

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO REAQUECIMENTO DE PLACAS NA USIMINAS¹

Antônio Adel dos Santos²
Cristóvão Nery Giacomin³
João Paulo Batista Silva⁴

Resumo

São mostradas características básicas e o potencial 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. Dentre as aplicações se destacam: (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, 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: Fornos de reaquecimento; Simulação matemática; Resfriamento acelerado, Processo TMCP.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MATHEMATICAL SIMULATION OF SLAB REHEATING PROCESS AT USIMINAS

Abstract

A mathematical simulator of reheating process in walking-beam type furnaces has been developed and applied to Usiminas plate mill line at Ipatinga. This paper shows its basic characteristics and examples of application. Among these applications, the following can be highlighted: (i) determination of furnace zone temperatures and residence time that are suitable for processing steels by TMCP (controlled rolling plus accelerated cooling); (ii) determination of slab mean temperature at discharging as well as at each zone exit, providing data to be fed in the automation system at the commissioning stage; (iii) analyses of slab thermal distribution through the reheating process, enabling operational optimization.

Key words: Reheating furnaces; Mathematical simulation; Accelerating cooling; TMCP process.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

² Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc., D.Sc., CQE/ASQ, Centro de Tecnologia Usiminas – Usina de Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM; Analista de Sistemas, Centro de Tecnologia Usiminas - Usina de Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Centro de Tecnologia Usiminas - Usina de Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

A simulação matemática é uma ferramenta eficaz para melhoria de processos. Para isto, modelos matemáticos inerentes aos processos são desenvolvidos e precisam ser rigorosamente validados para que possam ser aplicados com confiabilidade.

Os estudos de pesquisa na área de processos de laminação a quente na Usiminas têm enfatizado o desenvolvimento da simulação matemática, tendo em vista o grande potencial de benefícios que podem ser auferidos com sua aplicação.⁽¹⁻⁴⁾ Os benefícios decorrem de uma série de características dos modelos matemáticos desenvolvidos em tais estudos, 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 ser impostas ao processo em função das especificações do produto.

Dessa forma, as ferramentas construídas para a simulação matemática (simuladores) podem ser usadas 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.

Para esclarecer os dois objetivos, considera-se, por exemplo, o processo de reaquecimento de semiprodutos de aço e, em particular, de placas, que é o foco do presente trabalho. No primeiro objetivo, a simulação matemática pode ser usada para verificar se as temperaturas de controle dos fornos estão adequadas para o aquecimento do produto, em termos de requisitos de temperatura e de uniformidade térmica para a laminação subsequente, e de atendimento das propriedades mecânicas e de forma do laminado. Com isso, temperaturas de controle otimizadas podem ser ajustadas, com potencial economia de consumo de combustível, ganho de produtividade e melhoria de qualidade do laminado. Evidentemente, em processos com controle automático estes objetivos já são normalmente obtidos, exceto caso os modelos de controle não estejam devidamente ajustados. No segundo objetivo, a simulação matemática permite explorar e avaliar condições de processo inéditas, especialmente no caso da introdução de novas tecnologias.

Neste trabalho são apresentadas características básicas e exemplos de resultados de aplicação de uma ferramenta de simulação matemática do processo de reaquecimento de placas, desenvolvida na Usiminas. 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) reavaliação dos padrões dos fornos visando economia de combustível; (ii) determinação das condições operacionais de forno para o processamento de aços pela tecnologia de laminação controlada seguida de resfriamento acelerado (processo TMCP – *Thermomechanical Control Process*); (iii) base de comparação e ajuste de modelos matemáticos do fornecedor do sistema de automação dos fornos. Ressalta-se que o processo TMCP requer, usualmente, condições operacionais específicas e mais restritivas do que aquelas dos demais processos, o que torna a simulação matemática muito útil.

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 aquecimento, que é aplicado em uma malha bidimensional considerando a espessura e o comprimento da placa, como mostrado esquematicamente na Figura 1. As siglas (VM) e (VF) indicam viga móvel e viga fixa, respectivamente. A placa recebe calor do meio ambiente pelos mecanismos de radiação térmica, q_r , e convecção, q_c .

