

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DO RESFRIAMENTO ACELERADO PILOTO¹

Marcelo Moreira Furst Gonçalves²
Hormando Leocadio Júnior³
Warley da Silva Horta⁴
Fábio Pinto Martins⁵

Resumo

O desenvolvimento de novos produtos depende de um longo período de intensivas experiências. Isto gera custos no início de fornecimento destes produtos com as qualidades requeridas. No laboratório, os níveis de risco e custo são muito mais baixos e, por esse motivo, vários métodos de simulação têm sido utilizados na tentativa de reproduzir o processo de deformação industrial a quente. Para o desenvolvimento de aços em escala piloto submetidos a resfriamento acelerado é importante que se disponha de um sistema de resfriamento acelerado piloto. Em 2010 foi desenvolvido pela Usiminas um projeto de resfriamento adaptado ao laminador existente. O resfriamento acelerado é capaz de controlar taxas de resfriamento de 5°C/s a 60°C/s em placas de até 300 mm de largura e 1.500 mm de comprimento, com espessuras de 20 mm a 40 mm e redução de temperatura de 900°C para 200°C. O sistema é automatizado possuindo câmeras termográficas, modelo matemático, controle de vazão de água dos headers, possuindo controle das taxas de resfriamento e da temperatura inicial e final desejada.

Palavras-chave: Automação; Laminação; Resfriamento acelerado.

DEVELOPMENT OF AUTOMATION AND CONTROL SYSTEM FOR ACCELERATED COOLING PILOT PLANT

Abstract

The development of new products depends on a long period of intensive experiences. This generates costs at the beginning of providing these products with the required qualities. In the laboratory, the levels of risk and cost are much lower and, therefore, several simulation methods have been used in an attempt to reproduce industrial hot deformation process. To develop pilot scale steels subjected to accelerated cooling is important to have a system of accelerated cooling. In 2010 was developed by Usiminas a project cooling adapted to existing rolling mill. The accelerated cooling is capable of controlling cooling rates from 5°C/s to 60°C/s plates up to 300 mm wide and 1.500 mm long, with thicknesses from 20 mm to 40 mm and a temperature reduction from 900°C to 200°C. The system is automated with thermographic cameras, mathematical model, water headers control flow, control of cooling rates and the initial and desired end temperatures.

Key words: Automation; Rolling mill; Accelerated cooling.

¹ Contribuição técnica ao 15º Seminário de Automação e TI Industrial, 20 a 22 de setembro de 2011, São Paulo, SP.

² Engenheiro Eletrônico, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Engenheiro Mecânico (MSc.), Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁵ Técnico em Automação Industrial, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

O Centro de Tecnologia Usiminas é considerado um centro de referência na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de produção e aplicação de aços em âmbito latino-americano, sendo o único do Brasil a simular, por meio de escala piloto, as diversas fases do processo produtivo de aço. O Centro de Tecnologia também atua em estudos sobre novas aplicações, novos tipos de aço, melhorias nos processos produtivos e na seleção e implementação de novas tecnologias.

As plantas industriais para laminação a quente de aços possuem equipamentos de elevado custo operacional. Assim, ensaios ou testes em instalações desse porte são onerosos e as vezes não trazem resultados que compensem os riscos e custos envolvidos. No laboratório, os níveis de risco e custo são muito mais baixos e, por esse motivo, vários métodos de simulação têm sido utilizados na tentativa de reproduzir o processo de deformação industrial a quente.⁽¹⁾

Em 2010 foi inaugurado um sistema industrial de resfriamento acelerado na Linha de Laminação de Chapas Grossas da Usina de Ipatinga. Assim, a Usiminas passa a ser a primeira empresa no Brasil a ter este tipo de equipamento, denominado *Continuous on Line Control* (CLC) e adquirido da Nippon Steel Corporation.

O principal efeito do resfriamento acelerado é o de promover um aumento da resistência mecânica sem deterioração da tenacidade à fratura, o que é obtido através de alterações microestruturais. O princípio do processo consiste em se promover o resfriamento das chapas com altas taxas ao longo da faixa de temperaturas de transformação microestrutural, o que resulta em alterações da microestrutura e em formação de bainita em detrimento da perlita.⁽²⁻⁴⁾ Na Figura 1 podem ser vistas diferentes microestruturas obtidas a partir da variação da taxa de resfriamento aplicada ao material em processamento.

