



## **SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE TENSÕES TÉRMICAS EM CILINDROS DE LAMINAÇÃO**

**Marcelo Fernandes Oliveira**

Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508-900 São Paulo SP  
mfoliv@yahoo.com

**Maria Regina Gomes Zoby**

Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508-900 São Paulo SP  
mrgzoby@hotmail.com

**Roberto Martins de Souza**

Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508-900 São Paulo SP  
roberto.souza@poli.usp.br

**Resumo.** *Os cilindros utilizados para o processo de laminação são submetidos a diversas solicitações causadas por variações de temperatura. Tensões residuais, por exemplo, são geradas no resfriamento sofrido pelos cilindros durante um tratamento térmico. Posteriormente, tensões térmicas surgem durante o processo de laminação, devido aos ciclos de aquecimento e resfriamento. É importante que seja feito um estudo da evolução destas tensões, com a finalidade de prevenir e evitar o surgimento de trincas e fraturas que possam prejudicar o funcionamento do cilindro ou o resultado do processo. O trabalho proposto consiste na modelagem através do “Método dos Elementos Finitos” (MEF) da evolução das tensões térmicas ao longo da seção transversal de um cilindro de laminação. Na primeira etapa do trabalho, o cilindro está inicialmente à temperatura uniforme de 600°C e livre de qualquer tensão inicial. O cilindro é então exposto ao ar para o resfriamento. Na segunda, o cilindro está a uma temperatura uniforme de 20°C, inicialmente com tensões iguais às tensões resultantes da primeira etapa. A superfície é então submetida a uma curva de temperatura cíclica que representa o aquecimento e resfriamento durante o regime de operação. Os resultados obtidos indicam tensões de sinais contrários na superfície e na parte central do cilindro. Quando em operação, o cilindro fica submetido a oscilações de tensões trativas e compressivas, com amplitudes maiores na superfície.*

**Palavras-chave:** *Tensões térmicas, tensões residuais, cilindros de laminação, método dos elementos finitos.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O Brasil se destaca como um dos poucos países do mundo que fabricam cilindros de laminação, tanto para consumo próprio, como para exportação. Nos últimos anos, devido à concorrência de países como Japão, Canadá, Estados Unidos e alguns países europeus, o mercado nacional sofre uma severa competitividade e necessita se modernizar para enfrentar o mercado externo. Como consequência desta modernização, foram feitos investimentos para detectar falhas no processo de laminação, analisar e documentar todo o processo, bem como apresentar alternativas tecnológicas que tornem essas peças mais resistentes e eficazes (Pesquisa FAPESP, 1999).

Por ser uma peça central do processo, o cilindro de laminação merece atenção especial. Sua fabricação envolve cuidados extras, que vão desde a sua usinagem, até o monitoramento constante quando em operação.

Durante sua fabricação, os cilindros de laminação são, em geral, submetidos a um tratamento térmico, com o objetivo de conferir ao produto as propriedades mecânicas desejadas. No entanto, em muitos casos, esse procedimento resulta no aparecimento de tensões residuais significativas (Stevens et al., 1971).

Posteriormente, quando utilizado durante o processo de laminação, a superfície do cilindro é aquecida devido ao contato com a chapa e resfriada quando exposta ao ar e ao fluido de refrigeração (em geral, água). O fluxo de calor da chapa para o cilindro, na laminação a quente, está predominantemente associado à temperatura da chapa, enquanto que, na laminação a frio, o atrito tem papel fundamental (Guerrero et al., 1999). Em ambos os casos, a deformação plástica da chapa se constitui em uma fonte adicional de calor durante o processo (Chang, 1999).

Quando o fluxo de calor ultrapassa certos limites, o perfil do cilindro é alterado por desgaste ou por dilatação térmica (Guerrero et al., 1999). Essa alteração do perfil reduz a vida útil dos cilindros e causa danos na laminação da chapa, provocando perdas na qualidade do processo. Em relação ao desgaste, o mesmo pode ser causado por três fatores (Stevens et al., 1971):

- abrasão da superfície do cilindro devido ao contato com a chapa;
- fadiga da superfície do cilindro causada pelas tensões mecânicas que surgem do contato com o cilindro de encosto ou com a chapa;
- fadiga térmica na superfície devido ao ciclo de temperatura ao qual é submetido.

