



ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS VIA DIFRAÇÃO DE NÊUTRONS EM BARRAS DE AÇO AISI 1045 PRODUZIDAS POR TREFILAÇÃO COMBINADA¹

Rafael Menezes Nunes²
Alexandre da Silva Rocha³
Milena Mondardo⁴
Thomas Hirsch⁵

Resumo

As tensões residuais representam um dos principais potenciais para o aparecimento de distorções, empenamentos e mudanças dimensionais em componentes mecânicos durante o processo de manufatura. Neste trabalho foi realizada uma avaliação do perfil de tensões residuais em barras de aço AISI 1045 trefiladas. Utilizou-se a técnica de difração de nêutrons para a realização dos perfis de tensões residuais. A medição de tensões residuais foi realizada após a etapa de trefilação com fieiras de 15° e 20° e após o endireitamento e polimento por rolos cruzados ("PERC") com 16° para uma barra que havia sido trefilada com a fieira de 15°. As medições foram realizadas ao longo de duas posições periféricas (0 - 180°). A partir dos valores de deformações obtidos foi estimado o nível de tensões residuais longitudinais, transversais e radiais ao longo de toda a seção transversal das barras.

Palavras-chave: Trefilação combinada; Tensões residuais; Difração de nêutrons.

EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES VIA NEUTRON DIFFRACTION IN BARS OF AISI 1045 STEEL PRODUCED BY COMBINED COLD DRAWING

Abstract

The residual stresses represent one of the main potentials for the appearance bending and dimensional changes (known as distortion) in mechanical components during the manufacturing process. This work accomplished an evaluation of the residual stresses profile in cold drawn AISI1045 steel bars. The samples were removed from two steps of a combined cold-drawing process: cold-drawing, straightening and polishing by crossed rolls ("PERC") with 16°. Measurements were made along two peripheral positions (0 - 180°). From the values of deformation obtained the residual stress profile over the complete bar cross sections were estimated for longitudinal, hoop and radial positions

Key words: Cold-drawing; Residual stress; Neutron diffraction.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Doutorando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. rafael.nunes@ufrgs.br

³ 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

⁴ Mestranda do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

⁵ Priv Doz. Dr. Ing., IWT – Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik – Bremen - Germany



1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento industrial e a forte competitividade houve o desenvolvimento de programas de qualidade, produtividade e controle de processo visando estabilidade e maior produtividade. Desta forma, surgiu a necessidade de conhecimento e controle de todos os parâmetros de processo e o entendimento dos processos como um todo, evitando assim efeitos não esperados que pudessem ocasionar perdas de produção. O controle e conhecimento destes parâmetros permitem a estabilidade do processo produtivo, assim, podem-se solucionar problemas inesperados durante uma rota de fabricação com mais eficiência e velocidade.^(1,2)

No processo de trefilação uma importante fonte de perdas durante o processamento do material são as distorções de forma, indesejadas, e que são relacionadas ao nível e distribuição de tensões residuais no material.

O processo de trefilação é um processo de fabricação por deformação plástica no qual há um tracionamento do fio-máquina (matéria-prima) através da ferramenta (fieira), ocasionando assim uma redução de área na seção transversal e aumento de comprimento. Uma das características principais do processo de trefilação é o excelente acabamento superficial e também a ótima precisão dimensional.^(3,4) A principal matéria-prima usada na trefilação de barras é o fio-máquina. Uma das grandes vantagens do processo de trefilação são: Ganho de resistência mecânica, acabamento superficial e a alta velocidade do processo.⁽³⁻⁶⁾

As tensões residuais podem favorecer de forma benéfica ou maléfica componentes mecânicos, em geral tensões residuais compressivas na superfície são mais favoráveis, pois aumentam a vida em fadiga de um componente mecânico. O oposto ocorre com tensões residuais trativas, pois diminuem a vida em fadiga.⁽⁷⁻⁹⁾