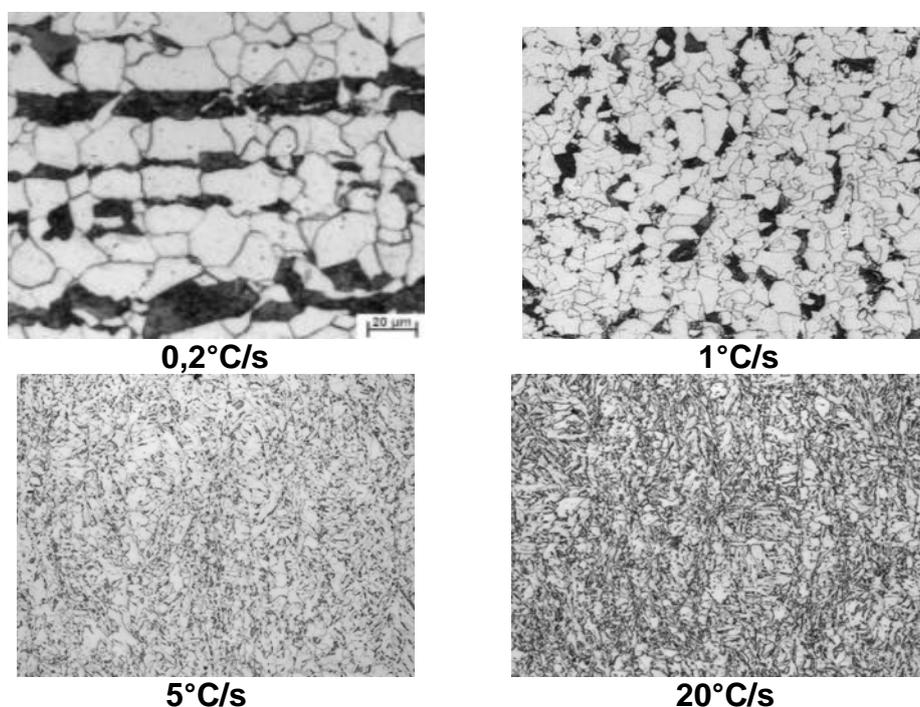


Figura 1. Microestruturas obtidas a partir de diferentes taxas de resfriamento.⁽²⁾

Este trabalho apresenta o sistema de automação e controle desenvolvido pela Usiminas para o resfriamento acelerado piloto de modo a possibilitar ajustes de

acordo com a necessidade de desenvolvimento de novos produtos e melhorias do processo industrial.

2 MATERIAL E MÉTODO

Para o desenvolvimento de aços em escala piloto submetidos a resfriamento acelerado é importante que se disponha de um sistema de resfriamento acelerado piloto no laminador piloto do Centro de Tecnologia Usiminas. Este investimento foi realizado pela Usiminas em 2010, com o desenvolvimento de um projeto de resfriamento que foi adicionado ao laminador existente.^(5,6)

2.1 Resfriamento Acelerado Piloto

O equipamento de resfriamento acelerado piloto é composto por:

- bancos de resfriamento (*headers*) superiores e inferiores;
- um tanque de armazenamento de água a ser utilizada no processo;
- um tanque de decantação da água utilizada;
- bombas para o sistema de vazão e recirculação da água;
- válvulas de controle;
- medidores de vazão e de temperatura;
- sistema de resfriamento de água (*chiller*);
- duas câmeras termográficas; e
- dois sensores óticos de posicionamento.

A Figura 2 apresenta uma vista do equipamento de resfriamento acelerado piloto instalado no Centro de Tecnologia Usiminas.



Figura 2. Visão geral do resfriamento acelerado piloto instalado no Centro de Tecnologia Usiminas – Usina de Ipatinga.

Na Tabela 1 são apresentadas as características principais do equipamento.

Tabela 1. Principais características físicas e de processo do resfriamento acelerado piloto

Comprimento da mesa de resfriamento	6 m
Largura da mesa de resfriamento	300 mm
Vazão de água máxima	720 m ³ /h
Velocidade da mesa	0 a 2 m/s
Bancos de resfriamento (headers)	unidades superiores e inferiores
Taxa de resfriamento	5 a 60°C/s
Monitoramento	pirômetros câmeras termográficas sensores laser de presença

2.2 Modelo Matemático para o Cálculo de Vazão

O cálculo das vazões utilizadas no resfriamento acelerado piloto é realizado a partir de um modelo matemático desenvolvido na Usiminas e que utiliza informações relativas aos parâmetros de processamento do material, tais como: a temperatura de entrada e de saída desejada, a espessura da placa, a taxa de resfriamento a ser aplicada, a temperatura da água e do ar e o tipo de aço a ser processado.

Na Figura 3 é apresentada a tela principal do modelo a partir da qual são realizados os cálculos e definição dos valores das vazões de água. Estas vazões serão ajustadas, no supervisório de controle do sistema, para cada um dos *headers* inferiores e superiores. Além disso, é apresentada a evolução da temperatura durante o processo de resfriamento, baseado no modelo matemático, que será comparado com o obtido durante o processamento real.

