

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DO TUBO SEM COSTURA<sup>1</sup>

*Frederico de Castro Magalhães<sup>2</sup>  
Maria Teresa Paulino Aguiar<sup>3</sup>  
Antônio Eustáquio de Melo Pertence<sup>4</sup>  
Haroldo Béria Campos<sup>4</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>5</sup>*

## **Resumo**

No processo de fabricação de tubos de aço carbono sem costura, as condições de trabalho são particularmente onerosas para os componentes da planta de produção, em decorrência das trocas térmicas e aos elevados esforços mecânicos envolvidos, especialmente, na fase de perfuração do tubo, despertando assim, o interesse em aprofundar no conhecimento sobre o assunto. Este trabalho visa simular numericamente, através do aplicativo Deform3d, o processo de perfuração de tubo sem costura, realizado em um laminador equipado com discos guias (Diescher), onde foram avaliadas as deformações, tensões e as dimensões do tubo conformado.

**Palavras-chave:** Laminação; Tubo sem costura; Elementos finitos.

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE ROLLING PROCESS OF SEAMLESS PIPE**

### **Abstract**

The rolling of seamless tubing is a particularly demanding process for the industrial equipment, due to the high stresses and loads associated especially with the piercing process and to the prevailing extreme heat exchange conditions. The present paper presents a numerical simulation for the piercing of seamless tubing employing guide disks (Diescher process), utilizing the DEFORM 3D software. The stress and strain distributions in the tubing, as well as its dimensions were evaluated after the simulation

**Keywords:** Rolling mill; Seamless pipe; Finite elements.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico. Pós-doutor. Depto. de Engenharia Metalúrgica. e de Materiais. UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheira metalúrgica Prof. Titular. Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil. UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico. Prof. Associado. Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

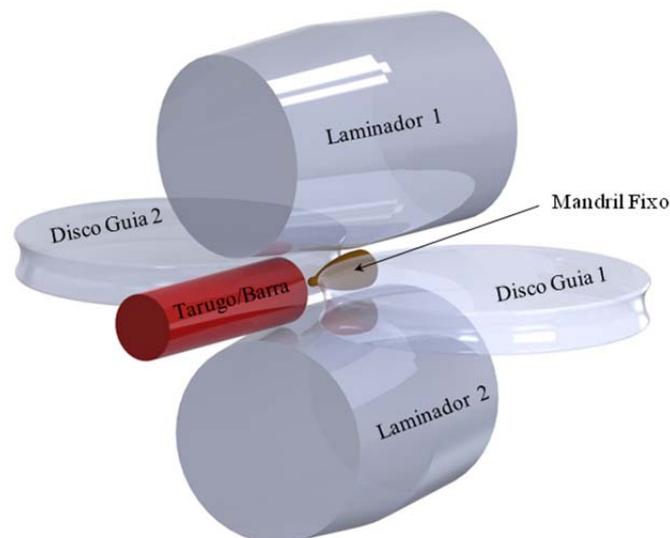
<sup>5</sup> *Engenheiro mecânico .Prof. Titular. Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

# 1 INTRODUÇÃO

Estatísticas oficiais mostraram que o Brasil exportou 23.357 toneladas de tubo em fevereiro/2013, contra 20.655 toneladas em janeiro/2013, um aumento de 13%<sup>(1)</sup>. Na fabricação de tubos são empregados vários tipos de materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. Os produtos tubulares são fabricados segundo duas classes de processos: tubos com e sem costura. Em fevereiro de 2013, o preço médio FOB dos tubos sem costura chegou a US\$ 2.033/t, enquanto os tubos com costura foram vendidos por US\$ 1.512/t.<sup>(1)</sup> De uma maneira geral, pode-se considerar que os tubos com costura são fabricados preferencialmente por soldagem para atender pequena espessura de parede ou para grandes diâmetros, enquanto os processos de fabricação de tubos sem costura são utilizados para atender espessuras de parede média e grossa e diâmetro externo de até 660 mm.<sup>(2)</sup> Existem faixas de espessura e diâmetro para as quais as duas classes de processos podem ser empregadas. Para a produção de um tubo sem costura pode-se empregar os seguintes processos de fabricação: Extrusão, trefilação, forjamento e laminação. No processo de laminação do tubo sem costura são utilizados os seguintes tipos de equipamentos (principais processos):<sup>(3)</sup>

- laminador Mannesmann constituídos de dois cilindros de formato de duplo cone com eixos quase paralelos;
- laminador com dois cilindros de formato de duplo cone com duas guias do tipo Stiefel ou de discos dispostos a 180° (Discher); e
- laminador com três cilindros cônicos dispostos a 60°.

