

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO ACELERADO DE CHAPAS GROSSAS¹

Antônio Adel dos Santos²
Cristóvão Nery Giacomini³

Resumo

Em 2010 foi introduzido o processo de resfriamento acelerado de chapas grossas na Usiminas, em Ipatinga. Em termos de controle, o objetivo básico do processo é fazer o resfriamento rápido do laminado em determinado intervalo de temperatura com a taxa de resfriamento especificada. Para melhorar este controle foi desenvolvido um aplicativo de simulação matemática que calcula o perfil de velocidade do laminado ao longo do processo e a correspondente evolução térmica, desde o último passe do laminador acabador até o final do resfriamento. São gerados os perfis de temperatura na espessura e ao longo do tempo para qualquer grau de aço e dimensional do laminado, possibilitando ajustes nos modelos de controle de processo. Além disso, o aplicativo de simulação tem sido muito útil no desenvolvimento de novos graus de aço, ao relacionar as condições de processo à taxa de resfriamento, a qual afeta diretamente as suas propriedades mecânicas. Neste trabalho é mostrada uma visão geral do aplicativo de simulação, alguns exemplos de aplicação e seu potencial para melhoria do processo e suporte ao desenvolvimento de novos aços.

Palavras-chave: Resfriamento acelerado; Simulação matemática; Chapas grossas.

SIMULATION OF THE ACCELERATED COOLING PROCESS OF HEAVY PLATES

Abstract

The accelerated cooling process of heavy plates was introduced in Usiminas plate mill line at Ipatinga in 2010. Concerning its control, the process shall provide a fast cooling of the as rolled plate between a specified temperature interval following a given cooling rate. In order to help such control, it was developed a mathematical simulation tool, which calculates the plate speed profile together with the thermal evolution from the last pass in the finishing mill until the end of cooling. Thus, the thermal profile through the plate thickness can be established for any steel grade and dimensions, giving rise to subsidies for the tuning of process control. Besides, the simulation tool has been very useful for development of novel steel grades, as the process variables can be related to the cooling rate, which affects remarkably mechanical properties of steel. This paper shows an overview of the simulation tool and examples of application, highlighting its potential for improving process control and development of new products.

Key words: Accelerated cooling; Mathematical simulation; Heavy plates.

¹ *Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.*

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

³ *Membro da ABM; Analista de TI, Centro de Tecnologia Usiminas; Ipatinga, MG.*

1 INTRODUÇÃO

O conceito de resfriamento acelerado para otimização das propriedades mecânicas de laminados planos é relativamente antigo, sendo aplicado à laminação de tiras a quente desde o início da década de 1960. A sua aplicação em chapas grossas data do início da década de 1980, no Japão.⁽¹⁾ A partir daí, houve disseminação de sua aplicação para outros países, especialmente para o ocidente, sendo atualmente uma tecnologia utilizada na maioria das linhas de chapas grossas do mundo.

Comparativamente ao processo de laminação controlada seguida de resfriamento ao ar, o processo de resfriamento acelerado permite que aços avançados com alta resistência mecânica sem deterioração da tenacidade sejam produzidos. Para algumas aplicações específicas, tais como transporte e armazenamento de óleo e gás em ambientes com alto teor de enxofre, este processo é indispensável à obtenção de chapas de aço. Em outras aplicações, de menor restrição, graus equivalentes de aços podem ser produzidos com menor necessidade de adição de elementos de liga na aciaria.

Vários aspectos precisam ser controlados durante o resfriamento acelerado de chapas grossas. Entre eles, a questão fundamental é obter um resfriamento relativamente homogêneo ao longo do comprimento do laminado, com simetria na espessura e largura, desde a temperatura inicial até a final especificada, atendendo a uma determinada taxa de resfriamento. Busca-se atingir os objetivos de resfriamento com o uso de modelos de controle do processo e a intervenção ocasional do operador.

Uma maneira muito útil de melhorar o ajuste dos modelos de controle e permitir maior entendimento do efeito das variáveis de processo nos valores obtidos de temperatura e taxas de resfriamento é pela aplicação de modelos de simulação matemática *offline*. Adicionalmente, os modelos podem auxiliar no desenvolvimento de novos aços, pela determinação de condições de processo que permitam obter taxas de resfriamento indicadas.

Neste trabalho é apresentada uma visão geral de um aplicativo de simulação matemática desenvolvido para o resfriamento acelerado, CLC, da linha de laminação de chapas grossas da Usiminas em Ipatinga. O aplicativo segue a filosofia de outros já desenvolvidos e aplicados,⁽²⁻⁴⁾ nos quais as entradas e saídas dos cálculos dos modelos matemáticos são apresentadas de forma amigável e de fácil interação com o usuário. São mostrados ainda exemplos de sua aplicação na Usiminas para melhoria de processo e desenvolvimento de produtos.

