

ESTUDO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DO RESFRIAMENTO DE UM JATO D'ÁGUA CIRCULAR EM UMA PLACA DE AÇO AQUECIDA ¹

Hormando Leocádio Júnior²

Geraldo Arruda Maia³

Júlio César Passos⁴

Resumo

Este artigo apresenta um estudo experimental e numérico do comportamento da transferência de calor de uma placa quadrada de aço, de 150 mm por 14 mm de espessura, aquecida e resfriada por um jato d'água circular. Os efeitos da temperatura e vazão de água 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 impacto 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 quatro termopares inseridos na placa. Os resultados obtidos contribuem para um melhor entendimento do processo de resfriamento por jatos d'água circular na mesa de saída do laminador de tiras a quente.

Palavras-chave: Resfriamento; Transferência de calor; Método inverso de condução de calor.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE COOLING EFFECTS OF A CIRCULAR WATER JET ON A HOT STEEL PLATE

Abstract

This paper presents an experimental and numerical study of the heat transfer behavior of a hot square steel plate of 150 mm wide and 14 mm thick cooled by an impinging circular water jet. The effects of the water temperature and the flow rate were analyzed. Numerical analysis using inverse heat conduction method was used to calculate the heat flux and the temperature on the impingement surface from the measured hot plate temperatures. The temperature history of the plate during the cooling process was measured with four thermocouples installed inside the plate. The results obtained contribute to a better understanding of cooling circular water jets during runout table in the hot strip mill.

Key words: Cooling; Heat transfer; Inverse heat conduction method.

¹ *Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, Gerência de Projetos Mecânicos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil, hjunior@usiminas.com.br*

³ *MBA, Engenheiro Metalurgista, Gerência Técnica de Laminação a Quente, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil, gmaia@usiminas.com.br*

⁴ *Dr. Eng., Departamento de Engenharia Mecânica, LEPTEN/Boiling, Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, jpassos@emc.ufsc.br*

1 INTRODUÇÃO

Jatos líquidos incidindo em superfícies aquecidas são usados em diversas aplicações industriais como uma técnica de extrair calor. Em geral, os jatos d'água circular são usados como um eficiente sistema de resfriamento para placas de aço aquecidas.^[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. Sistemas de resfriamento por água têm sido implementados em laminadores de tiras a quente a fim de conseguir a temperatura de bobinamento requerida e obter as microestruturas desejáveis.^[2-6]

Em laminadores de tiras a quente, normalmente, as temperaturas de acabamento e de bobinamento estão entre 800°C-950°C e 510°C-750°C, respectivamente. A tira é resfriada por água na mesa de saída, após a última cadeira do laminador, até a temperatura de bobinamento desejada. Isto inclui condução de calor, convecção forçada monofásica, nucleação, filme de vapor, convecção natural para o ar, radiação e a geração de calor na mudança de fase do material, como mostra a Figura 1. O mecanismo de transferência de calor envolve fenômenos complexos na região de incidência do jato d'água com mudança de fase da água em uma superfície em movimento.^[1,5,7,8] Guo^[5] concluiu que a transferência de calor neste processo é governada, predominantemente, por três mecanismos: convecção forçada monofásica, nucleação e película de vapor. Nesse tipo de resfriamento a convecção forçada representa mais de 90% de todo calor transferido.

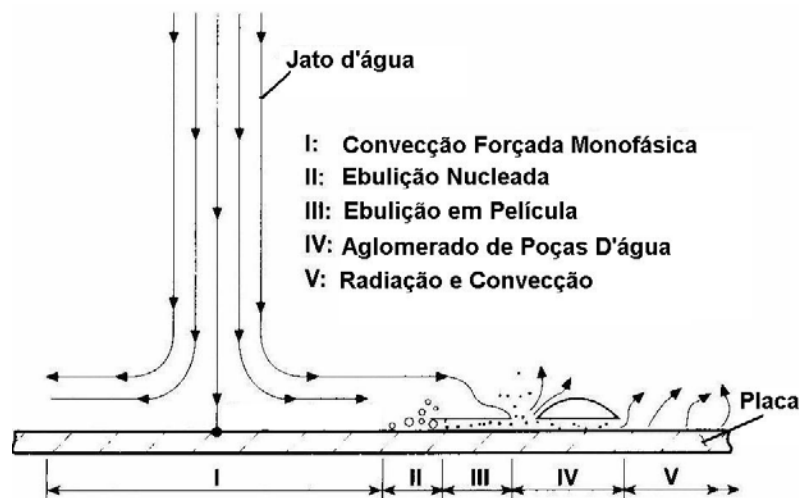


Figura 1 - Regimes de transferência de calor adjacentes ao jato incidente sobre a tira durante seu resfriamento na mesa de saída do laminador.^[6]

