

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO AQUECIMENTO DE CILINDRO DE LAMINAÇÃO

Lira Jr, J. C., claudino@vortice.com.br¹
Henríquez, J.R., rjorge@ufpe.br¹
Dutra, J. C. C., charamba@gmail.com¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acad. Hélio Ramos s/n, Recife, Pernambuco, Brasil

Resumo: Os produtos laminados de aço carbono têm elevada importância em vários segmentos industriais, como construção civil, mecânica e agropecuária entre outros. Devido a elevada aplicabilidade, este material tornou-se o principal produto de exportação da indústria siderúrgica nacional. Para garantir a competitividade no mercado internacional, o material deve obedecer a parâmetros de qualidade e também apresentar custo de produção diferenciado. No processo de laminação os cilindros que conformam o material sofrem desgastes constantes, devido ao aquecimento contínuo provocado pelas barras. O desgaste por aquecimento interfere na vida útil do cilindro, provocando trincas e desgaste prematuro das peças. Para evitar desgastes e a substituição dos cilindros, são feitos câmbios para reposicionar o ponto de passagem das barras em processamento, porém, esta operação leva a parada total do laminador causando perdas financeiras para produção. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático para simulação numérica do processo de aquecimento dos cilindros. Em trabalhos futuros será implementado, uma análise detalhada do aquecimento em função dos operacionais como dimensões do canal de laminação, velocidade de laminação, temperatura e propriedades do fluido de refrigeração e do material que está sendo laminado. O modelo desenvolvido apresentou resultados satisfatórios para uma proposta inicial, apenas para simular o aquecimento do cilindro. Este trabalho, no futuro, servirá como base para simulação numérica das novas etapas previstas para um estudo completo do processo de laminação de rolos.

Palavras-chave: Laminação de aço, Transferência de Calor, Simulação Numérica.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um modelo para avaliação do aquecimento do cilindro de laminação em um processo de conformação contínua de barras de aço carbono a 1000°C consiste de várias etapas até a simulação completa do processo de aquecimento. Este trabalho faz parte de um conjunto de atividades desenvolvidas para analisar todas as propriedades e operações envolvidas nesse processo. Neste trabalho será apresentado um modelo matemático para simulação do processo de aquecimento dos cilindros de laminação, considerando um fluxo de calor constante na superfície do cilindro, avaliando assim a propagação do calor no interior do cilindro em função da temperatura superficial. Para manutenção da temperatura superficial das peças foi considerado um sistema de resfriamento por sprays de água a 30°C. Para descrição do problema de forma detalhada, será apresentada na figura 1 uma vista em perfil do sistema em estudo na condição real do laminador em operação.

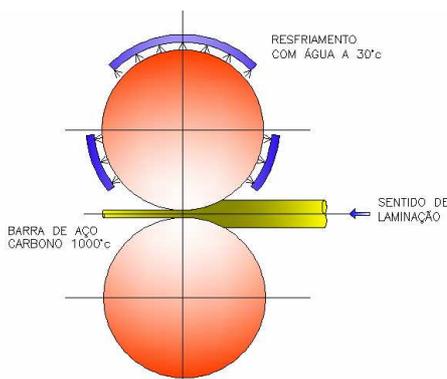


Figura 1. Sistema de aquecimento do cilindro de laminação.

O sistema proposto será modelado em três etapas. Na primeira etapa, apresentada neste trabalho, será elaborado um modelo unidimensional e transiente, para ajuste das premissas básicas, e melhor afinidade com o problema físico. Na segunda etapa será implantada a condição bidimensional e transiente do problema em estudo. Nesta etapa serão consideradas as várias condições de contorno impostas na superfície do cilindro, considerando as regiões onde serão as condições de aquecimento e resfriamento, Seguidamente na terceira etapa será considerada a terceira dimensão, onde será implementado a transferência de calor no sentido longitudinal do cilindro, também nesta etapa será considerado o efeito casca, relacionando a condição real de um cilindro encamisado.

Após estas etapas será implantado um módulo do sistema de resfriamento do cilindro através de jatos, com um sistema de refrigeração para controlar a temperatura da água. Para validação dos modelos será construída uma bancada, do sistema de aquecimento e resfriamento. No processo de aquecimento do cilindro será utilizado um queimador poroso, para simular a condição radiativa de aquecimento do cilindro, nesta análise, será considerado todo processo de combustão com gás natural. Adicionalmente serão utilizados os dados extraídos de um processo de laminação de barras com cilindros fundidos e encamisados.

