

MELHORIA DO PROCESSO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS NA USIMINAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO MATEMÁTICA

Antônio Adel dos Santos ¹
Cristóvão Nery Giacomini ²
João Paulo Batista Silva ³

Resumo

São mostradas características básicas e aplicações do simulador matemático do processo de reaquecimento de placas em fornos de viga móvel, desenvolvido no Centro de Tecnologia Usiminas, e que tem sido aplicado aos fornos da Linha de Chapas Grossas da Usina de Ipatinga. Trata-se de um modelo matemático bidimensional, resolvido pelo método numérico de volumes finitos, validado por medições de temperatura da placa durante o aquecimento e inserido em uma ferramenta visual de simulação. Dentre as aplicações destacam-se: (i) determinação das temperaturas de zonas e tempos de permanência adequados à produção de aços com a tecnologia de resfriamento acelerado; (ii) determinação de temperaturas médias das placas no desenformamento e saída das zonas dos fornos, que são dados necessários para alimentar a automação dos fornos na fase de comissionamento; e (iii) análise da distribuição térmica da placa ao longo do reaquecimento, fornecendo subsídios para a otimização operacional.

Palavras-chave: Forno de reaquecimento; Simulação matemática; Processamento termomecânico.

IMPROVEMENT OF SLAB REHEATING PROCESS AT USIMINAS THROUGH MATHEMATICAL SIMULATION

Abstract

Basic characteristics and application examples of the mathematical simulator for reheating process in walking-beam type furnaces, that has been developed and applied to Usiminas plate mill line at Ipatinga, are shown in this paper. This is a bi-dimensional mathematical model solved by the finite volume method, validated by temperature measurements inside the slab during heating and coded as a visual tool. Among these applications, the following can be highlighted: (i) determination of suitable furnace zone temperatures and residence times for processing steels by accelerated cooling technology; (ii) determination of slab average temperature at discharging as well as at each zone exit, supplying data to be fed to the automation system at the commissioning stage; (iii) analyses of slab thermal distribution through the reheating process, enabling operational optimization.

Key words: Reheating furnace; Mathematical simulation; Thermomechanical processing.

I INTRODUÇÃO

A simulação matemática é uma ferramenta eficaz para melhoria de processos. Para isto, os modelos matemáticos inerentes devem ser desenvolvidos e rigorosamente validados para que possam ser aplicados com confiabilidade. Em relação a fornos de reaquecimento de aços, a literatura existente é restrita,⁽¹⁻³⁾ uma vez que não há controvérsias

sobre o fenômeno de aquecimento dos aços. Diferenças entre os trabalhos resumem-se aos métodos de solução numérica do problema transiente de condução de calor e à formulação das condições de contorno. Por exemplo, Panjkivic e Gloss⁽³⁾ apresentaram recentemente uma excelente contribuição técnica sobre modelos de fornos de reaquecimento, enfatizando tanto as equações de governo quando o método de solução numérica.

¹Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Pesquisador Especialista Sênior, Certified Quality Engineer/American Society for Quality, Centro de Tecnologia Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: antonio.adel@usiminas.com

²Analista de Sistemas, Analista de TI Sênior, Centro de Tecnologia Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: cristovao.giacomini@usiminas.com

³Engenheiro Metalurgista, Pesquisador, Centro de Tecnologia Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: joao.batista@usiminas.com

Os trabalhos sobre simulação matemática desenvolvidos mais recentemente no Centro de Tecnologia Usiminas,⁽⁴⁻⁶⁾ visam, adicionalmente, à formulação das equações diferenciais de governo dos fenômenos envolvidos e à sua solução numérica, a inserir os modelos em ferramentas visuais, com interfaces de entrada e saída de dados que são de fácil acesso aos usuários. Dessa forma, os modelos ficam acessíveis aos usuários de áreas operacionais e técnicas da empresa, na forma aqui chamada de simuladores matemáticos. Além disso, os modelos são validados por meio de medidas diretas no processo para sua credibilidade.

