleo de equipamentos elétricos assegura a otimização do rendimento destas máquinas, devido às propriedades desenvolvidas exclusivamente para minimizar as perdas internas de energia.

Devido ao grau de sofisticação tecnológica necessária à produção deste tipo de aço e à crescente preocupação com a eliminação de desperdícios de energia, aumentou-se a percepção da importância de se investir no desenvolvimento de métodos de predição teórica capazes de representar as condições reais dos processos de fabricação.

Alinhando-se aos fatos, este trabalho tem como objetivo a investigação teórica das condições de tratamento térmico de uma tira de aço silício, em uma das fases do processo de fabricação, com a finalidade de se obter perfis térmicos do material com a confiabilidade assegurada.

Com base nos parâmetros de processo disponíveis, a investigação resultou no desenvolvimento de um modelo teórico capaz de representar os resultados térmicos do processo de descarbonetação da tira de aço. O modelo matemático desenvolvido tem a capacidade de simular os resultados das operações de aquecimento e resfriamento, quando o material está submetido a variações nos parâmetros de processo tais como temperatura, velocidade e atmosfera.

Os avanços da tecnologia computacional motivaram a evolução dos métodos para simulação e modelagem de processos físicos os mais diversos possíveis. Este fato, foi responsável pela elaboração de vários estudos direcionados a equipamentos térmicos de usinas siderúrgicas.

O Grupo de Análise e Modelagem de Sistemas e Equipamentos Térmicos - "GAMSET" - do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais vem desenvolvendo estudos sobre a modelagem e simulação de equipamentos térmicos, desde 1992, já tendo produzido uma bibliografia relevante de temas relacionados com esta linha de pesquisa, principalmente para fornos de reaquecimento. Outros autores também são citados:

Federov, Lee e Viskanta<sup>[1]</sup> apresentaram uma metodologia para a simulação do aquecimento de fornos para carga contínua. O modelo térmico pode ser utilizado para a definição dos parâmetros de projeto de um forno industrial, tais como a temperatura ótima da fonte de calor necessária para se atingir a uma distribuição de temperatura prescrita da superfície da carga. É utilizado um procedimento de conjugação de uma técnica de otimização com o modelo proposto.

Carvalho<sup>[2]</sup> desenvolveu um modelo matemático para simular e controlar o processo de recozimento de tiras de aço no interior de um forno contínuo, com aquecimento à combustão de gás de alto-forno (GAF). A metodologia se baseia no balanço térmico da energia do processo de geração de calor por combustão, energia absorvida pelo material, perdas devido à vazão de fumaças, energia necessária para o aumento de temperatura interna e fugas por aberturas.

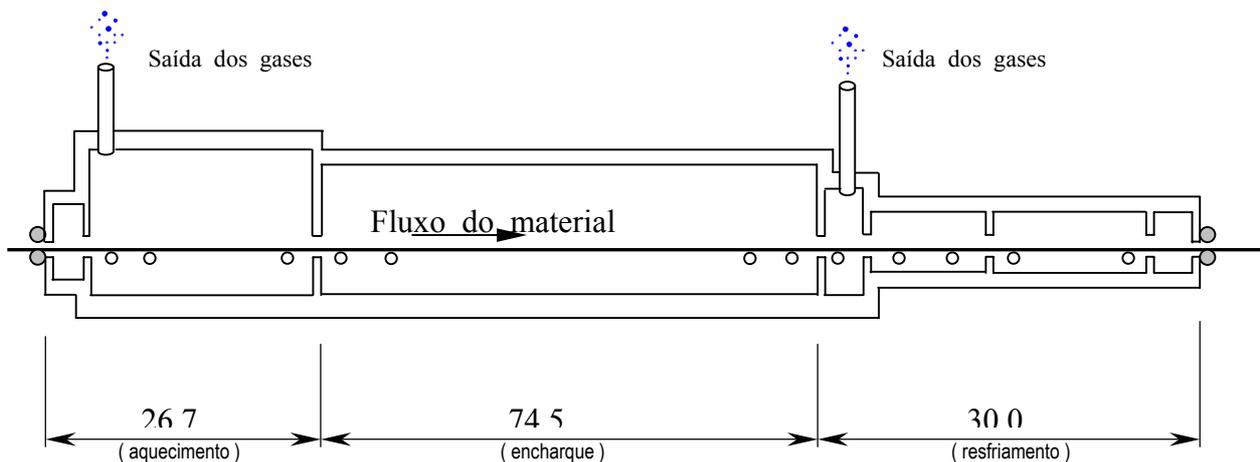
Kang, Huang e Purushothaman<sup>[3]</sup> propuseram um modelo matemático para descrever o comportamento térmico de peças avulsas fundidas ou forjadas,

