

Simulação computacional de um processo de trefilação para produção de barras redondas de aço AISI 1045

Computational simulations of a wire-drawing process in the production of AISI 1045 steel bars

Alexandre da Silva Rocha

Prof. Dr., Engenheiro do Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM, Centro de Tecnologia - CT, UFRGS. alexandre.rocha@ufrgs.br

Stephan Hänisch

Dipl.-Ing. IUL, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund. stephan.Haenisch@iul.tu-dortmund.de

Tiago Brun Coser

Graduando LdTM, CT, UFRGS. tiago0589@hotmail.com

Tomaz Fantin de Souza

Mestre em Engenharia tomazfs@yahoo.com.br

Carla Adriana Theis Soares

Engenheira do LdTM, CT / UFRGS. carla.adriana@ufrgs.br

Resumo

Nesse trabalho foi simulada a etapa de trefilação na produção de barras redondas do aço AISI 1045 através do processo de trefilação combinada. Foram determinados diversos parâmetros para a simulação com base em processos industriais de trefilação combinada. Foi realizado o teste do anel, e sua simulação, a fim de obter-se o valor de atrito para utilização na simulação numérica e cálculos analíticos. Dos resultados da simulação numérica, através da comparação desta com equações empíricas e analíticas, foi avaliada a capacidade da simulação de prever a força de trefilação. Além disso, foi realizado um esforço no sentido de determinar as tensões residuais após a trefilação. Os valores simulados de tensões residuais foram comparados com valores experimentais obtidos através de análise de tensões residuais por difração de Nêutrons realizada em amostras trefiladas da indústria. Com base neste trabalho, foi discutida a possibilidade de usar-se a simulação para prever quantitativamente as tensões residuais após o processo de trefilação. As análises poderão ser utilizadas para o desenvolvimento de futuros melhoramentos no processo de trefilação.

Palavras-chave: Trefilação, tensões residuais, simulação numérica.

Abstract

In this work, the wire-drawing production step for the production of AISI 1045 steel bars was numerically simulated. Different parameters necessary for the simulation were estimated based on current combined industrial drawing processes. Ring compression tests were carried out and simulated aiming at the determination of the friction value to be used in the simulation. From the numerical simulation results, the capacity of the simulation for estimating the drawing forces by comparison with analytical and empirical equations was evaluated. Besides this, an effort was made to simulate the residual stresses after drawing. The simulated residual stress profiles were then compared to experimental residual stresses profiles, which were obtained in a Neutron Diffraction experimental analysis carried out on industrial samples. Based on this work, the possibility of using simulation to quantitatively calculate residual stresses after the cold drawing was discussed. The carried out analysis will be used to implement improvements in the drawing process.

Keywords: Cold drawing, residual stresses, numerical simulation.

1. Introdução

O uso de produtos trefilados aumentou nos últimos anos (Lange, 2006). Barras trefiladas com diferentes diâmetros são usadas na fabricação de peças automotivas, reduzindo posteriores etapas de usinagem, gastos e consumo energético. A trefilação pode ser definida como sendo um processo de fabricação por deformação plástica, na qual há um tracionamento da matéria-prima (fio-máquina, p. ex.), através da ferramenta (feira), ocasionando, assim, uma redução de área, na seção transversal, e aumento de comprimento. Algumas das características principais do processo de trefilação são o excelente acabamento superficial e a ótima precisão dimensional alcançáveis, além do ganho de resistência mecânica e a obtenção de alta velocidade de processamento (Dieter, 1981). A principal matéria-prima usada, na trefilação de barras, é o fio-máquina, ou seja, aço laminado de seção contínua, usualmente cilíndrica, fornecido em rolos.

2. Materiais e métodos

A necessidade do conhecimento prévio do valor do coeficiente de atrito do processo como dado de entrada para o software impôs a realização de uma simulação computacional, para o ensaio

Quando um material é transformado por deformação plástica, como é o caso do processo de trefilação, originam-se tensões residuais, que podem alterar dimensões, propriedades mecânicas e o comportamento do material em distorção (variações dimensionais e de forma após tratamento térmico), algumas vezes podendo levar a falhas catastróficas de um componente em serviço. As tensões residuais também interferem em etapas posteriores da rota de fabricação de um determinado componente, tendo em vista que a cada etapa ocorre uma redistribuição dessas tensões, como resultado dos carregamentos mecânicos, térmicos e de transformações metalúrgicas.

