

ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O RESFRIAMENTO DE CILINDROS DE TRABALHO DA LAMINAÇÃO A QUENTE¹

Marcio Rodrigo Soliman²
 Ronaldo Antônio Neves Marques Barbosa³
 Hormando Leocadio Junior⁴

Resumo

O resfriamento de cilindros na laminação a quente afeta diretamente duas características fundamentais dos cilindros. A durabilidade, devido ao desgaste com a degradação da superfície, e o coroamento térmico relacionado à forma do material, devido à expansão térmica dos cilindros. O resfriamento se faz através de jatos de água convenientemente ajustados. A determinação dos coeficientes de transferência de calor é fundamental para fins de otimizar o processo de resfriamento de cilindros visando aumentar sua durabilidade e a qualidade do produto laminado. Estudos experimentais e numéricos dos efeitos do resfriamento através de um jato de água em formato de leque sobre um cilindro protótipo sob temperaturas entre 50°C e 350°C foram realizados. A pressão da água, o tipo de bico e a posição ao longo do comprimento do leque (centro e extremidade) influenciam na eficiência do resfriamento de cilindros. O valor máximo encontrado do coeficiente de transferência de calor foi de 6,0 kW/m².°C, sendo observada uma diferença de 14,3% entre o centro e a extremidade do leque.

Palavras-chave: Cilindro de trabalho; Laminação a quente; Resfriamento; Coeficiente de transferência de calor.

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER AND DATA COLLECTION FOR NUMERICAL SIMULATION OF WORK ROLL COOLING IN HOT ROLLING

Abstract

The roll cooling in Hot Rolling directly affects two fundamental characteristics of the rolls. One is the durability due to surface degradation. The other is the thermal expansion, which affects the shape and dimensions of the strip. Cooling is done by water jets that need to be properly adjusted. The determination of heat transfer coefficients is essential to optimize the process and thus increase its durability and quality of the strip. Experimental and numerical effect of cooling using a water jet fan-shaped on a prototype roll at temperatures between 50°C and 350°C were performed. The water pressure, nozzle type and the position along the length of the fan-shaped (center and edge) influence the efficiency of roll cooling. The maximum value found in the coefficient of heat transfer was 6.0 kW/m².°C, and observed a 14.3% difference between the center and end of the jet fan-shaped.

Key words: Work roll; Hot rolling; Cooling; Heat transfer coefficient.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

² Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Mestre, Engenheiro Produção Sênior da Gerência Técnica na Laminação a Quente, Usiminas – Ipatinga, MG, Brasil.

³ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre, Doutor, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre, Pesquisador Especialista da Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas – Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Devido ao contato direto com o material a ser processado, os cilindros de trabalho são componentes relevantes na produção de laminados, por serem um dos principais responsáveis por sua forma e acabamento superficial. Pela sua significância nos custos de bobinas se destacam como elementos de grande importância. Além disso, as interrupções no processo para *setup* de ferramentas afetam a produtividade da linha operacional. A vida útil dos cilindros de laminação é limitada pela degradação e desgaste de sua superfície durante os seus ciclos de operação de laminação.

Essa degradação, seguida de desgaste, modifica a sua condição original, a sua geometria e a sua rugosidade superficial. As mudanças na geometria do cilindro, combinadas com a expansão térmica, afetam o perfil e a forma dos laminados. Outro aspecto do desgaste é que, quando suficientemente alto, a carepa terciária, desenvolvida após a descarepação primária, acumula nas cavidades da superfície do cilindro e posteriormente passa a ser impressa na superfície das tiras laminadas, gerando o defeito superficial chamado de carepa de cilindro.⁽¹⁾ Nesse contexto, o resfriamento aplicado adequadamente influencia a vida útil dos cilindros e conseqüentemente na qualidade dos produtos.

Como o aquecimento não é uniforme ao longo da mesa do cilindro e ao longo do tempo, a variação dimensional resultante não é linear, gerando tensões térmicas que podem provocar a formação de trincas que danificam os cilindros, gerando defeitos superficiais nos produtos laminados ou até mesmo a fratura dos cilindros. Além disso, outro problema relacionado ao aquecimento e a expansão térmica dos cilindros é a variação da espessura do produto laminado ao longo da largura.

A geração de trincas e o descontrole da coroa térmica nos cilindros podem ser evitadas ou atenuadas mediante um resfriamento adequado. Este resfriamento é feito com jatos de água sobre a sua superfície. Para efetividade do resfriamento não basta lançar água em abundância sobre os cilindros, é preciso que os jatos sejam distribuídos convenientemente no cilindro e com a pressão adequada de acordo com a área, ou seja, na vazão suficiente para remover a quantidade de calor na medida certa. Entretanto, o resfriamento de cilindros é um problema complexo, que mesmo muito estudado ainda traz incertezas, principalmente quanto à determinação dos coeficientes de transferência de calor.

1.1 Sistema de Resfriamento de Cilindros na Laminação a Quente

Em princípio, no processo de resfriamento, o volume de água deve ser adequado e a pressão ajustada de tal forma que cada ponto da superfície do cilindro ceda máxima quantidade de calor à água refrigerante minimizando a penetração do calor na massa dos cilindros.⁽²⁾

Mesmo com um sistema de resfriamento eficiente, não se impede a elevação da temperatura dos cilindros durante a passagem da tira, assim, o desejável é que se entre nas faixas de controle. Para a alimentação dos sistemas de resfriamento usam-se sistemas de bombas, tubulações e bicos. O sistema de resfriamento é constituído de *headers*, montados paralelamente aos cilindros, com bicos adaptados para direcionar os jatos de água e proporcionar um resfriamento adequado. Esses jatos de água normalmente são aplicados sobre os cilindros em forma de leque, na quantidade e na distribuição necessárias.