em um forno contínuo. Este modelo calcula o perfil de temperatura de trabalho em função da posição relativa da carga.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 O Equipamento de Descarbonetação

O equipamento de descarbonetação (Figura 1), é composto de duas regiões distintas de tratamento do material - a região de aquecimento e a região de resfriamento - cada uma com seus respectivos equipamentos periféricos: estação de mistura de gases, sistemas de potência e sistemas de umidificação. O equipamento juntamente com os sistemas periféricos, é também chamado de reator térmico de descarbonetação, e proporciona um ciclo completo de transformações estruturais e superficiais na tira de aço, tendo como base o desencadeamento de reações químicas rigorosamente controladas. O aquecimento é executado por meio de um sistema de resistores elétricos, distribuídos nas paredes laterais e nas superfícies superior e inferior



OBS: dimensões em metros

**Figura 1.-** Representação esquemática do reator térmico

A primeira região chamada de aquecimento e encharque é subdividida em nove zonas de controle, cada qual com o comprimento e a potência instalada distintas. O controle de temperatura é feito observando-se a diferença entre um valor pré-fixado (*set-point*), e o respectivo valor medido e registrado.

A atmosfera interna é controlada e composta por uma mistura gasosa de hidrogênio, nitrogênio e vapor d'água. A quantidade de vapor d'água presente na mistura gasosa, isto é, a umidade contida, é controlada indiretamente pelo ponto de orvalho (PO) da atmosfera. Após a passagem pela seção de aquecimento e encharque, a tira de aço é submetida a um resfriamento controlado, passando por três seções: resfriamento estático, camisas d'água e jato de gás.

## 2.2 Setorização do Equipamento

O equipamento é originalmente dividido em 9 zonas térmicas de aquecimento e 3 zonas de resfriamento. Com o objetivo de facilitar a solução numérica, as zonas com características térmicas semelhantes foram unificadas, e o reator passou a ser estudado considerando sete setores distintos.

## 2.3 Lei do Balanço de Energia

As equações de balanço de energia para o caso específico de uma tira de aço em movimento dentro de um equipamento onde os parâmetros do ambiente interno, variam em função da posição, são representadas pela lei da conservação da energia:

$$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T) = \text{div}(k \nabla T) + S \quad (2.1)$$

onde  $T$  é a temperatura do material,  $S$  é a taxa volumétrica de geração interna de energia,  $\frac{D}{Dt}$  é a derivada substancial.

Considera-se o material isotrópico e homogêneo. A equação (2.1) pode ser re-escrita no sistema de coordenadas cartesianas, na forma:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (2.2)$$

As velocidades  $v$  e  $w$  nas direções  $y$  e  $z$ , são nulas tem-se:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (2.3)$$

Durante o período de processamento de uma seqüência de bobinas com características idênticas, considera-se que o equipamento opera em regime permanente. Sendo assim, tem-se  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ . Portanto, a equação (2.3) torna-se:

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (2.4)$$

Apesar de não haver geração de calor interno, o termo fonte foi mantido na equação de governo. Este termo representa o fluxo de calor combinado de convecção e de radiação, que são incidentes nas superfícies horizontais planas da tira de aço. Sendo assim:

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_c + \dot{q}_r \quad (2.5)$$

onde  $\dot{q}_c$  é o calor recebido por convecção,  $\dot{q}_r$  é o calor recebido por radiação.