Conforme Kazanecki<sup>(4)</sup> entre os maquinários acima mencionados, o emprego de dois cilindros cônicos com dois discos guias motrizes (Diescher) (Figura 1), reduz as perdas por fricção, possibilitando aumentar a velocidade de laminação, reduzindo os custos de processamento e uma melhor guiagem do material.



**Figura 1.** Desenho esquemático de um laminador com dois cilindros cônicos e duas guias motrizes, em forma de disco, empregado na fabricação do tubo sem costura.

No processo de laminação dos tubos de aço carbono sem costura, as condições de trabalho são particularmente onerosas para os componentes da planta de produção, em decorrência das trocas térmicas e aos elevados esforços mecânicos envolvidos, especialmente, na fase de perfuração do tubo, despertando assim, o interesse em aprofundar no conhecimento sobre o assunto. Este trabalho visa simular

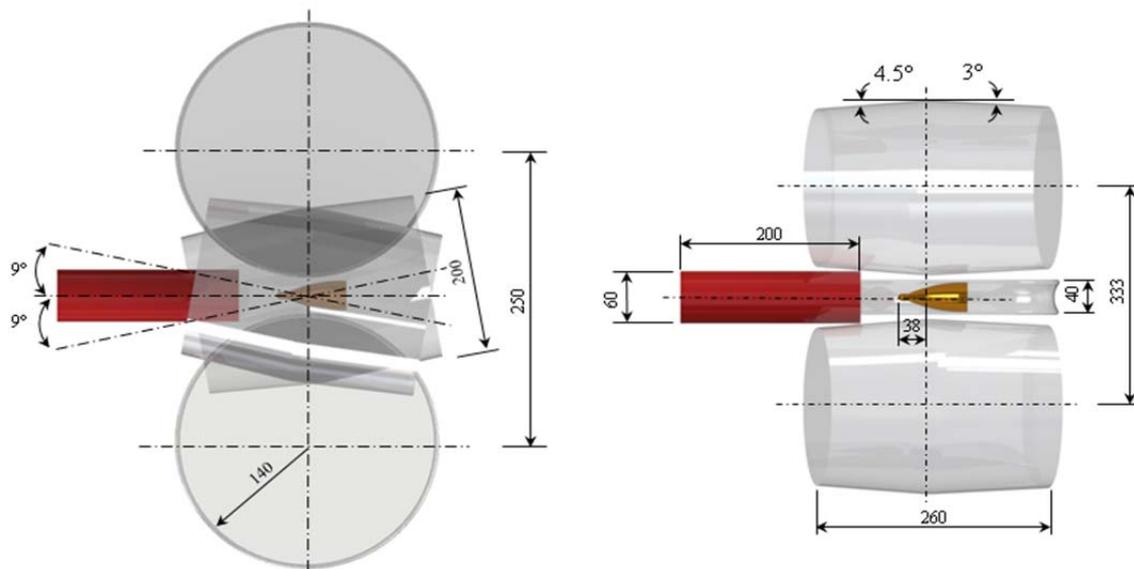
numericamente, através do aplicativo Deform3D, empregando método dos elementos finitos, o processo de perfuração de tubo sem costura, realizado em um laminador equipado com discos guias (Diescher), onde foram avaliadas as deformações, tensões e as dimensões do tubo conformado.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O principal objetivo deste trabalho é modelar e simular numericamente o processo de perfuração do tubo sem costura, em um laminador composto com dois cilindros cônicos, duas guias motrizes laterais (Diescher) e um mandril fixo.

### 2.1 Modelamento Geométrico

Baseando nas recomendações de Pater<sup>(3)</sup> e Teterin,<sup>(5)</sup> definiu-se as principais dimensões do conjunto de laminação a ser empregado no estudo (Figura 2):



**Figura 2.** Principais dimensões (mm) do conjunto de laminação do tubo sem costura.

Ficou definido que o material a ser perfurado seria o aço carbono SAE 1045. Neste tipo de laminador, os cilindros giram no mesmo sentido e com a mesma rotação de 60 rpm, ao contrário dos discos guias (Diescher) que giram em sentidos opostos porém com a mesma rotação de 7 rpm. A redução de área foi de 10%.

