

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS EM FORNOS DE VIGA MÓVEL

Antônio Adel dos Santos <sup>1</sup>  
Camilla Pessanha Schiavo <sup>2</sup>  
Cristóvão Nery Giacomini <sup>3</sup>

## Resumo

Foi desenvolvido um aplicativo de simulação do processo de reaquecimento de placas em fornos de viga móvel, para cálculo da evolução térmica da placa, da espessura da carepa formada e da solubilização de elementos microligantes do aço. O núcleo do simulador é um modelo matemático de aquecimento da placa, no qual a solução numérica das equações de transferência de calor foi obtida pelo método de volumes finitos. Todas as variáveis que influem no aquecimento, tais como condições operacionais, dimensões e qualidade da placa, além de parâmetros construtivos do forno, são considerados. O aplicativo foi codificado em VB 6.0, com interfaces amigáveis, e permite o cálculo direto do aquecimento, dadas as condições de forno, ou o cálculo inverso das temperaturas de zona necessárias para se atingir a temperatura visada de desenformamento. O simulador tem grande potencial na otimização do processo de reaquecimento em termos de consumo de combustível, produtividade e ajuste de propriedades mecânicas finais dos produtos.

**Palavras-chave:** Forno de reaquecimento; Modelo matemático; Simulação computacional.

## COMPUTER SIMULATION OF SLAB REHEATING PROCESS IN WALKING BEAM FURNACES

### Abstract

A computer simulator of walking beam reheating furnaces that predicts slab temperature evolution, scale thickness and dissolution of microalloying elements in steel has been developed. The core of the simulator is a slab heating mathematical model in which the heat transfer equations were solved numerically by the finite volume method. All variables influencing slab heating, such as operating conditions, dimensions and quality of slab besides furnace design are considered. The software was coded in VB 6.0 language so as to provide friendly interfaces, and permits either direct calculation of heating curves, given the furnace operating conditions, or the inverse calculation of zone temperatures in order to achieve a target discharging slab temperature. The simulator has a great potential for process optimisation in terms of fuel consumption, productivity and adjustment of final mechanical properties.

**Key words:** Reheating furnace; Mathematical modelling; Computer simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

A introdução de novas práticas e de melhorias nos processos tem sido buscada de forma constante nas usinas siderúrgicas, visando-se melhorar o seu desempenho global. Um dos objetivos destas ações é a minimização do seu elevado consumo energético, que é uma característica marcante da atividade siderúrgica. Nos processos de laminação a quente dos aços, os fornos de reaquecimento de placas são os responsáveis pela maior parcela de consumo de energia, situando-se em torno de 50% do custo

de transformação da placa em produto laminado. Na operação destes fornos, busca-se, além do consumo mínimo de combustível, elevada produtividade e condições adequadas de encharque da placa visando o processo de laminação subsequente e a obtenção das propriedades mecânicas visadas no produto laminado.

<sup>1</sup>Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Dr., CQE/ASQ, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, CEP 35160-900, Ipatinga, MG. [aasantos@usiminas.com.br](mailto:aasantos@usiminas.com.br).

<sup>2</sup>Membro da ABM; Engenheira Metalurgista, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, CEP 35160-900, Ipatinga, MG. [cshciavo@usiminas.com.br](mailto:cshciavo@usiminas.com.br).

<sup>3</sup>Membro da ABM; Técnico em Informática, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, CEP 35160-900, Ipatinga, MG. [cristovaogiacomin@gmail.com](mailto:cristovaogiacomin@gmail.com).

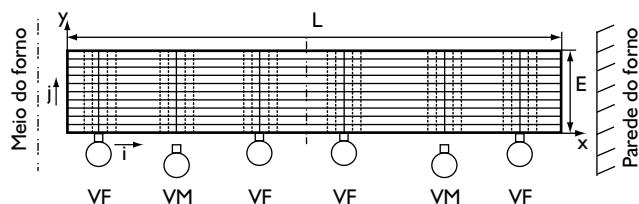
A simulação matemática do processo é uma ferramenta muito útil para se atingir estes objetivos. Modelos matemáticos têm sido apresentados na literatura,<sup>(1)</sup> inclusive um já desenvolvido na Usiminas,<sup>(2)</sup> porém sua utilização requer um especialista para manipular as entradas e saídas e analisar os resultados. A implementação destes modelos em simuladores apresenta uma série de vantagens, dentre elas, a facilidade de utilização pelo usuário, devido às interfaces amigáveis, a existência de bancos de dados contendo cadastros dos equipamentos, dos dados padrão de processo e dos aços processados.