Os dois primeiros fatores podem ser considerados como resultados inevitáveis do processo de laminação. Entretanto, o último fator pode ser controlado por alterações no processo de resfriamento do cilindro durante a laminação. A determinação de um resfriamento (e portanto de um ciclo térmico na superfície do cilindro) que gere as menores variações de tensão, pode garantir uma melhor qualidade na laminação e até mesmo prolongar a vida útil do cilindro.

Este trabalho visa uma análise da evolução da temperatura e das tensões de um cilindro que tem um ciclo térmico imposto na superfície. Para tanto, analisou-se não só as tensões térmicas geradas durante a laminação, como também incorporou-se às análises uma etapa inicial, onde calcularam-se as tensões residuais resultantes do resfriamento de um cilindro ao ar.

## 2. DESCRIÇÃO DO MODELO

Para todas as análises numéricas descritas neste trabalho, foi utilizado o programa de elementos finitos ABAQUS. Como mencionado no item anterior, as análises foram realizadas em duas etapas. A idéia da etapa inicial foi a de incorporar às análises alguns valores de tensão residual resultantes do processo de fabricação do cilindro. Entretanto, não objetivou-se incluir as tensões residuais que ocorrem devido à transformação de fase durante o resfriamento (Pacheco et al., 1997) e, portanto, fez-se a hipótese que todo o cilindro encontrava-se a uma temperatura uniforme de  $600^{\circ}\text{C}$  (livre de qualquer tensão). Nesta etapa, o cilindro foi posteriormente resfriado ao ar, com fluxo de calor ocorrendo somente através da sua superfície externa e com um coeficiente de transferência de calor  $h$  constante.

Na segunda etapa, o cilindro foi submetido a dez ciclos térmicos, onde o perfil de temperatura mostrado na Fig. 1 foi imposto como condição de contorno de temperatura para diferentes pontos localizados na superfície do cilindro. O perfil mostrado na Fig. 1 foi obtido com base nos resultados de Stevens et al. (1971), os quais instrumentaram um cilindro e monitoraram a temperatura de pontos do mesmo durante a laminação. É importante observar que a condição de contorno apresentada na Fig. 1 foi aplicada de maneira defasada aos diferentes pontos da superfície do cilindro, de forma a simular a rotação do mesmo (Lépre Neto et al., 2001). Com isso, objetivava-se simular o comportamento do cilindro em operação, com os picos de temperatura do perfil simulando o contato de diferentes pontos da superfície do cilindro com a chapa metálica aquecida.

Durante a “rotação”, a velocidade angular do cilindro foi de aproximadamente 12,8 rpm, associada a ciclos com duração de 4,7 s (Fig.1).

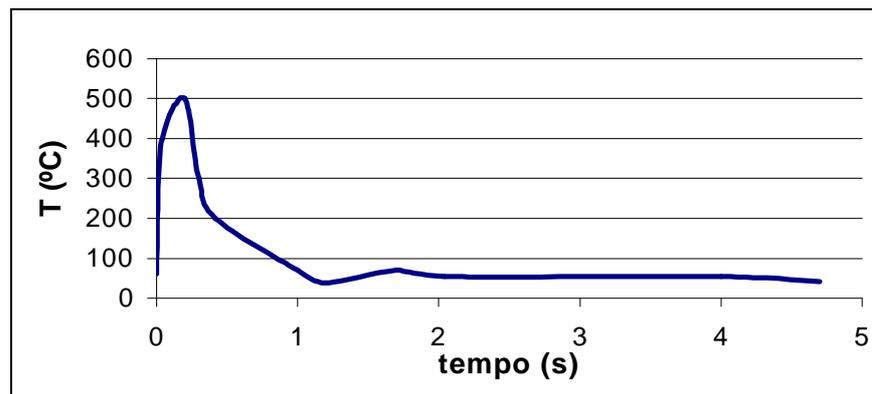


Figura 1. Perfil de temperatura de um ciclo de operação no segundo passo

As características do material utilizado durante as análises correspondem às propriedades de um aço AISI 1020 e estão dispostas na Tab. 1 (Sen et al., 2000).