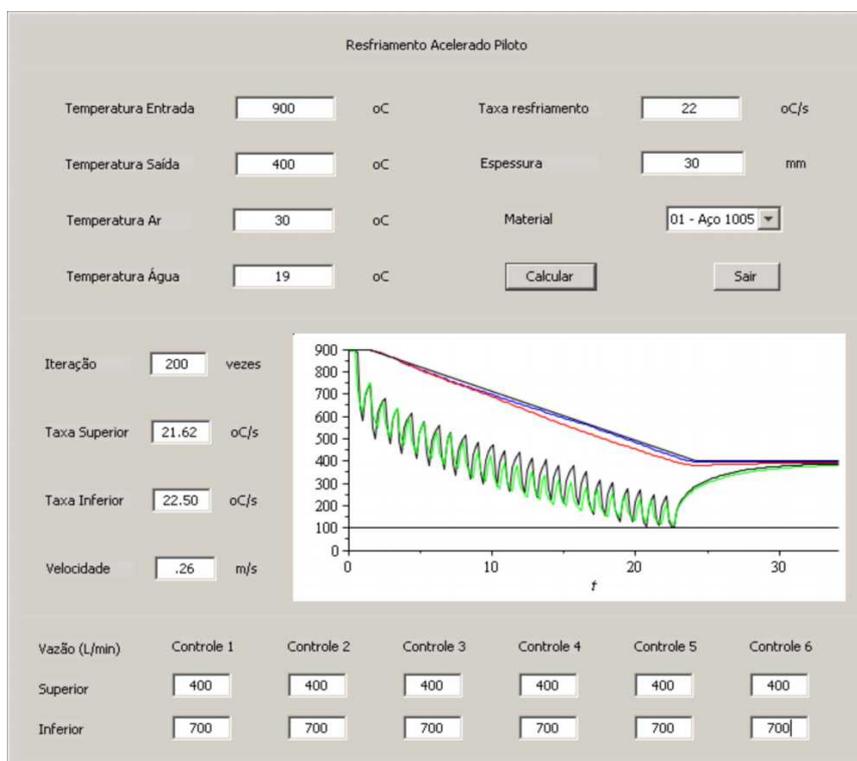


Figura 3. Tela de cálculo das vazões a partir do modelo matemático desenvolvido.

2.3 Sistema de Automação e Controle

O sistema de automação e controle desenvolvido para o resfriamento acelerado piloto tem a função principal de ajustar e controlar as vazões necessárias em cada conjunto de *headers* de modo a obter a taxa de resfriamento desejada, bem como monitorar os valores das variáveis envolvidas e liberar o sistema para início do processo de resfriamento.

Todo o controle do sistema foi baseado no controlador em tempo real CompactRIO, modelo 9024 que utiliza um processador *PowerPC* de 800 MHz, memória de sistema de 512 MB e armazenamento de 4 GB. Além disso, possui terminal *Ethernet* para conexão ao módulo de expansão *Ethercat*, modelo 9144 e ao computador de operação do sistema. O chassi do controlador e o módulo de expansão possuem 8 *slots* para conexão dos cartões de entrada e saída de sinal (Figura 4).

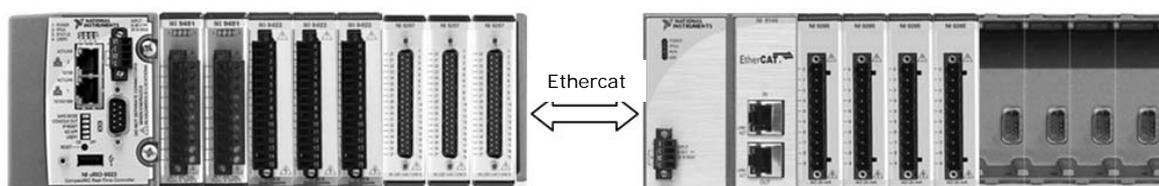


Figura 4. Controlador em tempo real cRIO-9024 e Ethercat-9144.⁽⁷⁾

Para a aplicação desenvolvida foram utilizados 12 cartões com diferentes funções, permanecendo quatro *slots* livres para expansões futuras. A Tabela 2 apresenta a distribuição dos cartões no controlador e a função de cada um no sistema de automação e controle do resfriamento acelerado piloto.

Tabela 2. Distribuição e função dos cartões no controlador

Módulo	Slot	Tipo	Função
cRIO-9024	1	Contato	Acionamento do sistema de bombas.
	2	Contato	Acionamento do sistema de recirculação e reposição de água.
	3 e 4	Entradas digitais	Informações de funcionamento do sistema (ligado/defeito).
	5	Entradas digitais	Sensores de presença de chapa e nível do tanque de decantação.
	6	Entrada de sinal de corrente	Transmissores de vazão superiores e pirômetro de entrada.
	7	Entrada de sinal de corrente	Transmissores de vazão inferiores e pirômetro de saída.
	8	Entrada de sinal de corrente	Transmissores de nível, temperatura e pressão.
	Ethercat-9144	1 e 2	Saída de sinal de corrente
3 e 4		Saída de sinal de corrente	Atuadores das válvulas de controle de vazão inferiores.