Dentro desse contexto, foi desenvolvido o presente simulador, cujas características básicas são apresentadas neste trabalho.

## 2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

### 2.1 Equacionamento do Modelo de Aquecimento da Placa

Foi considerada uma seção longitudinal da placa, no meio de sua largura, para o domínio do modelo (Figura 1). A opção pela geometria bidimensional decorre do fato de que as variações de temperatura do ambiente do forno ao longo de seu comprimento, numa extensão correspondente à largura usual de uma placa, serem desprezíveis. Por outro lado, podem existir variações significativas de temperatura ao longo da largura do forno (na direção do comprimento das placas), o que justifica a utilização de todo o comprimento da placa no domínio. O deslocamento da placa é realizado por meio de um par de vigas móveis e, enquanto estacionária, ela é apoiada sobre um par ou sobre dois pares de vigas fixas.



**Figura 1.** Esquema da seção da placa com o domínio do modelo. VF, VM, L e E, representam viga fixa, viga móvel, comprimento e espessura da placa.

Foi utilizada a metodologia onde o fluxo líquido de calor para a placa é dado por uma equação que considera a emissividade efetiva do meio radiante.<sup>(1,2)</sup> Assim, o fluxo de calor para a superfície superior da placa,  $q_t$ , é dado pela Equação 1. Nesta equação,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ );  $T_s$  é a temperatura superficial da placa;  $T_f$  a temperatura do ambiente do forno; e  $h_c$  o coeficiente de convecção natural<sup>(2)</sup> (valor constante de  $14,4 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). O parâmetro  $\phi_{CG}$  representa a emissividade efetiva do meio radiante e é utilizado no ajuste do modelo matemático.

$$q_t = \sigma \cdot \phi_{CG} (T_f^4 - T_s^4) + h_c (T_f - T_s) \quad (1)$$

Na superfície inferior, é necessário considerar o efeito sombra, devido à presença das vigas fixas e móveis. Considera-se que a superfície inferior receba calor tanto das paredes/ambiente quanto das vigas, estando cada uma delas a uma dada temperatura. O fluxo de calor para esta superfície,  $q_b$ , é dado pela Equação 2, onde F é o fator de vista global do ambiente do forno para a superfície da placa, e  $T_v$  é a temperatura da viga.

$$q_b = \sigma \cdot \phi_{CG} [F \cdot T_f^4 + (1 - F) T_v^4 - T_s^4] + h_c (T_f - T_s) \quad (2)$$

O cálculo do fator de vista é função da geometria e disposição das vigas fixas e móveis do forno, considerando-se que a placa está apoiada ora sobre as vigas fixas ora sobre as móveis.

No interior da placa, o calor é transferido por condução, regido pela equação de Fourier. Como a velocidade da placa pode ser definida como uma variável conhecida do processo, o problema do aquecimento pode ser resolvido considerando-se que a origem do sistema de coordenadas se desloque solidariamente à placa. Assim, e considerando-se ainda que o material é isotrópico em termos de propriedades físicas, a Equação 3 representa a transferência de calor bidimensional por condução na placa, sendo  $\rho$ ,  $c$  e  $k$ , as propriedades densidade, calor específico e condutividade térmica, respectivamente.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

### 2.2 Solução Numérica

Foi aplicado método dos volumes finitos, de acordo com as formulações implícitas de Patankar.<sup>(3)</sup> Para minimizar os cálculos foi aplicado o método TDMA, utilizando-se, na solução, varrimentos alternados linha por linha nas direções x e y, sendo então denominado método TDMA-ADI linha por linha.

Apesar do método ser incondicionalmente convergente, o tamanho de malha e o intervalo de tempo entre as soluções afetam a precisão do cálculo. Foi verificado que a solução ficou estabilizada para malhas a partir de 20 nós em x e 10 em y. Foi verificado ainda que um intervalo de tempo de 30 s gerou erros de cálculo de apenas 0,30%, portanto desprezíveis.

As propriedades físicas  $k$ ,  $\rho$  e  $c$  são funções da temperatura e dependem da composição química do aço. Após uma análise de valores e equações matemáticas disponíveis na literatura para seu cálculo, decidiu-se utilizar as tabelas do BISRA,<sup>(4)</sup> que fornecem essas propriedades para 5 diferentes aços comuns. O aplicativo desenvolvido enquadra, então, a composição química da placa a ser simulada em um destes aços.

