

TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE O RESFRIAMENTO DE UMA PLACA DE AÇO A ALTA TEMPERATURA POR UM JATO D'ÁGUA CIRCULAR¹

Hormando Leocádio Júnior²

Júlio César Passos³

Resumo

Este artigo apresenta um estudo experimental e numérico dos efeitos do resfriamento de um jato d'água circular sobre uma placa de aço a elevadas temperaturas (600 a 900°C). Os efeitos da temperatura superficial sobre os regimes de transferência de calor foram analisados. Foi realizada uma análise numérica, usando o método inverso da condução de calor transiente, para calcular o fluxo de calor e a temperatura na superfície de incidência do jato d'água, a partir das temperaturas medidas internamente na placa. O histórico de temperaturas, durante o processo de resfriamento, foi medido através de termopares inseridos na placa. As análises dos resultados mostraram que, na zona de incidência do jato, a água está em contato direto com a superfície do metal. Não há formação da película de vapor, apesar da temperatura da superfície (600 a 900°C) exceder, em muito, a temperatura de ebulição da água e o regime de transferência de calor não ser monofásico. Os resultados obtidos contribuem para um melhor entendimento dos modos de transferência de calor envolvidos durante o resfriamento de aço plano.

Palavras-chave: Resfriamento por jato d'água; Placa de aço a alta temperatura; Transferência de calor; Método inverso de condução de calor.

HEAT TRANSFER DURING COOLING OF A HIGH TEMPERATURE STEEL PLATE BY A CIRCULAR WATER JET

Abstract

This paper presents an experimental and numerical study of the effects heat transfer during cooling of a high temperature steel plate (600 to 900°C) by a circular water jet. The effects of the surface temperature on the heat transfer regimes were analyzed. Numerical analysis using The inverse heat conduction method was used to calculate the heat flux on the impinging surface from the measured temperatures by thermocouples inserted in square steel plates. The results had showed that, in the impingement zone, the water will be in direct contact with the surface, even the surface temperature (600 to 900°C) exceeds the boiling temperature and the heat transfer regime is also not monophase. The results will contribute to the optimization of cooling systems for hot strip mill and to a better understanding of the heat transfer regimes during a hot steel plate cooling at high temperatures.

Key words: Cooling by water Jet; Hot steel plate; Heat transfer; Inverse heat conduction method.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *M. Eng., Gerência de Engenharia de Manutenção, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil, hjunior@usiminas.com.br*

³ *Dr. Eng., Departamento de Engenharia Mecânica, LEPTEN/Boiling, Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, jpassos@emc.ufsc.br*

1 INTRODUÇÃO

Em geral, os jatos d'água são usados como um eficiente sistema de resfriamento para placas de aço aquecidas por extrair altas taxas de calor.⁽¹⁾ O controle da temperatura dos aços laminados a quente na mesa de saída do laminador associadas às suas características químicas e com taxas de resfriamento adequadas permitem obter as propriedades mecânicas dos aços. Em laminadores de tiras a quente, normalmente, as temperaturas de acabamento e de bobinamento estão entre 950°C e 510°C, respectivamente, com velocidade próxima a 10 m/s. O resfriamento de tiras laminadas a quente é um processo transiente de transferência de calor, no qual a temperatura interna e o calor específico do aço variam com o tempo.⁽²⁾ Os mecanismos de transferência de calor envolvidos durante o processo de resfriamento de aço plano não são completamente entendidos, visto que envolvem convecção forçada, mudança de fase, radiação e convecção para o ambiente numa mesma região de resfriamento onde as taxas de fluxo de calor são quase independentes do movimento da superfície, mas aumentam com a temperatura superficial.⁽³⁾ A curva típica de ebulição em vaso, para água saturada à pressão de 1 atm, é mostrada na Figura 1.-a. O grau de superaquecimento da superfície, ΔT_{sat} , é a diferença entre as temperaturas de superfície e saturação da água, T_s e T_{sat} , respectivamente.

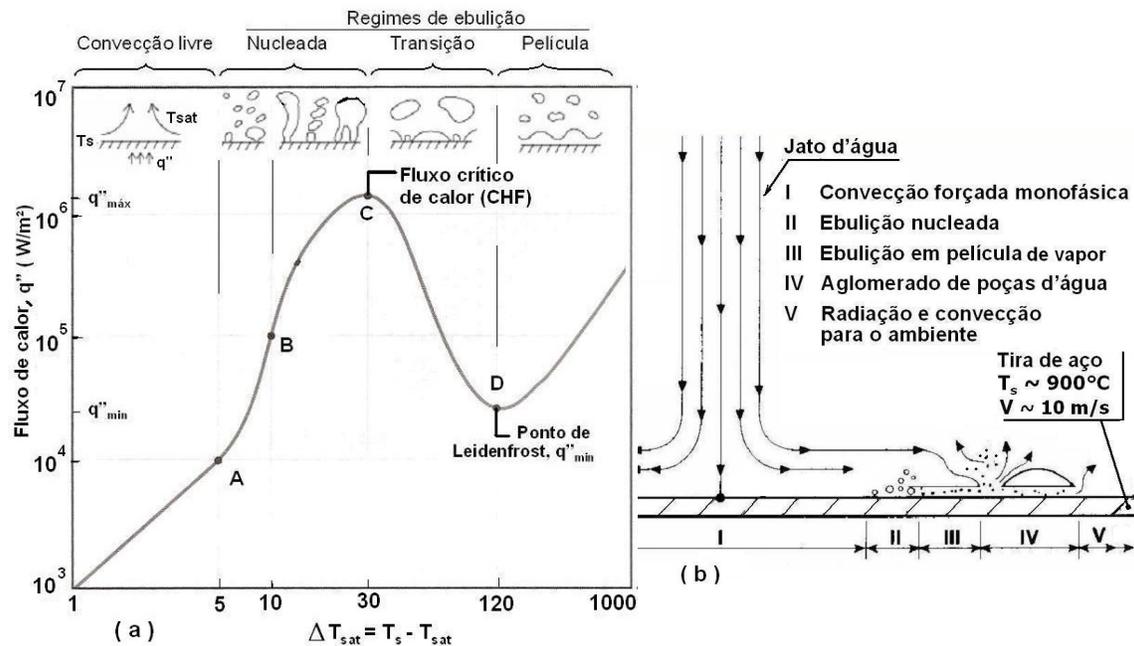


Figura 1. (a) Curva típica de ebulição em vaso para água saturada a 1 atm (Adaptado de Incropera e De Witt⁽⁴⁾) e (b) regimes adjacentes ao jato incidente sobre a tira durante seu resfriamento na mesa de saída do laminador.⁽⁵⁾

