

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE PREVISÃO DA TEMPERATURA DURANTE A LAMINAÇÃO A QUENTE DOS AÇOS

Antônio Adel dos Santos ¹
Cristóvão Nery Giacomini ¹

Resumo

O controle da temperatura é fundamental no processo de laminação a quente dos aços. Para isso, são necessários sensores ao longo das linhas de processo. Adicionalmente, modelos matemáticos de previsão da temperatura, tanto *online* quanto *offline*, são muito úteis, e fundamentais em alguns casos, quando é necessário conhecer perfis térmicos no interior do material, além da temperatura superficial medida. Neste sentido, este trabalho apresenta os aspectos básicos do desenvolvimento de modelos de cálculo da evolução de temperatura do aço durante a laminação a quente, desde o reaquecimento da placa até o produto laminado e resfriado na forma de chapas. São mostradas formulações matemáticas, métodos numéricos de solução usados e validação dos cálculos. Todo esse desenvolvimento foi baseado em trabalhos realizados no Centro de Pesquisa na Usiminas, nos últimos anos, cuja fundamentação teórica, buscada na literatura, foi adaptada e validada de acordo com as especificidades de cada linha. Além disso, como sinal de inovação e aplicabilidade, os modelos foram implantados como simuladores *offline* integrados, tornando prática sua utilização pelos analistas de processo. **Palavras-chave:** Laminação a quente de aços; Evolução térmica; Modelos matemáticos.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR TEMPERATURE PREDICTION DURING HOT ROLLING OF STEELS

Abstract

Temperature control is of paramount importance during hot rolling of steel. Thus, sensors need to be installed through the processing lines. In addition, mathematical models for temperature prediction are useful, and occasionally necessary, when the thermal profile inside the stock has to be known, besides the measured surface temperature. Therefore, this paper shows the background used to modeling the temperature evolution of steel during hot rolling, from the slab reheating process up to the as rolled product after its cooling. Basic features are shown such as model formulations, numerical methods and validations. All the work was based on recent development carried out at Usiminas' Research and Development Center, where theoretical background found in literature was adapted and fitted to the processing line particularities. In addition, as an indicator of innovation and applicability, the models were implemented as offline simulation tools, making easy their use by technical staff.

Keywords: Hot rolling of steels; Temperature evolution; Mathematical models.

I INTRODUÇÃO

O conhecimento e o controle da temperatura do material durante o processo de laminação a quente é fundamental em termos de produtividade, qualidade do produto e custos de produção. Para que todos estes requisitos sejam atendidos ao mesmo tempo, dentro de suas faixas de aceitação, aplicam-se, usualmente, modelos de previsão da evolução da temperatura no processo, aliados a medições realizadas ao longo das linhas de laminação. Os modelos matemáticos de temperatura são baseados nas leis fundamentais de transferência de calor entre o material e

o meio ambiente, levando em consideração as características das linhas e dos materiais processados.

O trabalho pioneiro sobre modelos de evolução térmica em linhas de laminação a quente foi realizado por Hollander [1]. Hoje, encontra-se disponível vasta literatura técnica sobre transferência de calor neste processo, por exemplo, para as etapas de reaquecimento [2], resfriamento final do produto laminado [3,4] e laminação propriamente [5].

No entanto, detalhes de aplicações dos modelos aos processos industriais são mais escassos na literatura.

¹ Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: antonio.adel@usiminas.com

Ao menos em parte, isto pode ser atribuído ao fato que nas usinas siderúrgicas os modelos de controle *online* existentes são, normalmente, propriedade de empresas fornecedoras de tecnologias de processo, que se resguardam de publicações detalhadas. Além disso, os trabalhos de literatura comumente têm o escopo muito específico sobre determinado fenômeno relacionado à transferência e calor, raramente apresentando uma visão global da evolução térmica.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar uma contribuição ao entendimento e à divulgação de aspectos básicos do desenvolvimento de modelos matemáticos de previsão de temperatura durante a laminação a quente dos aços. O trabalho é baseado em desenvolvimentos realizados no Centro de Pesquisa da Usiminas, considerando desde o reaquecimento de placa até o resfriamento final do laminado.

