

Evolução das tensões residuais longitudinais causadas pela trefilação, austenitização e têmpera superficiais de hastes para amortecedores¹

Luiz Paulo Mendonça e Silva²
Pedro Malaquias Araújo Stemler²
Pedro Henrique Rodrigues Pereira³
Verônica Sousa de Araújo⁴
Franco de Castro Bubani⁵
Alisson Duarte da Silva⁶
Paulo Roberto Cetlin⁷

Resumo

As tensões residuais desenvolvidas em componentes processados por conformação mecânica e subsequentes tratamentos térmicos afetam as propriedades mecânicas finais destes componentes, especialmente seu comportamento sob fadiga. Além disso, podem provocar alterações na forma do componente; um exemplo dessa situação é a haste de amortecedores, que passa pelas etapas de trefilação, austenitização superficial por aquecimento indutivo seguida por têmpera em água, levando à formação de uma camada superficial de martensita. Essas etapas introduzem tensões residuais longitudinais nas hastes, cuja avaliação é de interesse. O presente artigo apresenta simulações numéricas, empregando o método dos elementos finitos, para a evolução das tensões residuais longitudinais causadas em hastes de amortecedores por estes processamentos. A trefilação envolveu uma redução de área fixa e quatro ângulos da fieira, conduzindo a tensões residuais trativas na superfície das hastes, com magnitude aproximadamente constante para os vários ângulos de fieira empregados. A austenitização superficial eliminou as tensões residuais nas vizinhanças da superfície das hastes, que se tornaram compressivas como resultado da têmpera. A simulação numérica do processamento das hastes indicou sua possibilidade de uso após a validação experimental dos resultados obtidos.

Palavras chave: Trefilação, Austenitização, Têmpera Superficial, Ângulo da fieira, Simulação numérica, Tensões residuais, Propriedades mecânicas.

¹ *Contribuição técnica ao 34º Seminário Nacional de Forjamento (34º SENAFOR), 18ª Conferência Internacional de Forjamento, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 8 a 10 de Outubro de 2014.*

² *Graduandos do curso de Engenharia Metalúrgica, Bolsistas de Iniciação Científica, UFMG.*

³ *Eng. Mecânico, Bolsista da CAPES – Proc.nº11938/13-7 no programa de Doutorado junto à University of Southampton.*

⁴ *Enga. Mecânica, Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG. Professor Associado, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.*

⁵ *Doutorando, Centro Atômico Bariloche, Conselho Nacional de Energia Atômica, Bariloche, Argentina*

⁶ *Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção, UFMG*

⁷ *Professor Titular, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.*

Introdução

Um automóvel é formado por uma série de subsistemas, dentre os quais é de interesse no momento a suspensão, responsável pelo contato entre o veículo e o solo. A suspensão tem uma série de componentes (eixos, molas, barra de torção, ponteiros, cubos de roda, etc.) e emprega amortecedores para atenuar as oscilações de molas submetidas a esforços cíclicos. A Figura 1 mostra duas típicas suspensões dianteiras de veículos: em uma delas (tipo McPherson) os amortecedores têm papel estrutural, enquanto na suspensão convencional esta função não é exercida pelos amortecedores.

O amortecedor na verdade é um subsistema formado por vários componentes, como ilustrado na Figura 2. O foco da presente proposta é a haste do amortecedor (chamada haste do pistão na figura).

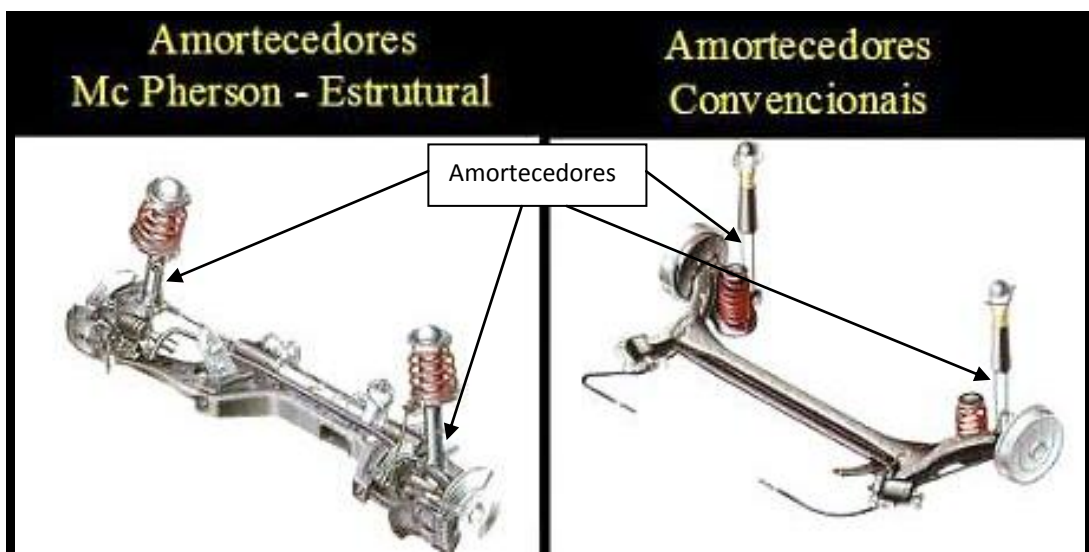


Figura 1: Suspensão dianteira de um automóvel e amortecedores do tipo McPherson e convencionais. (COUTO 2011)