O termo fonte varia em função de cada um dos setores térmicos definidos para o desenvolvimento do estudo térmico do reator.

O efeito de transferência de calor por difusão é considerado pequeno, em função da reduzida espessura da tira de aço (0,27 mm), quando comparado aos processos de radiação e de convecção entre a vizinhança e a tira de aço. Tem-se:

$$\dot{q}_c + \dot{q}_r \gg \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q_k|_x + q_k|_y + q_k|_z \quad (2.6)$$

$$\text{e portanto: } \rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \dot{q}_c + \dot{q}_r \quad (2.7)$$

### 2.3.1 Condição de contorno

Para o equacionamento do problema apresentado, a situação sugere uma condição de contorno de primeira espécie, na direção x, definida como:

$$\text{em } x = 0 \quad \Rightarrow \quad T = T_{\text{ambiente}} \quad (2.8)$$

## 2.4 O Termo Fonte Convectivo

O processo de transferência de calor por convecção é determinado pelas correlações entre uma superfície horizontal plana (tira de aço) e um escoamento paralelo, em contra corrente. O coeficiente convectivo é calculado considerando as condições da atmosfera em cada um dos setores pela lei do resfriamento de Newton:

$$q_c = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.9)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção, cuja variação é função do setor térmico.

A troca de calor por convecção entre o gás e a tira de aço foi calculada pela correlação para o escoamento paralelo e uma superfície plana<sup>(4)</sup>

$$Nu_x \equiv \frac{h_x x}{k} = 0,332(Re_x)^{1/2} (Pr)^{1/3} \quad (2.10)$$

onde  $Nu_x$  é o número de Nusselt local.

O setor de resfriamento por jato de gás arrefecido, é modelado como jatos colidentes. A troca de calor por convecção entre o gás e a tira de aço foi calculada pelas correlações<sup>(4)</sup> seguintes:

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0,42}} = K \left( A_r, \frac{H}{D} \right) G \left( A_r, \frac{H}{D} \right) F_2(Re) \quad (2.11)$$

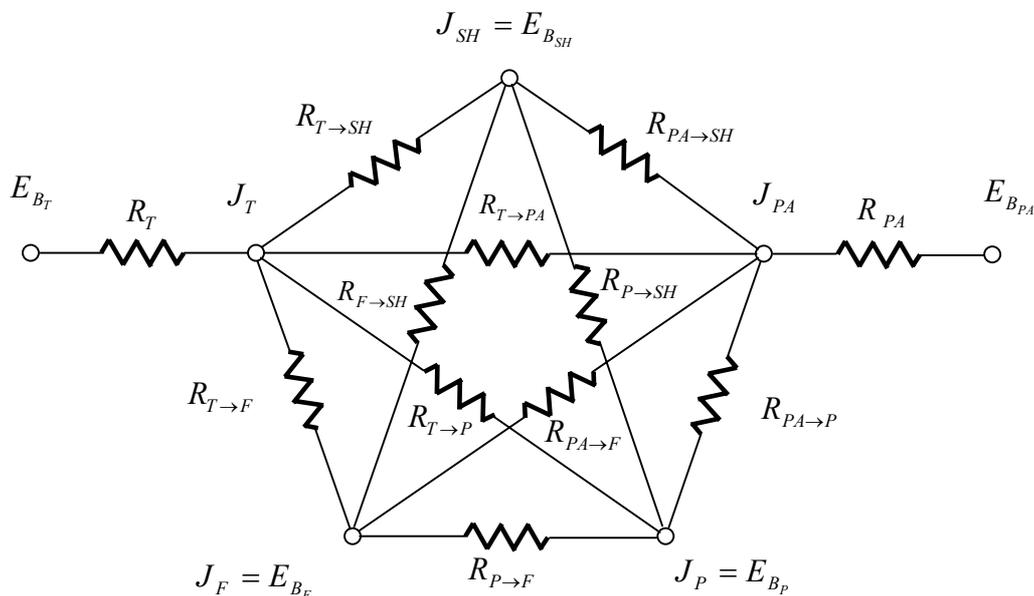
$$K = \left[ 1 + \left( \frac{H/D}{0,6/A_r^{1/2}} \right)^6 \right]^{-0,05} \quad (2.12)$$