A adoção de jatos de água de alta pressão proporciona o rompimento da camada de calefação formada sobre os cilindros passando a remover eficientemente a quantidade de calor em excesso que tenderia a se acumular nos cilindros. A adequação da distância, a orientação e inclinação dos jatos de água entre outros determinam a eficiência dos sistemas de resfriamento.

O volume e a pressão da água dependem do nível de trabalho que os cilindros executarão. Assim, em cadeiras de laminação de grande redução e velocidade periférica baixa, onde o trabalho é mais crítico, será aconselhável o emprego de maiores volumes e pressões de água. Já em cadeiras de menores reduções, menores temperaturas e maiores velocidades, as condições que se apresentam são menos críticas, o que poderá reduzir o volume e a pressão da água. As pressões utilizadas em laminadores acabadores, segundo Kerr,⁽³⁾ variam entre 8,5 kgf/cm² e 13 kgf/cm², podendo alcançar 15,5 kgf/cm².

A transferência de calor predominante no resfriamento de cilindro é a convecção forçada, pois se trata da incidência de jatos de água na superfície aquecida do cilindro. O coeficiente de transferência de calor depende da temperatura superficial do cilindro e das características do jato de água.⁽⁴⁾ Barbadillo,⁽⁵⁾ acrescenta a densidade do jato de água como item importante que afeta o coeficiente convectivo. O resfriamento de uma superfície aquecida, descrito por Shiina, Nakamura e Narita⁽⁶⁾ (Figura 1), apresenta formação de zonas distintas: zona de impacto do jato (JI), em seguida zona de nucleação de bolhas (NB), zona de transição (ZT) e filme de vapor (FV), com características distintas em termos de trocas térmicas.

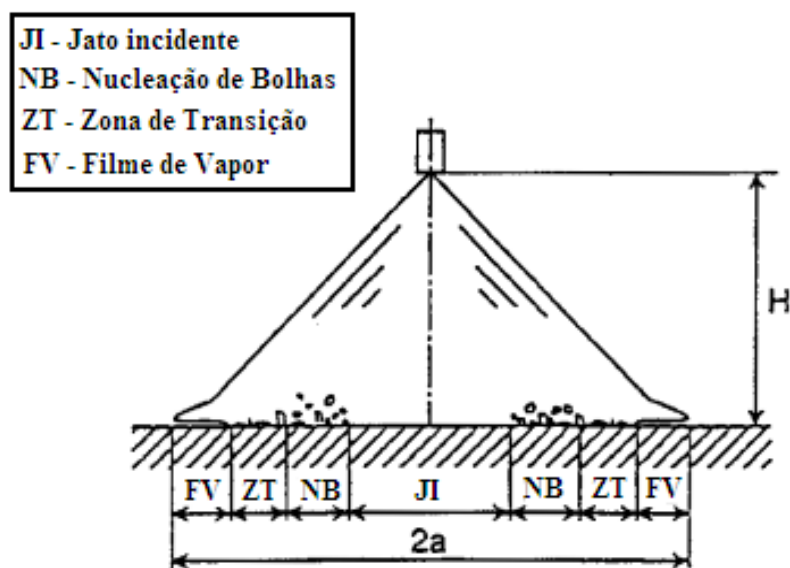


Figura 1. Características do leque durante o impacto em uma superfície quente.⁽⁶⁾

Para o estudo do comportamento térmico dos cilindros de trabalho foi construído em escala piloto um sistema de resfriamento de cilindros para simular as condições térmicas, proporcionando a aquisição de informações para fins de melhorias no sistema atual de resfriamento, compreendendo, avaliando e medindo os fenômenos da transferência de calor e com análise dos resultados de simulação, comparar bicos a serem utilizados nos headers de resfriamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 2 mostra o aparato experimental desenvolvido e montado na Oficina de Cilindros do Tiras a Quente da Usiminas – Usina de Ipatinga. É um protótipo em escala piloto de um sistema de resfriamento de cilindros desenvolvido a fim de observar os fenômenos durante o resfriamento e coletar dados para determinar o coeficiente de transferência de calor.

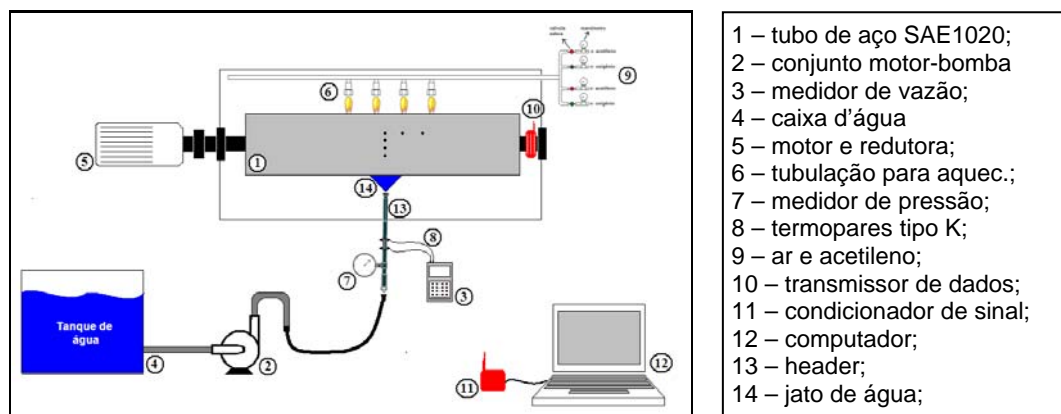


Figura 2. Perfil típico da variação de temperatura na superfície de um cilindro durante a laminação a quente de um produto plano.

