

# METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TENSÕES EM TUBOS DE AÇO NO PROCESSO DE RESFRIAMENTO EM UM LEITO CONTÍNUO<sup>(1)</sup>

Rodrigo Guerra Peixoto<sup>(2)</sup>  
Roberto Márcio de Andrade<sup>(3)</sup>

## Resumo

O processo siderúrgico de fabricação de tubos na Vallourec & Mannesman Tubes, V&M, é formado pelas seguintes fases: redução do minério de ferro, aciaria, lingotamento contínuo, laminação do aço e tratamento térmico de têmpera e revenimento. Esta linha é composta de dois fornos de tratamento térmico, sendo um para o tratamento de austenitização e o outro para revenimento, uma unidade de têmpera com água e, na fase final do processo, tem-se o resfriamento contínuo com ar natural. Logo após o start up da linha, surgiram os primeiros problemas de qualidade do produto processado, gerando desvios de material em função dos empenamentos dos tubos processados na fase final do resfriamento. Este trabalho apresenta a uma metodologia teórica para análise do campo de tensões térmicas em tubos de aço sem costura, geradas durante o processo de resfriamento em leito contínuo durante o processo de revenimento. Após a implementação deste trabalho é possível um levantamento de dados e parâmetros que permitam identificar a possível faixa de temperatura onde se inicia o processo de empenamentos dos tubos dentro do leito de resfriamento.

**Palavras-chave:** Tensões térmicas; Resfriamento lento de tubos; Leito contínuo.

---

<sup>(1)</sup> Trabalho a ser apresentado no 60º Congresso Anual - ABM - 2005, de 25 a 28 de julho de 2005, local: Minas Centro - Belo Horizonte - MG - Brasil.

<sup>(2)</sup> Bacharel em Física, Graduando em Engenharia Mecânica pela UFMG.

<sup>(3)</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre, Doutor, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo siderúrgico de fabricação de tubos na Vallourec & Mannesman Tubes, V&M, é formado pelas seguintes fases: redução do minério de ferro, aciaria, lingotamento contínuo, laminação do aço e tratamento térmico de têmpera e revenimento, que consiste no aquecimento e resfriamento controlado do material laminado, conferindo-lhe características e propriedades especiais.

No processo de têmpera, o tubo é aquecido a uma temperatura acima da temperatura final de transformação austenítica e depois resfriado rapidamente com água, obtendo-se, assim, uma estrutura martensítica. No processo de revenimento, o tubo é aquecido a uma temperatura inferior à temperatura de início de transformação austenítica, seguida de resfriamento lento e ao ar livre em leito contínuo. Nesta fase, o aço adquire uma estrutura de martensita revenida.

Durante o processo de resfriamento pode ocorrer uma distribuição não homogênea de temperatura ao longo do tubo. Esta não-homogeneidade no perfil transiente de temperaturas gera tensões residuais no tubo, que podem exceder o limite de escoamento do material, gerando deformações plásticas (empenamento). Para retornar à forma original, os tubos são submetidos, individualmente, a um processo de desempenamento, o que gera redução considerável da produtividade.

O controle do processo de resfriamento pode evitar a geração de tensões além do limite de escoamento, evitando-se assim o empenamento das peças. Além do conhecimento detalhado do processo de resfriamento, é necessário correlacioná-lo à geração de tensões por efeitos térmicos. Conhecida a distribuição de tensões térmicas ao longo do processo de resfriamento, é possível identificar os gradientes de temperatura que provocam a deformação plástica e, desta forma, determinar as condições de contorno térmicas que minimizem a geração de empenamento. Com isso, soluções para a melhoria do controle processo poderão ser propostas visando aumento da qualidade do produto final.

