

O Efeito das Etapas de Conformação e Aquecimento na Fabricação de Hastes de Amortecedores Automotivos Sobre a sua Forma Final – um Estudo Exploratório com Base no Método dos Elementos Finitos

Araújo, V.S.¹
e Silva, L.P.M.¹
Schillé, J-P.²
Guo, Z.²
da Silva, A. D.¹
Cetlin, P. R.¹

¹Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil (lissonds@gmail.com).

²JMatPro, Sente Software Ltd., Surrey Technology Centre, 40 Occam Road, United Kingdom.

Resumo

A ocorrência de defeitos em produtos durante a sua fabricação é comumente consequência de um processo de fabricação ineficiente. Contudo, a melhoria deste processo e, conseqüentemente, o desenvolvimento da tecnologia pertinentepodem se tornar bastante complexos conforme a aplicação, sendo necessário utilizar ferramentas CAE de alto desempenho como códigos de simulação numérica com base no Método dos Elementos Finitos (FEM). A produção de hastes de amortecedores utiliza barras que, durante sua fabricação por trefilação e têmpera superficial, podem sofrer um defeito denominado empeno. Na trefilação a frio de barras metálicas, a maior parte da deformação plástica é atribuída às tensões de compressão impostas ao material, devido ao contato entre a barra e a fieira. Em função das características do processo, esta deformação não é homogênea ao longo da seção transversal da barra e a sua magnitude é influenciada pela geometria e posição relativa entre a barra e a fieira. Esta deformação não homogênea gera tensões residuais nas barras trefiladas, as quais podem produzir uma mudança nas dimensões e o empeno das mesmas. No processo térmico subsequente, aquecimento e resfriamento rápido da região superficial, estas tensões residuais sofrem uma variação. Este trabalho busca desenvolver um modelo capaz de analisar as causas do empeno de barras de aço SAE 1045 durante a trefilação e processos subsequentes. A influência das características geométricas da matéria prima sobre a forma da barra combinadas ainda com o aquecimento subsequente, foi estudada e apresentada neste texto.

Palavras chave: trefilação;aquecimento por indução; tensões residuais; distorção.

The effect of forming and heating processes on the final shape of bars for automotive shock absorbers - a Finite Element Method based study

Abstract

Part defects are commonly the result of inefficient manufacturing procedures. Process improvement practices and, therefore, technology development may be very complex and demand the use of CAE tools such as numerical simulation codes based on Finite Element Method. Car shocks absorbers use steel bars for its assembly. Along the steel bars manufacturing – drawing and quenching – the product may undergo warping. For bar drawing operation strains occur due to the material-tool contact, imposing compression stresses in the bar. The strain profile along the cross section of the drawn bar is not homogeneous and is influenced by various process parameters, e.g. tool geometry and relative position between the bar and the die.. The nonhomogeneous strain results in residual stresses, which will modify the final shape of the bars in its finishing the operations. After drawing, the following heat treatment process, surface heating and fast cooling, will modify the residual stresses profile. The authors have developed a FE setup for analyzing the AISI 1045warpingand its reasons during drawing and austenitizing processes. The workpiece geometry influence on the final shape of the bar, as well as the the consideration of the superficial heating step after drawing, have been investigated in this work.

Key words: drawing; induction heating; residual stresses; distortion.

1 INTRODUÇÃO

Amortecedores são sistemas mecânicos que possuem componentes produzidos por conformação mecânica e por tratamento térmico e, portanto, com o seu processo de fabricação passível de ser estudado a partir de programas computacionais de simulação. Existem dois tipos básicos de amortecedores empregados na indústria automobilística: o amortecedor estrutural e o amortecedor convencional [1]. O estrutural (ou dianteiro) tem ligação direta com a estrutura da suspensão dianteira do veículo e suas funções principais são absorver a energia dissipada pelo sistema de suspensão (impacto) e ligar o chassi à carroceria. Já o amortecedor convencional (traseiro), não tem ligação direta com a suspensão do veículo e sua função básica é estabilizar as oscilações da carroceria (em função do efeito elástico e repetitivo das molas), além de cumprir o

importante papel de conciliar conforto ao rodar com estabilidade e aderência dos pneus ao solo. Os amortecedores devem realizar esta tarefa inclusive nas condições mais difíceis de trabalho – pisos irregulares ou desvios bruscos de trajetória [2]. Podem ser observados na Figura 1 exemplos de amortecedores em corte com os detalhes internos dos mesmos, inclusive a haste do pistão, produzida a partir de barras trefiladas e tratadas termicamente.

