

Influência do ângulo e do coeficiente de atrito nas tensões residuais geradas na trefilação de barras de aço AISI 1045

Die angle and friction coefficient influence on residual stresses generated in wire drawing in bars of AISI 1045 steel

Carla A.T. Soares¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
cadria_soares@yahoo.com.br

Juliana Zottis¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
juliana.zottis@ufrgs.br

Tomaz F. de Souza¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
tomazfs@yahoo.com.br

Lorenzi M. de Freitas¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
lorenzi_colorado@hotmail.com

Tiago Colombo¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
tcacolombo@hotmail.com

Alexandre da Silva Rocha¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
alexandre.rocha@ufrgs.br

Resumo. Trefilação é um dos processos de conformação mecânica mais utilizados na fabricação de barras redondas de aço. Este processo permite alcançar grande precisão dimensional, ótimo acabamento final, além de melhorar a resistência mecânica do produto final. Para uma melhora do processo, é necessário ter conhecimento dos seus parâmetros, identificar a influência de cada um e controlá-los para manter a qualidade da peça acabada, para que se evitem distorções que acarretam em custos elevados na sua correção. Este trabalho tem por objetivo avaliar, através de simulação numérica computacional, a influência do coeficiente de atrito e do

Abstract. Wire Drawing is one of the most widely used metal forming processes in the manufacture of round steel bars and, of all, this process allows a high dimensional accuracy to the parts. To improve this process, it is necessary to know all the parameters and to identify their influence in the quality of the manufactured product. This study aims to evaluate the influence of friction and the die angle, by numerical simulation, in the residual stresses and distortions generated after heat treatment. Numerical simulations of the drawing process of round bars of AISI 1045 steel were carried out for a given diameter reduction aiming to evaluate the residual

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

ângulo de fieira na geração das tensões residuais, comumente associadas às distorções finais de peças trefiladas após tratamento térmico. Foram realizadas simulações numéricas de um processo de trefilação de barras redondas de aço AISI 1045 para uma dada redução de diâmetro com o objetivo de se avaliar o gradiente das tensões residuais no centro e na superfície das barras. As simulações foram realizadas considerando um material em regime elastoplástico do banco de dados do *software* Simufact.FormingGP®, onde foram variados o ângulo da fieira e o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a barra trefilada. Para a validação dessas simulações, foram comparadas as forças geradas pelo processo simulado e as forças calculadas por equações empíricas encontradas na literatura. Os resultados das simulações mostraram maior influência do atrito e do ângulo da fieira nas tensões residuais da superfície da barra. No centro, a influência das tensões residuais é maior para os ângulos menores de fieira. Com a análise da comparação entre as forças, pode-se considerar que o modelo foi reproduzido corretamente e pode prever os valores de força do processo. Evidenciou-se também maior influência do ângulo de fieira em relação ao atrito no surgimento das tensões residuais.

Palavras-chave: trefilação, atrito, ângulo de fieira.

stresses in the center and on the surface of the bars. The simulations were performed considering an elastoplastic material from the Simufact.Forming-GP® database software, in which the die angle and the friction coefficient between the tool and the bars were varied. The validity of the simulations was evaluated by comparing the forces taken from simulation and the forces calculated by empirical equations found in the literature. The simulation results showed greater influence of friction and of the die angle in the residual stresses on the surface of the bar. In the center, the influence in the residual stresses is higher for small die angles. With the analysis of the comparison between the forces it may be assumed that the model has been reproduced correctly and that it can predict the force values of the process. Also, there was a greater influence of the die angle relative to the friction coefficient in the emergence of residual stresses.

Key words: wire drawing, friction, die angle.

Introdução

A trefilação é uma das técnicas mais aplicadas na indústria para a fabricação de barras e fios redondos (He *et al.*, 2003) e, também, um dos principais processos de conformação mecânica que pode ser usado para gerar grandes quantidades de produtos de pequeno diâmetro e com excelente controle dimensional (Lascoe, 1988). Entretanto, no processo de trefilação, é comum aparecerem tensões residuais que podem estar associadas às distorções de forma e a empenamentos no material após a realização de tratamentos térmicos.

Nos processos que envolvem deformação plástica, surgem tensões residuais no material trabalhado, as quais podem afetar as propriedades do produto, com possível rompimento da peça, mesmo estando livre da aplicação de forças externas (Willemse e Naughton, 1985). Para trefilação de barras, essas tensões ocorrem devido às deformações heterogêneas do processo e podem ocasionar a redução da vida em fadiga e a propagação de trincas no produto final (Totten *et al.*, 2002). O valor máximo das tensões residuais na superfície do material não deve superar o valor de tensão equivalente proposto por von Mises,

localmente considerado e levando em conta o histórico de processamento do material (Ripoll *et al.*, 2010; Macherauch e Kloos, 1987).