Desde os anos 60, o uso de análises numéricas, utilizando, entre outros, o método de elementos finitos (Woo, 1968), 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”. Desta forma, simulações computacionais por elementos finitos permitem melhorar o processo antes mesmo da construção de protótipos, evitando, assim, investimentos desnecessários (Tekkaya, 2000). Para o caso da trefilação, pode-se, por exemplo, aperfeiçoar as dimensões da peça de trabalho, geometria da feira, otimizar parâmetros de processo, entre outras possibilidades.

Nesse trabalho, foram simuladas, numericamente, as tensões residuais geradas durante a trefilação, para barras redondas de aço AISI 1045, para dois diferentes ângulos de feira. Desenvolveram-se um modelo 2D e outro 3D, para uma simulação de elementos finitos, de modo que se reproduzisse o processo de fabricação, optando-se por trabalhar com o modelo 3D apesar dos maiores tempos de simulação. Foram comparados, também, os resultados simulados de força com equações empíricas.

do anel, de modo a levantar uma curva de calibração, que foi confrontada com os resultados do mesmo teste realizado experimentalmente.

As tensões residuais presentes, nas

barras, foram medidas após a trefilação pelo método de Difração de Nêutrons.

O material utilizado foi um aço AISI 1045 laminado com composição química indicada na Tabela 1.

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

Tabela 1

Composição química do aço utilizado.

Ensaio do anel para estimativa do coeficiente de atrito

Atrito é a resistência ao movimento das superfícies de dois corpos em contato, durante o deslizamento de um sobre o outro (ASM, 1988). O atrito influencia, significativamente, a deformação do material (Avitzur, 1989; Godfrey et al., 2000; Atienza et al., 2005a), alterando os valores de forças e a vida em desgaste das ferramentas.

Para a determinação do coeficiente de atrito, foi realizado o ensaio do anel, que é um teste muito utilizado na determinação do coeficiente de atrito em processos de conformação. O ensaio consiste na compressão de anéis cilíndricos de aço para análise geométrica. 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 valor (Sahin et al., 2007; Robinson, 2004).

As dimensões dos anéis foram de 20 mm de diâmetro externo, 10 mm de diâmetro interno e 6 mm de altura, feitos a partir de amostras do fio-máquina a ser trefilado. Esses 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. Na confecção dos punções, foi utilizado o mesmo material da feira (metal duro, WC-Co), com o mesmo acabamento superficial e

utilizando-se o mesmo lubrificante tipicamente usado em processos industriais, gerando-se, assim, uma curva experimental. Após a realização dos testes, foram desenvolvidas simulações do ensaio do anel no software Simufact.Forming GP® com velocidade de compressão de 0,1 mm/s, uma malha para o modelo do anel de 50x50 elementos.

O objetivo dessas simulações foi gerar curvas de calibração, a fim de compará-las com a curva experimental. Foram realizadas oito simulações, variando-se o coeficiente de atrito de Coulomb (μ) de 0,05 a 0,4.

Na Figura 1, são mostradas os resultados da simulação do teste do anel, bem como as curvas experimentais.

Pela comparação das curvas experimentais com as curvas obtidas por si-

mulação numérica, demonstradas na Figura 1, para diferentes valores de atrito,

optou-se por um coeficiente de atrito de Coulomb (μ) de 0,1, tendo em vista que a

faixa de deformações envolvidas no processo chega a valores na ordem de 0,2.