No processo de trefilação combinada, tensões residuais estão relacionadas ao aparecimento de distorções em barras durante o processo de trefilação, ou ainda, em etapas subsequentes de processamento, como por exemplo, usinagem e tratamentos térmicos.⁽¹⁰⁻¹²⁾ O controle de distorções é muito importante para diminuir custos de processo, aumentando a competitividade do produto, desta forma, diminuindo etapas de endireitamento que requerem um alto tempo de processamento e conseqüentemente, aumentam o custo do produto final.⁽¹³⁻¹⁶⁾

As tensões residuais presentes em um material sempre estarão em equilíbrio, assim, plotando-se uma curva das tensões trativas e compressivas presentes no material a soma das forças e momentos será zero.^(7,17) Na prática a determinação destas curvas é complexa, pois o estado de tensões apresentado no material é tridimensional.⁽¹⁷⁾

As tensões residuais apresentam um caráter elástico, assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão verdadeira de escoamento local do material.⁽¹⁷⁾ Também define-se tensões residuais como sendo ordinárias, ou seja, uma tensão trativa irá somar-se com outra tensão trativa, ou ainda, uma tensão trativa irá diminuir a tensão resultante quando somada a uma tensão compressiva. As tensões residuais podem ser aliviadas aquecendo o material até uma temperatura a qual a tensão de escoamento do material é igual ou inferior às tensões residuais presentes no material.^(7,17) Ou seja, neste caso as tensões residuais irão causar deformações plásticas, escoamento do material e serão aliviadas.

As tensões residuais podem ser medidas por diferentes métodos, dentre eles destacam-se os métodos de *slitting* (deflexão), *hole-drilling*, difração de raios-X,

difração de nêutrons, micro-magnético dentre outros. Cada método apresenta suas aplicações, vantagens, desvantagens e peculiaridades.⁽¹⁷⁾

Para a determinação de tensões residuais é necessário classificar qual tipo de tensão está sendo medido pelo método.⁽¹⁶⁾ Podemos classificar as tensões residuais como macroscópicas tipo I e microscópicas do tipo II e tipo III.⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ As tensões macroscópicas são as tensões residuais que se distribuem em larga escala e se equilibram por todo o componente. Na classificação das tensões residuais macroscópicas considera-se o material como sendo homogêneo, em uma visão macroscópica, são as tensões medidas por métodos de dissecação do material, como por exemplo, *hole-drilling*.⁽²⁰⁾ As tensões residuais do tipo II também chamadas de microscópicas são formadas pela não homogeneidade da estrutura cristalina do material. Estas tensões residuais estão associadas ao domínio cristalino do material, como por exemplo, o grão e também fases presentes no material e estas tensões estão relacionadas ao balanço entre diferentes grãos ou fases presentes no material. As tensões residuais microscópicas do tipo III existentes na escala atômica, correspondem à ação criada por todos os diferentes tipos de defeitos cristalinos.⁽²⁰⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

A trefilação combinada é composta de várias etapas e dentre as principais características de processo estão, a alta produtividade aliada ao alto grau de automação no maquinário. As principais etapas do processo de trefilação combinada são: preparação dos rolos, pré-endireitamento horizontal, pré-endireitamento vertical, jateamento com granalhas, trefilação, endireitamento horizontal, endireitamento vertical, operação de corte, endireitamento e polimento final por rolos cruzados ("PERC"), operações de controle de qualidade e enfeixamento. As velocidades de processamento de material podem chegar a 100m/min.^(14,15,21) O material de partida é um fio-máquina laminado a quente e fornecido em forma de bobina, as principais etapas do processo de trefilação combinada analisadas neste trabalho são mostradas na Figura 1, bem como, são indicados com uma seta os pontos de retirada de amostras.