$$G = 2A_r^{1/2} \frac{1 - 2,2A_r^{1/2}}{1 + 0,2(H/D - 6)A_r^{1/2}} \quad (2.13)$$

$$F_2 = 0,5 Re^{2/3} \quad (2.14)$$

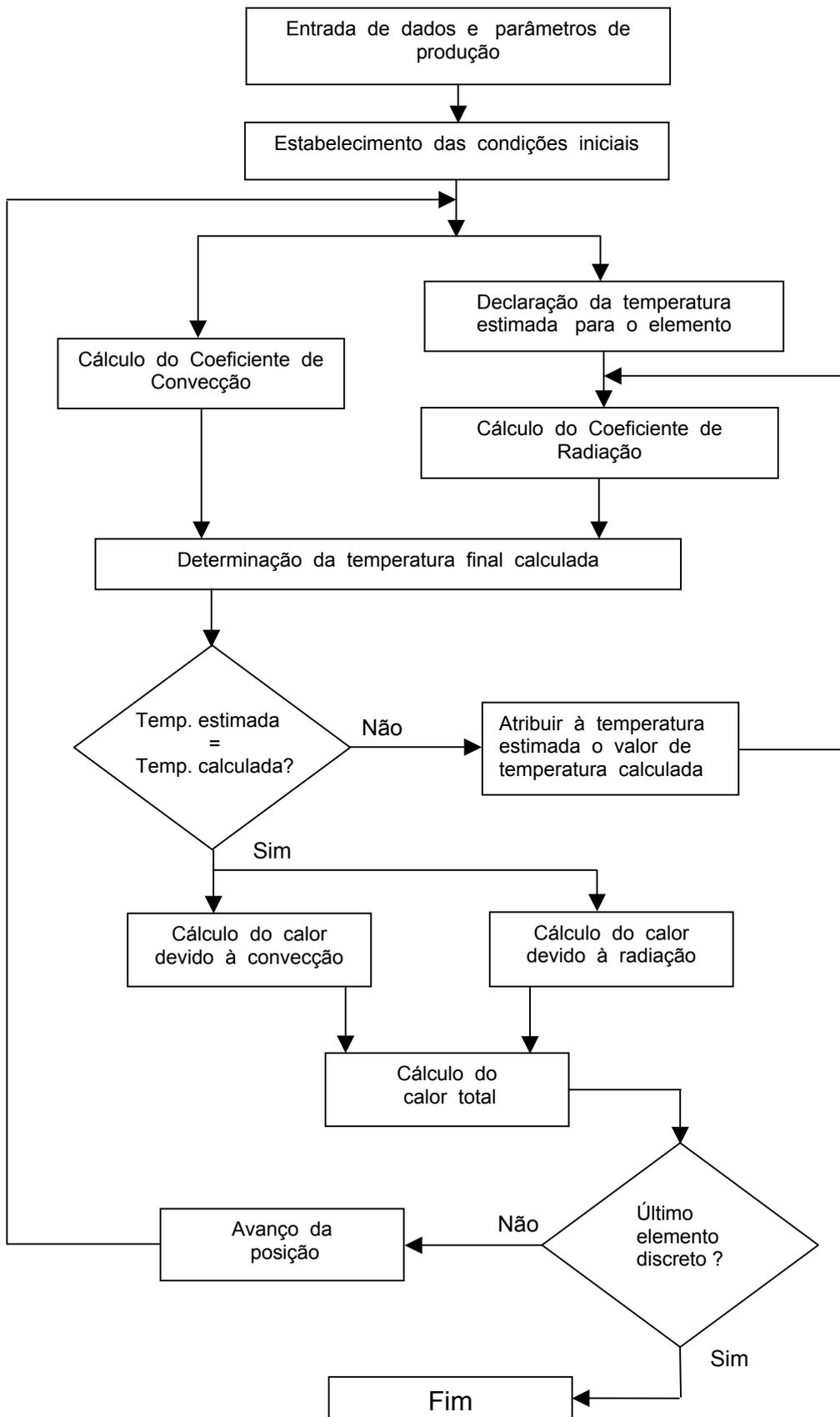
## 2.5 O Termo Fonte Radiativo

A taxa de transferência de energia por radiação foi analisada considerando um invólucro formado pelas superfícies da tira de aço, paredes aquecidas e paredes não aquecidas, pelas extremidades ou fronteiras, e pelo espaço vazio entre a tira de aço e as paredes laterais. As paredes aquecidas representam a fonte de calor. As paredes sem aquecimento são consideradas isoladas e cinzentas e têm o comportamento similar a uma superfície isotérmica, opaca e difusa. A tira de aço inicia o processo à temperatura ambiente. As superfícies de frente e de fundo, e as duas superfícies do espaço vazio entre a tira de aço e as paredes laterais, são consideradas superfícies fictícias com características da atmosfera interna. A influência dos efeitos adicionais devido à radiação gasosa é incluída na análise da taxa de transferência de radiação. O circuito térmico equivalente para as trocas de calor por radiação do invólucro, é apresentado na Figura 2.



**Figura 2.** Circuito térmico radiativo

As relações básicas, para fatores de forma entre duas superfícies genéricas  $i$  e  $j$ , são propostas por Howell<sup>(5)</sup> para faces paralelas e perpendiculares. A integração da equação (2.7) é realizada pelo método de diferenças finitas com formulação implícita ao longo da direção do deslocamento da tira de aço. A radiação, a convecção e as propriedades do gás e da tira de aço são determinadas considerando inicialmente a temperatura da posição anterior. A cada iteração, estas grandezas, são atualizadas até a convergência, cuja tolerância foi definida como  $1.10^{-3}$ . O fluxograma do algoritmo computacional é mostrado na Figura 3.



**Figura 3.-** Fluxograma do processo de cálculo da temperatura da tira de aço

### 3 RESULTADOS

Para a análise e validação dos resultados calculados, três parâmetros são levados em consideração: a temperatura calculada pelo modelo (1), as temperaturas pontuais da tira de aço medidas experimentalmente (2) e as temperaturas de “set-point”, (3) que são medidas por termopares instalados no teto de cada zona.

O processo de medição, está exposto à uma variedade de erros, inerentes à um processo de medição manual. Adotam-se assim, valores estatísticos das últimas medições registradas, conforme Tabela 1.

