

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO FERRAMENTAL NA GERAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS DURANTE O PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS DE AÇO AISI 1045¹

Tiago Brun Coser²
Tomaz Fantin de Souza³
Alexandre da Silva Rocha⁴

Resumo

Neste trabalho, foi analisada a influência da geometria da fiação no perfil de tensões residuais gerado em barras trefiladas de aço AISI 1045 com uma redução em área de aproximadamente 11%, objetivando-se obter um perfil otimizado. Inicialmente, o comprimento da região de calibração foi avaliado, verificou-se que esse parâmetro tem pouca influência nas tensões residuais geradas. Duas outras alterações na geometria da fiação foram propostas - introdução de uma região cônica dupla ou de uma protuberância na região de calibração - a fim de se obter uma redução final mínima, responsável pela redução das tensões residuais. Os resultados obtidos foram comparados entre si, e com os resultados da geometria convencional, onde se verificou uma redução significativa das tensões geradas, sendo a proposta com região cônica dupla a alteração que apresentou melhores resultados de forma geral.

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

ANALYSIS OF DIE GEOMETRY IN THE RESIDUAL STRESSES GENERATION DURING THE WIRE DRAWING PROCESS OF AISI 1045 STEEL BARS

Abstract

In this work, the influence of the die geometry in the generated residual stresses profile of AISI 1045 wire drawn bars (11% reduction) was evaluated. The objective was to obtain an optimized residual stress profile. Initially, the bearing length was analyzed, where it was noticed that it does not have a great influence in the residual stresses. Two geometry changes in the die were proposed - a double tapered region and a protusion in the bearing zone - in order to achieve a small final reduction, which would be responsible for diminishing the residual stresses. The obtained results were compared with the ones obtained from conventional die geometry and it was found out that there a significant reduction in the magnitude of the residual stresses, where the double tapered region proposal showed best results.

Keywords: Wire drawing; Residual stresses; Computational simulation.

¹ Contribuição técnica ao 4º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-ferrosos, 26 e 27 de novembro de 2013, São Paulo, SP.

² Mestrando pelo Programa Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

³ Doutorando pelo Programa Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

⁴ Doutor em Ciência dos Materiais pelo Programa Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Professor e Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Barras trefiladas são materiais que tem grande interesse industrial, pois são aplicados massivamente na indústria automotiva, desde fios muito finos para reforços de pneus à fabricação de eixos. A trefilagem é um processo de conformação mecânica que consiste em reduzir a seção transversal de uma barra, ao fazê-la passar através de uma matriz cônica, fieira, por meio de uma força de tração aplicada na saída da matriz, conforme ilustrado na Figura 1.^(1,2) A deformação plástica é obtida a partir da combinação de tensões trativas e compressivas que são desenvolvidas através da força de trefilagem e da configuração da fieira.⁽²⁾ Dentre as suas vantagens, está o fato de se obter um produto com excelente acabamento superficial, ótima precisão dimensional e ao ganho de resistência mecânica que o produto apresenta no final deste processo.⁽³⁾

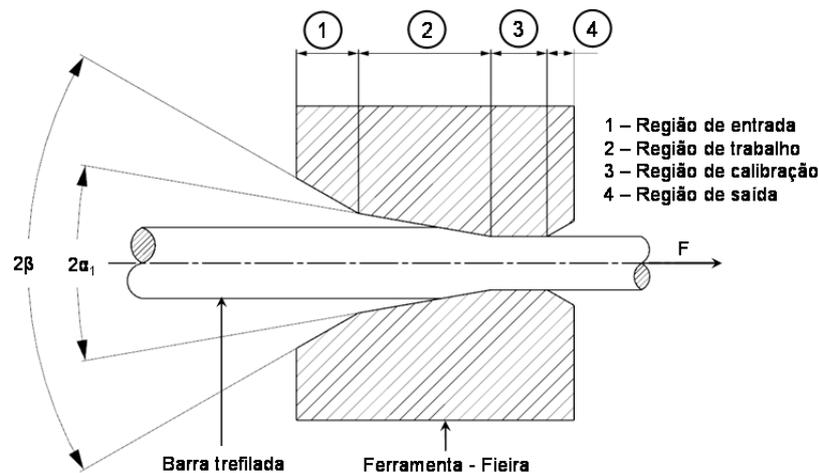


Figura 1. Desenho esquemático do processo de trefilagem.