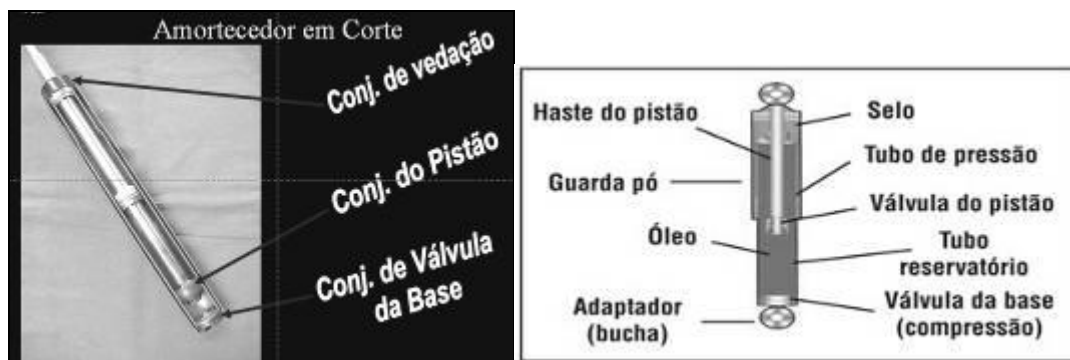


Figura 1 – Amortecedor em corte e seus principais componentes [2].

A fabricação de hastes para amortecedores engloba processos mecânicos e térmicos. A primeira etapa é a trefilação de fio máquina, transformando a matéria prima em barras, com dimensões pré-definidas, para a utilização em hastes. Após o processo de conformação, as barras são tratadas termicamente, passando pelas etapas de aquecimento – frequentemente por indução – e têmpera – resfriamento rápido em água. Em todas as etapas descritas existe a possibilidade da ocorrência do defeito denominado empeno. Este defeito onera os custos de produção e reduz a produtividade por meio da adição de uma nova etapa de processo: o desempenho. A Figura 2 mostra a sequência das etapas de fabricação em que o material está sujeito à ocorrência de empeno, bem como a etapa de desempenho.



Figura 2 – Etapas do processo de fabricação de barras para hastes de amortecedores.

A primeira etapa do processo de fabricação de hastes para amortecedores (Figura 3), trefilação, normalmente acarreta defeitos na barra por empenamento. Deformações heterogêneas ao longo da seção transversal das barras podem ser impostas por este processo, gerando nas mesmas tensões residuais que podem levar a distorções, comprometendo a retilidade (característica dimensional de avaliação da não presença do empeno) das barras [2]. Ferramentas CAE em 3D podem ter um papel de importância na investigação das causas do empeno, além de serem eficazes na modificação das variáveis de processo com o objetivo de reduzir a ocorrência deste defeito.

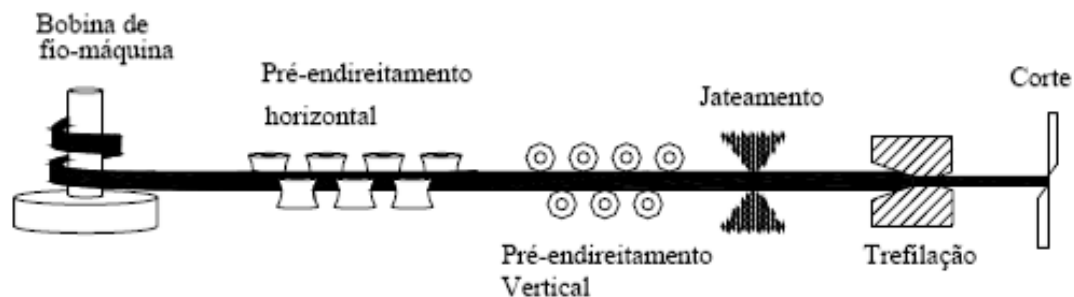


Figura 3 – Fluxo de processo de uma trefilação combinada para produção de barras para hastes de amortecedores [3].

O estudo do empeno em todas as etapas do processo é uma tarefa bastante complexa. Testes experimentais necessitam de planejamento, apurada metodologia e equipamentos precisos. O uso de ferramentas CAE exige códigos ainda mais elaborados quando utilizadas na previsão de processos térmicos. Além disso, as informações sobre o material a ser analisado na simulação precisam considerar as fases presentes no metal, as propriedades de cada uma e a relação de transformação entre elas. Guo *et al.* (2009) afirma que para a previsão de distorções durante tratamentos térmicos, é necessário definir:

- a cinética das transformações de fases, *i.e.*, curvas TTT e CCT;
- propriedades termofísicas em função da temperatura para cada fase formada, assim como massa específica, módulo de Young, coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica;
- propriedades mecânicas em função da temperatura para cada fase formada, limite de resistência, limite de escoamento e dureza.