2 PROCESSO DE RESFRIAMENTO ACELERADO NA USIMINAS

Na Figura 1 está apresentado um esboço dos equipamentos principais da Linha de Chapas Grossas em Ipatinga. São dois fornos tipo viga móvel, uma estação de descarepação primária, um laminador acabador seguido de desempenadeira a quente e o equipamento CLC. Este possui seis zonas de controle de vazão de água, superior e inferior independentes, controles de máscara de topo, base e bordas. Na maioria dos materiais, o resfriamento é obtido com a passagem do laminado somente uma vez pelo equipamento. Para espessuras de laminados mais elevadas, pode ser necessária oscilação no seu interior.

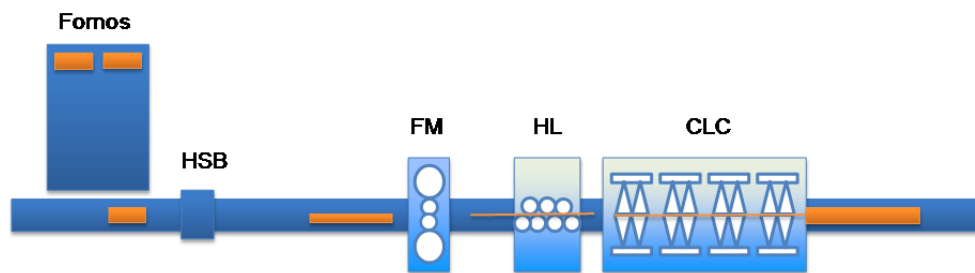


Figura 1. Esquema da linha de chapas grossas da Usina de Ipatinga. HSB: descarepador primário; FM: laminador acabador; HL: desempenadeira a quente.

3 MODELO MATEMÁTICO

3.1 Perfil de Velocidade

O objetivo principal do simulador é o cálculo da evolução de temperatura do laminado ao longo do processo, em função do tempo ou da sua posição ao longo da linha. Então, é necessário descrever matematicamente as relações de tempo, posição e velocidade do laminado. Na Figura 2 é mostrado um esquema do perfil de velocidades do topo do laminado ao longo do processo. O cálculo é iniciado antes da última passagem pelo laminador, no ponto de parada sob o pirômetro de entrada. Até a posição do sensor HMD A39T, a velocidade do laminado é controlada pelo laminador. Daí ocorre a desaceleração para a velocidade inicial da HL, a qual é tabelada. O perfil de velocidades desde o valor V_{HL} até o patamar na posição do sensor CMDA43T é calculado e controlado pelo equipamento CLC, e depende das condições de resfriamento visado para o laminado. Deste ponto até o final da linha CLC, a velocidade é controlada manualmente. Os perfis de velocidade de meio e base do laminado são idênticos ao apresentado para o topo, mas defasados na posição em função de seu comprimento.