Tabela 1. Propriedades mecânicas para o material utilizado na análise

Diâmetro (mm)	490				
Calor específico (J/Kg·°C)	579,7				
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	7800				
Condutividade (W/m·°C)	43,124				
Coeficiente de Poisson	0,3				
Coef. De expansão térmica (1/°C)	1,41x10 <sup>-4</sup>				
Propriedade correspondente à:	20°C	100°C	200°C	400°C	600°C
Módulo de elasticidade (GPa)	210	206	200	181	165
Módulo de plasticidade (MPa)	619	561	548	457	153
Tensão de escoamento (MPa)	256	221	216	157	63

A Fig.2 apresenta uma parte da malha utilizada em ambas as etapas das análises utilizando-se o método dos elementos finitos. Para viabilizar a simulação de giro do cilindro adotada na segunda etapa (carregamento cíclico na superfície externa do cilindro), utilizou-se uma malha bidimensional com elementos considerando estado plano de deformações (*plane-strain*). Outras características dos modelos foram raio de 245mm e malha com 384 nós e 360 elementos de quatro nós, dispostos de modo a tornarem-se menores a medida que se aproximam da periferia do cilindro, conforme indicado na Fig.2. Isto se deu em virtude da expectativa de gradientes térmicos mais severos próximos à superfície e, conseqüentemente, à necessidade de uma malha mais refinada.

### 3. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validar o modelo, alguns resultados foram obtidos e comparados com a bibliografia existente. Para verificar se a malha proposta era razoável para a análise, simulou-se o comportamento do cilindro submetido às mesmas condições descritas por Sen et al. (2000) e obteve-se o mesmo perfil de temperatura e tensão. Vale a pena mencionar que, apesar da análise feita por Sen et al. (2000) ser para uma malha com simetria ao longo do eixo de rotação do cilindro (malha bidimensional axissimétrica), os resultados podem ser comparados, desde que a seção comparada seja uma seção distante das extremidades do cilindro.