Para que essas tensões sejam reduzidas, ou que se desenvolvam de forma benéfica, como no caso de tensões compressivas na superfície do material, é preciso conhecer a influência de todos os parâmetros do processo no surgimento das mesmas, bem como sua influência como potencial de distorções e empenamentos.

Na trefilação, um parâmetro muito importante a ser considerado é o atrito entre o material a ser trefilado e a fieira, ferramenta responsável pela redução de diâmetro do material. Esse atrito tem influência na maioria dos processos de fabricação e surge nas interfaces onde existe movimento relativo entre o material e as ferramentas. É um fenômeno indesejável na maioria das vezes por exigir, com seu aumento, maior potência para efetuar a operação, sendo que também afeta o acabamento superficial da peça, influencia na deformação do material alterando valores de força e no desgaste das ferramentas (Avitzur, 1989; Godfrey *et al.*, 2000; Martins e Rodrigues, 2005).

Para a avaliação de tensões residuais, a simulação numérica é uma ferramenta que está

sendo cada vez mais utilizada para o conhecimento dos processos de fabricação, além de sugerir melhoria dos parâmetros na fabricação de peças. A utilização da simulação numérica permite evitar gastos desnecessários, perdas, investimentos em protótipos e testes dispendiosos, bem como melhorar a qualidade do produto acabado (Tekkaya, 2000).

Dessa forma, neste trabalho, foram simuladas numericamente as tensões residuais geradas durante a trefilação de barras redondas de aço AISI 1045 para seis diferentes coeficientes de atrito e nove diferentes ângulos de fiação, a fim de avaliar a influência desses parâmetros no surgimento de tensões residuais no produto final. Essas tensões podem ser associadas a empenamentos ou distorções de forma indesejadas. O conhecimento das configurações de processo que gerem menores tensões residuais pode ser indicado como uma sugestão de parâmetros para melhoria de processos futuros.

Materiais e métodos

Material

Para a realização das simulações numéricas, foi utilizado o aço AISI 1045 laminado, de uso corriqueiro em processos industriais e utilizado na produção de barras trefiladas para eixos automotivos. Esse aço possui boas características de forjabilidade, o que não é válido para a usinabilidade. É um aço padrão de média resistência, baixa temperabilidade, utilizado em eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais de máquinas e virabrequins (Gerdau, 2012). As características da composição química desse material obtidas por espectrometria óptica estão dispostas na Tabela 1.

Simulação numérica do processo de trefilação

Para a realização das simulações, foi desenvolvido um modelo numérico bidimensional axissimétrico, demonstrado na Figura 1, considerando um modelo elasto-plástico não linear de plasticidade para a curva de escoamento

do material AISI 1045 através do método de elementos finitos no *software* comercial Simufact.formingGP®, a fim de avaliar as tensões residuais geradas pelo processo de trefilação. O *software* utiliza o *solver* Marc® que, por sua vez, para este caso, resolve o problema da não linearidade da curva de escoamento do material através do método Newton-Raphson, Equação 1 (Marc®, 2010), o qual introduz um vetor de correção residual para transformar equações lineares em não lineares até sua convergência.

$$K(u)\delta u = F - R(u) \quad (1)$$

Onde u é o deslocamento nodal, F é o vetor força, K é a matriz rigidez, R é o valor residual entre as equações lineares e a equação de escoamento do material (não-linear). Os valores de forças F são relacionados com a tensão de escoamento do material através da Equação 2.

$$R = \sum_{elem} \beta^T \sigma dV \quad (2)$$

Onde β é o operador que transforma deslocamentos em deformações e σ é a tensão de escoamento do material.

Para aplicar o método dos elementos finitos, o sólido deve ter a sua geometria subdividida em várias partes, que são os denominados elementos finitos. Essa subdivisão é realizada através de uma malha que geralmente é composta, no caso bidimensional, por triângulos ou quadriláteros cujos vértices são os nós da rede. Essa subdivisão é realizada de forma automática pelo *software* de simulação utilizado, o qual insere um sistema de equações, que é aplicado nos nós cuja solução determina a magnitude de interesse no fenômeno usado. Neste trabalho, foram utilizadas malhas do tipo quadrilateral (Quad) para simulação bidimensional aplicada nas simulações, onde os elementos utilizados têm 1 mm de largura e 1 mm de comprimento.

A fiação utilizada foi considerada maleável, ou seja, foram adicionados elementos a ela para que pudesse reproduzir as propriedades elásticas de uma ferramenta real. Para imprimir

Tabela 1. Composição química do aço utilizado (Rocha *et al.*, 2011).

Table 1. Chemical composition of the used steel (Rocha *et al.*, 2011).