Diversos trabalhos na literatura tratam, de forma detalhada, dos processos de aquecimento de tubos em fornos contínuos, SILVA, L. B et al (1996), SILVA, R. J. et al (1999<sup>a</sup>), SILVA, R. J. et al. (1999<sup>b</sup>). Porém, um número reduzido de publicações aborda o processo de resfriamento, DAMASCENO, J (2004). MACKERLE, J (2003), apresenta uma vasta revisão sobre análise teórica dos processos de tratamentos térmicos. Porém, somente duas referências envolvendo estudos em tubos são citadas.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia teórica para análise do campo de tensões térmicas em tubos de aço sem costura, geradas durante o processo de resfriamento em leito contínuo após o processo de revenimento.

## 2 METODOLOGIA

O leito de resfriamento contínuo da V&M do Brasil é formado por um conjunto de trilhos paralelos, sobre os quais desliza a carga impulsinada por um sistema de suportes móveis que carregam os tubos até o próximo leito, retornando a posição inicial com a ajuda de esteira rotativa, fechando-se, assim, o ciclo, Figura 1.



Figura 1. Leito de resfriamento contínuo da V&M do Brasil.

## 2.1 Modelo Matemático

O modelo matemático desenvolvido é baseado na Equação de Navier, Equação 1, para corpos elásticos que obedecem a Lei de Hooke, num regime de pequenas deformações, (MAL, et al, 1991).

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu(\nabla^2 \mathbf{u}) + \mathbf{f} - (3\lambda + 2\mu)\alpha\nabla(\Delta T) = 0 \quad (1)$$

Esta equação é obtida a partir de considerações de equilíbrio mecânico, relações entre o tensor de deformações e o campo de deslocamentos, relações constitutivas e de compatibilidade desenvolvidas da teoria da elasticidade. Neste caso,  $\lambda$  e  $\mu$  são propriedades do material, conhecidas como constantes de Lamè.  $\mathbf{u}$  é o campo de deslocamentos,  $\mathbf{f}$  é o campo de forças externas,  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica do material e  $\Delta T$  é a função de variação de temperaturas.

No modelo desenvolvido, o campo de forças externas é considerado nulo em todo o domínio e não há nenhum tipo de restrição aos deslocamentos nas superfícies externas do tubo.

Num material isotrópico, que apresente comportamento elástico linear, num regime de pequenas deformações, um determinado ponto sofre deformações normais, de valor numérico idêntico, em três direções perpendiculares entre si, Equação 2. Desta forma, todas as componentes cisalhantes do tensor de deformações, devido à variação de temperatura apenas, são nulas, i.e.,

$$\boldsymbol{\varepsilon}_T = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

A relação entre a deformação e o campo de temperatura é dada pela Equação 3:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \alpha(\Delta T) \quad (3)$$

Tomando um corpo material com diferentes variações de temperaturas em pontos distintos, deformações cisalhantes surgem e o modelo matemático torna-se mais complexo. Entretanto, conhecendo-se o valor do tensor de deformações em

cada ponto do domínio, pode-se obter os tensores de tensões correspondentes, através de relações constitutivas, que envolvem propriedades do material.

No caso de materiais homogêneos e isotrópicos, apenas dois parâmetros, como os coeficientes de Lamè  $\lambda$  e  $\mu$ , devem ser conhecidos, para a determinação completa da matriz constitutiva que relaciona os tensores de tensões e de deformações. Em termos matriciais, esta relação pode ser representada pela Equação 4.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (4)$$

No primeiro termo da Equação 4, estão representadas as três componentes normais e as três componentes cisalhantes do tensor de tensões. No membro da direita, o primeiro termo representa a matriz constitutiva em função dos coeficientes de Lamè e o segundo termo, apresenta as componentes normais e cisalhantes do tensor de deformações lineares.