2 ASPECTOS BÁSICOS DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Em todas as etapas da laminação a quente, a temperatura do laminado varia com o tempo, o que caracteriza um problema transiente de transferência de calor. Além disto, o material está em movimento nestas etapas, exceto no resfriamento da bobina a quente após estocagem. Então, além de transiente, o problema é dinâmico. Portanto, o primeiro aspecto fundamental para o desenvolvimento dos modelos é a determinação das relações de posição, tempo e velocidade do laminado, pois a cada posição, o regime de resfriamento prevalente precisa ser identificado no modelo.

A segunda etapa é a formulação do conjunto de equações que representem os fenômenos transientes de transferência de calor no interior do laminado, equação de difusão térmica, e entre o laminado e meio circundante, que são as equações de contorno. A questão crucial desta fase é a determinação realística dos fluxos de calor entre o ambiente e o laminado, que são caracterizados pelos coeficientes de transferência de calor.

Em seguida, desenvolvem-se as soluções numéricas para o problema transiente de transferência de calor, com suas condições de contorno e inicial. Aspectos fundamentais da solução numérica são a convergência e estabilidade.

Finalmente, é fundamental validar os cálculos realizados para cada linha particular, comparando-se valores medidos com os previstos, nas variadas condições de processo, para se ter confiabilidade nos modelos.

Das quatro etapas citadas, somente a solução numérica não está associada às características da linha de laminação, pois se restringe a técnicas matemáticas. No caso dos desenvolvimentos no Centro de Pesquisa da Usiminas, toda a lógica de cálculo, parâmetros geométricos e operacionais das linhas e dados dos materiais foram inseridos em aplicativos computacionais, os quais permitem a qualquer usuário facilmente realizar os cálculos e visualizar os resultados.

2.1 Diagramas TPV - Tempo-Posição-Velocidade

No levantamento dos diagramas TPV são consideradas: (a) configuração geométrica da linha ou processo, com distâncias relevantes; (b) forma de deslocamento do laminado, incluindo aceleração, desaceleração, movimento uniforme e paradas; (c) simplificações assumidas que são necessárias para viabilizar e/ou facilitar o desenvolvimento dos algoritmos. O diagrama TPV pode ser uma característica intrínseca da configuração e modo de operação da linha ou equipamento, ou estar acoplado aos modelos de evolução térmica.

Como exemplo, é mostrado o caso do modelo de evolução térmica da placa da saída do forno até a entrada do primeiro laminador, RI, para a Linha de Tiras a Quente. Na Figura 1 é apresentado o diagrama de sua velocidade em função da posição.

A placa pode ser desenformada em qualquer uma das alas, denominadas de F3 a F7 na Figura 1. A velocidade é constante até a caixa de descarepação, HSB, onde a placa praticamente para, enquanto são enviados dados de *setup* para o RI. Posteriormente, a velocidade é retomada e, depois, ocorre aceleração até a entrada do RI, quando acontece nova parada antes do primeiro passe. De posse das distâncias relevantes, qualquer gráfico entre as variáveis tempo, velocidade e posição pode ser tratado. Nesse caso, o perfil de velocidade é característico da linha, não dependendo da evolução térmica da placa.

Outro exemplo de representação gráfica do diagrama TPV é mostrado na Figura 2, para uma chapa grossa laminada e posteriormente processada no resfriamento acelerado na Usiminas, em Ipatinga [6]. Os segmentos verticais na parte superior da Figura 2 denotam as distâncias mapeadas ao longo da Linha. O cálculo é iniciado antes do último passe no laminador (FM), no ponto de parada sob o pirômetro de entrada. Neste momento, no tempo zero, a velocidade é nula. A partir deste momento a chapa é acelerada uniformemente até a velocidade de transporte do laminador à desempenadeira (VFM), a qual permanece até que o topo atinja determinado sensor de posição. A partir daí, ocorre desaceleração até a velocidade inicial da desempenadeira. Até o próximo sensor de posição esta velocidade é mantida, quando ocorre aceleração até o valor VHL na entrada da HL. A partir deste ponto a velocidade é calculada pelo modelo do resfriamento acelerado. As equações de cálculo da velocidade são aplicadas ao topo do laminado e consistem de MU, movimento uniforme, e MUV, movimento uniformemente variado.