Para o dimensionamento eficaz no processo de resfriamento na mesa de saída do laminador é importante avaliar o coeficiente de transferência de calor ou fluxo de calor, bem como o histórico de temperatura ao longo do comprimento da tira. Diversas análises experimentais e numéricas foram realizadas para investigar o resfriamento por jato d'água.^[1,9-14]

Os mecanismos de transferência de calor através de jato d'água durante o resfriamento da tira na mesa de saída, mesmo com as importantes contribuições de trabalhos sobre o tema, ainda não são completamente compreendidos. Resultados publicados por diferentes autores^[1,10-14] mostram divergências entre os valores de coeficientes de transferência de calor (5 kW/m²K a 100 kW/m²K). Filipovic et al.^[8]

desenvolveram modelos matemáticos para jato d'água planar e circular sobre uma placa em movimento onde mostra que o aumento do subresfriamento, diferença entre a temperatura de saturação da água e a temperatura do jato, aumenta o fluxo do calor consideravelmente na zona de estagnação. A mesma tendência foi encontrada experimentalmente por Robidou et al.^[16] para regimes de transição e ebulição em película de vapor e o fluxo crítico de calor. Além disso, constatou que o aumento da velocidade do jato de 0,7 m/s a 0,8 m/s não produziu um efeito significativo no fluxo do calor para toda curva de ebulição.

Com o propósito de melhor entendimento sobre esse sistema de resfriamento, apresentam-se os resultados preliminares para o regime transiente de resfriamento devido a um jato d'água circular incidindo em uma placa de aço aquecida a 740°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. Esse estudo objetivou, também, compreender os principais mecanismos do processo de resfriamento em função de duas vazões e variando as temperaturas do jato d'água sobre uma placa de aço aquecida.

2 O APARATO E OS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

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.

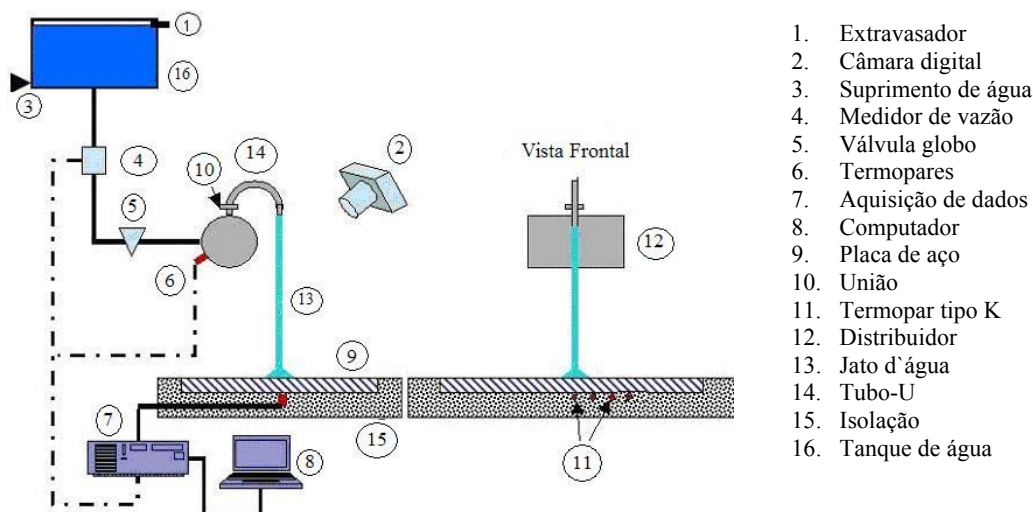


Figura 2 – Desenho esquemático do aparato experimental.

