



PREVISÃO DA EVOLUÇÃO TÉRMICA DURANTE A LAMINAÇÃO A QUENTE DOS AÇOS*

Antônio Adel dos Santos¹
 Cristóvão Nery Giacomini²
 Bruno Alves Resende³

Resumo

O controle da temperatura é fundamental no processo de laminação a quente dos aços, motivando a dedicação de esforços em estudos sobre a transferência de calor e na aplicação de melhorias operacionais. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento, os resultados e as aplicações 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, validação dos cálculos e a contribuição dos modelos para o entendimento e melhoria de processo. Todo esse desenvolvimento foi baseado em trabalhos realizados 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, os modelos foram implantados como simuladores *offline*, tornando prática sua aplicação pelos analistas de processo. São mostrados exemplos de cálculo do aquecimento de placas, da evolução térmica das placas nos fornos até a entrada dos laminadores, e da evolução do esboço durante a laminação de chapas grossas.

Palavras-chave: Laminação a quente; Evolução térmica; Modelo matemático.

PREDICTION OF TEMPERATURE EVOLUTION DURING HOT ROLLING OF STEELS

Abstract

Temperature control is of paramount importance during hot rolling of steel, thus motivating the application of efforts on both heat transfer investigations and improvement of operating practices. Therefore, the aim of this work is to present the development, results and application examples of 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, validations and their contribution to the process understanding and improvement. All the work was based on recent development carried out at Usiminas. The theoretical background found in literature was adapted and fitted to each processing line particularity. In addition, the models were implemented as offline simulation tools, making easy their use for technical staff. Examples are given of the slab reheating process, thermal evolution of slabs from the furnace up to the first rougher and the temperature change during hot rolling of plates.

Keywords: Hot rolling; Temperature evolution; Mathematical models.

¹ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, D.Sc., CQE/ASQ, Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG.

² Membro da ABM; Analista de TI, Centro de Tecnologia Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Engenheiro Mecânico, MSc., Centro de Tecnologia da Usiminas; Ipatinga, MG.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



1 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 [2,3], resfriamento final do produto laminado [4-6] e laminação propriamente [7]. Ênfase tem sido dada à etapa de resfriamento final do laminado, especialmente na produção de aços de alta resistência, por este processo ser preponderante na definição das propriedades mecânicas finais dos aços laminados a quente.

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

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar uma contribuição ao entendimento e à divulgação de aspectos básicos da aplicação de modelos matemáticos de transferência de calor ao processo de laminação a quente dos aços. São destacados alguns desenvolvimentos realizados na Usiminas, nos últimos anos, relativos a modelos de previsão da evolução de temperatura, desde o reaquecimento de placa até o resfriamento final do laminado. São mostrados exemplos de formulação matemática, solução numérica, forma de representação da realidade dos processos nos modelos e aspectos de sua validação e aplicação. Tais exemplos são relacionados às linhas de laminação de chapas grossas e de tiras a quente da Usiminas, em Ipatinga

2 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Em todas as etapas da laminação a quente, a temperatura do material 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 material. Cada posição do material precisa ser associada ao regime de resfriamento apropriado.

Em seguida, tem-se o desenvolvimento de soluções numéricas para o problema transiente de transferência de calor, com suas condições de contorno e inicial. A questão crucial do desenvolvimento é a determinação realística dos fluxos de calor entre o ambiente e o material, que são caracterizados pelos coeficientes de transferência de calor.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



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 material, 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.

No caso do modelo de reaquecimento desenvolvido [2], considerou-se o deslocamento da placa com velocidade constante no forno, ou, ao menos, constante em cada zona, podendo ser diferente entre elas. Dado o comprimento do forno, ou de cada zona, e o respectivo tempo de permanência, a determinação da velocidade é imediata. O gráfico posição versus tempo da placa será linear com inclinação positiva.

Em seguida, a placa é desenformada e segue até o primeiro laminador. Na figura 1 é apresentado o diagrama de velocidade da placa em função da posição para a Linha de Tiras a Quente, desde os fornos de reaquecimento até a entrada do primeiro laminador, R1. Este diagrama foi construído para o simulador de evolução térmica da placa.