Os benefícios desses simuladores decorrem de uma série de características dos modelos matemáticos, dentre elas: (i) são baseados em leis físicas dos fenômenos presentes nos processos, permitindo a generalização dos modelos; (ii) são inseridos em aplicativos computacionais amigáveis e de fácil utilização pelo usuário; (iii) são completamente parametrizados, de forma que podem ser aplicados a instalações industriais similares; (iv) são validados a partir de dados levantados dos próprios processos, garantindo sua confiabilidade; e (v) permitem, muitas vezes, os cálculos inversos, ou seja, determinar as condições a serem impostas ao processo em função das especificações do produto. Dessa forma, os simuladores matemáticos podem ser usados com dois objetivos distintos: (i) avaliar um processo já padronizado e estável, verificando possibilidades de otimizá-lo em termos de custo, rendimento e qualidade do produto; e (ii) verificar a viabilidade de rotas de processo totalmente novas em função de especificação de produto ou de implantação de tecnologia nova.

Neste trabalho, são apresentadas características básicas e exemplos de resultados de aplicação de uma ferramenta de simulação matemática do processo de reaquecimento de placas em fornos de viga móvel. Esta

ferramenta tem sido usada para melhoria de processo dos fornos da Linha de Chapas Grossas da Usina de Ipatinga da Usiminas, com ênfase em três objetivos: (i) reavaliar os padrões dos fornos visando economia de combustível; (ii) determinar as condições operacionais de forno para o processamento de aços pela tecnologia de laminação controlada seguida de resfriamento acelerado (processo TMCP – *Thermomechanical Control Process*); (iii) servir como base de comparação e ajuste de modelos matemáticos do fornecedor do sistema de automação dos fornos.

2 SIMULAÇÃO MATEMÁTICA

2.1 Modelo Matemático

O núcleo do simulador é o modelo matemático de cálculo da evolução da temperatura da placa ao longo do reaquecimento, que é aplicado em uma malha bidimensional considerando a espessura e o comprimento da placa, Figura 1.

A transferência de calor do meio ambiente para a placa é realizada pelos mecanismos de radiação térmica, q_r , e convecção, q_c , conforme representado na Equação 1. O expoente k significa que todas as variáveis são dadas para cada zona k do forno. Os valores de φ_{CG} , considerada a emissividade efetiva do forno, são determinados experimentalmente com o auxílio dos resultados obtidos em experiência de medição da evolução da temperatura com uma placa instrumentada, permitindo o ajuste do modelo. Quando são consideradas as zonas superiores, o fator de vista F_i é unitário, ao passo que, para as zonas inferiores, ele é calculado para cada nó da malha de solução ao longo do comprimento da placa, em função das características geométricas desta região.