**Tabela 1.** Histórico de temperaturas da tira de aço em função da posição de medição

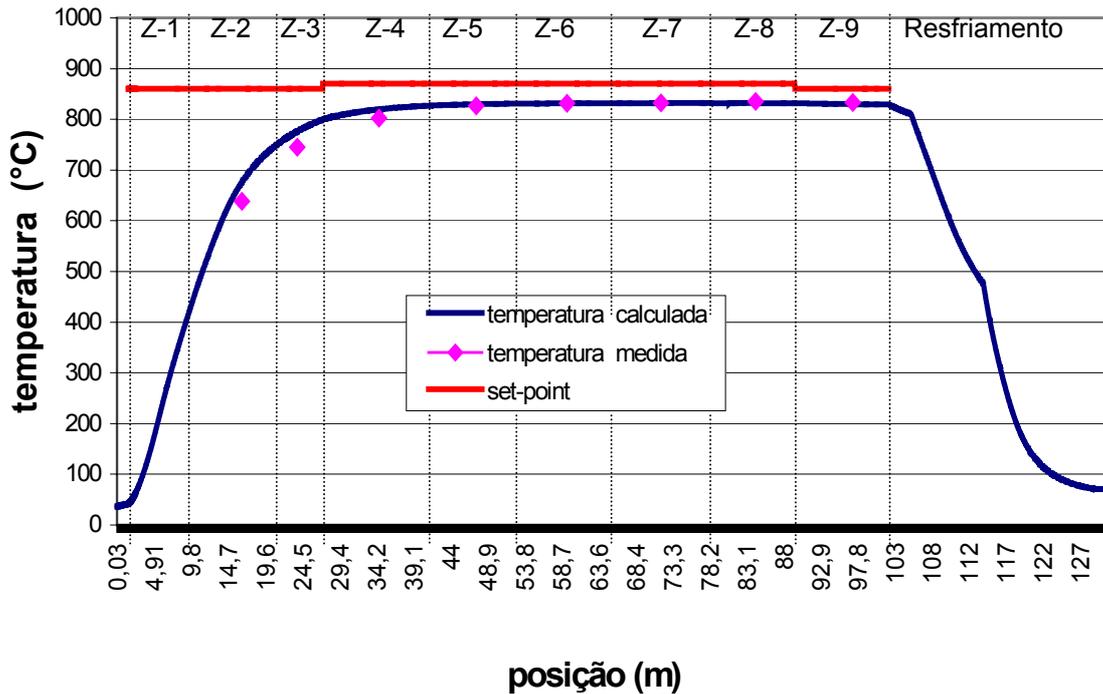
Dados históricos de temperatura (°C) Período - 2002 a 2005									
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9
Média (°C)	-	638	745,3	802,2	826,8	831,4	832,6	835,2	833,2
Desvio padrão	-	-	13,3	11,1	6,5	7,6	7,8	8,6	5,1

Os valores de temperatura da tira de aço na zona 1, não são considerados, pois nesta região o equipamento de medição encontra-se fora da faixa de trabalho.

A Figura 4 mostra a comparação entre os valores de temperatura experimental e o perfil da simulação numérica. Os dados experimentais são reproduzidos com boa concordância pelo modelo matemático. Os melhores resultados situam-se ao longo das zonas de encharque.

Na região de resfriamento, não existem dados experimentais, exceto na saída do material. Nestas seções, trabalha-se com dados de operação existentes, tais como temperatura de entrada e saída da água de recirculação das camisas d'água, temperatura do gás de proteção e vazões de água e gás. Com base nestes dados, pode-se considerar que o modelo matemático representa a situação real com fidelidade.

A Tabela 2, mostra o confronto dos valores experimentais e teóricos nas zonas passíveis de dados experimentais. Apresentam-se ainda, os desvios percentuais máximos para cada zona térmica do reator.



**Figura 4.** Perfil de temperatura experimental e numérico da tira de aço para uma velocidade de processo de 44 m / min.

**Tabela 2.** Desvios entre os resultados calculados e os resultados experimentais

Posição		Temperatura calculada (°C)	Temperatura medida (°C)	Desvio (°C)	Desvio (%)
zona	Distância (m)				
2	16,5	676,44	638	38,4	6,0
3	23,8	776,27	745,3	31	4,2
4	34,6	819,72	802,2	17,5	2,2
5	47,4	829,69	826,8	2,9	0,35
6	59,4	831,47	831,4	0,1	0,01
7	71,8	832,05	832,6	-0,6	0,07
8	84,3	832,02	835,2	-3,2	0,4
9	97,1	829,8	833,2	-3,4	0,4
Saída	132	69,84	74,7	-5,0	2,6

#### 4 DISCUSSÃO

Constata-se pelos valores apresentados na Tabela 2 que a maior discrepância entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente é da ordem de 6,0% , ocorrendo em uma região cuja taxa de crescimento da

temperatura é bastante elevada, e não se trata de um valor estatístico de uma amostra de dados, sendo o valor de uma única medição.