Esta matriz constitutiva pode ser reescrita em termos do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do material, fazendo-se as seguintes substituições.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

onde E é o módulo de elasticidade e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

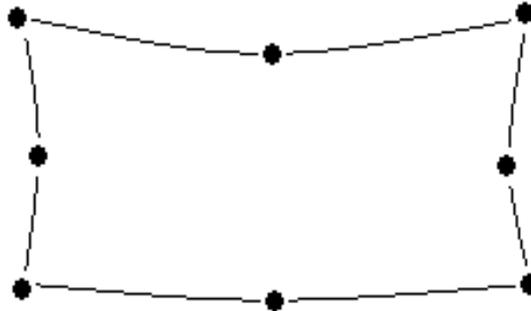
## 2.2 Discretização por Elementos Finitos

As equações da elasticidade são resolvidas numericamente, através do Método dos Elementos Finitos, utilizando-se um pacote comercial. O perfil transiente de temperaturas, obtido experimentalmente por DAMASCENO (2004), foi considerando como carregamento térmico. Com isso, desenvolveu-se uma análise mecânica linear para a obtenção da distribuição de tensões.

Foi construída uma representação tridimensional de um tubo de aço sem costura, com 13200 mm de comprimento, 244,5mm de diâmetro externo e 11,05 mm de espessura, que correspondem as dimensões do tubo estudado por DAMASCENO (2004).

Na discretização por Elementos Finitos, utilizou-se elementos de casca retangulares de 8 nós, como mostrado na Figura 2. Como o elemento é de casca, a espessura não é notada na ilustração e entra como um de seus parâmetros, apenas para efeito de cálculo.

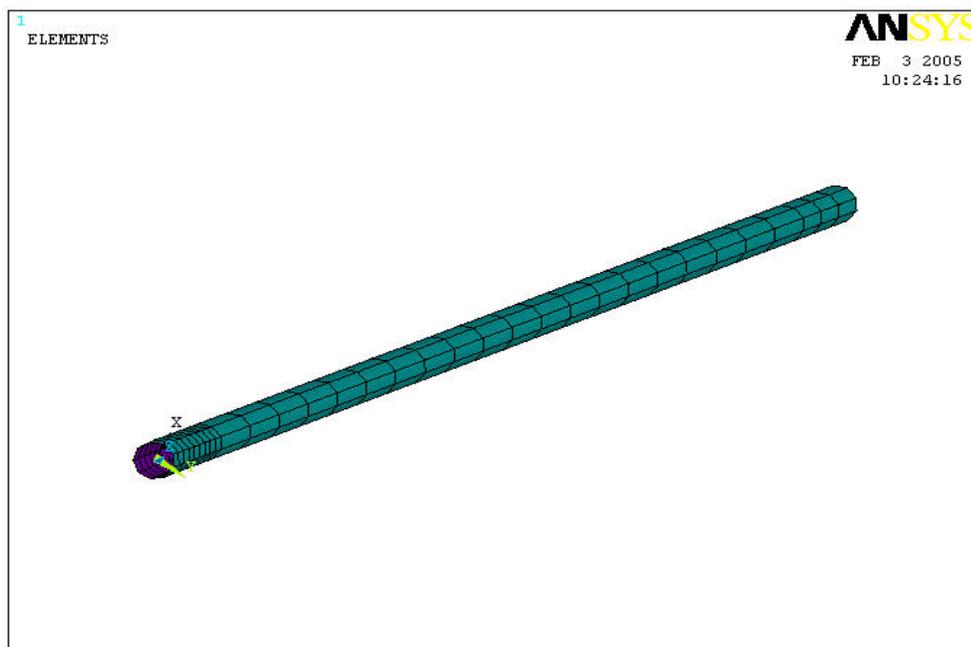
O modelo final atingiu 288 elementos e 822 nós, com 6 graus de liberdade cada (deslocamentos em três direções cartesianas e rotações em torno dessas regiões).



**Figura 2.** Elemento de casca com 8 nós.

Como os dados experimentais disponíveis restringiam-se a poucos pontos do tubo, foi realizada uma interpolação bidimensional, obtendo uma melhor descrição do perfil transiente de temperaturas. Desta forma, em cada vértice de elemento representado na Figura 3, pode-se aplicar uma variação de temperatura ao longo do tempo.