Elemento de liga	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Al
Massa (%)	0,43	0,21	0,73	0,01	0,02	0,19	0,01	0,19	<0,01	<0,01	<0,01

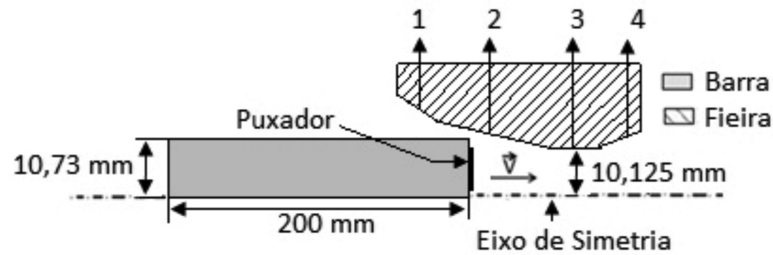


Figura 1. Modelo bidimensional criado.

Figure 1. Model Tridimensional created.

a velocidade de trefilação (V), indicada na Figura 1, foi utilizado um artifício denominado “puxador”, em que foi imposto um contato fixo em uma das pontas da barra, o qual simula o efeito do braço mecânico que traciona uma peça de trabalho através da fieira durante o processo de trefilação. A barra foi modelada em 200 mm de comprimento e 10,73 mm de raio inicial. A barra passou através da fieira tocando-a e, com isso, reproduziu uma redução de aproximadamente 11%, resultando em um raio final da barra trefilada de 10,125 mm.

Conforme a Figura 1, a fieira possui comprimento total de 30 mm e é dividida em 4 regiões: região de entrada (1) com 5 mm de comprimento, responsável pelo guiamento do material através da fieira; região de trabalho (2) com 15 mm de comprimento, responsável efetivamente pela redução de diâmetro e definida pelo ângulo de trefilação, sendo um dos parâmetros mais importantes do processo; região de calibração (3) com 5 mm de comprimento, relacionada à estabilização das propriedades do material que foram alteradas durante a etapa de redução de diâmetro e, por fim; região de saída (4) com 5 mm de comprimento possui um ângulo oposto ao de entrada, sendo associada aos efeitos de retorno elástico do material, além de facilitar a retirada da barra em caso de paradas não planejadas do processo (Rocha *et al.*, 2011).

Foram considerados, também, os efeitos térmicos acoplados, e o material utilizado foi o aço AISI 1045, indicado pelo banco de dados do *software* para três taxas de deformação $1,6s^{-1}$, $8s^{-1}$ e $40s^{-1}$, respectivamente, dadas pelas Equações 3, 4 e 5.

$$k_f = 1018,098 \cdot \varphi^{0,1123} \quad (3)$$

$$k_f = 1012,572 \cdot \varphi^{0,0799} \quad (4)$$

$$k_f = 1008,29 \cdot \varphi^{0,0774} \quad (5)$$

Onde k_f representa a tensão de escoamento e φ a deformação.

Os demais parâmetros utilizados nas simulações numéricas, referentes à peça de trabalho e à fieira, estão demonstrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Parâmetros da peça para simulação do processo de trefilação.

Table 2. Part parameters for the drawing process simulation.

Parâmetro	Componente: Peça
Malha	4500 elementos
Material	AISI 1045
Velocidade de trefilação (mm/s)	1250
Diâmetro inicial e final (mm)	21,463 e 20,25
Temperatura inicial (°C)	20
Módulo de Young (GPa)	210
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade (Kg/mm ³)	7890

Tabela 3. Parâmetros da ferramenta para simulação do processo de trefilação.

Table 3. Die tool parameters for the drawing process simulation.

Parâmetro	Componente: Fieira
Malha	300 elementos
Material	W-Co
Temperatura inicial (°C)	20
Módulo de Young (GPa)	660
Coefficiente de Poisson	0,22
Densidade (Kg/mm ³)	15300
Condutividade Térmica	100
Coefficiente de expansão térmica	0,000005

Foram considerados oito coeficientes de atrito de Coulomb (μ) variando-os de 0,01 a 0,2 (Martins e Rodrigues, 2005). Também, foram variados os ângulos de fiação (2α) de 4,6° até 25°. A validação do modelo computacional foi realizada através da comparação entre os resultados da força de trefilação simuladas e de equações empíricas. Por fim, foram tomadas as tensões residuais da superfície e do centro da barra para análise da influência dos parâmetros variados neste trabalho.