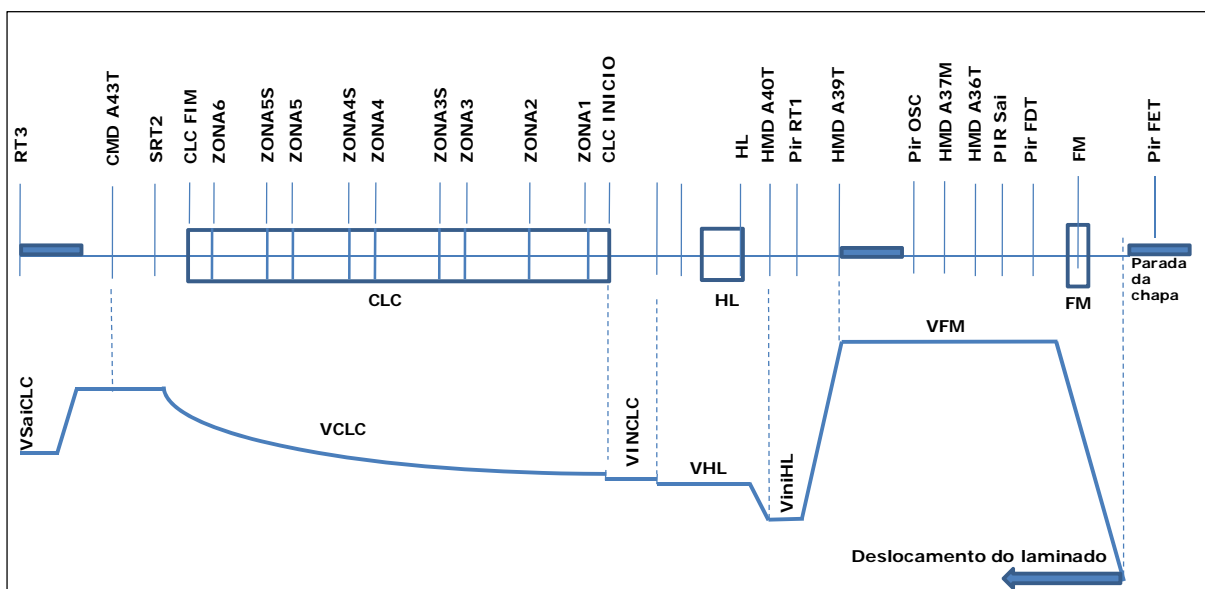


Figura 2. Perfil esquemático de velocidade do topo do laminado desde a entrada do laminador até o final da linha CLC, na posição do pirômetro de recuperação RT3. Pir: pirômetro; HMD: sensor de posição a quente, CMD: sensor de posição a frio; SRT: *scan* de temperatura; ZONA(1 a 6), zona com resfriamento forçado; ZONA(1 a 6)S: zona seca, com resfriamento ao ar.

3.2 Modelo de Temperatura

A equação que governa a transferência de calor por condução em regime transiente no interior do laminado, equação de Fourier, unidimensional na espessura, é dada em (1).

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

ρ : densidade do aço (kg.m^{-3});
 c : calor específico do aço ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$);
 T : temperatura (°C);
 t : tempo (s);
 λ : condutividade térmica do aço ($\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$);
 x : posição na espessura (m).

As propriedades c , ρ e λ são obtidas das tabelas Bisra,⁽⁵⁾ instituto de pesquisa que determinou tais propriedades em 22 aços. No modelo existe uma rotina que enquadra o aço a ser simulado naquele código BISRA cuja composição química mais se aproxima do aço estudado.

Para solução pelo método das diferenças finitas, formulação por entalpia, a equação (1) precisa ser modificada. Para isso, como a condutividade térmica é dependente da temperatura, usa-se a conversão da temperatura em temperatura modificada,⁽²⁾ e a transformação de calor específico em entalpia, obtendo-se a equação (2).

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (2)$$

H : entalpia (J.kg^{-1});
 λ_d : condutividade térmica na temperatura de referência ($\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$);
 ϕ : temperatura modificada (°C).

No modelo de temperatura são incorporadas as parcelas de calor geradas ou absorvidas pelos seguintes fenômenos: calor de atrito com cilindros, calor de deformação e calor perdido por contato com os cilindros, no último passe de laminação; calor devido à transformação de fases do aço e calor perdido no contato com rolos da desempenadeira.

A condição inicial de temperatura do laminado é a temperatura do último passe de acabamento, caso a opção de simulação seja completa, ou a temperatura de início de resfriamento rápido desejada, caso a simulação contemple apenas o CLC. A questão mais importante e complicada em modelos térmicos é a determinação dos coeficientes de transferência de calor. No presente modelo, foram utilizadas expressões matemáticas obtidas pelo fornecedor do equipamento e representadas genericamente na equação (3). Nos trechos com resfriamento com água, o coeficiente depende da temperatura superficial, da densidade de água (vazão/área) e da temperatura da água. Nos trechos de resfriamento ao ar, o coeficiente é função da temperatura superficial do laminado apenas.

$$h = f(T_s, W, T_a) \quad (3)$$

h : coeficiente de transferência de calor ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$);
 T_s : temperatura superficial do laminado ($^{\circ}\text{C}$);
 W : densidade de água ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$);
 T_a : temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$).

Como tanto as propriedades termofísicas quanto os coeficientes de transferência de calor são dependentes da temperatura, a solução da equação para cálculo da evolução térmica é feita de forma numérica. Foi escolhido o método das diferenças finitas, formulação explícita, para rapidez de cálculo. Neste caso, o intervalo de tempo em cada passo da iteração é controlado.⁽⁶⁾ Alternativamente, a solução pode ser obtida pelo método de volumes finitos,⁽²⁾ incondicionalmente convergente, mas a solução é mais demorada.

3.3 Validação dos Modelos

O ajuste e a validação dos modelos foram realizados com base na análise e aplicação da simulação aos dados de 3334 laminados, que foram processados no período de setembro/2011 a agosto/2012. Foram coletados 150 registros para cada laminado, incluindo dimensões, velocidades e temperaturas em vários pontos da linha, quantidade de água de resfriamento, além de valores visados de processo.

Na Figura 3 é mostrado o gráfico comparativo dos valores calculados e medidos da velocidade do topo do laminado na entrada do CLC. A faixa de velocidade de operação do equipamento é de 15 m/min a 150 m/min, quando não há oscilação. A ótima capacidade de previsão da velocidade do modelo pode ser atestada pela observação visual e pelo erro padrão da estimativa 3,6 m/min.