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 1300°C. O material da placa quadrada, de 150 mm por 14 mm de espessura é o AISI 304 (Tabela 1). O sistema de aquisição de dados (7) permitiu realizar 10 leituras por segundo. Foram usadas as vazões, Q_w , de 3 e 6 l/min, com $\pm 0,25\%$ de incerteza, obtidas através do medidor de vazão (4).

Tabela 1 - Propriedades Termofísicas do Aço AISI 304 [17].

T(°C)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	k(W/mK)
127	515	8000	16.6
327	557	8000	19.8
527	582	8000	22.6
727	611	8000	25.4
927	640	8000	26.0

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 do ponto central e a uma altura z de 5 mm, a partir do fundo da placa. A mesma foi aquecida até 900°C e mantida no forno por mais 30 minutos antes de ser transferida à posição de teste. O início do processo de resfriamento pelo jato d'água se deu à temperatura próxima de 740°C.

A altura da saída do jato d'água superior à placa de teste, H , foi ajustada em 300 mm. Essa distância foi estabelecida de modo que o jato d'água na saída do tubo se mantivesse contínuo e laminar. Hatta et al.^[1] e Lee et al.^[18] mostraram que o efeito da altura do bocal possui uma fraca influência na curva de resfriamento no ponto de estagnação, quando mantido um jato constante.

As temperaturas da água foram mantidas em 12°C e 26°C, medidas 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. As imagens permitiram analisar o comportamento da transferência de calor envolvendo diversos parâmetros hidrodinâmicos: a velocidade do jato, o diâmetro do jato e a temperatura de saturação da água. Esses parâmetros trabalhados estão listados na Tabela 2. A velocidade de impacto do jato d'água pode ser calculada através equação (1):

$$V_j = \sqrt{V_n^2 + 2gH} \quad (1)$$

sendo V_j e o V_n as velocidades do jato, função da altura, e da água na saída do bocal, em m/s; g é a aceleração da gravidade, em m/s²; e H a distância vertical da saída do bocal à superfície da placa, em metros.

O diâmetro do jato d'água, D_j , função da altura, é calculado pela equação (2):

$$D_j = D_n \sqrt{V_n/V_j} \quad (2)$$

com D_n o diâmetro do bocal.

A pressão no ponto de estagnação é dada pela equação (3):

$$P_s = P_a + \frac{1}{2} \rho V_j^2 \quad (3)$$

com P_a a pressão atmosférica e ρ a densidade da água.

A temperatura de saturação, T_{sat} , pode ser obtida na tabela de saturação da água de acordo com a pressão. No processo de resfriamento acelerado de laminadores de tiras a quente a velocidade do jato está próxima de 6,5 m/s, com temperatura de saturação de 105,2°C a 1 atm. O que eleva o ponto de ebulição da água.

Tabela 2 - Parâmetros hidrodinâmicos no ponto de estagnação.

Q_w (l/min)	D_n (mm)	V_n (m/s)	D_j (mm)	V_j (m/s)	P_s (Pa)	T_{sat} (°C)
3,0	10	0,64	5,1	2,5	103.125,0	100,6
6,0	10	1,27	6,9	2,7	103.645,0	100,8

2.3 Análise Inversa de Condução de Calor

Uma análise inversa de condução de calor transiente foi realizada usando o programa desenvolvido por Trujillo,^[19] a fim de calcular as temperaturas e os fluxos de calor na superfície de resfriamento a partir das temperaturas medidas na placa.

Para a análise numérica, um modelo 2D axissimétrico em elementos finitos foi usado. O modelo estabelecido para simular o processo de trocas térmicas adotou um domínio com raio de 75 mm, espessura de 14 mm e com 4200 elementos quadráticos. Como condições de contorno adotou-se regime adiabático nas superfícies sem incidência do jato, uma vez que as quantidades de radiação e convecção nessas superfícies são muito menores do que na de incidência do jato. A superfície superior foi dividida em quatro regiões 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Visualização

A Figura 3 mostra os sucessivos estágios durante o processo de resfriamento, com vazão de 6 l/min, temperatura da água de 26°C e a temperatura inicial da placa de 740°C.

