

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO

Juliana Zottis<sup>1</sup>  
Carla Adriana Theis Soares<sup>2</sup>  
Rafael Paini Pavlak<sup>3</sup>  
Tomaz Fantin de Souza<sup>4</sup>  
Vinicius Waechter Dias<sup>5</sup>  
Alexandre da Silva Rocha<sup>6</sup>

## Resumo

A trefilação de barras de aço é usualmente utilizada para conferir precisão dimensional e melhores propriedades mecânicas ao material. Por outro lado, um dos problemas do processo é o aparecimento de distorções de forma após a realização do tratamento térmico. Tais distorções estão diretamente relacionadas ao acúmulo de tensões residuais geradas durante as etapas do processo de fabricação. Em função disso, este trabalho visa avaliar a influência de parâmetros, como forma de agarre do fio-máquina, velocidade e lubrificação utilizados na trefilação de barras de aço analisando a distribuição de tensões residuais após esta etapa. A análise das tensões foi realizada através do método de elementos finitos, utilizando dois softwares de simulação numérica computacional: Simufact.formingGP® e Deform™. Através desta análise, verificou-se que a forma como a barra é tracionada ocasiona uma diferença de até 100 MPa nas tensões residuais no centro da barra, o que representa um fator importante no estudo das possíveis causas das distorções. Verificou-se também, que parâmetros como a velocidade e a homogeneidade da lubrificação modificam consideravelmente o perfil das tensões residuais no produto final.

**Palavras-chave:** Trefilação a frio; Tensões residuais; Simulação numérica.

## NUMERICAL SIMULATION OF RESIDUAL STRESSES GENERATED IN THE WIRE DRAWING PROCESS FOR DIFFERENT PROCESS PARAMETERS

### Abstract

The drawing process of steel bars is usually used to check better dimensional accuracy and mechanical properties to the material. In the other hand, the major concern found in manufacturing axes through this process is the appearance of distortion of shape. Such distortions are directly linked to the accumulation of residual stresses generated during the processes. As a result, this paper aims to study the influence of process parameters such as shape of puller, speed and lubrication used in wire drawing analyzing the accumulation of residual stress after the process. The stress analysis was performed by FEM being used two simulation software: Simufact.formingGP® and Deform™. Through these analyzes, it was found that the shape of how the bar is pulled causes a reduction of up to 100 MPa in residual stresses in the center of the bar, which represents an important factor in the study of the possible causes of the distortion. As well as factors speed and homogeneity of lubrication significantly altered the profile of residual stresses in the bar.

**Keywords:** Cold-drawing; Residual stresses; Numerical simulation.

<sup>1</sup>Engenheira mecânica, Mestranda, Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: juzottis@hotmail.com.br

<sup>2</sup>Mestre em Engenharia, Doutoranda, Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: cadria\_soares@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Graduando, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: paini.pavlak@ufrgs.br

<sup>4</sup>Mestre em Engenharia, Doutorando, Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: tomazfs@yahoo.com.br

<sup>5</sup>Mestre em Engenharia, Doutorando, Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: vinicius.waechter@ufrgs.br

<sup>6</sup>Doutor em Engenharia, Prof. Dr. Pesquisador, Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: alexandre.rocha@ufrgs.br

## I INTRODUÇÃO

Na conformação mecânica de materiais, a trefilação é utilizada para a fabricação de peças como arames e barras cilíndricas ou tubulares que podem ser utilizadas em peças para automóveis, máquinas de engenharia, ferramentas, equipamentos industriais e máquinas têxteis [1].

A utilização do método de elementos finitos como ferramenta de análise e otimização de processos de conformação mecânica, incluindo análise de tensões residuais, é importante para as indústrias de todo o mundo devido à redução de custos e aumento da qualidade na execução e no desenvolvimento de novos produtos em menos tempo, bem como no aumento do *know-how*, auxílio em treinamentos e aumento na eficácia de *marketing* [2-4].