## 3 OPÇÕES DE SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

### 3.1 Opção de Cálculo Direto – Curvas de Aquecimento

Este é o modo mais usual e mais simples do simulador. Normalmente, deseja-se saber qual a condição térmica da placa no desenformamento, dadas as condições de processo e as caracte-

rísticas do forno. Assim, dada uma placa com suas dimensões e composição química conhecidas, sendo aquecida num forno específico, em condições pré-determinadas (temperaturas de zonas e tempo de permanência), o simulador calcula as curvas de aquecimento e a temperatura de desenformamento, além dos cálculos complementares, tais como espessura e perda de peso por carepa, tempo e temperatura teóricos para dissolução de precipitados.

### 3.2 Opção de Cálculo Inverso – Temperaturas de Zonas

Às vezes objetiva-se determinar quais são as temperaturas de zonas para que uma temperatura de desenformamento visada da placa seja atingida. Isto pode ser obtido com o módulo de cálculo direto, através de tentativas, nas quais as temperaturas das zonas são alteradas, observando-se o resultado da condição térmica calculada no desenformamento. Para eliminar esta seqüência de simulações tentativas, foi introduzido o cálculo inverso no simulador, que faz as iterações automaticamente até encontrar a resposta desejada. Nesse módulo, é determinada qual deve ser a temperatura de uma zona pré-selecionada do forno (pré-aquecimento, aquecimento ou encharque), sendo fornecidas as temperaturas das demais zonas, para que a placa atinja uma temperatura de desenformamento visada, num dado tempo de permanência. A base para este cálculo foi derivada de simulações com um modelo desenvolvido anteriormente,<sup>(2)</sup> no qual foi mostrado que existe uma relação aproximadamente linear entre a temperatura de desenformamento e as temperaturas das zonas.

### 3.3 Opção De Ajuste Do Modelo – Parâmetros $\varphi_{CG}$

Para o ajuste do modelo de aquecimento é necessário fazer uma comparação entre as curvas medidas e as calculadas, para posições específicas, e alterar os valores de  $\varphi_{CG}$  até se obter a aproximação satisfatória. Isto pode ser feito de forma qualitativa, mas menos precisa, baseando-se na observação visual das curvas. Para eliminar esta análise subjetiva, foi introduzido um modo de simulação visando-se fazer o ajuste por procedimentos matemáticos iterativos, em interfaces amigáveis com o usuário. O procedimento introduzido busca valores de  $\varphi_{CG}$  para o forno, minimizando-se o residuo quadrado médio entre as curvas de aquecimento medidas e as calculadas de uma placa.

### 3.4 Parâmetros Calculados

O modelo calcula as temperaturas em todos os nós do domínio em cada intervalo de tempo decorrido de solução (30 s). A cada 3 min são calculadas e armazenadas as temperaturas médias consideradas relevantes para informações sobre o aquecimento da placa, que são: média global, no meio da espessura da placa, na superfície superior, na superfície inferior e na posição da viga fixa principal. É também calculada a marca de *skid* ao longo do aquecimento. As tabelas e gráficos da evolução das temperaturas médias e marca de *skid* ao longo do aquecimento constituem parte da saída do simulador. Também são apresentadas as temperaturas médias da placa na saída de cada zona do forno. Adicionalmente às curvas de

aquecimento (temperatura em função do tempo ou da posição), a evolução térmica da placa pode ser visualizada pela mudança, ao longo do tempo, de seu perfil térmico no comprimento.

A espessura da carepa é calculada baseando-se em equações de ganho de massa devido à oxidação isotérmica do ferro,<sup>(5)</sup> incorporando-se procedimentos para permitir sua aplicação em condições de aquecimento contínuo.<sup>(6)</sup> Os cálculos de solubilização de precipitados empregam equações publicadas na literatura<sup>(7)</sup> e consideram os aspectos termodinâmico e cinético da dissolução.<sup>(8)</sup> São cálculos teóricos para fornecer informações comparativas entre as condições de solubilização em função de mudanças nas condições de processo.

### 3.5 Validação do Modelo

Toda formulação do simulador foi testada quanto à sua consistência. O modelo de aquecimento foi ajustado e validado utilizando-se resultados de experiência de medição de temperatura em vários pontos no interior da placa. Esta experiência foi realizada empregando-se o dispositivo desenvolvido na Usiminas e utilizado nos fornos de reaquecimento das laminações a quente da Usiminas. A Figura 2 mostra, como exemplo, comparações entre curvas calculadas e medidas da temperatura média e da temperatura no meio da espessura da placa. A diferença entre valores medidos e calculados de temperatura, no desenformamento, foi inferior a 10°C em todas as posições da placa consideradas no modelo.

