

## RESFRIAMENTO ACELERADO PILOTO<sup>1</sup>

Hormando Leocadio Júnior<sup>2</sup>

Ricardo Machado Cabral<sup>3</sup>

Marcelo Moreira Furst Gonçalves<sup>4</sup>

### Resumo

O desenvolvimento de novos produtos depende de um longo período de intensivas experiências na linha industrial, gerando altos custos no início de fornecimento destes produtos ao mercado. A simulação em escala piloto apresenta baixíssimo custo quando comparado ao processo em escala industrial. Para o desenvolvimento de aços submetidos ao resfriamento acelerado e o domínio desta tecnologia, a Usiminas concebeu, desenvolveu, projetou e instalou, em 2011, o Resfriamento Acelerado Piloto capaz de controlar as taxas de resfriamento de 5°C/s a 100°C/s em placas de até 300 mm de largura e 1.500 mm de comprimento, com espessuras de 10 mm a 40 mm e redução de temperatura de 900°C para 200°C. O sistema é totalmente automatizado possuindo controle de vazão de água dos 24 bancos superiores e inferiores, taxas de resfriamento, velocidade da mesa (0 a 60 m/min) e monitoramento da temperatura inicial e final, através de câmeras termográficas. Um modelo matemático *off line* permite simular computacionalmente as várias opções de taxa de resfriamento, na superfície e interior da placa, bem como pré-determinar o número de bancos ligados e suas respectivas vazões de água.

**Palavras-chave:** Simulação; Laminação a quente; Resfriamento acelerado piloto.

### ACCELERATED COOLING PILOT PLANT

### Abstract

The development of new products takes a long period of intensive experiences. This generates costs at the beginning of providing these products to the market. Accelerated Cooling in Pilot Scale has cost much lower than industrial scale. To develop steels subjected to accelerated cooling and mastering this technology, the Usiminas conceived, developed, project and the Accelerated Cooling Pilot, in 2011. The system is able of controlling cooling rates from 5 to 100°C/s in plates up to 300 mm wide and 1500 mm long, with thicknesses from 10 to 40 mm and a temperature reduction from 900 to 200°C. The system is totally automated having control of 24 top and 24 bottom water flow banks, cooling rates, run out table speed (0 to 60 m/min) and initial and final temperature monitoring by thermographic cameras. It has also a mathematic model off-line that enables predicting several options of cooling rates (at surface and inner of plate) and how many water banks must be on and its respectively water flow rates.

**Keywords:** Simulation; Hot rolling mill; Accelerated cooling pilot.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico (M.Sc), Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico (M.Sc), Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Engenheiro Eletrônico, Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

## 1 INTRODUÇÃO

Simulação de resfriamento acelerado em escala piloto permite o domínio da tecnologia resfriamento acelerado, tanto na fase anterior quanto posterior à implantação industrial, e o desenvolvimento de novos produtos.

Dentro do plano de modernização e expansão da Usiminas, na área de laminação de chapas grossas, em 2010 foi inaugurado um sistema industrial de resfriamento acelerado na Linha de Laminação de Chapas Grossas da Usina de Ipatinga. Este processo permite ampliar a gama de produtos Chapas Grossas oferecidos ao mercado, com a fabricação de aços mais nobres, tais como: aço API de grau mais elevado e aços com resistência a trincas induzidas por hidrogênio (HIC), para a fabricação de tubos que atendam as difíceis condições de extração de petróleo do Pré-Sal em grandes profundidades. Além disso, aços processados no resfriamento acelerado podem ser produzidos com composições químicas mais leves do que os aços produzidos atualmente, trazendo como benefícios a redução de custo de elementos de liga na aciaria e melhores características de soldabilidade.

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.<sup>(1-3)</sup> 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. Na Figura 1 podem ser vistas diferentes microestruturas obtidas a partir da variação da taxa de resfriamento aplicada ao material em processamento.

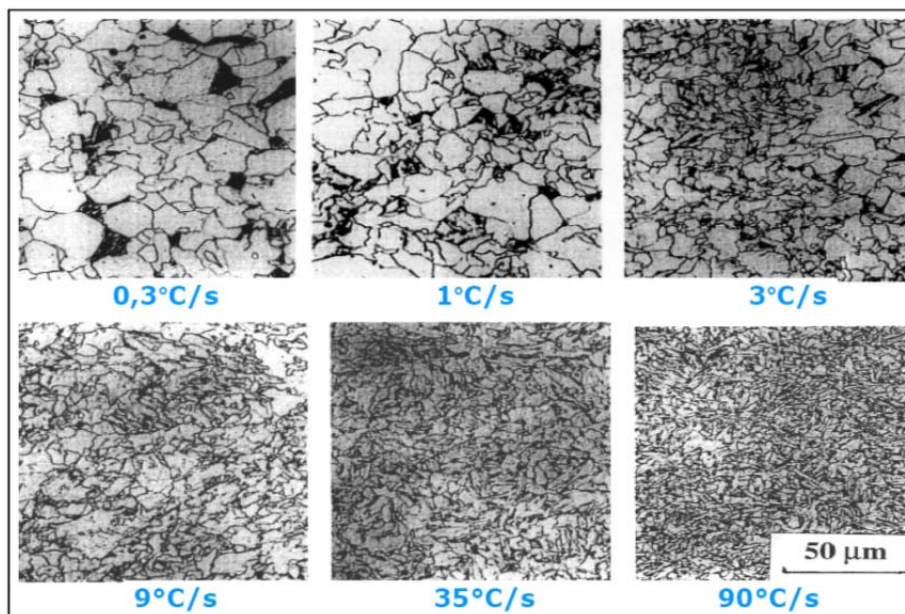


Figura 1 – Microestruturas obtidas a partir de diferentes taxas de resfriamento - Aço 0,04C-1,64Mn-0,029Nb-0,015Ti.<sup>(1)</sup>