Com este método, a peça de trabalho tem sua geometria subdividida em várias partes ou elementos, tal subdivisão é chamada malha, sendo geralmente constituída, no caso bidimensional, de triângulos (tetraédrica) ou quadriláteros (hexaédrica), cujos vértices são denominados nós (da malha). Através desta rede de elementos interligados, um sistema de equações é aplicado, do qual a solução permite determinar as grandezas de interesse no fenômeno analisado [5,6].

Dentre os processos de conformação mecânica, a trefilação combinada é utilizada na indústria de fabricação de fios, barras e eixos. Tal cadeia de fabricação consiste no desbobinamento do fio-máquina (matéria-prima), e sua passagem pelas etapas de pré-endireitamento vertical e horizontal, jateamento, trefilação, corte e, finalmente, polimento e endireitamento por rolos cruzados (PERC), como demonstrados na Figura 1.

Este processo gera, ao longo de sua cadeia, tensões residuais, que são as tensões presentes em um

material na ausência de forças externas e/ou gradientes de temperatura. Estas tensões são originadas sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou deformação elástica heterogênea, e podem ter efeitos benéficos ou prejudiciais ao componente, dependendo do sinal, magnitude e distribuição destas tensões [7], que são um dos potenciais para o desenvolvimento de distorções de forma que podem ocasionar não conformidades geométricas e até a perda do produto final.

Além das etapas ao longo do processo de fabricação, elevadas velocidades de trefilação podem, também, causar o acúmulo de tensões residuais na barra, onde o fluido lubrificante pode se decompor, devido ao aumento da temperatura, e perder a sua eficiência lubrificante e refrigerante [8]. Para velocidades elevadas, as condições de operação, sob o ponto de vista térmico, tendem a ser adiabáticas e, para velocidades mais baixas, aproxima-se da condição isotérmica que influi, de maneira acentuada, na natureza e forma do escoamento do material e, consequentemente, nas propriedades mecânicas do fio trefilado [8].

Em função disso, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência de parâmetros do processo, tais como forma de agarre, velocidade e lubrificação utilizados na trefilação combinada de barras de aço AISI 1045 analisando o acúmulo das tensões residuais após a etapa de trefilação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de calcular as tensões residuais geradas no produto final, optou-se pela utilização da malha hexaédrica por ser mais homogênea e distribuir-se melhor ao longo da barra. O modelo desenvolvido para a realização das simulações está exposto na Figura 2 e os parâmetros utilizados nas simulações estão demonstrados na Tabela 1.

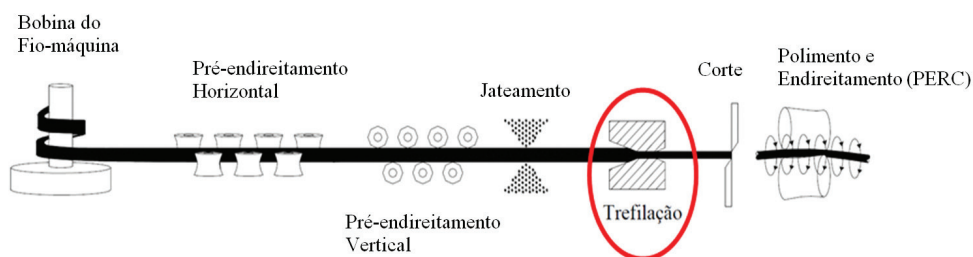


Figura 1. Processo de trefilação combinada.

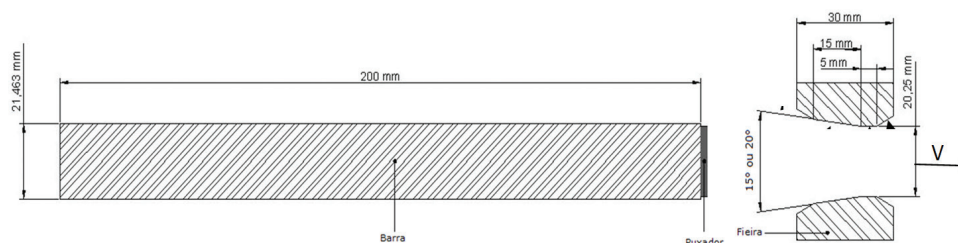


Figura 2. Modelo tridimensional processo utilizado na simulação.

