



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE FIEIRA¹

Carla Adriana Theis Soares²
 Tomaz Fantin de Souza³
 Tiago Brun Coser⁴
 Lorenzi Moreira de Freitas⁵
 Alexandre da Silva Rocha⁶

Resumo

As tensões residuais geradas no processo de trefilação de barras têm influência direta na qualidade do produto final. A simulação numérica é uma ferramenta de grande utilidade para estimar-se os valores destas. Neste contexto, foram realizadas simulações numéricas de um processo de trefilação de um aço AISI 1045 laminado para diferentes ângulos de fieira obtendo-se resultados para tensões residuais, forças e deformações do processo em questão. Os resultados obtidos permitem avaliar os perfis de tensões residuais e sua variação para diferentes ângulos de fieira.

Palavras-chave: Trefilação; Tensões residuais; Simulação computacional.

NUMERICAL SIMULATION OF RESIDUAL STRESSES GENERATED IN THE DRAWING PROCESS FOR DIFFERENT DIE ANGLES

Abstract

Residual stresses generated in the drawing process has direct influence on the quality of the final product. The numerical simulation is a valuable tool to estimate the level of these stresses. In this context, numerical simulations of a drawing process of a rolled AISI 1045 steel were carried out for different angles of the die to obtain results for residual stresses, forces and deformations of the process under investigation. The results obtained allow to have a view on the behavior of the residual stress generation for different die angles.

Key words: Cold-drawing; Residual stresses; Numerical simulation.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Mestranda do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. cadria_soares@yahoo.com.br

³ Mestrando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. tomazfs@yahoo.com.br

⁴ Graduando do curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. tiago.coser@ufrgs.br

⁵ Graduando do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. lorenzi.freitas@ufrgs.br

⁶ Prof. Dr. Eng. do PPGEM – UFRGS e pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Escola de Engenharia da UFRGS, Brasil. alexandre.rocha@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

O avanço das descobertas em conformação mecânica possibilitou a fabricação de peças com diferentes geometrias e baixo custo unitário, além do material adquirir propriedades que somente os processos de conformação mecânica podem proporcionar. Mas, uma das principais limitações é o alto custo inicial que inviabiliza a flexibilidade da produção e, conseqüentemente, as alterações no processo.

A trefilação é um dos principais processos de conformação mecânica e pode ser usada para gerar grandes quantidades de produtos de pequeno diâmetro e com excelente controle dimensional⁽¹⁾ sem perdas de material ou gastos desnecessários. Esse processo impõe deformações plásticas ao material que induzem tensões residuais, as quais se alteram durante as diferentes etapas do processo.

Tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos. Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos será zero⁽²⁾. O valor máximo em módulo que o valor efetivo (dado, por exemplo, pela tensão equivalente de Von Mises) das tensões residuais poderá chegar é o próprio limite de escoamento do material, localmente considerado e levando em conta o histórico de processamento do material.

A influência que cada parâmetro do processo tem no produto final precisa ser muito bem conhecida e controlada de forma que sejam evitados perdas e gastos desnecessários antes de investimentos em protótipos e testes dispendiosos além de melhorar a qualidade do produto final.⁽³⁾ A simulação numérica pode ser uma importante ferramenta para cumprir este objetivo. Nas últimas décadas o seu uso, dentre outros, o método de elementos finitos,⁽⁴⁾ tem permitido aperfeiçoar o estudo dos diferentes processos de fabricação de maneira que se evitem erros de projeto que possam acarretar custos elevados na sua correção através de longas etapas de *try-out*. Para o caso da trefilação pode-se, por exemplo, através da simulação, aperfeiçoar as dimensões da peça de trabalho, geometria da fiação, aperfeiçoar parâmetros de processo, dentre outras possibilidades.

Neste trabalho foram simuladas numericamente as tensões residuais geradas durante a trefilação para barras com perfil redondo de aço AISI 1045 laminado para os seguintes ângulos de fiação: 12°, 15°, 16,2° (ângulo ótimo estimado por fórmulas empíricas), 18° e 20° considerando uma redução de 12,51% em todas as simulações. Desenvolveram-se modelos 2D para a simulação de elementos finitos de modo que se reproduzisse o processo de fabricação.

Para que fossem atingidos os objetivos da simulação da trefilação, necessitou-se levantar todos os parâmetros com base em processos industriais de uso corrente, dentre eles: o fator de atrito, curva de escoamento das barras, dimensões e velocidade de trefilação. A necessidade do conhecimento prévio do valor do fator de atrito do processo como dado de entrada para o software utilizado, impôs a realização de simulação computacional para o ensaio do anel, de modo a levantar uma curva de calibração que foi confrontada com os resultados experimentais. Para a obtenção da curva de escoamento do material, realizou-se ensaio de compressão para barras de um aço AISI 1045 laminado de uso comum na indústria de trefilação.