Da entrada do topo no resfriamento acelerado até que a base do laminado atinja o sensor de sua saída, ocorre aceleração não constante até a velocidade atingir o valor máximo. A velocidade máxima é mantida até que a base do laminado atinja o sensor de posição final. Então, a velocidade é zerada de acordo com desaceleração constante, e retomada a velocidade de saída do equipamento (VSaiCLC). As rotinas de velocidade construídas estão acopladas ao cálculo preliminar de temperatura no resfriamento, de forma que

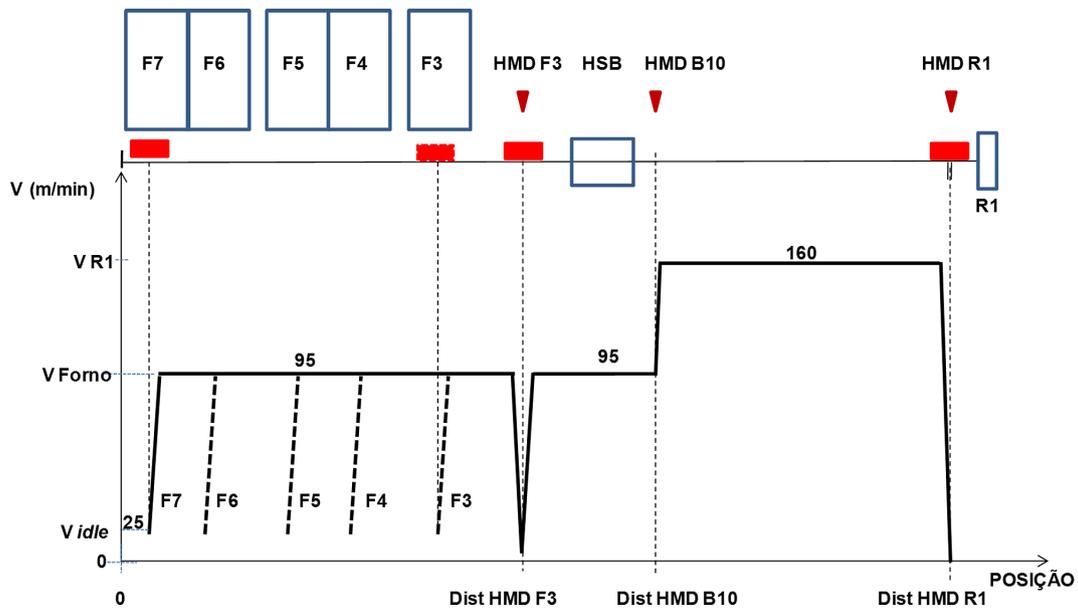


Figura 1. Diagrama de velocidade em função da posição de placa na LTQ de Ipatinga. HMD: sensor de posição; HSB: estação de descarepação primária; F3, ...F7: alas dos fornos de reaquecimento; B10: mesa de rolos número 10.

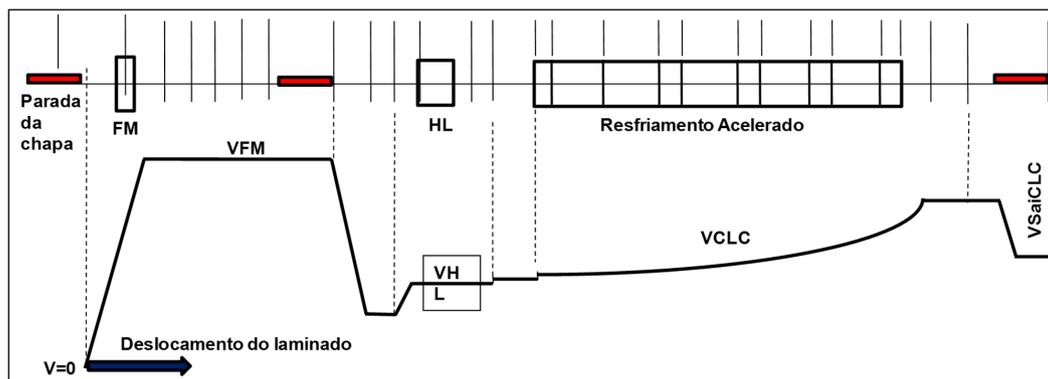


Figura 2. Perfil esquemático de velocidade do topo do laminado desde a entrada do laminador até o final da linha de resfriamento acelerado. FM: laminador acabador; HL: desempenadeira a quente.