O tubo de aço foi fixado em um eixo e montado sobre um tanque. O eixo foi acoplado e acionado por um sistema de redutora e motor. O header com o bico de resfriamento foi fixado na extremidade do tanque e ajustada para ficar a 90° do eixo do cilindro. Na parte contrária ao tubo do resfriamento foi montado outro tubo com os bicos para o aquecimento.

O combustível utilizado foi o acetileno com ar comprimido para o aquecimento do tubo cilíndrico. As temperaturas foram medidas através de termopares e sistema de aquisição de dados via *wireless* composto por transmissor de dados; condicionador de sinal; computador com interface wireless e software desenvolvido pelo Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico da Usiminas. Ao condicionador de sinal, foram conectados os termopares (tipo K) cujas juntas de medição foram montadas no cilindro protótipo em posições definidas.

O cilindro protótipo com dimensões de 900 mm de comprimento, diâmetro externo de 352 mm, e com parede de 16 mm de espessura, tinha as furações para os termopares conforme as Figuras 3a e 3b.

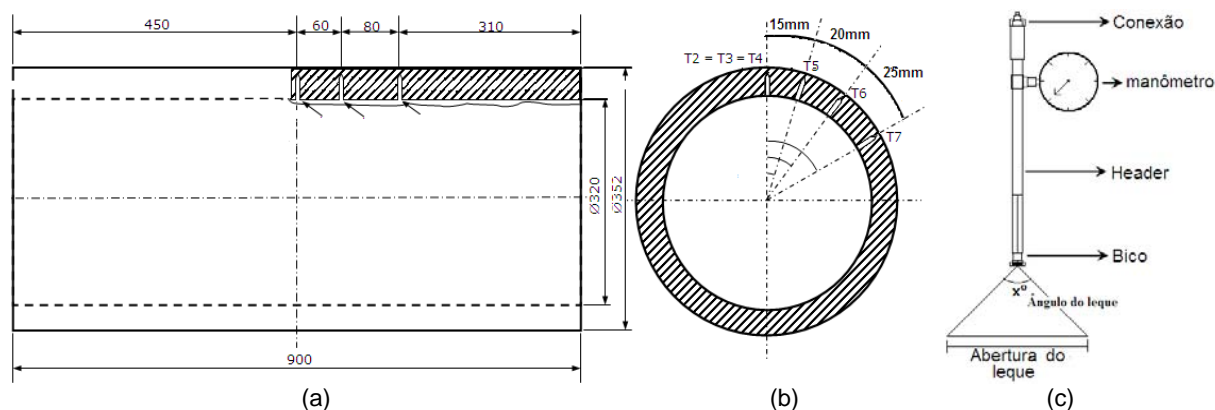


Figura 3. (a) e (b) Cilindro protótipo usado para simular um cilindro de laminação durante o resfriamento; e (c) montagem do header para os testes de resfriamento.

Durante os testes foram usados três bicos, com jatos em formato de leque (A, B e C). Os bicos usados possuem vazões diferentes numa mesma pressão e ângulos de leque diferentes 110° e 65° . Cada um foi montado em uma tubulação (Figura 3c).

2.1 Procedimento Experimental

Os experimentos consistiram em aquecer o cilindro protótipo enquanto ele girava a uma velocidade de 5 RPM. Após a temperatura do cilindro protótipo alcançar um valor superior a 300°C , o sistema motor/bomba era acionado, iniciando o processo de resfriamento. Durante todo esse processo, a temperatura era monitorada por meio dos 7 termopares.

Foram realizados 31 ciclos de aquecimento e resfriamento, com alterações nos parâmetros de pressão da água, pressão de acetileno, tipo de bico e resfriamento com e sem o aquecimento. As coletas de dados geraram curvas de “temperatura versus tempo” dos ciclos (Figura 4).

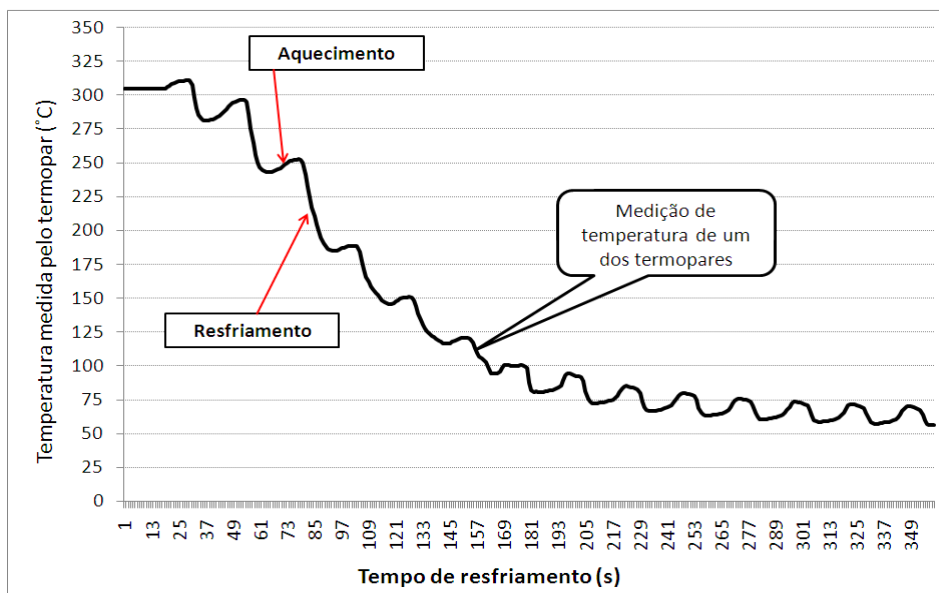


Figura 4. Temperatura medida em função do tempo em um dos experimentos realizados.