**Tabela 1.** Parâmetros fixos para as simulações do processo de trefilação

Análise	3D mecânica
Material	AISI 1045
Diâmetro inicial e final	21,46 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
Módulo de Young	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Ângulo de Fieira ( $2\alpha$ )	15° e 20°
Comprimento da barra	200 mm
Coefficiente de atrito Coulomb ( $\mu$ )	0,1-0,15
Redução	11%

Conforme Palmeira [8], as velocidades de trefilação variam de 500 mm/s a 40.000 mm/s (dependendo do material e do diâmetro do fio); e as ferramentas podem ser de perfil cônico com um ângulo de trabalho dependente do material e do diâmetro do fio-máquina, bem como, uma parte cilíndrica com comprimento igual a até dois diâmetros finais. Sendo assim, as velocidades de trefilação foram variadas em 400 mm/s, 625 mm/s e 1.250 mm/s. Para imprimir essa velocidade, foi utilizado um artifício denominado “puxador” cuja forma de agarre também foi avaliada, sendo disposto na barra de duas formas: a primeira na base e a segunda, com o mesmo envolto na barra.

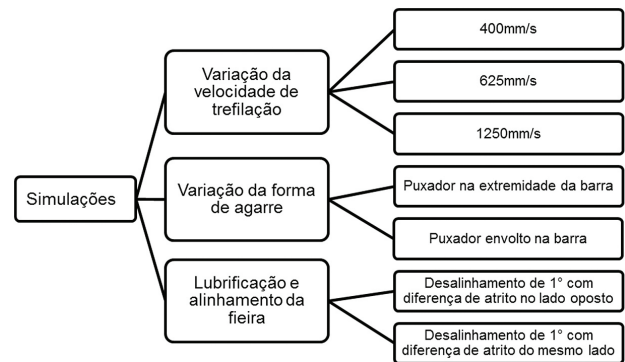
O atrito entre a barra e a ferramenta influi de maneira decisiva no desgaste da fieira, no aquecimento e no acabamento superficial do produto, sendo que esta variação do atrito, em princípio, depende das condições de operação, incluindo a natureza dos materiais envolvidos no processo. Para a avaliação da influência deste parâmetro via simulação numérica, foram analisados dois diferentes coeficientes de atrito de Coulomb, 0,1 e 0,15, na interface barra/ferramenta, sendo combinado com certo grau de desalinhamento da fieira em relação à barra.

As simulações computacionais podem ser realizadas através da utilização de vários softwares de elementos finitos, conforme tipo de análise e resultados esperados, sendo que neste trabalho foram utilizados os softwares Simufact.forming GP® e Deform™ para posterior comparação dos resultados dos perfis de tensões residuais.

A fim de analisar o comportamento do processo e avaliar a influência de diferentes parâmetros, foram realizadas simulações conforme o fluxograma mostrado na Figura 3, em ambos os softwares.

## 2.1 Software Simufact.formingGP®

Simulações foram realizadas, considerando um modelo elasto-plástico não linear de plasticidade do material AISI 1045 do banco de dados através do método de elementos finitos no software comercial Simufact.formingGP®. Este software utiliza o solver Marc que, por sua vez, resolve o problema da não linearidade da curva

**Figura 3.** Fluxograma das simulações realizadas.

de escoamento do material através do método *Newton-Raphson* [9] introduzindo um vetor de correção residual para transformar equações não-lineares em lineares até sua convergência.

Nas simulações tridimensionais do modelo apresentado na Figura 2, a barra foi gerada com malha de aproximadamente 60.000 elementos, onde não foram considerados os efeitos térmicos e a ferramenta do processo (fieira) foi considerada rígida.