A modelagem geométrica do conjunto de laminação foi realizada utilizando o software Solidworks. O Solidworks é um programa CAD de modelagem 3D que permite grande precisão e controle das formas finais das peças envolvidas no conjunto de laminação. Após a modelagem e o arranjo espacial do conjunto de laminação, conforme os parâmetros geométricos, este foi transferido para o ambiente do aplicativo numérico Deform 3D.

### 2.2 Método Dos Elementos Finitos

O aplicativo numérico, Deform 3D<sup>®</sup> (SFTC – Scientific Forming Technologies, Ohio, USA), empregado para simular o processo de laminação do sem costura, utiliza a formulação implícita de integração no tempo, onde, a solução da equação

de governo que rege o equilíbrio é obtida pela consideração no tempo  $t+\Delta t$ . Sendo conhecidos o deslocamento e a velocidade no tempo  $t$ , para obter estes valores no tempo  $t+\Delta t$ , o equilíbrio de forças no tempo é dado pela Equação (1):

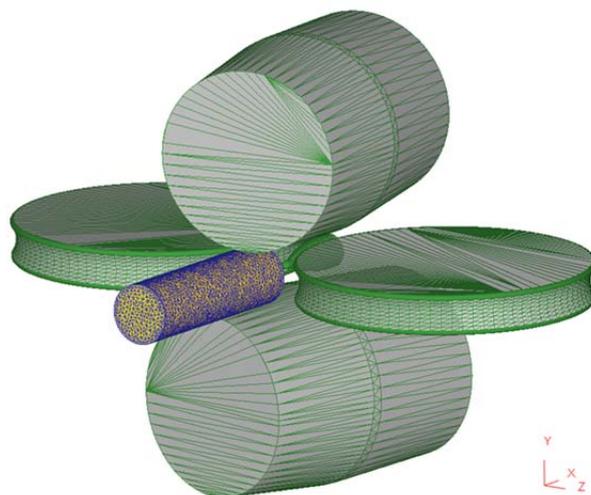
$$M\ddot{U}_{t+\Delta t} + C\dot{U}_{t+\Delta t} + KU_{t+\Delta t} = R_{t+\Delta t} \quad (1)$$

Em problemas que envolvem não-linearidades, geralmente é utilizado o método incremental de Newton-Raphson para se obter o valor de  $U_{t+\Delta t}$ . Nele, por exemplo, o deslocamento do tarugo é dividido em pequenos incrementos e em cada um deles, é calculado o vetor deslocamento. Este método requer a montagem e a inversão da matriz de rigidez a cada novo incremento, o que representa um aumento no tempo de processamento.

Para a etapa da simulação numérica, algumas considerações foram empregadas, no intuito de diminuir o tempo computacional, sem comprometer os resultados. Entre estas considerações, temos:

- os cilindros, discos guias (Diescher) e o mandril fixo foram modelados como corpos rígidos;
- os atritos existentes nas interfaces entre o tarugo e os demais componentes do laminador foram constantes ao longo de toda a simulação numérica, obedecendo a lei de Amonton-Coulomb, e apresentaram os seguintes coeficientes de atrito: Tarugo/Cilindros: 1,0 - Tarugo/Discos motrizes: 0,4 – Tarugo/Mandril: 0;
- para a modelagem do aço SAE 1045 a parte elástica do material foi desconsiderada, remetendo desta forma a formulação rígido-plástico; temperatura constante do tarugo de aço SAE 1045 em 1.000°C (Processo isotérmico);
- as simulações encerravam-se quando era obtido o estado estacionário de deformação.

A malha do material a ser perfurado (aço SAE 1045) foi gerada pelo procedimento padrão do aplicativo numérico Deform3D, sendo utilizados elementos isoparamétricos tetraédricos de quatro nós. Os elementos tetraédricos são mais utilizados, por serem mais flexíveis na geração de malha em geometrias complexas e versáteis na remalha automática. A Figura 3 mostra o conjunto modelado no ambiente do aplicativo Deform3D.