A simulação computacional, auxiliada por formulações matemáticas para o cálculo da força, permitiu determinar o valor de ângulo de fiação que minimiza a força de trefilação.

2 ALIMENTAÇÃO DO SOFTWARE

2.1 Curva de Escoamento

Para adquirir a curva de escoamento do material foi realizado o ensaio de tração, que consiste na aplicação de carga uniaxial em um corpo-de-prova até a ruptura, medindo-se a variação do comprimento em função da carga.⁽⁵⁾ Ensaíram-se corpos de prova cilíndricos de aço AISI 1045 com 10 mm de comprimento (área útil de ensaio) e 5 mm de diâmetro, com velocidade de deformação de 0,0001 1/s obtendo-se a relação matemática para a curva de escoamento, ou seja, de tensão verdadeira versus deformação verdadeira (*Equação 1*), que foi inserida no software.

$$k_f = 1157,8 \cdot \varphi^{0,15} \quad (1)$$

Onde k_f é a tensão de escoamento do material, φ é a deformação verdadeira, que é definida pelo $\ln(A_0/A_1)$.

Cabe ressaltar que com a utilização desta curva na simulação não está sendo levado em conta aspectos como endurecimento cinemático, bem como efeitos de variação da taxa de deformação.

2.2 Coeficiente de Atrito

Atrito é a resistência ao movimento das superfícies de dois corpos em contato, durante o deslizamento de um sobre o outro.⁽¹⁾ O atrito influencia significativamente a deformação do material,^(6,7) alterando os valores de forças e desgaste na relação ferramenta-peça.

Para a medição deste atrito existe o conceito de coeficiente de atrito de Coulomb (μ) que é o quociente entre a força tangencial necessária para realizar o movimento relativo entre as duas superfícies e a força normal aplicada entre as mesmas.⁽⁸⁾ Para obter-se o seu valor foi realizado o teste do anel que, por sua vez, avalia as variações geométricas do anel em compressão. Para baixos valores de atrito, a deformação do anel segue um caráter de deformação do disco, ou seja, tanto o diâmetro interno quanto o diâmetro externo do anel deformam-se radialmente para fora. Já para o caso de altos coeficientes de atrito, enquanto o diâmetro externo deforma-se radialmente para fora aumentando o seu valor, o diâmetro interno deforma-se radialmente para dentro, diminuindo o seu tamanho.^(9,10)

Foram realizados dois ensaios para o aço AISI 1045 sob estudo, enquanto que para os punções foi utilizado um material para a fiação (metal duro, WC-Co) e um lubrificante comum em processos industriais. As dimensões dos anéis foram de 20 mm de diâmetro externo, 10 mm de diâmetro interno e 6 mm de altura. Estes anéis foram submetidos a reduções de altura de aproximadamente 20%, 40% e 60%. A variação do diâmetro interno foi registrada como função da redução de altura, gerando as curvas que descrevem o atrito no processo.

Após a realização dos testes foi desenvolvida a simulação do ensaio do anel. O objetivo desta foi gerar curvas de calibração para serem comparadas com as curvas experimentais obtendo-se assim, o valor do atrito que alimentará o software. Foram realizadas nove simulações, em cada uma variando o coeficiente de atrito de Coulomb de 0,05 a 0,45.

Na Figura 1 são mostrados os resultados da simulação para o ensaio do anel, bem como as duas curvas obtidas experimentalmente (Ensaio 1 e 2).