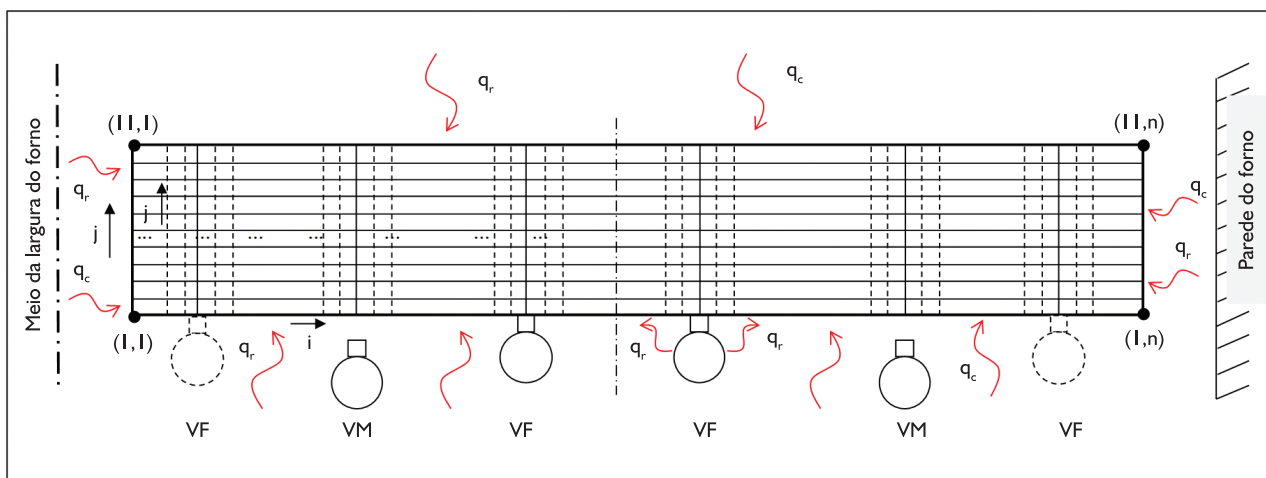


Figura 1. Esquema da malha de cálculo de temperatura em seção da placa varrendo comprimento e espessura. A representação é para um forno com duas fileiras, sendo que a placa ocupa uma delas. VM: viga móvel; VF: viga fixa. O número de nós da malha é II na espessura e n (variável), no comprimento da placa.

$$q^k = \phi_{CG}^k \sigma [F_i (T_a)^4 + (1 - F_i) (T_v)^4 - (T_s)^4] + h^k (T_a^k - T_s) \quad (1)$$

onde:

q^k : fluxo de calor do forno para a placa ($W.m^{-2}$);

ϕ_{CG}^k : emissividade efetiva do ambiente do forno para a placa (-);

F_i : fator de vista (-);

σ : constante universal de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$);

T_s : temperatura da superfície da placa (K);

T_a^k : temperatura ambiente do forno (K);

T_v : temperatura das vigas (K);

h^k : coeficiente de transferência de calor por convecção ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

A temperatura ambiente do forno varia ao longo do seu comprimento e é parametrizada matematicamente por um conjunto de equações de segmentos de reta (Equação 2). Tal Equação é função da temperatura de controle da zona do forno, T_z^k , que é a temperatura medida continuamente por termopar. Os valores dos parâmetros A e B são determinados no ajuste do modelo matemático.

$$T_a^k = A.T_z^k + B^k \quad (2)$$

As Equações 1 e 2 permitem determinar a quantidade de calor transferida do ambiente do forno para a superfície da placa. No seu interior, a transferência é governada por condução e dada pela Equação de Fourier (Equação 3).

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

onde:

x e y: coordenadas espaciais na seção longitudinal através da espessura da placa (Figura 1) (m);

t: tempo de aquecimento (s);

λ : condutividade térmica da placa ($W.m^{-1}.K^{-1}$);

ρ : densidade da placa ($kg.m^{-3}$); e

c: calor específico da placa ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).

As propriedades λ , ρ e c variam com a composição química do aço e com a temperatura. Por considerar tais variações, o modelo verifica qual aço estudado pelo BISRA⁽⁷⁾ mais se aproxima da composição química do aço a ser processado e aplica as propriedades de tal aço na Equação 3.

A solução da Equação 3 é realizada de forma numérica aplicando-se o método de volumes finitos, esquema implícito, com o algoritmo TDMA ADI (*Tridiagonal Matrix Algorithm Alternating Implicit*), com resolução linha a linha.⁽⁸⁾

2.2 Aplicativo Computacional

Tendo como núcleo o modelo matemático apresentado, foi desenvolvido um aplicativo computacional com as principais características: (i) possui um banco de dados com as faixas de composições químicas de todos os aços

chapas grossas da Usina de Ipatinga; (ii) possui tabelas de cadastro de parâmetros geométricos do forno e de fatores de ajuste do modelo matemático; (iii) possui interfaces de entrada de dados e de saída de resultados das simulações, sendo que na entrada (Figura 2), todas as variáveis podem ser alteradas antes da simulação; (iv) na saída de resultados (Figura 3), são calculados diversos parâmetros térmicos da placa, tais como: temperatura média global, marca de *skid*, temperatura no meio da espessura da placa, temperatura superficial, temperatura de topo, temperatura no meio do comprimento, além de parâmetros de solubilização de precipitados e crescimento de carepa.