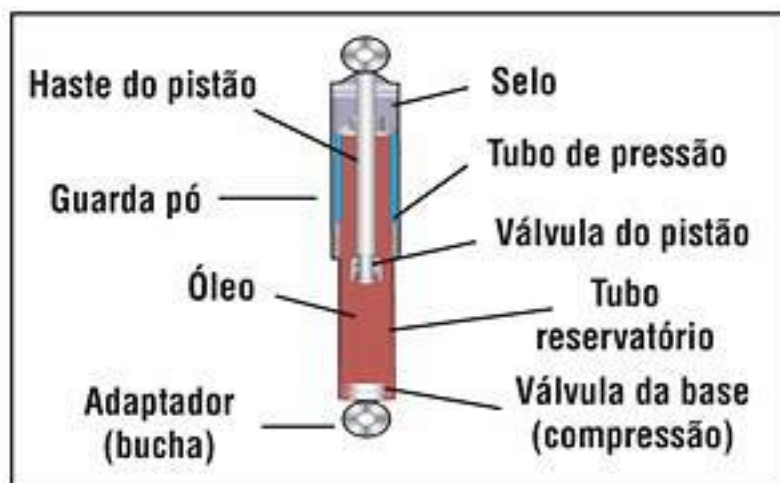


Figura 2: Componentes de um amortecedor. (COUTO 2011)

O material da haste é o aço AISI 1045, fornecido sob a forma de bobinas de fio-máquina laminadas a quente. As bobinas são desenroladas, passam por um endireitamento inicial, são jateadas com granalha de aço, trefiladas, cortadas e então recebem um polimento/desempeno. Já no cliente, recebem um aquecimento superficial por indução (profundidade de cerca de 1 mm), têmpera superficial em água, retífica, e finalmente uma cromagem.

Uma exigência especial no desempenho da haste do amortecedor pronta para montagem é sua retilineidade, que não deve exceder uma flecha total de 0,1mm, medida em uma distância entre apoios de 100mm. Esta retilineidade é afetada pelas etapas de desempeno, trefilação, aquecimento superficial e têmpera da haste. O efeito da trefilação sobre a retilineidade foi estudado experimentalmente por COUTO et al. (2011). O empeno de barras, em qualquer etapa de sua fabricação, é resultado das tensões residuais induzidas nas seções longitudinais das barras durante seu processo de fabricação. No caso da trefilação, tais tensões dependem fortemente da geometria da fiação (AKIYAMA et al. 2001, ASAKAWA et al. 2000, CAMPOS 1993, HOSFORD 2005, METZ et al. 2007, NUNES 2008).

A simulação numérica da trefilação de barras permite uma avaliação das tensões residuais causadas pela heterogeneidade de deformação, desde que o material seja considerado como elasto-plástico. Após a conformação, a retirada do carregamento externo exige o reequilíbrio das tensões residuais, associadas às diferenças de deformação em regiões distintas. É importante observar que as tensões residuais podem atingir, no máximo, as tensões de escoamento do material, uma vez que se essa tensão for ultrapassada, o material se deformaria plasticamente, aliviando o estado de tensões vigente.

O aquecimento e resfriamento de componentes mecânicos podem ser responsáveis pela imposição de tensões residuais devido a dois fenômenos: (a) à dilatação e contração térmica e (b) no caso dos aços, às transformações de fase.

A restrição mecânica à livre dilatação ou contração térmica, em determinadas regiões de um metal, caracteriza-se como uma das causas principais do surgimento de tensões residuais.

No caso dos aços, tensões residuais podem originar-se devido às alterações dimensionais associadas às transformações de fase no aquecimento (austenitização) e no resfriamento (transformação para perlita e ferrita ou bainita e martensita). A Figura 3 ilustra o fenômeno para o aquecimento de um aço até 845°C e seu subsequente resfriamento até a temperatura ambiente.

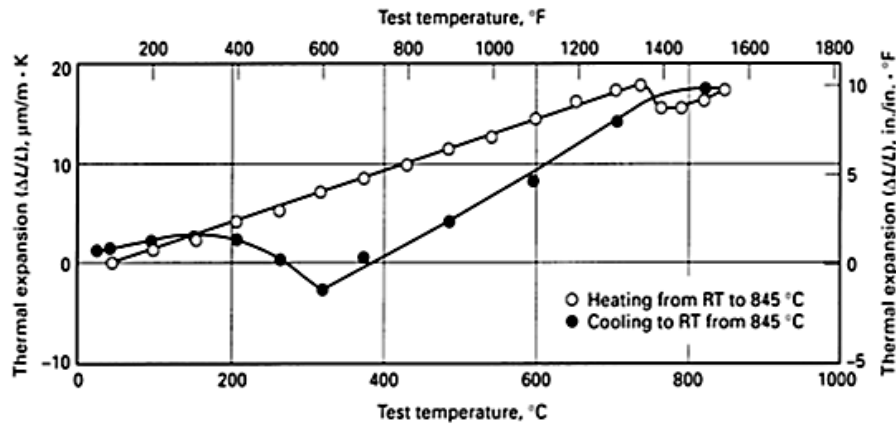


Figura 3: Dilatação e contração térmica de um aço, levando em conta as transformações de fase no aquecimento e no resfriamento. (BATES et al. 1991)

Nos casos onde o resfriamento do material está associado a uma transformação martensítica, tensões e deformações adicionais àquelas de natureza puramente dilatacionais serão geradas pela expansão volumétrica causada pela formação da martensita. Tal fenômeno pode ser estudado detalhadamente através de simulações computacionais utilizando-se o método dos elementos finitos. Na Figura 4 é mostrada a distorção de anéis em “C” durante o tratamento térmico de têmpera (Da SILVA et al. 2012). Verifica-se que, inicialmente, toda a distorção observada durante a têmpera do anel (4 s após a têmpera) é causada por dilatações térmicas; no entanto, a transformação da austenita para martensita, cuja evolução está mostrada 10 e 25 s após a têmpera, altera profundamente a distorção do anel. No presente caso, as previsões computacionais foram muito próximas das medidas experimentalmente.