2.2 Análise Inversa de Condução de Calor

Foi realizada análise inversa de condução de calor transiente, a fim de se calcular o histórico de temperaturas e os fluxos de calor na superfície do cilindro protótipo, a partir das temperaturas medidas durante os testes. O *software* usado combina as temperaturas medidas para estimar os fluxos de calor aplicados na superfície.

Para a análise inversa de condução de calor transiente foram utilizados modelos de elementos finitos em 2D, planar, com elementos quadráticos e triangulares variando de 0,5 mm a 1 mm. O modelo foi construído a partir de uma porção do cilindro protótipo, que contemplava o posicionamento de três termopares, Tc4, Tc3 e Tc2, posicionados justamente no centro e nas extremidades dos leques formados (ângulos de 65° e 110°), conforme Figura 5.

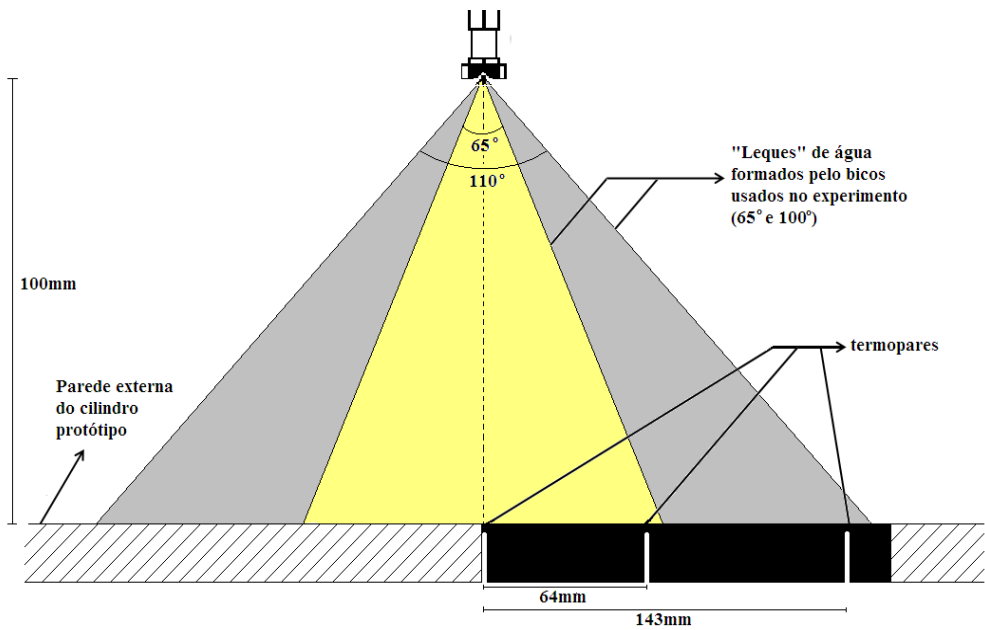


Figura 5. Essa figura representa o posicionamento dos termopares para que fiquem no centro e nas extremidades dos leques.

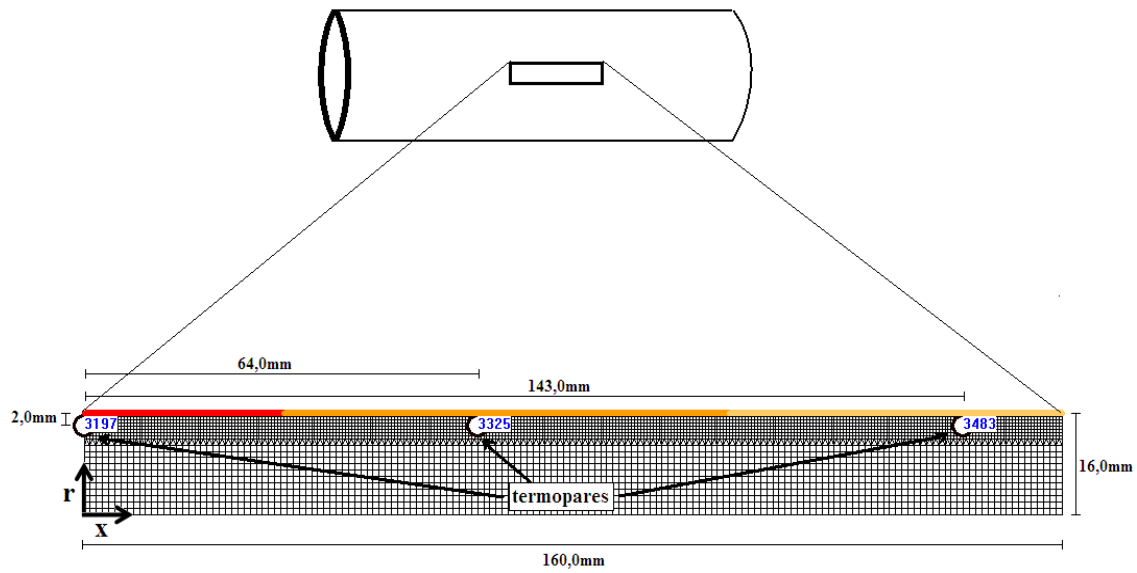


Figura 6. Modelo construído para análise inversa de condução de calor.

O detalhe da malha formada e a indicação do fluxo de calor na superfície do cilindro protótipo são mostrados na Figura 6. A malha do modelo foi constituída de 4.791 nós e 4.770 elementos quadráticos e triangulares, para uma parcela do cilindro protótipo, mostrando as três regiões de fluxo de calor na superfície do tubo e a representação nodal dos termopares.