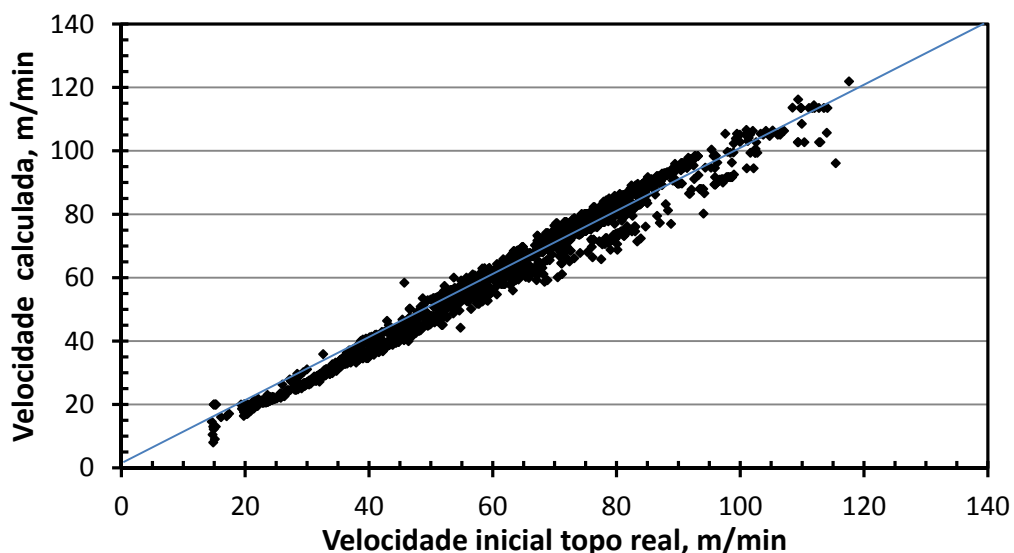


Figura 3. Comparação da velocidade calculada do topo do laminado, na entrada do CLC, com a medida.

Na Figura 4-a é mostrado o gráfico comparativo da temperatura calculada com a visada do processo, corrigida pelo operador, para o final de resfriamento do laminado. A temperatura final de resfriamento é definida pelo valor máximo entre as obtidas nas posições SRT2 e RT3 (Figura 2), pois existe a recuperação da temperatura superficial em espessuras elevadas. Existe uma aproximação entre valores calculados e medidos, sendo o erro padrão da estimativa 16°C. Porém,

quando são comparados valores calculados com os medidos, houve elevada dispersão (Figura 4-b), com erro padrão da estimativa de 63°C. Apesar de o acerto da temperatura final de resfriamento em faixas muito estreitas ser naturalmente um grande desafio, foi buscado melhorar a aproximação entre valores calculados, medidos e visados. Para isso, foi introduzido um módulo de otimização de parâmetros do modelo matemático, empregando-se o método simplex.⁽⁷⁾ Na Figura 4-c é mostrado um gráfico comparativo da temperatura calculada com a medida após ajuste de um parâmetro do coeficiente de transferência de calor por resfriamento forçado. O erro máximo tolerado na simulação dos 3334 laminados foi $\pm 5^\circ\text{C}$. Houve convergência da otimização em todos os laminados. Com esta função do aplicativo, o modelo de controle de processo pode ser ajustado para grupos específicos de aços, atuando-se nos parâmetros do coeficiente de transferência de calor.