## 2.2 Software Deform™

Da mesma maneira, foi construído um modelo numérico tridimensional, conforme a Figura 2, a partir do software *Deform™*, sendo que este possui diferentes opções de solver: *Lagrangian Incremental*, *ALE rolling*, *ALE extrusion*, entre outros. Por ser indicado para forjamento convencional e processos como extrusão e trefilação, o método de solução utilizado foi *Lagrangian Incremental*. O aço AISI 1045 também foi considerado isotrópico, sem efeitos térmicos e com ferramenta (fieira) rígida. O modo de simulação utilizado foi o *Iso-Thermal* com malha de aproximadamente 18750 elementos, sendo o tipo de análise elasto-plástica.

A curva de escoamento utilizada para caracterização do material isotrópico nas simulações utilizando o *Deform™* foi obtida experimentalmente por um ensaio de compressão, sendo representada pela Equação 1.

$$k_f = 1292,8 \cdot \sigma^{0,2018} \quad (1)$$

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Validação Numérica

Antes de comparar os perfis de tensões residuais obtidos nas simulações, foi feita uma análise para validação numérica a fim de verificar a correspondência entre o modelo simulado e o problema físico. Após serem feitas as simulações, comparou-se a força teórica de trefilação

segundo Siebel (Equação 2), com os valores de força simulados [10].

$$F = A_f \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad (2)$$

Onde:  $k_{fm}$  é a tensão de escoamento média,  $\varphi_A$  é a deformação verdadeira de área do material,  $\mu$  é o atrito de Coulomb,  $\alpha$  é o semi-ângulo da feira e  $A_f$  é a área final da peça.

As simulações numéricas foram validadas através da comparação entre os dados de força calculados pela Equação 2, equação de Siebel e simulados como demonstrado na Tabela 2.

A diferença máxima entre os valores de força simulados pelo *software* Simufact.formingGP® e calculados pela equação de Siebel, foi cerca de 29,96% para a simulação que considera dois diferentes atritos e desalinhamento da feira. A diferença mínima foi de 10,86% para a simulação que considera velocidade de 400 mm/s.

Ao avaliarmos as forças geradas nas simulações utilizando o *software* Deform™, percebe-se que as diferenças passam a aumentar em relação às forças calculadas, chegando a 89,44% para a simulação com atritos diferentes e desalinhamento da feira e a um mínimo de 32,14% para a simulação com velocidade de 400 mm/s. Isto pode ser atribuído à diversos fatores, dentre eles as limitações da equação de Siebel que, por exemplo, não considera a região de calibração da ferramenta. O que levaria a forças um pouco maiores, reduzindo a diferença encontrada.

### 3.2 Resultados das Simulações no Software Simufact.formingGP®

Conforme citado na seção 2, foram avaliadas três velocidades de trefilação: 400 mm/s, 625 mm/s e 1.250 mm/s. Sendo assim, a Figura 4 apresenta os resultados obtidos, respectivamente, para tais velocidades, onde a barra trefilada apresenta tensões trativas na superfície (+) e compressivas no centro (-), sendo, tais tensões características do processo de trefilação a frio [2].

Os valores quantitativos de tensões residuais foram obtidos de uma média de pontos da superfície e do centro da barra. A partir disso, verificou-se que os valores médios de tensão residual na superfície e no centro da barra após o processo foram:

- 400 mm/s - Centro: -1.000 MPa e Superfície: 700 MPa;
- 625 mm/s - Centro: -1.003 MPa e Superfície: 708 MPa;
- 1.250 mm/s - Centro: -1.019 MPa e Superfície: 692 MPa.

Para avaliar a influência da forma de agarre das barras utilizada nas simulações em relação às tensões residuais geradas no processo de trefilação, foram realizadas duas simulações com os parâmetros apresentados na Tabela 1, variando-se apenas a localização do puxador.

A Figura 5 apresenta os perfis obtidos para as simulações com (Figura 5a) puxador envolto na barra e (Figura 5b) puxador na extremidade da barra e com dois diferentes coeficientes de atrito e desalinhamento da feira (Figuras 5c e 5d). Observa-se que, sem alterar velocidade ou coeficiente de atrito, a barra com o puxador envolto resultou em uma tensão residual central de -1.018 MPa e superficial de 701 MPa. Valores estes não distantes para a simulação com o puxador na extremidade da barra, a qual apresentou -1.019 MPa no centro da barra e 692 MPa na superfície da mesma.