As tensões residuais estão presentes em todas as peças que são produzidas por deformação de maneira heterogênea, podendo ser definidas como as tensões resultantes em equilíbrio em componentes que não estejam sofrendo esforços externos [4]. A ocorrência de deformações elásticas e/ou plásticas de maneira não homogênea é a principal causadora de tensões residuais, sendo provocadas pelo trabalho plástico do material ou da transformação de fases com ou sem variação de volume [5,6].

O empeno de barras trefiladas é o resultado de distorções causadas pelas deformações elástica, plástica e térmica. Porém, ao se considerar processos por tratamento térmicos, as distorções obrigatoriamente são influenciadas por outros dois fatores, sendo eles a transformação de fases e a plasticidade da transformação [7]. A equação a seguir mostra esta relação:

$$d\mathcal{E}_{ij} = d\mathcal{E}_{ij}^e + d\mathcal{E}_{ij}^p + d\mathcal{E}_{ij}^t + d\mathcal{E}_{ij}^{ff} + d\mathcal{E}_{ij}^{pt}, \quad (3)$$

onde e , p , t , tf , e pt representam as contribuições das deformações elástica, plástica, térmica, por transformação de fases e pela plasticidade da transformação, respectivamente.

Logo, a previsão do empeno de barras trefiladas e tratadas termicamente e, portanto, da distorção, precisa considerar a integração entre os diversos fenômenos em ocorrência durante o processo, conforme é explicado na Figura 4. A previsão de distorção foi realizada com sucesso em trabalhos anteriores para corpos de prova (Anéis em C) e para peças industriais (anéis laminados) [7,8,9].

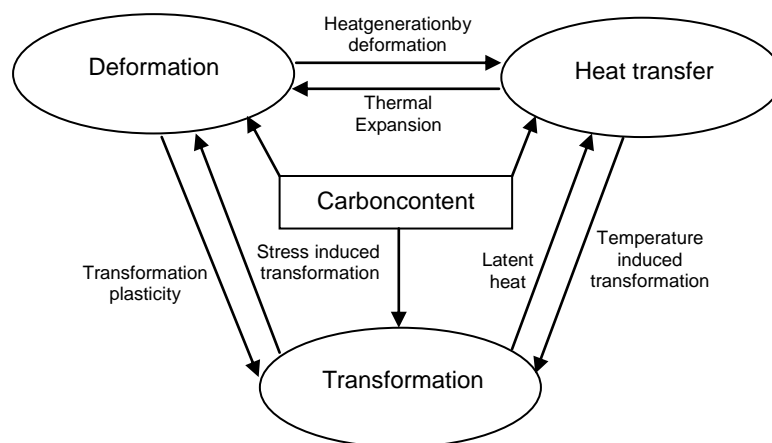


Figure 4 – Integração entre os fenômenos considerados na previsão de processos térmicos [7].

O objetivo deste trabalho é explorar modelos que possam prever a evolução das tensões residuais de uma barra de aço AISI 1045 quando processada por trefilação seguida de austenitização superficial visando a têmpera final. As tensões residuais indicam a maior ou menor tendência da distorção, e por consequência do empeno, do componente metálico em estudo.

2 METODOLOGIA

A previsão de distorções em função de trabalhos mecânicos e térmicos depende de uma quantidade de dados muito grande e bastante complexa. Utilizou-se o software JMatPro para a simulação e a obtenção das propriedades físicas e mecânicas do aço AISI 1045. A utilização desta ferramenta já foi validada anteriormente para a previsão de distorções [7,8,9]. Para o processo de trefilação, obtiveram-se os dados principais para os comportamentos elástico e plástico do aço, e.g. módulo de elasticidade e curva de escoamento. Para o processo de aquecimento superficial, foi necessário obter os dados de comportamento para

cada fase considerada durante o aquecimento do material, além da definição da cinética da transformação entre as fases.