A condição de contorno adotada foi regime adiabático nas superfícies sem incidência do jato d'água, uma vez que as quantidades de radiação e convecção para o ambiente nessas superfícies são muito menores do que na superfície de incidência do jato.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação Visual do Resfriamento do Cilindro Protótipo

Durante os testes, para avaliação visual, foram tiradas algumas fotos do local de impacto do jato de água no decorrer do processo de resfriamento do cilindro protótipo. Quanto menor a temperatura do cilindro protótipo maior a região de contato da água com o cilindro (molhamento), ou seja, mais as zonas de nucleação de bolhas e o filme de vapor se distanciavam do local de impacto do jato de água. Esse fato é mostrado em seqüência nas Figuras 7a a 7f, descrito por Shiina, Nakamura e Narita.⁽⁶⁾ Através da Figura 7a, de maneira ilustrativa, mostra-se o local de impacto com a água em contato, as zonas de nucleação de bolhas e filme de vapor.

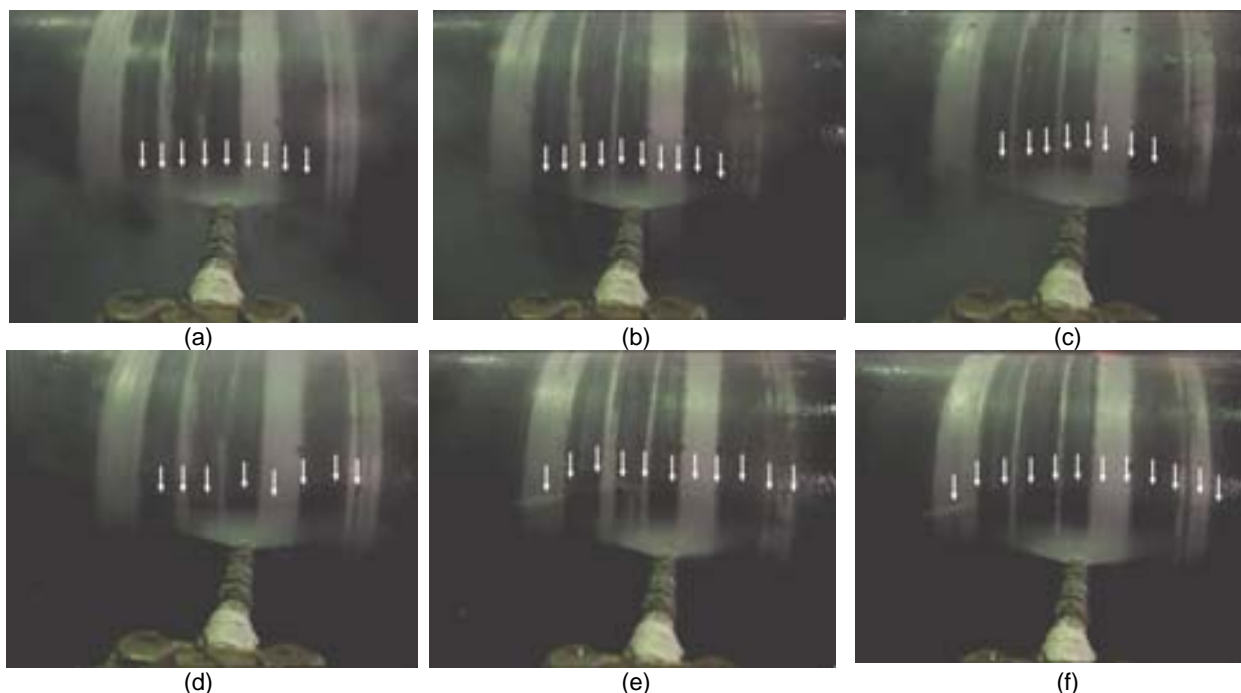


Figura 7. Fotografias do processo de resfriamento.

3.2 Avaliação da Transferência de Calor

Os valores de fluxo de calor (kW/m^2), o coeficiente de transferência de calor h ($\text{kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), a temperatura ($^\circ\text{C}$) superficial e sub-superficial foram determinadas. Foram feitas avaliações sobre a variação da pressão da água no centro do leque formado pelo bico projetor, bem como as variações em três pontos ao longo do seu comprimento, centro, meio e extremidade para a mesma pressão, e a influência do tipo de bico.

O modelo fornece as isotermas do perfil térmico da região resfriada do cilindro protótipo a partir dos resultados feitos com a análise inversa de condução de calor. As isotermas no instante de 118 segundos em um dos testes realizados são apresentadas na Figura 8. Nesse momento a temperatura da superfície do cilindro protótipo apresentou variação entre 81°C , no momento do aquecimento, e 60°C , no momento do resfriamento. Essa figura evidencia a condição em que o resfriamento e a perda de calor são maiores no centro do leque.

For time 1.18000E+002 Max Temp 85.0 node 121 —Min Temp 63.8 node 4473

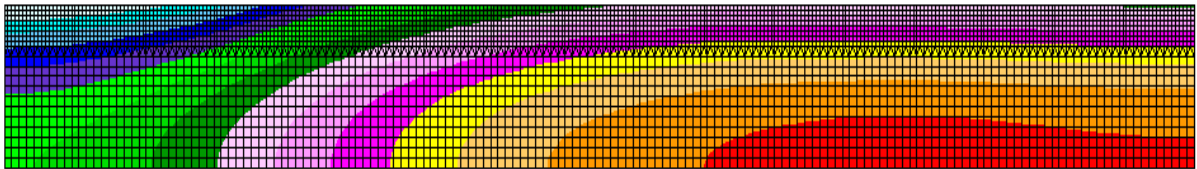


Figura 8. Isotermas no instante t = 118 s.