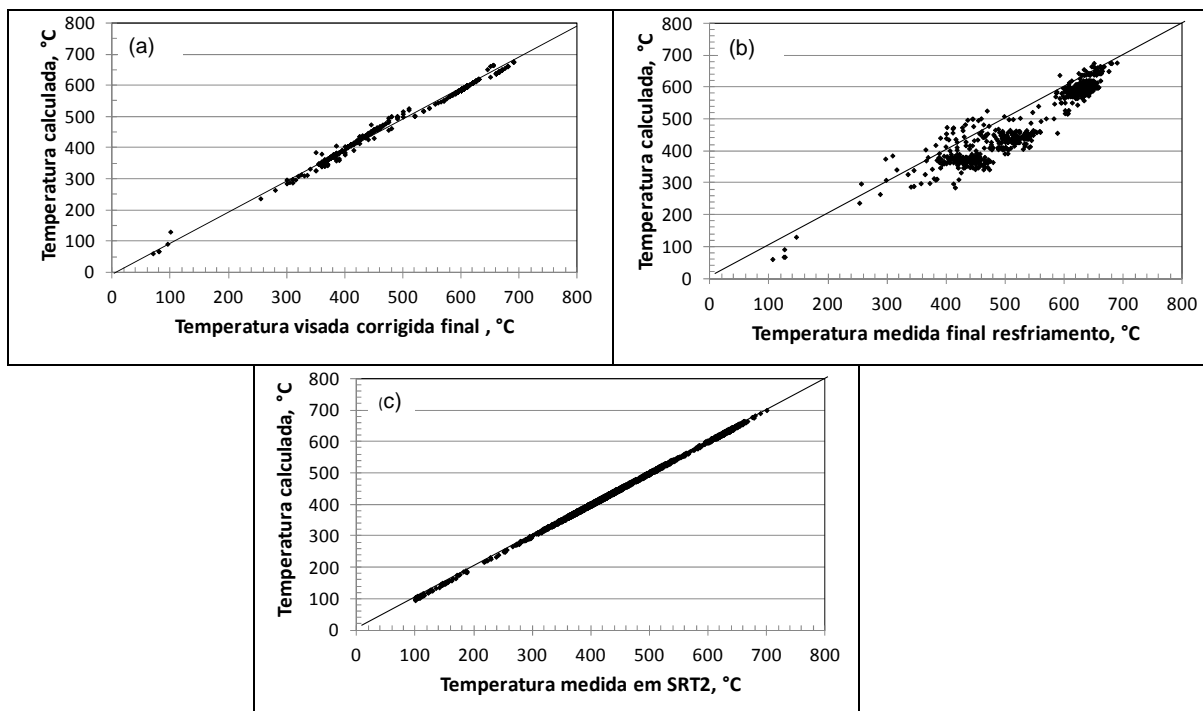


Figura 4. Verificação do acerto de temperatura calculada pelo modelo com valores medidos e visados.

4 APLICATIVO DE SIMULAÇÃO

Os modelos matemáticos foram inseridos em um aplicativo de simulação, construído em plataforma visual, que contém: tabelas de cadastro de todos os parâmetros da linha de laminação inerentes à simulação, composições químicas e dimensionais de todos os aços passíveis de serem processados nas linhas, propriedades termofísicas dos aços e parâmetros de controle dos modelos matemáticos. As informações estão em banco de dados. A interface de simulação, representada na Figura 5, é flexível e possui diversas alternativas de simulação, tais como domínio de simulação, método de solução matemática, grau e dimensional do aço, etc. A simulação é normalmente na forma direta, que permite o cálculo da evolução térmica do laminado em função das variáveis de entrada, incluindo a quantidade de água no resfriamento forçado. Uma alternativa interessante introduzida no modelo é o cálculo inverso, utilizando algoritmo de otimização simplex,⁽⁷⁾ que permite determinar a

quantidade de água para que seja obtido um valor visado de taxa de resfriamento. Ao todo são dezoito interfaces de entrada.

Além das simulações direta e inversa, aplicadas a cada laminado individualmente, o aplicativo pode ser usado para a simulação sequencial de um conjunto de laminados, tanto na forma direta, por exemplo, usado nas Figuras 4-a e 4-b, quanto na otimização de algum parâmetro do modelo visando melhorar o acerto de temperatura de final de resfriamento, usado por exemplo na Figura 4-c.