O modelo comporta-se adequadamente, representando com fidelidade o fenômeno físico e gerando resultados bastante satisfatórios. Uma vez que a incerteza dos sistemas de medição é da ordem de 13°C, os resultados simulados pelo programa encontram-se dentro da faixa de incerteza dos valores experimentais levantados, e o modelo é validado.

#### 4.1 Simulação

Propõe-se a simulação de uma situação hipotética de demanda de mercado em que haja a necessidade de um aumento da produção. Este objetivo deverá ser alcançado por meio de um aumento da velocidade de processo.

Deve-se assim determinar o novo nível de temperatura de operação (*set-point*). Nesta simulação, considerou-se o valor dos limites de especificação de temperatura, que foram definidos pelo controle de processo, para a região de encharque do material.

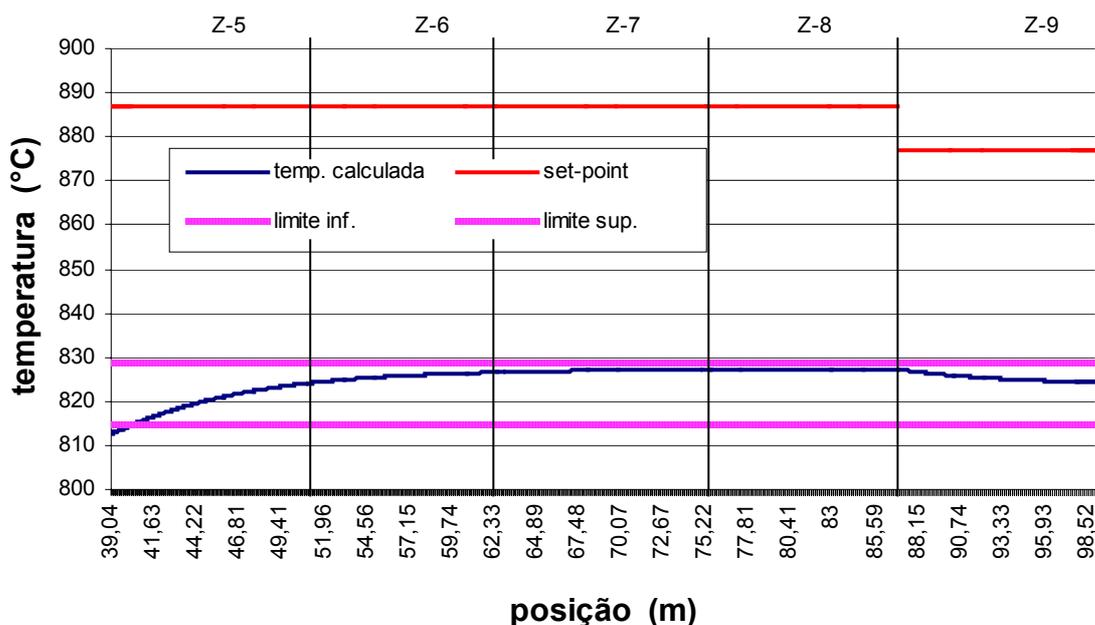
Como resultado, constatou-se que para o aumento na velocidade de processo de 44 para 60 m/min, ou seja, um aumento de 36%, é necessário um aumento na temperatura interna de *set-point* do reator de apenas 2%. Nestas condições a curva de distribuição de temperaturas da tira de aço se situou dentro da faixa de especificação de qualidade do produto. Isto significa que o maior valor da temperatura de ajuste, ou seja 870°C, deverá ser alterado para 887°C.

A Figura 5 apresenta o perfil de temperatura da tira de aço na região onde é controlada e assegurada a qualidade do material - zonas 5 a 9.