Com este carregamento térmico, a distribuição de tensões no tubo, ao longo do tempo, foi determinada. Utilizou-se um módulo de elasticidade de 205 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,29. Como coeficiente de dilatação térmica, adotou-se  $12,8E-6 \text{ K}^{-1}$ .



**Figura 3.** Tubo com a malha de Elementos Finitos

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de tensões equivalentes de Von Mises foi obtida para os instantes 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 45 e 60 minutos após o início do processo de resfriamento. As Figuras 4 a 7 ilustram alguns destes resultados. Na Tabela1, são apresentados os resultados de tensões equivalentes máximas obtidas.

Os dados experimentais utilizados referem-se a um processo de resfriamento de um tubo de aço sem costura, após um determinado tratamento térmico ter sido realizado. Assim, o tubo é resfriado de temperaturas que giram em torno de 400°C até temperaturas próximas à temperatura ambiente. Este resfriamento não ocorre de forma homogênea espacialmente e nem ao longo do tempo, o que gera tensões residuais.

Como o objetivo deste trabalho se restringia ao desenvolvimento de uma metodologia para estudar este tipo de processo, valores a temperatura ambiente para as propriedades do material, exceto para o coeficiente de dilatação térmica, foram utilizados.

É notório que, para o caso assumido como referência, o período que intercala os 5 e os 20 primeiros minutos de resfriamento é o mais crítico. Se algum tipo de deformação plástica vier a ocorrer, é provável que seja dentro deste intervalo de tempo. Entretanto, uma análise mais aprofundada do problema deve ser feita posteriormente.

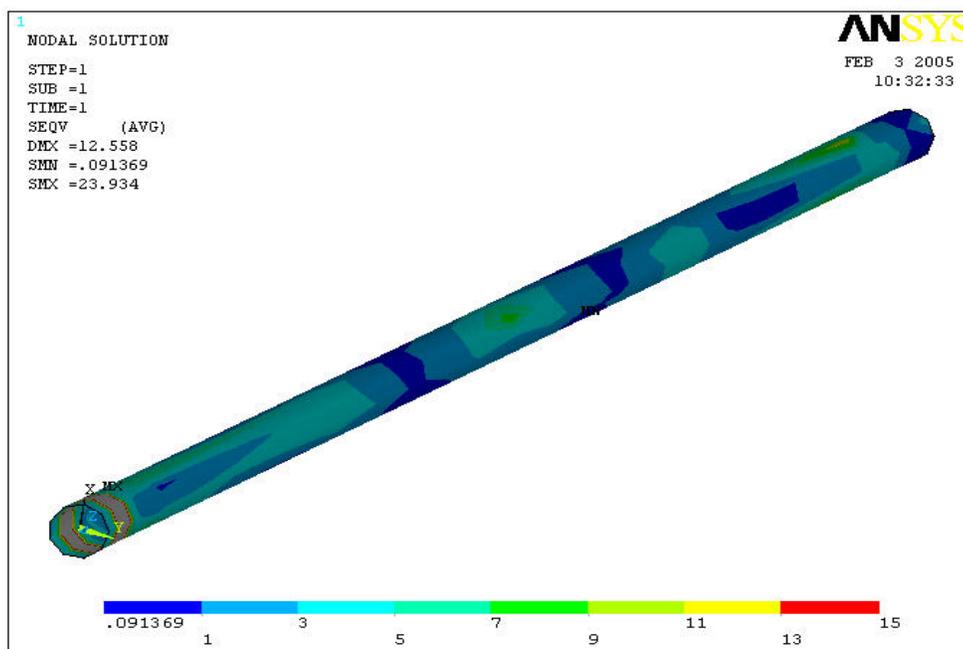


Figura 4. Distribuição de tensões após 5 minutos de resfriamento.