O sistema de refrigeração de cilindro de laminação é de fundamental para o processo de laminação, sendo considerado um dos caminhos críticos no processo de laminação. Por se tratar de um trem contínuo a parada para cambio por desgastes de canais leva a parada total do laminador. O processo de desgaste dos cilindros pode ser atenuado quando se tem um controle da temperatura do mesmo através do processo de refrigeração. A seguir serão apresentados diversos trabalhos relacionados a sistema de refrigeração em laminação e suas especificidades.

Liu and Yanagimoto (2002) desenvolveram um método de análise numérica tridimensional para analisar a evolução da microestrutura interna e externa em um processo de conformação por laminação. O que motivou o trabalho foi a necessidade das indústrias de produzir aço de alto desempenho através de um processo, onde o tempo gasto para desenvolvimento de novos materiais fossem o menor possível. Este trabalho foi importante pois, possibilitou a realização de novos produtos laminados melhorando também a microestrutura do aço produzido. Foi verificado que a nova microestrutura, têm uma relação próxima com a mudança de temperatura e a deformação plástica no processo de laminação.

A deformação plástica também é fator que determina a precisão do produto final. A melhoria nos procedimentos de laminação relacionada à microestrutura dos produtos e acabamento final das peças necessita de tempo e custo bastante elevado para conclusão das análises. A necessidade dessas melhorias estimula o desenvolvimento de um método para análise tridimensional das deformações considerando o efeito da temperatura na evolução da microestrutura dos vários produtos laminados como folhas, barras e perfis de diferentes seções. A forma geométrica que tem influencia direta na microestrutura da peça pode ser analisada e flexibilidade a partir desta ferramenta tridimensional, possibilitando o ajuste das características desejadas, através das análises apresentadas na simulação numérica da conformação do grão.

As propriedades mecânicas são fortemente afetadas com a variação da microestrutura dos metais produzidos. Os metais de menor dimensão de grão apresentam elevada ductibilidade elevada em baixas temperaturas associada a uma elevada tensão residual. Esses aspectos reforçam a necessidade de controlar a formação do grão no processamento a quente para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais produzidos em laminadores a quente. O controle de temperatura na laminação são fatores que influenciam diretamente na qualidade do produto, garantindo assim a estrutura fina do grão nos processos de produção em escala. Esta tecnologia é amplamente utilizada nos processo de laminação a quente, que tem a fase austenítica afetada quando o material é conformado.

O estudo foi elaborado com base na integração numérica em três dimensões para prever a evolução da microestrutura do material em função da deformação plástica e da mudança de temperatura durante o processo de laminação de barras. Para elaboração do estudo foram utilizadas barras produzidas no processo de laminação a quente com 20 mm e 10 mm. A primeira foi utilizada para calibrar o modelo com uma viga tipo H do estudo. O modelo numérico do perfil H laminado a quente, analisou os efeitos do resfriamento na distribuição da microestrutura, que mostra a real importância destas informações para garantir a dureza em toda seção transversal da peça, o modelo numérico possibilita o ajuste das condições ótimas no processo de laminação.

Os resultados apresentados em cada situação proposta permitiram avaliar a evolução da microestrutura a deformação plástica em três dimensões. Também foi demonstrada a variação da temperatura da laminação de barras e outros laminadores.

Sun and Han et al. (2002), desenvolveram um modelo pelo método dos elementos finitos para previsão térmica e metalúrgica de uma barra na mesa de saída de um laminador a quente. A qualidade final do produto tal como suas propriedades metalúrgicas são bastante influenciadas pelo processo de resfriamento nas mesas de saída, com base nessa premissa muitas pesquisas são desenvolvidas com objetivo de definir o controle termomecânico dos produtos de laminação. Modelar com precisão o comportamento dos materiais é bastante complexo, pois, é necessária a integração entre os parâmetros térmicos e mecânicos do comportamento dos materiais em função da formação do grão, estudo recente identificaram a importância de uma interação da transferência de calor e a evolução das fases. Este trabalho foi composto de dois modelos, um termodinâmico e outro de transformação de fase. A interação destes dois modelos vai possibilitar uma análise em três dimensões de toda peça, possibilitando uma avaliação completa do comportamento da peça na saída da mesa de rolos.