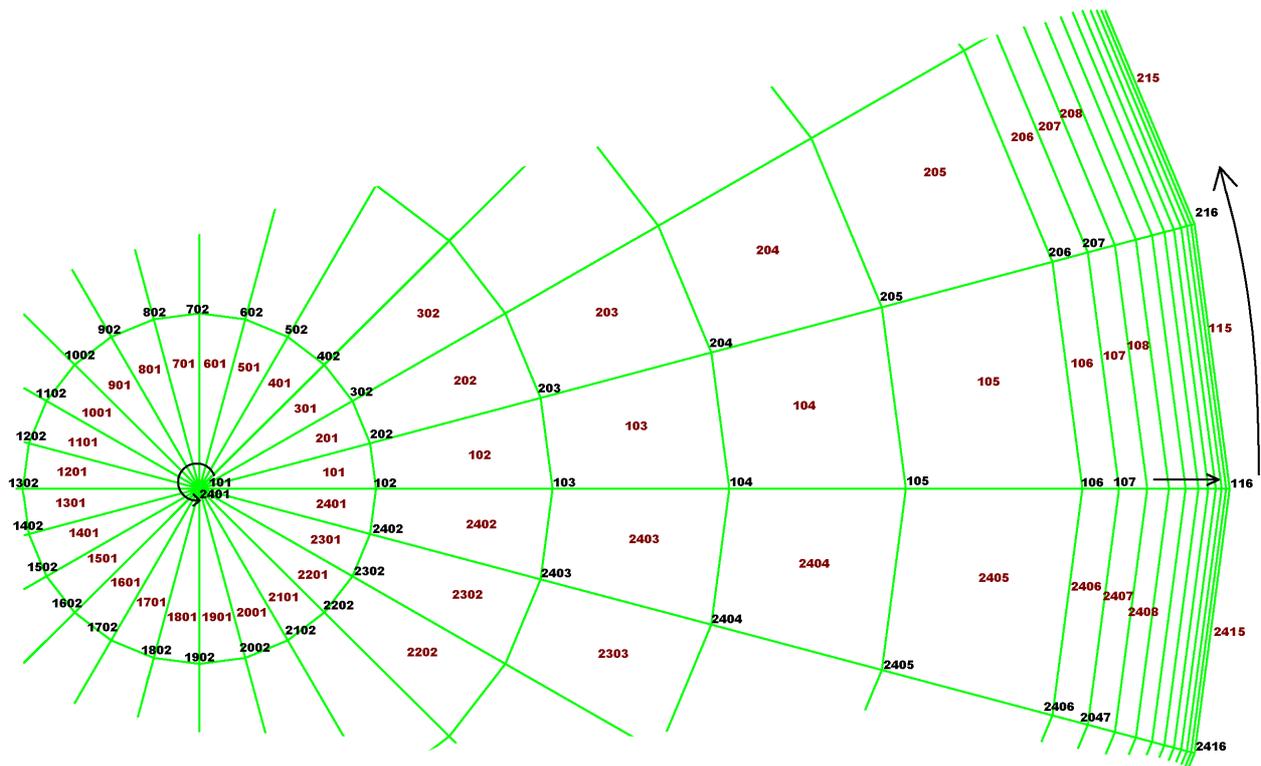


Figura 2. Malha do modelo

Para o segundo passo, ou seja, o ciclo térmico, uma primeira validação do modelo consistiu em confirmar se a temperatura dos nós da superfície do cilindro realmente obedecia ao ciclo imposto e se o perfil de temperatura nos elementos próximos à superfície era próximo ao resultado fornecido por Stevens et al. (1971). Esses resultados se mostraram coerentes e são apresentados na Fig. 3. Para nós defasados de 90°, a curva de temperatura é defasada de 1,3 segundos, o que confirma o tempo de aproximadamente 4,7 segundos por ciclo.

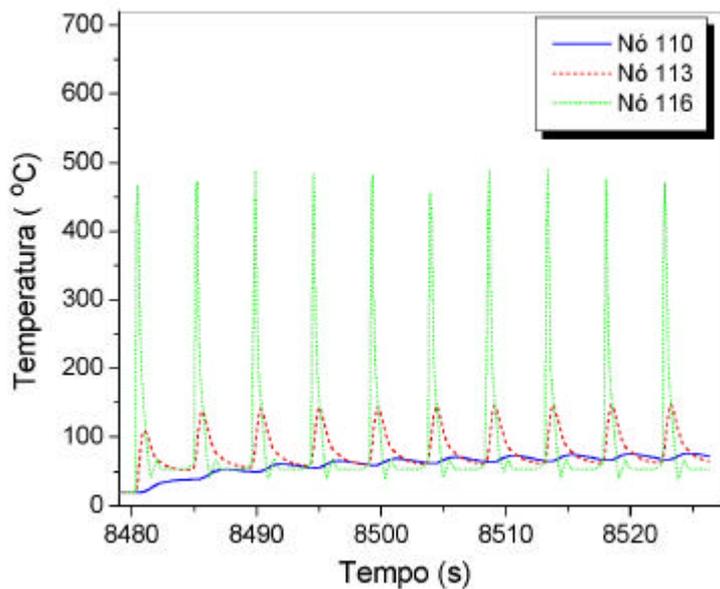


Figura 3. Evolução da temperatura ao longo de 10 ciclos térmicos. Valores apresentados para nó na superfície do cilindro (nó 116) e a 7 mm (nó 113) e 24,5 mm (nó 110) da superfície.