Até $\Delta T_{sat} \approx 5^\circ\text{C}$, a transferência de calor ocorre por convecção monofásica. O fluxo de calor cresce e o superaquecimento aumenta e inicia-se da ebulição nucleada, ponto A, com jatos e colunas de vapor no trecho B-C. O fluxo de calor crítico (CHF), no ponto C, é onde as bolhas de vapor dificultam o contato do líquido com superfície aquecida, reduzindo fortemente o resfriamento nesta região. A transição (trecho C-D) é caracterizada por uma camada intermitente de vapor instável sobre a superfície. À medida que ΔT_{sat} aumenta, o fluxo de calor diminui.

Uma película ondulada contínua de vapor sobre a superfície que surge a partir do ponto D ($\Delta T_{\text{sat}} \approx 120^\circ\text{C}$), onde o fluxo de calor é mínimo (q''_{min}) e referido como ponto de Leidenfrost.

Os autores divergem quanto ao regime de transferência de calor que ocorre na zona de incidência do jato d'água durante o resfriamento do aço plano laminado. Segundo Prieto e Menendez⁽⁶⁾ a região de impacto do jato o regime é de convecção forçada monofásico, mesmo com temperaturas de superfície $600^\circ\text{C} < T_s < 900^\circ\text{C}$ e não explicaram como avaliam as propriedades da água a 1 atm em temperaturas superficiais de até 900°C . Para Viskanta e Bergman⁽⁷⁾ e Timm et al.⁽³⁾ o regime é de transição devido a elevada taxa de fluxo de calor e temperatura superficial. A partir de suas observações visuais, Zumbrennen et al.⁽⁵⁾, descreveram, na Figura 1.-b, os regimes que ocorrem durante o resfriamento de uma tira de aço. Na zona I, onde ocorre o impacto do jato d'água, a transferência de calor ocorre por convecção forçada monofásica, e a temperatura de superfície está abaixo da temperatura de ebulição da água. Na zona II tem-se o regime de ebulição nucleada, em uma faixa estreita. Na zona III, ocorre ebulição em película de vapor. Uma vez formada a película de vapor, observa-se em seguida um estado desordenado sobre a superfície quente da placa, mostrado na zona IV.

Ochi et al.⁽⁸⁾ e Leocádio⁽⁹⁾ et al. mostraram que o subresfriamento (ΔT_{sub}), diferença entre as temperaturas de saturação (T_{sat}) e do jato d'água (T_j), afeta fortemente o fluxo de calor e evita a formação da película na zona de incidência do jato. Resultados publicados por diferentes autores^(11,12) mostram divergências entre os valores de coeficientes de transferência de calor.

Com o propósito de melhor entendimento dos regimes que ocorrem durante o resfriamento de uma placa a alta temperatura e aço plano laminado, apresentam-se os resultados devido a um jato d'água circular incidindo em uma placa de aço aquecida a 600°C , 750°C e 900°C . Envolve a análise das temperaturas medidas em quatro pontos alinhados dentro da placa, com a mesma profundidade: um central e os demais equidistantes a partir do centro. Utilizando-se as temperaturas medidas, foi desenvolvido um modelo 2D axissimétrico em elementos finitos, baseado no método inverso de condução de calor transiente. Com a sua aplicação foram calculados os fluxos de calor e as temperaturas na superfície de impacto do jato d'água.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aparato Experimental

A Figura 2 mostra o esboço do aparato experimental instalado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas. O líquido refrigerante é água armazenada em um tanque (16), com pressão equivalente à 0,7 bar, permitindo um jato laminar na saída (13) do Tubo-U (14) (raio de curvatura de 70 mm), com diâmetro interno de 10 mm. O motivo para o uso do tubo-U é que a água na saída do bocal estará estável e livre de ar e, também, para ser compatível com aqueles usados na mesa de saída do laminador. O tubo de extravasamento de água (1) tem a função de manter constante o nível da água na caixa, assegurando uma pressão constante no tubo-U. Uma placa do aço inoxidável (9) foi aquecida em um forno elétrico com potência de 75 kW e capacidade de aquecer até 1.300°C . O material das placas quadradas, de 150 mm e 200 mm por 14 mm e 10 mm de espessura, respectivamente, é o AISI 304 (Tabela 1). O sistema de aquisição de dados (7)

permitiu realizar 10 leituras por segundo.