Um fato inerente ao processo de trefilagem, é a ocorrência de deformação heterogênea em toda a seção da peça, causando o aparecimento de tensões residuais no produto final.⁽¹⁾ Essas tensões internas podem vir a gerar perda de matéria-prima durante o processo de manufatura, ocasionada por distorções ou ainda aparecimento de trincas durante o tratamento térmico⁽⁴⁾. Sabe-se ainda, que em componentes em uso, tensões residuais trativas na superfície favorecem a formação de fissuras que podem diminuir a vida em fadiga ou até mesmo produzir fraturas frágeis em ambientes sob corrosão-tensão ou agressivos.⁽¹⁾

Dessa forma, o conhecimento de fatores que alteram as propriedades dos produtos semiacabados durante a fabricação é de fundamental importância e se torna o primeiro passo para melhoria do produto final.⁽⁵⁾ Além disso, a partir da década de 1960, o uso de análises numéricas utilizando, dentre outros, o método dos elementos finitos, tem permitido aperfeiçoar o estudo de diferentes processos de fabricação, de maneira que se evitem erros de projeto bem como diminuição do número de *try-outs* e gastos desnecessários com materiais e processos adicionais.^(6,7) Portanto, a simulação computacional se torna uma ferramenta bastante interessante para avaliar as tensões residuais presentes em uma barra trefilada e avaliar que modificações podem ser feitas no processo para otimizar os perfis destas tensões residuais. Dessa forma, existe uma necessidade por um método capaz de controlar e reduzir a magnitude dessas tensões geradas. Uma das

melhores maneiras para se realizar isso, é estudar os parâmetros da fieira, que podem levar a um *design* otimizado.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Por exemplo, Överstam⁽¹⁰⁾ estudou a influência da geometria da região de calibração, partindo-se inicialmente de uma geometria totalmente cilíndrica e, depois, inserindo certa angulação tornando-a cônica. Já Kuboki et al.⁽¹¹⁾ verificaram que a partir da adição de uma pequeníssima redução na última etapa do processo de trefilação, as tensões residuais podem ser reduzidas consideravelmente. Isso ocorre devido ao fato dessa redução compensar o alongamento diferente entre a região superficial e o núcleo da barra.⁽⁸⁾ Inicialmente, alguns trabalhos foram escritos propondo a adição um último estágio de trefilação destinado à realização da redução mínima, o qual foi chamado de *skin pass*.⁽¹¹⁾ Entretanto, do ponto de vista prático, isso significa a adição de um processo, levando a um aumento do número de fieiras e passes, significando um aumento dos custos de produção. Dessa forma, alguns autores propuseram a modificação da geometria da fieira de forma a introduzir essa pequena redução final, ao invés da adição de uma nova fieira ao final do processo.^(8,9)

Neste trabalho, o processo de trefilação de barras de aço AISI 1045 foi simulado numericamente objetivando-se propor alterações na geometria da fieira. A influência de diferentes parâmetros nas tensões residuais geradas foi avaliada. Inicialmente, o comprimento da região de calibração foi avaliado. Duas alterações na geometria fieira foram propostas - introdução de uma região cônica dupla ou de uma protuberância na região de calibração - a fim de se obter uma redução final mínima, responsável pela redução das tensões residuais. Os resultados obtidos foram comparados entre si, bem como com os da geometria convencional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A necessidade do conhecimento da curva de escoamento do material bem como do coeficiente de atrito como dado de entrada no software de elementos finitos impôs a realização de ensaio de compressão e do anel para a aquisição desses dados.

2.1 Curva de Escoamento do Material

A curva de escoamento do material foi obtida por ensaio de compressão de um corpo de prova cilíndrico. Esse ensaio foi realizado pelo fato de que os aços possuem baixa formabilidade quando tensões trativas hidrostáticas são aplicadas. Dessa forma, maiores deformações são obtidas através do ensaio de compressão.⁽¹²⁾

Para o ensaio, foram utilizados corpos de provas cilíndricos com 10 mm de diâmetro e 15 mm de altura. Cinco corpos de prova foram usinados a partir do sentido axial de uma barra de aço AISI 1045 não trefilada e submetidos à compressão. A Figura 2 mostra a curva de escoamento média obtida a partir dos cinco ensaios realizados.