a aceleração é calculada visando à obtenção da temperatura final de resfriamento desejada em todo laminado.

2.2 Modelo de Transferência de Calor

A equação que governa a transferência de calor por condução no interior do laminado em regime transiente, equação de Fourier, na forma bidimensional, é dada em Equação 1..

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ρ : densidade do aço ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

c : calor específico do aço ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$);

T : temperatura (°C);

t : tempo (s);

λ : condutividade térmica do aço ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$);

x, y : coordenadas da posição do domínio (m).

As propriedades c , ρ e λ variam com a temperatura e, em menor extensão, com a composição química do aço. Existem equações e tabelas que fornecem tais propriedades para composições específicas de aços. Nos trabalhos desenvolvidos na Usiminas, têm sido usados os valores determinados originalmente pelo instituto BISRA [7] e atualizados posteriormente.

A troca de calor entre o laminado e o meio ocorre pelos mecanismos de radiação, convecção natural e convecção forçada. Considerando o processo de laminação a quente em temperaturas acima de 700°C , a radiação é predominante.

O modelo desenvolvido para os fornos de reaquecimento [8] considera a radiação térmica e a convecção por movimentação dos gases queimados no interior do forno, numa equação geral, dada em Equação 2. 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. 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.

$$q^k = \varphi_{CG}^k \cdot \sigma \left[\frac{F_i (T_a)^4 + (1 - F_i)(T_v)^4}{(T_s)^4} \right] + h^k (T_a - T_s) \quad (2)$$

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 : temperatura ambiente do forno (K);
 T_v : temperatura das vigas (K);
 h^k : coeficiente de transferência de calor por convecção ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

Os mecanismos de transferência de calor por radiação e convecção natural devem ser considerados durante o transporte do material e na laminação propriamente, mas desde que a seção analisada esteja fora do arco de contato e fora da zona de incidência de água de resfriamento forçado ou descarepação. O fluxo de calor por radiação é calculado pela Equação 3, lei de Stefan-Boltzmann, aplicando-se um fator de ajuste, f_r .

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \left[(T_s)^4 - (T_a)^4 \right] \cdot f_r \quad (3)$$

q_r : fluxo de calor do material para o meio por radiação ($W.m^{-2}$);
 ε : emissividade da superfície da placa (-);
 T_a : temperatura ambiente (K);
 f_r : fator de correção para o fluxo de calor por radiação (-).

A emissividade da superfície do esboço varia com a espessura da carepa formada, temperatura da superfície e a rugosidade do material. A emissividade aumenta em temperaturas mais elevadas, pois a rugosidade do material é maior. Existem algumas equações propostas na literatura [5,9], sendo que nesse trabalho foi adotada aquela proposta por Kokado [9], Equação 4.

$$\varepsilon = \left[0,8 + 0,58 \left(\frac{h_0}{h} - 1 \right) \right] / \left(\frac{h_0}{h} \right) \quad (4)$$

h_0 : espessura original da placa;
 h : espessura do esboço no instante de cálculo de ε .

Para a convecção natural, equações simples propostas na literatura [10] permitem o cálculo da transferência de calor para o meio ambiente, Equação 5, sem perda de precisão

em relação às equações fundamentais de película. Nesta equação, a constante b é definida experimentalmente como 2,8, se superfície superior do laminado, 2,2, se superfície lateral e 1,4, se superfície inferior.

$$h_{cn} = b(T_s - T_a)^{0,25} \cdot f_{cn} \quad (5)$$

h_{cn} : coeficiente de transferência de calor por convecção natural ($W.m^{-2}.K^{-1}$);
 f_{cn} : fator de correção para h_{cn} (-).