As simulações das etapas de fabricação foram realizadas através do software com base no Método dos Elementos Finitos DEFORM™-3D, versão 10.2.1 (ScientificForming Technology Corporation, Columbus, Ohio, EUA), incluindo o módulo DEFORM™-HT para a previsão da austenitização durante o aquecimento por indução. Foram consideradas duas barras de aço AISI 1045 com diâmetro de 22,5 mm. Inicialmente, a primeira delas possui uma geometria retilínea, enquanto que a segunda encontra-se curva, porém livres de qualquer tensão residual. As barras foram trefiladas para um diâmetro final de 20,4 mm. A Figura 5 mostra o fio máquina curvo e a fieira (semi-ângulo de 15°) utilizada na simulação do processo de trefilação.

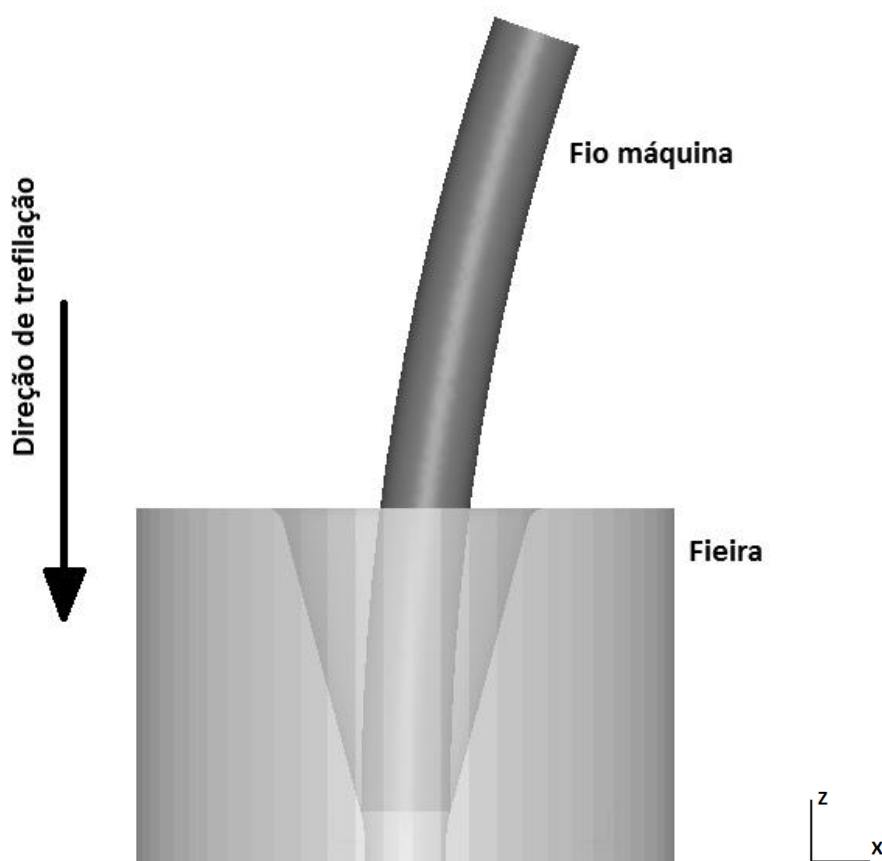


Figura 5 – Sistema utilizado na simulação da etapa de trefilação.

A etapa de aquecimento superficial das barrastrefiladas foi desenvolvida com base nos perfis simulados por trefilação. Com o intuito de se aquecer e austenitizar a barra com uma profundidade de 1 mm, atribuiu-se a temperatura de 940 °C a todos os nós presentes na região da barra desde a superfície até uma distância de 1 mm de profundidade. A Tabela 1 mostra os principais parâmetros adotados no

modelo de simulação numérica para ambas as operações: trefilação e aquecimento por indução.

Tabela 1 – Modelo de simulação com base no Método dos Elementos Finitos.

Operação	Parâmetro	Definição
1 – Trefilação	Programa	DEFORM-3D™
	Peças de trabalho	Fio máquina reto e curvo (diâmetro. 22,5 mm)
	Material	AISI 1045 para conformação mecânica simulado pelo JMatPro
	Temperatura	20 °C
	Objeto	Elasto-plástico
2 – Aquecimento por indução	Programa	DEFORM-3D™
	Peças de trabalho	Barras trefiladas - Operação 1
	Material	AISI 1045 para tratamento térmico simulado pelo JMatPro
	Temperatura inicial	20 °C
	Temperatura induzida	940 °C
	Objeto	Elasto-plástico

Considerando-se que as tensões residuais na direção longitudinal são as principais fontes do empeno das barras, essas foram as tensões analisadas ao longo do diâmetro dessas barras. A Figura 6 mostra esquematicamente a metodologia utilizada para a aquisição dos resultados. Os valores correspondem à seção da barra ao longo do seu diâmetro.