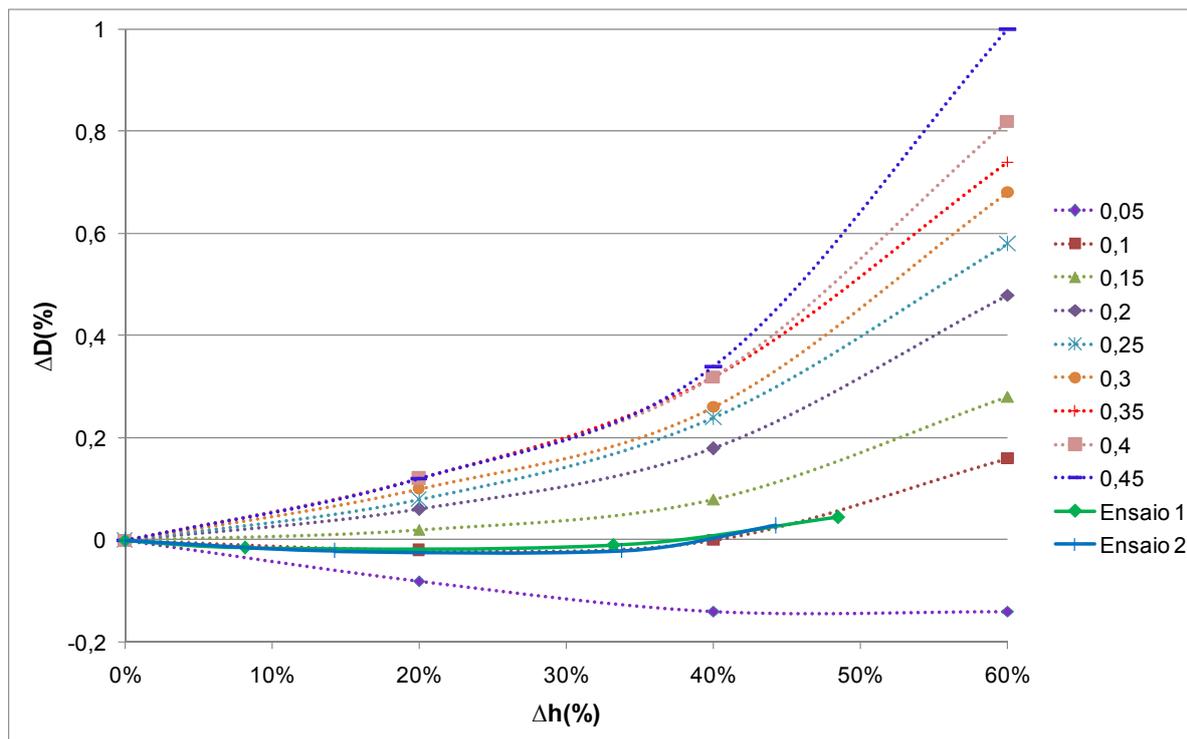


Figura 1 – Ensaio do anel para obtenção do coeficiente de atrito.

Analisando-se o gráfico acima se percebe que o valor do coeficiente de atrito de Coulomb (μ) estimado fica em torno de 0,10.

Cabe observar que os valores de atrito obtidos são característicos do ensaio realizado, podendo diferir um pouco dos valores reais que são desenvolvidos num processo de trefilação, tendo em vista o efeito das altas velocidades nos processos industriais, espera-se que na realidade os valores presentes na trefilação sejam um pouco inferiores ao estimados pelo ensaio do anel.

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO

Gerou-se um modelo numérico a partir do software Simufact.formingGP[®] para o estudo do estado de tensões residuais para o processo de trefilação do aço AISI 1045. O material foi considerado isotrópico, não foram considerados os efeitos térmicos acoplados e a ferramenta do processo (fieira) foi considerada rígida. Foi utilizada a equação da curva de escoamento do material, conforme a Equação 1.

O modelo desenvolvido para descrever o processo de trefilação foi um modelo axissimétrico mecânico bidimensional que permite que se simule uma fatia infinitesimal, porém os resultados são considerados iguais para toda a circunferência da barra, o que permite reduzir o tempo de cálculo e esforço computacional. Para imprimir a velocidade de trefilação, foi colocada em uma das pontas da barra uma ferramenta denominada “puxador”, a qual simula o efeito do braço mecânico que puxa a barra durante o processo real de trefilação. O modelo está exposto na Figura 2.

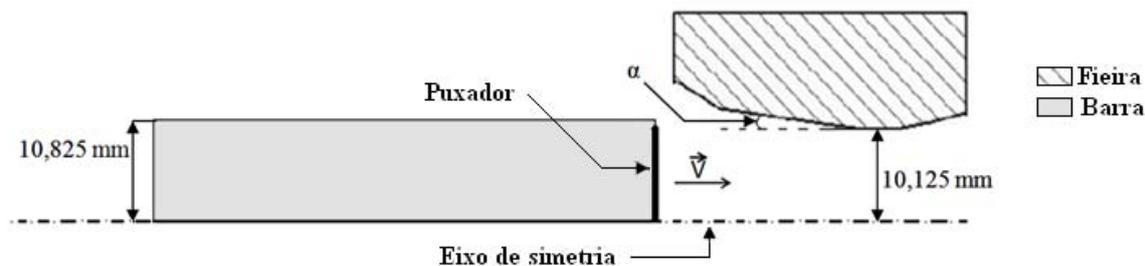


Figura 2 - Modelo bidimensional 2D considerando a simetria do processo utilizado na simulação.

O raio inicial é de 10,825 mm e o final de 10,125 mm. O ângulo de feira é do dobro do semi-ângulo de feira (α). Foram realizadas simulações do processo de trefilação para os ângulos de feira de 12°, 15°, 16,2° (ângulo ótimo, posteriormente detalhado), 18° e 20°, considerando uma redução de 12,51% para todas as simulações. A velocidade de trefilação (V) utilizada foi de 1.500 mm/s e representa o processo real utilizado na Indústria.

Os parâmetros utilizados nas simulações são mostrados na Tabela .