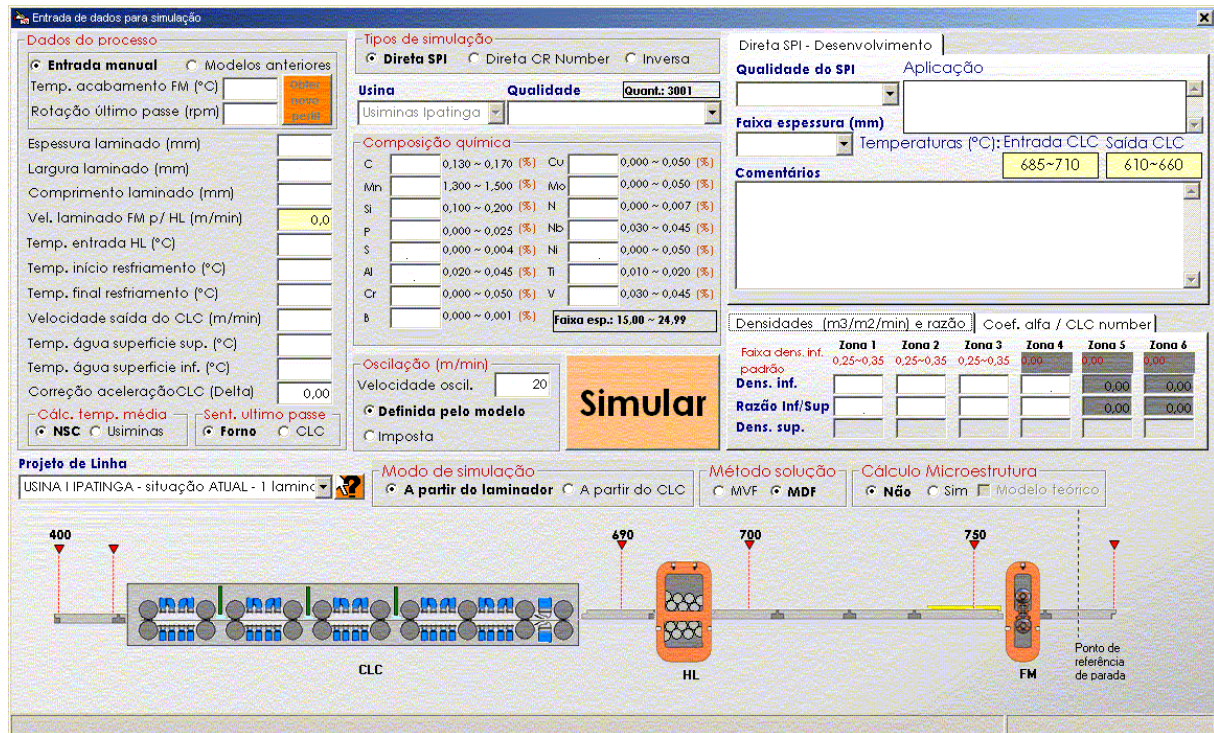


Figura 5. Interface principal de simulação do resfriamento acelerado, no aplicativo desenvolvido.

Na interface de saída (Figura 6), são mostrados os principais dados de entrada, valores de velocidade do laminado, tempos de processo, temperaturas superficial e média em várias posições da linha e taxas de resfriamento. Os tempos e taxas de transformação de fase podem ser calculados em intervalos específicos definidos pelo usuário, e são apresentados ao acionar a aba correspondente. No canto inferior direito existe uma tabela para resultados de microestrutura. Existe um modelo teórico de transformação da fase austenita em diversos constituintes, passíveis de serem formados no resfriamento acelerado, acoplado ao de temperatura.