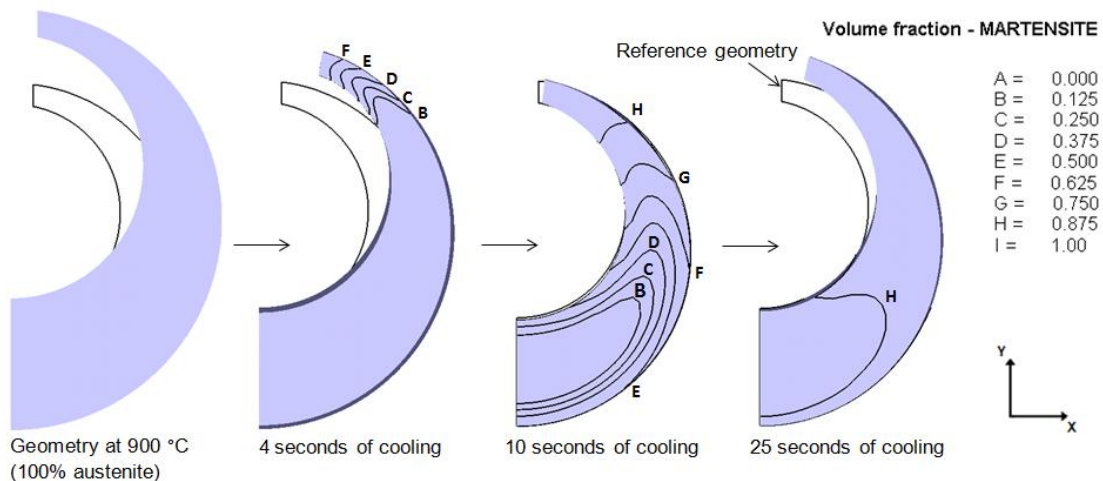


Figura 4: Representação geométrica de um anel em “C” de aço AISI 4140 (metade da peça em função de sua simetria) durante a simulação de um processo de resfriamento rápido (têmpera) – deslocamento da geometria ampliado 10x (Da SILVA 2012).

O objetivo do presente trabalho é estudar, através de simulação computacional, a evolução das tensões residuais longitudinais em hastes para amortecedores, resultantes das etapas de trefilação, austenitização e têmpera superficiais destas barras.

Materiais e métodos

As geometrias das fieiras e da barra submetida ao processo de trefilação foram elaboradas no editor de geometria do software de simulação por elementos finitos empregado (DEFORM-2D – Versão 10.0, da Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio, USA), e são apresentadas com detalhe na Figura 5, para a fieira com semi-ângulo de 9° . O processo de trefilação foi considerado axissimétrico, a barra a ser trefilada tem raio de 11,25 mm e comprimento de 50 mm; foram desenhadas 4 fieiras com semi-ângulos de 6° , 9° , 15° e 20° . As mesmas geometrias foram utilizadas para as simulações de aquecimento e têmpera.

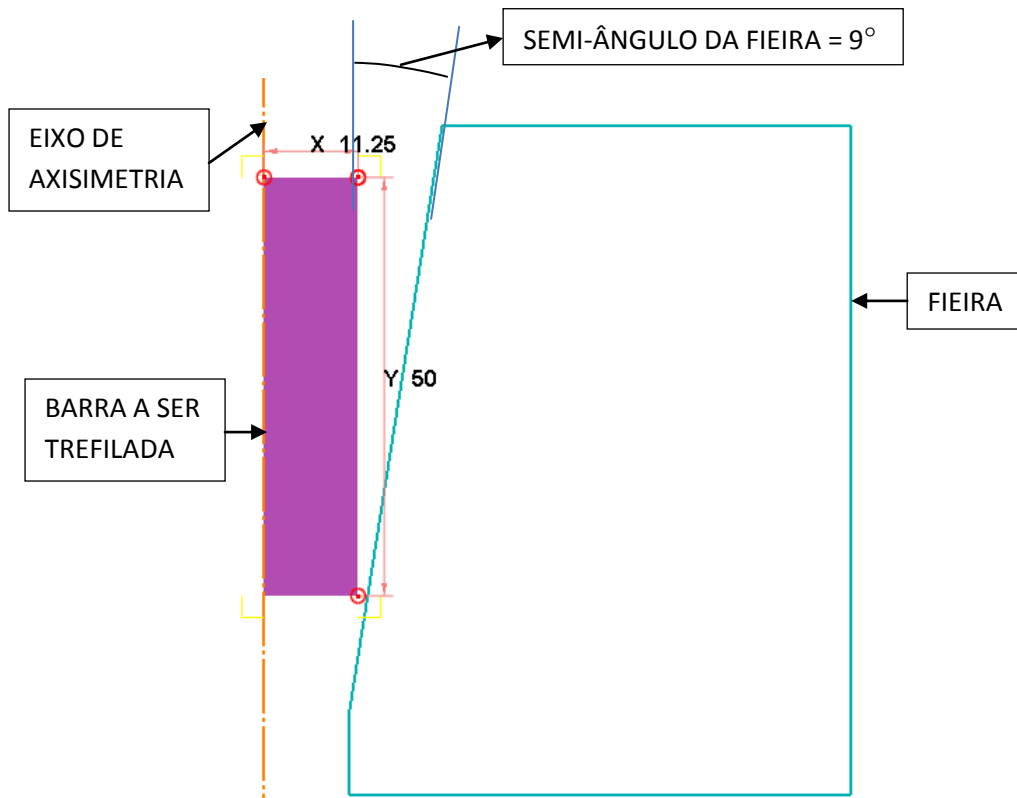


Figura 5: Geometria da haste e da fieira utilizadas na simulação de trefilação.