Analisando a influência do atrito entre a barra e a ferramenta, observou-se que a região da feira em que

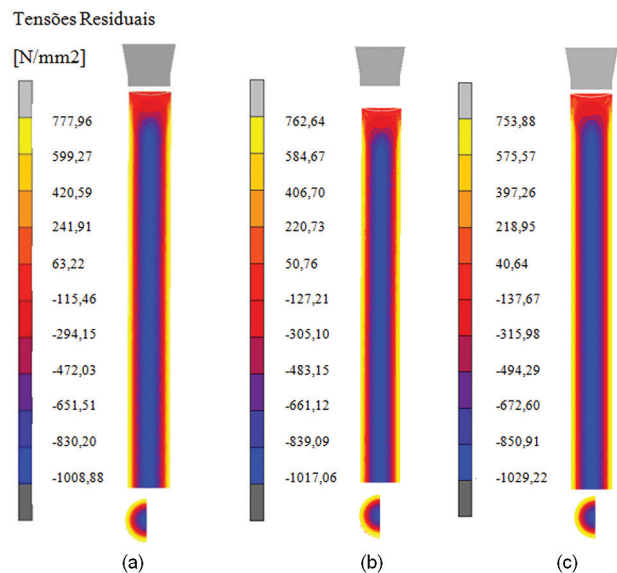
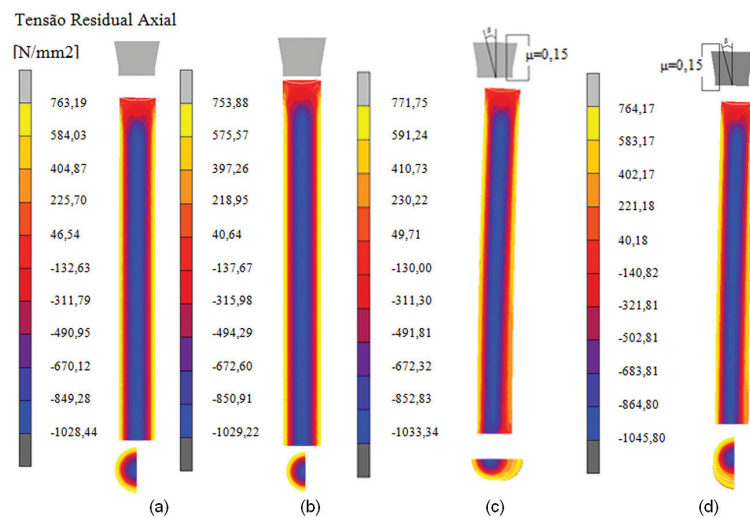


Figura 4. Perfil axial das tensões residuais para as simulações com puxador na extremidade da barra para as velocidades de (a) 400 mm/s; (b) 625 mm/s; e (c) 1.250 mm/s.

Tabela 2. Comparação entre os resultados de força simulados e calculados

Parâmetros	Simufact.formingGP®	Deform™	Siebel
400 mm/s	71,4 (kN)	85,1 (kN)	
625 mm/s	71,7 (kN)	94,4(kN)	
1.250 mm/s	72,1 (kN)	94,0(kN)	
Puxador envolto (1250 mm/s)	73,0 (kN)	90,0(kN)	64,4 (kN)
Atrito 0,15 a 0°	83,2 (kN)	122,0(kN)	
Atrito 0,15 a 180°	83,7 (kN)	108,7(kN)	



**Figura 5.** Tensões residuais na direção axial para diferentes formas de agarre: (a) puxador envolto na barra; (b) puxador na extremidade da barra; e (c) e (d) com dois diferentes atritos e desalinhamento da feira.