Após o início do processo de resfriamento ocorreu a formação de um pequeno círculo branco, em 0,08 s, entorno do centro do jato. Posteriormente, este círculo desaparece e uma área de convecção forçada monofásica circular se desenvolve. Durante o processo de resfriamento pequenos respingos de gotas de água causadas pela ebulição foram observados no limite circular da área de convecção forçada. Devido à redução da intensidade de ebulição durante o resfriamento o tamanho dos respingos das gotas da água aumenta enquanto a intensidade dos respingos diminui.

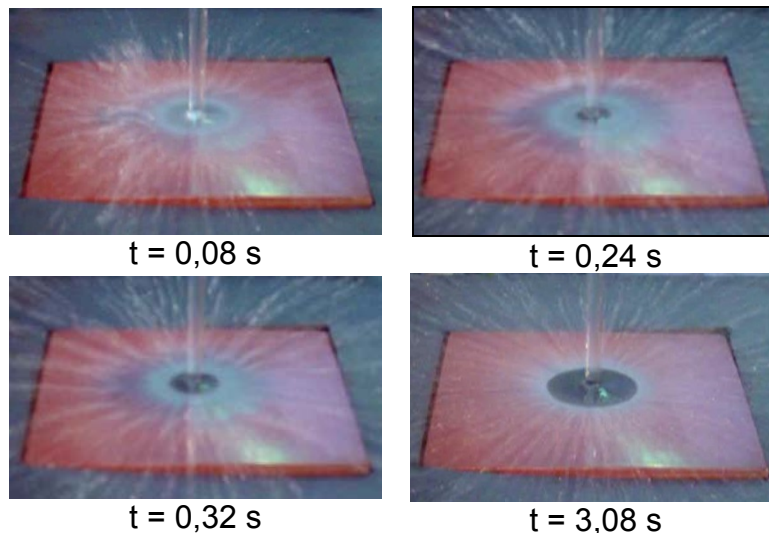


Figura 3 - Fotografias do processo de resfriamento, água a 26°C e 6 l/min.

3.2 Curvas de Resfriamento

A Figura 4-a mostra as curvas de resfriamento obtidas com os termopares de 1 a 4, em $r = 0$ mm; 15 mm; 35 mm e 55 mm, a uma vazão de 3 l/min e temperatura da água de 12°C.