Tabela 1 - Parâmetros da simulação do processo de trefilação

Análise	Axissimétrica mecânica
Elementos	10x150
Material	AISI 1045
Coeficiente de atrito (μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1500 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,65 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
Ângulos de feira (2α)	12°; 15°; 16,2°; 18° e 20°

4 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Antes de se comparar os perfis de tensões residuais obtidos na simulação com os resultados experimentais, foi feita uma análise de validação numérica para 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:⁽¹¹⁾

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad (2)$$

Onde: k_{fm} é a tensão de escoamento média, φ_A é a deformação verdadeira de área do material, μ é o atrito de Coulomb, α é o semi-ângulo da feira e A_1 é a área final da peça.

Para fins de comparação, decidiu-se achar analiticamente o semi-ângulo ótimo de feira ($\alpha_{\text{ótimo}}$) que minimizasse a força. Para isso, derivou-se a Equação 2 em relação ao semi-ângulo e igualou-a a zero (Equação 3) chegando a Equação 4.

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} + A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot A_1 \cdot \varphi_A \cdot k_{fm} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A} \quad (2)$$

$$\frac{dF}{d\alpha} = 0 \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \sqrt{1,5 \cdot \mu \left(\ln \frac{A_0}{A_1} \right)} \quad (4)$$

Onde A_0 é a área inicial do fio-máquina, ($\alpha_{\text{ótimo}}$) é o semi-ângulo ótimo.

O resultado deste cálculo, para o caso, foi de um semi-ângulo ótimo de fieira de 8,1° (ângulo de fieira ótimo de 16,2°). Além disso, foram analisadas as tensões residuais para esta fieira e os resultados estão dispostos a seguir.

Os resultados de força na trefilação calculadas e simuladas estão expostos na Figura 3.

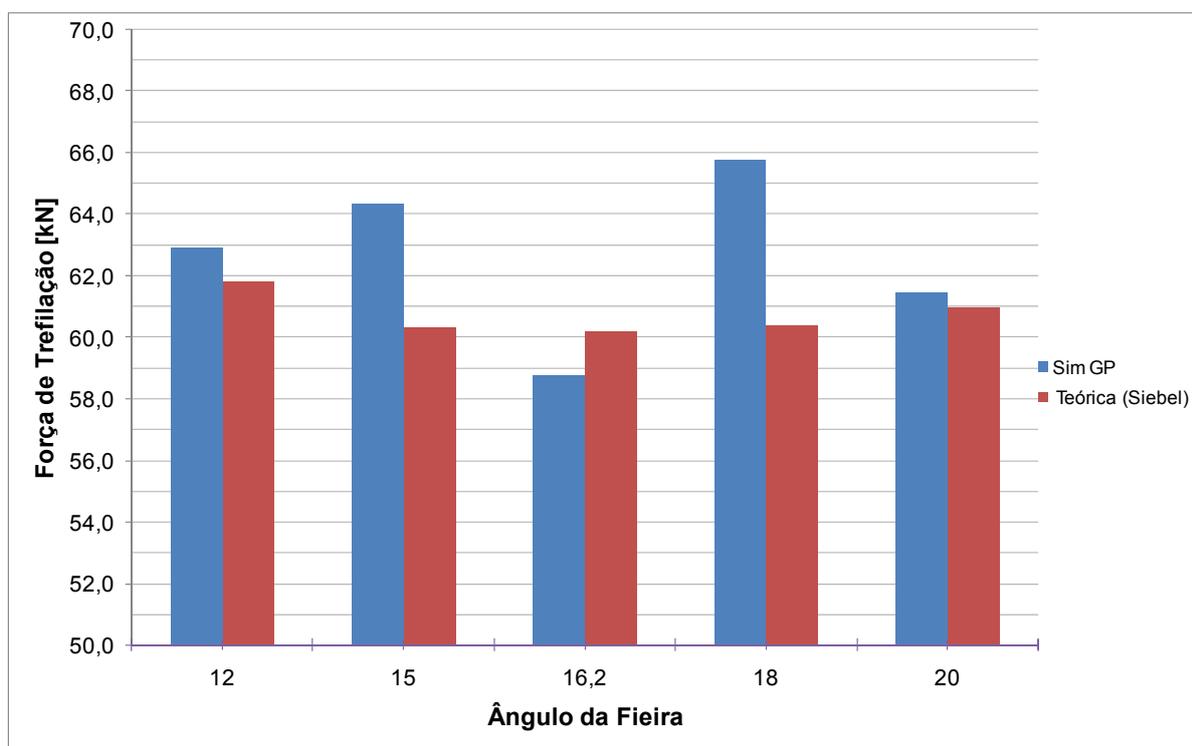
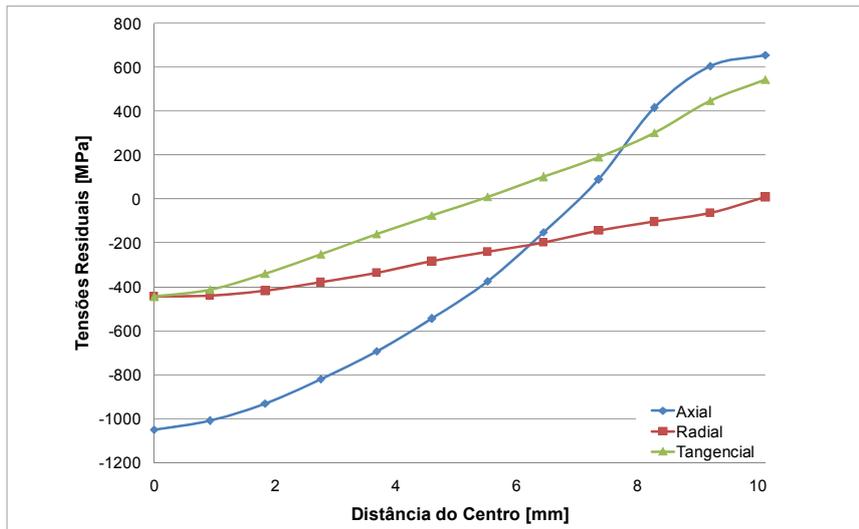