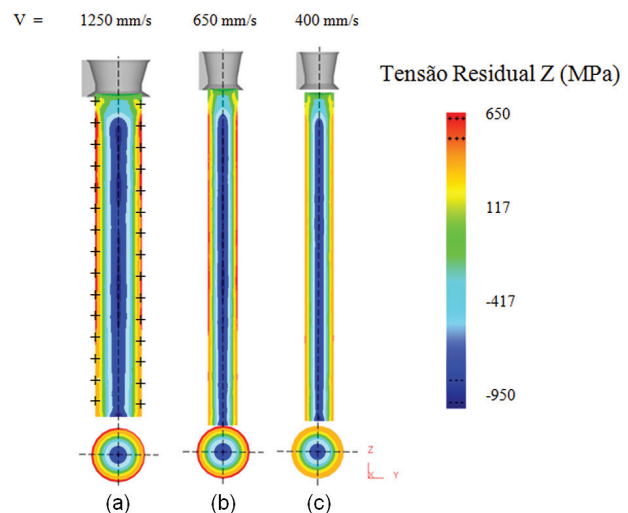
o coeficiente de atrito de Coulomb é 0,15, ou seja, o lado oposto à inclinação  $\beta=1^\circ$  da feira, demonstrado na Figura 5c, as tensões na superfície ficaram em torno de 545 MPa, enquanto que na região da feira em que o atrito foi de 0,1, as tensões na superfície foram reduzidas consideravelmente para valores em torno de 325 MPa.

Para o centro da barra, as tensões residuais também diminuíram ao serem comparadas com as demais simulações, para aproximadamente  $-975$  MPa. Na Figura 5d, pode-se perceber a simulação com atrito 0,15 no mesmo lado da inclinação feira, e na superfície, as tensões reduziram consideravelmente para 507 MPa. No lado oposto, com atrito 0,1, as tensões mantiveram-se em aproximadamente 631 MPa. No centro da barra as tensões residuais permaneceram em cerca de  $-1.017$  MPa, seguindo o comportamento das demais simulações.

### 3.3 Resultados das Simulações no Software *Deform*<sup>TM</sup>

A fim de comparar posteriormente os resultados, foi criado um modelo de referência com os parâmetros apresentados na Tabela I. Tal modelo visa aproximar-se ao máximo do modelo ideal, com velocidade principal de 1.250 mm/s, mesmo coeficiente de atrito ( $\mu=0,1$ ) entre a superfície da barra e a ferramenta, utilizando-se a forma de agarre com puxador na extremidade da barra.

A velocidade é um fator importante na avaliação do perfil de tensões residuais após a trefilação. Sendo assim, a Figura 6 apresenta os resultados destas tensões para o modelo de referência, 1.250 mm/s, bem como, os perfis das simulações com velocidades de 400 mm/s e 625 mm/s, com o software *Deform*<sup>TM</sup>. No modelo de referência, as tensões residuais no centro a barra possuem um valor máximo compressivo de 950 MPa e na sua superfície um máximo trativo de 650 MPa, com distribuição quase homogênea.



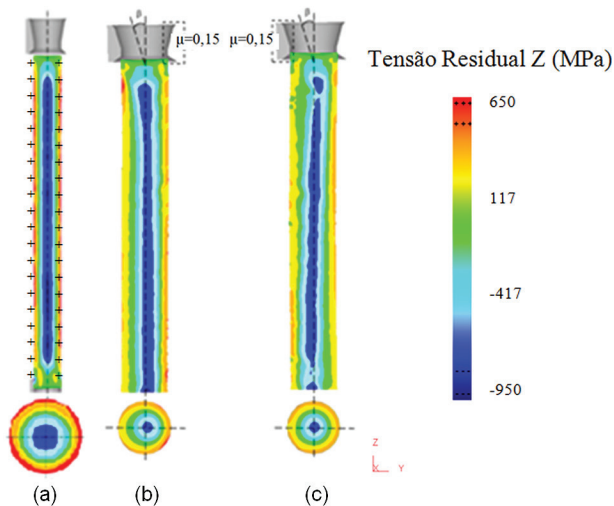
**Figura 6.** Perfil de tensões residuais para o modelo de referência (a), e velocidades de (a) 400 mm/s e (b) 625 mm/s.