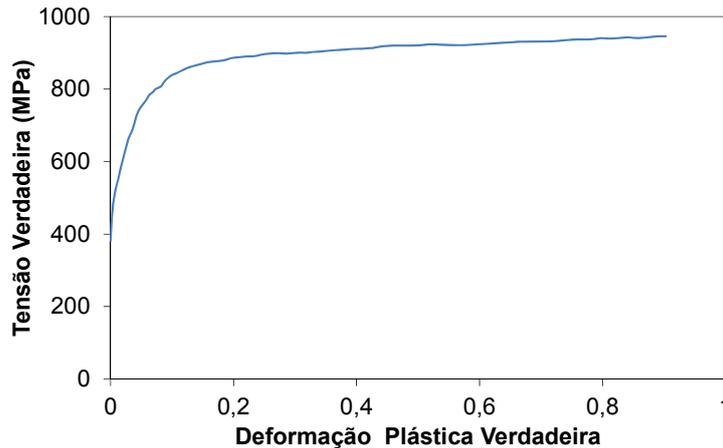


Figura 2. Curva de escoamento para o aço AISI 1045 obtida por ensaio de compressão.

2.2 Ensaio do Anel para Estimativa do Coeficiente de Atrito

A determinação do coeficiente de atrito foi feita através do ensaio de compressão do anel. As dimensões dos anéis foram de 20 mm para o diâmetro externo, 10 mm para o diâmetro interno e 6 mm de altura. Os corpos de prova foram submetidos à reduções de altura de 20, 40 e 60%, aproximadamente, utilizando punções confeccionados com mesmo material da fieira, WC-Co. O teste foi realizado em uma prensa manual com velocidade de, aproximadamente, 0,1 mm/s.

As curvas de calibração para comparação dos valores experimentais foram obtidas através de simulação computacional, utilizando o software Abaqus CAE®. Simulações axissimétricas foram realizadas variando-se o coeficiente de atrito de Coulomb (μ) entre 0,05 e 0,2, utilizando uma malha de 1250 elementos.

A Figura 1 apresenta os resultados obtidos através das simulações, bem como os resultados experimentais. A curva obtida experimentalmente é referente à media dos resultados obtidos para diversos ensaios. Pela comparação das curvas obtidas por simulação numérica com a obtida experimentalmente, o valor de coeficiente de atrito de Coulomb (μ) foi determinado como 0,1.

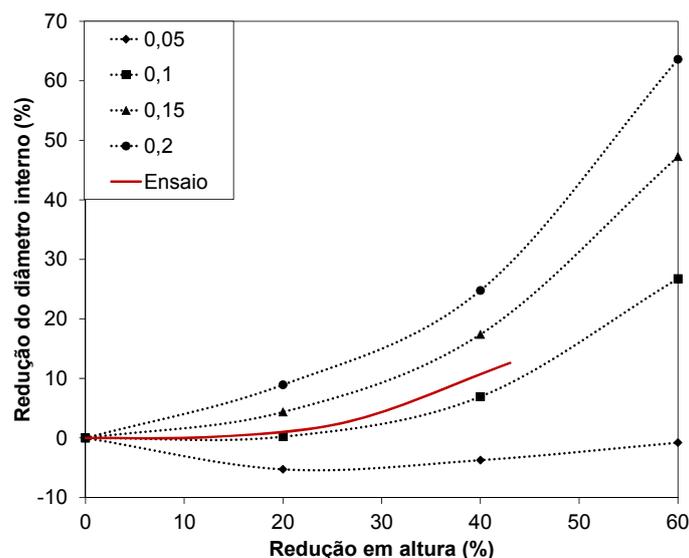


Figura 1 Curvas de calibração para o ensaio de compressão do anel variando o coeficiente de atrito de Coulomb (μ) de 0,05 até 0,2 e comparação com o resultado obtido experimentalmente.

2.3 Simulação Computacional do Processo de Trefilação

2.3.1 Modelos de simulação

Devido à geometria do problema, foi proposto um modelo axissimétrico (Figura 4) por causa do menor tempo de computação em comparação a um modelo tridimensional. A trefilação foi simulada aplicando-se a velocidade de processo na extremidade da barra, forçando-a a passar pela ferramenta fixa. A fieira foi considerada rígida e não foram considerados os efeitos térmicos acoplados.

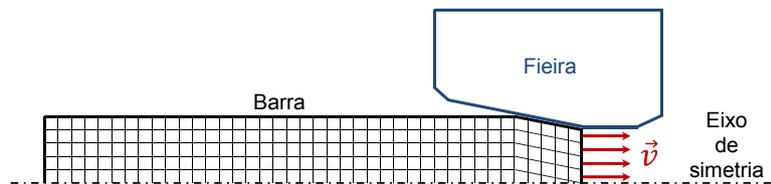


Figura 4 Desenho esquemático do modelo axissimétrico utilizado para simulação do processo de trefilação.