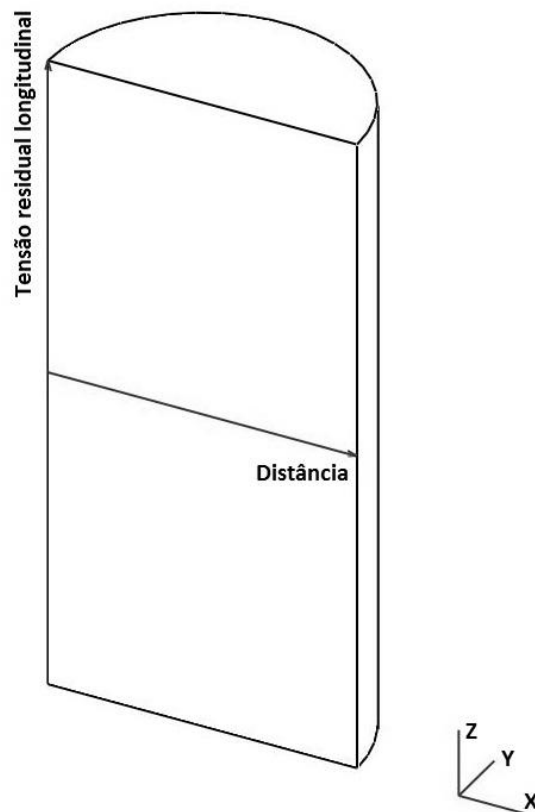


Figura 6 – Esquema de medição da tensão residual longitudinal ao longo do diâmetro da barra trefilada e aquecida por indução.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações resultaram em uma redução do diâmetro da barra durante a etapa de conformação por trefilação e em uma austenitização da região superficial durante a etapa de aquecimento por indução. A Figura 7 mostra a fração de austenita obtida na barra tridimensional, enquanto que o perfil da quantidade de austenita ao longo do diâmetro pode ser analisado na Figura 8. Observa-se que o aquecimento por indução provocou a transformação de fases na região superficial, com uma profundidade de aproximadamente 1,0 mm no material, caracterizando-se 100% de austenita.

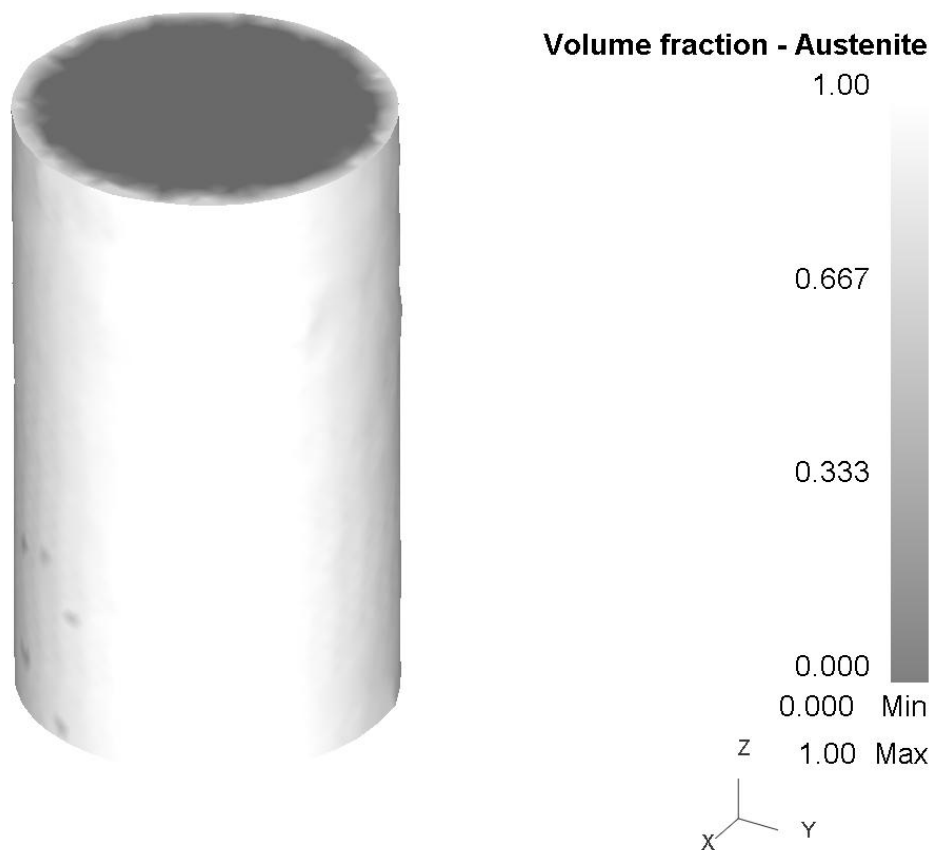


Figura 7 – Parte da barra aquecida por indução: fração de austenita presente na barra; a cor branca representa 100% de austenita em contraste com a fração de perlita.