Força

As equações empíricas para a força de trefilação foram comparadas aos resultados simulados. A equação de Sachs (Schaeffer, 2004), descrita pela Equação 6, leva em consideração o atrito e o ângulo de fiação em sua formulação.

$$F = A_1 \cdot k_{fm} \cdot \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot \cot \alpha}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^{\mu \cdot \cot(\alpha)}\right] \quad (6)$$

Onde F é a força de trefilação [N], A_0 e A_1 são, respectivamente, as áreas inicial e final da barra [mm²], k_{fm} é a tensão de escoamento média [MPa], μ é o coeficiente de atrito de Coulomb e α é o semi-ângulo da fiação [radianos].

Já a equação de Avitzur (Avitzur, 1983), Equação 7, leva em consideração, também, a região de calibração da fiação.

$$F = A_1 \cdot k_{f0} \cdot \frac{\left\{2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\alpha}{(\sin^2 \alpha)} - \cot \alpha\right) + 2 \cdot \mu \cdot \left[\cot \alpha \cdot \left[1 - \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right)\right] \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right) + \frac{2 \cdot H_c}{D_1}\right]\right\}}{1 + 4 \cdot \mu \cdot \frac{H_c}{D_1}} \quad (7)$$

Onde k_{f0} é a tensão de escoamento inicial [MPa], D_0 e D_1 são, respectivamente, os diâmetros inicial e final da barra [mm], H_c é o comprimento da região de calibração da fiação [mm].

Resultados e discussão

Análise da força de trefilação

Na Figura 2, são comparados os resultados de força calculados pelo *software* com as equações de Sachs (Equação 6) e de Avitzur (Equação 7) para seis diferentes coeficientes de atrito, variando-os de 0,01 até 0,2 e para onze diferentes ângulos de fiação, variando-os de 4° até 26°.

Analisando os dados da Figura 2, pode-se dizer que, de uma forma geral, a força simulada acompanha o perfil de força calculada empiricamente. Pode-se observar, também, que ocorre uma pequena diferença entre as forças calculadas e simuladas, sendo que a média dessa diferença foi de 8% para a equação de Sachs (Figura 2a) e de 7% para Avitzur (Figura 2b). Tomando o caso do coeficiente de atrito empregado, pode-se perceber que um aumento no seu valor requer uma maior força de trefilação, pois, como já analisado, um aumento desse coeficiente imprime uma maior dificuldade para que o material atravesse a ferramenta de trefilação. Ao se avaliar a influência do ângulo de trefilação, para ambas as equações, o aumento do ângulo permite um decréscimo da força até, aproximadamente, o ângulo de 13°, após isso, a força estabiliza-se até o ângulo de 18° e, então, volta a aumentar. No entanto, para o atrito de 0,01, o comportamento da força foi crescente. Conforme o esperado, a força aumenta proporcionalmente com o atrito.

Análise das tensões residuais

Para o presente estudo, os casos mais críticos das tensões residuais encontram-se na superfície e no centro da barra, sendo que, nas demais posições da barra, os valores de tensão residuais apresentam valores intermediários. A Figura 3 demonstra um exemplo

do perfil geral de tensões residuais encontrados em todos os ângulos avaliados.

Na Figura 3, para a direção axial, as tensões são tratativas na superfície e compressivas no centro da barra (Atienza *et al.*, 2005), sendo que a direção radial possui comportamento compressivo no centro e zero na superfície. A direção tangencial apresenta o perfil semelhante à direção axial, porém, em menores proporções. Este comportamento já havia sido encontrado em trabalhos prévios (Ripoll *et al.*, 2010; Atienza *et al.*, 2005; Rocha *et al.*, 2011).

Como o perfil observado foi o mesmo para todas as simulações, optou-se por analisar apenas as tensões no centro e na superfície da

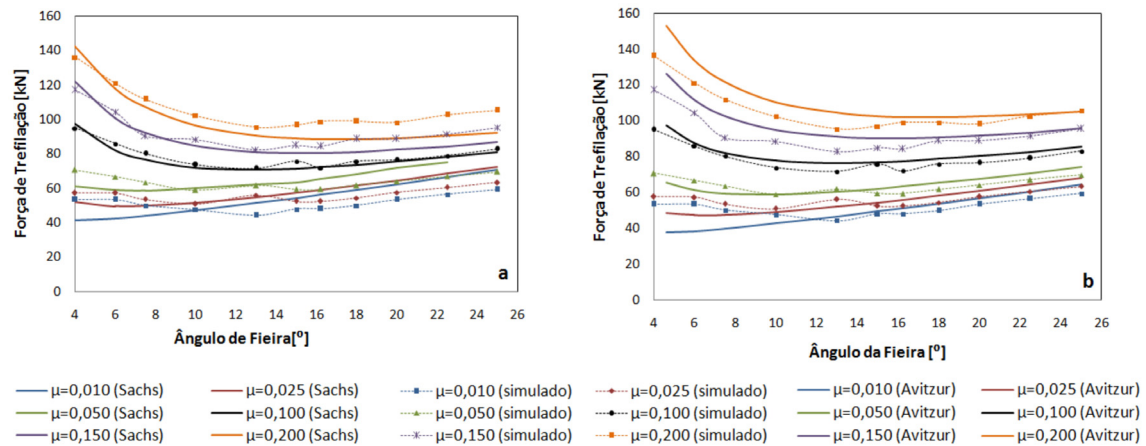


Figura 2. Forças simuladas e calculadas pelas equações de (a) Sachs e (b) Avitzur.