3.2.1 Avaliação com diferentes pressões

As análises foram feitas utilizando o bico A e variando a pressão em 2 kgf/cm²; 5 kgf/cm²; 10 kgf/cm²; 15 kgf/cm² e 19 kgf/cm², baseando-se nas medições realizadas com o termopar Tc4 posicionado no centro do leque. O reflexo da temperatura dos ciclos de resfriamento é inferior a 10 mm da superfície. Em temperaturas maiores que 200°C a variação chega a 65°C. Em temperaturas baixas essa variação é mínima, mantendo-se praticamente constante.

Confrontando as curvas de resfriamento dos testes, a diferentes pressões e considerando a curva do teste com pressão de 2 kgf/cm² como base, consegue-se o gráfico da Figura 9, considerando os 10 primeiros ciclos de resfriamento e aquecimento. Quanto maior a pressão de resfriamento maior a queda de temperatura no ponto medido. A maior diferença encontrada foi de 90,18°C utilizando pressão de 19 kgf/cm². A diferença de temperatura entre os testes realizados a 15 kgf/cm² e a 19 kgf/cm² foi mínima.

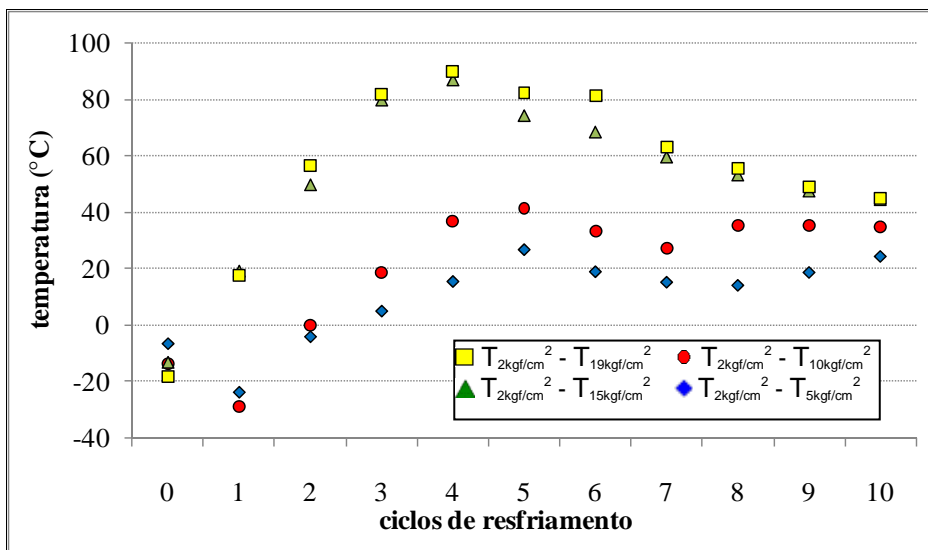


Figura 9. Diferença de temperatura entre os testes de resfriamento a diferentes pressões usando o bico A.

Os valores máximos de fluxo de calor calculados na superfície, com temperatura superficial acima de 100°C estão apresentados na Figura 10. Os resultados evidenciam que o fluxo de calor é proporcional à pressão de resfriamento.

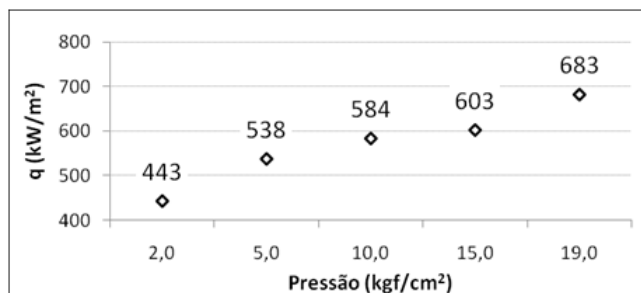


Figura 10. Valores de fluxo de calor em função da pressão.

O coeficiente de transferência de calor muda de comportamento quando a superfície atinge temperatura próxima de 100°C. Isso é explicado pelo fato de que, quando a temperatura aumenta, as bolhas na superfície são formadas mais rapidamente passando para uma região de ebulição em película onde a formação de bolhas é tão rápida que elas coalescem antes de se desprenderem da superfície. Com isso, grande parte da superfície fica coberta por uma película instável de vapor, que aumenta a resistência térmica, reduzindo o calor transferido, conforme indicado por Horský.⁽⁴⁾ Conforme Leocádio,⁽⁷⁾ o coeficiente de transferência de calor cresce até atingir a região de ebulição nucleada. A partir desse ponto, permanece constante até o início do regime de convecção forçada monofásica. Com esse regime, o coeficiente convectivo aumenta proporcionalmente à diminuição da temperatura superficial. Considerando temperaturas abaixo de 100°C tem-se que o valor médio de h varia com a pressão de acordo com o gráfico da Figura 11.

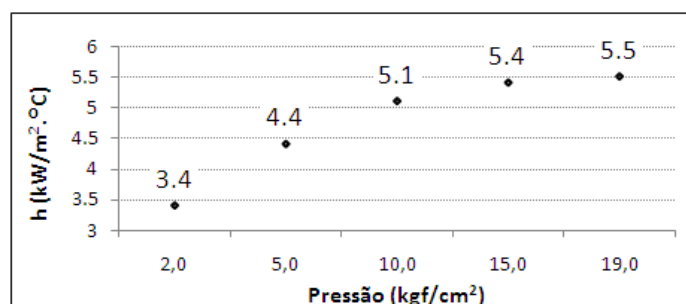


Figura 11. Valores do coeficiente de transferência de calor em função da pressão.