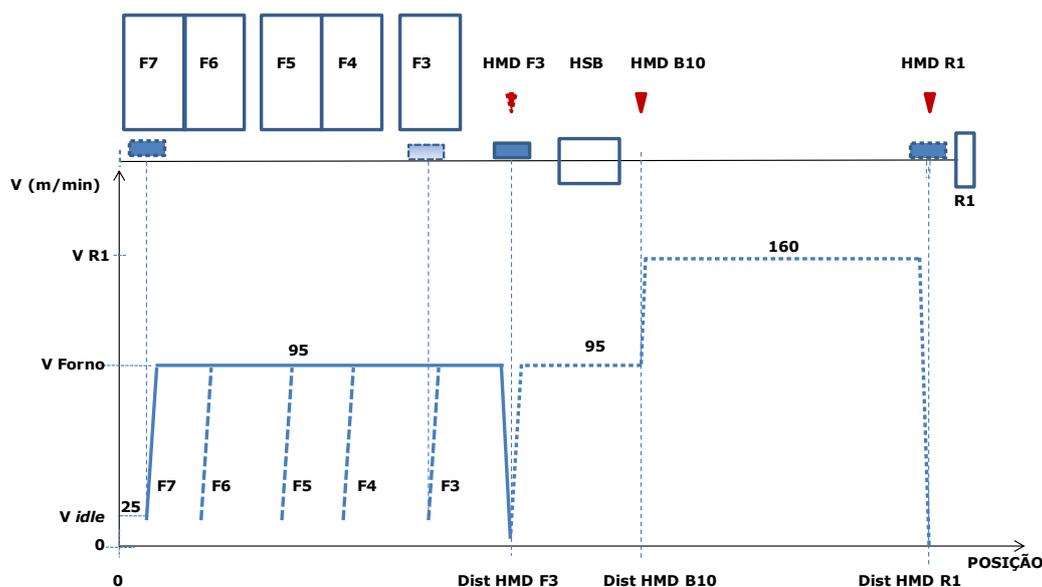


Figura 1. Diagrama de velocidade em função da posição de placa na LTQ de Ipatinga. HMD: sensor de posição; HSB: estação de descarepação primária; F3, ...F7, alas dos fornos de reaquecimento; B10: mesa de rolos número 10.

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 R1. Posteriormente, a velocidade é retomada e, depois, ocorre aceleração até a entrada do R1, 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 laminada e posteriormente processada no resfriamento acelerado

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



na Usiminas, em Ipatinga [8]. 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.

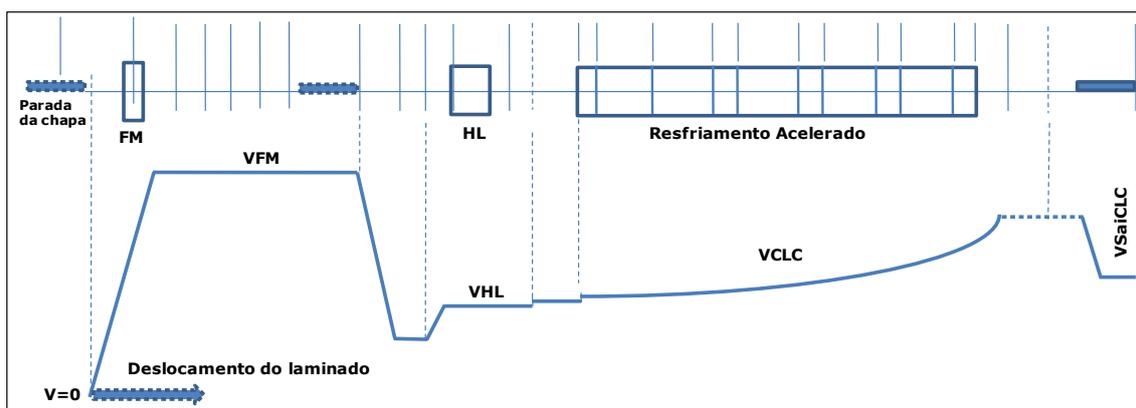


Figura 2. Perfil esquemático de velocidade do topo do laminado desde a entrada do laminador até o final da linha de resfriamento acelerado. FM: laminador acabador; HL: desempenadeira a quente.