Como uma das principais variáveis no processo de resfriamento acelerado é a temperatura do material processado, foram instaladas, além dos pirômetros de infravermelho, duas câmeras termográficas, localizadas na entrada e na saída do sistema de resfriamento. A câmera de entrada, modelo Flir A325, é utilizada para medir a temperatura de início do resfriamento que deve ser igual à ajustada pelo modelo matemático. Esta câmera está configurada e calibrada para medições de temperatura na faixa de 350°C a 2.000°C, apresentando resolução de 320 x 240 pixels e frequência de aquisição de imagens até 60 Hz. Na saída do sistema de resfriamento é utilizado um modelo similar, contudo ajustado para uma temperatura de 200°C a 900°C. A câmera da saída é responsável por apresentar, além da temperatura final do material utilizada no cálculo da taxa de resfriamento real, a sua distribuição térmica de modo a verificar a uniformidade do resfriamento ao longo de todo o material.

No resfriamento piloto ainda foram instalados dois sensores óticos de posição do material processado (no início e no fim da linha) a fim de medir o tempo de duração do processo de resfriamento, conferir a velocidade da mesa de rolos de acordo com o valor ajustado e o calculado e, conseqüentemente, a taxa de resfriamento obtida. Além disso, o processo conta com dois transmissores de temperatura instalados no primeiro e último *headers*. A fim de garantir homogeneidade no resfriamento, o processo tem início somente quando a diferença de temperatura medida pelos transmissores for menor ou igual a 0,5°C.

A partir das informações da temperatura, da velocidade do processo e dos valores de vazão em cada banco de *headers*, o controle das válvulas, com o objetivo de manter os valores de vazão ajustados, é feita através de sistema em malha fechada, conhecido também como sistema retroalimentado (Figura 5).

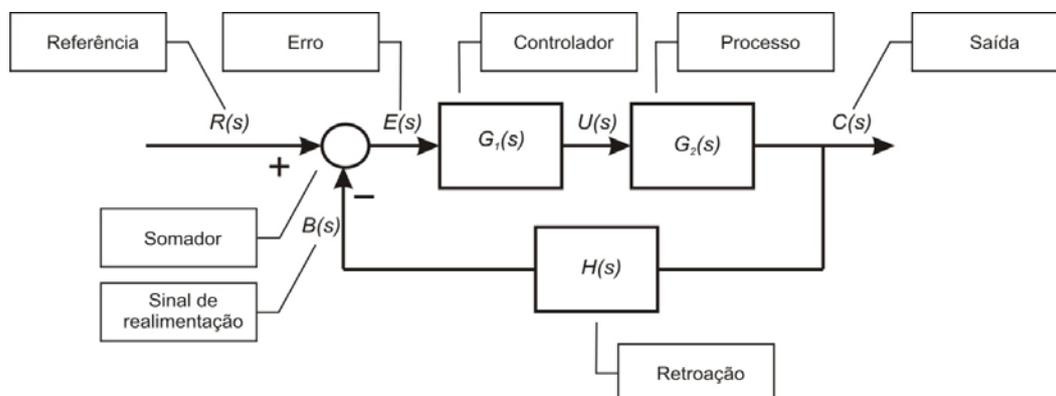


Figura 5. Diagrama de blocos de um sistema de controle de vazão em malha fechada.

Dentre os diversos tipos de controladores, os mais utilizados são o Proporcional, Integral e Derivativo (PID).⁽⁸⁾ A técnica de controle PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Este controlador é indicado para sistemas onde a função entre variável de entrada e de saída pode ser linearizada, contudo, vale salientar, que o uso do controle PID não garante um controle otimizado. Apesar disso, no sistema do resfriamento piloto, o controle apresentou eficiência de resposta e tempo de estabilidade dentro do especificado em razão do dimensionamento do sistema e dos atuadores e válvulas de controle.

2.4 Software de Automação e Controle

O desenvolvimento do sistema de controle que gerencia o resfriamento acelerado piloto foi feito utilizando o *software* LabVIEW, versão 2010. O programa desenvolvido neste software é armazenado no controlador CompactRIO para que possa trabalhar em tempo real, ficando o computador como interface com o usuário (IHM – Interface Homem Máquina). A comunicação entre a IHM e o controlador é feita via um *Hub* com quatro portas Gigabit. Neste mesmo *Hub* são conectadas as duas câmeras termográficas para transferência das imagens térmicas e, posterior medição da temperatura da placa de aço, pela IHM. A Figura 6 apresenta a tela principal do sistema de controle.