O modelo desenvolvido permitiu avaliar os efeitos no resfriamento das peças, e no comportamento do resfriamento das peças em três dimensões em função do sistema de resfriamento implantado para o controle de

temperatura das mesmas. Também foi possível simular o comportamento metalúrgico do material em função do processo resfriamento. De forma geral o modelo se mostrou robusto para prever o comportamento do material independente das correntes térmicas envolvidas no processo de resfriamento, estas análises são favoráveis para o controle final do produto e ajustes qualitativo nas características metalúrgicas dos materiais.

Morales e Lópes et al. (1989) desenvolveram um modelo matemático para simular o comportamento dos produtos laminados sobre ação do sprays de água em um sistema resfriamento. O modelo desenvolvido possibilitou a determinação da transferência de calor na peça durante o processo de laminação. O coeficiente de transferência de calor e fatores como tipo de bico, pressão da água distancia do bico para superfície entre outros são fundamentais para determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Outros fatores também pode influenciar como a formação de bolhas na superfície das barras. Cada condição característica leva a determinação da equação experimental e do coeficiente de transferência calor. O método das diferenças finitas foi utilizado para solução das equações. As equações desenvolvidas de forma empírica, foram utilizadas para os coeficientes de transferência calor por radiação e convecção. Foram elaboradas várias simulações do resfriamento com diversos arranjos caixas de resfriamento.

Como pode ser verificado nos trabalhos apresentados, a utilização de simulação numérica em processos de laminação é uma ferramenta extremamente eficaz para melhoria da qualidade dos produtos e otimização do processo produtivo. Este estudo é parte inicial de um sistema numérico que pretende simular o processo de transferência de calor em laminador contínuo de elevado desempenho. A seguir será apresentado a modelagem numérica inicial para simulação do processo de aquecimento do cilindro.

2. MODELAGEM UNIDIMENSIONAL TRANSIENTE

Para análise do aquecimento neste trabalho será elaborado um modelo unidimensional transiente com as seguintes condições de contorno: convecção externa e variação de energia acumulada no centro do cilindro. Para o processo transiente será considerado o método explícito para interpolação no tempo, ou seja, as novas temperaturas são calculadas com base na temperatura obtida nos cálculos do tempo anterior. A seguir na figura 2 será definida a condição de contorno para os pontos centrais.

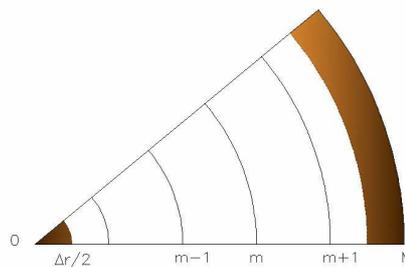


Figura 2 condição para $0 < r < M$.

Para os pontos centrais, tomando como base a equação geral da condução de calor.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Onde:

r = raio do cilindro

T = temperatura do cilindro

α = difusividade térmica

t = tempo

k = coeficiente de transferencia de calor por condução

ρ = massa específica

c_p = calor específico

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{T_{m-1}^t + T_{m+1}^t + 2T_m^t}{\Delta r} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_m^{t+1} - T_m^t}{\Delta t} \quad (4)$$

Logo:

$$\frac{T_{m-1}^t + T_{m+1}^t + 2T_m^t}{\Delta r} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_m^{t+1} - T_m^t}{\Delta t} \quad (5)$$

Reordenando os termos da equação, tem-se para os termos representando os nodos no centro do cilindro, para $m = 1, 2, 3 \dots m-1$ e $t = 0, 1, 2, \dots nt$.

$$T_m^{t+1} = c(T_{m+1}^t + T_{m-1}^t) + (1 - 2c)T_m^t \quad (6)$$

$$c = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \quad (7)$$

Condições de contorno em $r = 0$, com base nos dados apresentados na figura 3 apresentada a seguir:

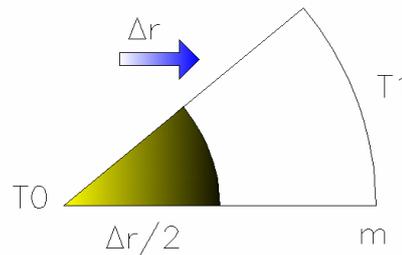


Figura 3 (Condição de contorno $r = 0$)

$$\frac{T_1^t - T_0^t}{R} = \rho c_p \Delta V \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

$$T_1^t - T_0^t = \frac{R \rho c_p \Delta V}{\Delta t} (T_0^{t+1} - T_0^t) \quad (9)$$

$$T_0^{t+1} = \frac{\Delta t}{R \rho c_p \Delta V} (T_1^t - T_0^t) + T_0^t \quad (10)$$

Onde:

$$R = \frac{\Delta r}{\pi \frac{\Delta r}{2} L k} \quad (11)$$

$$cte = \frac{\Delta t}{R\rho c_p \Delta V} = \frac{\Delta t}{\frac{\Delta r}{\pi \frac{\Delta r}{2} L k} \rho c_p 2\pi \left(\frac{\Delta r}{2}\right)^2 L} = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} = c \quad (12)$$

Logo:

$$T_0^{t+1} = T_0^t (1-c) + cT_0^t \quad (13)$$

Condições de contorno em $r = M$, com base nos dados apresentados na figura 4 apresentada a seguir:

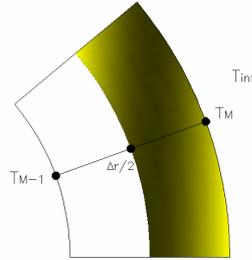


Figura 4 condição de contorno em $r = M$

Balço de energia na fronteira:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Taxa de calor} \\ \text{efluente na} \\ \text{superfície} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{acumulada} \\ \text{no volume} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{do interior} \\ \text{do cilindro} \end{array} \right) \quad (14)$$

$$hA(T_\infty - T_M^t) = \rho c_p \Delta V \frac{\Delta T}{\Delta t} + kA \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (15)$$

$$T_M^{t+1} - T_M^t = \frac{2\alpha \Delta t h \Delta r}{\Delta r^2 k} (T_\infty - T_M^t) - \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} (T_M^t - T_{M-1}^t) \quad (16)$$

$$T_M^{t+1} = \frac{2\alpha \Delta t h \Delta r}{\Delta r^2 k} (T_\infty - T_M^t) - 2c(T_M^t - T_{M-1}^t) + T_M^t \quad (17)$$

Onde:

h = coeficiente de transferência de calor por convecção

A = área do volume fundamental do cilindro.

T_∞ = temperatura do ambiente

$$c1 = \frac{2\alpha \Delta t h \Delta r}{\Delta r^2 k} \quad (18)$$

$$T_M^{t+1} = 2cT_{M-1}^t - (2c + c1 - 1)T_M^t - c1T_\infty \quad (19)$$

Para montagem do sistema de equações será feito o ordenamento dos termos das condições de contorno em $r = 0$.

$$T_0^{t+1} = T_0^t (1-c) + cT_0^t \quad (20)$$

$$\text{Em } r = M \quad T_M^{t+1} = 2cT_{M-1}^t - (2c + c1 - 1)T_M^t - c1T_\infty \quad (21)$$

$$\text{E nos nodos internos como: } T_0^{t+1} = T_0^t (1 - c) + cT_0^t \quad (22)$$

$$\text{Onde: } t = 0, 1, 2, \dots, nt \quad nt = \frac{\text{tempo}}{\Delta t} \quad i = 0, 1, 2, \dots, nr \quad nr = \frac{M}{\Delta r}$$

Logo o sistema de equações fica:

$$\begin{bmatrix} T_0^{t+1} \\ T_1^{t+1} \\ T_2^{t+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{M-2}^{t+1} \\ T_{M-1}^{t+1} \\ T_M^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-c) & c & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ c & (1-2c) & c & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & (1-2c) & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & (1-2c) & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & c & (1-2c) & c \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 2c1 & (-2c - c1 - 1) + c1T_\infty \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_0^t \\ T_1^t \\ T_2^t \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{M-2}^t \\ T_{M-1}^t \\ T_M^t \end{bmatrix}$$