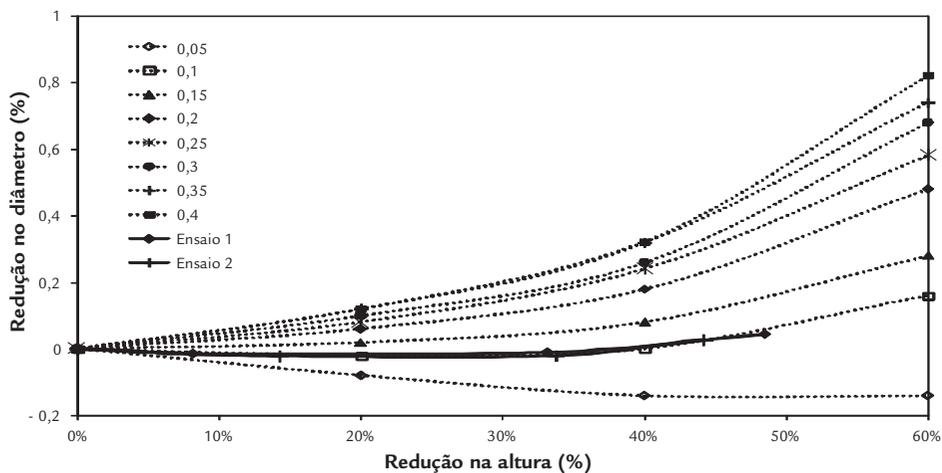


Figura 1
Curva de calibração para o ensaio de compressão do anel variando o coeficiente de atrito de Coulomb (μ) de 0,05 até 0,4 e comparação com os dois ensaios do anel realizados experimentalmente.

Medição de tensões residuais em barras trefiladas

Foi utilizado o método da Difração de Nêutrons de forma totalmente não destrutiva, ou seja, não foi executado nenhum corte ou polimento eletrolítico, para a obtenção dos perfis de tensões residuais, tendo em vista a grande penetração dos nêutrons na faixa de dezenas de milímetros. Nessa análise, foram medidas as distâncias interplanares do plano {211} do ferro- α para as direções axial, periférica e radial das barras, desde a superfície até o centro. Os detalhes dessa

caracterização experimental são apresentados em uma publicação específica (Nunes, 2008). A partir das distâncias interplanares, foram calculadas deformações nas três direções principais, utilizando-se as constantes elásticas específicas, e foram calculadas as tensões principais.

O balanço de tensões residuais foi checado como forma de ajuste dos valores medidos, já que, na difração de nêutrons, a precisão de medida depende da precisão na determinação da distância

interplanar sem a atuação de tensões residuais (Hauk, 1997).

Nesses experimentos, foram utilizados corpos de prova das barras trefiladas com 200 mm de comprimento e 20,25 mm de diâmetro. A medição foi realizada após a trefilação do aço AISI 1045 para os ângulos de feira de 15° e 20°, ao longo de duas posições periféricas (0°-180°). Os experimentos foram realizados em Helmholtz Zentrum Berlin, Alemanha.

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 gerado pelo processo de trefilação do aço AISI 1045. Primeiramente, desenvolveu-se um modelo axisimétrico bidimensional, que permite que se simule uma fatia da barra, porém os resultados são extrapolados para o restante da geometria, o que permite reduzir o tempo de cálculo computacional. Além disso, foi criado um modelo 3D para verificar se haveria diferenças nos resultados obtidos utilizando essa modelagem, quando comparada à bidi-

mensional. Nesse modelo, por considerações geométricas de simetria e a fim de se diminuir o tempo de cálculo, foi simulada metade da barra.

A simulação do processo foi realizada no regime elasto-plástico, a ferramenta foi considerada rígida e não foram considerados os efeitos térmicos acoplados. Foi utilizada a curva do banco de dados do software Simufact.forming GP® para o material AISI 1045, que contém curvas para três taxas de deformação 1,6s⁻¹, 8s⁻¹ e 40s⁻¹, respectivamente dadas pelas Equações 1, 2 e 3.

$$K_f = 1018,098 \cdot \varphi^{0,1123} \quad (1)$$

$$K_f = 1012,572 \cdot \varphi^{0,0799} \quad (2)$$

$$K_f = 1008,29 \cdot \varphi^{0,0774} \quad (3)$$

Os demais parâmetros utilizados, nas simulações numéricas, estão demonstrados na Tabela 2.

Para imprimir a velocidade (V) de trefilação, foi utilizado um artifício, que foi denominado “puxador”, em uma das pontas da barra, o qual simula o efeito do braço mecânico, que puxa a peça de trabalho durante o processo

Tabela 2
Parâmetros da simulação do processo de trefilação.