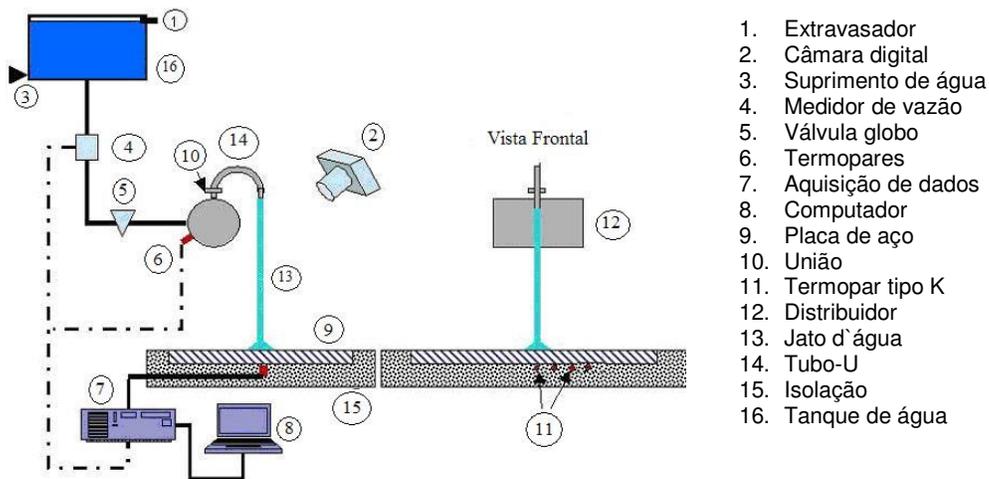


Figura 2. Desenho esquemático do aparato experimental.

Foi usada a vazão, Q_w , de 6 l/min, com $\pm 0,25\%$ de incerteza, obtidas através do medidor de vazão (4) e temperatura da água de 22 °C.

Tabela 1 - Propriedades Termofísicas do Aço AISI 304⁽⁴⁾

T(°C)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	k(W/mK)
127	515	7859	16.6
327	557	7774	19.8
527	582	7685	22.6
727	611	7582	25.4
927	640	7521	28.0

2.2 Procedimento Experimental

O histórico de temperaturas da placa durante o processo de resfriamento foi medido com quatro termopares inseridos na placa. Os termopares tipo K com diâmetro de 1,5 mm foram montados alinhados em distâncias r de 0 mm, 15 mm, 35 mm e 55 mm (placa de 150 mm) e 0 mm, 15 mm, 35 mm, 55 mm e 75 mm (placa de 200 mm) do ponto central e a uma altura y de 10 mm e 6 mm, respectivamente, a partir do fundo das placas. As mesmas foram aquecidas no forno antes de serem transferidas à posição de teste. O início do processo de resfriamento pelo jato d'água se deu às temperaturas de teste (T_i) de 600 °C, 750 °C e 900 °C. A altura da saída do jato d'água superior à placa de teste, H , foi ajustada em 300 mm. A temperatura da água era 22 °C, medida por meio de um termopar tipo K no distribuidor (12). A temperatura ambiente foi considerada constante a 25 °C. Nas demais faces, sem incidência do jato, foram isoladas termicamente. Uma câmera digital foi empregada na captura das imagens durante o processo de resfriamento com uma taxa de 13 fotografias por segundo. O diâmetro do jato incidente, D_j , é menor que o do jato na saída do bocal, D_n , conforme mostra a fotografia do jato d'água na Figura 3-a. O diâmetro do jato d'água diminui à medida que se aproxima da superfície de incidência, para um jato d'água com vazão de 6 l/min, saindo do bocal $D_n = 10$ mm a altura $H = 300$ mm. Dentro da zona de estagnação (zona de incidência) atuam a pressão e a velocidade vertical, V_j . Fora desta zona aparece a

zona de fluxo radial, onde $V_j = 0$. Os autores^(8,13) convergem para um valor próximo a $r / D_j \approx 1,0$ quanto à definição do diâmetro da zona de estagnação, D_{est} . As dimensões da zona de estagnação foram avaliadas tomando-se como referência a fotografia do jato, conforme mostrado na Figura -b.

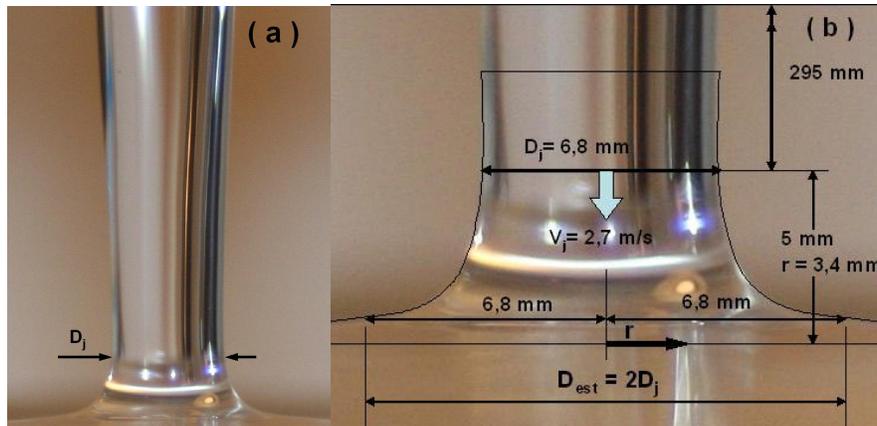


Figura 3. (a) Fotografia do jato d'água incidente de 6 ℓ/min sobre a superfície plana indicando a posição de D_j e (b) Determinação dos parâmetro da zona de estagnação baseada na análise da fotografia do jato d'água.

Alguns parâmetros hidrodinâmicos são necessários na análise da transferência de calor é necessário conhecer: velocidade da água na saída do bocal (V_n), velocidade do jato incidente (V_j), diâmetro do jato incidente (D_j) além da temperatura de saturação da água no ponto de estagnação (T_{sat}). Esses parâmetros estão listados na Tabela 2. e foram calculados utilizando as equações da continuidade e de Bernoulli. A temperatura de saturação, T_{sat} , pode ser obtida na tabela de saturação da água de acordo com a pressão.

Tabela 2. Parâmetros hidrodinâmicos na zona de estagnação

Q_n (ℓ/min)	D_n (mm)	V_n (m/s)	D_j (mm)	V_j (m/s)	P_j (Pa)	T_{sat} (°C)
6,0	10	1,27	6,8	2,7	98.792	99,3

No processo de resfriamento de tiras a quente a velocidade do jato está próxima de $V_j = 6,5$ m/s, com temperatura de saturação de 105,2°C a 1 atm. O que eleva o ponto de ebulição da água.