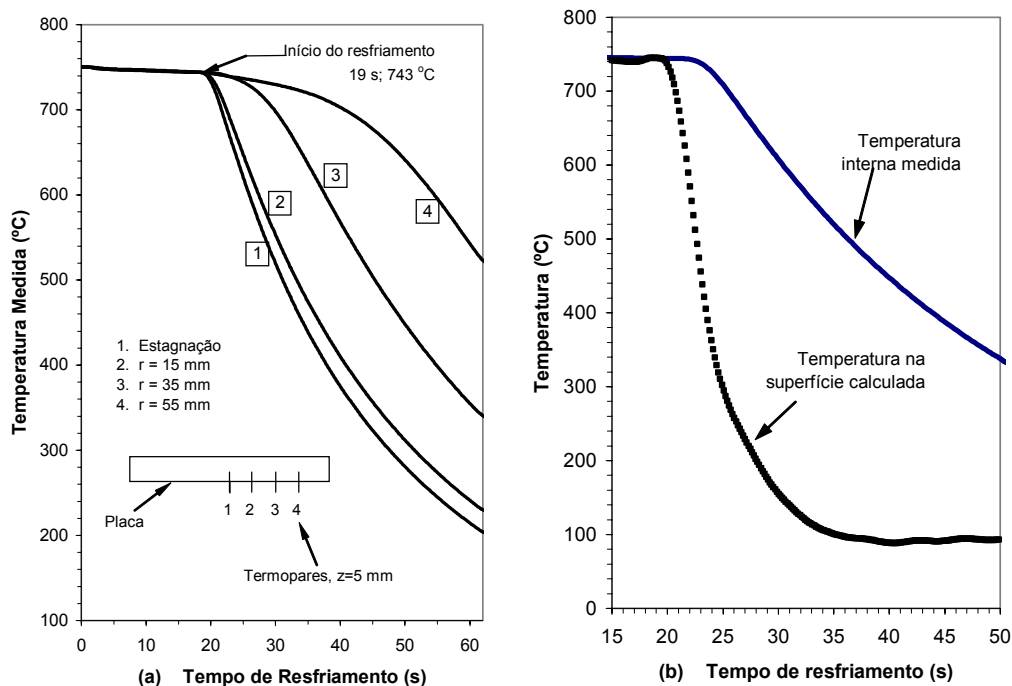


Figura 4 - (a) Temperaturas internas medidas pelos 4 termopares nas posições radiais distantes do centro para 3 l/min e 12°C e (b) Temperatura superficial calculada e interna medida, em $r = 15$ mm para 3 l/min e 12°C.

Os quatro termopares mediam a mesma temperatura de 743°C, antes do jato d'água tocar a superfície da placa (Figura 4-a). Depois que o jato atingiu a superfície da placa, no instante igual a 19 s, a temperatura na superfície da placa diminuiu rapidamente no ponto de estagnação.

A Figura 4-b mostra as curvas de resfriamento para as temperaturas de superfície

calculadas e as internas medidas, em $r = 15$ mm, com 3 l/min e 12°C . Observa-se que a temperatura de superfície cai mais rapidamente do que a temperatura interna nos primeiros segundos do início do resfriamento, indicando que o perfil de temperatura no interior da placa, durante este período, é não-linear. Tendências similares foram vistas em todos os testes.

A Figura 5 mostra as isotermas no instante igual a 25 s após o início do processo de resfriamento, com 3 l/min e 12°C , mostrando a não-linearidade no resfriamento interno da placa.

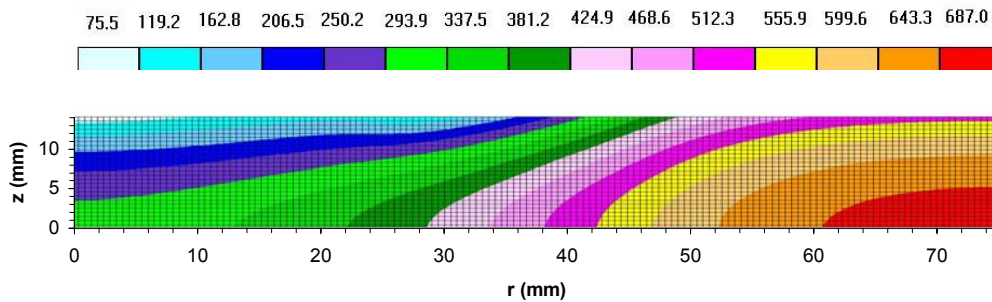


Figura 5 -Isotermas em 25 s após o início do resfriamento com vazão 3 l/min e temperatura da água de 12°C .

3.3 Curvas Parciais de Ebulição

A Figura 6 mostra o fluxo de calor instantâneo calculado na superfície resfriada da placa em função do tempo com vazão de 3 l/min e temperatura da água de 26°C .