Figura 3 - Comparação entre os valores de força teórica calculada e os valores simulados.

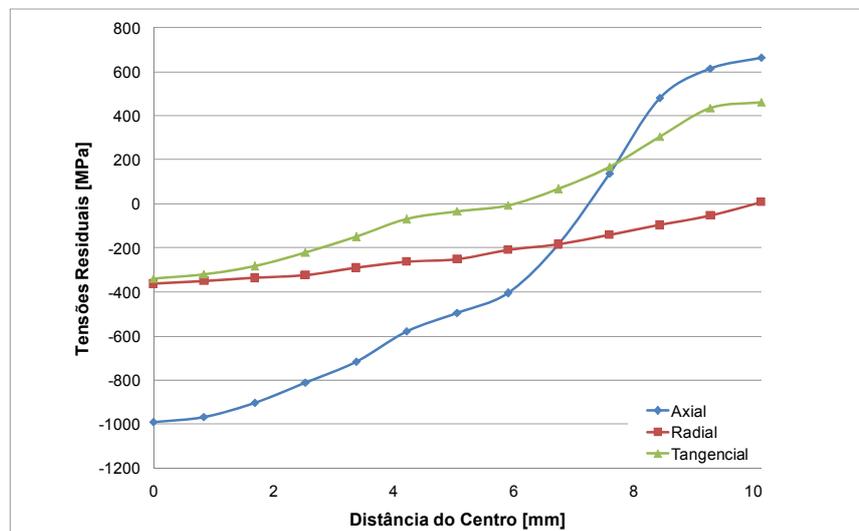
Tanto as simulações quando os cálculos teóricos apresentam diferenças em torno de 8% para as forças de trefilação, com isso, pode-se afirmar que o processo está adequadamente modelado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

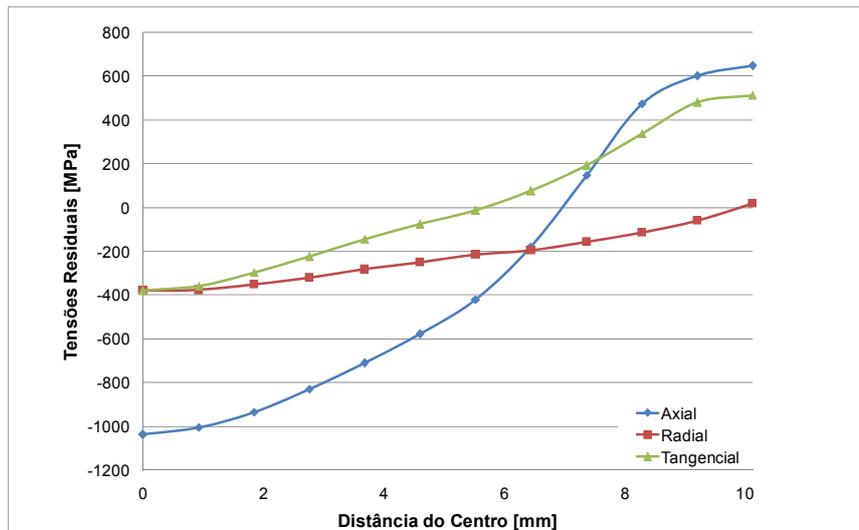
Na Figura 4 são apresentados os perfis de tensões residuais para os ângulos de 12°, 15°, 16,2° (ângulo ótimo), 18° e 20°.