2.3 Análise Inversa de Condução de Calor

Uma análise inversa de condução de calor transiente foi realizada, usando o programa desenvolvido por Trujillo e Busby,⁽¹⁴⁾ a fim de calcular as temperaturas e os fluxos de calor na superfície de resfriamento a partir das temperaturas medidas internamente na placa. Para a análise numérica foi usado um modelo 2D axissimétrico em elementos finitos, com elementos quadráticos de 0,5 mm. Para as placas quadradas de 150 mm por 14 mm, com posição de fixação dos termopares em $y = 10$ mm, adotou-se um domínio numérico com raio de 75 mm, espessura de 14 mm e 4200 elementos quadráticos, conforme mostra a Figura 44.

A superfície superior foi dividida em quatro zonas de monitoração de fluxo de calor de acordo com os posicionamentos dos termopares, de 0 mm a 7 mm, de 7 mm a 25 mm, de 25 mm a 45 mm e de 45 mm a 75 mm, para monitorar os fluxos

de calor por região. Para as placas quadradas de 200 mm por 10 mm, $y = 10$ mm, domínio numérico com raio de 100 mm, espessura de 10 mm e 4.000 elementos, com superfície superior dividida em cinco regiões de monitoração de 0 mm a 7 mm, de 7 mm a 25 mm, de 25 mm a 45 mm, de 45 mm a 75 mm e de 75 mm a 100 mm. Como condição de contorno adotou-se regime adiabático nas superfícies sem incidência do jato, uma vez que as quantidades de radiação e convecção nessas superfícies eram muito menores do que na de incidência do jato.

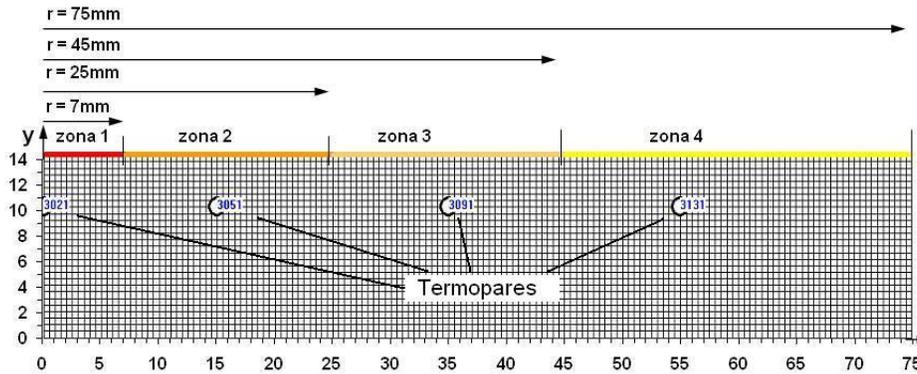


Figura 4. Modelo 2D axissimétrico com 4.200 elementos quadráticos para as placas quadradas de 150 mm por 14 mm com quatro zonas de monitoração superficial de fluxo de calor de acordo com os posicionamentos dos termopares.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise visual

A Figura 5 mostra os sucessivos estágios durante o processo de resfriamento com vazão (Q_w) de 6 ℓ/min , temperatura da água (T_w) de 22 $^{\circ}\text{C}$, velocidade do jato incidente (V_j) de 2,7 m/s e diâmetro do jato (D_j) de 6,8 mm e temperatura inicial (T_i) da placa de 900 $^{\circ}\text{C}$.

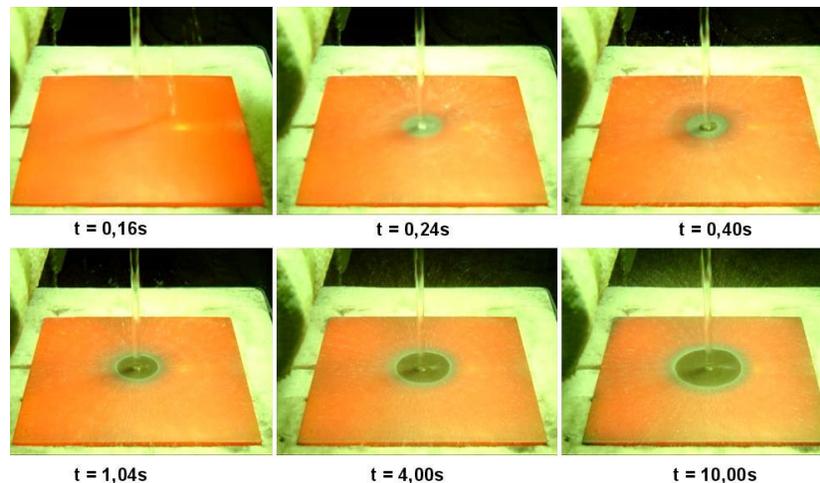


Figura 5. Fotografias do resfriamento com temperatura inicial de $T_i = 900$ $^{\circ}\text{C}$.

Foram feitas fotografias de todos os testes, com taxa de aquisição de 13 fotos por segundo (intervalo de 0,08 s). Após o início do processo de resfriamento houve a formação de um pequeno disco branco em volta do jato incidente, no instante

$t = 0,24$ s. Transcorrido $0,16$ s, observou-se que o círculo branco desapareceu e uma zona circular escura desenvolveu-se e, em volta dela, ocorreu a formação de um anel branco. Com o decorrer do tempo, observou-se que a taxa de crescimento da zona escura diminuiu. A zona escura indica, visualmente, que a água está em contato com a superfície da placa. À medida que se distancia do local de incidência do jato, a água aquece e atinge a temperatura de saturação formando a película de vapor, onde surge o anel branco.