O desenvolvimento de produtos, em cada usina particularmente, depende de um longo período de intensivas experiências na linha industrial, gerando altos custos no início de fornecimento destes produtos ao mercado. A simulação em escala piloto apresenta baixíssimo custo quando comparado ao processo em escala industrial.<sup>(4)</sup> Uma ferramenta muito importante para auxílio no desenvolvimento do processo industrial de resfriamento acelerado é a simulação em escala piloto deste processo. Dispondo-se de uma linha piloto de laminação e resfriamento acelerado, podem ser realizados testes, com baixo custo.

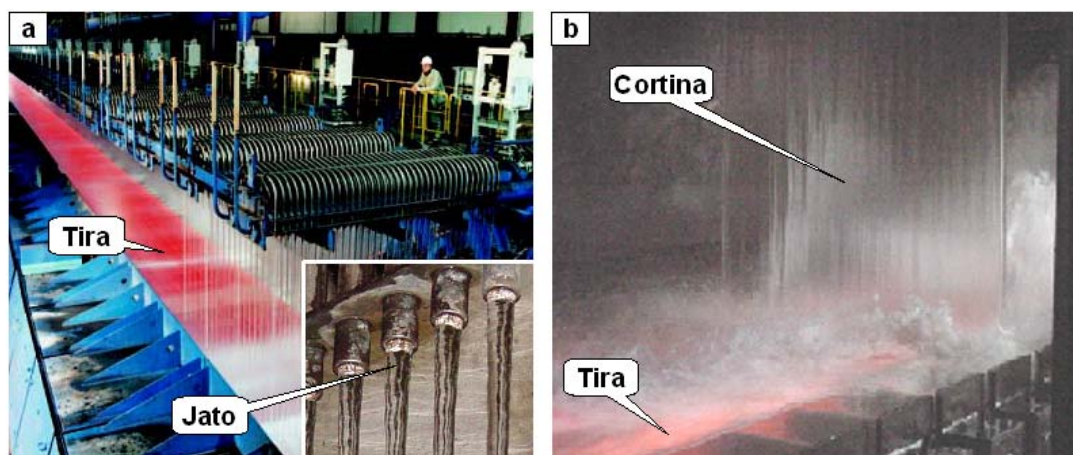
Este trabalho apresenta o primeiro Sistema de Resfriamento Acelerado Piloto da América Latina, o qual foi 100% desenvolvido pelo Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico da Usiminas, desde a concepção, projeto e fabricação. Este sistema foi inaugurado em 2011 e está instalado no Centro de Tecnologia Usiminas. Sistema de Resfriamento Acelerado Piloto possibilita o desenvolvimento de aços de alta e ultra-alta resistência mecânica e resistentes a trincas induzidas por hidrogênio (HIC). Composições químicas com menores teores de carbono e elementos de liga em relação aos aços produzidos de forma convencional, o que resulta em melhoria da soldabilidade, tenacidade e conformabilidade, além de realizar têmpera direta após laminação a quente.

## 2 MATERIAL E MÉTODO

A microestrutura e as propriedades mecânicas do aço depende do controle da taxa de resfriamento na mesa de saída do laminador. O sistema de resfriamento deveria ser capaz de promover um resfriamento uniforme e simétrico, entre a superfície superior e inferior da chapa, possuir flexibilidade para ajustar a taxa de resfriamento durante o processamento com os seguintes parâmetros: a) Temperatura inicial e final 900°C a 200°C; b) Taxa de Resfriamento de 10°C/s a 40°C/s; c) Dimensões da chapa: 800 a 1.500 mm X 220 mm X 10 a 40 mm. Entretanto, a transferência de calor e os fenômenos metalúrgicos, associados ao processo de resfriamento, são complexos, o que dificulta o acerto da temperatura final em um sistema de controle. Isto inclui condução de calor, convecção forçada monofásica, ebulição nucleada, filme de vapor, convecção natural para o ambiente, radiação e a geração de calor na mudança de fase do material. A determinação dos coeficientes de transferência de calor é fundamental para o controle eficaz da temperatura da chapa e dimensionamento de um sistema de resfriamento.<sup>(5-7)</sup>

### 2.1 Transferência de Calor em Jatos d'Água Incidentes

Jatos d'água livres incidentes são utilizados como um eficiente meio de controle de resfriamento de aços laminadas a quente, devido ao elevado fluxo de calor extraído com o uso de equipamentos relativamente simples. Os jatos livres mais comuns são tipo circular e cortina (Figura 2).



**Figura 2.** Sistemas de resfriamento da tira laminada a quente por fluxo laminar d'água: (a) Tubo-U (jato circular), instalado na usina de Cherepovezt, Rússia, em 2003, e (b) Cortina d'água (jato planar), instalado na Usiminas, Brasil, em 1990.<sup>(5)</sup>



Por apresentarem menor custo de fabricação e manutenção, os jatos circulares foram escolhidos.