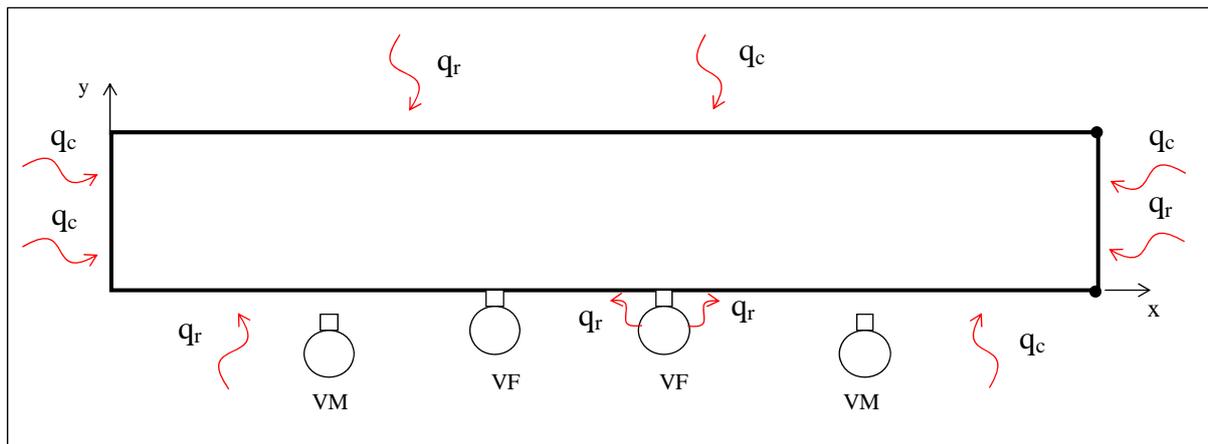


Figura 1. Esquema do fluxo de calor do ambiente do forno para as superfícies da placa.

A transferência de calor do ambiente e das paredes do forno para a placa é governada pela equação (1). O expoente k significa que todas as variáveis são dadas para cada zona k do forno. Os valores de φ_{CG} 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.

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

Onde:

- q^k : fluxo de calor do forno para a placa ($W \cdot m^{-2}$);
- φ_{CG}^k : emissividade efetiva do ambiente do forno para a placa (-);
- F_i : fator de vista (-);
- σ : constante universal de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$);
- T_s : temperatura da superfície da placa (K);
- T_a^k : temperatura ambiente do forno (K);
- T_v : temperatura das vigas (K); e
- h^k : coeficiente de transferência de calor por convecção ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

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 em cada zona.

Os valores dos parâmetros A e B são determinados no ajuste do modelo matemático.

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

As equações (1) e (2) permitem determinar a quantidade de calor transferida do ambiente do forno para a superfície da placa. No interior desta, a transferência é governada por difusão e dada pela equação de Fourier (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 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$);
- ρ : densidade da placa ($kg \cdot m^{-3}$); e
- c: calor específico da placa ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).

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⁽⁵⁾ 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*) resolução linha a linha.⁽⁶⁾

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.