A Figura 6 mostra os esboços explicativos das etapas dos primeiros instantes do processo de resfriamento de uma placa aquecida com as etapas fotografadas mostradas na Figura 5. No primeiro esboço, Figura 6-a há um filme de vapor separando o líquido do sólido, onde haverá um baixo fluxo de calor. No esboço seguinte, Figura 6-b, o jato d'água rompe o filme de vapor e toca a superfície da placa, onde a temperatura encontra-se acima do ponto de Leidenfrost e haverá um alto fluxo de calor.

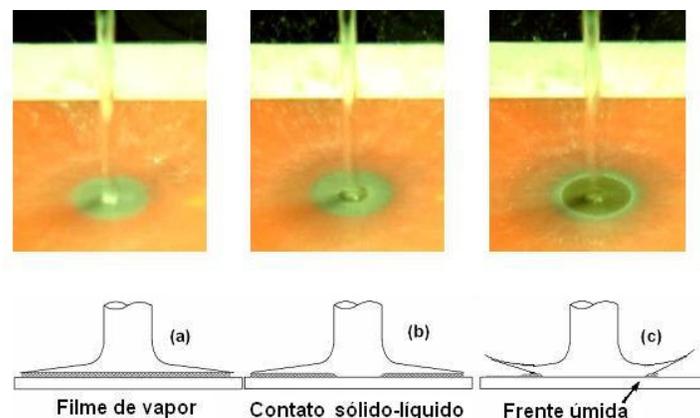


Figura 6 Esboços explicativos das etapas dos primeiros instantes do resfriamento da placa mostrada na Figura 5.

O esboço da Figura 6-c representa o avanço da frente úmida que aumenta com o tempo.

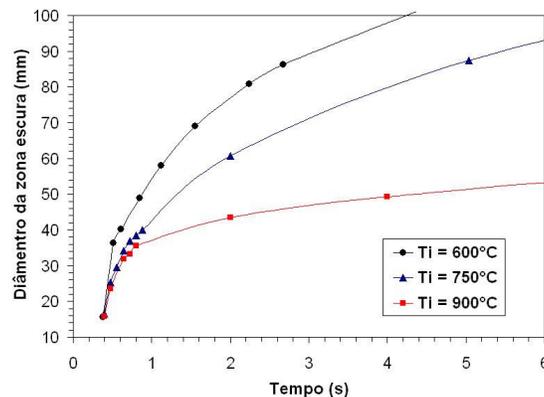


Figura 7. Curvas de crescimento do diâmetro da zona escura em função do tempo para $T_i = 600^\circ\text{C}$, 750°C e 900°C .

A Figura 7 mostra, graficamente, o crescimento do diâmetro da zona escura em função do tempo para temperaturas iniciais de teste (T_i) de 600°C , 750°C e 900°C . O gráfico confirma que nos primeiros instantes, $t < 0,8$ s, o molhamento sofre pouca influência da temperatura inicial de teste. Para $t > 1,0$ s, a temperatura

superficial possui grande influência sobre a frente úmida retardando o crescimento da zona escura.

3.2 Curvas de Resfriamento

A Figura 8-a mostra as curvas de resfriamento obtidas com os termopares de 1 a 5, em $r = 0$ mm, 15 mm, 35 mm, 55 mm e 75 mm, mostrada na Figura 5.

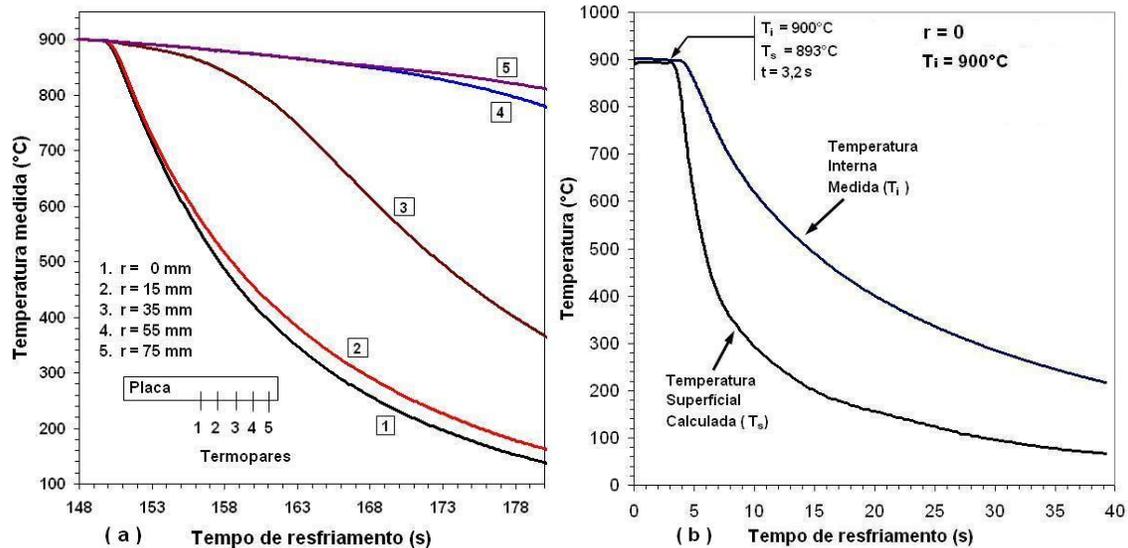


Figura 8. (a) Temperaturas internas medidas pelos 5 termopares nas posições radiais distantes do centro para 6 l/min e 22°C e (b) Temperatura superficial calculada e interna medida em $r = 0$.