Com auxílio de um aparato experimental, montado no Centro de Tecnologia da Usiminas, foi realizado um estudo experimental e numérico dos efeitos do resfriamento por um jato d'água circular subresfriado em uma placa de aço a elevadas temperaturas (600°C a 900°C) (Figura 3).

As características térmicas foram examinadas por meio de curvas de resfriamento, em função das diferentes condições de teste. Foi realizada uma análise numérica, usando o método inverso da condução de calor transiente, que calcula os fluxos de calor e o histórico de temperaturas na superfície de impacto do jato d'água, a partir das temperaturas medidas por termopares inseridos em placas quadradas de aço inoxidável. Os fluxos e coeficientes de transferência de calor foram comparados com os resultados e as correlações existentes na literatura.

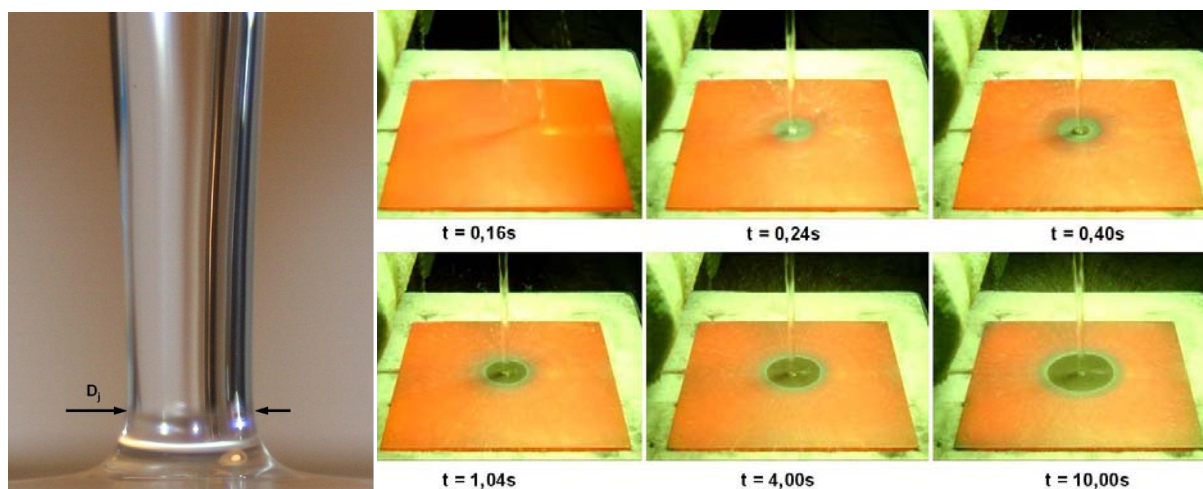
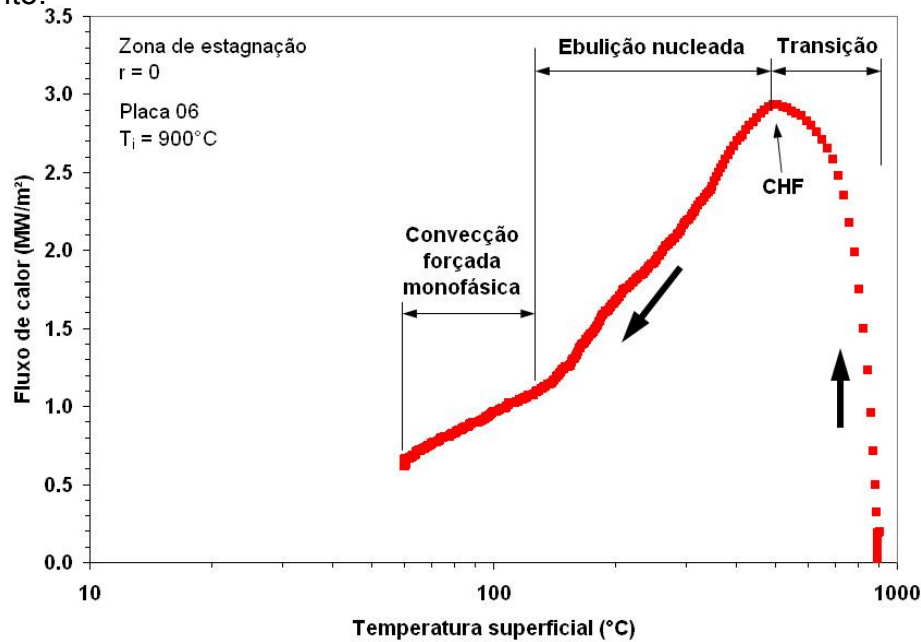


Figura 3 – A esquerda, a fotografia do jato d'água sobre a superfície plana onde  $D_j$  é o menor diâmetro antes de atingir a superfície. À direita, Fotografias do processo de resfriamento da placa com temperatura inicial de 900°C.