Figure 2. Simulated and calculated forces for the equations (a) Sachs and (b) Avitzur.

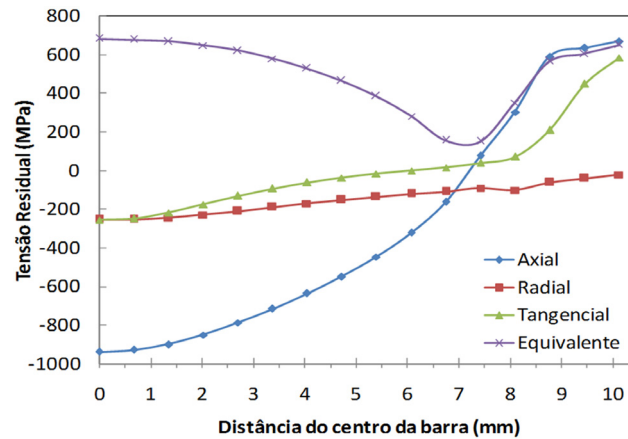


Figura 3. Perfil de tensões residuais encontrados em todas as simulações.

Figure 3. Residual stresses profile found after all the simulations.

barra, ou seja, os pontos máximos de tensões. As avaliações das tensões residuais no centro da barra estão demonstradas na Figura 4.

Podem-se observar, na Figura 4, as tensões residuais geradas no centro da barra para as direções axial, tangencial e radial e, também, a tensão equivalente. Essa tensão equivalente foi calculada através do critério de von Mises, onde se pode observar que ela tem comportamento semelhante às tensões axiais.

Para a direção axial, Figura 4a, percebe-se que os menores ângulos resultam nas tensões residuais menos compressivas, que vão tornando-se cada vez mais compressivas de acordo com o aumento do ângulo de fieira até um ângulo de trefilação entre 8° e 10°. Para ângulos entre 10° e 15°, há um leve decréscimo na compressibilidade das tensões, havendo uma estabilização em torno de -950 MPa após esse valor. O valor mínimo de tensão que a direção axial

atingiu foi de -575 MPa para o ângulo de 4,6° e atrito de 0,2; já o valor máximo alcançado, -1075 MPa, foi para o ângulo de 10° e atrito 0,05.

Confirmou-se a condição de igualdade entre as tensões residuais para as direções radial (Figura 4b) e tangencial (Figura 4c). Para essas duas direções, as tensões tendem a tornarem-se menos compressivas com o aumento do ângulo de fieira e a permanecerem estáveis com a variação do atrito. Para os ângulos maiores que 15°, em ambas as direções, as tensões residuais tendem a se estabilizar e chegam a atingir o valor mínimo de -200 MPa. Para ângulos menores que 15°, as tensões tornam-se mais compressivas, podendo chegar a -400 MPa no ângulo de 6°. Esses valores encontrados não interferem consideravelmente na avaliação dos valores de tensão residuais, já que a direção axial é a componente com maior influência na magnitude dessas

tensões, vide a proximidade entre essa direção e a tensão equivalente do material.

Na Figura 4d, são apresentados os resultados de tensão equivalente para os ângulos de fieira simulados, mostrando que o estado de tensões residuais está em equilíbrio, pois os valores não alcançam, em nenhuma região da barra, a tensão de escoamento para a dada deformação de 0,1168 aplicada nas Equações 1, 2 e 3. O valor máximo alcançado foi de 725 MPa para o ângulo de 10° com atrito de 0,025, abaixo da tensão de escoamento do material após a trefilação para a menor taxa de deformação, 8 s⁻¹, que é de 800 MPa.

Foi analisado que, para o centro da barra, com menores ângulos de fieira, o atrito exerce maior influência no valor das tensões residuais, onde baixos atritos fornecem maiores gradientes de tensão residual. Isso ocorre devido ao fato de que ângulos menores de fieira possibilitam uma menor penetração da deformação no material e uma redução na força de trefilação.

Sendo assim, o aumento do atrito é o maior responsável para o aumento da força de trefilação e da heterogeneidade das deformações, ocasionando tensão residual (Lu, 1996).