No instante $t = 148$ s e temperatura interna de 900°C iniciou-se o processo de resfriamento da placa. A queda de temperatura é mais acentuada para curva 1, em $r = 0$, onde o resfriamento é mais intenso. À medida que o diâmetro da zona escura aumenta, as curvas de resfriamento ficam mais acentuadas intensificando o processo de resfriamento. Utilizando-se a análise inversa de condução de calor transiente calcularam-se as temperaturas superficiais a partir das temperaturas medidas internamente nas placas de teste (Figura 8-b) na posição $r = 0$. Observou-se que a temperatura superficial cai mais rapidamente do que a temperatura interna nos primeiros segundos do início do resfriamento, indicando um perfil de temperatura no interior da placa altamente não-linear. Essas tendências foram observadas nos testes com $T_i = 600^\circ\text{C}$ e 750°C . A Figura 9 mostra a não-linearidade no resfriamento interno da placa através das isoterms, no instante igual a 16,8 s do início do resfriamento. Na superfície de incidência do jato, em $r = 0$ e $y = 14$ mm, apresenta uma temperatura de 156°C enquanto a 10 mm abaixo deste ponto a temperatura é 624°C.

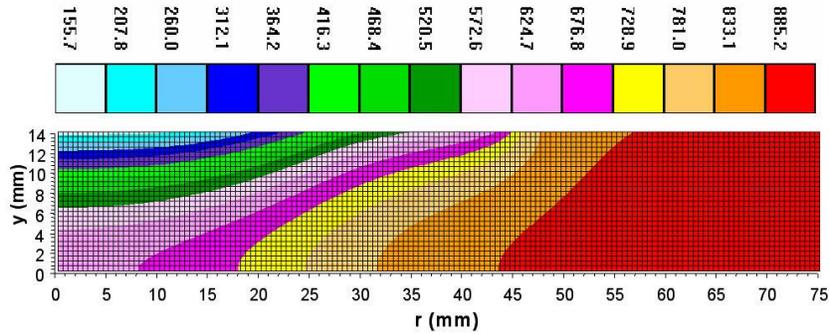


Figura 9. Isotermas no instante $t = 16,8$ s após o início do resfriamento da placa, $T_i = 900^\circ\text{C}$.

A análise conjunta das observações visuais (Figura 5) e das curvas de resfriamento superficial das placas de teste (Figura 10) revelaram que a água subresfriada ($T_j = 22^\circ\text{C}$) está em contato direto com a superfície mesmo quando a temperatura excede, em muito, a temperatura saturação da água ($T_{\text{sat}} = 100^\circ\text{C}$). Não existindo película de vapor entre a superfície aquecida do metal e o jato d'água incidente.

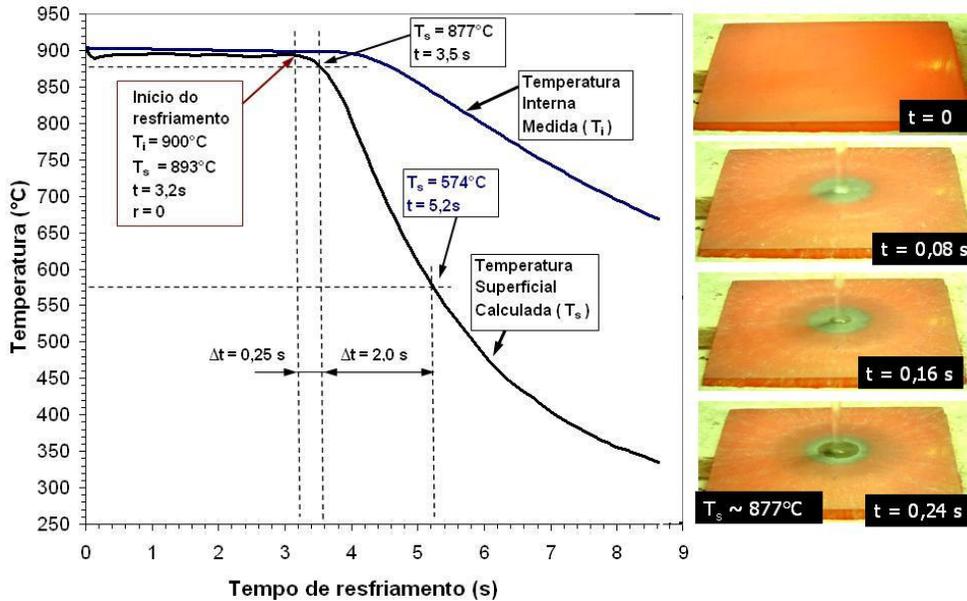


Figura 10. Comparação entre a curva de resfriamento superficial e as fotografias dos sucessivos estágios deste processo, com $T_i = 900^\circ\text{C}$.

O tempo decorrido entre o início do resfriamento até o surgimento da zona escura foi da ordem de $\Delta t = 0,24$ s. e transcorrido os intervalos de tempo de $\Delta t = 0,3$ e $2,3$ s, do início do resfriamento da placa, as temperaturas superficiais eram de $T_s = 877^\circ\text{C}$ e 574°C , respectivamente. A ausência de bolhas ou película de vapor não significa regime monofásico. Isto é devido à penetração do jato na camada de vapor e ao subresfriamento da água. Na ebulição subresfriada, a temperatura do líquido está abaixo de sua temperatura de saturação e as bolhas formadas na superfície aquecida condensam-se no líquido.^(3,7) Para temperatura de jato d'água com $T_j < 60^\circ\text{C}$ o molhamento ocorrerá assim que o jato d'água tocar a superfície da placa, independentemente de sua temperatura.⁽⁸⁾