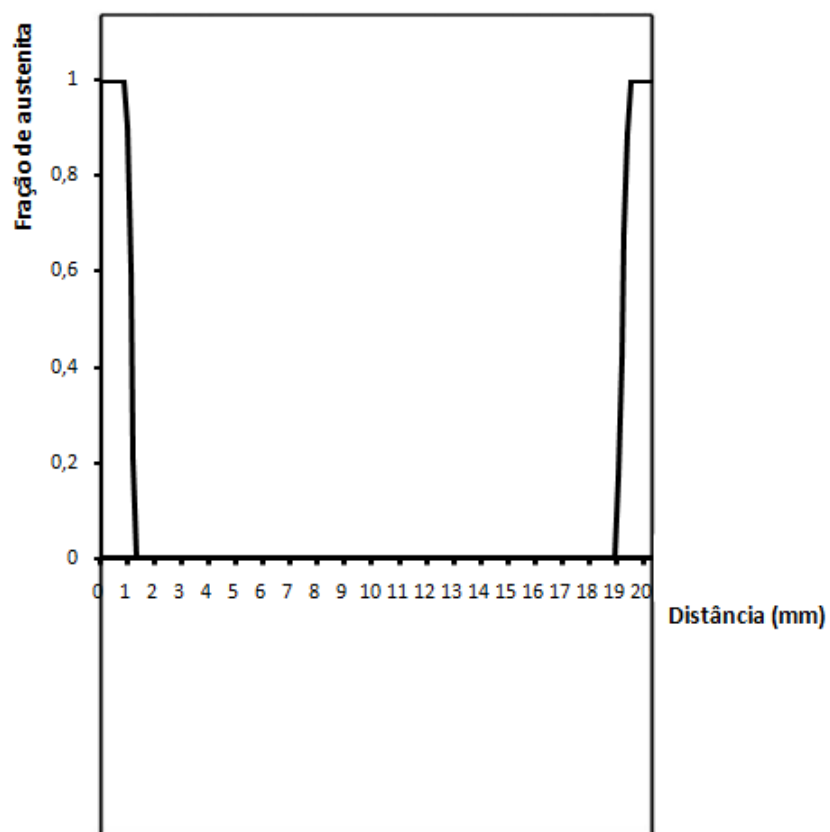


Figura 8 – Fração de austenita ao longo da seção transversal da barra após o aquecimento por indução.

Considerando-se a deformação na direção longitudinal da barra, o processo de conformação mecânica por trefilação gera diferentes níveis de deformação ao longo da seção transversal da barra trefilada, induzindo uma certa distribuição de tensões residuais nesta seção. Somando-se a isso, a etapa de aquecimento influencia o perfil de tensões residuais, tendendo a reduzir as suas magnitudes. Para o fio máquina inicialmente reto, a Figura 9 mostra o perfil de tensões residuais longitudinais após a trefilação e após o aquecimento por indução. Observa-se que, após a trefilação, o perfil é aproximadamente simétrico. Isso sugere que a barra terá pouca ou nenhuma distorção, não havendo a caracterização de empeno da barra trefilada. Já a austenitização do material influenciou na magnitude das tensões residuais longitudinais, levando a uma redução dos valores apresentados após a conformação.