(a)



(b)



(c)

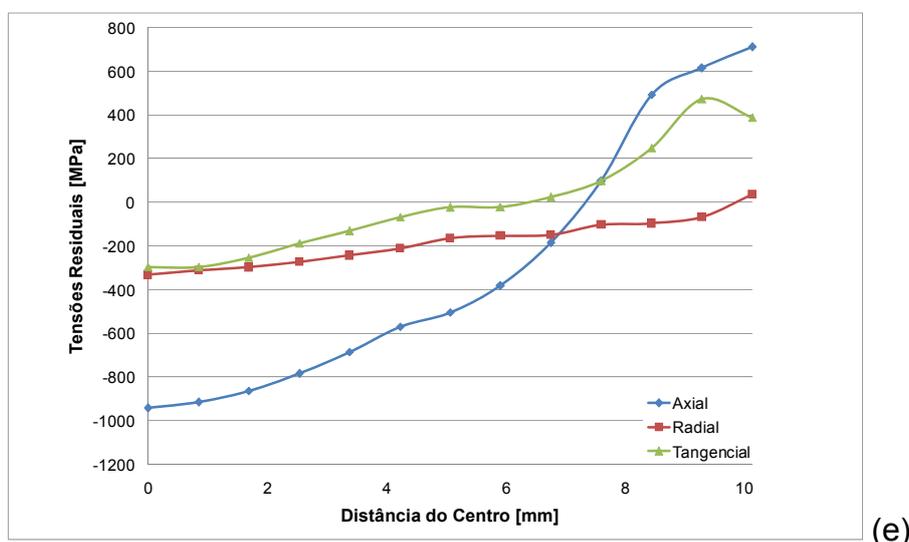
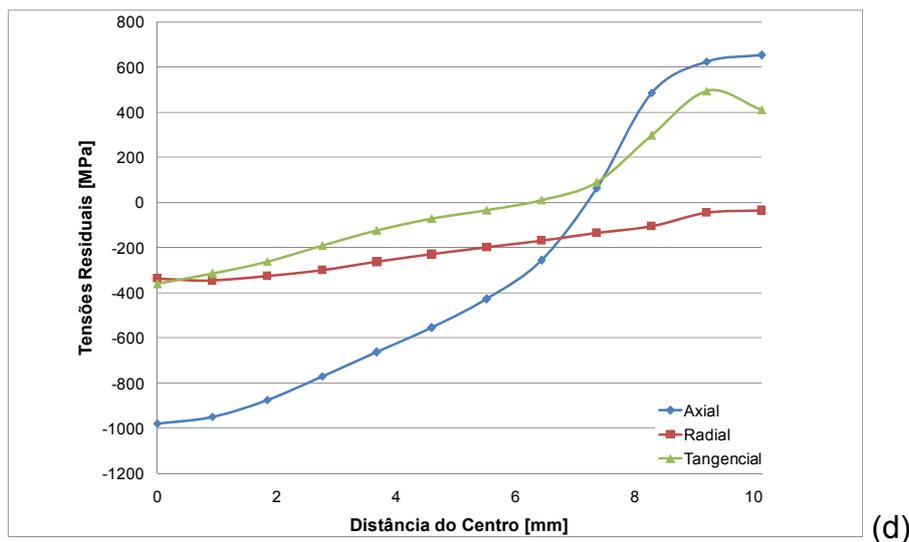


Figura 4 - Tensões Residuais simuladas para os ângulos de feira de 12° (a), feira de 15° (b), feira de 16,2 (c), feira de 18° (d) e feira de 20° (e).

As tensões residuais para a direção axial demonstram um comportamento trativo na superfície e compressivo no centro da barra, atingindo um valor máximo em torno de 700 MPa na superfície e mínimo de -1.050.MPa no centro. A direção radial apresenta comportamento compressivo em toda a área da barra, atingindo valores mínimos no centro em torno de -450.MPa e aproximando-se de 0 na superfície. A direção tangencial apresenta comportamento parecido com o apresentado na direção axial, trativa na superfície e compressivo no centro da barra.

Os valores das tensões residuais para as direções tangencial e axial após a trefilação devem ser próximos na superfície, o que está de acordo com o resultado simulado.^(7,12,13) Os valores das tensões residuais para as direções radial e tangencial são idênticos no centro da barra, tendo em vista que para a posição central estas duas componentes de tensão apresentam a mesma direção.

Na Figura 5, é apresentada uma comparação dos perfis de tensões residuais nas direções axial, radial e tangencial com todos os ângulos simulados.