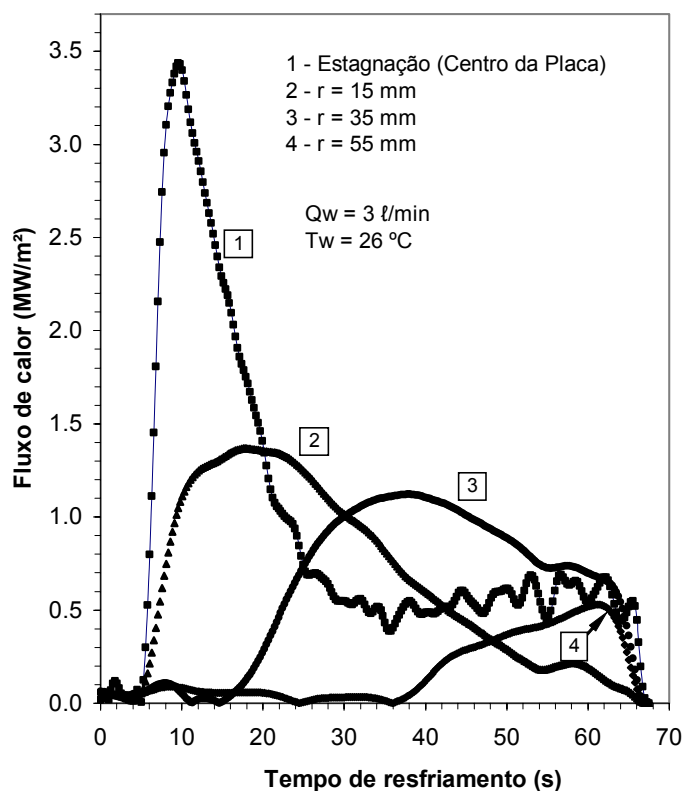


Figura 6 - Fluxos de calor na superfície em função do tempo de resfriamento.

Na Figura 6 observa-se que os fluxos máximos de calor, da curva 1 (dentro da zona de estagnação) é significativamente mais elevada do que as demais, apresentando

um valor de fluxo máximo de $3,43 \text{ MW/m}^2$. Os picos de fluxos de calor diminuem com o aumento da distância do ponto de estagnação. A mesma tendência foi relatada por Hauksson et al.^[9] Nota-se que após o pico registrado para a curva 1 o fluxo de calor torna-se aproximadamente constante ao longo do tempo, com valor de $0,5 \text{ MW/m}^2$, durante a convecção forçada monofásica.

3.4 Efeito da Temperatura

A Figura 7 mostra o fluxo de calor instantâneo calculado na superfície resfriada da placa em função do tempo com vazão de 3 l/min e temperaturas da água de 12 e 26°C . Essas duas curvas coincidem durante os primeiros 3 s do processo de resfriamento até o fluxo de $2,0 \text{ MW/m}^2$ que correspondem aos regimes de ebulição em película de vapor, devido às altas temperaturas de superfície.

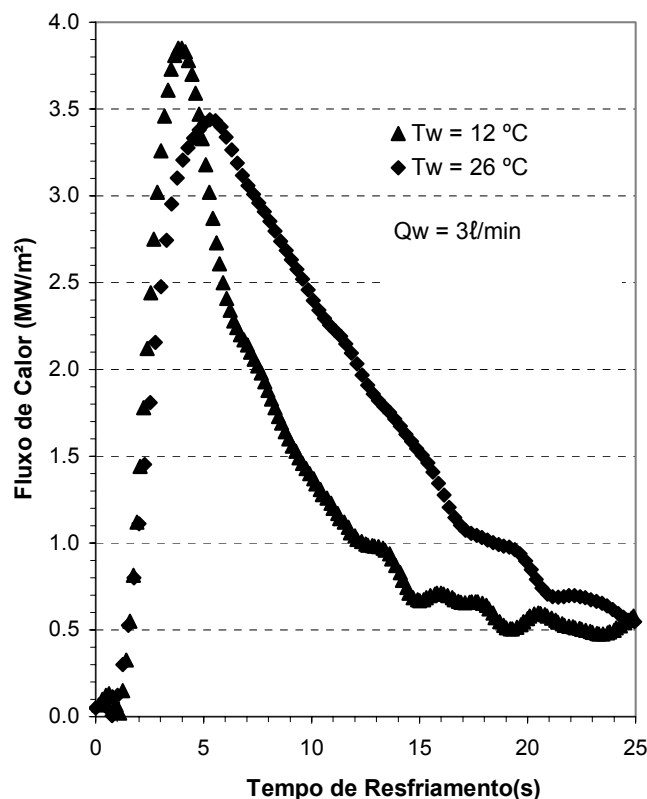


Figura 7- Fluxos máximos de calor no ponto de estagnação para uma vazão de 3 l/min . e temperaturas de 12 e 26°C em função do tempo de resfriamento.

Para os fluxos de calor maiores que 2 MW/m^2 os valores máximos aumentam com a diminuição da temperatura da água. O fluxo máximo de calor foi de $3,85 \text{ MW/m}^2$ para temperatura da água à 12°C , ou seja, 11% maior do que o calculado para 26°C . Esses resultados estão coerentes com os da literatura.^[9] Lee et al.^[1] encontrou o fluxo máximo de calor de $2,6 \text{ MW/m}^2$, usando uma placa de AISI 304, cuja temperatura inicial era 750°C , a 3 l/min e 30°C .