Análises	2D e 3D mecânicas
Elementos	2000 (2D) / 36239 (3D)
Material	AISI 1045
Coeficiente de atrito (μ)	0,1
Velocidade de trefilação	1250 mm/s
Diâmetro inicial e final	21,463 e 20,25 mm
Temperatura inicial	20°C
Ângulos de feira (2 α)	15° e 20°
Módulo de Young	210 GPa
Coeficiente de Poisson	0,3

real de trefilação. O modelo é esquematizado na Figura 2.

A barra modelada, na Figura 2, tem 200 mm de comprimento e 21,463 mm de diâmetro e a feira tem comprimento total de 30 mm, sendo que é dividida em 4 regiões, descritas a seguir.

Região de entrada (1): com 5 mm de comprimento e um ângulo um pouco maior que o ângulo de entrada, serve para guiar o material e facilitar a lubrificação.

Região de trabalho (2): com 15 mm de comprimento, é definida pelo ângulo

de trefilação, que é um dos parâmetros mais importantes do processo, relacionado com a força de reação da feira à força trativa que impulsiona o material a atravessá-la, gerando a deformação plástica. Foram simuladas feiras com ângulos de 15° e 20°.

Região de calibração (3): com 5 mm de comprimento. Região sem ângulo, relaciona-se com a estabilização das propriedades do material que foram alteradas durante o processo.

Região de saída (4): possui um

ângulo oposto ao de entrada e de trefilação, permite o retorno elástico do material antes da saída completa da feira, minimizando a possibilidade de abrasão, caso o processo seja interrompido.

O estado de tensões residuais foi calculado no final do processo, após a barra ter atravessado toda a feira, pois as tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos como definido na introdução.

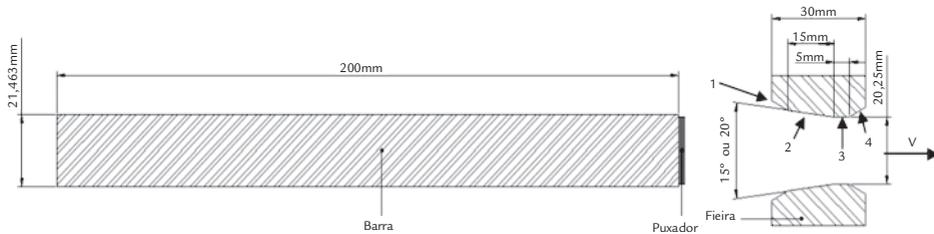


Figura 2
Modelo bidimensional criado.

3. Resultados e discussões

Foi verificado se a capacidade da simulação numérica era capaz de prever a força de

trefilação. Para isso, foram comparados os resultados numéricos com os resultados ob-

tidos pelas equações de Siebel (Dieter, 1981), Eq. 4, e de Geleji (Gerleji, 1967), Eq. 5.

$$F = A_r \cdot k_{fm} \cdot \varphi \alpha \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad (4)$$

$$F = \left(\frac{K_{fm} \cdot (1 - 0,385 \cdot \alpha)}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{A_0 - 1}{A_1} \right) \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} \right) \cdot (A_0 - A_1) \left(\frac{\mu}{\sin \alpha} \right) + 0,77 \cdot k_{fm} \cdot A_r \cdot \alpha \quad (5)$$

Onde A_1 é a área da barra após a trefilação [mm²], A_0 é a área da barra antes da trefilação [mm²], k_{fm} é a tensão de escoamento média [MPa], φ_A é a deformação em área ou longitudinal, μ é o coeficiente de atrito de Coulomb e α é o semi-ângulo da feira expresso em radianos.

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados das forças simuladas e calculadas.

A diferença máximas entre os valores de força simulados e calculados, para a feira de 15°, é de 12,1%, para a simulação 3D, e 17,65%, para a 2D, e, para a feira de 20°, é de 18,65%, para a simulação 3D, e 16,93%, para a 2D. As diferenças encontradas entre a simulação e as equações podem ser atribuídas a diversos fatores, entre eles as limita-

ções da equação, a qual, por exemplo, não considera a região de calibração. A consideração desta região levaria a forças um pouco maiores, reduzindo a diferença encontrada. As simulações 3D forneceram resultados levemente melhores que as 2D.