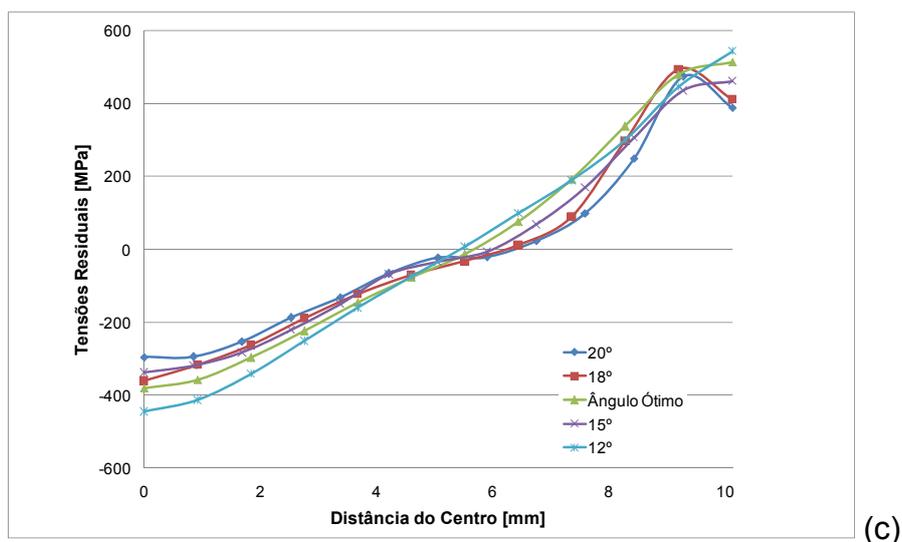
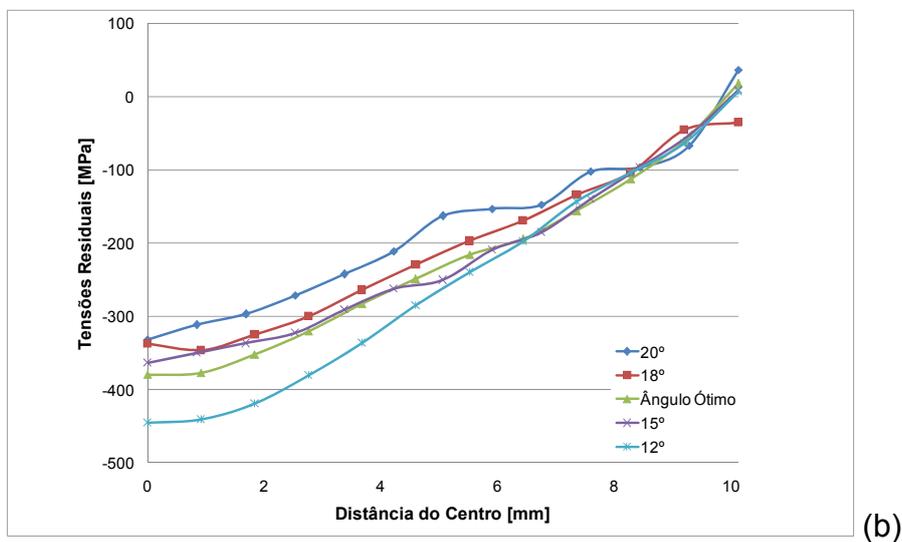
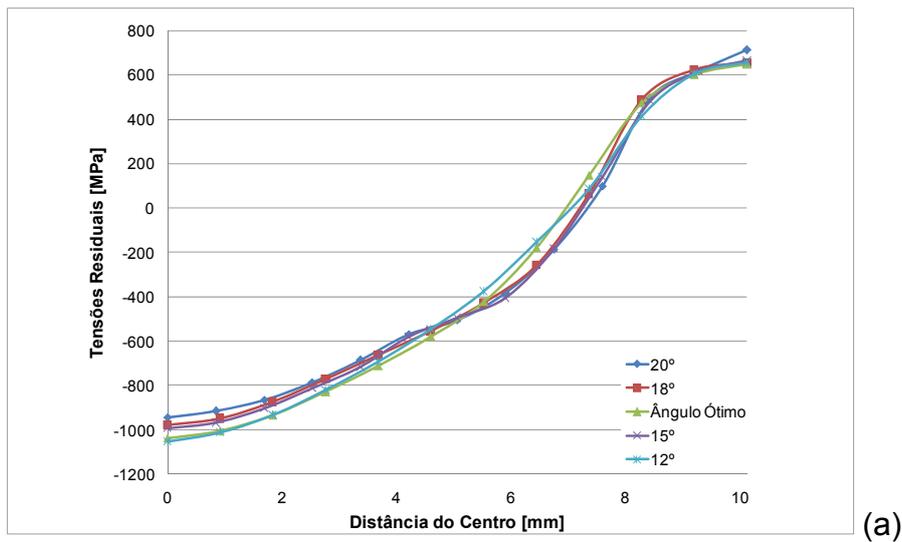


Figura 5 - Tensões residuais na direção axial (a), radial (b) e tangencial (c).

Pode-se observar na Figura 5 que para todos os ângulos de fieira o perfil de tensões residuais atinge valores muito próximos, apenas ocorrendo pequenas



diferenças nas direções tangencial e radial para o centro da barra que podem ser originadas por limitações de cálculo do software.

Analisando os resultados de tensões residuais para os diferentes ângulos de feira percebe-se esse parâmetro não exerce influência significativa nos valores das tensões residuais para as direções axial, tangencial e radial,⁽¹⁴⁾ levando em conta que foram consideradas para todas as simulações a mesma redução de 12,51%.