Já nos modelos de simulação com variação de velocidade de 400 mm/s e 625 mm/s, Figuras 6b e 6c, a média das tensões residuais após o processo foram respectivamente:

- Centro:  $-743$  MPa e Superfície: 441 MPa;
- Centro:  $-807$  MPa e Superfície: 529 MPa.

Assim como a velocidade, a forma de agarre também foi avaliada. A Figura 7a apresenta os resultados para a simulação com o puxador envolto na barra, do qual foi utilizado para melhor construção do modelo e adaptação da malha hexaédrica. Houve uma distribuição não homogênea na superfície da barra, sendo que o valor de tensão residual máxima variou entre 650 MPa e 450 MPa, e a tensão obtida no centro foi de  $-750$  MPa.

A lubrificação, fator importante na análise do processo, foi variada juntamente com o desalinhamento da



**Figura 7.** Simulações *Deform*<sup>TM</sup> para (a) puxador envolto na barra; e (b) e (c) para diferentes atritos e desalinhamento da feira.

feira, representando um erro de ajuste de  $1^\circ$ . O comportamento referente às tensões residuais destas simulações pode ser visualizado nas Figuras 7b e 7c. Ao modificar o coeficiente de atrito modificou-se o comportamento das tensões residuais após o processo de trefilação. Ambas as simulações apresentaram perfis heterogêneos com diferentes distribuições de tensão, sendo que estas variaram entre  $-700$  MPa no centro e  $400$  MPa na superfície da barra.

#### 4 DISCUSSÃO

Avaliando as simulações realizadas, pôde-se perceber uma redução das tensões residuais com a redução da velocidade. Segundo Nakagiri *et al.* [11] um dos parâmetros do processo que influencia nas condições finais dos produtos trefilados, entre elas o empenamento, é a velocidade de trefilação. Com o aumento desta velocidade de trefilação observa-se um incremento na variável empenamento. Quanto menor a velocidade, maior tempo de contato entre a feira e a barra, o que proporciona uma melhor distribuição do estado de tensões em todo o material. A relação entre velocidade e empenamento aparece claramente em processos de trefilação quando o fio-máquina é trefilado a uma velocidade de  $1.000$  mm/s, sendo situado entre  $1$  mm/m e  $1,3$  mm/m, enquanto que reduzindo a velocidade de trefilação para  $833$  mm/s, há uma redução do empenamento médio para aproximadamente  $0,7$  mm/m [8].

Neste trabalho foram avaliadas duas posições para dois atritos diferentes em lados opostos da ferramenta. Percebeu-se uma grande variação nas tensões residuais entre estes lados e também, um empenamento visível foi verificado nas barras após a trefilação. A força de trefi-

lação também teve um ganho considerável se comparadas com as simulações em que há apenas um atrito constante. Segundo a literatura, este atrito na interface ferramenta/peça pode ter um grande efeito no escoamento do material como defeitos internos e externos de formação e requisitos de maior força e energia no processo [12-15]. Este atrito na interface é devido à ineficiência na lubrificação durante o processo que pode resultar em uma variação no coeficiente de atrito em diferentes locais da feira, sendo que isso modifica o perfil de tensões residuais tornando-o mais heterogêneo.

O comportamento do perfil das tensões residuais demonstradas neste trabalho é similar ao obtido experimentalmente por Difração de Nêutrons e Difração de Raios-X [15], porém, os valores das tensões simuladas são superestimados devido a fatores como efeito Bauschinger e anisotropia que não foram considerados neste trabalho [14,15].

Quanto às diferentes formas de agarre, constatou-se que os resultados são divergentes, sendo que para o *software Deform*<sup>TM</sup>, as tensões residuais variam em torno de  $150$  MPa e a distribuição é heterogênea na superfície da barra; enquanto que para o *Simufact.formingGP*<sup>®</sup> estes valores não apresentam significativas variações.