A Tabela 1 apresenta os demais parâmetros utilizados na simulação do processo.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na simulação do processo de trefilação.

Análise	Axissimétrica
Elementos	8400 (21 x 400)
Tamanho médio do elemento	0,5 mm
Material	AISI 1045
Ângulo de fieira (2α)	15°
Coefficiente de atrito (μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1250 mm/s
Diâmetro inicial (D_0)	21,463 mm
Diâmetro final (D_1)	20,25 mm
Módulo de Elasticidade	206 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Software	Abaqus CAE®

As tensões residuais foram computadas ao final do processo, após a barra ter atravessado toda a ferramenta sem estar sob ação de forças externas.

2.3.2 Alterações na geometria da fieira

Como dito anteriormente, primeiramente a influência do comprimento da região de calibração foi estudada e, logo após, com base na literatura, alterações na geometria da fieira foram propostas aplicando-se as modificações na fieira propostas por Kuboki et al.⁽⁸⁾ e Asakawa, Sasaki e Shishido.⁽⁹⁾

A região de calibração não envolve redução adicional. Em geral, seu comprimento (L_C) é determinado em função do diâmetro final (D_1) da barra trefilada, com o seu valor usual variando entre 30 e 50%.⁽¹⁰⁾ Seis condições foram simuladas, conforme a Tabela 2, e os seus respectivos perfis gerados foram comparados.

Tabela 2 Comprimentos da região de calibração simulados

Comprimento (mm)	L_C/D_1 (%)
0,5	4,94
1	9,88
2,5	24,69
5	49,38
7,5	74,07
8,5	83,95

A alteração na geometria da fieira proposta por Kuboki et al.⁽⁸⁾ foi a introdução uma segunda região cônica responsável pela redução mínima que, teoricamente, teria o mesmo efeito do processo *skin pass*. A Figura 5a ilustra esse novo conceito de fieira. Através da introdução da segunda região cônica define-se um diâmetro intermediário ($D_{1/2}$) muito próximo ao diâmetro final (D_1), gerando-se a redução mínima, com um ângulo ($2\alpha_2$) inferior ao de trabalho ($2\alpha_1$).

Já no trabalho de Asakawa, Sasaki e Shishido,⁽⁹⁾ foi proposta a introdução de uma protuberância na região de calibração. A Figura 5b ilustra a alteração proposta. A redução é feita até um diâmetro intermediário ($D_{1/2}$) muito próximo ao final (D_1) e, então, na região de calibração é introduzida a protuberância responsável pela redução mínima final. A protuberância pode ser definida a partir do ângulo θ e a diferença entre o diâmetro intermediário e o final, denominado Δh .

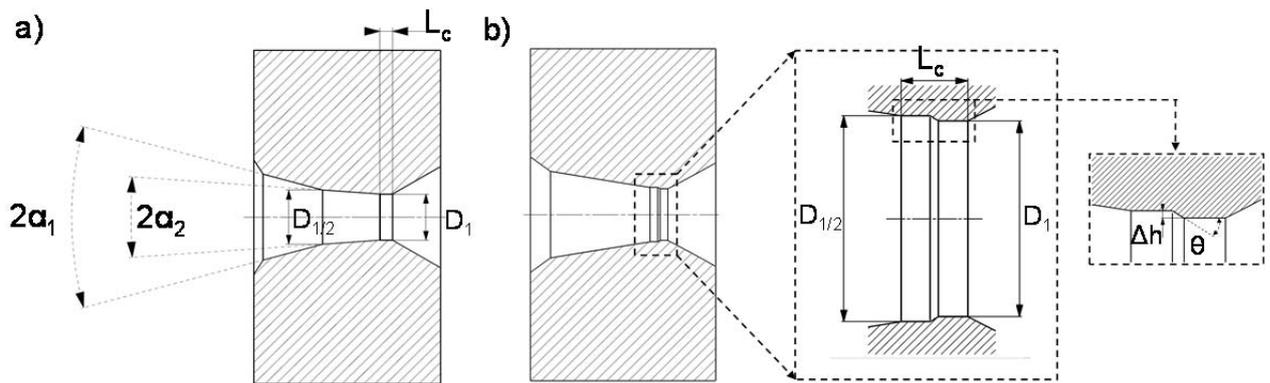


Figura 2. Alterações da geometria da fieira a) Alteração proposta por Kuboki⁽⁹⁾ b) Alteração proposta por Asakawa⁽¹⁰⁾.