As tensões também apresentaram valores coerentes, sendo as curvas de tensão tangencial ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) quase iguais para todos os pontos de mesmo raio. A Fig. 4 mostra a evolução da tensão tangencial durante a segunda etapa para nós defasados de  $90^\circ$  e a uma mesma distância do centro.

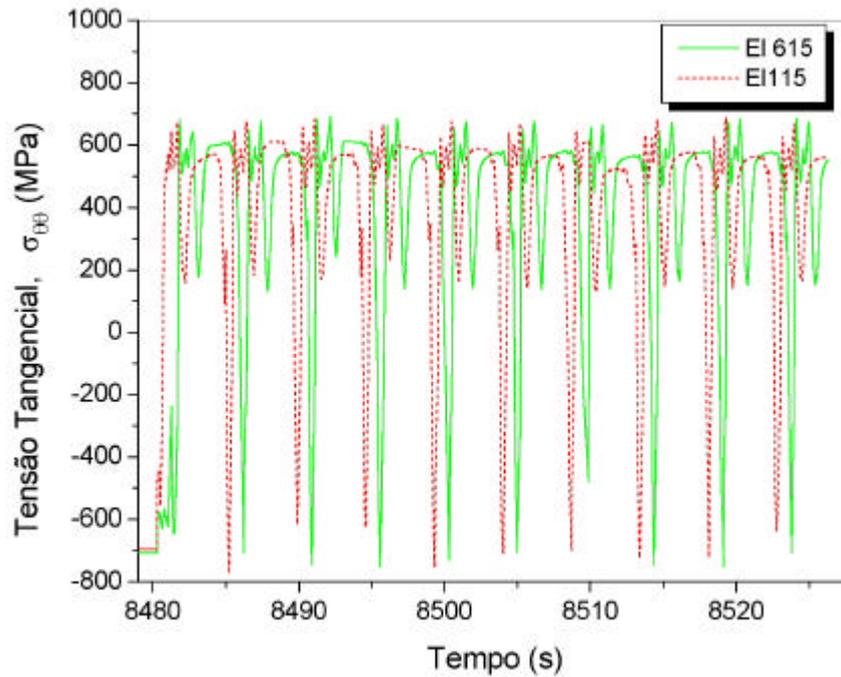


Figura 4. Tensão tangencial ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) em elementos (EI 115 e EI 615) na superfície do cilindro e defasados de  $90^\circ$ .

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho, as tensões no cilindro foram geradas na primeira etapa pelo resfriamento e, na segunda, pela dilatação e contração dos elementos devido às variações de temperatura.

A evolução da temperatura da superfície e do núcleo do cilindro está apresentada na Fig. 5, juntamente com a evolução da tensão tangencial ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) na superfície do cilindro.