A temperatura do ambiente pode variar em função das condições operacionais, ou seja, pode representar uma condição de resfriamento ou aquecimento variando o coeficiente de convecção. Para definição do coeficiente de convecção, inicialmente será definido o número de Reynolds, apresentado na equação 23 e o número de Nusselt Médio apresentado na equação 24, onde o valor é calculado através da equação empírica apresentada para valores de Reynolds variando de $10^2 < Re < 10^7$

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (23)$$

$v =$ velocidade média do fluido

$D =$ diâmetro do tubo condutor

$\nu =$ viscosidade cinemática

$$Nu = \frac{0,3 + 0,62 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0,41 Pr)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282.000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (24)$$

Com os dados numéricos apresentados, foi desenvolvido um modelo unidimensional transiente para simulação do processo de aquecimento dos cilindros, O sistema de equações gerado para cálculo da temperatura do cilindro de laminação será resolvido de forma matricial com programa MatLab, que tem habilidade para trabalhar com sistema matriciais.

3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Na simulação será considerado um cilindro de aço carbono ASTM-A-1010. Esta análise vai verificar apenas o diferencial de temperatura entre a superfície e o interior do cilindro de laminação. Também foi considerada a temperatura do ambiente de 45°C e a temperatura inicial do cilindro de 30°C. Posteriormente, conforme apresentado na figura 5, foi analisado dois tipos de materiais dos cilindros de laminação. Um de ferro fundido, bastante utilizado nas gaiolas do sistema de desbaste, que fazem os primeiros passes no processo da laminação. Seguidamente foi utilizado um cilindro de metal duro com elevado teor de cromo. Este tipo de cilindro é utilizado em laminadores de alto desempenho ou em trem de gaiolas acabadoras, no final do processo de laminação. Verifica-se que o cilindro de ferro fundido apresenta um perfil de aquecimento, que demonstra uma propagação mais rápida do calor no interior da peça, quando comparado com o de metal duro. Esta informação é importante para planejamento do sistema de refrigeração, possibilitando um controle maior da temperatura superficial do cilindro em cada condição do processo.

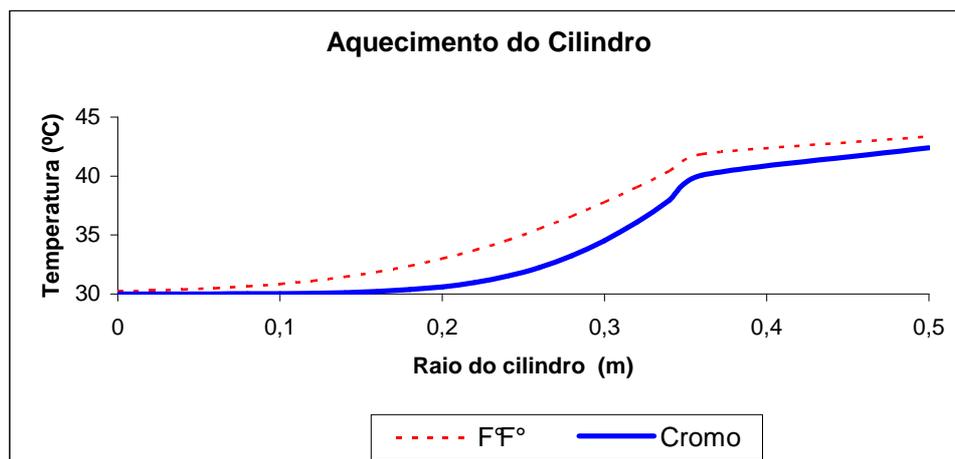


Figura 5 Simulação do aquecimento com dois tipos de materiais

A seguir será apresentado uma simulação com um cilindro de metal duro, para avaliar o perfil de aquecimento em diversos tempos de simulação. Para essa condição foi considerada a temperatura de operação da barra a ser laminada no processo 1000°C, nesta condição observa-se em 120 minutos o cilindro atinge a temperatura da barra.