A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados para as duas alterações da geometria da fieira encontradas na literatura para se obter uma região de redução mínima. Além disso, também é mostrado os parâmetros utilizados para a configuração convencional da ferramenta.

Tabela 3. Parâmetros utilizados nas simulações propondo alterações na geometria da fieira

Parâmetro	Fieira convencional	Fieira com região cônica dupla	Fieira com protuberância
D_0 (mm)	21,463	21,463	21,463
$D_{1/2}$ (mm)	-	20,46463	20,46463
D_1 (mm)	20,25	20,25	20,25
Redução mínima	-	1%	1%
Comprimento da região de calibração - L_c (mm)	5	5	5
Ângulos de trabalho da fieira – $2\alpha_1$	15°	15°	15°
Ângulo da segunda região cônica - $2\alpha_2$	-	1°	-
Δh (mm)	-	-	0,21463
Ângulo da protuberância - θ	-	-	15°

2.3.3 Validação numérica

A validação numérica do modelo de simulação foi realizada através da comparação entre os valores de pressão de contato calculados,⁽¹³⁾ dado pela Equação 1, e

obtidos através da simulação na região de deformação para a geometria convencional.

$$p = \frac{F}{S(\mu \cos \alpha + \text{sen } \alpha)} \quad (1)$$

onde p é a pressão de contato, F é força de trefilação e S é a área da superfície de contato. A força de trefilação foi calculada através das duas formulações mostradas anteriormente,⁽¹⁴⁾ dadas pelas Equações 2 e 3. Dessa forma, valores de pressão foram também calculados utilizados cada uma das fórmulas.

$$F = A_1 \varphi_A k_{fm} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha_1} + \frac{2 \alpha_1}{3 \varphi_A} \right) \quad (2)$$

$$F = A_1 k_{fm} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\mu \cotg \alpha_1} \right) \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cotg \alpha_1} \right] + 0,77 \alpha \right\} \quad (3)$$

Onde A_0 e A_1 correspondem à área inicial e final da seção transversal da barra respectivamente, K_{fm} é a tensão de escoamento média para a redução, μ é o coeficiente de atrito, α_1 é semi-ângulo da região de trabalho e φ_A é a deformação verdadeira em área ($\varphi_A = \ln(A_1/A_0)$).

Além da avaliação da pressão de contato para a validação numérica, foram comparados os valores calculados de deformação e valores simulados. A partir da lei da constância de volume pode-se chegar às seguintes formulações apresentadas pelas Equações 4,5, e 6.

$$\varphi_l = -\varphi_A = -\ln \frac{A_1}{A_0} \quad (4)$$

$$\varphi_r = \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (5)$$

$$\varphi_t = \ln \frac{2\pi r_1}{2\pi r_0} = \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (6)$$

Onde φ_l é a deformação verdadeira longitudinal, φ_r é a deformação verdadeira radial, φ_t é a deformação verdadeira tangencial (ou circunferencial).⁽¹⁴⁾

3 RESULTADOS

3.1 Validação Numérica

Na Tabela 4 são apresentados os valores de pressão de contato simulado e os obtidos pelo pelas formulações apresentadas anteriormente. Os valores simulados estão, de certa forma, próximos dos valores calculados, apresentando uma diferença de 19,7 % em relação à fórmula de Siebel e 23,71% em relação à formula de Sachs. As diferenças encontradas entre a simulação e as equações podem ser atribuídas ao fato que o valor apresentado para a pressão simulada se refere à média de valores na região de contato, com valores aumentando quando se chega próximo à região de transição da região de trabalho e de calibração. Já as equações utilizadas consideram a pressão como sendo uniforme na superfície de contato, o que acaba sendo responsável pela diferença apresentada.

Tabela 1. Comparação entre os valores de pressão de contato simulados e calculados

Pressão de contato – Simulação (MPa)	Pressão de contato – Siebel (MPa)	Pressão de contato – Sachs (MPa)
1288,2	1076,53	1041,3

A Tabela 2 apresenta a comparação entre os valores simulados e calculados para as deformações principais. Os resultados ficaram muito próximos, apresentando diferenças de 1,49%, 1,88% e 1,58% para a deformação longitudinal, radial e tangencial, respectivamente. Considerando as duas validações realizadas, pôde-se afirmar que os modelos propostos descrevem adequadamente o problema. Dessa forma, a influência da geometria do ferramental nas tensões residuais geradas foi analisada.