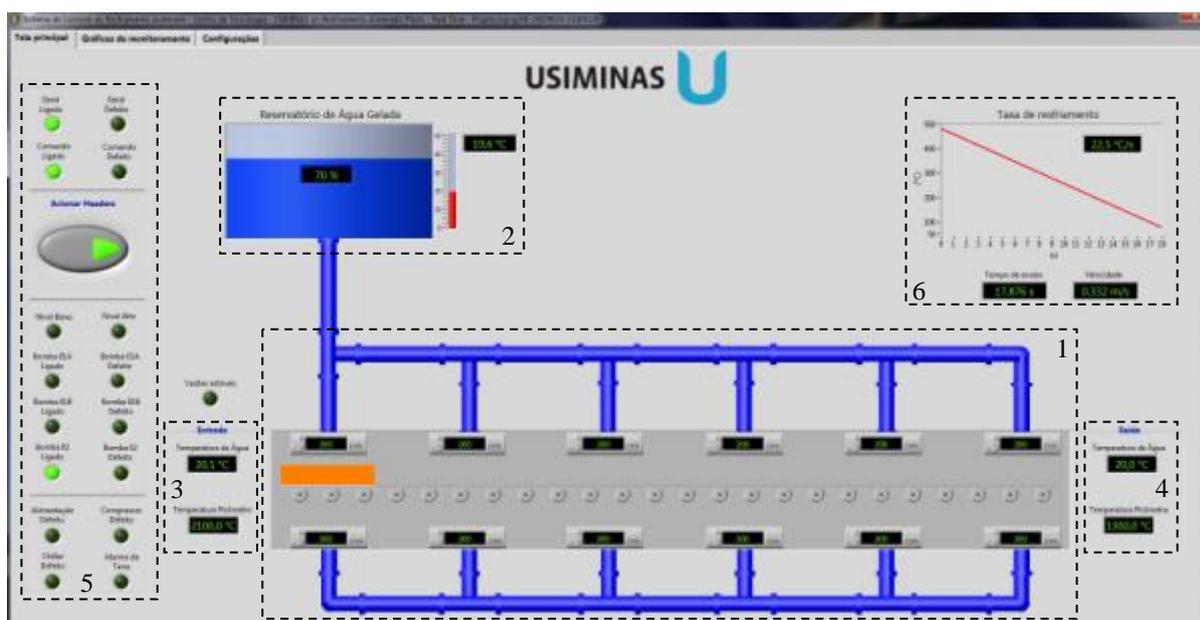


Figura 6. Tela principal do sistema de controle do Resfriamento Acelerado Piloto.

Nesta tela o usuário ajusta as vazões para cada um dos *headers*,⁽¹⁾ verifica o nível e a temperatura da água no tanque principal,⁽²⁾ a temperatura da água no primeiro e último *header*,^(3,4) as temperaturas de entrada e saída da placa obtidas pelas câmeras,^(3,4) as condições de funcionamento do sistema⁽⁵⁾ e, ao final do ensaio, é mostrado o gráfico da taxa de resfriamento obtida, bem como a velocidade e o tempo de processamento do resfriamento.⁽⁶⁾

O sistema também informa ao usuário, através de indicação visual, o instante em que todas as vazões já estão ajustadas dentro da faixa de controle desejada, podendo ser iniciado o processo de resfriamento.

Com relação às medições de temperatura da placa, a fim de possibilitar medições coerentes e que não sejam impactadas por pontos com diferentes níveis de emissividade, como por exemplo, regiões com carepa, o sistema mede a temperatura ao longo de um perfil e obtém o valor da máxima temperatura, bem como sua localização. Este valor é transferido à tela principal e registrado no campo relativo à temperatura de início do processamento para posterior uso no cálculo da taxa de resfriamento. A Figura 7 apresenta a imagem termográfica do material antes do início do processo de resfriamento e a linha a partir da qual é obtido o ponto de temperatura máxima, cujo valor é apresentado na figura.

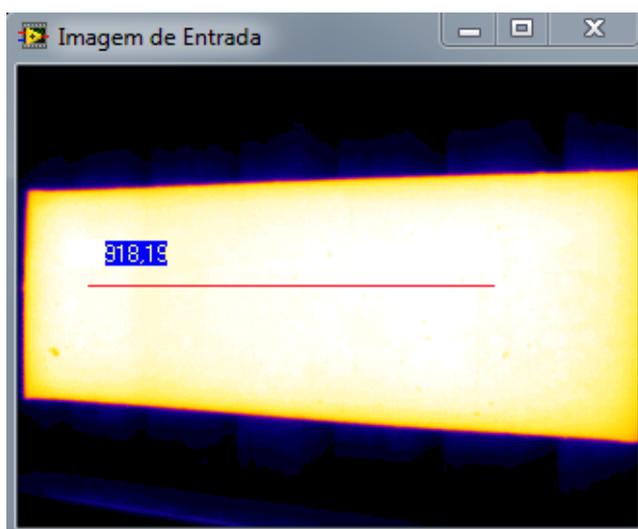


Figura 7. Imagem termográfica obtida na entrada da linha de resfriamento.