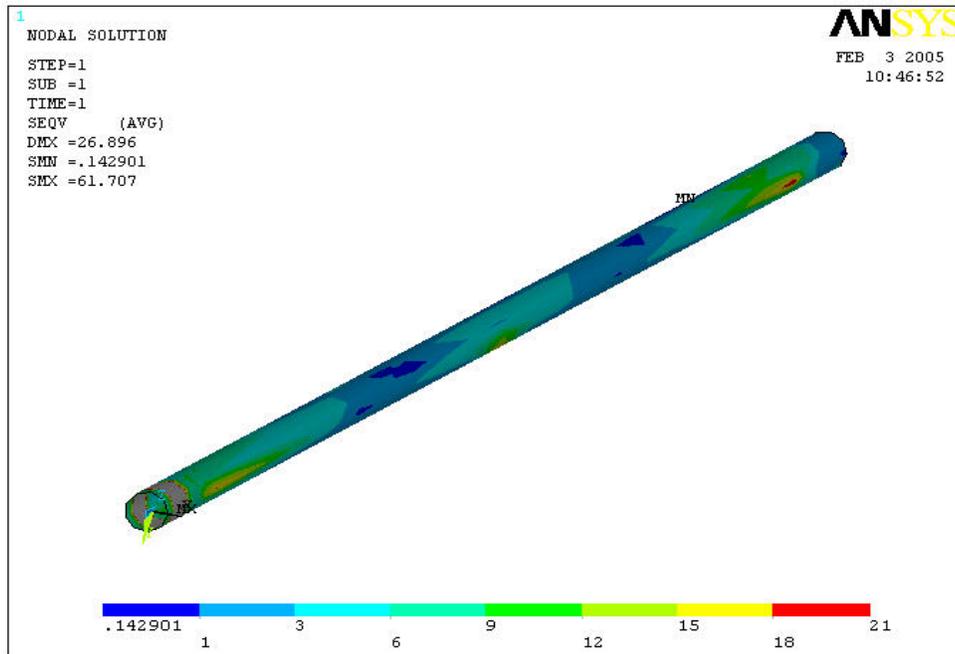


Figura 5. Distribuição de tensões após 15 minutos de resfriamento.