A simulação pode ser feita de forma direta quando, dadas as condições operacionais, são calculados os parâmetros de desenformamento da placa ou, na forma inversa, quando as temperaturas de zona são calculadas para se atingir a temperatura de desenformamento visada.

2.3 Validação do Modelo Matemático

Uma etapa fundamental para confiabilidade e aplicação do simulador matemático do forno é a sua validação, realizada com base em experiências de medições de curvas de aquecimento durante o processamento padrão dos fornos. Em cada experiência, foram inseridos oito termopares do tipo K, com bainha de 6,00 mm, em várias posições no interior de uma placa especialmente preparada, que foi enforcada e aquecida no processo normal de produção. As dimensões da placa para os fornos da Linha de Chapas Grossas e usada na experiência foram de 245 mm de espessura, 3.450 mm de comprimento e 1.890 mm de largura. Os termopares foram conectados a um coletor de dados, devidamente isolado termicamente e protegido do ambiente do forno, que

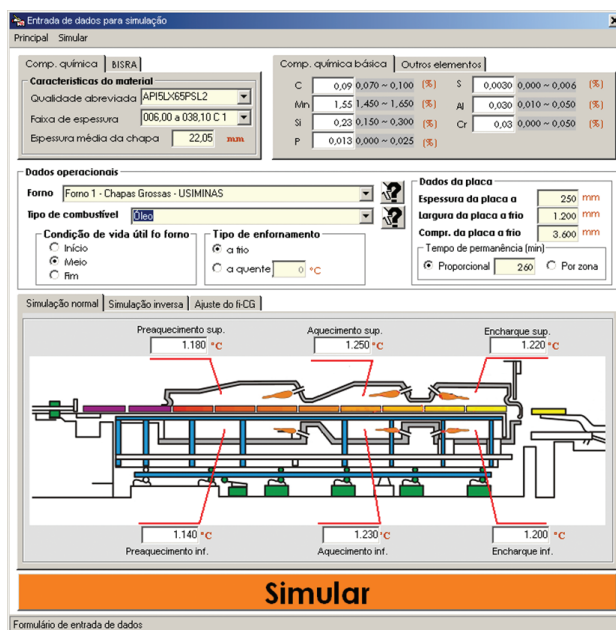


Figura 2. Interface principal de entrada de dados do aplicativo.

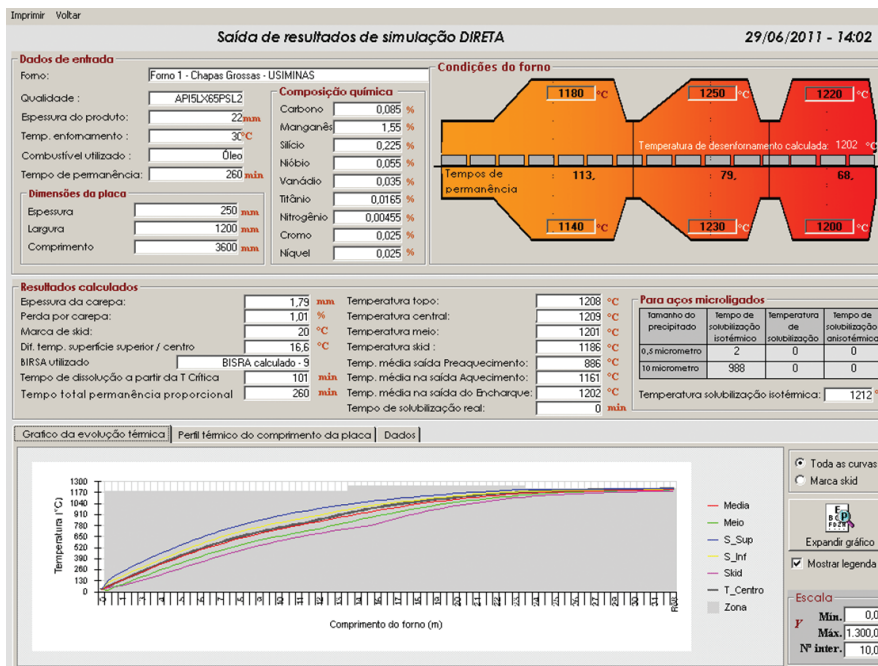


Figura 3. Interface com os resultados de simulação.