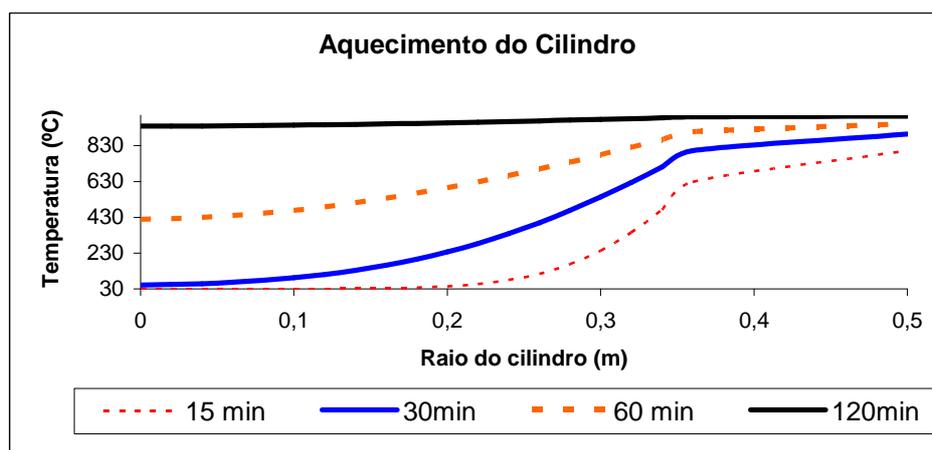


Figura 6 (Aquecimento do cilindro em processo transiente)

4. Conclusões

Apesar de existir poucos trabalhos escritos sobre os cilindros de laminação, é um tema bastante relevante no estudo da transferência de calor em processo de laminação a quente. O trabalho mesmo utilizado ferramentas simples para simulação dos processos, apresentou resultados os resultados esperados para essa primeira etapa. O resultados apresentados nas simulações indicaram o perfil de aquecimento para os cilindros de metal duro e ferro fundido Apesar da necessidade de melhorias na elaboração do programa para permitir simulações mais refinadas, o modelo desenvolvido apresentou resultados satisfatórios para um estudo inicial. Este trabalho será utilizado para composição de trabalhos futuros como a implantação de módulos complementares das dimensões do canal de laminação, velocidade de laminação, temperatura e propriedades do fluido de refrigeração, do material que está sendo laminado e também um modulo adicional se de resfriamento por jato conforme citado anteriormente. Os novos trabalhos devem considerar entre outros aspectos estudo em três dimensões, o modulo de radiação e o fornecimento de energia por deformação da barra.

5. Bibliografia

MORALES, R. D.; LÓPEZ, A. G.; OLIVARES, I. M.. Heat Transfer Analysis During Water Spray Cooling of Steel Rods. **Isij International**, Puebla México, n. 30, p.48-57, 08 out. 1989. Department of Metallurgy, ESQIE-Instituto Politécnico Nacional.

SUN, C. G.; HAN, H. N.; AL, J. K. Lee Et. A Finite Element Model for the Prediction of Thermal and Metallurgical Behavior of Strip on Run-Table in Hot Rolling. **Isij International**: Departamento de Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, 790-784, Korea. , Puebla México, v. 42, n. 4, p.392-400, 21 jan. 2002.

LIU, Jinshan; YANAGIMOTO, Jun. Three-dimensional Numerical Analysis of Microstructural Evolution in and after Bar and Shape Rolling Processes. **Isij International**: Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505 , Japan, v. 8, n. 42, p.868-875, 14 maio 2002.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NUMERICAL SIMULATION OF HEATING CYLINDER LAMINATION

Lira Jr, J. C., claudino@vortice.com.br¹

Henríquez, J.R. , rjorge@ufpe.br¹

Dutra, J. C. C. , charamba@gmail.com¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acad. Hélio Ramos s/n, Recife, Pernambuco, Brasil

ABSTRACT: *Rolled carbon steel has high importance in various industries such as construction, mechanics and agriculture among others. Because of high applicability, this material became the main export of domestic steel industry. To ensure competitiveness in the international market, the material must meet the quality parameters and also provide production cost differential. In the process of rolling cylinders which form the material suffer constant wear, due to heating caused by the bars still in process, this interferes with the wear life of the cylinder, causing cracks and premature wear of parts. To prevent wear and replacement cylinders are made to reposition the exchange crossing point of the bars in processing, however, this operation leads to a complete stop the mill causing financial loss to production. The aim of this study was to develop a mathematical model for numerical simulation of the process of heating the cylinder, thus enabling a detailed analysis of heating for different operating parameters. The model showed satisfactory results for an initial simulation of heating cilindros. This work is a basis for numerical semulation whole heating process.*

Keywords: *Rolling steel, heat transfer, Numerical Simulation.*