Esses valores estão coerentes com Liu, Finn e Ramser⁽⁸⁾ que, também aplicando análise inversa de condução de calor, encontraram valores médios de 6,50 kW/m².°C, no centro do leque, e 5,0 kW/m².°C, na extremidade do leque, a temperaturas abaixo de 95°C e com cilindro com rotação de 200 rotações por minuto. Tseng, Lin e Gunderia⁽⁹⁾ realizando experimento em um cilindro de alumínio a pressão de 13 kgf/cm² encontraram h de 6,0 kW/m².°C, na posição central do leque, na qual o bico estava posicionado a uma distância de 7 cm da superfície do cilindro.

3.2.2 Avaliação ao longo do comprimento do leque

Aqui serão apresentados os resultados de transferência de calor ao longo do comprimento do leque. Serão três pontos ao longo do alinhamento, centro (termopar TC4), extremidade (termopar Tc3) e um intermediário (termopar Tc2). Para avaliar esse parâmetro, foram considerados os resultados da transferência de calor com pressão de resfriamento de 15 kgf/cm² e bico A.

Comparando as curvas de fluxo de calor para as três regiões nos 10 primeiros ciclos de resfriamento (Figura 12), nota-se que a região do centro do leque tem uma eficiência maior a altas temperaturas, se mantendo superior comparado às outras duas regiões. Como a região do centro do leque passa por um resfriamento mais acelerado, essa região chega a temperatura próxima a 100°C num tempo menor. Fato evidenciado no ciclo 6, onde o fluxo volta a subir passando para a região de convecção em regime monofásico. As regiões Tc3 e Tc2 passam por essa transição somente no ciclo seguinte. Após o ciclo 8, os fluxos se estabilizam mantendo-se muito próximos uns dos outros. Mostra-se então que a transferência de calor na região do centro do leque é mais intensa comparada às outras regiões do leque em análise.

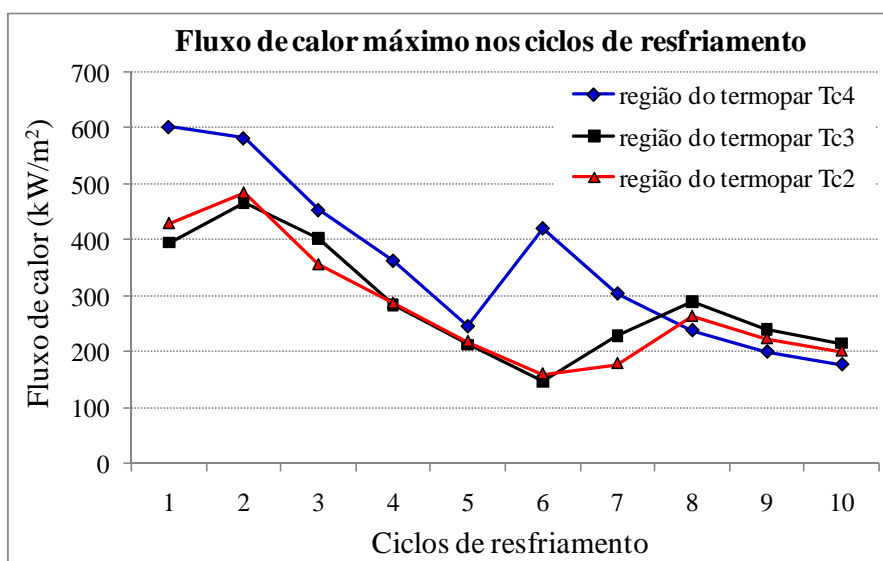


Figura 12. Fluxo de calor na superfície do cilindro protótipo com pressão de 15 kgf/cm², ao longo do comprimento do leque.

Outro fato é que quanto maior a pressão menor a diferença entre os coeficientes de transferência de calor ao longo do comprimento do leque. Shiina, Nakamura e Narita,⁽⁶⁾ utilizando uma porção de um cilindro de cobre, empregando 3 diferentes bicos com vazão de 18 l/min, ângulo de projeção de 50°, pressão de 5 kgf/cm² e distanciados a 300 mm da superfície, encontrou valores máximos dos coeficientes de transferência de calor de 8,7 kW/m².°C no centro e 1,2 kW/m².°C na extremidade do leque.

3.2.3 Avaliação com diferentes bicos

Outra análise da transferência de calor realizada nesse trabalho foi em função do tipo de bico usado durante o processo de resfriamento. Como dito anteriormente os três bicos analisados foram o A, B e C. Os bicos foram avaliados a uma pressão de 5 kgf/cm². Os dados foram coletados no centro do leque.

Utilizando como referência o bico C e analisando os 10 primeiros ciclos de resfriamento, tem-se que, no decorrer do resfriamento, a diferença de temperatura entre os testes vai aumentando até o ciclo de resfriamento 3 (bico A = 204,6°C, bico B = 154,9°C e bico C = 226,6°C) (Figura 13), chegando a uma diferença de 71°C, indicando maior eficiência na extração de calor, pelo bico B.