Para dimensionar o sistema de resfriamento e desenvolver o modelo matemático é necessário conhecer a capacidade que um jato d'água possui em retirar calor de uma placa a uma dada temperatura. Assim, a Figura 4 mostra uma das curvas levantadas de fluxo de calor em função da temperatura superficial na zona de impacto do jato a 22°C, sobre uma placa a 900°C (Figura 3). Esta curva foi obtida através do cálculo inverso da condução de calor. A curva mostra que ocorrem três regimes de transferência de calor: convecção forçada monofásica, ebulição nucleada e regime de transição. O fluxo crítico de calor (CHF) de 3,0 MW/m<sup>2</sup> ocorre próximo da temperatura superficial de 500°C. Esta temperatura está muito acima da temperatura de 130°C e o valor do CHF é três vezes maior do que o encontrado para água saturada. Estes resultados mostram a alta eficiência dos jatos incidentes em retirar calor. Wang et al.<sup>(8)</sup> recentemente realizou experimentos similares chegando aos mesmos resultados.

O dimensionamento e arranjo dos tubos foram realizados pelo Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico da Usiminas. Como o arranjo dos tubos afeta a eficiência e uniformidade do resfriamento, foram 37 testes de performance do arranjo escolhido em diferentes temperaturas de placa de teste, velocidades de mesa, vazão de água e diâmetros dos tubos, na face superior e inferior, conforme mostrado na Figura 5. Os testes foram realizados na Universidade de Brno, República Tcheca.

A Figura 6 mostra o resultado dos testes do arranjo dos jatos com a placa em movimento. Com medição de temperatura a 0,6 mm, 3 mm e 10 mm da superfície de resfriamento.



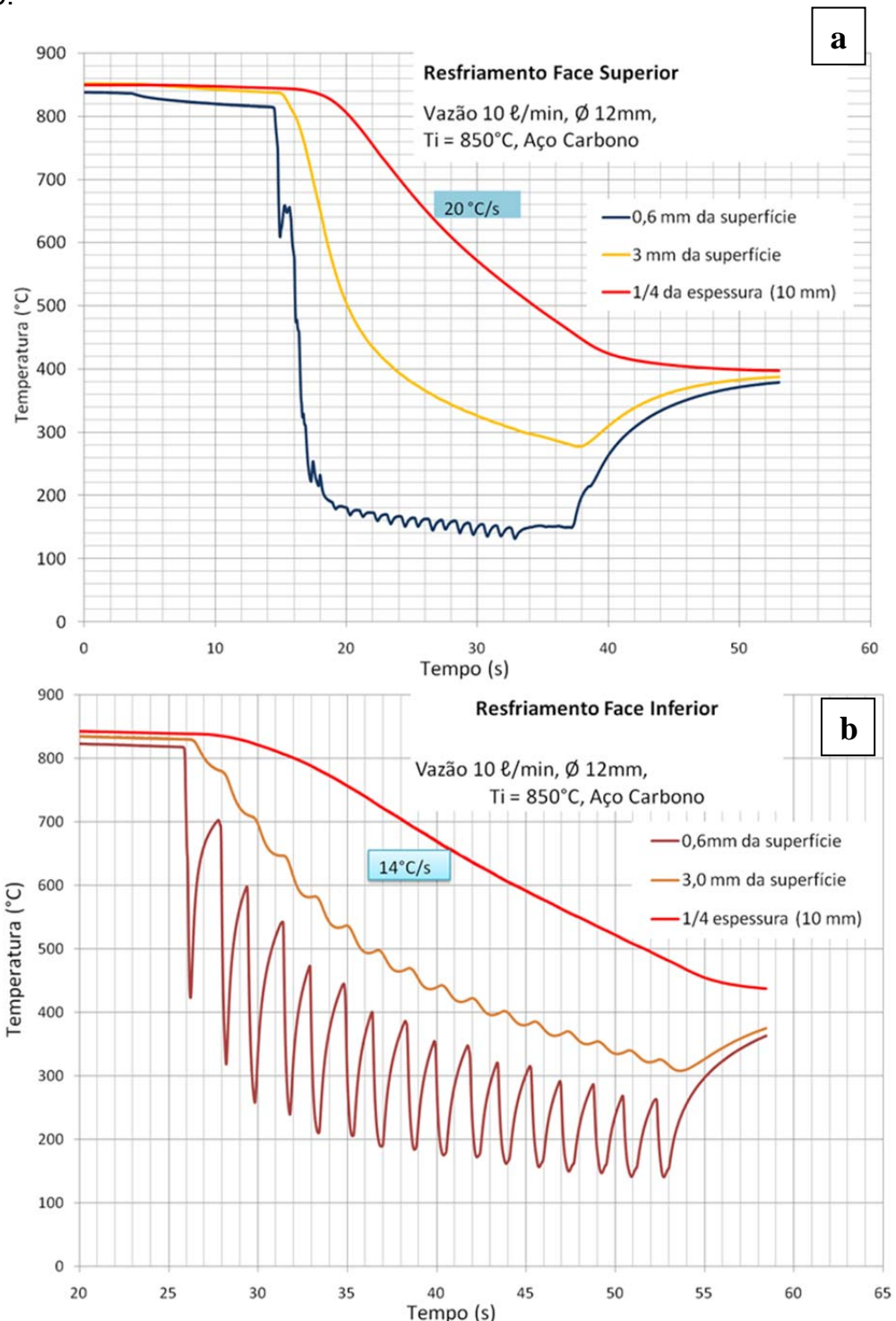
**Figura 4** – Fluxo de calor na superfície em função da temperatura superficial,  $T_i = 900^\circ\text{C}$ , na zona de estagnação.