Na Figura 11-a é apresentada a curva de fluxo de calor em função da

temperatura superficial, na zona de incidência do jato, em $r = 0$ e $T_i = 900^\circ\text{C}$. A curva pode ser dividida em três regiões: convecção forçada monofásica, ebulição nucleada e regime de transição. O valor do fluxo crítico de calor, $\text{CHF} = 3 \text{ MW/m}^2$, em $T_s \approx 506^\circ\text{C}$, encontrado na Figura -a é três vezes maior que o valor de $\text{CHF} = 1 \text{ MW/m}^2$, em $T_s \approx 130^\circ\text{C}$, encontrado para ebulição em vaso da Figura 1.-a. O regime monofásico teve início em $T_s \approx 140^\circ\text{C}$. Estes resultados estão coerentes com as análises feitas por Robidou et al.,⁽¹⁵⁾ onde informam que o subresfriamento e a convecção forçada afetam fortemente a curva de ebulição. O coeficiente de transferência de calor (h) cresce até atingir o início do regime de convecção forçada monofásica. Neste regime o h aumenta proporcionalmente à diminuição da temperatura superficial, enquanto que o fluxo de calor diminui. Conforme mostra a Figura 11-a, o regime de transição está compreendido entre $506^\circ\text{C} < T_s < 893^\circ\text{C}$. Portanto, para as temperaturas superficiais de $T_s = 877$ e 574°C , mostradas na Figura 10 onde existe a zona escura, o regime de transferência de calor é de transição. Esta conclusão está coerente com os comentários **Wolf et al. (1993)** e contraria as afirmações de **Hatta et al. (1984)**.

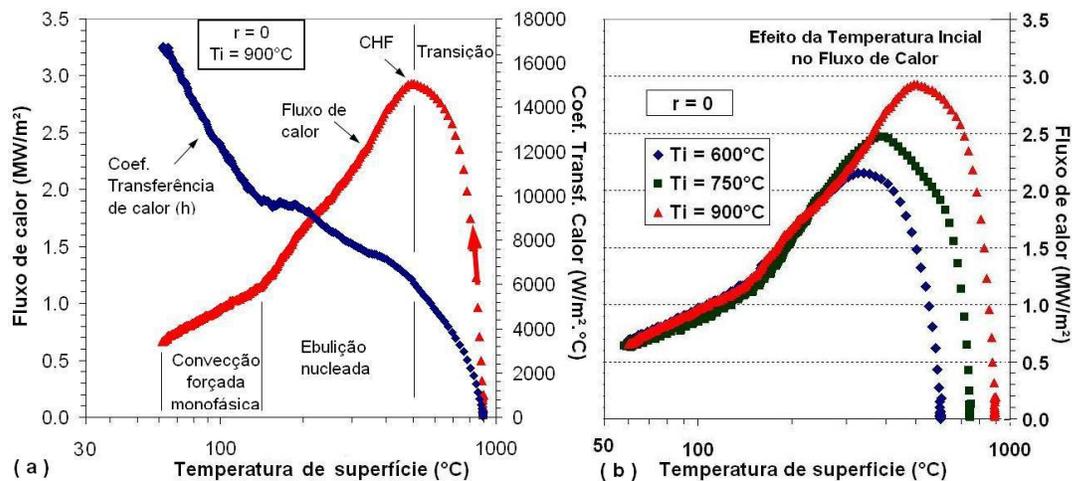


Figura 11. (a) Temperaturas internas medidas pelos 5 termopares nas posições radiais distantes do centro para 6 l/min e 22°C e (b) Temperatura superficial calculada e interna medida em $r = 0$.

A Figura 11-b mostra a comparação das curvas de ebulição em função da temperatura superficial para as temperaturas iniciais de teste $T_i = 600^\circ\text{C}$, 750°C e 900°C onde o valor do CHF aumenta com o aumento da temperatura inicial de teste. Para $T_i = 600^\circ\text{C}$, 750°C e 900°C o CHF ocorre em $T_s = 340^\circ\text{C}$, 365°C e 506°C , respectivamente. Para todos os testes, o regime de monofásico teve início em $T_s \approx 140^\circ\text{C}$.

3.3 Transferência de calor em resfriamento de aço laminado a quente

A Figura 12 mostra a fotografia de uma tira de aço laminada a quente, a uma velocidade próxima a 10 m/s e $T_s \approx 900^\circ\text{C}$, sob a cortina d'água onde se forma a zona escura.

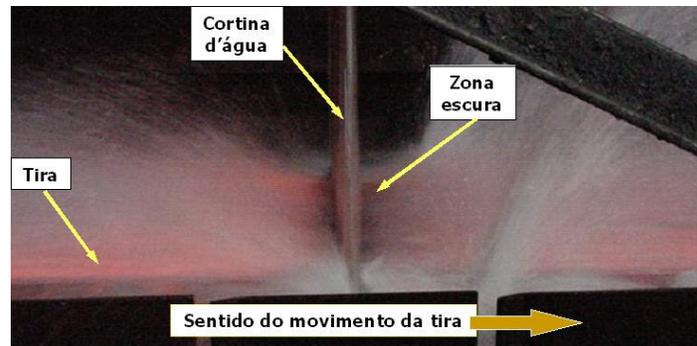


Figura 12. Fotografia de uma cortina d'água, $V_j = 6,5$ m/s, incidindo sobre uma tira de aço, a velocidade de 10 m/s e $T_s \approx 900^\circ\text{C}$, mostrando a zona escura na região de impacto do jato d'água.

O tempo que a tira permanece sob o jato d'água é da ordem de $t = 0,002$ s. Este intervalo de tempo não é suficiente para reduzir a temperatura superficial da tira, inicialmente a 900°C , para uma temperatura superficial $T_s < T_{\text{sat}}$, onde pudesse ocorrer o regime de convecção monofásica, conforme mostra o gráfico e fotografias da Figura 10. Segundo Zumbrennen et al.⁽⁵⁾ durante o processo de resfriamento a tira, o regime de convecção forçada monofásica na região de impacto do jato d'água e a temperatura de superfície está abaixo de 100°C , conforme mostra a Figura 1..

4 CONCLUSÃO

A caracterização da transferência de calor durante o resfriamento de uma placa de aço inoxidável aquecida, através de um jato d'água circular incidente em sua superfície, foi realizada com sucesso com a ajuda de um aparato experimental.