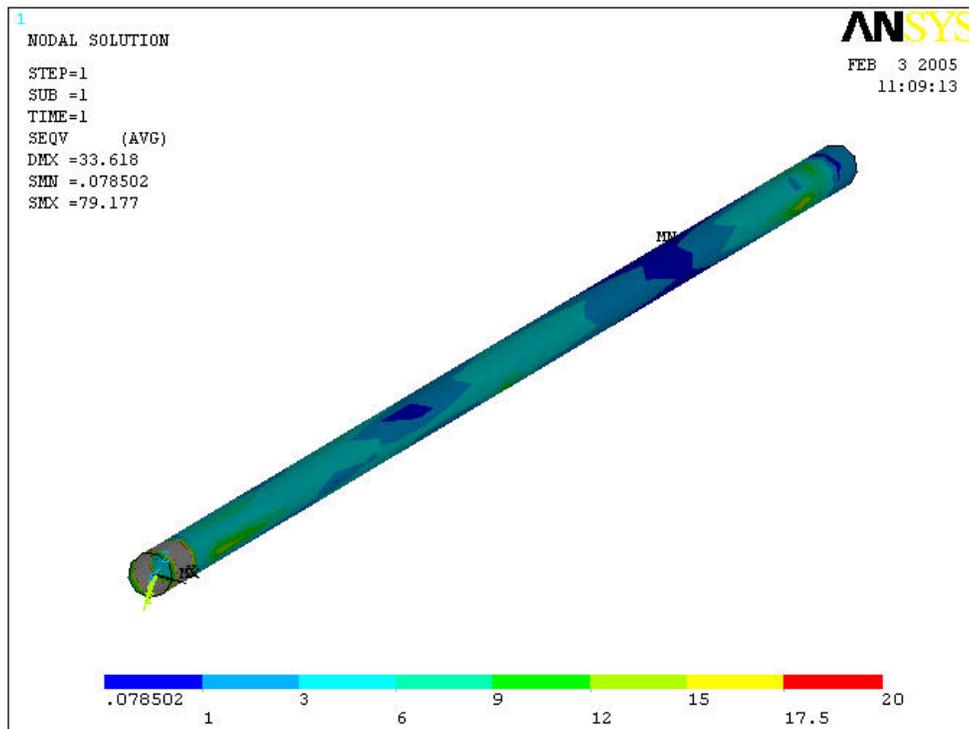
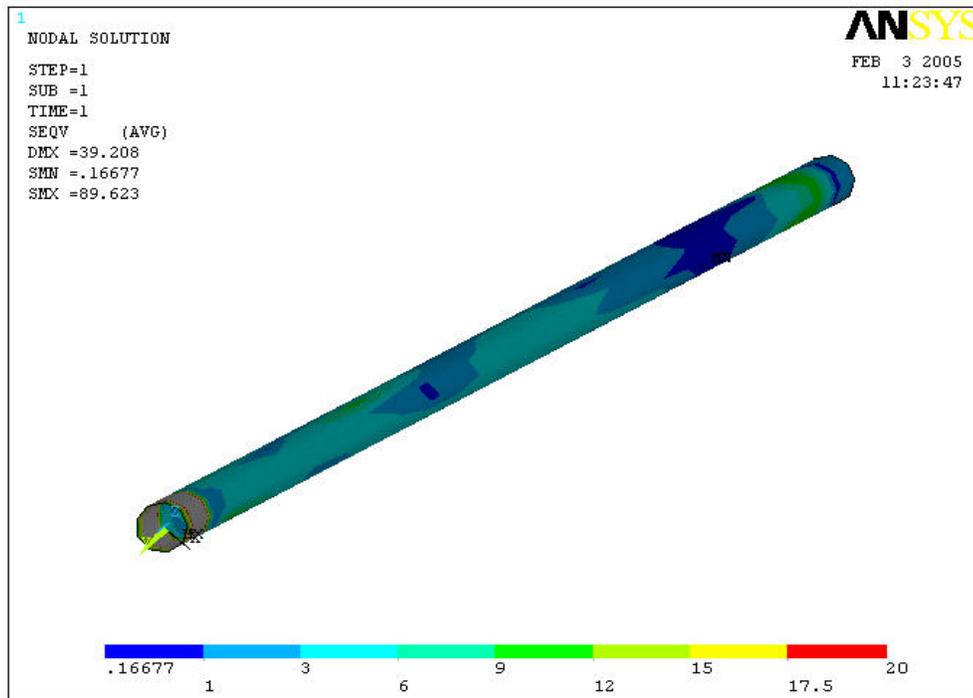


Figura 6. Distribuição de tensões após 30 minutos de resfriamento.



**Figura 7.** Distribuição de tensões após 45 minutos de resfriamento.

**Tabela 1.** Tensões equivalentes máximas.

Tempo de resfriamento (minuto)	5	10	15	20	25	30	35	45	60
Tensões equivalentes máx. (MPa)	<11	~18 a 20	~18 a 21	~15 a 18	~12 a 15				

## 5 CONCLUSÕES

Foi desenvolvida uma metodologia teórica para análise do campo de tensões térmicas em tubos de aço sem costura, geradas no processo de resfriamento em leito contínuo durante o processo de revenimento.

Foi desenvolvido um modelo matemático tridimensional, baseado na Equação de Navier para corpos elásticos que obedecem a Lei de Hooke, num regime de pequenas deformações. A solução do modelo foi obtida através de uma discretização por Elementos Finitos, utilizando-se elementos de casca retangulares de 8 nós, totalizando 288 elementos e 822 nós, com 6 graus de liberdade cada.