**Figura 5** – Testes de performance do arranjo dos jatos, com a placa em movimento, em diferentes temperaturas de placa, velocidades de mesa, vazão de água e diâmetros dos tubos, na face superior e inferior.

A eficiência do resfriamento de  $20^\circ\text{C/s}$  é maior na face superior (Figura 6a) do que na inferior com  $14^\circ\text{C/s}$  (Figura 6b) nas mesmas condições de teste. Isto ocorre devido a permanência da água na superfície superior, o que eleva o fluxo de calor. Na FIGURA 6b, a temperatura próxima a superfície (0,6 mm) é rapidamente recuperada após passar pelo arranjo de jatos. A água cai após o impacto com a superfície, devido à ação da gravidade. A ausência de água reduz o fluxo de calor e o regime de transferência de calor se dá por radiação e convecção para o ambiente, regime este muito inferior ao de ebulição, provocado pela água remanescente na superfície superior da placa.

A curva de resfriamento na posição de medição a 1/4 da espessura (10 mm) não apresenta recuperação de temperatura após o final do processo de resfriamento, o que demonstra ser o melhor local a ser considerado para avaliação da taxa de resfriamento.



**Figura 6** –Comparação entre as taxas de resfriamento nas faces (a) superior e (b) inferior nas mesmas condições de teste. A eficiência de resfriamento é maior na face superior nas mesmas condições de teste.

## 2.2 Projeto e Instalação do Sistema

Foi concebido um fluxograma de processo e instrumentação a partir do qual o sistema foi projetado, conforme mostra a Figura 7.





**Figura 8** – Projeto em 3D do sistema de resfriamento na linha de laminação piloto existente no Centro Tecnológico da Usiminas.

O equipamento de resfriamento acelerado piloto é composto por:

- bancos de resfriamento 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;
- câmeras termográficas; e
- sensores óticos de posicionamento.

A Figura 9 apresenta uma vista do equipamento de resfriamento acelerado piloto instalado no Centro de Tecnologia da Usiminas.



**Figura 9** – Visão geral do resfriamento acelerado piloto instalado no Centro de Tecnologia.

A Figura 10 mostra o sistema em funcionamento onde todos os bancos estão ligados.



Figura 10- Visão geral com todos os bancos em funcionamento.

## 2.2 Modelo Matemático

O modelo matemático desenvolvido no Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico determina o número de bancos ligados, velocidade da mesa e vazão de cada banco a fim de garantir que a placa atinja a temperatura final e a taxa de resfriamento desejadas.

Para tanto, o modelo solicita como dados de entrada a temperatura de entrada e de saída desejadas, a espessura da placa, a taxa de resfriamento a ser aplicada, a temperatura da água e o tipo de aço a ser processado, conforme mostrado na Figura 11. O modelo mostrará como dado de saída a taxa de resfriamento possível e as curvas de resfriamento ao longo do processo nas superfícies superior e inferior da placa e no interior da placa na posição de 1/4 da espessura. No desenvolvimento do modelo foram utilizadas como condições de contorno os fluxos de calor mostrados na Figura 4 e resultantes dos testes mostrados na Figura 5.

## 2.3 Automação e Controle

O sistema de automação e controle desenvolvido pelo Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico tem a função de ajustar e controlar as vazões nos bancos e velocidade da mesa, predefinidas no modelo matemático, necessárias para garantir a taxa de resfriamento desejada, bem como monitorar os valores das variáveis envolvidas e liberar o sistema para início do processo de resfriamento. A FIGURA 11 apresenta a tela principal do sistema de controle.

Nesta tela o usuário ajusta as vazões para cada um dos bancos [1], verifica o nível e a temperatura da água no tanque principal [2], a temperatura da água no primeiro e último banco [3 e 4], as temperaturas de entrada e saída da placa obtidas pelas câmeras [3 e 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].