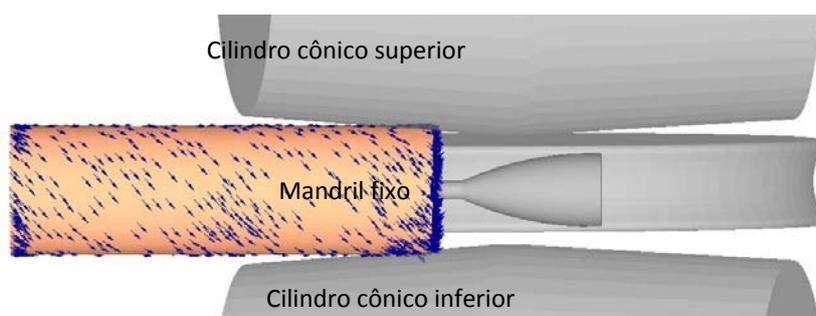


**Figura 3.** Laminador modelado no ambiente do aplicativo numérico Deform3D.

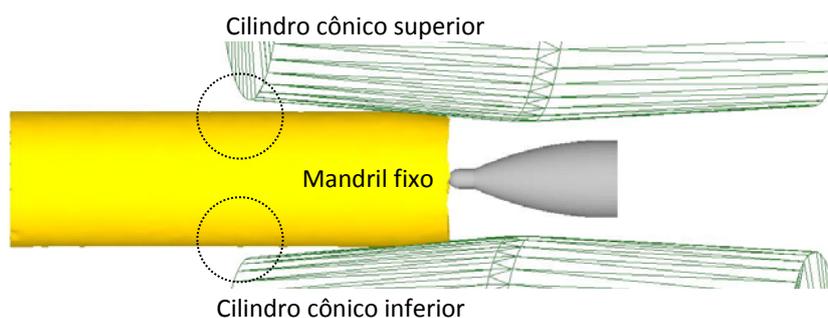
A curva de fluxo para descrever o comportamento do aço carbono SAE 1045 durante a laminação é função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura  $\bar{\sigma}_{ef} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_{ef}, \dot{\varepsilon}_{ef}, T)$  e suas propriedades mecânicas e térmicas foram obtidas diretamente da biblioteca do aplicativo Deform3D.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações numéricas mostraram que antes de iniciar a perfuração do tarugo, este apresenta uma deformação plástica na aresta jusante promovida pela compressão rotativa dos cilindros cônicos de laminação, na qual, é responsável pela rotação e translação do tarugo em direção ao mandril fixo. A Figura 4 mostra os vetores de deslocamento helicoidal adquirido pelo tarugo após esta deformação plástica na aresta jusante. Um dos discos guias foi removido no intuito de melhor visualização dos vetores deslocamentos. Na medida em que o tarugo desloca-se na direção axial ocorre à redução do seu diâmetro destacada dentro círculos pontilhados da Figura 5.