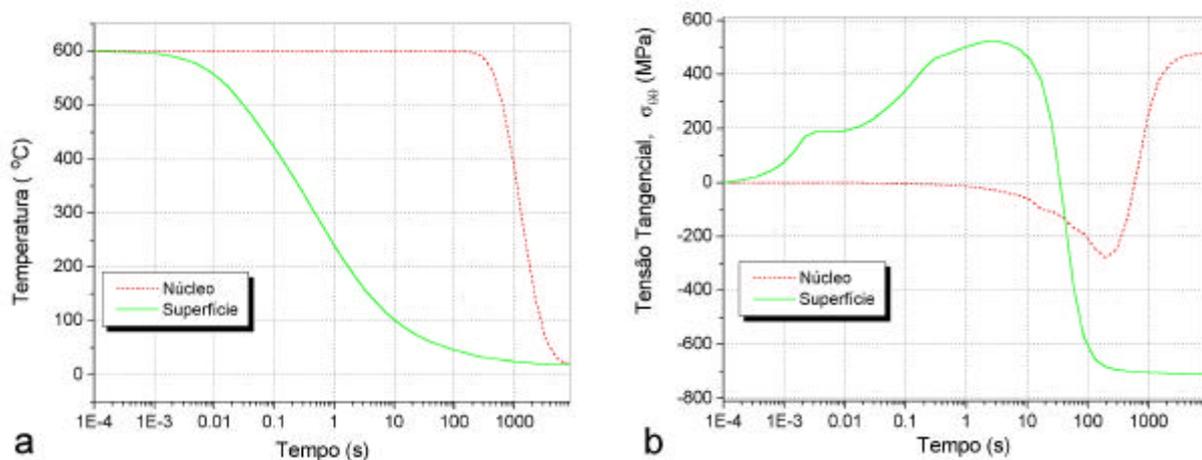


Figura 5. Distribuição da temperatura (a) e da tensão (b) no primeiro passo

Na análise de resfriamento do cilindro, pode-se facilmente identificar um resfriamento mais rápido da superfície do cilindro em relação ao núcleo (Fig. 5). Essa diferença de velocidade se deve à exposição do material à convecção externa e é responsável pelo surgimento de tensões residuais trativas no núcleo e compressivas na superfície do cilindro. O tempo total de resfriamento foi de

aproximadamente 8000 segundos. Este valor, aparentemente elevado, é devido ao grande diâmetro do modelo. Com relação às tensões, mesmo com uma variação de temperatura de apenas 600 °C, e não considerando-se os efeitos das transformações de fase, os valores de tensão foram significativos, da ordem de centenas de MPa.

Pode-se perceber através da Fig. 3 que, nos dez ciclos térmicos impostos na segunda etapa, as variações de temperatura ocorrem de maneira significativa nos nós próximos à superfície, enquanto que, a uma distância da superfície de aproximadamente 24,5 mm, a temperatura já não sofre alteração significativa em relação à temperatura inicial de 20° C. Stevens et al. (1971) descreveram a evolução térmica do cilindro com um aumento gradual de temperatura interna, ou seja, após alguns ciclos de funcionamento, o núcleo do cilindro tem sua temperatura aumentada e as variações da superfície tendem a diminuir, sendo a temperatura média superficial cada vez mais próxima da temperatura da chapa. Esse aumento de temperatura deve ser sempre muito lento e o sistema de resfriamento do cilindro deve ser capaz de controlá-lo. Para este modelo, entretanto, os dez ciclos de temperatura não foram suficientes para gerar aumento gradual nos picos de temperatura nas regiões analisadas.

A Fig. 6 mostra que, como seria de se esperar, os elementos do núcleo não sofrem alterações significativas de tensão no segundo passo (tempos maiores que 8480 segundos), sendo as tensões radial e tangencial apenas ligeiramente menores às resultantes do primeiro passo (450 MPa).

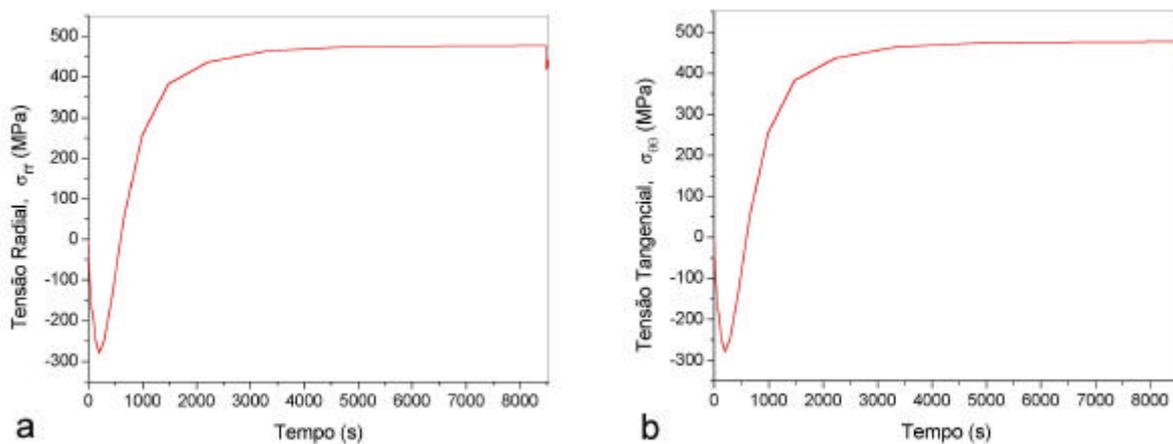


Figura 6. Tensão no centro do cilindro (El 101) ao longo das duas etapas. Tensões nas direções: (a) radial ( $\sigma_r$ ) e (b) tangencial ( $\sigma_{\theta\theta}$ )