Utilizou-se para a haste uma malha quadrática com 2520 elementos com comportamento mecânico segundo os dados fornecidos da curva de fluxo do aço AISI 1045 apresentada na Figura 6, módulo de Young igual 210 GPa e coeficiente de Poisson igual 0,3. As simulações foram realizadas considerando as fieiras como objetos rígidos e as barras exibindo um comportamento elasto-plástico.

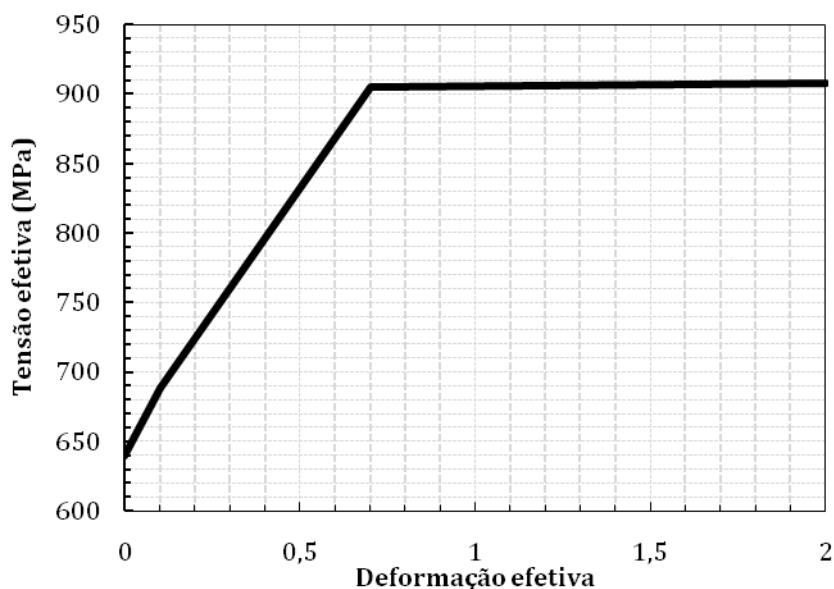


Figura 6: Curva de fluxo do aço AISI 1045 (retirada da biblioteca do DEFORM-2D)

As condições de contorno atribuídas às hastes foram as seguintes: velocidade no eixo y igual a -100 mm/s para os nós na base da haste; velocidade no eixo x igual a 0 mm/s para os nós na lateral esquerda; coeficiente de atrito “shear” entre a fieira e a haste igual 0,1; redução de área igual a 10%; temperatura do processo igual a 20 °C; “time step” igual 0,0075s e número de “steps” igual 100, totalizando um tempo de simulação de 0,75 s. Após o término das quatro simulações de trefilação descritas acima (uma para cada semi-ângulo da fieira), as hastes obtidas passaram à simulação do aquecimento superficial, excluindo-se a fieira da simulação e tomando-se a velocidade dos nós na base das hastes como 0 mm/s. Nesta etapa utilizou-se uma malha quadrática com maior número de elementos, 5631 elementos, que também apresenta uma maior densidade de elementos na região próxima a superfície da haste, onde se observam grandes gradientes térmicos. Na simulação do aquecimento superficial adotou-se o “time step” de 0,1 s e um número de “steps” igual a 100, totalizando 10 s de simulação. Para o comportamento mecânico do material e para a cinética de transformação de fases utilizou-se a base de dados fornecida pelo software JMatPro (Sente Software Ltd., Surrey, United Kingdom), considerando-se a haste constituída inteiramente por perlita com 0,45% de carbono.

Para o aquecimento superficial propriamente dito, definiu-se que os nós próximos à superfície da barra e dentro de uma camada de aproximadamente 1 mm de espessura seriam aquecidos linearmente de 20 °C até 900 °C em aproximadamente 9 s, seguido de manutenção nesta temperatura por mais 1 s. Esses tempos foram selecionados de forma a alcançar a completa austenitização da camada aquecida. O aquecimento industrial desta camada ocorre por indução, e para obter um perfil de temperatura semelhante ao obtido por essa técnica, optou-se pela redução dos coeficientes de condução térmica da perlita e da austenita para valores muito baixos, de forma a se evitar a rápida

propagação de calor da superfície para o interior da barra. Também, atribui-se um valor nulo para o calor latente de transformação de fase da perlita para austenita.

Para se realizar as simulações de têmpera utilizaram-se as hastes obtidas ao final das simulações de aquecimento superficial. Desativou-se a função de aquecimento superficial e definiu-se a superfície pela qual haveria troca de calor com o ambiente como aquela mostrada em vermelho na Figura 7. Utilizou-se o mesmo material da simulação de aquecimento superficial, porém não é mais necessária a diminuição dos coeficientes de condução térmica e o calor latente de transformação de fase. Mantiveram-se a mesma forma, quantidade de elementos, “time step” e número de “steps” utilizados no aquecimento. Utilizou-se a função de coeficiente de transmissão térmica para o ambiente de forma ilustrado na Figura 8 para simular a haste sendo resfriada por água fria (HARDIN e BECKERMAN 2005). O tempo total de simulação foi tal que a temperatura final da superfície da barra atingisse 38°C, temperatura a partir da qual as tensões residuais não mais se alteraram de forma considerável pelo resfriamento da barra até a temperatura ambiente.