A Tabela 3 apresenta os valores de temperatura estabelecidos para a simulação proposta.

O aumento da produção gera um aumento não proporcional do consumo de energia elétrica. A vantagem deste fato torna-se expressiva quando a avaliação é realizada do ponto de vista do consumo específico, representado pela energia consumida por unidade de tonelada produzida. Assim quanto maior o volume de material processado, menor será a energia elétrica consumida para a produção de uma tonelada de produto conforme os valores abaixo:

- Ganho no consumo mensal: 64 kWh / ton;
- Economia anual: 4.070.400 kWh
- Benefício financeiro: R\$ 447.700,00



**Figura 5.** Perfil de temperatura da tira de aço para velocidade de processo de 60 m/min e temperatura de *set-point* ajustada para a nova condição

**Tabela 3.** Temperatura calculada e limites de especificação para velocidade de 60 m/min. e ajuste da temperatura de *set-point* em 2%

Zona Térmica / posição (m)	Temperatura calculada (°C)	Limite inferior (°C)	Limite superior (°C)	Temperatura set-point (°C)
Aquecimento	-	-	-	877
Zona 4 (34,6)	803,35	-	-	887
Zona 5 (47,4)	822,16	815	829	887
Zona 6 (59,4)	826,21	815	829	887
Zona 7 (71,8)	827,15	815	829	887
Zona 8 (84,3)	827,25	815	829	887
Zona 9 (97,1)	824,51	815	829	877

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de uma metodologia para a simulação de um ciclo térmico do tratamento de descarbonetação em um aço silício de grão orientado (GO), é apresentado neste trabalho. Visa-se a garantia das

propriedades magnéticas do material dentro dos limites de especificação, com taxas otimizadas de descarbonetação.

A diferença máxima do confronto entre dados experimentais e calculados foi de 2,9 °C, desvio de 0,35% na região correspondente a zona 5, estando os resultados obtidos dentro da faixa de incerteza dos dados experimentais de  $\pm 13^\circ\text{C}$ .

Após a validação do modelo matemático, realizaram-se simulações, nas quais modificaram-se os parâmetros de processo para análise dos efeitos na distribuição de temperatura da tira de aço. A velocidade normal de processo é aumentada para um valor que corresponde à velocidade máxima da linha de processo (60 m/min), o que resulta em um aumento da temperatura de ajuste necessário para se manter o ciclo padrão de tratamento térmico do material em apenas 2 %.

Conclui-se assim, pela validação do modelo matemático e das técnicas numéricas aplicadas na resolução das equações de governo, que representam os fenômenos térmicos para o processo de descarbonetação dos aços siliciosos no reator *EFCo*, da Acesita.

## **Agradecimentos**

À ACESITA S.A. em nome dos gerentes e colegas de trabalho pelo valioso apoio técnico ao desenvolvimento deste trabalho;  
ao Professor Márcio Ziviani pela orientação conduzida com seriedade e convicção;  
à minha irmã Dra. Cláudia, pelos ensinamentos técnicos e humanos na persistência da busca de soluções.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Fedorov, A. G., Lee, K. H., Viskanta, R. *Inverse Optimal Design of the Radiant Heating in Materials Processing and Manufacturing*. Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 7 (6), pp. 719-726.
- 2 Carvalho, S. R. *Desenvolvimento de um Modelo Matemático e Computacional de um Forno de Recozimento*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, 2003.
- 3 Kang, J., Huang, T., Purushothaman, R. *Modeling and Simulation of Heat Transfer in Loaded Continuous Heat Treatment Furnace*. Transactions of Materials and Heat Treatment, Proceedings of the 14 th IFHTSE Congress, Vol. 25, n° 5, 2004.
- 4 Incropera, F. P. e De Witt, D.P. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*. LTC, 5ª Edição, Rio de Janeiro, 2003
- 5 Howell, J. R. *A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors* <http://www.me.utexas.edu/~howell/sectionc/>, 2005