A Figura 5 apresenta as tensões residuais gerada na superfície da barra, para as direções axial, tangencial, radial e equivalente, calculada pelo critério de von Mises.

Para a direção axial (Figura 5a) percebe-se uma grande variação das tensões residuais com o atrito e com a mudança de ângulo. O maior valor trativo de tensão encontrado foi para o ângulo de 13° com atrito 0,01, onde chegou a 775 MPa. O valor mínimo foi de 375 MPa para o ângulo de 4,6° e atrito de 0,2. Para ângulos de fieira maiores que 15°, as tensões tendem a se estabilizar, porém, percebe-se uma diferença média de 200 MPa no perfil quando o maior e o menor atrito são comparados.

Para a direção radial (Figura 5b) as tensões residuais tendem a zero, como era esperado. Para a componente tangencial (Figura 5c) foi

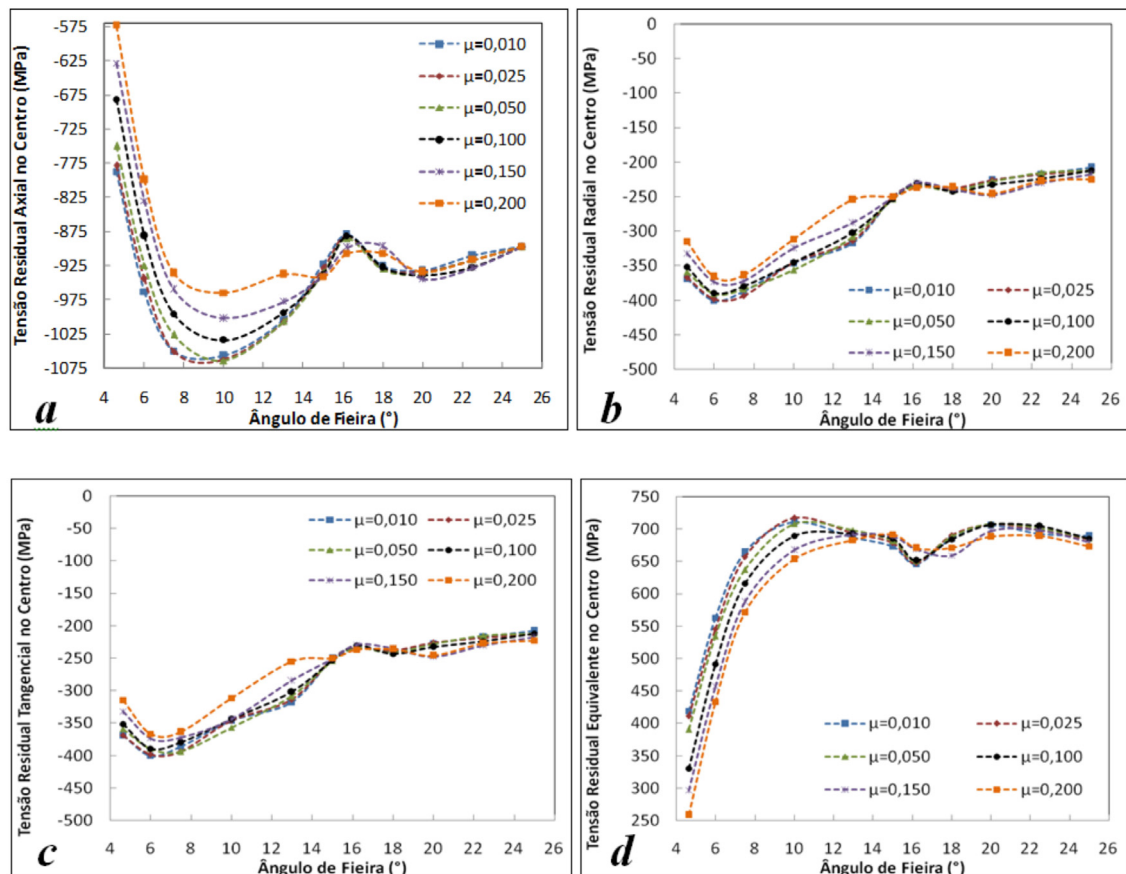


Figura 4. Tensões residuais no centro da barra para as direções (a) axial, (b) radial, (c) tangencial e (d) von Mises para os ângulos de 4,6° a 25° e atritos de 0,01 a 0,2.

Figure 4. Residual stresses in the center bar for the directions (a) axial, (b) radial, (c) hoop and (d) von Mises for the angles 4,6° to 25° and frictions 0,01 to 0,2.

analisada uma queda das tensões com a redução do atrito e uma diferença média entre o menor e maior atrito de 130 MPa. Quando o ângulo é avaliado, há diferenças de cerca de 100 MPa para um mesmo atrito na direção tangencial na superfície da barra.