Tabela 2 Comparações entre os valores de formação simulados e calculados

	Deformação Verdadeira		
	Longitudinal - ϕ_l	Radial - ϕ_r	Tangencial - ϕ_t
Simulação	0,1181	-0,0593	-0,0591
Equação	0,1164	-0,0582	-0,0582

dDe Calibração

A Figura 6 apresenta o perfil de tensões residuais para a direção axial, pois sabe-se que valores trativos na superfície podem afetar a vida em fadiga do produto final, além de produzir mudanças nas dimensões durante processos de corte, retífica e tratamento térmico do produto.⁽¹⁵⁾ É possível perceber que na região a partir de 70 a 75% distante do centro da barra, as tensões residuais tornam-se trativas, onde maior valor de tensão residual axial obtido para esse caso foi 726 MPa, correspondente ao maior comprimento da região de calibração, enquanto o menor valor foi de 689 MPa, para o comprimento de 5 mm.

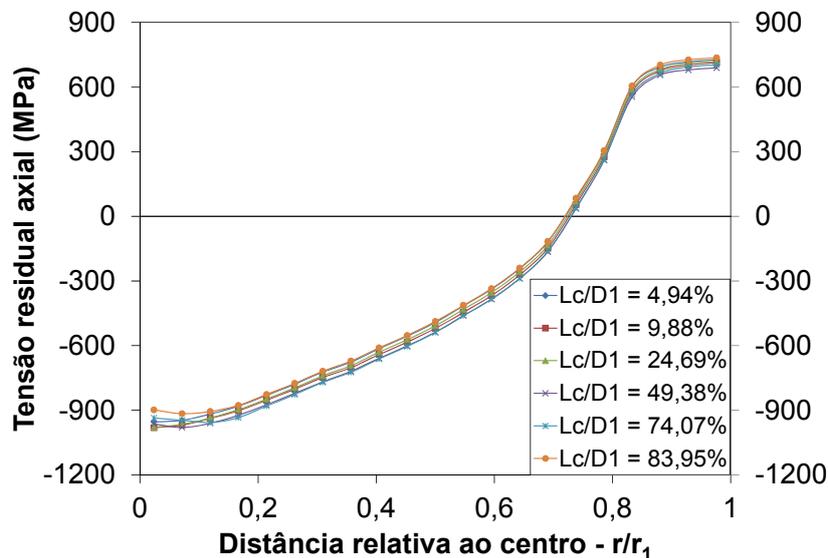


Figura 6. Perfil de tensões residuais na direção axial para diferentes comprimentos da região de calibração.

A Figura 7 mostra a relação entre as tensões residuais axiais superficiais encontradas e o comprimento da região de calibração. É possível perceber que há uma queda de, aproximadamente, 6,5% na tensão residual axial superficial quando a relação L_c/D_1 é igual à 49,38%. Ficou evidenciado que há uma faixa ótima para o

comprimento da região de calibração para a diminuição das tensões residuais axiais superficiais. Os resultados indicam que a relação L_c/D_1 na faixa entre 0,4 e 0,6 apresenta os menores valores de tensões residuais superficiais, sendo bastante semelhantes aos encontrados na literatura.⁽⁹⁾ Com os resultados apresentados é possível concluir que o comprimento da região de calibração tem influência nas tensões residuais geradas, apesar de não serem extremamente significativos.

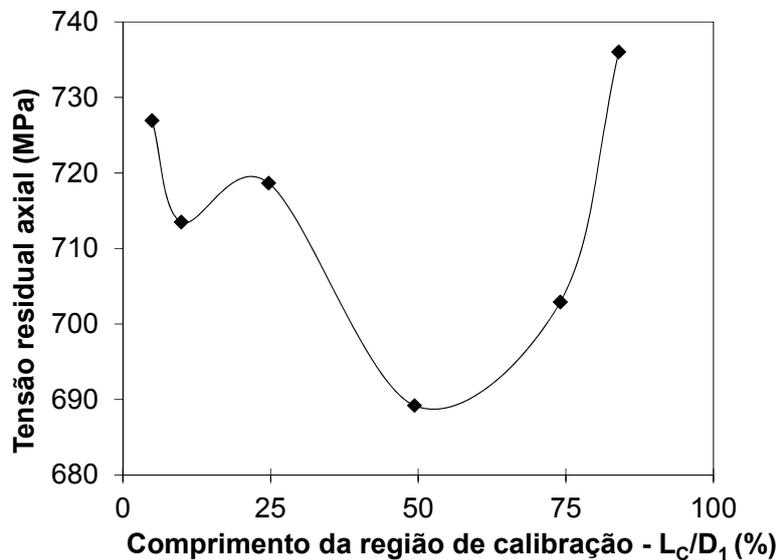


Figura 7. Tensões residuais axiais superficiais em função da relação entre o comprimento da região de calibração e o diâmetro final.