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 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 (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 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

T : temperatura ($^\circ\text{C}$);

t : tempo (s);

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

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

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



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 pelo antigo instituto de pesquisa BISRA [9]. Como os valores são tabelados em função da temperatura, a cada instante de cálculo são feitas interpolações, para a temperatura considerada, entre os valores tabelados.

A troca de calor entre o material 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 [2] considera a radiação térmica e a convecção por movimentação dos gases queimados no interior do forno, numa equação geral, dada em (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.

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

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^k : temperatura ambiente do forno (K);

T_v : temperatura das vigas (K);

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

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 .

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

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 da placa 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 [7,10], sendo que nesse trabalho foi adotada aquela proposta por Kokado [10], equação (4).

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



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

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 [11] permitem o cálculo da transferência de calor para o meio ambiente, equação (5), sem perda de precisão em relação às equações fundamentais de película [12]. 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 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$);

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°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 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$);

w : vazão específica de água ($\ell \cdot m^{-2} \cdot \min^{-1}$);

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. Existem muitas variantes de solução por este método [13]. 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).

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

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

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), obtém-se a equação diferencial com a temperatura

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



modificada, equação (9). Reescrevendo-se (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 ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

Em alguns modelos neste trabalho, foi usado o método de solução numérica por volumes finitos, que foi desenvolvido por Patankar [14]. Enquanto que no MDF a equação diferencial é aproximada por diferenças discretas, no MVF é feito um balanço da grandeza em estudo em cada porção do domínio, chamado de volume finito. Os elementos básicos para a formulação da solução numérica pelo MVF são mostrados na figura 3, para um problema bidimensional. O ponto P representa o comportamento médio do material no elemento de volume correspondente à área hachurada (o elemento tem espessura unitária). Os pontos W, N, E e S representam os centros dos elementos de volume vizinhos a P, e que trocam calor com este último. O fluxo de calor de dentro ou para fora do elemento ocorre pelas interfaces w, n, e, s.

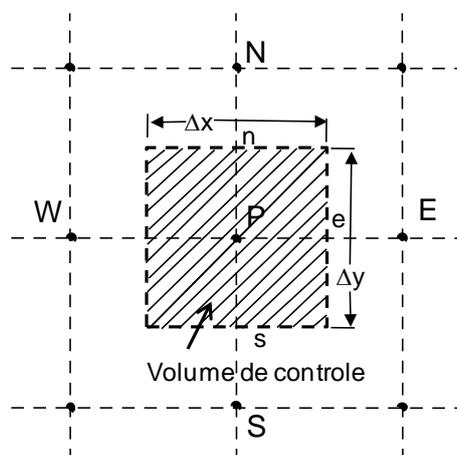


Figura 3. Volume de controle no MVF para um problema bidimensional de condução de calor [14].

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



Nesse caso, a forma discretizada reduz-se à equação (12), onde T é a temperatura nos respectivos pontos P , W , N , E e S , dados como subscritos, e os coeficientes a , relativos a esses pontos, são funções das dimensões do elemento de volume e das propriedades físicas, calor específico, densidade e condutividade térmica do aço. O termo b é função da geração/absorção de calor no elemento, caso existente, e do estado térmico no instante anterior do ponto P . A equação (12) se aplica para o interior do domínio. Nas regiões de borda, é necessário introduzir as condições de contorno, alterando-se a forma da equação resultante.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (12)$$

Para cada nó da malha é obtida uma equação semelhante à equação (12). O sistema de equações obtido é então resolvido para cada instante de tempo, havendo para isso uma variedade de alternativas de formulações, por exemplo, formulação implícita, explícita, ou por relaxação. Tem sido adotada a formulação implícita que possui a vantagem de convergir incondicionalmente, apesar de aumento do tempo de solução [14]. A rapidez da solução é maior pela aplicação do algoritmo TDMA (*Tridiagonal Matrix Algorithm*), com varrimentos alterados de solução nas direções x e y , o que evita geração de sistemas de equações.