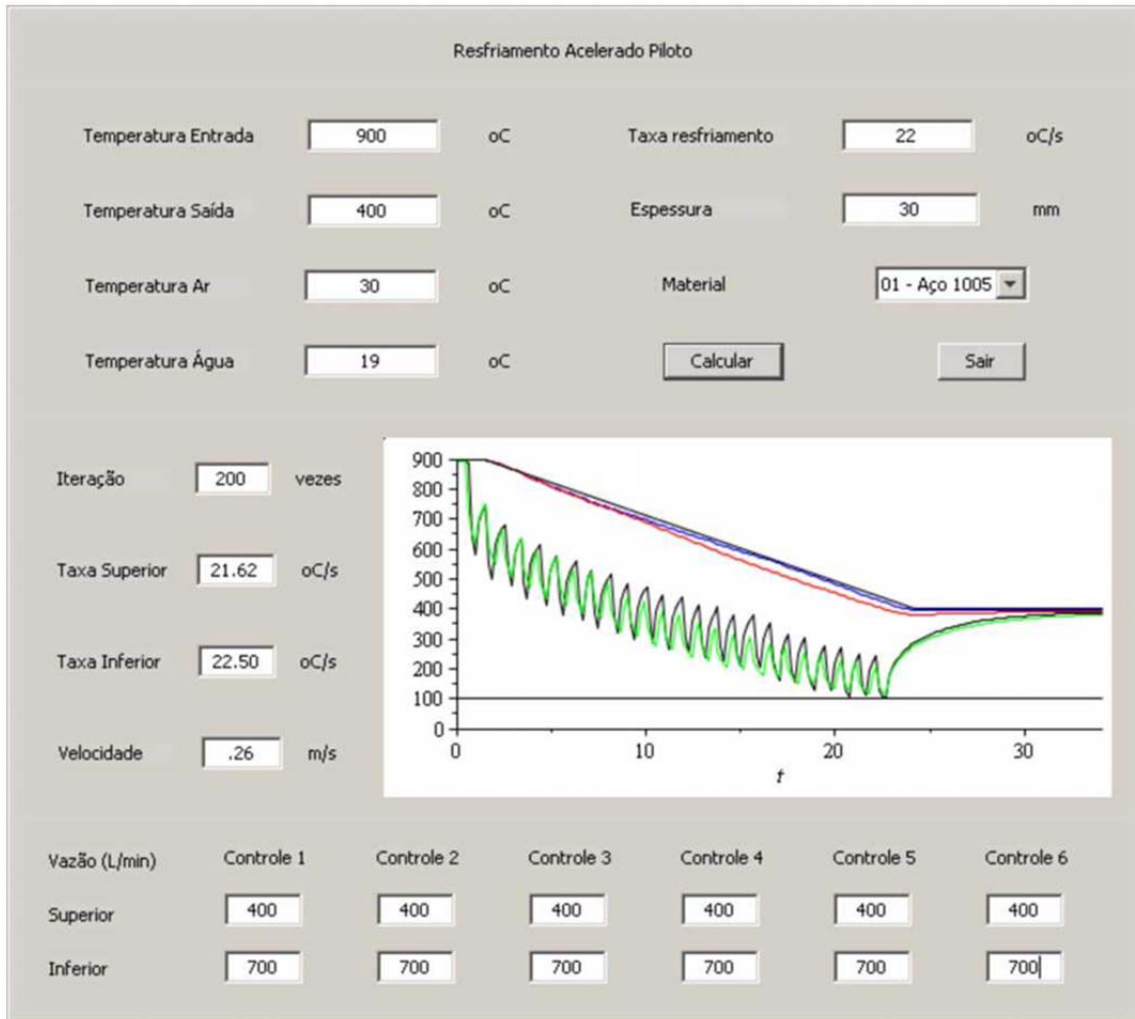


Figura 11 -.Tela do modelo matemático mostrando os dados de entrada e saída e as curvas de resfriamento.

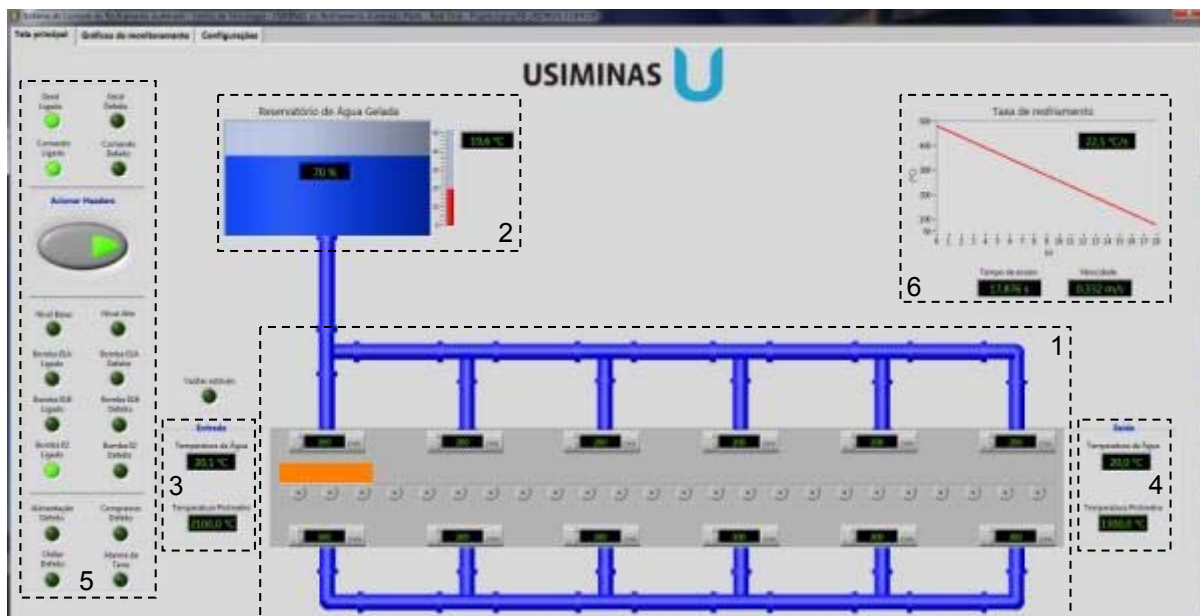
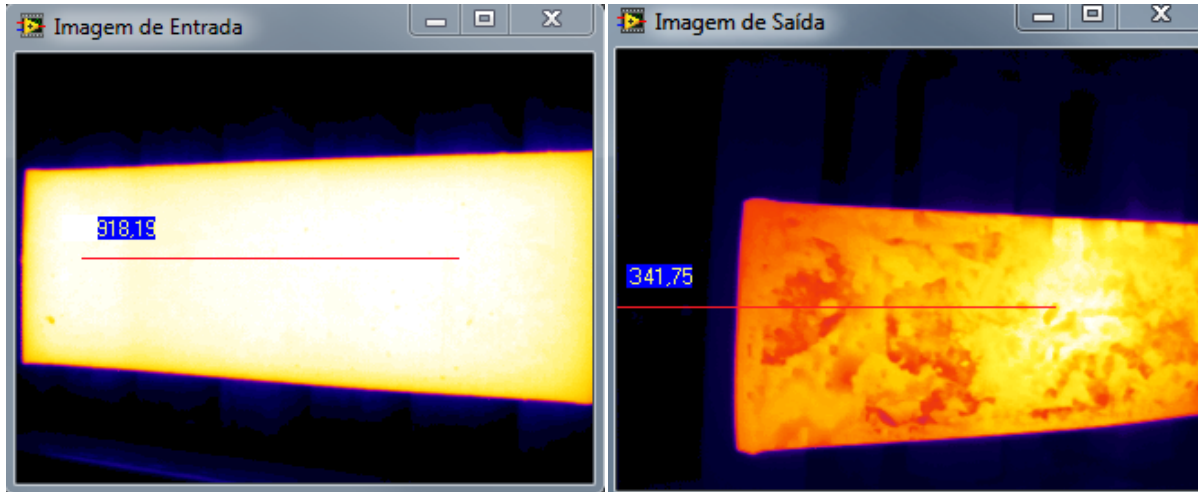