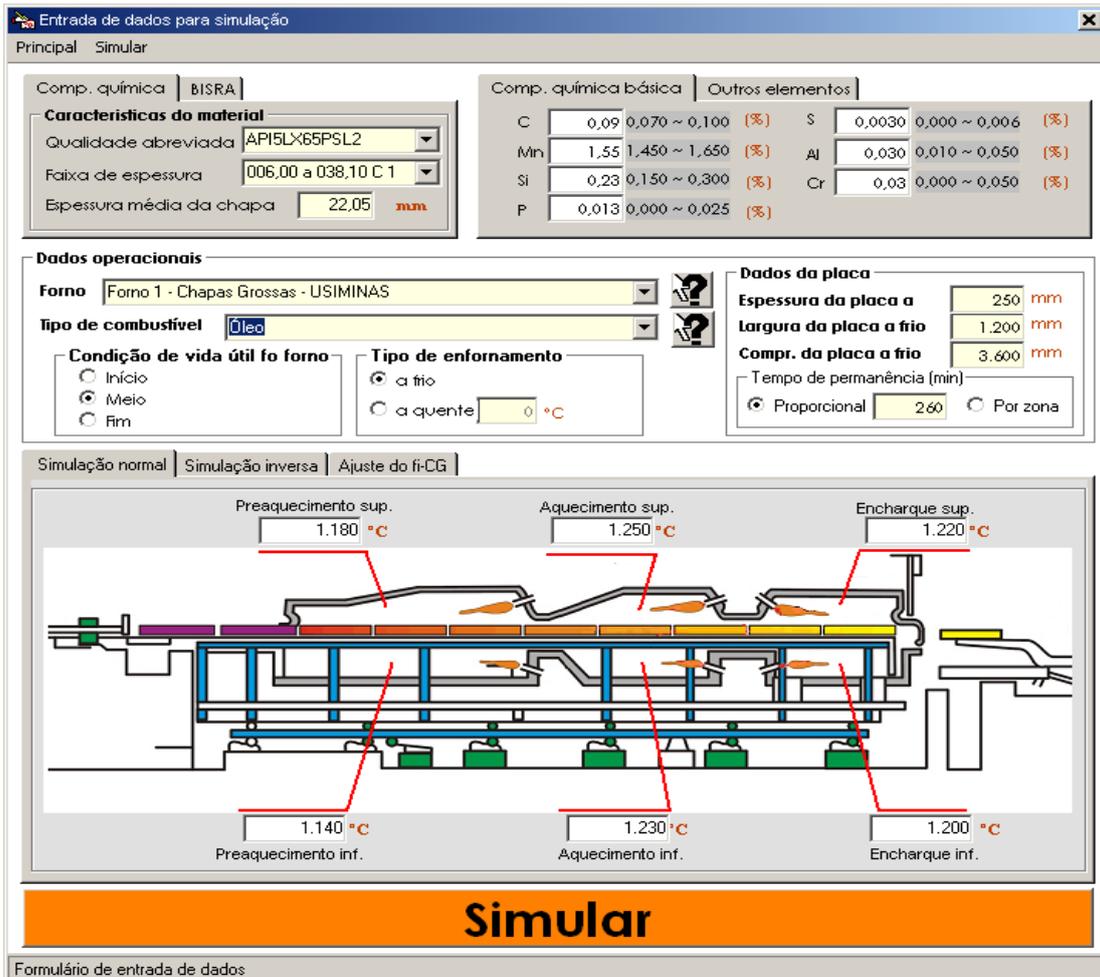


Figura 2. Interface principal de entrada de dados do aplicativo, com a opção de simulação normal (direta) ativada.

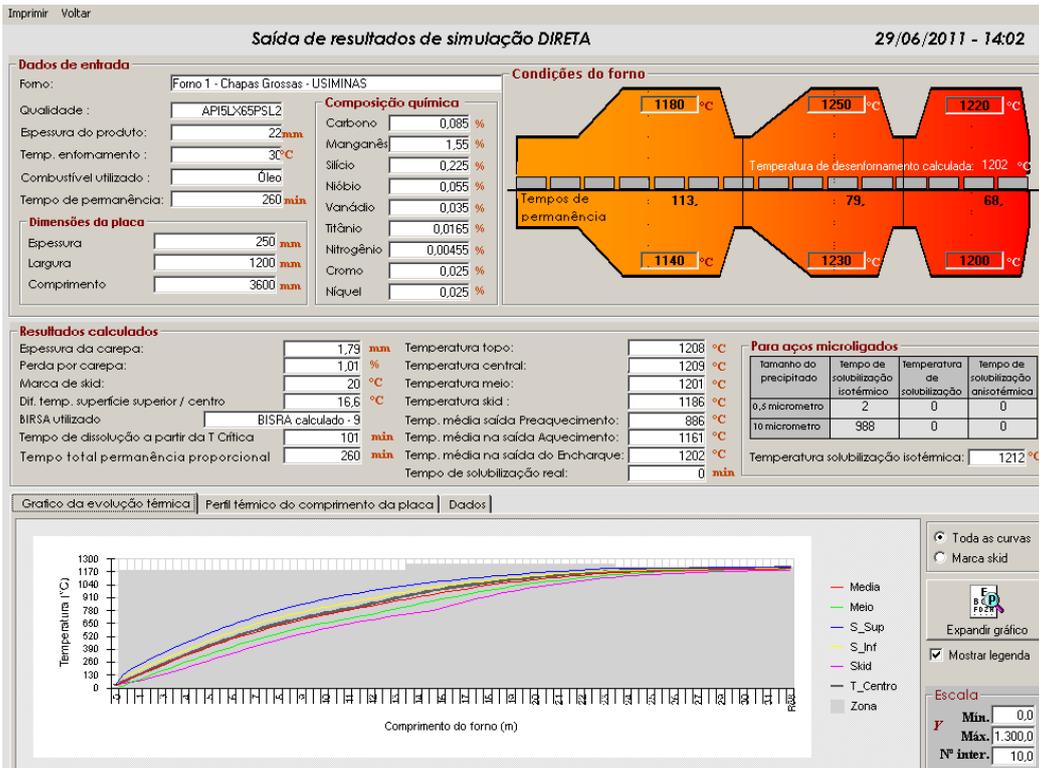


Figura 3. Tela com os resultados de simulação.