3.3 Introdução de uma Redução Final Mínima

A Figura 8 mostra os perfis obtidos comparando-se a fieira convencional, fieira com região cônica dupla e a fieira contendo uma pequena protuberância na região de calibração. Para a direção axial, as tensões residuais superficiais foram 235 e 635 MPa para os modelos com região cônica dupla e com protuberância, respectivamente, representando uma queda de 65 e 7% em relação à geometria convencional. Já para a direção tangencial, as tensões superficiais foram 303 e 278 MPa para os modelos com região cônica dupla e com protuberância, respectivamente, representando uma queda de 39,4 e 44,4%. É possível perceber, claramente, que há uma redução considerável nas tensões residuais trativas das barras, tanto para a direção axial quanto para a tangencial.

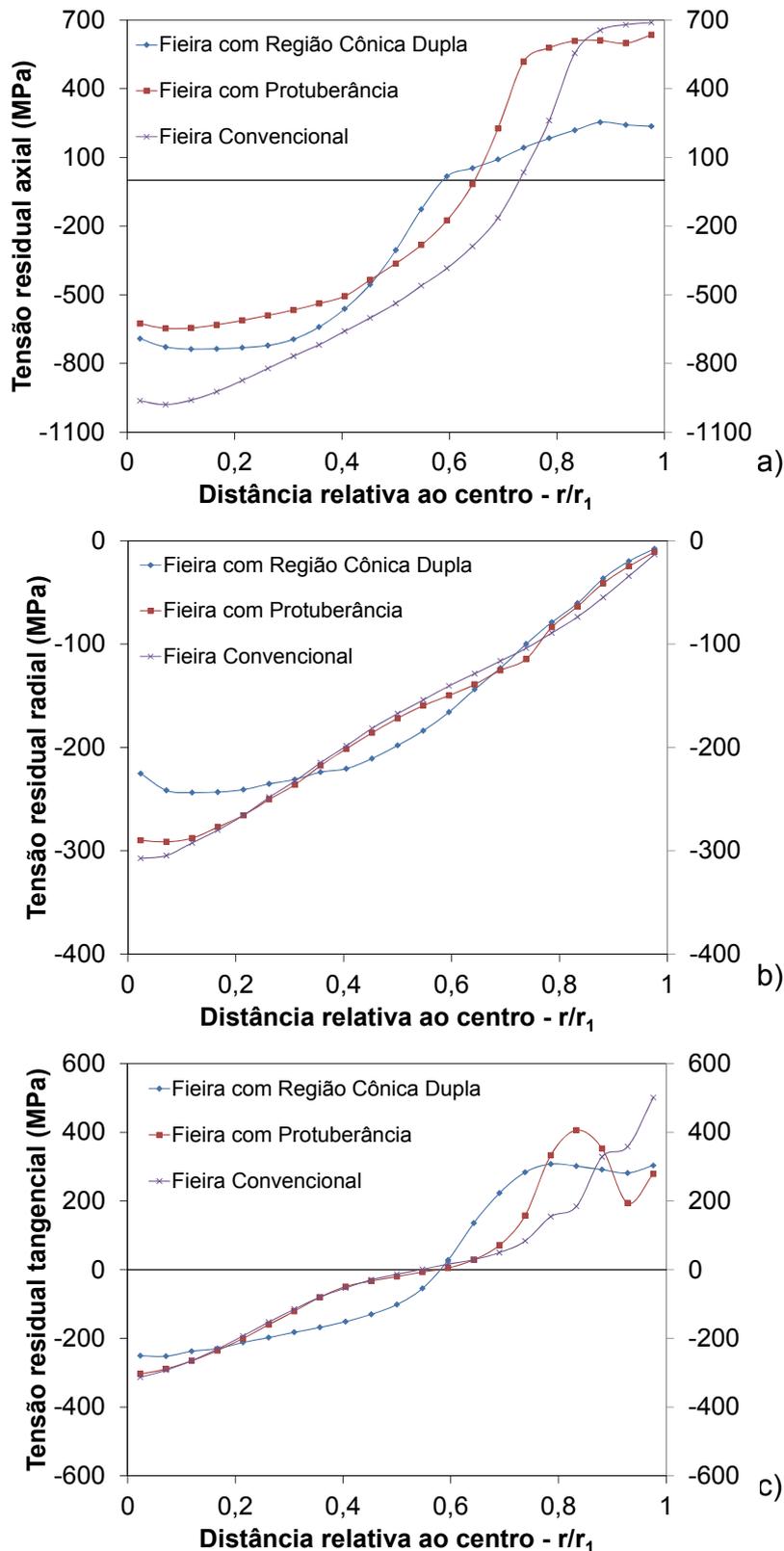


Figura 8. Perfis de tensões residuais para as modificações propostas da fieira. a) axial, b) radial, c) tangencial.