O perfil transiente de temperaturas, obtido experimentalmente da literatura, foi considerado como carregamento térmico. Porém, em nenhum momento da análise, os resultados de tensões obtidos ultrapassaram os valores dos limites de escoamento encontrados na literatura, para aços comuns, a temperatura ambiente. De fato, o tubo analisado por DAMASCENO (2004) não sofreu empenamento.

Como os dados experimentais são escassos e apenas um tubo foi monitorado, torna-se interessante o estudo dos processos convectivos e radiativos nas superfícies externas do tubo, ao longo do processo de resfriamento, para a obtenção das condições de contorno apropriadas para uma nova análise numérica. Com isso um campo de temperaturas mais genérico e que envolva a questão do empenamento pode ser obtido.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Vallourec Mannesmann, pela oportunidade para realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS

1. ANSYS Release 5.7, 1997.
2. Damasceno, J. ; Modelagem Física, em Escala Real, do Processo de Resfriamento de Tubos em um Leito Contínuo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, 2004
3. MAL, A.K, SINGH, S.J. Deformation of Elastic Solids, Prentice Hall, 1991.
4. Mackerle, J.; Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes A bibliography (1976–2001). Computational Materials Science 27 313–332, 2003
5. Silva, L. B. e Ziviani, M.; Modelamento matemático do aquecimento de barras cilíndricas em um forno de soleira rotativa. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas/ VI Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor y Matéria, Anais..., p.395-400, Florianópolis, 1996.
6. Silva, R. J., Ziviani, M., França, G. C. e Magalhães, C. V.; Determinação experimental do perfil de temperatura de tarugos de aço durante seu aquecimento em forno rotativo. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Anais... (em CD-ROM), Águas de Lindóia, 1999a.
7. Silva, R. J., Ziviani, M., França, G. A C. e Magalhães, C. V.; Validação do modelo matemático do aquecimento de tarugos de aço em um forno rotativo. In: IV Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Anais... ( em CD-ROM), Santiago, 1999b.
8. STASA, F.L. **Applied Finite Element Analysis for Engineers**, Saunders College Publishing, 1985.

# A METHODOLOGY FOR STRESS ANALYSIS OF STEEL TUBES DURING COOLING PROCESS ON CONTINUOUS COOLING STATIONS <sup>(4)</sup>

*Rodrigo Guerra Peixoto<sup>(5)</sup>  
Roberto Márcio de Andrade<sup>(6)</sup>*

## **Abstract**

The continuous heat treatment process of Vallourec & Mannesmann Tubes started in September 2001, with a throughput of 8 to 40 pipes/hour, on sizes ranging from 88.9 mm to 355.6 mm diameter and 6 to 14 meters in length. This line is made up of 2 (two) heat treatment furnaces, one for austenitizing and the other for tempering, one unit for quenching with water, and at the final stage of the process the material is cooled down by means of natural air. Soon after the line startup, the first problems related to the quality of the product processed arose, therefore, causing material deviation due to warping of the processed pipes at the last stage of the cooling process. This paper presents the theoretical analysis methodology of the thermal stress in steel pipe cooling process during tempering and the phases of the experiment developed during the on-line production process. After the implementation of the present study, it was possible to carry out data and parameter survey, which will help identify the possible temperature range within which the pipe warping process takes place in the cooling station.

**Key-words:** Thermal stress; Slow cooling process; Continuous cooling station.

---

<sup>(4)</sup> Paper present to 60th Annual Congress - ABM - 2005 , 25 to 28 of July of 2005, Minas Centro – Belo Horizonte - MG - Brazil

<sup>(5)</sup> Physicist, Student of Mechanical Engineering UFMG.

<sup>(6)</sup> Mechanical Engineer, M. Sc., Dr., Professor of Mechanical Engineering Department of UFMG.