Nos instantes de aplicação de água, seja para a finalidade de descarepação ou resfriamento, a perda de calor por convecção forçada é muito alta, suplantando os mecanismos de radiação e convecção natural. O coeficiente de transferência de calor por convecção forçada é calculado pela Equação 6, que é válida para temperaturas superficiais acima de $500^\circ C$. Esta equação é bastante simples, mas leva em consideração os principais fatores que afetam a transferência de calor, que são a temperatura superficial e a vazão de água por área. Cálculos mais precisos, tais como no resfriamento acelerado de chapas grossas, fatores como a composição química do aço e a temperatura da água são também considerados.

$$h_{cf} = 107,2w^{0,793} \cdot 10^{-0,0154T_s} \cdot f_{cf} \quad (6)$$

h_{cf} : coeficiente de transferência de calor por convecção forçada ($W.m^{-2}.K^{-1}$);
 w : vazão específica de água ($l.m^{-2}.min^{-1}$);
 f_{cf} : fator de correção de h_{cf} (-).

2.3 Solução Numérica

Como tanto as propriedades termofísicas quanto os coeficientes de transferência de calor são dependentes da temperatura, a solução da Equação 1 é feita de forma numérica. Existem três métodos gerais de solução numérica: diferenças finitas (MDF), volumes finitos (MVF) e elementos finitos (MEF). Por diferenças finitas, a equação diferencial é aproximada por diferenças, nas escalas de tempo e de posição. Na Usiminas tem sido usada a formulação por entalpia, solução explícita, que é mais estável em situações onde há variação brusca de temperatura. Primeiramente, é feita a transformação de temperatura em temperatura modificada, Equação 7.

$$\phi = \int_{T_0}^T \frac{\lambda}{\lambda_d} dT \quad (7)$$

λ_d : condutividade térmica numa temperatura especificada ($W.m^{-1}.^\circ C^{-1}$);
 ϕ : temperatura modificada ($^\circ C$).

A outra transformação é do calor específico para a entalpia, Equação 8. Aplicando-se as Equações 7 e 8 à 1,

obtem-se a equação diferencial com a temperatura modificada, Equação 9. Reescrevendo-se Equação 9 na forma explícita de diferenças finitas para pontos internos no material obtém-se a Equação 10.

$$c = \frac{\partial H}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial T} \quad (8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\lambda_d}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

$$H_{i,j}^1 = H_{i,j}^0 + \frac{\lambda_d \Delta t}{\rho} \left[\frac{2}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \left(\frac{\phi_{i-1,j} - \phi_{i,j}}{\Delta x_1} + \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}}{\Delta x_2} \right) + \frac{2}{\Delta y_1 + \Delta y_2} \left(\frac{\phi_{i,j-1} - \phi_{i,j}}{\Delta y_1} + \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}}{\Delta y_2} \right) \right] \quad (10)$$

$H_{i,j}^0, H_{i,j}^1$: entalpia nos instantes de tempo anterior e atual, respectivamente ($J.kg^{-1}$);

Δt : intervalo de solução (s);

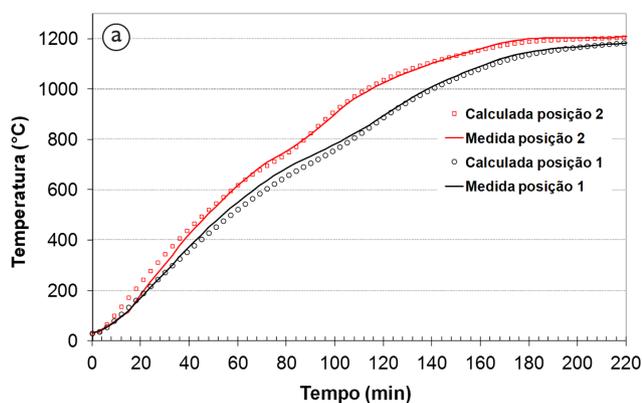
$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2$: espaçamentos nas direções x e y dos nós anterior e posterior, respectivamente (m);

i, j: identificadores dos nós.