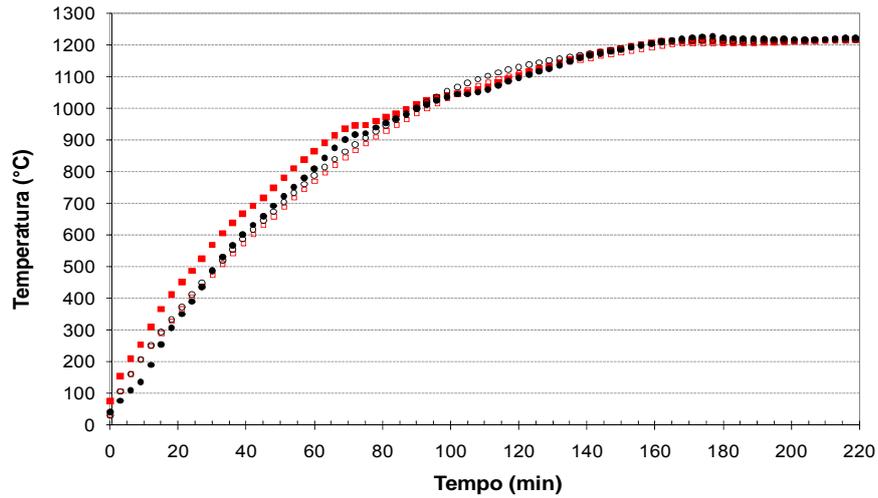
2.3 Validação do Modelo Matemático

Uma etapa fundamental para confiabilidade e aplicação do simulador matemático do forno foi a sua validação, realizada com base em medições de curvas de aquecimento durante o processamento padrão dos fornos. Nestas experiências, termopares foram inseridos em várias posições no interior de placas devidamente preparadas, que foram enfiadas e aquecidas no processo normal de produção. Os termopares são conectados a um coletor de dados, devidamente isolado termicamente e protegido do ambiente do forno, que armazena as temperaturas medidas em pequenos intervalos de tempo, ao longo do aquecimento. A Figura 4 mostra uma fotografia da placa instrumentada prestes a ser enfiada em uma das experiências realizadas.

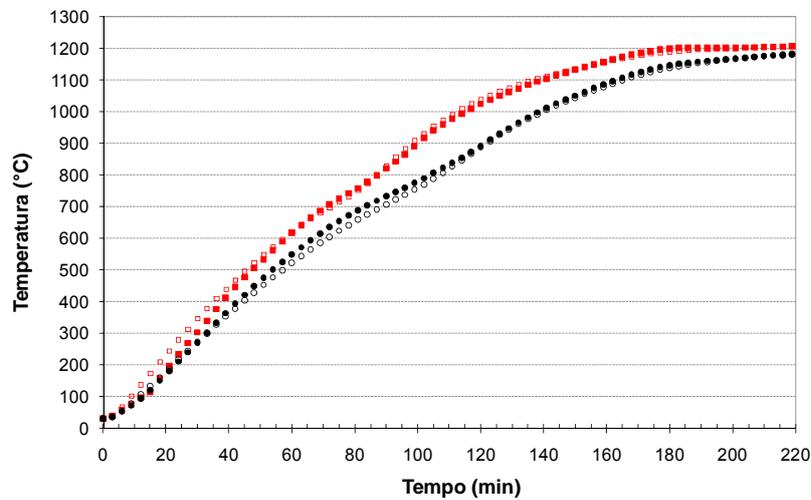


Figura 4. Fotografia da placa instrumentada prestes a ser enfiada.