Outro fato a ser notado é que, para a direção axial, a geometria de ferramenta com região cônica dupla mostrou melhores resultados do que a fieira com protuberância. Já para a direção tangencial, na região das tensões trativas, a fieira com

protuberância apresenta resultados ligeiramente melhores que a outra geometria. Portanto, comparando-se os resultados entre as alterações propostas pode-se dizer que, teoricamente, uma fieira com região cônica dupla apresentará um melhor perfil de tensões residuais em comparação com a fieira convencional e a com protuberância. Entretanto, testes práticos devem ser realizados para se comprovar se alterações propostas realmente são benéficas.

4 CONCLUSÕES

- Ao se verificar a influência da região de calibração no perfil de tensões residuais, foi possível perceber que não houve grandes diferenças obtidas para os diversos comprimentos de calibração utilizados. Analisando-se as tensões axiais superficiais verificou-se que há uma faixa ótima para o comprimento da região de calibração para a diminuição das tensões residuais axiais superficiais. Os resultados indicam que a relação L_C/D_1 na faixa entre 0,4 e 0,6 apresenta os menores valores de tensões residuais superficiais.
- Duas alterações na fieira foram propostas com a finalidade de se introduzir uma redução final mínima. Uma diminuição de 67% na tensão residual axial superficial foi obtida com a introdução da região cônica dupla. Já para a direção tangencial, na região das tensões trativas, a fieira com protuberância apresenta resultados ligeiramente melhores que a outra geometria, (44,4% contra 39,4% de redução).

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq, Capes e Finep pelo apoio financeiro através do programa Bragecrim (Brazilian German Collaborative Research Initiative in Manufacturing Technology).

REFERÊNCIAS

- 1 ATIENZA, J. M. Tensiones Residuales en Alambres de Aceros Trefilados. Madrid: Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- 2 DIETER, G. E. Handbook of Workability and Process Design. Materials Park, Ohio: ASM International, 2003.
- 3 DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. New York: McGraw-Hill, 1986.
- 4 NUNES, R. M. Análise de Tensões Residuais de Aços AISI 148 Produzidos por Trefilação Combinada Visando Minimizar Distorções Pós-Processamento. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- 5 NUNES, R. M. Estudo de Distorção de Barras Cilíndricas de Aço ABNT 1045 em uma Rota de Fabricação Envolvendo Trefilação Combinada e Tempera por Indução. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- 6 TEKKAYA, A. E. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming.. Journal of Materials Processing Technology, v. 103, n. 1, p. 14-22, 1 jun. 2000.
- 7 WOO, D. M. On the complete solution of the deep-drawing problem. International Journal of Mechanical Sciences, v. 10, n. 2, p. 83-94, fev. 1968.
- 8 KUBOKI, T. et al. Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing. Ironmaking & Steelmaking, v. 28, n. 1, p. 65-71, 2001.

- 9 ASAKAWA, M.; SASAKI, W.; SHISHIDO, S. Effect of die approach geometry and bearing length on residual stress after bar drawing. *Wire Journal International*, 2001.
- 10 ÖVERSTAM, H. The influence of bearing geometry on the residual stress state in cold drawn wire, analysed by the FEM. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 171, n. 3, p. 446-450, 1 fev. 2006.
- 11 KUBOKI, T. et al. Effect of final drawing with light reduction on the leveling of residual stress distribution in cold bar drawing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 214, p. 1389 - 1400, 2000.
- 12 LANGE, K. *Handbook of Metal Forming*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1995.
- 13 JOHNSON, R. W.; ROWE, G. W. Redundant work in drawing cylindrical stock. *Journal of the Institute of Metals*, v. 96, p. 97-105, 1968.
- 14 SCHAEFFER, L. *Conformação Mecânica*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009.
- 15 RIPOLL, M. R.; WEYGAND, S. M.; RIEDEL, H. Reduction of tensile residual stresses during the drawing process of tungsten wires. *Materials Science and Engineering: A*, 2010.