Como o método é explícito, o intervalo máximo de tempo para a solução da Equação 10 precisa ser limitado, conforme Equação 11, válida para todo o domínio, inclusive no seu interior, onde o coeficiente de transferência de calor é nulo.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2 \frac{\lambda_d}{\rho c} \left(\frac{1}{\Delta x_1 \Delta x_2} + \frac{h}{\lambda_d \Delta x_1} + \frac{1}{\Delta y_1 \Delta y_2} + \frac{h}{\lambda_d \Delta y_1} \right)} \quad (11)$$

h: coeficiente global de transferência de calor entre o material e o meio ($W.m^{-2}.K^{-1}$).



3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para o caso do processo de reaquecimento, a coleta de temperaturas medidas foi feita através de uma placa instrumentada com termopares em seu interior, aquecida no processo normal. Um coletor de dados, com a devida proteção térmica, fez o registro dos valores medidos. Após o desenformamento da placa, as curvas de aquecimento medidas foram comparadas com os valores calculados pelo modelo. Na Figura 3a é mostrado um exemplo de comparação de curvas calculadas e medidas em dois locais no interior da placa, aplicada aos fornos de reaquecimento da Linha de Chapas Grossas (LCG). A curva calculada foi obtida após ajuste dos parâmetros ϕ_{CG}^k , Equação 2.

As medições feitas pelos termopares no interior da placa instrumentada, durante alguns instantes após seu desenformamento foram usadas para ajustar os fatores das Equações 3 e 5, antes de sua passagem pela estação de descarepação, HSB. Na Figura 3b estão mostradas comparações de valores previstos pelos modelos com os medidos dessa forma, em local adjacente à superfície.

A partir da saída da HSB até o final da etapa de laminação, tanto nas Linhas de Tiras a Quente (LTQ) quanto de LCG, os valores medidos de temperatura foram obtidos dos termopares de controle do processo, que medem a temperatura superficial do material, normalmente em posições na saída da HSB, e na entrada e saída de cada passe de laminação. A Figura 4 mostra o perfil térmico ao longo da linha e a distribuição de temperatura calculada pelo modelo desenvolvido de evolução térmica da placa, na sua seção transversal, em dois momentos: na saída do forno e na entrada do laminador.

Na Figura 5 são mostradas curvas comparativas medidas e calculadas da temperatura na entrada do passe, para duas sequências de laminação na LCG, obtidas com o modelo desenvolvido [11]. A Figura 5a se refere à laminação convencional de um aço CMn. A Figura 5b se refere à laminação controlada de um aço microligado. A queda de temperatura durante o tempo de espera entre as etapas de desbaste e acabamento foi corretamente prevista pelo modelo.

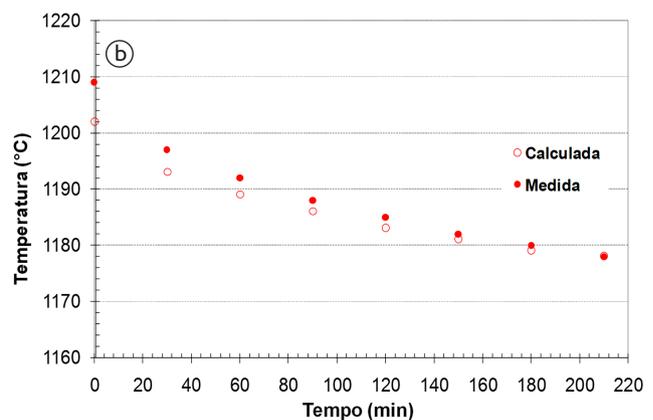


Figura 3. Comparação de curvas medidas e calculadas: (a) processo de reaquecimento de placas na LCG, em duas posições no meio de sua espessura; (b) evolução térmica do desenformamento à entrada da HSB, na LTQ, em local próximo à superfície da placa.