Figura 12. Tela principal do sistema de controle do Resfriamento Acelerado Piloto.

A fim de possibilitar medições de temperaturas coerentes e que não sejam impactadas por pontos com diferentes níveis de emissividade, devido a 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 usado no cálculo da taxa de resfriamento atingida. A Figura 7 apresenta a Imagem termográfica da placa antes de entrar (918°C) e depois (341°C) de sair da zona de resfriamento.



**Figura 13-** Imagem termográfica da placa antes de entrar e depois de sair da zona de resfriamento.

A temperatura de superfície na saída é menor do que a registrada internamente, conforme mostrado na Figura 5. O tempo necessário para homogeneização da temperatura é informado pelo modelo matemático (Figura 11).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 Tabela 1 são apresentados os dados técnicos do resfriamento acelerado piloto construído no Centro de Tecnologia Usiminas. Os valores de taxa de resfriamento e largura máxima da placa superam os valores solicitados na especificação.

Foram realizados diversos testes no sistema de resfriamento piloto. Os testes a quente consistiram em realizar o resfriamento de placas aquecidas de diversas espessuras instrumentadas. Verificou-se a repetibilidade do processo e que o sistema de resfriamento instalado é capaz de realizar um resfriamento homogêneo em ambas as faces da placa e garantir a mesma taxa de resfriamento em ambas as faces, conforme mostrado na Figura 14.

Tabela 1 – Dados técnicos do resfriamento acelerado piloto construído

<i>Comprimento da mesa de resfriamento</i>	6 m
<i>Largura máxima da placa</i>	300 mm
<i>Comprimento máximo da placa</i>	2000 mm
<i>Vazão de água máxima</i>	720 m <sup>3</sup> /h
<i>Velocidade da mesa</i>	0 a 2 m/s
<i>Espessura da placa</i>	10 a 40 mm
<i>Taxa de resfriamento</i>	5 a 100°C/s
<i>Monitoramento</i>	Pirômetros câmeras termográficas/ entrada e saída sensores laser de presença

As curvas de resfriamento obtidas durante o resfriamento de uma placa de aço carbono de 40 mm de espessura, com termopares a 1,5 mm da superfície superior e

inferior e a 1/4 da espessura superior e inferior. Todos os 24 bancos estavam ligados e a taxa de resfriamento de 10°C/s a 1/4 da espessura.