3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para validação dos modelos foram feitas comparações entre valores de temperatura medidos com os calculados, usando-se significativa quantidade de dados.

Para o caso do processo de reaquecimento, a coleta de dados medidos 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 4(a) 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 4(b) 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. Isso porque ainda não se conseguiu desenvolver um dispositivo que permita medir as temperaturas internas do esboço ao longo de uma linha de laminação industrial. As medições superficiais estão mais sujeitas a variações e imprecisões devido a interferências tais como, camada de óxido na superfície, presença de água e calibração do pirômetro. Na figura 5, está mostrada uma figura representativa da 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, para uma condição normal de laminação.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

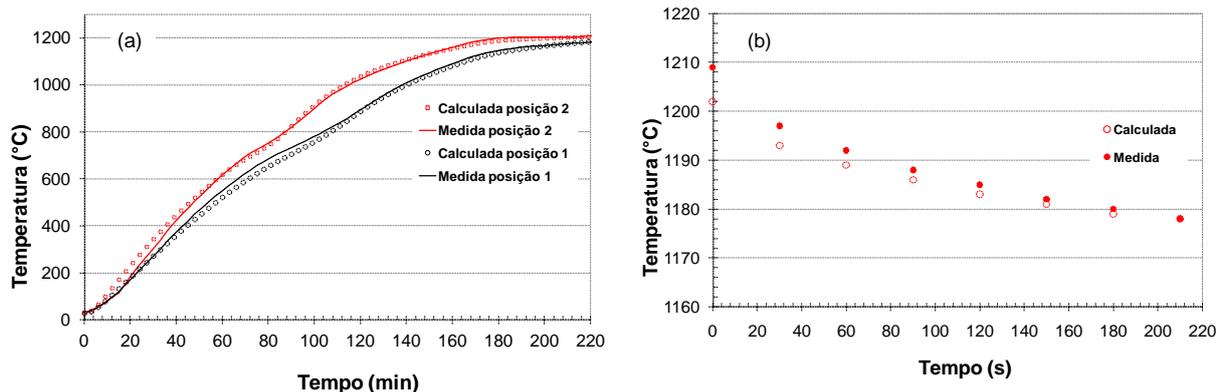


Figura 4. Comparação de curvas medidas e calculadas: (a) processo de aquecimento de placas na LCG, em duas posições no meio de sua espessura; (b) evolução térmica do desenformamento à entrada da HSB, na LTQ, em local próximo à superfície da placa.