Os valores simulados de tensões residuais. (Figuras 3 e 4) foram comparados com os valores experimentais obtidos por Difração de Nêutrons realizada em amostras trefiladas da indústria. Por simplicidade, nesse artigo, optou-se pela apresentação dos resultados das simulações 3D, pois esta forneceu resultados levemente melhores na previsão da força e, também, mais aproximados aos valores experimentais de tensões residuais. Os

perfis apresentados são para feiras com ângulos de 15° e 20°.

Nas Figuras 3a e 4°, são apresentados os perfis de tensões residuais, para a direção axial, em função da área de seção transversal, onde os pontos -1 e 1 representam as superfícies da barra e o ponto 0 representa o centro. Já as Figuras 3b e 4b apresentam os resultados das tensões residuais, para as direções radial e tangencial, onde -10 e 10 representam a superfície e 0, o centro da barra, respectivamente para os ângulos de 15° e 20°, onde se demonstra um comparativo entre os perfis gerados pelas simulações 3D com os resultados medidos via Difração de Nêutrons.

As tensões residuais, para ambos

Forças de trefilação				
Tipo de simulação	Ângulo de trefilação	Força simulada (N)	Força Siebel (N)	Força Geleji (N)
Simulação 3D	15°	71170	64603,62	63485,24
Simulação 3D	20°	78550	66120,36	66202,96
Simulação 2D	15°	74692	64603,62	63485,24
Simulação 2D	20°	77316	66120,36	66202,96

Tabela 3
Comparação entre os resultados de força simulados e calculados com a Equação 4.

Figura 3
Perfis de tensões residuais
para o ângulo de feira 15°:
a) direção axial;
b) direções radial e tangencial.

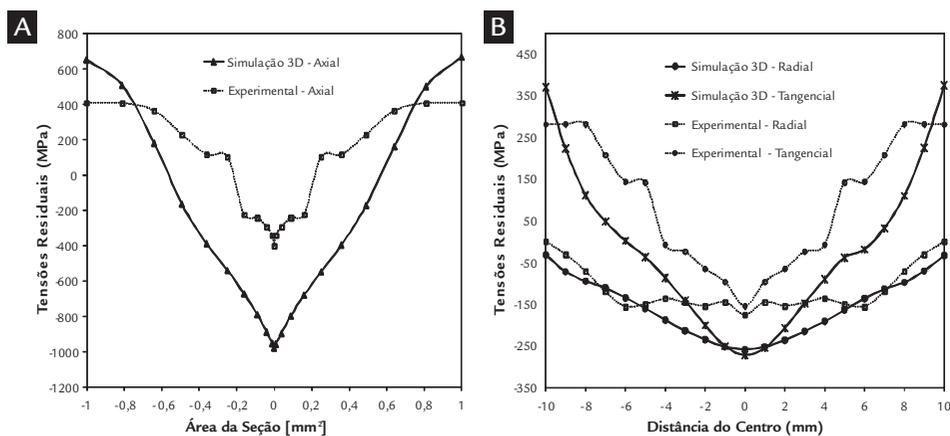
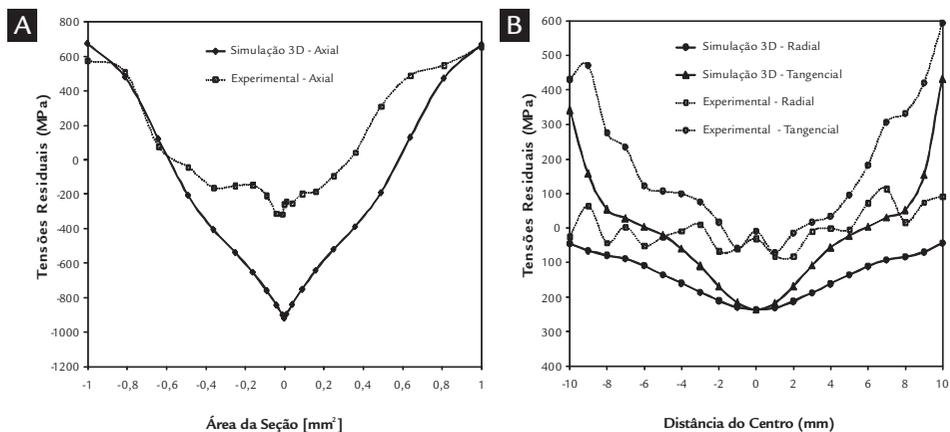