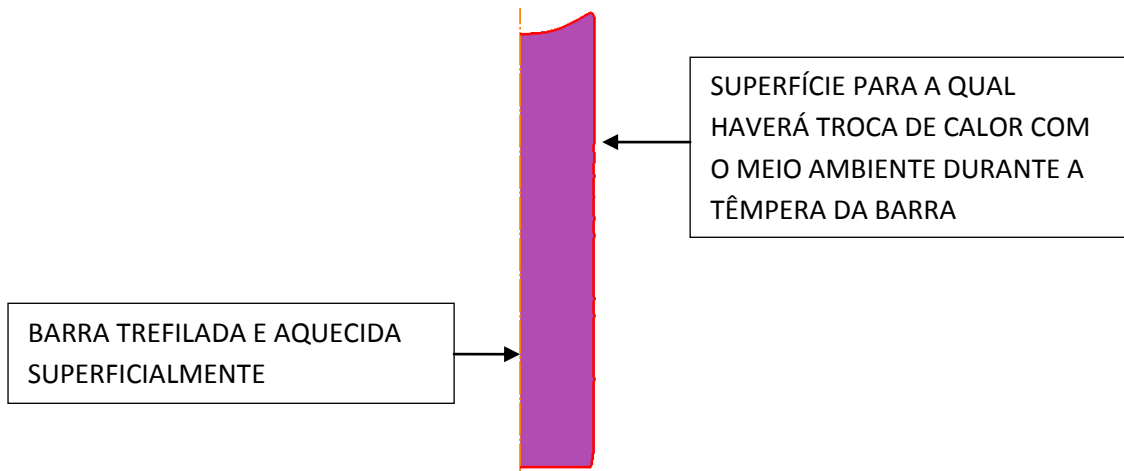


Figura 7: Superfície da barra trefilada e aquecida superficialmente, através da qual ocorrerá troca de calor com o ambiente durante a têmpera da barra.

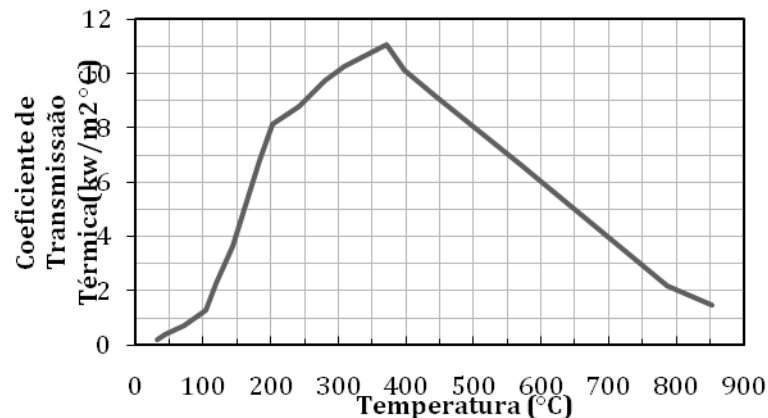


Figura 8: Variação do coeficiente de transmissão térmica em função da temperatura utilizado na simulação da têmpera da barra (HARDIN e BECKERMAN 2005).

Resultados e Discussão

A Figura 9 apresenta a distribuição das tensões residuais longitudinais, através de uma escala de cores. A parte superior das hastes nesta figura corresponde à parte final da trefilação, observando-se um aumento de sua concavidade com o aumento do semi-ângulo da fieira.