Ao final do processo, o mesmo tipo de medição ocorre na saída. Contudo, nesta etapa, como ocorre uma recuperação térmica do material,^(5,6) o valor de temperatura utilizado para o cálculo da taxa ocorre alguns instantes após a sua saída, até que a mesma estabilize, sendo este o valor registrado posterior ao cálculo da taxa de resfriamento. A Figura 8 mostra a placa após passar pela linha de resfriamento, bem como a linha de medição e o valor da temperatura máxima obtida.

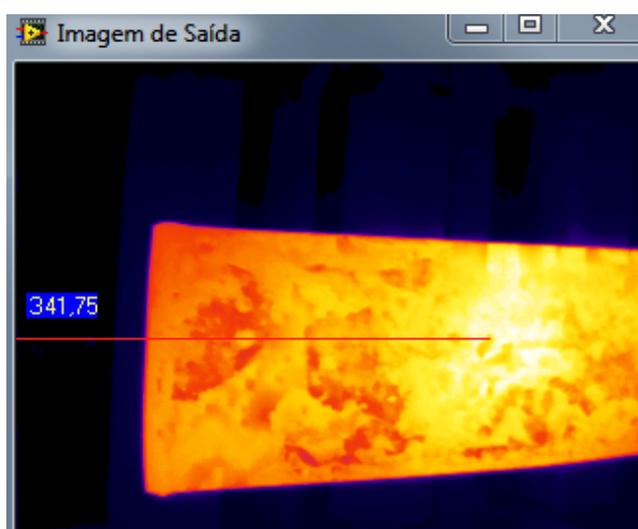


Figura 8. Imagem termográfica obtida na saída da linha de resfriamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de resfriamento foram de acordo com o projetado. No gráfico da Figura 9 são apresentadas as curvas de medição de temperatura no interior da placa (1/4 da espessura) e a 2 mm da superfície da mesma, em uma placa com 25 mm de espessura. Neste teste foram utilizados somente os *headers* superiores com uma vazão de 300 l/min, temperatura da água igual a 20°C, velocidade da mesa de 20 m/min e temperatura inicial de resfriamento de 800°C. Nestas condições foi obtida uma taxa de resfriamento de 8,6°C/s. Ainda, é possível verificar no gráfico a recuperação térmica que ocorre na superfície da placa de modo a igualar com a temperatura em seu interior.