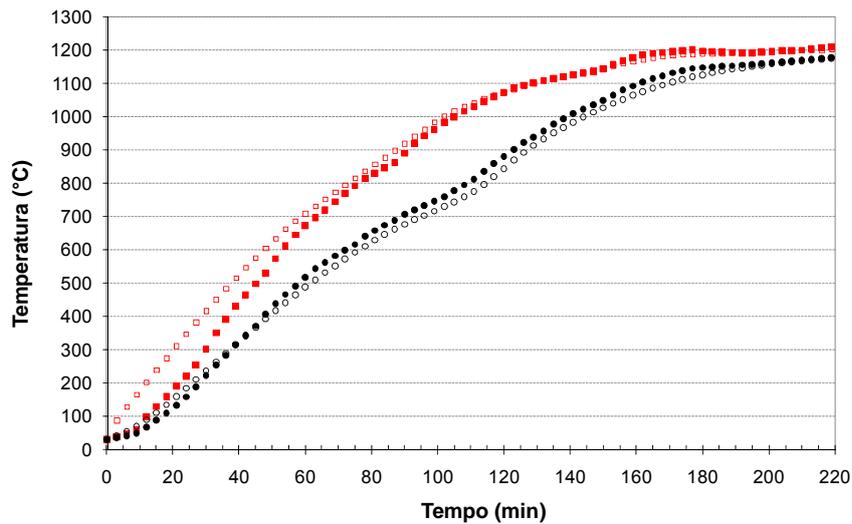
Na Figura 5 são mostrados alguns exemplos de comparação de curvas de aquecimento medidas e calculadas pelo aplicativo após sua validação, em seis pontos de medição de temperatura. Dois destes pontos foram próximos à superfície superior da placa (profundidade de 10 mm e espaçamento entre eles de 500 mm), sendo as curvas mostradas na Figura 5a. As curvas com os símbolos cheios representam os valores medidos, e os símbolos vazios aquelas calculadas. Outros dois pontos foram relativos a termopares posicionados no meio da espessura da placa (também espaçados 500 mm), e as curvas são mostradas na Figura 5b. Os pontos restantes referem-se a termopares inseridos próximos à superfície inferior (a 10 mm da superfície e afastados entre si 500 mm), cujas curvas são mostradas na Figura 5c. O erro de cálculo é relativamente pequeno, especialmente 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.



(a) Temperaturas próximas à superfície superior



(b) Temperaturas no meio da espessura



(c) Temperaturas próximas à superfície inferior

Figura 5. Curvas exemplo comparativas de temperatura calculada com a medida em seis posições de termopares.

3 APLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Estabelecimento de Condições Operacionais Especiais

Foi instalado em 2010 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 aço aplicando a tecnologia 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, requisitos especiais de temperatura de desenformamento e de uniformidade térmica da placa são necessários. Por exemplo, temperaturas de desenformamento tão baixas quanto 1.050°C podem ser utilizadas, 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.

Tendo já sido desenvolvido e validado o 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, os resultados da simulação são mostrados na tela de saída (Figura 6). As temperaturas de zonas determinadas 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. O tempo de permanência foi de 243 min. 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.