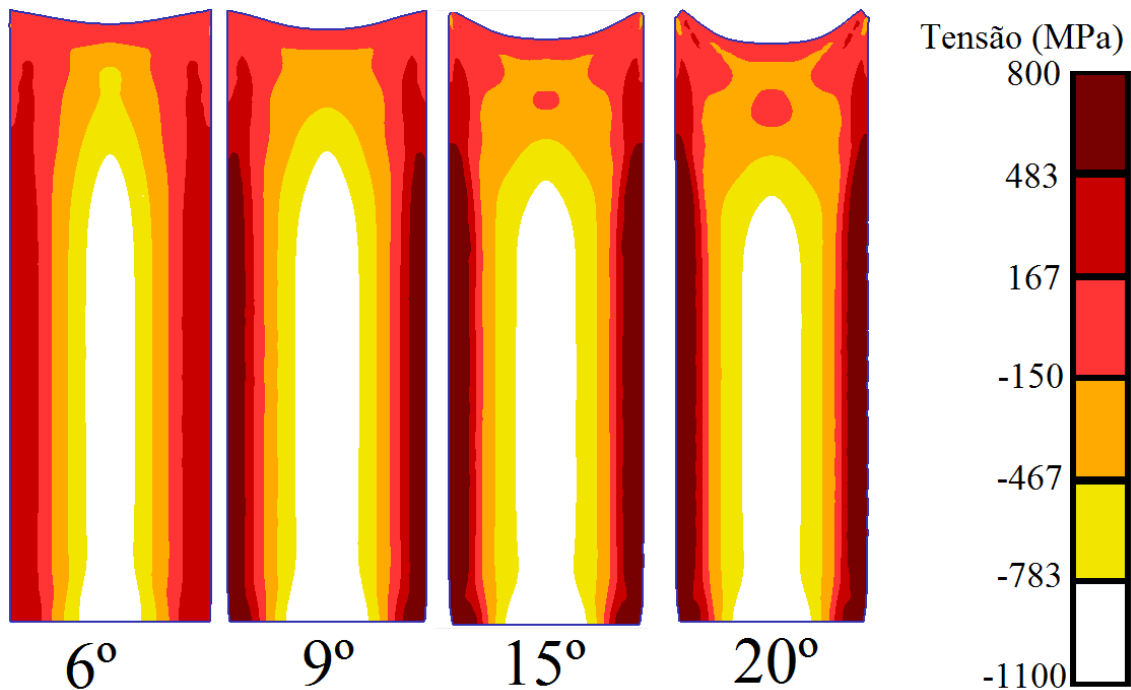


Figura 9: Distribuição das tensões residuais longitudinais após trefilação, para os quatro semi-ângulos de fieira analisados.

A Figura 10 apresenta gráficos da distribuição da tensão residual longitudinal ao longo do diâmetro da haste, para as mesmas situações da Figura 9.

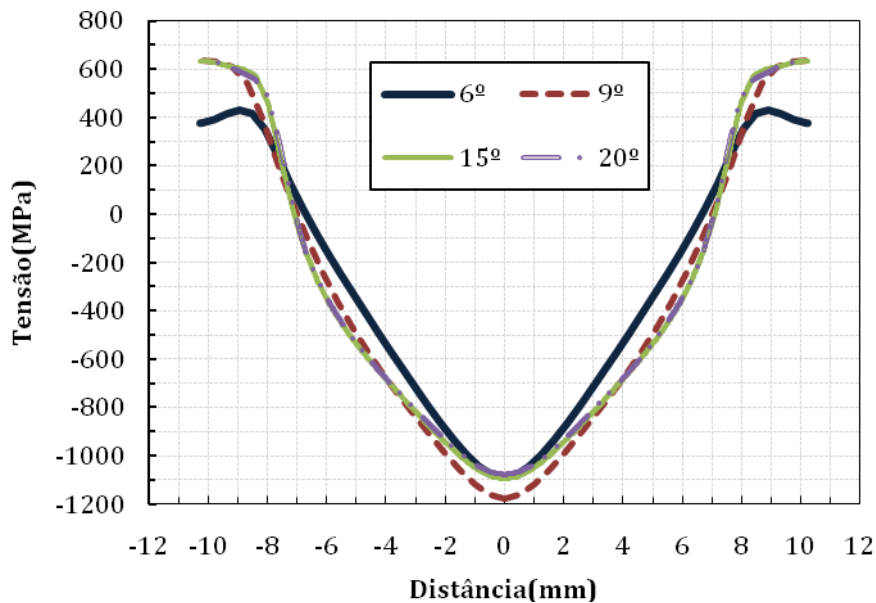


Figura 10: Gráfico da distribuição das tensões residuais longitudinais após trefilação, para os quatro semi-ângulos de fiação analisados.

Ao se analisar em conjunto as informações fornecidas através das Figuras 9 e 10 percebe-se que após a trefilação as barras apresentam tensões residuais longitudinais trativas na superfície e compressivas no centro (DIETER 1973). As curvas para semi-ângulos de 9°, 15° e 20° são muito semelhantes, atingindo tensões trativas na superfície das barras na ordem de 600 MPa. Já para o semi-ângulo de 6° atinge-se cerca de 400 MPa na superfície das barras.

As Figuras 11 e 12 apresentam situações idênticas às mostradas nas Figuras 9 e 10, respectivamente, mas agora após o aquecimento superficial, que conduziu à austenitização de uma camada superficial com a profundidade aproximada de 1,0 mm. Observa-se que na região na qual se deu o aquecimento superficial as tensões residuais tornaram-se nulas em todos os casos; em seguida, essas tensões tornaram-se compressivas e de magnitude de cerca de 400 MPa e então cresceram de forma acentuada até tensões trativas de 700 MPa para as hastes com semiângulo iguais a 9°, 15° e 20° e até cerca de 500 MPa para a haste com semiângulo igual a 6°.