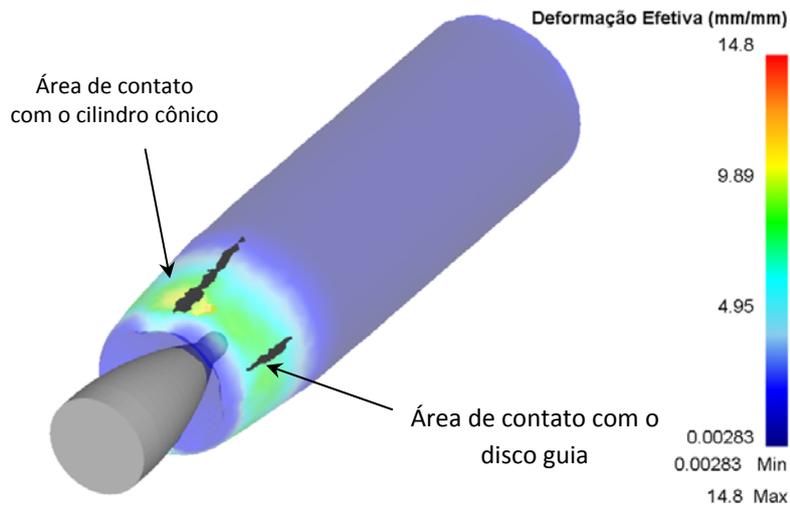


**Figura 4.** Deslocamento vetorial do tarugo após a deformação plástica na aresta jusante do tarugo.



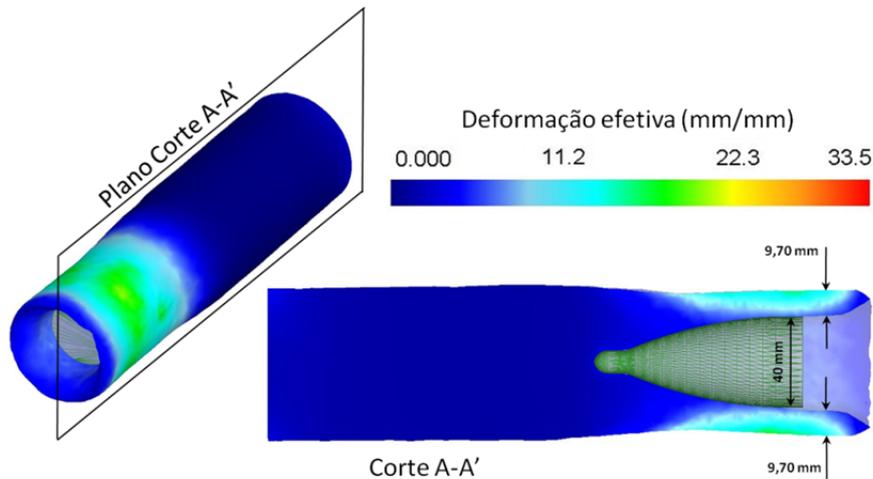
**Figura 5.** Redução do diâmetro do tarugo promovida pelos cilindros cônicos de laminação.

Em função da posição do mandril fixo, na fase principal do processo, quando se inicia a formação da cavidade interna do tubo, todas as ferramentas (cilindros cônicos e discos guias) estão em contato com o tarugo (áreas na cor escura) (Figura 6). Baseando na Figura 6, evidencia-se a importância dos discos guias (Diescher), uma vez que, os seus movimentos rotacionais promovem um aumento nas forças axiais, assegurando o transpasse do tarugo sobre o mandril fixo.



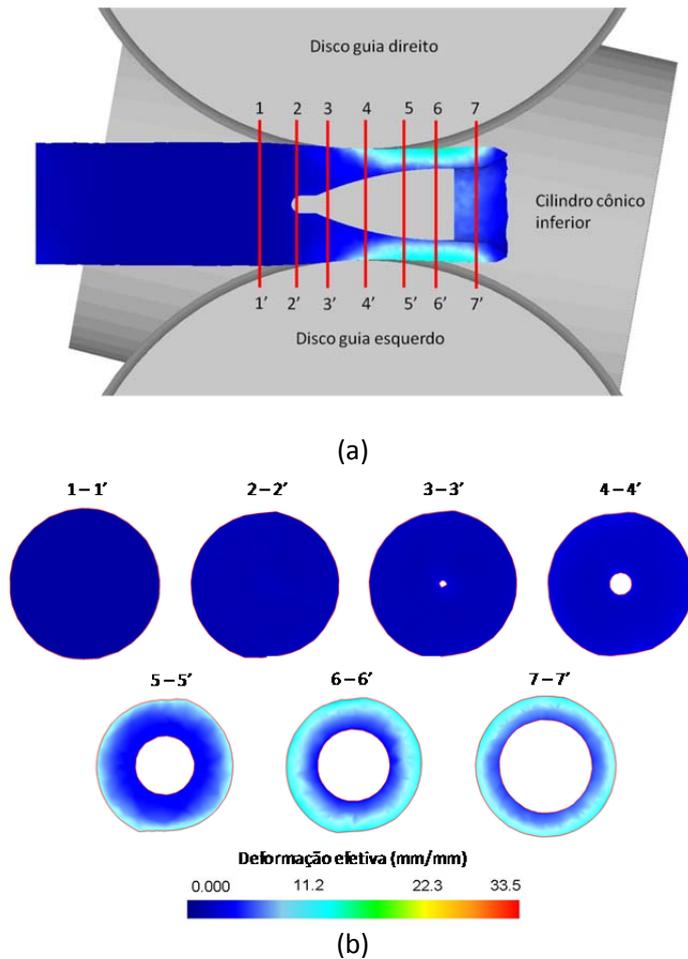
**Figura 6.** Deformação efetiva do tarugo em um determinado instante e as áreas de contato com os ferramentais (cilindro cônico superior e disco guia do lado direito).