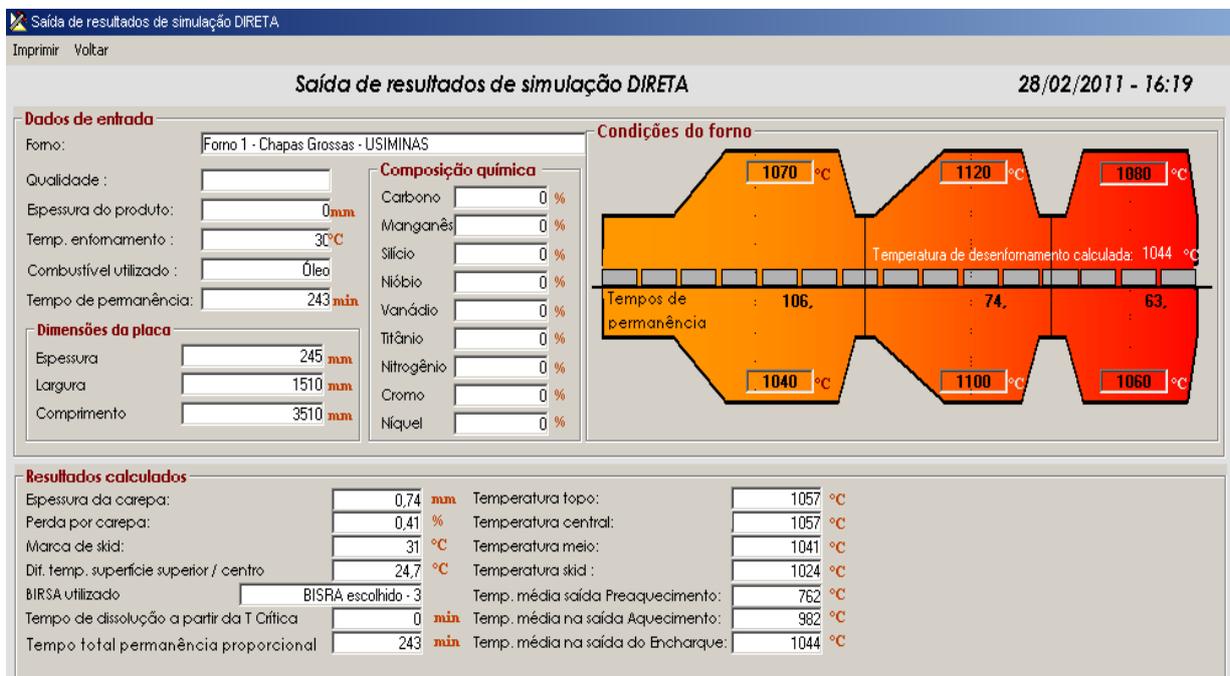


Figura 6. Tela de resultados da simulação das condições de forno para desenformamento a 1.050°C.

Decidiu-se realizar um teste industrial de processamento de placas com esta condição de reaquecimento. Durante o teste, com o forno operando nestas

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. 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 1 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, aonde a diferença chegou a 1,8% (20°C).

Tabela 1. 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.

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 acima, 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 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 através da simulação matemática. Com esta simulação todos os padrões operacionais de temperaturas de zonas podem ser simulados e analisados, tendo em vista objetivos de melhoria operacional e 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*), e as mesmas somente podem ser determinadas através de 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 o aspecto térmico das placas foi enfatizado. O simulador possui também cálculos termodinâmicos e cinéticos de dissolução de precipitados de Nb, que podem auxiliar na indicação de condições adequadas para o reaquecimento de aços microligados.⁽⁷⁾ Ressalta-se, no entanto, que devido à inviabilidade de medição da dissolução no processo industrial os cálculos são teóricos e estimativos.

4 CONCLUSÕES

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. Simulações do efeito de variáveis de processo podem ser realizadas, visando maior conhecimento e melhoria do processo.

No trabalho apresentado, foi mostrada a aplicação da ferramenta de simulação matemática dos fornos de reaquecimento de placa do tipo viga móvel, a qual é dotada de características especiais, tais 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 através 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.

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, permitiu que a ferramenta fosse usada, com sucesso, na exploração de condições operacionais inéditas, isto é extrapoladas do seu domínio de validação. Neste caso, temperaturas de processo tão baixas quanto 1.050°C foram previstas e obtidas no processo de produção de aços com a tecnologia de resfriamento acelerado, por meio da simulação.

Além disso, foram citadas outras importantes aplicações desta ferramenta de simulação, tais como: a geração de dados PDI para a automação dos fornos de chapas grossas da Usina de Ipatinga, em andamento, e subsídios para verificação da adequação dos modelos matemáticos do fornecedor da automação.

REFERÊNCIAS

- 1 SANTOS, A.A.; SCHIAVO, C.P.; GIACOMIN, C.N. **Simulação computacional do processo de reaquecimento de placas em fornos de viga móvel**, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 35-39, jul-set. 2008.
- 2 GIACOMIN, C.N.; SANTOS, A.A.; SOUZA, A.L. **Análise dos processos de laminação a quente na Usiminas via simuladores computacionais**, Tecn. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 6, n. 1, p. 31-35, jul-set. 2009.
- 3 SANTOS, A.A.; BARBOSA, R. **Modelling the kinetics of austenite decomposition in Nb-Ti-V microalloyed steel after hot strip rolling**, Steel Research Int., v. 80, n. 9, p.632-638, 2009.
- 4 SANTOS, A.A.; GIACOMIN, C.N. **Mathematical simulation of plate rolling at Usiminas: a tool for process enhancement**. In: 18ª CONFERENCIA DE LAMINACIÓN, IAS, Rosario, Argentina, 01- 04 novembro, 2010.
- 5 The British Iron and Steel Association. **Physical constants of some commercial steels at elevated temperatures**. London: Butterworths, 1953.
- 6 PATANKAR, S.V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: McGraw-Hill, 1980.
- 7 PALMIERE, E.J.; GARCIA, C.I.; DeARDO, A.J. **Compositional and microstructural changes wich attend reheating and grain coarsening in steels containing niobium**. Metallurgical and Materials Transactions A, Pittsburgh, v.25A, n.2, p. 277-285, 1994.