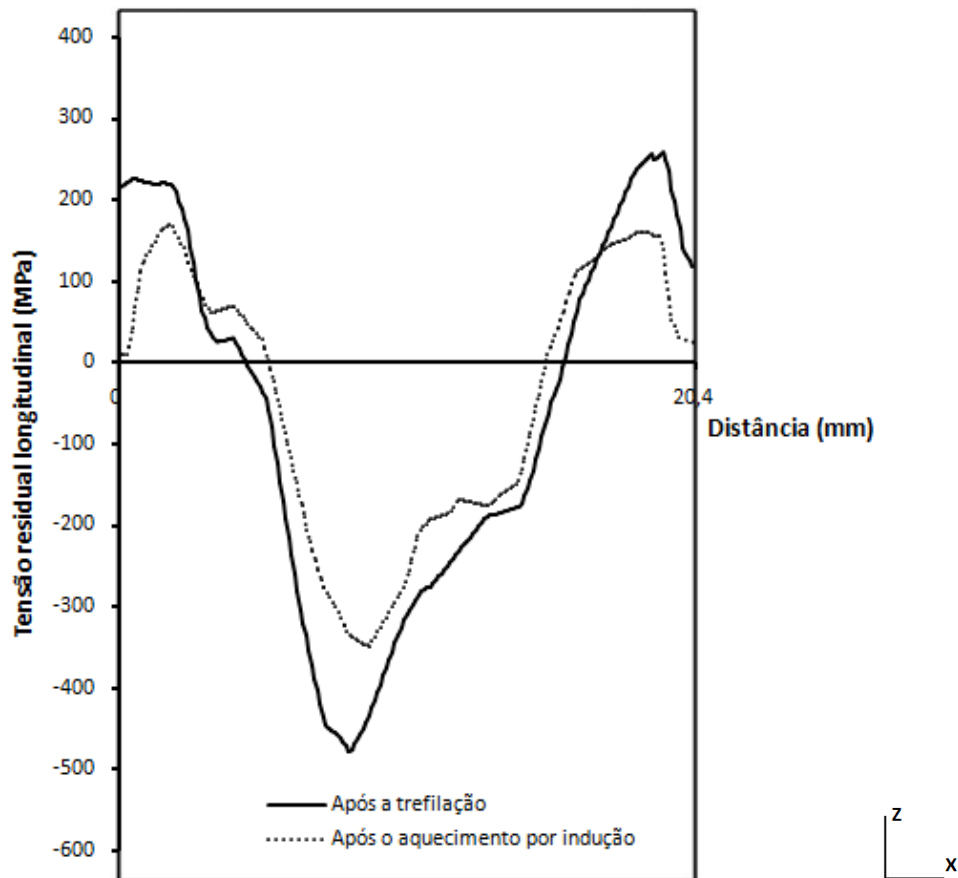


Figura 9– Perfil de tensões residuais longitudinais antes e após o aquecimento por indução.

A mesma análise foi realizada para o processo com o fio máquina inicialmente curvo. Neste caso, o perfil de tensões residuais longitudinais após a trefilação apresentou-se não simétrico, havendo diferenças significativas de magnitude entre as duas extremidades da linha do diâmetro. A Figura 10 mostra o perfil das tensões residuais longitudinais após a trefilação e após o aquecimento por indução. Observa-se que, após a trefilação, a tensão residual em uma das extremidades do diâmetro da barra possui um valor significativamente maior do que a tensão residual na extremidade oposta. Este resultado reflete as consequências do processo de trefilação de um fio máquina curvo (tipicamente resultante da utilização de fio-máquina inicialmente na forma de bobinas, havendo uma maior deformação longitudinal de tração na extremidade referente ao lado interno da curva. Este fato sugere a ocorrência de distorção da barra, resultando no seu empeno. O processo de austenitização por indução tende a reduzir a magnitude dos valores de tensão residual longitudinal da barra e pode vir a contribuir com a redução do empeno da mesma.