Com relação aos elementos superficiais, a Fig. 7 mostra a evolução das tensões tangenciais calculadas para dois nós a diferentes distâncias da superfície do cilindro. Na figura nota-se que as tensões ficam oscilando entre valores trativos e compressivos ( $\pm 700$  MPa), oscilações estas, que diminuem e demoram mais a acontecer em pontos mais afastados da superfície do cilindro.

Como resultado geral desta análise, considerando-se as duas etapas em conjunto, observa-se que a fabricação do cilindro exerce fator importante sobre o comportamento do mesmo. Como indicado na etapa de resfriamento ao ar, a fabricação do cilindro pode determinar valores como os mostrados na Fig. 5, a partir dos quais passam a ocorrer e se alternar tensões térmicas trativas e compressivas nos instantes em que o cilindro é colocado em operação (Figs. 4 e 7). Os maiores danos que ocorrem em um cilindro de laminação, durante o seu funcionamento, são problemas na superfície como trincas e desgaste. Após análise dos resultados obtidos, fica claro que essa região é a de maiores variações e de picos de tensões e, portanto, as soluções para evitar os danos devem ter como objetivo reduzir esses valores, por exemplo, através do projeto de sistemas de refrigeração (durante a laminação) que minimizem a amplitude das oscilações observadas nesta etapa.

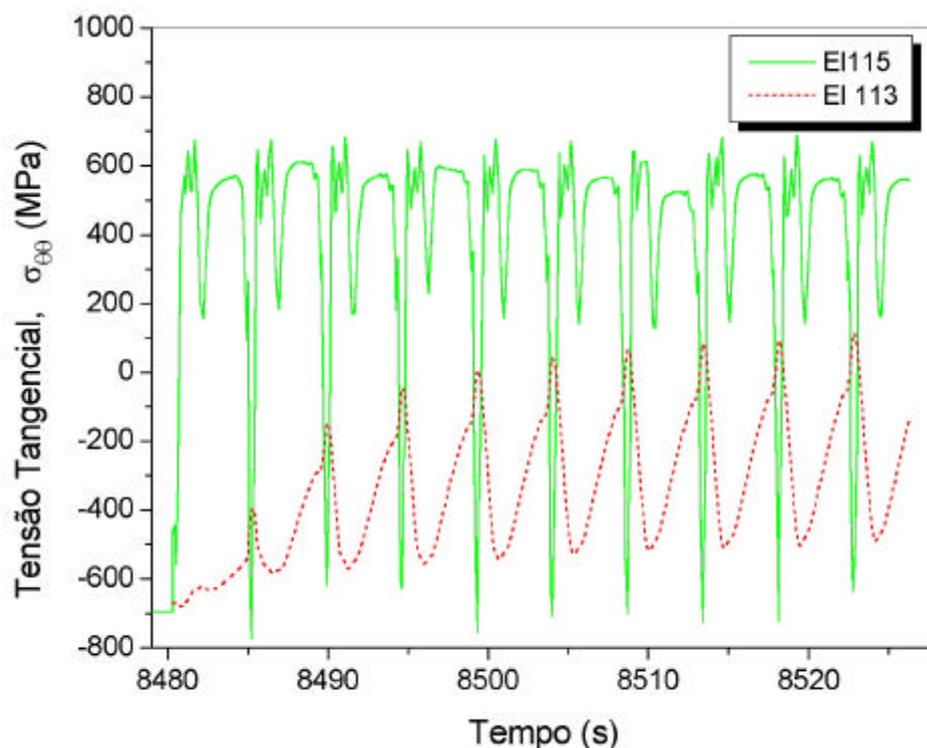


Figura 7. Tensão tangencial na superfície (EI 115) e a 7,0 mm da superfície (EI 113)