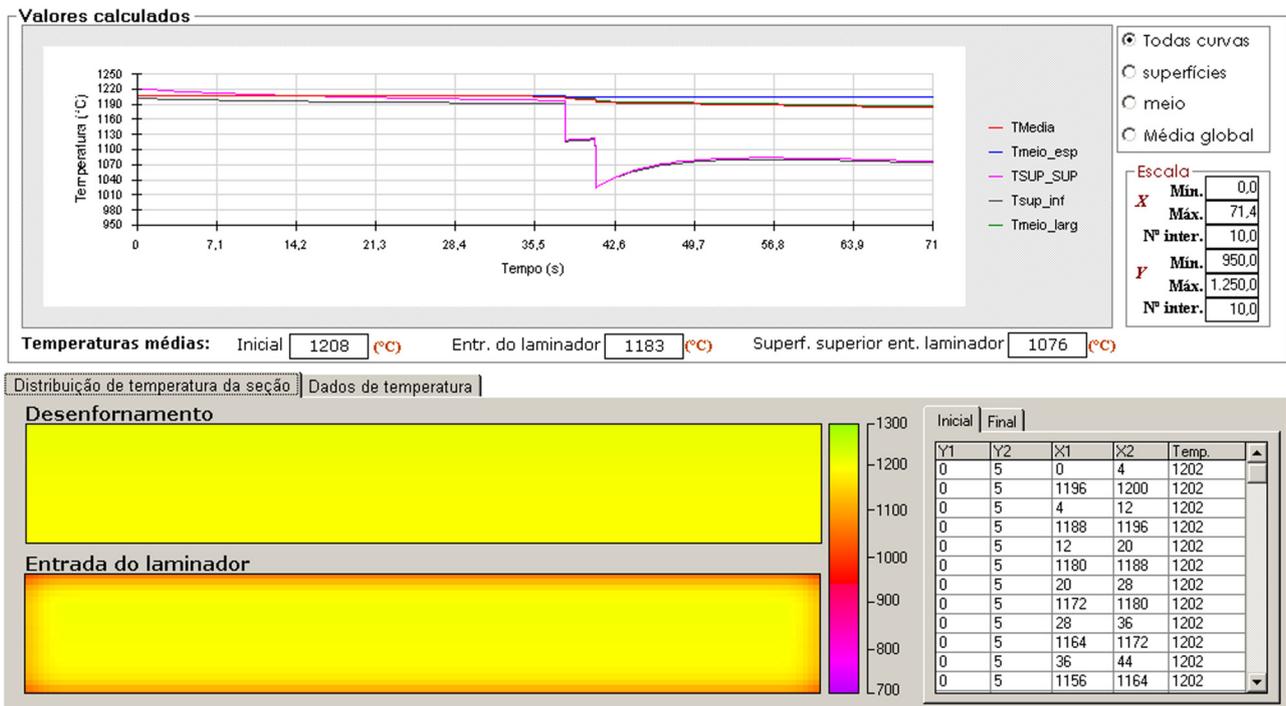


Figura 4. Resultado de simulação da evolução térmica de uma placa na LCG, desde o desenformamento até a entrada do Laminador. Na parte inferior da figura, está o campo bidimensional (largura × espessura) de temperatura em dois momentos. Temperaturas: TMedia: média geral na seção; TMeio_esp: média no meio da espessura; TSUP_SUP: média na superfície superior; Tsup_inf: média na superfície inferior; TMeio_larg: média no meio da largura.