A tensão equivalente encontrada (Figura 5d) apresentou um perfil semelhante ao da componente axial, sendo que a tensão máxima ficou em torno de 700 MPa, abaixo da tensão de escoamento como observado anteriormente.

Na superfície da barra, a influência do ângulo de fieira é tão importante quanto o valor do atrito para as tensões residuais, pois essa região estará em maior contato com a fieira, ocasionando uma grande influência desse parâmetro na heterogeneidade das deformações.

Quando se analisa o ângulo da fieira, percebe-se que a tensão residual tende a reduzir com a redução do ângulo, pois os valores de

força de trefilação, um dos fatores que influenciam o surgimento das tensões residuais, são diretamente proporcionais aos valores do ângulo da fieira, Equações 4 e 5.

Conclusão

Com a análise da comparação entre as forças calculadas e simuladas, pode-se considerar que o modelo foi reproduzido corretamente, pois a diferença média alcançada entre as forças foi de 8% para a equação de Sachs e 7% para a equação de Avitzur. As diferenças nos resultados de força permitem dizer que o modelo desenvolvido pode prever os valores de força do processo.

Para o presente estudo, os casos mais críticos das tensões residuais encontram-se na superfície e no centro da barra, pois estas influenciam as características do perfil de tensões do produto final.

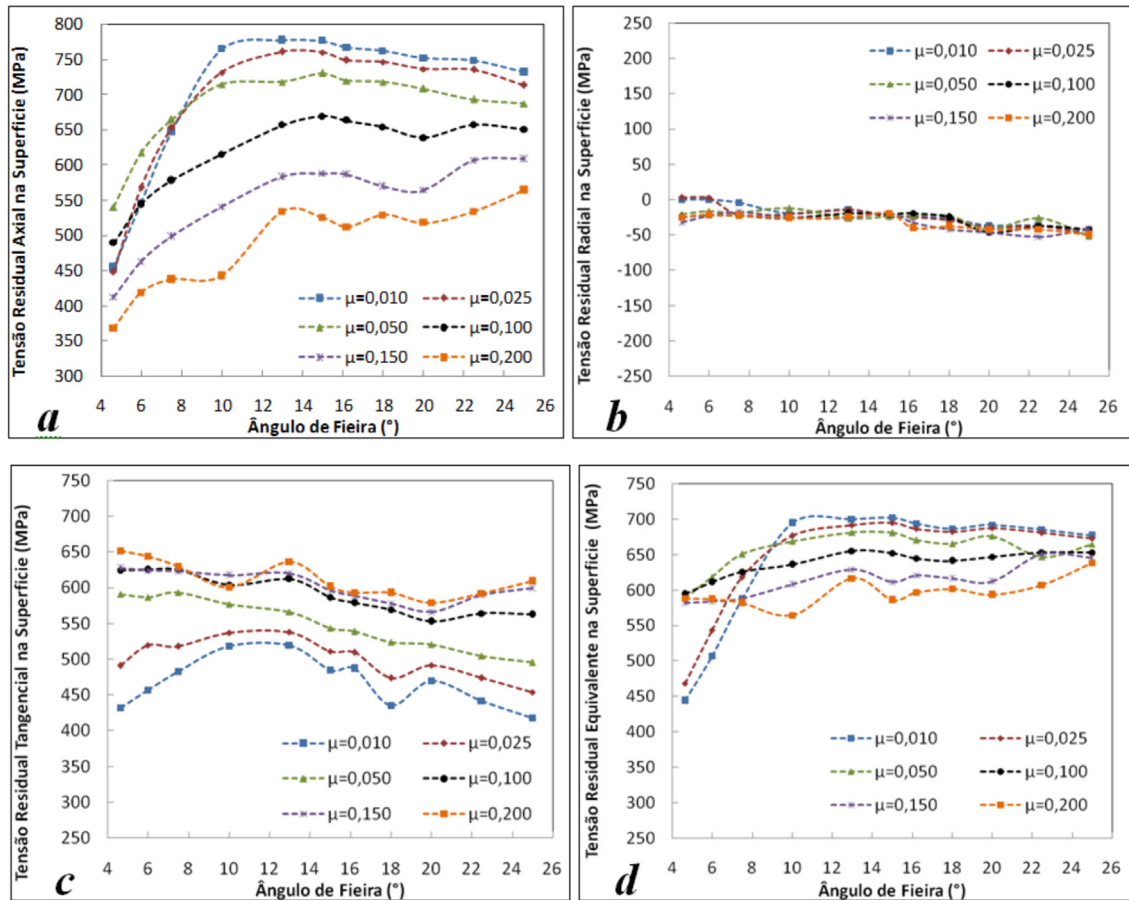


Figura 5. Tensões residuais na superfície da barra para as direções (a) axial, (b) radial, (c) tangencial e (d) von Mises para os ângulos de 4,6° a 25° e atritos de 0,01 a 0,2.