armazena as temperaturas medidas a cada 30 s ao longo do aquecimento. Três dos oito termopares foram posicionados entre as duas vigas fixas centrais (Figura 1), sendo um próximo à superfície superior, um no meio da espessura e outro próximo à superfície inferior. Outros três termopares foram posicionados sobre uma das vigas fixas centrais (Figura 1), repetindo-se a distribuição ao longo da espessura. Outro termopar foi posicionado na extremidade da placa e o último mede, na verdade, a temperatura ambiente do forno, ou seja, ele ficou cerca de 150 mm acima da superfície superior da placa. A Figura 4 mostra uma fotografia da placa instrumentada prestes a ser enfiada em uma das experiências realizadas.

Na Figura 5 são mostrados alguns exemplos de comparação de curvas de aquecimento medidas com as calculadas pelo aplicativo após sua validação, isto é, a determinação dos parâmetros φ_{CG}^k , h^k , A e B, das Equações 1 e 2. Para a validação foram usados resultados de três experiências, em condições distintas de processamento em termos de temperaturas de zonas e tempo de permanência da placa nos fornos. Na Usiminas, os fornos de reaquecimento possuem seis zonas, mas o aplicativo é parametrizado e pode ser usado para um número qualquer de zonas, desde que ajustado por experiências com a placa instrumentada. Na Figura 5a são mostradas comparações para as temperaturas a 10 mm da superfície superior da placa, para duas posições ao longo do comprimento da placa, afastadas de 500 mm, uma correspondente ao meio do comprimento da placa, entre as vigas fixas centrais, e a outra, na posição correspondente à viga fixa. Observe, neste caso, que o efeito da viga fixa, onde a placa é apoiada em sua superfície superior, é pequeno. Na Figura 5b são



Figura 4. Fotografia da placa instrumentada prestes a ser enfiada.

mostradas curvas comparativas para a posição de meio de espessura da placa. As temperaturas são mais baixas que na superfície, como esperado, e o efeito da viga fixa que, pelo efeito sombra reduz localmente a temperatura da placa, é nitidamente percebido. O erro de cálculo é relativamente pequeno, em especial no momento de descarregamento da placa, que é o mais importante para o processo, onde o erro fica normalmente dentro de 10°C, menos que 1% do valor medido.

3 APLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Estabelecimento de Condições Operacionais Especiais

Em 2010, foi instalado o equipamento de resfriamento acelerado na Linha de Chapas Grossas da Usiminas em Ipatinga, denominado CLC (*Continuous on-Line Control*) pelo fornecedor da tecnologia, a siderúrgica Nippon Steel Corporation. O processamento de aços aplicando a tecno-

logia de laminação controlada mais resfriamento acelerado (processo TMCP) exige adaptações das rotas de processo, desde a aciaria até o acabamento do laminado. No caso do reaquecimento de placas, são necessários requisitos especiais de temperatura de desenformamento e de uniformidade térmica da placa. Por exemplo, podem ser utilizadas temperaturas de desenformamento tão baixas quanto 1.050°C, o que representa uma condição totalmente inédita no processo convencional de reaquecimento de placas para chapas grossas, no qual o desenformamento ocorre em torno de 1.200°C.

Após o desenvolvimento e validação do aplicativo de simulação, foi feita sua aplicação para avaliar a capacidade dos fornos de reaquecimento da Linha em atender aos requisitos do processo TMCP e determinar quais seriam as condições operacionais em termos de temperaturas de zonas e tempo de permanência da placa.

Para o caso de desenformamento visado de 1.050°C, a tela de saída apresenta os resultados da simulação (Figura 6). As temperaturas de zonas deter-

minadas na simulação matemática foram 1.070/1.040°C, 1.120/1.100°C e 1.080/1.060°C, respectivamente para as zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque, nos ambientes superior/inferior, como mostrado na Figura 6. O tempo de permanência foi de 243 minutos. Observe que, neste caso, a simulação foi para um aço CMn com código BISRA 3, pois este foi o aço da placa utilizada no teste de medição de temperatura.