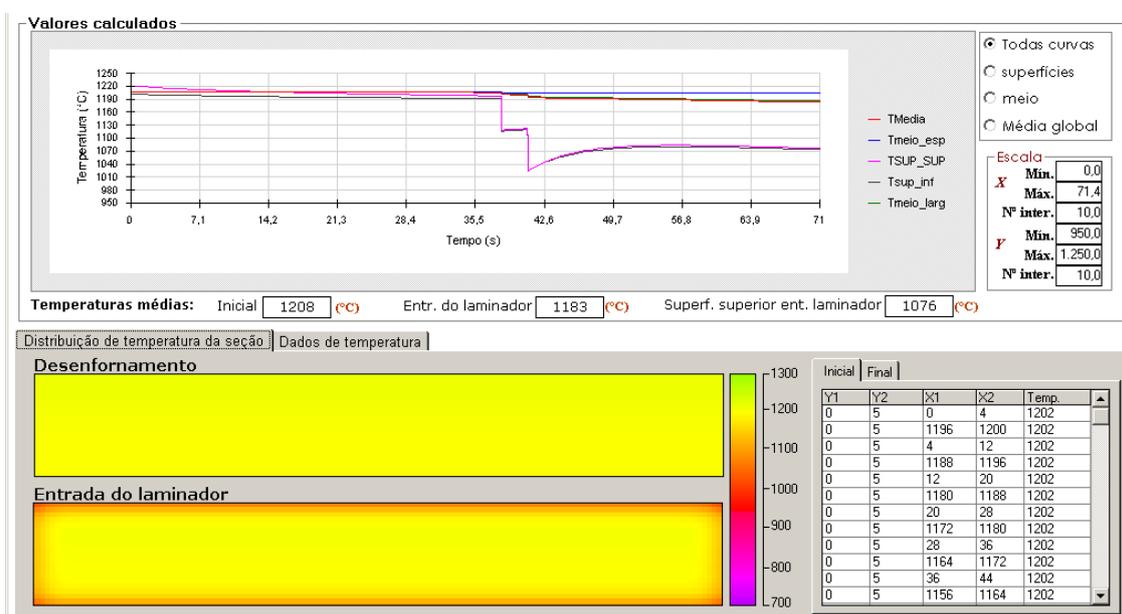


Figura 5. Resultado de simulação da evolução térmica de uma placa na LCG, desde o desenformamento até a entrada do Laminador. Na parte inferior da figura, está o campo bidimensional (largura x espessura) de temperatura em dois momentos. Temperaturas: TMedia, média geral na seção; TMeio_esp: média no meio da espessura; TSup_Sup: média na superfície superior, TSup_inf: média na superfície inferior; TMeio_larg, média no meio da largura.

Na figura 6 são mostradas curvas comparativas medidas e calculadas da temperatura na entrada do passe, para duas sequências de laminação na LCG, obtidas com as formulações utilizadas [15]. A figura 6(a) se refere à laminação convencional de um aço CMn. A figura 6(b) 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.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

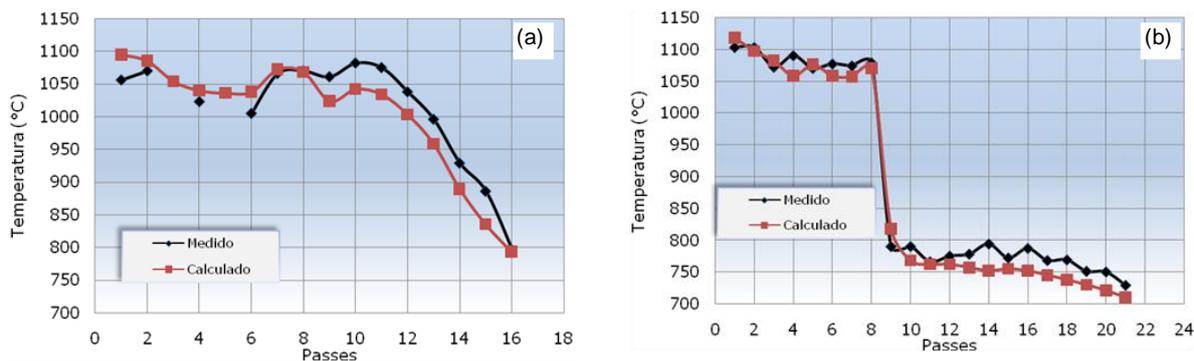


Figura 6. Exemplos de comparação entre temperaturas calculadas e medidas para duas sequências de laminação de chapas grossas. (a) aço CMn, espessura 6,3 mm; (b) laminação controlada de aço microligado de 17,75 mm de espessura.

Na tabela 1 são mostrados os valores dos fatores de ajuste das equações (3), (5) e (6), obtidos para os coeficientes de transferência de calor durante a laminação a quente dos aços processados na Usiminas, na LCG e na LTQ.