3.5 Efeito da Vazão

A Figura 8 mostra os resultados para o efeito da variação da vazão de água, para a temperatura de 26°C . Uma tendência similar, qualitativa e quantitativa, do efeito do aumento da vazão foi encontrada quando a taxa de fluxo aumenta de

3 l/min para 6 l/min. O fluxo máximo de calor foi de 3,92 MW/m² para 6 l/min, 14% mais elevado do que o fluxo de calor para a vazão de 3 l/min.

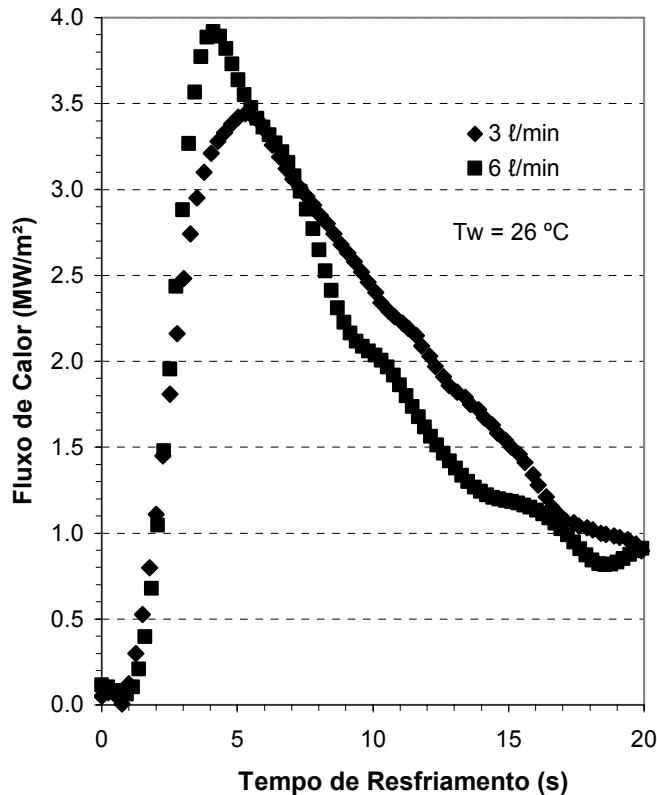


Figura 8- Fluxos máximos de calor no ponto de estagnação para uma temperatura fixa e vazões de 3 e 6 l/min em função do tempo de resfriamento.

4 CONCLUSÃO

A caracterização da transferência de calor em uma placa de aço inoxidável aquecida e resfriada, através de um jato d'água incidente em sua superfície, foram realizadas com sucesso com a ajuda de um aparato experimental.

Uma análise inversa de condução de calor transiente, baseada em um modelo 2D axissimétrico de elementos finitos usando o método iterativo e seqüencial de regularização, foi usada para calcular os fluxos de calor e temperaturas na superfície da placa. Os dados de entrada para o modelo numérico e sua validação foram as temperaturas medidas por quatro termopares alinhados inseridos na placa.

Com esse aparato permitiu observar os seguintes fatos:

- A temperatura da água influencia significativamente sobre a transferência de calor na zona de estagnação. A sua redução de 26°C para 12°C provocou um aumento de 11% no fluxo máximo de calor;
- A vazão, também, possui uma forte influência no processo de resfriamento. A variação de 100% na vazão de água à 26°C, de 3 l/min para 6 l/min, provocou uma aumento de 14% no fluxo de calor;
- A intensidade de fluxo máximo de calor para os demais pontos, fora da zona de estagnação, reduz com o aumento da distância da zona de impacto do jato. Isto ocorre em função do aumento da temperatura da água, devido ao calor absorvido da placa.