1. A temperatura superficial possui grande influência sobre crescimento da zona escura (molhamento). Quanto maior a temperatura superficial mais lento será o avanço da frente úmida;
2. A zona de incidência do jato, em $r = 0$, apresenta fluxo crítico de calor (CHF) superior às demais zonas radiais e o valor do CHF crescem com o aumento da temperatura inicial de teste, T_i .
3. Os resultados experimentais mostraram que na zona de incidência do jato, a água estabelece contato com a superfície após os primeiros instantes do início do resfriamento e não há formação da película de vapor ou presença de bolhas apesar da temperatura da superfície (T_s) exceder, em muito, a temperatura de ebulição da água ($T_{\text{sat}} = 100^\circ\text{C}$). O regime de transferência de calor não é monofásico devido às altas temperaturas superficiais e aos altos fluxos de calor.
4. Durante o resfriamento controlado de aço laminado a quente, na região de impacto do jato d'água, a temperatura superficial, T_s , está muito acima da temperatura de saturação da água, T_{sat} sendo provável ocorrer o regime de transição, contrariando as afirmações de alguns autores^(5,6,16) que consideraram esta região como monofásica. Portanto, não é adequado o uso das correlações para escoamento monofásico sugeridas por Hatta et al.⁽¹⁶⁾ e Prieto e Menendez⁽⁶⁾
5. Em sistemas de resfriamento de aço plano, a temperatura do jato d'água incidente deve ser $T_j < 40^\circ\text{C}$, a fim de evitar a formação da película de vapor que reduz, fortemente, a eficiência na transferência de calor.

Processo de ebulição subresfriada em contato com superfície a alta temperatura mostrou se complexo, necessitando de estudos sobre o processo através de fotografias em alta velocidade e análise de jato d'água incidente sobre uma superfície em movimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, às gerências de Laminação a Quente e Projeto Mecânico e Centro de Pesquisa da Usiminas, pelo fornecimento das amostras de teste, projeto, montagem do aparato experimental e suporte financeiro. Expressamos nossa apreciação a Tony C. Blair, Luciano Silva, Leonardo C. Reis, Ronaldo S. Alves, Marcelo M. F. Gonçalves e a toda equipe do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento pela ajuda e discussão durante os experimentos.

REFERÊNCIAS

- 1 LEE, P.; CHOI, H.; LEE, S.; The Effect of Nozzle Height on Cooling Heat Transfer from a Hot Steel Plate by an Impinging Liquid Jet, Iron and Steel Institute of Japan International ISIJ, v. 44, n° 4, p. 704–709, 2004.
- 2 BARROS, C. J.; LUNA, H. P.; MENEZES, B. R., Estudo de Modelos Aplicados ao Controle de Resfriamento de Tiras a Quente, 1995, dissertação de mestrado em ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 3 TIMM, W.; WEINZIERL, K.; LEIPERTZ, A., Heat transfer in subcooled jet impingement boiling at high wall temperatures, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 46, p. 1385 - 1393, 2003.
- 4 INCROPERA, F.P.; DE WITT, D. P., Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 5ª edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, 2003, 494 p.
- 5 ZUMBRUNNEN, D. A.; INCROPERA, F.P.; VISKANTA, R., A method and apparatus for measuring heat transfer distributions on moving and stationary plates cooled by a planar liquid jet, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 3, n° 2, p. 202-213, 1990.
- 6 PRIETO, M. M.; L. S. MENENDEZ, R., J. A., Thermal performance of numerical model of hot strip mill runout table, Ironmaking and Steelmaking, v. 28, n° 6, p. 474-480, 2001.
- 7 VISKANTA, R.; BERGMAN, T., Heat Transfer in Materials Processing, Handbook of Heat Transfer, cap. 8, 3ª edition, McGraw-Hill, 1998, USA.
- 8 OCHI, T.; NAKANISHI, S.; KAJI, M. ISHIGAI, S., Cooling of a hot plate with an impinging circular water jet, Multi-Phase Flow and Heat transfer III. Part A: Fundamentals, p. 671-681, Elsevier, Amsterdam, 1984.
- 9 LEOCADIO, H., SILVA, A.F.C., PASSOS, J. C., Analysis of the cooling effect of a water jet on a hot steel plate, Proceedings of 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília, DF, 2007
- 10 FILIPOVIC J.; VISKANTA R.; INCROPERA F.P.; VESLOCKI T. A., Cooling of a Moving Steel Strip by an Array of Round Jets, Steel Research, v.65, n° 12, p.541-547, 1994.
- 11 Mozumder, A. K.; Monde, M.; Woodfield, P. L.; Islam, M. A. Maximum Heat Flux In Relation to Quenching of a High Temperature Surface with Liquid Jet Impingement, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 2877-2888, 2006.
- 12 Xu, F.; Gadala, M. S. Heat transfer behavior in the impingement zone under circular water jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 3785–3799, 2006.
- 13 WEBB, B. W.; MA, C. F., Single-phase jet impingement heat transfer, Advances in heat transfer, v. 26, p. 105-217, Academic press, San Diego, 1995.
- 14 TRUJILLO, D.M.; BUSBY, H.R., INTEMP - Inverse Heat Transfer Analysis - User's manual, TRUCOMP CO., FOUNTAIN VALLEY, CA, 2003, 47 p.
- 15 ROBIDOU H.; AURACHER H.; GARDIN, P.; LÉBOUCHÉ, M., Controlled cooling of a hot plate with a water jet, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 26, p.123–129, 2002.
- 16 HATTA, N.; KOKADO, J.; TAKUDA, H.; HARADA, J.; HIRAKU, J., Predictable Modeling for Cooling Process of a Hot Steel Plate by a Laminar Water Bar, Archiv für das Eisenhüttenwesen, v.55, n°4, p. 143-148, 1984.