#### 5 CONCLUSÕES

- Em ambos os *softwares*, pode-se perceber que com a inserção de heterogeneidades no modelo ocorre um aumento considerável na força simulada;
- Em relação às diferentes velocidades de processo simuladas, quanto menor a velocidade melhor a distribuição das tensões residuais em todo o material. Portanto, as simulações com velocidade de  $400$  mm/s apresentaram perfil de tensões mais homogêneo em relação às outras velocidades e também, com menores valores de tensão residual;
- Enquanto que a forma de agarre, apresenta diferenças no perfil das tensões residuais variando em função do *software* utilizado, sendo necessário um estudo mais aprofundado neste caso;
- Valores diferentes de atrito ao longo da barra, devido à ineficiência no processo de lubrificação, levam ao aumento de tensões residuais após a trefilação. Bem como, a combinação dos fatores lubrificação e erro de ajuste da ferramenta nas simulações realizadas, para ambos os *softwares*, resultaram em perfis heterogêneos de tensões residuais, sendo que a combinação destes parâmetros gera maior probabilidade de distorções no produto após o tratamento térmico; e

- Quanto à comparação entre os *softwares*, na estimativa de força, o *Simufact.forming GP*<sup>®</sup> apresenta melhores resultados, porém, na estimativa de tensões residuais, o *Deform*<sup>TM</sup> está mais próxima dos resultados experimentais presentes na literatura. Portanto, cada um apresenta uma característica, um ponto forte.

## Agradecimentos

Agradecemos a Capes, CNPq e FINEP pelo apoio financeiro através do programa Bragecrim (Brazilian German Collaborative Research Initiative in Manufacturing Technology) e também a FAPERGS por financiar uma bolsa de iniciação científica.

## REFERÊNCIAS

- 1 Santos CC. Influência de parâmetros de processo no empenamento de barras trefiladas do Aço 9254 [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: UFRGS; 2008.
- 2 Wang Z, Gong B. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park: ASM International; 2002. Residual stress in the forming of materials; p.141-49.
- 3 Tekkaya AE. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology. 2000;103:14-22. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00413-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00413-1)
- 4 Arbak E, Unal S, Boylu L, Erzincanli I, Tekkaya AE Izeltas AS, et al. Forging simulation at Izeltas. In: 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds 4; June 2007; Cesme, Turkey. Marinha Grande: ISTMA; 2007.
- 5 Gambin W. A method of large finite elements. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1977;11(3):351-65. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825\(77\)90043-3](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(77)90043-3)
- 6 Araújo AC. Análise da formação de bandas de cisalhamento por meio de corpos de prova de tração especiais [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2009.
- 7 Martins COD, Strohaecker TR, Rocha AS, Hirsch TK. Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100. Matéria. 2004;9(1):23-31.
- 8 Palmeira AA. Processos de fabricação IV. Resende: Departamento de Mecânica e Energia - UERJ; 2005. Processos de trefilação. cap. 5.
- 9 MSC Marc<sup>®</sup>. Theory and user information - Volume A. Munique: MSC Software GmbH; 2009. p. 713-26.
- 10 Dieter G. Metalurgia Mecânica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois; 1981. p. 653.
- 11 Nakagiri A, Yamano T, Konada M, Asakawa M, Sasaki W. Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment. Wire Journal International. 2000;34(8):72-80.
- 12 Budinski KG, Blau PJ. Testing methods for solid friction. Materials Park: ASM International; 2000. p. 306-16. ASM Handbook v. 8, Handbook of Mechanical Testing and Evaluation.
- 13 Godfrey H. The benefits of using wire drawing dies with smaller included angles and longer nibs. Wire Journal International. 2000;33(6):102-113.
- 14 Atienza JM, Ruiz-Hervias J, Martinez-Perez ML, Mompean FJ, Garcia-Hernandez M, Elices M. Residual stresses in cold-drawn pearlitic rods. Scripta Materialia. 2005;52(12):1223-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.03.003>
- 15 Rocha AS, Hänisch S, Coser TB, Souza TF, Soares CAT. Simulação computacional de um processo de trefilação para produção de barras redondas de Aço AISI 1045. Revista Escola de Minas. 2011;64(4):513-18. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672011000500018>

Recebido em: 11/11/2013

Aceito em: 16/01/2014