Figura 4
Perfis de tensões residuais
para o ângulo de feira 20°:
(a) direção axial;
(b) direções radial e tangencial.



os ângulos estudados, na direção axial, demonstram um comportamento trativo, na superfície, e compressivo, no centro da barra. Na Figura 3^o, percebe-se que o perfil de tensões residuais simulado alcança um valor máximo, na superfície, de 653 MPa, e mínimo, no centro da barra, de -979 MPa. Na Figura 4^o, observam-se as tensões residuais, que alcançam o valor de 673 MPa, na superfície, e mínimo, no centro da barra, de -921 MPa.

Nas Figuras 3b e 4b, representativas das direções radial e tangencial, é observado um comportamento compressivo, em toda a área da barra, para a direção radial, e, para a direção tangencial, há um comportamento parecido com o da direção axial.

Na Figura 3b, percebe-se que as tensões residuais atingem um valor mínimo, no centro da barra, de -259 MPa e máximo, na superfície, aproximando-se de zero, para o caso da direção radial, e para a direção tangencial, o valor mínimo de tensões residuais, no centro da barra, é de -272 MPa e o máximo, na superfície, é de 369 MPa. Já, na figura 4b, percebe-se uma redução das tensões residuais em ambas as direções, tangencial e radial, sendo que, na superfície da barra, as tensões residuais e radiais aproximam-se de zero e as tangenciais tem um máximo de 340 MPa e, no centro da barra, tanto

as tensões radiais quanto as tangenciais atingem um mínimo de -237 MPa.

Conforme Atienza et al. (2005), Atienza et al. (2005b), Martinez-Perez et al. (2004), os valores das tensões residuais, para as direções tangencial e axial, após trefilação, devem ser próximos na superfície, o que condiz com o resultado simulado. 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, essas duas componentes de tensão apresentam a mesma direção.

Na Figura 3b, ao se compararem os valores simulados com os resultados experimentais da feira de 15°, percebeu-se que a diferença entre os valores de tensões residuais, para a direção tangencial, atinge um máximo de 89 MPa, para a superfície, e de 117 MPa, para o centro da barra. Na direção radial, há uma diferença de 84 MPa, no centro da barra, e, na superfície, não há diferença considerável.

Na comparação dos valores simulados com os obtidos experimentalmente para o ângulo de 20°, indicado na Figura 4b, observa-se que ocorre uma diferença de 226 MPa, no centro da barra, tanto na a direção tangencial quanto na direção radial. Na superfície da barra, as diferenças entre a simulação e o experimental são mínimas.

Todas essas diferenças são consideradas normais, quando se trata de uma comparação de resultados numéricos com resultados experimentais, devido às hipóteses iniciais de cálculo e às devidas limitações (Atienza et al., 2005a). Além disso, deve-se considerar os efeitos de pequenos erros incorporados à medição via Difração de Nêutrons.

Esses valores consideráveis não se repetem, quando são comparados os valores de tensões residuais simuladas com as experimentais, para a direção axial, onde se observa, na Figura 3a, uma diferença máxima em torno de 247 MPa, na superfície, e de -578 MPa, no centro da barra, para a feira de 15°. Na Figura 4a, essas diferenças, no centro da barra, giram em torno de -664 MPa e, na superfície, ficam em torno de 100 MPa.