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, utilizou-se o método dos elementos finitos para calcular as tensões residuais térmicas que podem aparecer em diferentes instantes da fabricação e uso de cilindros de laminação. Os estudos indicaram que, como previamente exposto na literatura, solicitações térmicas executadas durante a fabricação podem resultar em tensões de sinais contrários na superfície e na parte central do cilindro. Posteriormente, o uso de condições do contorno que simularam a rotação do cilindro indicaram que, durante a laminação, regiões próximas à superfície do cilindro tendem a ficar submetidas a oscilações entre tensões trativas e compressivas, cujas amplitudes são maiores quanto mais próximo o ponto analisado estiver da superfície.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Aços Villares S.A. pela oportunidade de desenvolver este trabalho, e a todos que contribuíram para sua realização, em especial ao Prof. Dr. Amilton Sinatora.

## 7. REFERÊNCIAS

- Chang, D-F, 1999, “Thermal stresses in work rolls during the rolling of metal strip”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 94, pp. 45-51.
- Guerrero, M.P., Flores, C.R., Pérez, A. and Colás, R., 1999, “Modelling heat transfer in hot rolling work rolls”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 94, pp. 52-59.
- Lépoire Neto, F.P., de Mello, J.D.B. and Santos, M.B., 2001, “Numerical simulation of non conforming contact using finite element model”, *Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Tribology*, Vol. 3, Uberlândia, Brazil, pp. 282-290.

- Pacheco, P.M.C.L., Oliveira, S.A., Camarão, A.F. and Savi, M.A., 1997, “A model to predict residual stresses introduced by the quenching process in steels”, Proceedings of the 14th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Bauru, Brazil.
- Pesquisa FAPESP, 1999, “Nova geração de cilindros de aço”, Pesquisa FAPESP, v. 49., <http://www.fapesp.br/tecnolog49.htm>.
- Sen, S., Aksakal, B. and Ozel, A., 2000, “Transient and residual thermal stresses in quenched cylindrical bodies”, International Journal of Mechanical Sciences, v. 42, pp. 2013-2029.
- Stevens, P.G., Ivens, K.P. and Harper, P., 1971, “Increasing work-roll life by improved roll-cooling practice”, Journal of the Iron and Steel Institute, pp. 1-11.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

### STUDY ON THE EVOLUTION OF THERMAL STRESSES IN ROLLING ROLLS

#### **Marcelo Fernandes Oliveira**

Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508-900 São Paulo SP  
mfoliv@yahoo.com

#### **Maria Regina Gomes Zoby**

Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508-900 São Paulo SP  
mrgzoby@hotmail.com

#### **Roberto Martins de Souza**

Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508-900 São Paulo SP  
Roberto.souza@poli.usp.br

***Abstract.** The rolls used during the rolling process are subjected to different thermal loads, which result from variations of the temperature. For example, residual stresses are generated during the cooling used in heat treatments. Later, thermal stresses may arise during the rolling process itself, due to the thermal cycles characteristic of the process. It is important to conduct a study on the evolution of these thermal stresses, in order to predict and prevent the propagation of thermal cracks, which would damage the operation of the rolls or the quality of the rolled product. In this work, the finite element method was used to simulate the evolution of the thermal stresses that develop along the cross section of the rolls. Initially, in a first step, the roll was considered to be uniformly at a temperature of 600°C and without any stress. The roll was then exposed to cooling in air. In a second step, the temperature of the roll was set at 20°C, and it was pre-stressed with the stresses that resulted from the cooling step. The roll surface was then subjected to a temperature cycle, which simulated the heating and cooling during the rolling process. The results shows stresses with different sign on the surface and in the central part of the rolls. When in operation, the roll is submitted to oscillations of tractive and compressive stress, that are larger in the surface.*

***Keywords.** Thermal stresses, residual stresses, rolling rolls, temperature cycling, finite element modeling*