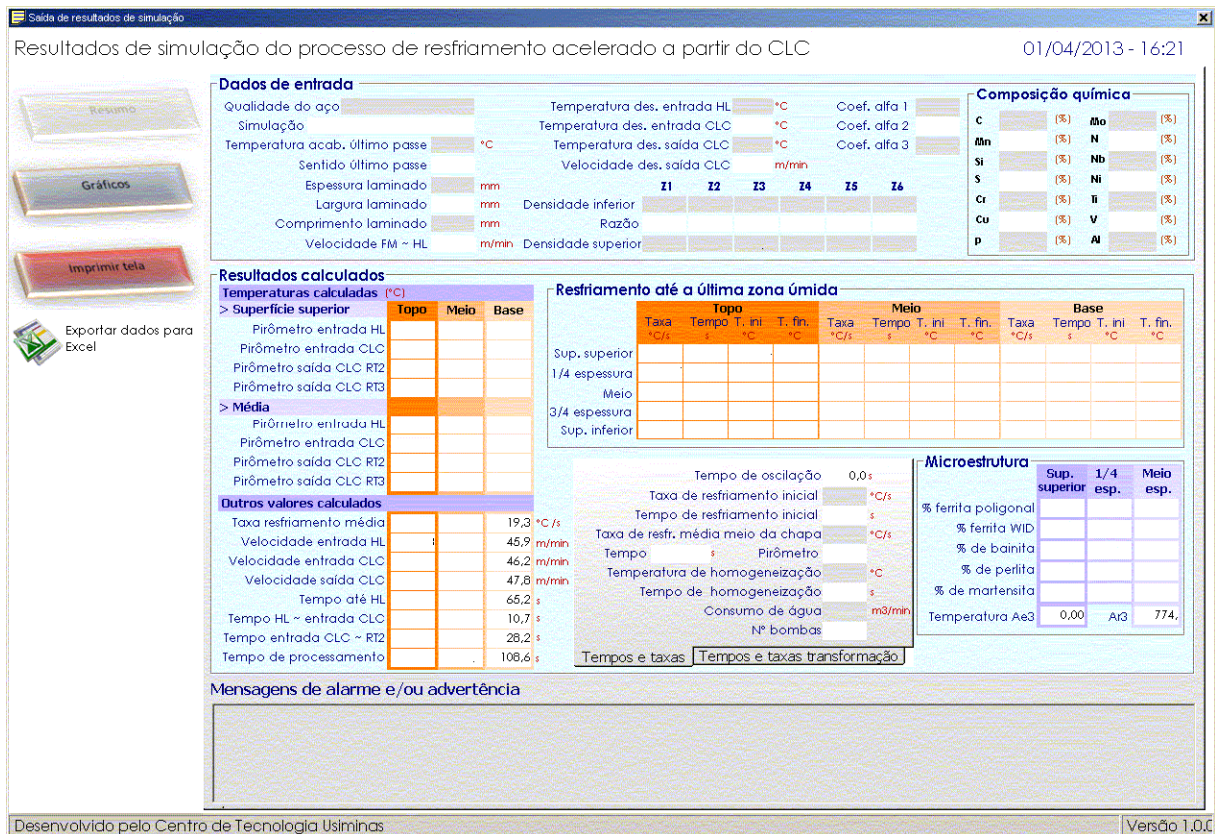


Figura 6. Interface de saída de resultados do aplicativo de simulação do resfriamento acelerado, ilustrando a simulação direta realizada conforme Figura 5.

Os perfis de temperatura, velocidade e coeficientes de transferência de calor podem ser apresentados graficamente, como ilustra a Figura 7, para a simulação referente às Figuras 5 e 6. Esta simulação foi apenas para a região do CLC, destacada pela linha vermelha contínua na Figura 5, portanto, o perfil de temperatura se restringe a este domínio. Uma série de opções é apresentada no lado esquerdo para configuração dos gráficos. Os resultados são também mostrados em tabelas que podem ser exportadas para planilhas eletrônicas, caso haja interesse do usuário em estender o seu tratamento.

5 POTENCIAL DE APLICAÇÃO

O potencial do aplicativo de simulação é amplo, viabilizando melhoria do processo e o desenvolvimento de novos produtos. Uma aplicação típica é para avaliação do efeito de variáveis de processo, de características do laminado e de parâmetros visados nos perfis de resfriamento obtidos. Por exemplo, podem ser verificados os efeitos da quantidade e temperatura de água de resfriamento, dimensões e composição química do laminado, temperatura de acabamento no laminador, nas temperaturas e taxas médias de resfriamento e em locais típicos ao longo da espessura do laminado. Isto permite dotar o processo de maior flexibilidade operacional.