Decidiu-se realizar um teste industrial de processamento de placas com esta condição de reaquecimento. Durante o teste, com o forno operando nessas temperaturas, foi realizada a experiência de medição das curvas de aquecimento com a placa instrumentada. Com os resultados coletados, foram realizados cálculos estimativos das temperaturas médias global da placa, da superfície superior, da superfície inferior, do meio da espessura, no topo da placa e na posição da viga fixa. Deve-se ressaltar que o modelo matemático possui uma malha de aproximadamente 660 pontos de cálculo, enquanto que, na experiência, foram inseridos oito termopares na placa.

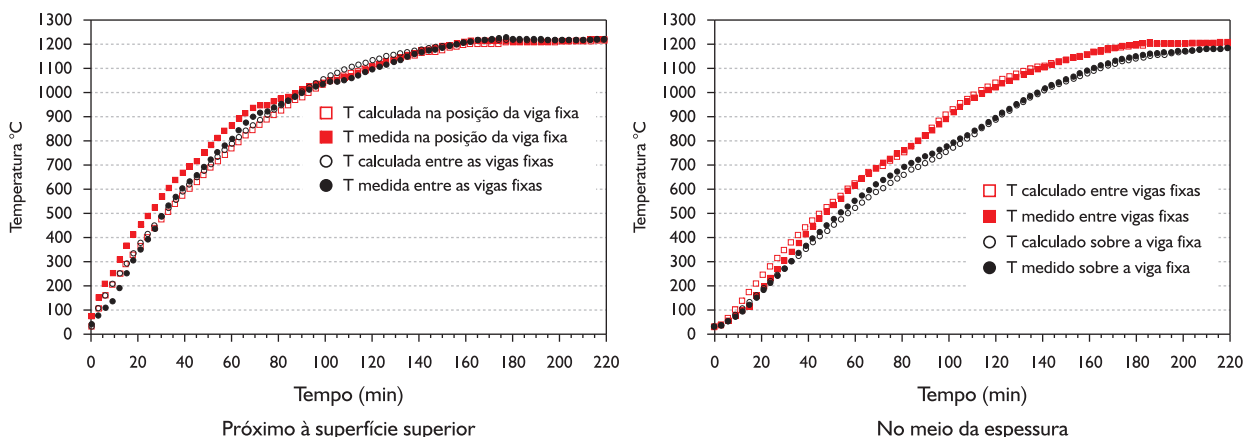


Figura 5. Curvas comparativas de temperaturas calculadas com medidas em duas posições na espessura da placa.

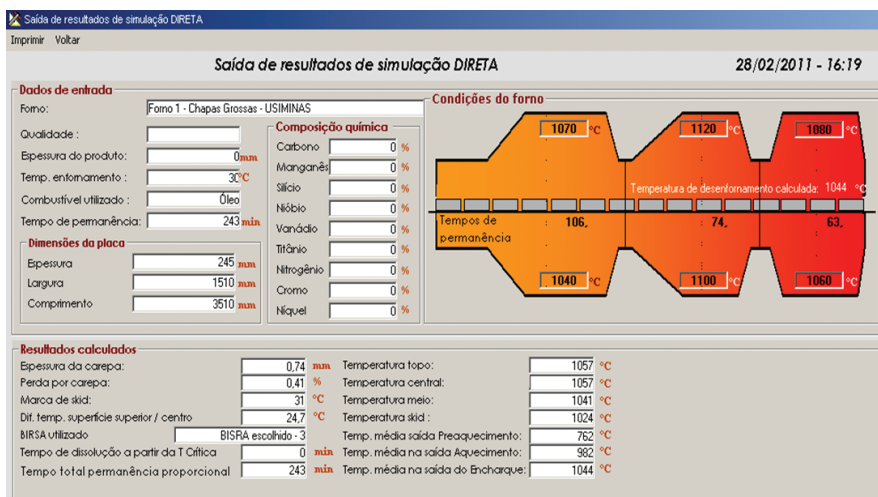


Figura 6. Tela de resultados da simulação das condições de forno para desenformamento a 1.050°C.