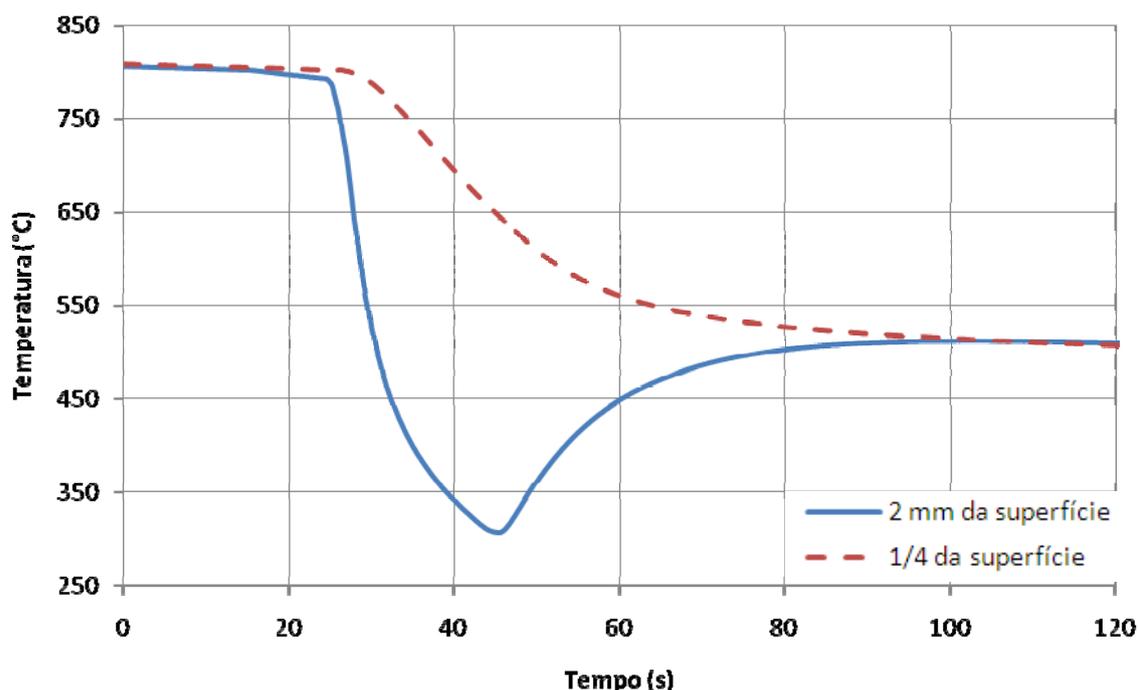


Figura 9. Gráfico de temperatura no interior da placa (1/4 da espessura) e a 2 mm da superfície.

Com relação ao controle, as Figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, as curvas nos *headers* superiores e inferiores durante o processo de sintonia do controle. Neste caso, as vazões foram ajustadas para 500 l/min nos *headers* superiores e 600 l/min nos inferiores e o tempo de estabilização em, aproximadamente, 25 segundos.

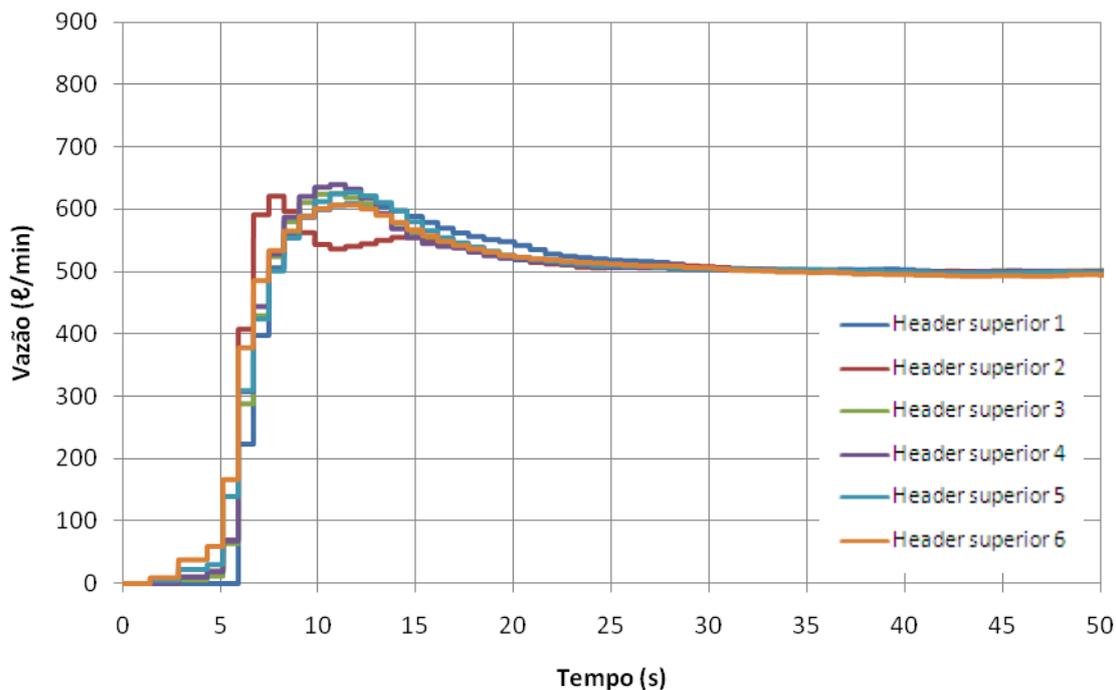


Figura 10. Gráfico das curvas de vazão dos *headers* superiores.