Observando-se a *Figura 3* do item anterior, percebe-se que o ângulo da feira, apesar de não ter influência nas tensões residuais, exerce uma grande influência na força de trefilação, sendo que o ângulo de 16,2° (ângulo ótimo) apresentou menor valor de força, 60,19 kN para o cálculo teórico (Equação 2) e 58,75 kN para a simulação, comprovando que a Equação 4 realmente descreve o valor de semi-ângulo de feira que minimiza os valores das forças de trefilação

Para a equação de Siebel, obtiveram-se maiores valores de forças de trefilação para os ângulos de 12° e 20° (menor e maior ângulos simulados), com o mínimo no valor do ângulo ótimo, de modo que os valores de forças de trefilação aumentam conforme o ângulo se distancia do valor deste. Já para a simulação, o menor valor de força encontrado, também foi no ângulo ótimo, porém não se observou o mesmo comportamento da força em relação ao ângulo dos valores encontrados pela Equação 2.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

- Após a trefilação as tensões residuais são fortemente trativas na superfície da barra e compressivas no centro da mesma para a direção axial. Para a direção radial as tensões residuais possuem um comportamento compressivo em toda a barra, aproximando-se de zero na superfície e seu valor mínimo é encontrado no centro. Os perfis para a direção tangencial são parecidos com os da direção axial;
- As simulações computacionais condizem com formulações teóricas de Siebel, com diferença máxima de 8% para o ângulo de feira de 18°;
- As tensões residuais não sofrem influência considerável do ângulo da feira para a redução de 12,51%.;
- A força de trefilação mínima encontrada é para o ângulo 16,2°(ângulo ótimo);

Para a continuação deste trabalho, propõe-se a realização de análise numérica para variações de comportamento mecânico do aço AISI 1045 laminado além de considerar diferentes reduções do diâmetro da peça final para avaliar a influência destes parâmetros nos valores de tensões residuais.

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 pelo financiamento de uma bolsa de iniciação científica.



REFERÊNCIAS

- 1 "ASM Metals Handbook", 1988, vol. 14, p:717
- 2 Macherauch, E., Kloos, K. "Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress". Residual Stress em: Science and Technology, Vol. 1, p 3–27, Alemanha 1987.
- 3 Tekkaya A.E.; "State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming", Journal of Materials Processing Technology 103, 2000, p:14-22, doi:10.1016/S0924-0136(00)00413-1.
- 4 Woo, D.M.; "On the complete solution of the deep-drawing problem", Int. J.Mech. Sci 10, 1968, p: 83-94, doi:10.1016/0020-7403(68)90065-9.
- 5 Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A.; Ensaios dos Materiais, Rio de Janeiro, LTC, p. 07, 1999
- 6 Avitur B.; Wire Ind., 1989, April p:243.
- 7 Atienza, J.M., Ruiz-Hervias, J., Martinez-Peres, M.L.; Monpean, F.J., Hernandez, M.G., Elices, M.; " Residual Stresses in Cold-drawn Pearlitic Rods", Scripta Materialia 52, 2005, p:1223-1228, doi:10.1016/j.scriptamat.2005.03.003.
- 8 Martins P., Rodrigues J.; "Tecnologia Mecânica", Escolar Editora, vol. 1, p: 497, Lisboa 2005.
- 9 Sahin, M., Cem S., Akata H.; " Effect of Surface Roughness on Friction Coefficients During Upsetting Process for Different Materials", 2005; Department of Mechanical Engineering, Trakya University, Turkey, doi:10.1016/j.matdes.2005.07.019.
- 10 Robinson, T.; Armstrong, C.G.; "Study on ring Compression Test Using Physical Modelling and FE Simulation", Journal of Materials Processing Technology, v.153-154, p:54-59, 2004, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.045.
- 11 Dieter, G.; "Metalurgia Mecânica". Rio de Janeiro, Guanabara Dois, p: 653, 1981
- 12 Atienza J. M., Elices M., Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires. Materials and Structures Vol. 37, June 2004, p301-304.
- 13 Martinez-Perez, M.L., Garcia-Hernandes M., Elices M., Gil-Sevillano, J., Peng, R.L, Buslaps, T.; "Residual Stresses Profiling in the Ferrite and Cementite Phases of Cold-drawn Steel Rods by Synchrotron X-Ray and Neutron Diffraction", Acta Materialia, 2004, p: 5303-5313, doi:10.1016/j.actamat.2004.07.036.
- 14 Nunes, R. M., Hirsch, T., Rocha, A. S., Análise De Tensões Residuais Superficiais Via Difração De Raios-X Durante O Processo De Trefilação Combinada De Barras De Aço Aisi 1045. in: 65 congresso anual da ABM, 2010, Rio de Janeiro. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2010.