Na proporção que o tarugo avança sobre o mandril fixo vai ocorrendo à formação da parede do tubo, até este atingir a sua menor espessura (9,70 mm), momento em que a borda jusante do material ultrapassa o maior diâmetro do mandril fixo (40 mm) (Figura 7). A partir deste instante, o processo de perfuração chega a sua fase estável, resultando na formação do diâmetro interno do tubo e no estado estacionário de deformação plástica.



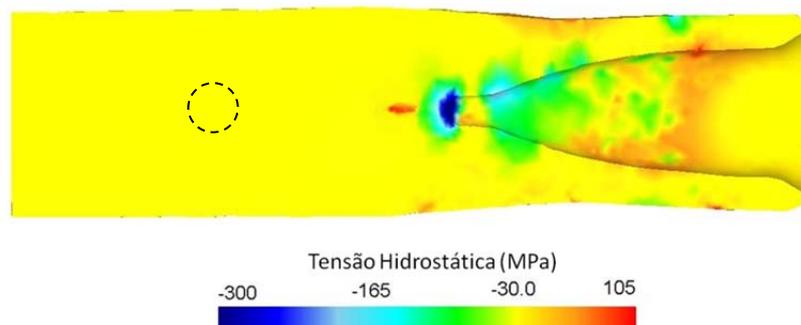
**Figura 7.** Estado estacionário de deformação no plano dos cilindros cônicos de laminação e as dimensões finais da parede do tubo.

A Figura 8a mostra diferentes planos de cortes transversais (linhas na cor vermelha) ao longo do comprimento do tarugo e na Figura 8b os respectivos perfis.



**Figura 8.** Planos de corte a serem avaliados (a) perfis do tarugo nestes planos (b).

Como pode ser visto nos perfis de corte 3-3', 4-4' e 5-5' da Figura 8b, os discos guias (Diescher) influenciam na ovalização transversal do tubo. Esta ovalização foi eliminada pelas rotações do material e dos cilindros cônicos logo após o tubo, já formado, ultrapassar o maior diâmetro do mandril fixo (corte 7-7'). A Figura 9 mostra a distribuição da tensão hidrostática do material no estado estacionário de deformação, tendo como plano de corte os discos de guia.



**Figura 9.** Distribuição da tensão hidrostática no plano dos discos guias.

Para valores positivos da tensão hidrostática, as tensões apresentam um caráter trativo, aumentando a possibilidade de ocorrer o coalescimento dos poros do material, formando assim, uma trinca. A Figura 9 mostra que antes do material entrar em contato com a ponta do mandril fixo, há uma pequena região, destacada dentro

do círculo tracejado, com alto valor de tensão hidrostática (105 MPa), favorecendo a formação de uma cavidade no eixo axial do tarugo, o que é comprovado na prática.

#### **4 CONCLUSÕES**

Apesar das simplificações e da complexidade deste processo de fabricação de tubos sem costura, o aplicativo numérico Deform3D foi capaz de determinar com precisão a deformação efetiva, a tensão hidrostática e os vetores de deslocamento do tubo, revelando-se uma ferramenta de interesse na avaliação dos processos de fabricação.

Os discos guias motrizes (Diescher) influenciam na ovalização do tubo, que só é eliminada pelas rotações do material e dos cilindros cônicos, após o material transpassar o mandril fixo.

As simulações numéricas mostraram a existência de uma região, localizada no eixo axial do tarugo, favorável ao surgimento de uma cavidade que auxilia na formação do diâmetro interno do tubo.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Capes, CNPq e a Fapemig pelo suporte para a concretização deste trabalho.

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 Portal Met@lica. Exportações Brasileiras de Tubo Crescem 13% Mês a Mês em Fevereiro. Disponível em: <http://www.metallica.com.br/siderurgia/exportac-es-brasileiras-de-tubo-crescem-13-m-s-a-m-s-em-fevereiro>. Acesso: mar. 2013.
- 2 Rizzo, E.M.S. Processos de laminação de produtos longos de aço. São Paulo: ABM, 2010. Pater, Z., Kananecki, J., Bartnicki, J. Three Dimensional Thermo-mechanical Simulation of The Tube Forming Process in Diescher's Mill. Journal of Mechanical Processing Technology, vol.177, pp.167-170, 2006.
- 3 Kazanecki, J. Rolling of Seamless Pipes. Kraków: AGW, 2003.
- 4 Teterin, P.K. The theory of periodic rolling. Moscow: Metallurgy, 1978.