Tabela 1. Fatores ajustados para os coeficientes de transferência de calor nos modelos de simulação *offline* desenvolvidos na Usiminas

Fator	Validade	Face da placa	Valor
f_r	Antes da HSB	Superior	0,15
		Inferior	0,08
	Após HSB	Superior	1,00
		Inferior	1,00
f_{cn}	Antes da HSB	Superior	0,15
		Inferior	0,15
	Após HSB	Superior	1,00
		Inferior	1,00
f_{cf}	Na HSB	Superior	1,00
		Inferior	1,00

4 BENEFÍCIOS DE APLICAÇÕES DOS MODELOS

Os modelos de simulação *offline* de reaquecimento de placas foram desenvolvidos e aplicados para os Fornos da Linha de Chapas Grossas, em Ipatinga, antes da entrada do sistema de seu controle automático, atualmente em operação. Nesta época, houve ainda a implantação da tecnologia do resfriamento acelerado. Os seguintes benefícios com as simulações realizadas foram obtidos: (a) avaliação da capacidade dos fornos em atender aos estreitos requisitos de aquecimento de placas para processamento por resfriamento acelerado; (b) geração de dados primários de entrada (PDI) para comissionamento do sistema *online*; (c) verificação e ajuste do acerto de cálculo de temperatura do modelo matemático deste sistema; (d) geração de padrões de reaquecimento para o processamento de aços pelo resfriamento acelerado.

Na área de evolução térmica da placa desde os fornos até o laminador, o aplicativo desenvolvido para Linha de Tiras a Quente permitiu a estimativa da temperatura na entrada do primeiro desbastador, R1. No caso de qualquer atraso neste percurso, a queda de temperatura pode ser avaliada, gerando subsídios para a tomada de

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



decisão pela interrupção ou não do processamento da placa, uma vez que temperaturas muito baixas podem levar a danos ao equipamento.

Para a etapa de laminação, os modelos desenvolvidos forneceram boa previsão da evolução térmica do laminado. No entanto, sua aplicação foi limitada, pois os resultados foram menos precisos que os fornecidos pelos sistemas de controle *online*, que possuem várias lógicas de retroalimentação e adaptação durante o processo.

Com relação ao resfriamento do laminado após laminação final de chapas grossas, foram desenvolvidos modelos para o resfriamento acelerado, para o resfriamento final no leito de resfriamento, no caso de chapas não processadas por resfriamento acelerado, e para a evolução térmica durante o empilhamento de chapas, todos na Linha de Chapas Grossas. Especialmente o modelo do resfriamento acelerado tem sido útil para ajustar condições de processo, uma vez que a tecnologia ainda é recente para a Usiminas.

REFERÊNCIAS

- 1 Hollander F. A model to calculate the complete temperature distribution in steel during hot rolling. In: Proceedings of the Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking Conference, 1973, Amsterdam, 46-79.
- 2 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, 1: 35-39.
- 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*, 2012, 9:190-209.
- 4 Evans JF, Roebuck ID, Watkins HR. Numerical modeling of hot strip mill runout table cooling. *Iron and Steel Engineer*, 1993, 1: 50-55.
- 5 Park IS. Effects of cooling water nozzle array on cooling performance of run out table in hot rolling process. *ISIJ*, 2013, 1: 71-75.
- 6 Li HJ, Li ZL, Yuan G, Wang ZD, Wang GD. 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: 29-34.
- 7 Devadas C, Samarasekera, IV. Heat transfer during hot rolling of steel strip. *Ironmaking and Steelmaking*, 1986, 6: 311-321.
- 8 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, Ouro Preto. São Paulo: ABM, 2013.
- 9 The British Iron and Steel Association. Physical constants of some commercial steels at elevated temperatures. London: Butterworths, 1953.
- 10 Kokado J. On the temperature change of sheet steel during continuous hot rolling. In: Proceedings ICSTIS, Suppl. Trans. *ISIJ*, 1971, 11: 750-754.
- 11 Holman JP. *Transferência de Calor*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1983.
- 12 Rohsenow WM. *Handbook of heat transfer*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1973.
- 13 Thibault J. Comparison of nine three-dimensional numerical methods for the solution of the heat diffusion equation. *Numerical Heat Transfer*, 1985, 8: 281-298.
- 14 Patankar SV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, McGraw-Hill, 1980.
- 15 Santos AA, Giacomini CN. Mathematical simulation of plate rolling at Usiminas: a tool for process enhancement. In: Proceedings 18ª Conferencia de Laminación, 2010, IAS, Rosario/Argentina, 01- 04 novembro.

* *Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.*