Um dos motivos, para que ocorra essa diferença, nos valores das tensões residuais, é que o material, ao ser trefilado, já possui tensões residuais presentes, devido a processos anteriores. Entretanto, na simulação realizada, o material, no início, está livre de tensões, o que pode ocasionar a diferença nos resultados. Isto poderá ser minimizado aplicando condições de contorno adequadas que reflitam o estado inicial do material, como, por exemplo, simulando-se a etapa de jateamento e importando o pré-

estado de tensões para as simulações do processo de trefilação. Além disso, no modelo proposto, o material é isotrópico, quando, na realidade, seu comportamento é anisotrópico, pois a matéria-prima é originária de um processo de laminação, que insere anisotropia devido à orientação dos grãos do material. De acordo com a literatura (Atienza et al., 2005a; Atienza et al., 2005b), ao

se considerar o material isotrópico, há uma superestimação dos valores de tensões residuais na ordem de 200 MPa no centro da barra para a direção axial, ao passo que, para as direções radial e tangencial, esse mesmo montante é superestimado. Para estudos futuros, urge a necessidade de se considerarem os efeitos da anisotropia do material.

Também será necessário conside-

rarem-se os efeitos do endurecimento cinemático (Ottosen, 1979), que ocorre no material devido às deformações ocasionadas em etapas anteriores à trefilação, que geram deformações em uma única direção, o que não ocorre durante a trefilação e, provavelmente, gera efeito Baushinger, que necessitará ser avaliado, experimentalmente, via ensaio em máquina Gleebe.

4. Conclusões

Ao se analisarem as forças calculadas e simuladas, perceberam-se diferenças que giram em torno de 18%, para a feira de 20°, e de 12%, para a feira de 15°, para o caso de simulação 3D, e diferenças em torno de 17%, para as feiras de 20°, e de 15°, para o caso de simulação

2D. Esses resultados foram satisfatórios, quando o objetivo é avaliar a força, utilizando simulação numérica.

Para a análise de tensões residuais, o perfil de tensões simulado aproxima-se do perfil esperado, porém os valores quantitativos simulados não

foram satisfatórios, ao compará-los com os valores experimentais. Isto se deve ao fato de que, na simulação, ainda não puderam ser incorporados os efeitos das etapas prévias de processamento do material, anisotropia e de endurecimento cinemático.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq, CAPES e FINEP pelo apoio financeiro através do programa BRAGECRIM (Brazilian

German Collaborative Research Initiative in Manufacturing Technology) e ao Helmholtz Zentrum Berlin, onde

foram realizadas as análises de tensões residuais.

6. Referências bibliográficas

- ATIENZA, J. M. et al. Residual stresses in cold-drawn pearlitic rods. *Scripta Materialia*, Spain, v. 52, n. 12, p. 1223-1228, 2005a.
- ATIENZA, J. M. et al. Residual stresses in cold-drawn ferritic rods. *Scripta Materialia*, Spain, v. 52, n. 4, p. 305-309, 2005b.
- AVITZUR, B. Flow through conical dies. *Wire Industry*, v. 56, p. 243, 1989.
- DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. p. 653.
- GELEJI, A. *Bildsame Formgebung der Metalle*. Berlin: Akademie Verlag, 1967.
- GODFREY, H., The benefits of using wiredrawing dies with smaller included angles and longer nibs. *Wire Journal International*, v. 33, n. 6, p. 102, 2000.
- HAUK, V. Structural and residual stresses analysis by non-destructive methods. *Elsevier*, p.530, 1997.
- LANGE, K. Handbook of metal forming. *Society of Manufacturing Engineers*, p. 13-24, 2006.
- MARTINEZ-PEREZ, M. L. et al. Residual Stresses profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction. *Acta Materialia*, Spain, v. 52, n. 18, p. 5303-5313, 2004.
- NUNES, R. M. *Análise de tensões residuais de aços AISI 1048 produzidos por trefilação combinada visando minimizar distorções pré-processamento*. Porto Alegre: PPGEM / UFRGS, 2008. (Dissertação de Mestrado).
- OTTOSEN, N. S. *Nonlinear kinematic hardening under non-proportional loading*. Copenhagen: Riso National Laboratory, 1979.
- 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.
- SAHIN, M., CEM, S., AKATA, H. Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting process for different materials. *Materials & Design*, v. 28, p. 633-640, 2007.
- TEKKAYA, A. E. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 103, p. 14-22, 2000.
- WOO, D. M. On the complete solution of the deep-drawing problem. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 10, p. 83-94, 1968.