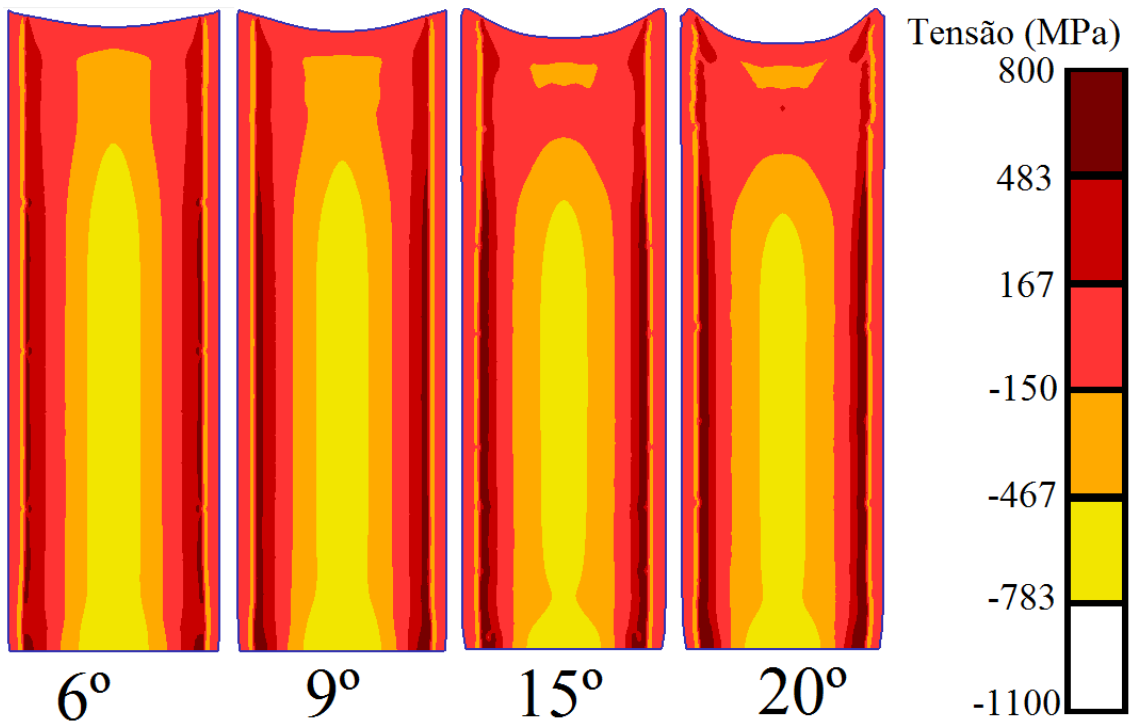


Figura 11: Distribuição de tensões residuais longitudinais ao final do aquecimento superficial, para os quatro semi-ângulos de fieira analisados.

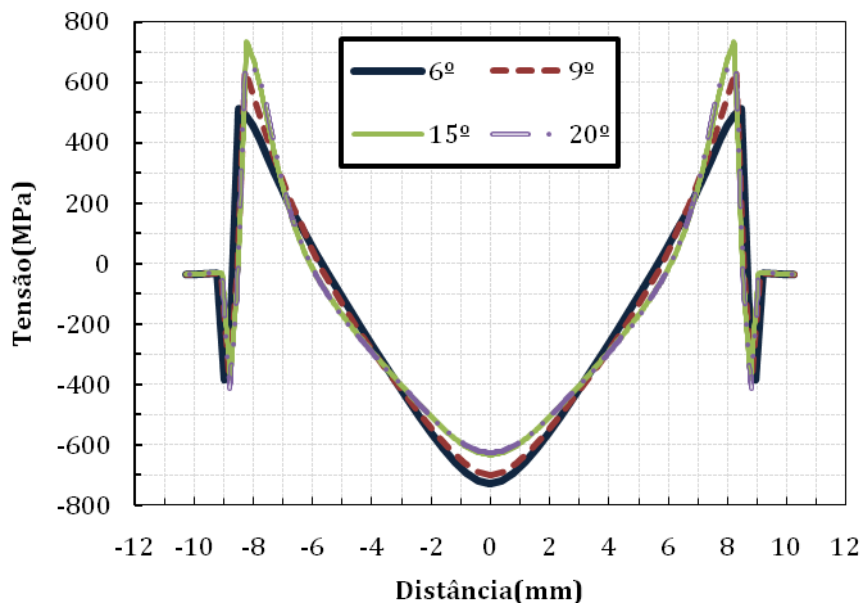


Figura 12: Gráfico da distribuição das tensões residuais longitudinais ao final do aquecimento superficial, para os quatro semi-ângulos de fieira analisados.

De forma análoga às figuras anteriores, a Figuras 13 e 14 exibem os resultados das tensões residuais longitudinais nas barras, após sua têmpera. As tensões residuais são muito semelhantes para as quatro situações analisadas, observando-se tensões de compressão na região perto da superfície das barras, atingindo-se -400 MPa para o semi-ângulo de 6°.

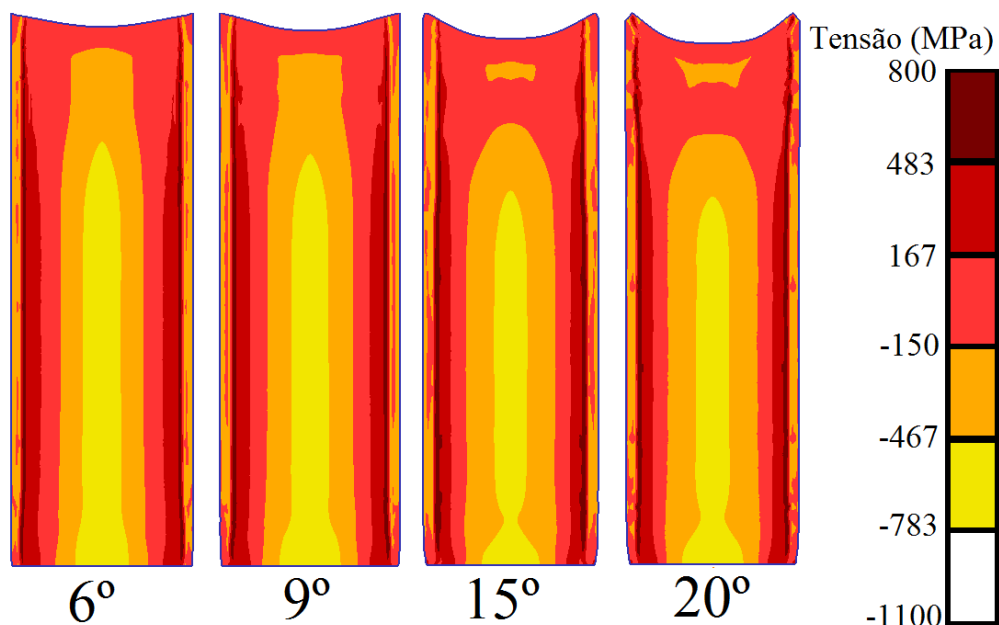


Figura 13: Distribuição das tensões residuais longitudinais após têmpera, para os quatro semi-ângulos de fieira analisados.