Portanto, as temperaturas médias medidas são estimativas, baseadas em poucos valores, enquanto que os valores calculados são baseados numa ampla distribuição de pontos.

Na Tabela I é mostrada uma comparação entre valores medidos e calculados no desenformamento. Observa-se a aproximação entre valores medidos e calculados, ficando a diferença em menos de 1%, excetuando-se a temperatura na extremidade da placa, onde a diferença chegou a 1,8% (20°C).

Nesse caso, o aplicativo foi utilizado para determinar condições operacionais especiais, inéditas. Aplicando-se tais condições ao teste industrial e medindo-se as curvas de aquecimento, verificou-se que os resultados medidos foram muito próximos daqueles previstos nas simulações prévias, confirmando a validade do modelo matemático. Em outra experiência com temperatura visada de desenformamento de 1.100°C, foi realizado um procedimento similar ao descrito, tendo sido comprovada, novamente, a confiabilidade da simulação.

Com isso, o aplicativo foi adotado como a ferramenta de determinação das condições operacionais dos fornos de reaquecimento de placas da Linha de Chapas Grossas em todos os testes a quente e testes de homologação dos aços processados por CLC a partir de 2010.

3.2 Melhoria Operacional e Subsídios para Automação dos Fornos

Foi implantada, recentemente, a automação dos fornos de reaquecimento da Linha de Chapas Grossas na Usina de Ipatinga. No modo anterior de operação, chamado de manual, o operador entra no sistema de combustão com as temperaturas das seis zonas dos fornos, obedecendo a padrões estabelecidos. Como é inviável a medição precisa da temperatura média da placa durante a rotina operacional, o único meio de determiná-la é por meio da simulação matemática. Com esta simulação todos os padrões operacionais de temperaturas de zonas podem ser simulados e analisados, tendo como objetivos a melhoria operacional e a redução de consumo de combustível.

No processo de automação dos fornos, foi realizada a simulação das curvas de aquecimento de todos os padrões operacionais então existentes para fornecer as temperaturas médias das placas no desenformamento, e também na saída das zonas de aquecimento e de

encharque. Isto foi necessário pois o sistema de controle automático do forno precisa ser alimentado com valores visados para estas temperaturas (dados PDI – *Primary Data Input*), que somente podem ser determinadas por simulação. Na forma de operação automática, o sistema de controle de combustão recebe os valores pré-determinados para a operação das zonas, de tal forma que as temperaturas de desenformamento visadas sejam atendidas.

Neste sentido, o simulador desenvolvido foi essencial para geração dos dados PDI necessários à automação dos fornos. Além disso, o ajuste do modelo matemático do fornecedor do sistema de automação foi calibrado tendo como subsídios os resultados das experiências de medição de temperatura realizadas e resultados de simulações com o simulador desenvolvido.

Até o momento, somente foi enfatizado o aspecto térmico das placas. O simulador possui também cálculos termodinâmicos e cinéticos de dissolução de precipitados de nióbio, que podem auxiliar na indicação de condições adequadas para o reaquecimento de aços microligados.⁽⁹⁾ Ressalta-se, no entanto, que devido à inviabilidade de medição da dissolução no processo industrial os cálculos são teóricos e estimativos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ajustando-se um modelo matemático, realístico e bem estruturado, a partir de dados de processo, obtém-se uma excelente ferramenta a ser aplicada para melhoria de processo produtivo. Podem ser realizadas simulações do efeito de variáveis de processo, visando maior conhecimento e melhoria do processo.