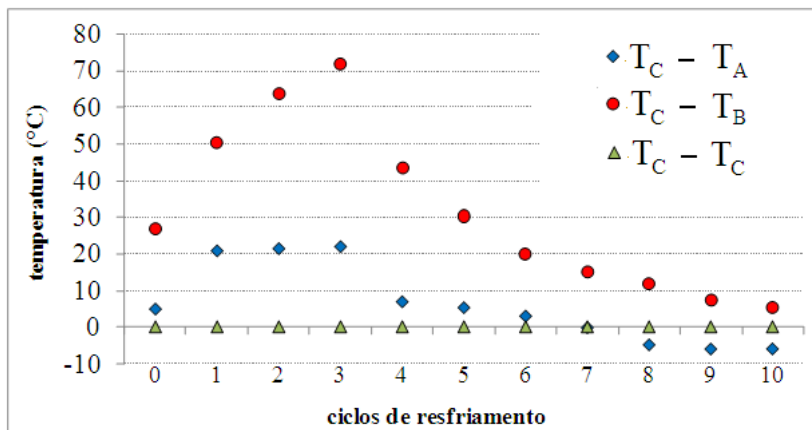


Figura 13. Diferença de temperatura entre os bicos nos ciclos de resfriamento tomando por base a curva de resfriamento usando o bico C.

As diferenças de temperaturas proporcionadas pelo bico B em relação aos bicos C e A é devido ao maior volume de água ($l/cm^2 \cdot min$) lançada pela área de projeção do bico. Os valores máximos de fluxo de calor calculados na superfície foram de $613,75 \text{ kW/m}^2$, para o bico B, de $578,01 \text{ kW/m}^2$, para o bico C, e de $538,40 \text{ kW/m}^2$, para o bico A. Esses valores mostram novamente que, através do bico B, há maior transferência de calor em comparação aos outros dois bicos testados.

Percebe-se ainda que o coeficiente de transferência de calor também tem mudança de comportamento quando a temperatura da superfície aproxima de 100°C . Fazendo-se comparativo do coeficiente convectivo para temperaturas menores que 100°C , já que nessas temperaturas não há formação de bolhas, ou seja, o regime é monofásico, os valores de h são: bico B = $6,01 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; bico C = $5,56 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e bico A = $5,23 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características da transferência de calor durante o resfriamento e aquecimento do cilindro protótipo foram experimentalmente investigadas, principalmente para avaliar as variáveis que afetam a performance do sistema de resfriamento de cilindros em um processo de Laminação a Quente. Para a análise foi usado um tubo de aço SAE1020 de 16 mm de espessura, 360 mm de diâmetro e 900 mm de comprimento, que foi aquecido à temperaturas próximas a 300°C e resfriado através de bico projetor com pressões da água variando de 2 a 19 kgf/cm^2 . Durante o processo, a tubulação de aço, girava a uma velocidade constante de 5 RPM.

Os resultados apresentados nesse trabalho evidenciaram que a transferência de calor durante o resfriamento de cilindros é sensível à pressão de jatos de água e os tipos de bicos, posição e o tipo de bico usado. Os seguintes fatos foram evidenciados durante as análises:

- a temperatura superficial influencia sobre o avanço da região molhada, modificando as condições de trocas térmicas;
- o valor máximo do coeficiente de transferência de calor em todos os testes ocorreu no regime de convecção forçada monofásica;
- o coeficiente de transferência de calor tem valor máximo do centro do jato, indicando que em um projeto de resfriamento deverá haver sobreposição das extremidades dos leques. Essa diferença no coeficiente de transferência de calor aumenta quanto menor for a pressão usado no resfriamento;

- em temperaturas maiores que 200°C, a variação pode chegar a 65°C entre a superfície e a 10 mm abaixo dela. Em temperaturas baixas essa variação é mínima, mantendo-se praticamente constante; e
- quanto maior a pressão de resfriamento maior a extração de calor e conseqüentemente maior a queda de temperatura no ponto medido. A maior diferença de temperatura encontrada comparando pressões 2 kgf/cm² e 19 kgf/cm² foi 90,18°C.

REFERÊNCIAS

- 1 WALMAG, G.; EYNDE, X. V.; SINNAEVE, M.; ERNST, E. Mechanisms of Work Rolls Degradation in HSM. 44º Seminário de laminação da ABM. Outubro, 2007. Campos do Jordão, SP, Brasil.
- 2 RIZZO, E. M. S. Processos de Laminação dos Aços: Uma Introdução. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 1-254, 2007.
- 3 KERR, E. J. Plant Visit to Usiminas-ILQT. Metallurgical Engineering Services to the Steel Industry, 2004, Ipatinga, p. 1-20.
- 4 HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M. Optimal Cooling of Rolls in Hot Rolling. Journal of Materials Processing Technology, 2002, Czech Republic, Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, p. 700-705.
- 5 BARBADILLO, J. J.; TROZZI, C. J. Mechanism of Banding in Hot Strip Mill Work Rolls. Iron and Steel Engineer. Janeiro, 1981, p. 63-72.
- 6 SHIINA, K.; NAKAMURA, S.; NARITA, K. Cooling Characteristics of an Impinging Spray Jet Which Forms an Ellipsoidal Liquid Film. Heat Transfer, Asian Research, 29 de abril, 2000.
- 7 LEOCÁDIO, H. Resfriamento de uma Placa de Aço à Alta Temperatura Por Meio de um Jato de Água Circular. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, julho de 2008.
- 8 LIU, J. C.; FINN, T. L.; RAMSER, R. A. Average Transfer Coefficient Measurement Technique for Impinging on Spray Jets on a Rotating Cylinder. Symposium on Measuring an Metering of Unsteady Flows, 1986, ASME WAM, p. 33-38.
- 9 TSENG, A. A; LIN, F. H.; GUNDERIA, A.S. et al. Roll Cooling and Its Relationship to Roll Life. Metallurgical Transactions, v.20A, p.2305-2320, Nov. 1989.