Figure 5. Residual stresses on the surface bar for the directions (a) axial, (b) radial, (c) hoop and (d) von Mises for the angles 4,6° to 25° and frictions 0,01 to 0,2.

Para o centro da barra, o atrito exerce maior influência nas tensões residuais para ângulos de fiação menores, pois esse parâmetro modifica a profundidade da deformação. Baixos ângulos de fiação não permitem uma grande profundidade de deformação, causando um perfil de deformações heterogêneas e gerando altos gradientes de tensão residual.

Na superfície da barra, há uma influência tanto do ângulo como do atrito nas tensões residuais. Quando se analisa o ângulo da fiação, percebe-se que a tensão residual tende a reduzir com a redução do ângulo devido ao decréscimo nos valores de força de trefilação, fator também relevante no resultado dos gradientes de tensão residual.

Para trabalhos futuros, sugere-se a consideração da anisotropia do material que é proveniente de um processo de laminação que insere diferentes características quando levadas em conta as diferentes orientações de grão do material. Além disso, deve-se realizar um trabalho de levantamento experimental dos valores de tensões residuais, sendo o processo de difração de Raios-X indicado para a medição das tensões residuais na superfície da barra e o processo de medição por Difração de Nêutrons indicado para a medição das tensões residuais no centro da barra, ou em regiões intermediárias.

Referências

- ATIENZA, J.M.; RUIZ-HERVIAS, J.; MARTINEZ-PEREZ, M. L.; MOMPEAN, F. J.; GARCIA-HERNANDEZ, M.; ELICES, M. 2005. Residual Stresses in Cold-drawn Pearlitic Rods. *Scripta Materialia*, **52**(12):1223-1228.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.03.003>
- AVITZUR, B. 1983. *Handbook of Metal Forming Process*. New York, John Wiley & Sons, 1020 p.
- GERDAU. 2012. Aço AISI 1045. Disponível em: <http://www.comercialgerdau.com.br>. Acesso em: 19/03/2012.
- GODFREY, H.J.; RICHARDS, J.F.; SASON, A.S. 2000. The benefits of using wiredrawing dies with smaller included angles and longer nibs. *Wire Journal International*, **33**(6):102-113.
- HE, S.; VAN BAEL, A.; LI, S. Y.; VAN HOUTTE, P.; MEI, F.; SARBAN, A. 2003. Residual Stress Determination in Cold Drawn Steel Wire by FEM Simulation and X-ray Diffraction. *Material Science and Engineering A*, **346**(1):101-107.
- LASCOE, O.D. 1988. *Handbook of Fabrication Processes*. Novelty, ASM International, 456 p.
- LU, J. 1996. *Handbook of Measurements of Residual Stresses*. Bethel, Society for Experimental Mechanics (U.S.), 238 p.
- MACHERAUCH, E.; KLOOS, K. 1987. Origin, Measurement and Evaluation of Residual Stress. *Residual Stresses in Science and Technology*, **1**(1):3-27.
- MARC®. 2010. *Theory and user information*. Plymouth, Simufact-Americas, vol. A, 890 p.
- MARTINS, P.; RODRIGUES, J. 2005. *Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica*. Lisboa, Escolar Editora, vol. 1, 545 p.
- RIPOLL, M.R.; WEYGAND, S.M.; RIEDEL, H. 2010. Reduction of Tensile Residual Stresses During the Drawing Process of Tungsten Wires. *Materials Science and Engineering A*, **527**(1):3064-3072.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.079>
- ROCHA, A.S.; HÄNISCH, S.; COSER, T.B.; de SOUZA, T.F.; SOARES, C.A.T. 2011. Simulação Computacional de um Processo de Trefilação para Produção de Barras Redondas de Aço AISI 1045. *Revista Escola de Minas*, **64**(4):513-518.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672011000500018>
- SCHAEFFER, L. 2004. *Conformação Mecânica*. 2ª ed., Porto Alegre, Imprensa Livre Editora, 167 p.
- TEKKAYA, A.E. 2000. State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, **103**(1):14-22.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00413-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00413-1)
- TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. 2002. *Handbook of Residual Stresses and Deformation of Steel*. Novelty, ASM International, 477 p.
- WILLEMSE, P.F.; NAUGHTON, B.P. 1985. Effect of Small Drawing Reductions on Residual Stresses in Thin Cold-drawn Steel Wire, as Measured by X-ray Diffraction. *Material Science and Technology*, **1**(1):41-44.

Submetido: 06/08/2012

Aceito: 25/10/2013