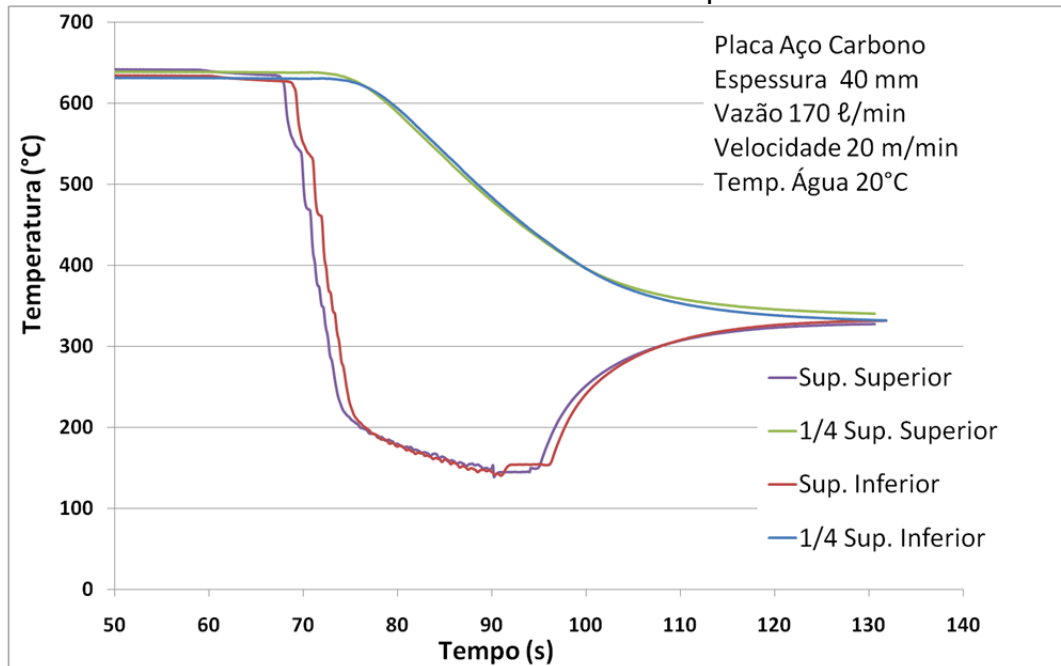


Figura 14 – Curva de resfriamento em uma placa de 40 mm com vazão de 170 l/min em quatro posições ao longo da espessura da placa, com taxa de resfriamento de 10°C/s a 1/4 da espessura.

Nas Figuras 15 e 16 é mostrado a sequência de laminação e resfriamento de uma placa, com espessura final de 20 mm, comprimento final de 2.000 mm e taxa de resfriamento de 8°C/s. A planicidade se manteve após a mesma ser submetida ao processo de resfriamento, conforme é mostrado na Figura 16b, provando que o sistema é capaz de prover um resfriamento homogêneo em ambas às faces. Esta placa apresentou um comprimento final de 2000 mm, ou seja, 500 mm a mais do solicitado na especificação.

A Figura 16a mostra a placa submetida ao resfriamento em uma sequência alternada de um banco ligado e três desligados. Isto é feito a fim de reduzir a taxa de resfriamento.

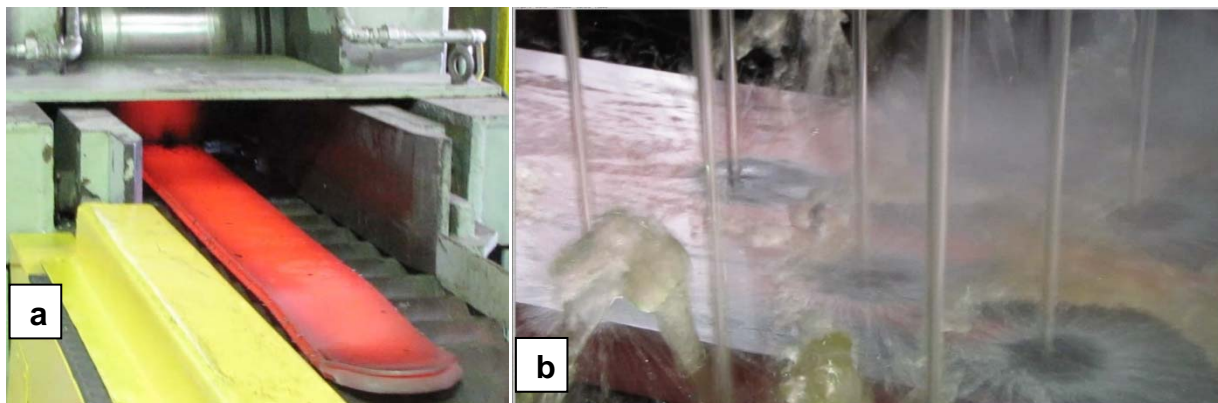


Figura 15 – (a) Espessura de 20 mm e comprimento de 2.000 mm, após a laminação. (b) Início de processo de resfriamento da placa, onde a zona escura é formada instantaneamente após o jato d'água tocar a superfície superaquecida.





Figura 16 – (a) Placa submetida ao resfriamento alternado dos headers e (b) Placa com a planicidade inicia mantida. Mostrando a uniformidade do resfriamento nas faces superior e inferior.

## 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 de produção em escala industrial. O sistema apresentou resultados acima do especificado. Esperavam-se taxas de resfriamento de  $10^{\circ}\text{C/s}$  a  $40^{\circ}\text{C/s}$  e será possível de  $5^{\circ}\text{C/s}$  a  $100^{\circ}\text{C/s}$ . Foi solicitada uma largura de placa de 220 mm, sendo possível 300 mm. O comprimento máximo especificado era de 1.500 mm e o sistema é capaz de 2.000 mm, com redução de temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$  para  $200^{\circ}\text{C}$ . Os valores de taxas de resfriamento aplicados no resfriamento acelerado piloto poderão ser transplantados para a linha industrial.

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.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- 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.
- GORNI, A., A.; SILVEIRA, J., H., D; Resfriamento acelerado de chapas grossas: O futuro chegou. Caderno Técnico Revista Metalurgia e Materiais, 63:564, Mar. 2006, p. 103-5.
- BARBOSA, A., N., M., R.; Fundamentos da Laminação Controlada, 1989.
- LEOCADIO, 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, 2008.
- LEOCADIO, H., L.; et al. 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, 2007.
- LEOCADIO, H., L.; et al., Heat transfer behavior of a high temperature steel plate cooled by a subcooled impinging circular water jet. In: 7<sup>th</sup> ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, Brazil, pp. 3–7, 2009.
- WANG, H.; et al., Experimental study of heat transfer coefficient on hot steel plate during water jet impingement cooling, Journal of Materials Processing Technology, vol. 212, pp1825-1831, 2012.