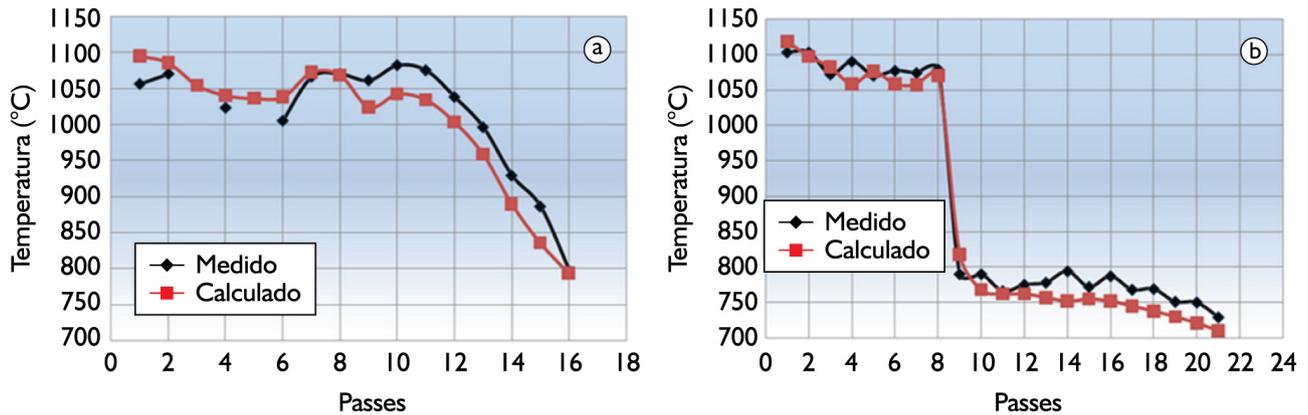


Figura 5. Exemplos de comparação entre temperaturas calculadas e medidas para duas sequências de laminação de chapas grossas. (a) aço CMn, espessura 6,3 mm; (b) laminação controlada de aço microligado de 17,75 mm de espessura.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram mostrados alguns aspectos básicos do desenvolvimento de modelos matemáticos de previsão da evolução térmica durante a laminação a quente. Todas as etapas, desde o reaquecimento de placas até o resfriamento

final do laminado, podem ser previstas com precisão satisfatória para fins de simulação *offline* do processo. Quando todas as formulações e dados de processo e dos materiais são inseridos em aplicativos computacionais, devidamente validados, os modelos tornam-se muito úteis para melhor conhecimento e ajuste do processo.

REFERÊNCIAS

- Hollander F. A model to calculate the complete temperature distribution in steel during hot rolling. In: The Metals Society. Proceedings of the Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking Conference; 1973 Feb 19-21; Amsterdam, Holland. London: AISI; 1975. p. 46-79.

- 2 Panjkovic V, Gloss R. Fast dynamic heat and mass balance model of walking beam reheat furnace with two-dimensional slab temperature profile. *Ironmaking & Steelmaking*. 2012;9(3):190-209. <http://dx.doi.org/10.1179/1743281211Y.0000000081>.
- 3 Evans JF, Roebuck ID, Watkins HR. Numerical modeling of hot strip mill runout table cooling. *Iron and Steel Engineer*. 1993;1:50-55.
- 4 Li HJ, Li Z, Guo Y, Wang Z, Wang G. Development of new generation cooling control systems after rolling in hot rolled strip based on UFC. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013;7(7):29-34. [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60122-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60122-3).
- 5 Devadas C, Samarasekera IV. Heat transfer during hot rolling of steel strip. *Ironmaking & Steelmaking*. 1986;6:311-321.
- 6 Santos AA, Giacomini CN. Simulação do processo de resfriamento acelerado de chapas grossas. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 50º Seminário de Laminação; 2013 Nov 18-21; Ouro Preto, Brasil. São Paulo: ABM; 2013.
- 7 The British Iron and Steel Association. Physical constants of some commercial steels at elevated temperatures. London: Butterworths; 1953.
- 8 Santos AA, Schiavo CP, Giacomini CN. Simulação computacional do processo de reaquecimento de placas em fornos de viga móvel. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008;5(1):35-39. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00501007>.
- 9 Kokado J. On the temperature change of sheet steel during continuous hot rolling. *Proceedings ICSTIS, Suppl. Transactions of Iron and Steel Institute of Japan*. 1971;11:750-754.
- 10 Holman JP. Transferência de calor. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil; 1983.
- 11 Santos AA, Giacomini CN. Mathematical simulation of plate rolling at Usiminas: a tool for process enhancement. In: Proceedings 18ª Conferencia de Laminación; 2010 Nov 01-04; Rosario, Argentina. Buenos Aires: IAS; 2010.

Recebido em: 3 Ago. 2015

Aceito em: 4 Set. 2015