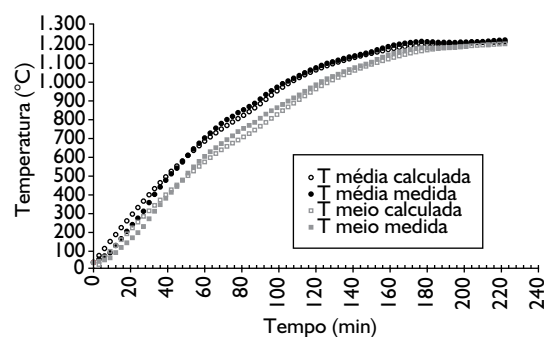


Figura 2. Curvas calculadas e medidas de aquecimento da placa.

## 4 EXEMPLOS DE TELAS DO SIMULADOR

São 10 telas de entrada, incluindo telas de simulação e de cadastro de características do forno, e 10 telas de saída de resultados. São mostradas a seguir algumas dessas telas. A Figura 3 mostra,

como exemplo, a tela de entrada do modo de simulação direta. Os dados de entrada são as características do material, as dimensões da placa e as condições operacionais. Quando a qualidade do material é selecionada, a faixa de composição química padronizada é automaticamente mostrada. É possível alterar estes valores, para uma simulação específica.

O simulador possui telas de cadastro de todos os parâmetros do forno necessários para as simulações. Alterações, por exemplo, em dimensões, posicionamento e quantidade de vigas, botões de *skid*, comprimentos de zonas, são realizadas nestas telas. Qualquer forno de reaquecimento de viga móvel, contendo um par de vigas móveis e um ou dois pares de vigas fixas, em parte ou ao longo de todo o comprimento do forno, pode ser cadastrado. Na Figura 4 é mostrada, como exemplo, a tela de cadastro das vigas móveis do forno.

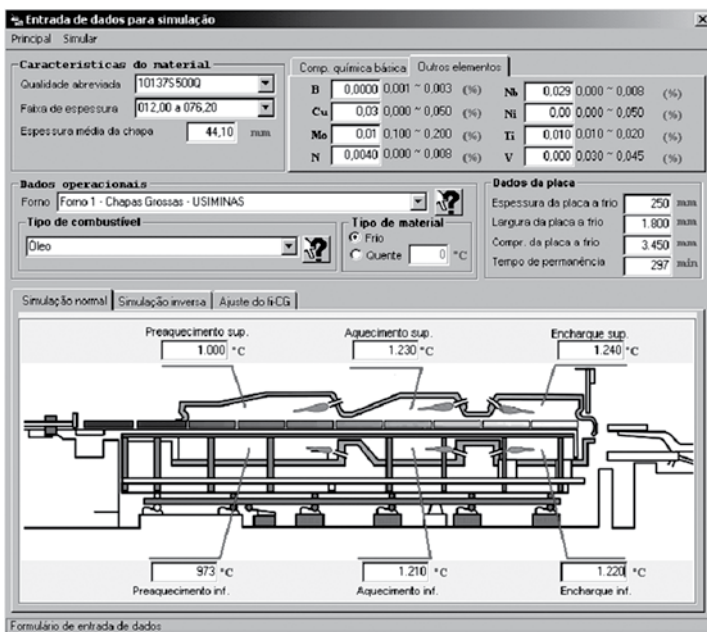


Figura 3. Tela de entrada de simulação para cálculo direto.

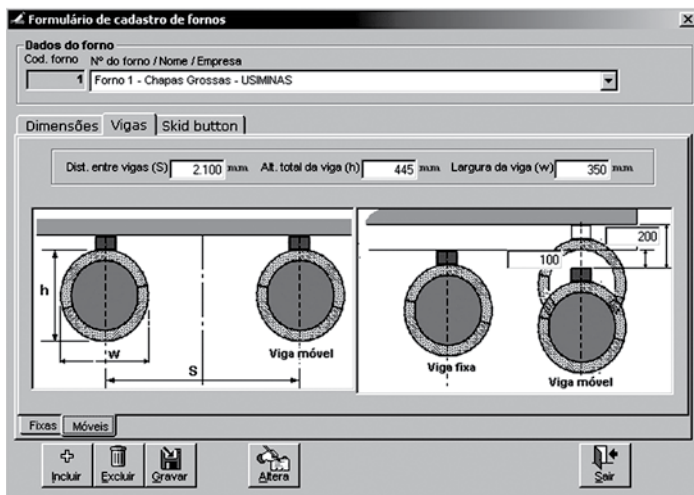


Figura 4. Tela de cadastro das vigas móveis.