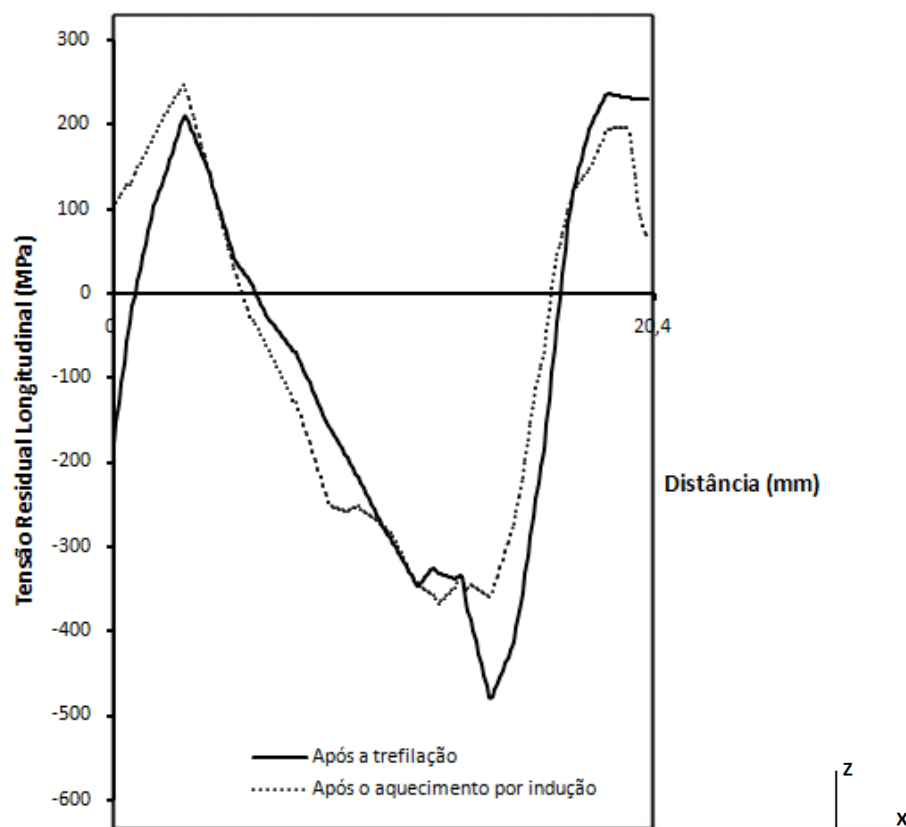


Figura 10 – Perfil de tensões residuais longitudinais antes e após o aquecimento por indução.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Através da simulação por elementos finitos é possível prever as tensões residuais causadas em um processo de conformação mecânica por trefilação, considerando-se também a influência da forma inicial do material de trabalho. Este processo pode ser investigado com mais detalhes variando-se as dimensões e o posicionamento relativo entre o material e a fieira, além da variação das dimensões da matéria prima e da consideração de defeitos iniciais. Além da análise das tensões residuais, é possível ainda quantificar a partir da simulação numérica a magnitude da distorção e, portanto, do empeno das barras metálicas.

Mostrou-se ser possível simular o aquecimento superficial da barra de maneira a austenitizá-la somente na região próxima à superfície. A austenitização leva a uma redução da magnitude das tensões residuais presentes na barra. A simulação do aquecimento por indução foi desenvolvida fornecendo uma temperatura de austenização à região objetivada, contudo, um modelo considerando o processo mais adequade aquecimento por indução deverá ser desenvolvido.

Uma vez estabelecido todo o modelo de simulação com base no Método dos Elementos Finitos, incluindo etapas de aquecimento por indução e têmpera, esse poderá ser validado de acordo com os dados experimentais obtidos pelas empresas que apóiam o projeto.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer:

- a ArcelorMittal Sabará pelo apoio técnico;
- a Cofap Magneti Marelli pelo apoio técnico;
- ao CNPq, CAPES, FAPEMIG, Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas e Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG pelo apoio financeiro recebido

REFERÊNCIAS

- [1] COUTO, G. A., CETLIN, P. R. e LIMA, A. B. Efeito do ângulo da fiação na geometria e propriedades mecânicas de barras trefiladas. *48° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos*. Santos, 2011, p908-918.
- [2] COFAP, MAGNETI MARELLI. Treinamento Amortecedores. 1ª Reunião Projeto "Redução de PPM", 2, 2008, Auditório RICAMBI, Mauá.
- [3] NUNES, R. M. (2008). Análise de Tensões Residuais no Processo de Trefilação Combinado do Aço AISI 1048 Visando Minimizar Distorções Pós-Processamento. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. 110 p.
- [4] TOTTEN, G. E., BATES, C. E., AND CLINTON, N. A. *Handbook of Quenchants and Quenching*. ASM International. 1993.
- [5] KRAUSS, G. Principles of Heat Treatment of Steel. 1980, 291p.
- [6] EBERT, L. J. The Role of Residual Stresses in the Mechanical Performance of Case Carburized Steels. *METALLURGICAL TRANSACTIONS A*, 1978, November Volume 9A, pp. 1537-1551.
- [7] DA SILVA, A. D., PEDROSA, T. A., GONZALEZ-MENDEZ, J. L., JIANG, X., CETLIN, P. R. e ALTAN, T. Distortion in Quenching an AISI 4140 steel C-Ring – Predictions and Experiments. *Materials & Design*, 2012;42:55-61.

- [8] DA SILVA, A. D., GUO, Z., SCHILLÉ, J-P., ALTAN, T. e CETLIN, P. R. Prediction of Geometric Distortion and Residual Stresses in Hot Rolled and Heat Treated Large Rings Through Finite Element Modeling. *16th International Forging Conference*. Porto Alegre, Brazil. October, 2012:235-246.
- [9] DA SILVA, A. D. "Prediction and Control of Geometric Distortion and Residual Stresses in Hot Rolled and Heat Treated Large Rings." Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG. 172p. 2012.