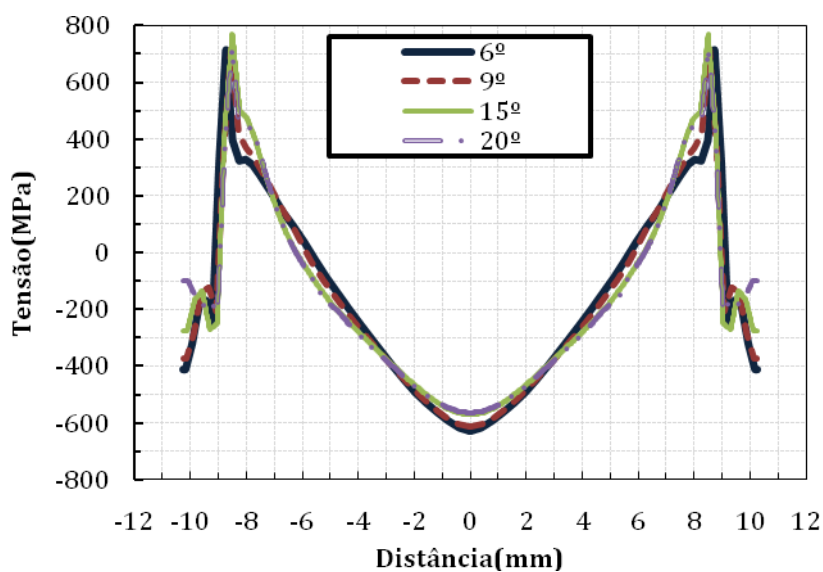


Figura 14: Gráfico da distribuição das tensões residuais longitudinais após têmpera, para os quatro semi-ângulos de fieira analisados.

Conclusões

A simulação numérica das operações de trefilação, austenitização e têmpera superficiais de barras para hastes de amortecedores permitiu uma previsão da distribuição das tensões residuais longitudinais nas barras após cada uma dessas operações.

A variação do semi-ângulo da fieira desde 6° até 20° não levou a grandes variações na distribuição das tensões residuais após cada uma das operações analisadas. No caso das barras trefiladas, o semi-ângulo de 6° levou a uma tensão residual longitudinal trativa um pouco mais baixa que para os outros semi-ângulos investigados.

Prevê-se que a tensão residual longitudinal na região superficial austenitizada das barras é nula.

A têmpera superficial das barras austenitizadas conduz à geração de tensões residuais longitudinais de compressão na superfície das barras, com valor em módulo levemente superior para a trefilação inicial com semi-ângulo de 6°, em relação aos outros semi-ângulos investigados.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, CAPES, FAPEMIG e dos Programas de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e em Engenharia Metalúrgica Materiais e Minas da UFMG; à Sente Software Ltd., UK gentilmente permitiu a utilização de seu banco de dados para as propriedades do AISI 1045 baseadas no JMatPro.

Referências Bibliográficas

- AKIYAMA M., KUBOKI T., NEISHI Y. e KURODA K. 2001, Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing, *Ironmaking and Steelmaking*, v.28, n.1, 65-71.
- ASAKAWA M., SASAKI W. e SHISHIDO, S. 2000, Effect of die approach geometry and bearing length on residual stress after bar drawing. *Wire Journal International*, Outubro, 68-72.
- BATES C. E., TOTTEN G. E. e BRENNAN R. L. 1991, Quenching of Steel, In *ASM Handbook of Heat Treatment*, Vol 4, Materials Park, ASM International, 159-290.
- CAMPOS, H. B. 1993, Estudo da Deformação na Trefilação em Passe Simples de Barras de Cobre. Belo Horizonte: UFMG, 1993. 368p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais.
- COUTO G. A. CETLIN P. R.; LIMA A. B. 2011, Efeito do ângulo da fieira na geometria e propriedades mecânicas de barras trefiladas, *Anais do 46º Seminário de*

Laminação – Processos e Produtos laminados e revestidos, ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Minerais e Mineração, Santos, SP, 24 a 27 de Outubro de 2011, ISSN 1983-4764, 908-919.

COUTO, G. A. 2011, Efeito do ângulo da fieira no comportamento geométrico e mecânico de barras trefiladas, dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Da SILVA A. D. 2012, Prediction and control of geometric distortion and residual stresses in hot rolled and heat treated large rings, tese (doutorado sanduíche com co-orientação do Prof. T. Altan, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 150p.

DIETER, G. E., Mechanical Metallurgy, 3rd ed. (1976), McGrawHill 743 p.

HARDIN, R. A. e BECKERMANN, C., 2005. Simulation of Heat Treatment Distortion. Proceedings of the 59th SFSMA Technical and Operating Conference, 3.3, 1-32.

HOSFORD, W. F. (2005). Mechanical behavior of materials. New York: Cambridge University Press.

METZ M., SANTOS C., ROCHA A. 2007, Análise Qualitativa das Tensões Residuais Longitudinais em Barras Trefiladas de Aço SAE 1045 através do Método Slitting, In: Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Perú, Cusco.

NUNES R. M. 2008, Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 110p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).