No trabalho apresentado, mostra-se a aplicação da ferramenta de simulação matemática dos fornos de reaquecimento de placa do tipo viga móvel, que é dotada de características especiais, como: (i) inserção do modelo matemático em um aplicativo computacional com interfaces de fácil utilização do usuário; (ii) parametrização dos principais dados de projeto dos fornos e variáveis operacionais; (iii) ajuste do modelo por meio de medições de curvas de aquecimento no processo industrial; e (iv) flexibilização do aplicativo para cálculo direto da temperatura da placa a partir das condições operacionais dos fornos e cálculo inverso para determinação das condições operacionais em função de temperaturas visadas da placa.

Tabela I. Comparação de valores calculados com os medidos de temperaturas médias da placa, na condição de operação dos fornos com temperatura visada de desenformamento de 1.050°C

Método	TMedGlo	TMedCen	TMedSkid	MS	TMedBor	TMedMeio	TSupSup	TsKid
Medido	1050	1062	1031	32	1077	1040	1071	1015
Simulador	1044	1057	1026	31	1057	1041	1066	1024

TMedGlo: média global; *MedCen*: média na seção central; *MedSkid*: média sobre a viga fixa; *MS*: marca de skid; *TmedBor*: média na extremidade da placa; *TMedMeio*: média no meio da espessura; *TSupSup*: média na superfície superior; *TSkid*: temperatura pontual na placa na posição sobre a viga fixa.

O fato de os modelos matemáticos terem sido desenvolvidos com base em princípios físicos dos fenômenos de transferência de calor dentro do forno, juntamente com sua validação, permite que a ferramenta seja usada, com sucesso, na exploração de condições operacionais inéditas, isto é extrapoladas do seu domínio de validação. Neste caso podem ser previstas e obtidas, temperaturas de processo tão baixas quanto 1.050°C,

no processo de produção de aços com a tecnologia de resfriamento acelerado, por meio da simulação.

Além disso, podem ser citadas outras importantes aplicações desta ferramenta de simulação, como: a geração de dados PDI para a automação dos fornos de Chapas Grossas da Usina de Ipatinga, e subsídios para verificação da adequação dos modelos matemáticos do fornecedor da automação.

REFERÊNCIAS

- 1 KIM, G., HUH, Y. Prediction of transient slab temperature distribution in the re-heating furnace of a waling-beam type for rolling of steel slabs. *ISIJ International*, v. 40, n. 11, p. 1115-23, 2000.
- 2 STAALMAN D. The funnel model for accurate slab temperature in reheating furnaces. *La Revue de Metallurgie*, v. 101. n. 6, p. 453,-459, Juin 2004. <http://dx.doi.org/10.1051/metal:2004187>
- 3 PANJKIVIC, V., GLOSS, R. Fast dynamic heat and mass balance model of walking beam reheat furnace with two-dimensional slab temperature profile. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 39, n. 9, p. 190-209, 2012.
- 4 SANTOS, A. A.; SCHIAVO, C. P.; GIACOMINI, C. N. Simulação computacional do processo de reaquecimento de placas em fornos de viga móvel. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 5, n. 1, p. 35-39, jul.-set. 2008. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00501007>
- 5 GIACOMINI, C. N.; SANTOS, A. A.; SOUZA, A. L. Análise dos processos de laminação a quente na Usiminas via simuladores computacionais. *Tecnologia em Metalurgia, Minerais e Mineração*, v. 6, n. 1, p. 31-35, jul.-set. 2009. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00601006>
- 6 SANTOS, A. A.; GIACOMINI, C. N. Mathematical simulation of plate rolling at Usiminas: a tool for process enhancement. In: CONFERENCIA DE LAMINACIÓN, 18.,2010, Rosario. *Proceedings...* Buenos Aires: IAS, 2010. p. 113-23.
- 7 THE BRITISH IRON AND STEEL ASSOCIATION. *Physical constants of some commercial steels at elevated temperatures*. London: Butterworths, 1953.
- 8 PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- 9 PALMIERE, E.J.; GARCIA, C.I.; DeARDO, A.J. Compositional and microstructural changes which attend reheating and grain coarsening in steels containing niobium, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 25, n. 2, p. 277-285, 1994.

Recebido em: 13/03/2012

Aceito em: 19/08/2012