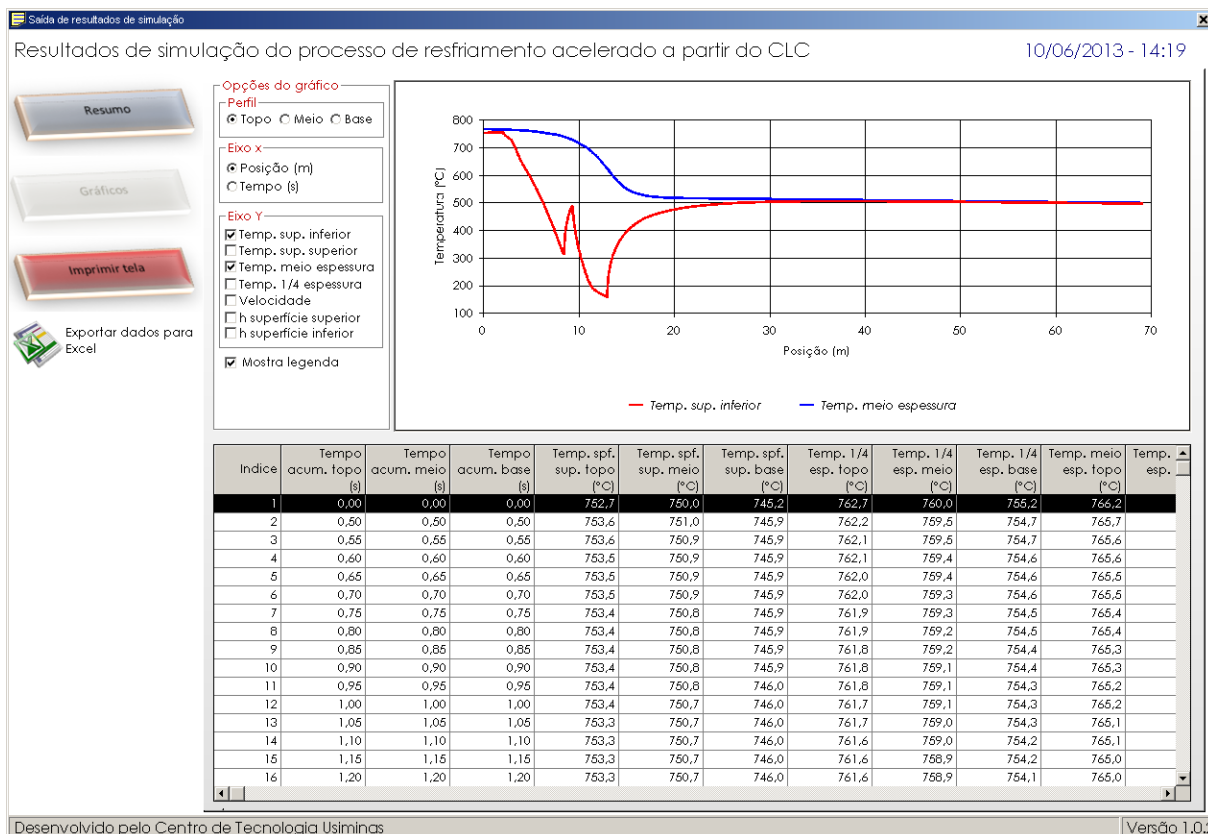


Figura 7. Gráfico dos perfis de temperatura calculados para a superfície e o meio da espessura do laminado, como exemplo de resultado de simulação realizada conforme Figura 5.

Outro potencial de aplicação, já explorado no aplicativo, é a geração de subsídios para o desenvolvimento de novos aços, especialmente na Usiminas onde o processo CLC é relativamente recente. Sabe-se que as propriedades mecânicas finais dos aços são fortemente dependentes da taxa de resfriamento, em função das alterações microestruturais promovidas nesta última etapa de processo. A simulação pode ser usada para ajustar as condições de processo no CLC visando à obtenção de taxas de resfriamento adequadas para atender as propriedades desejadas.

Na Tabela 1 estão mostrados, como exemplo, alguns resultados de simulações aplicadas a um aço em desenvolvimento na Usiminas, com espessura 33,4 mm e resfriamento acelerado entre 820°C e 425°C, variando-se a densidade de água nas zonas do CLC. Aumentando-se a densidade de água nas zonas, a velocidade de passagem pelo CLC é significativamente elevada, pois o modelo visa a manter a temperatura final de resfriamento. Porém, as variações das taxas de resfriamento são menores. É interessante observar que o resfriamento no meio da espessura do laminado é duas a três vezes mais lento que na superfície, como mostra o gráfico da Figura 7. Conjugando-se estes resultados ao conhecimento metalúrgico do processo, pode-se selecionar a condição mais adequada do processo.

Adicionalmente, a simulação pode ser empregada a um conjunto de chapas laminadas visando ao ajuste de parâmetros existentes no modelo, via módulo de otimização, para que o acerto da temperatura final de resfriamento seja melhorado.

Tabela 1. Exemplo de avaliação do efeito da variação de densidades de água nas zonas, Zona 1 a Zona 6, em alguns parâmetros importantes para análise do resfriamento acelerado

Simulação	Densidades de água, $m^3 \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$	Velocidade topo, $m \cdot min^{-1}$	Tempo, s	Taxa, $^{\circ}C \cdot s^{-1}$		Vazão de água, $m^3 \cdot min^{-1}$
				Superfície superior	Meio da espessura	
1	0,3; 0,3; 2; 2; 2; 0	45,7	20,2	33,9	10,1	146,8
2	2; 2; 2; 2; 2; 0	47,7	18,9	36,8	15,8	189,8
3	1; 2; 2; 2; 2; 2	60,9	19,0	37,2	15,1	234,1
4	2; 2; 2; 2; 2; 1	59,1	19,6	34,1	16,2	215,1
5	0,3; 2; 2; 2; 2; 0	47,5	19,0	37,2	14,6	179,0

6 CONCLUSÕES

O aplicativo desenvolvido associa modelos matemáticos de cálculo do perfil de velocidade e da evolução térmica do laminado a banco de dados e interfaces de entrada de dados e saída de resultados. O domínio de cálculo começa antes do último passe do laminador acabador e termina no último pirômetro relativo à linha CLC (pirômetro de recuperação). Qualquer parâmetro de configuração da linha, ou dado de processo ou da chapa laminada, relativos ao resfriamento acelerado, pode ser alterado em tempo de simulação. A validação e ajuste dos modelos foram realizados com base em dados de processo de 3334 chapas laminadas, garantindo-se satisfatória precisão de cálculo de velocidades e temperaturas do laminado. Assim, foi disponibilizada para várias áreas da Empresa uma ferramenta versátil e confiável para suporte à melhoria do processo de resfriamento acelerado e ao desenvolvimento de novos aços empregando esta tecnologia.

REFERÊNCIAS

- 1 TSUKADA, K.; MATSUMOTO, K.; HIRABE, K.; TAKESHIGE, K. Application of on-line accelerated cooling (OLAC) to steel plate. In: Mechanical Working and Steel Processing Conference, 23, 1981, Pittsburgh, p. 347-370.
- 2 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.
- 3 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.
- 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 INCROPERA, F. P., DE WITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2003.
- 7 GOLDBARG, M. C; LUNA, H, P. L. Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 2005.