A tela principal de saída para a simulação direta (Figura 5) mostra: i) os dados de entrada mais relevantes para o processo, tais como as condições operacionais do forno, dimensões da placa e composição química do aço; ii) parâmetros calculados, tais como temperaturas médias da placa na saída de cada zona, marca de *skid*, diferença de temperatura superfície/centro, espessura de carepa e perda de peso da placa; iii) gráfico de evolução térmica da placa ao longo do forno e gráfico do perfil térmico da placa ao longo de seu comprimento. Todos os dados usados na construção dos gráficos são disponibilizados em tabelas, e podem ser exportados como planilhas Excel. Se a simulação for para um aço microligado, os resultados dos cálculos de solubilização, tempo e temperatura para solubilização, são mostrados adicionalmente.

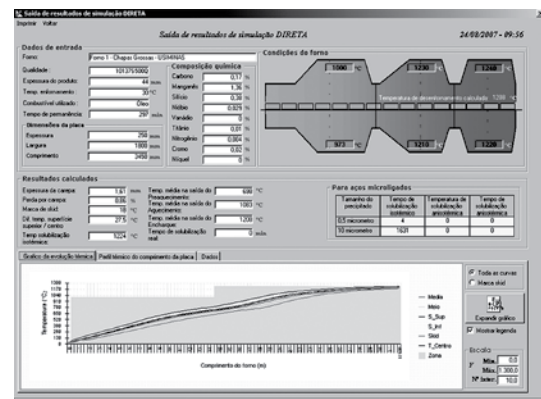


Figura 5. Tela de resultados da simulação direta.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram mostradas as características básicas do simulador matemático do processo de reaquecimento de placas em fornos de vigas móveis desenvolvido na Usiminas. O simulador, desenvolvido em *Visual Basic*, é versátil e pode ser aplicado para outros fornos, além daqueles da Linha de Chapas Grossas, desde que um conjunto de parâmetros típicos desses fornos seja inserido no simulador. Para o caso da Usiminas, existe um banco de dados com todos os aços atualmente produzidos, com suas dimensões e composições químicas, de forma que cada simulação é específica para uma dada placa sendo reaquecida em um dado forno. Com isso, os especialistas de controle técnico e de operação da laminação de chapas grossas passam a contar com uma ferramenta útil para análise e melhoria do processo de reaquecimento de placas.

## REFERÊNCIAS

- 1 PEDERSEN, L. M.; WITTENMARK, B. **A simple slab temperature model**. Andhra Pradesh, Índia: Steel Technology International, 2001. p. 74-7.
- 2 SANTOS, A.A.; HAUCK, G.A.; LAIA, L.L. Modelamento matemático para o reaquecimento de placas em fornos de viga móvel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 51., 1996, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: ABM, 1996, p.955-72.
- 3 PATANKAR, S.V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: McGraw-Hill, 1980.
- 4 The British Iron and Steel Association. **Physical constants of some commercial steels at elevated temperatures**. London: Butterworths, 1953.
- 5 SHEASBY, J.S.; BOGGS, W.E.; TURKDOGAN, E.T. Scale growth on steels at 1200°C: rationale or rate and morphology. **Metals Science**, v. 18, p. 127-36, Mar. 1984.
- 6 SACHS, K.; TUCK, C.W. Scale growth during re-heating cycles. **Werkstoffe und Korrosion**, v. 21, n. 11, p. 945-54, Nov. 1970.
- 7 IRVINE, K.J.; PICKERING, F.B.; GLADMAN, T. Grain-refined C-Mn steels. **Journal Iron and Steel Institute**, v. 205, p. 161-82, Feb. 1967.
- 8 WHELAN, M.J. On the Kinetics of Precipitate Dissolution. **Metal Science Journal**, v. 3, p 95-7, 1969.

Recebido em: 01/04/08

Aceito em: 16/07/08

Proveniente de: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO – PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 44., 2007, Campos do Jordão, SP. São Paulo: ABM, 2007.