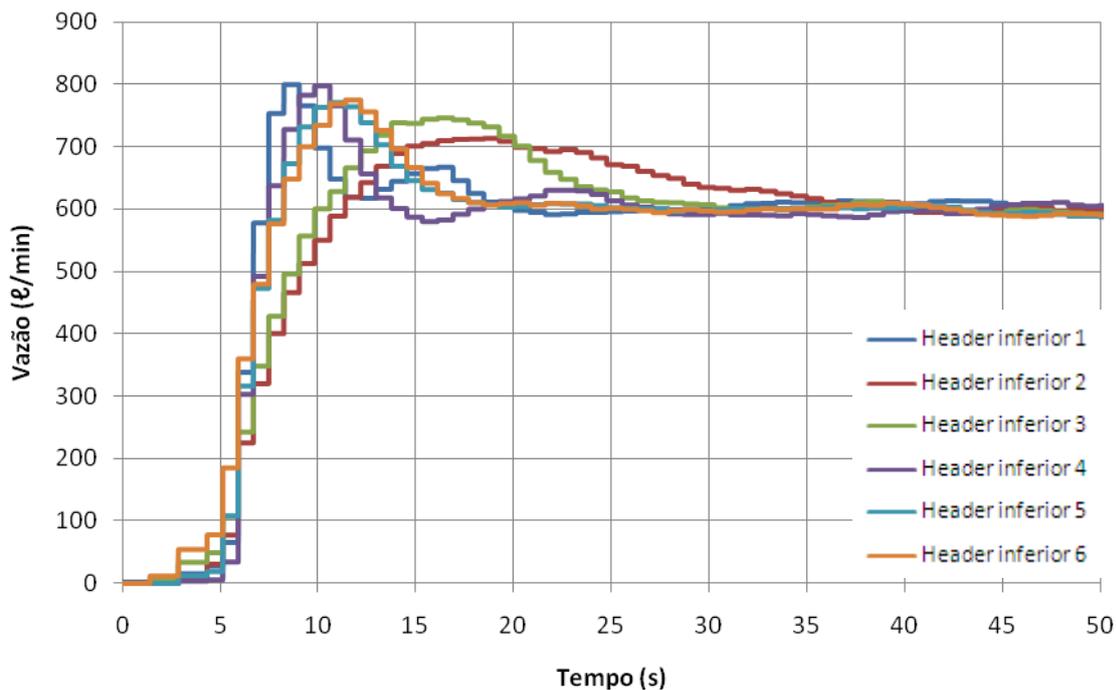


Figura 11. Gráfico das curvas de vazão dos headers inferiores.

A Figura 12 apresenta o conjunto de headers superiores e inferiores em operação durante o processo de resfriamento acelerado piloto.



Figura 12. Visão geral dos headers acionados durante o processo de resfriamento.

4 CONCLUSÕES

O resfriamento acelerado piloto passa a ser um equipamento que auxiliará no desenvolvimento de novos aços e de melhoria do processo industrial reduzindo custos e prazos.

Este sistema possibilita controlar taxas de resfriamento de 5°C/s a 60°C/s em placas de até 300 mm de largura, com espessuras de 20 mm a 40 mm e redução de temperatura de 900°C para 200°C.

O sistema é automatizado possuindo câmeras termográficas, modelo matemático, controle de vazão de água dos *headers*, possuindo controle das taxas de resfriamento e da temperatura inicial e final desejada.

Além das características físicas do equipamento, em razão de ter sido desenvolvido pela Usiminas, possibilita ao usuário efetuar diversas configurações de processamento, desde a alteração do tipo de bico de aplicação da água, bem como diferentes valores de temperatura, velocidade, distribuição do resfriamento, entre outros, possibilitando uma gama de variações e testes de acordo com a necessidade do usuário. Assim, será transferido para escala industrial após conhecido os parâmetros de processamento e realizados vários testes de funcionamento e análises dos materiais obtidos.

Como futuras etapas de desenvolvimento está a implementação de um sistema de redes neurais no controle do processo e a integração com o controlador do laminador piloto existente.

REFERÊNCIAS

- 1 BARBOSA, A., N., M., R.; Fundamentos da Laminação Controlada. Apostila do curso de graduação, 1989.
- 2 MUDDLE, B., C.; et al. Microstructure in controlled-rolled low-carbon microalloyed steels. In: CONFERENCE PROCEEDINGS FROM MATERIALS SOLUTIONS '97 ON ACCELERATED COOLING DIRECT QUENCHING OF STEELS, 1997, Indianapolis. Ohio: ASM International. 1997. 125-134.
- 3 LIN, M.; et al. Some fundamentals for the accelerated cooling of plate products. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STEEL FOR FABRICATED STRUCTURES, 1999, Cincinnati. Materials Park: ASM/AISI. 1999. p. 95-103.
- 4 GORNI, A., A.; SILVEIRA, J., H., D; Resfriamento acelerado de chapas grossas: O futuro chegou. Caderno Técnico da Revista Metalurgia e Materiais, 63:564, Março 2006, p. 103-105.
- 5 JÚNIOR, H., L.; Resfriamento de uma Placa de Aço à Alta Temperatura por Meio de um Jato d'Água Circular. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Julho de 2008.
- 6 JÚNIOR, H., L.; MAIA, G., A.; PASSOS, J., C.; Estudo experimental dos efeitos do resfriamento de um jato d'água circular em uma placa de aço aquecida. 44º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. ABM. 16 a 19 de outubro de 2007.
- 7 NATIONAL INSTRUMENTS. CompactRIO – National Instruments. Disponível em: <http://www.ni.com/compactrio>. Acesso em 01/03/2011:
- 8 MUNARO, C., J.; Projeto de Controlador PID. Apostila do curso de pós-graduação, 2006.