As influências da redução da temperatura da água em detrimento do aumento da

vazão deverão ser melhor avaliados para a otimização do projeto de um sistema de resfriamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a Gerência Técnica de Laminação a Quente, Projeto Mecânico e Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, pelo fornecimento das amostras de teste, projeto, montagem do aparato experimental e suporte financeiro e a Emerson Process pela doação do medidor de vazão eletromagnético. 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, *ISIJ International*, Vol. 44, N° 4, pp. 704-709, 2004.
- 2 Cox, S.D.; Hardy, S.J.; Parker D.J. Influence of Runout Table Operation Setup on Hot Strip Quality, Subject to Initial Strip Condition: Heat Transfer Issues, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 28, N° 5, pp. 363-372, 2001.
- 3 Devadas, C.; Samarasekera, I.V. Heat Transfer During Hot Rolling of Steel Strip, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 13, N° 06, pp. 311-321, 1986.
- 4 Evans, J.F.; Roebuck, I.D.; Watkins, H.R. Numerical Modeling of Hot Strip Mill Runout Table Cooling, *Iron and Steel Engineer*, Vol. 70, N° 1, pp 50-55, 1993.
- 5 Guo, R.M. Heat Transfer of Laminar Flow Cooling During Strip Acceleration on Hot Strip Mill Runout Tables, *Ironmaking and Steelmaking*, Toronto, Canada, pp. 49-59, 1993.
- 6 Zumbrunnen, D.A.; Viskanta, R.; Incropera, F. P. The Effect of Surface Motion on Forced Convection Film Boiling Heat Transfer, *Transactions of the ASME*, volume 111, pp. 760-766, 1989.
- 7 Liu, Z.; Fraser D.; Samarasekera, I.V. Experimental study and calculation of boiling heat transfer on steel plates during runout table operation, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 41, N° 1, pp.63-74, 2002.
- 8 Filipovic, J.; Viskanta R.; Incropera F.P.; Veslocki T. A. Cooling of a Moving Steel Strip by an Array of Round Jets, *Steel Research*, Vol.65, N° 12, pp. 541-547, 1994.
- 9 Hauksson, A.T.; Fraser, D.; Prodanovic, V.; Samarasekera, I. Experimental Study of Boiling Heat Transfer During Subcooled Water Jet Impingement on Flat Steel Surface, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 31, N°1, 51-56, 2004.
- 10 Hatta, N.; Kokado, J.; Takuda, H.; Harada, J.; Hiraku, K. Predictable Modelling for Cooling Process of a Hot Steel Plate by a Laminar Water Bar, *Arch. Eisenhüttenwes.* 55, N° 4, pp. 143-149, 1984.
- 11 Liu, Z.; Samarasekera, I. Application of Cooling Water in Controlled Runout Table Cooling on Hot Strip Mill, *J. Iron & Steel Res., Int.*, Vol. 11, N° 3, pp.15-23, 2004.
- 12 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.

- 13 Packo, M.; Kusiak, H.; Pietrzyk, M. Modelling Water Cooling of Steel Strip During Hot Rolling, *Steel Research*, Vol. 64, N° 2, pp. 128-131, 1993.
- 14 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.
- 15 Filipovic, J.; Viskanta, R.; Incropera, F.P.; Veslocki, T.A. Thermal Behaviour of a Moving Steel Strip by an Array of Planar Jets, *Steel Research*, Vol.63, N° 10, pp. 438-446, 1992.
- 16 Robidou, H.; Auracher, H.; Gardin, P.; Lebouché, M. Controlled cooling of a hot plate with a water jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 123-129, 2002.
- 17 Pecker, D.; Bernstein, I. M. *Handbook of Stainless Steels*, McGraw-Hill Book Company, NY, 1977.
- 18 Hatter, N.; Choked, J.; Hanasaki, K. Numerical Analysis of Cooling Characteristics for Water Bar, *Transactions ISIJ*, Vol. 23, pp. 555-564, 1983.
- 19 Trujillo, D.M. *Inverse Heat Transfer Analysis - user's manual*, trucomp co., Fountain Valley, CA, 2003.
- 20 Kokado, J., Hatta, N., Takuda, H., Harada, J.; Yasuhira, N. An analysis of film boiling phenomena of subcooled water spreading radially on a hot steel plate, *Arch. Eisenhüttenwes*, Vol. 55, pp. 113-118, 1984.
- 21 Carey, V.P. *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena: an Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Process*, in *Heat Transfer Equipment*, Taylor & Francis, 1992.