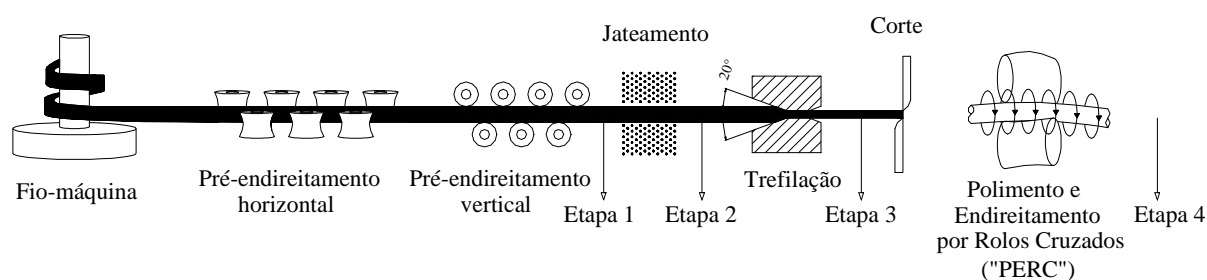


Figura 1 - Principais etapas do processo de trefilação combinada.

Na retirada de amostras do processo considerou-se a orientação das amostras retiradas em relação ao maquinário. Esta metodologia de análise foi muito importante para correlacionar os dados obtidos nos ensaios de laboratório com o processo. Nos resultados obtidos verificou-se a importância da marcação no momento da retirada das amostras, pois há correlação entre os resultados obtidos nos ensaios e a posição específica do ângulo periférico da amostra em relação ao maquinário,^(14, 16) conforme mostrado na Figura 3. A marcação também levou em conta o ângulo e o sentido com que a barra é processada conforme a Figura 3.

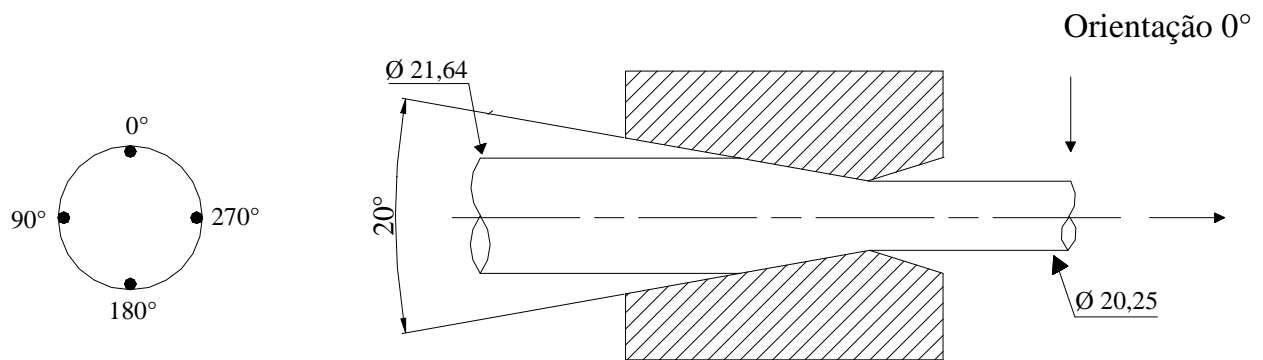


Figura 2 - Sistema de marcação das amostras, orientação na amostra e vista lateral da fieira.

As amostras foram retiradas em duas etapas da trefilação combinada, sendo que na etapa de trefilação houve variação do ângulo de fieira e no polimento e endireitamento por rolos cruzados (“PERC”) utilizou-se na etapa anterior (trefilação) um ângulo de fieira de 15°.

- Trefilada com ângulos de 15° e 20°.
- Endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 16° em conjunto com ângulo de fieira de 15°.

A Tabela 1 mostra a análise química do material, aço ABNT 1045.

Tabela 1 - Composição Química do aço AISI 1045.

Elemento % em peso	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb
	98,00	0,44	0,25	0,68	0,01	0,02	0,12	0,02	0,06	0,02	<0,01

O método de medição de tensões residuais por difração de nêutrons é análogo ao método de medição de tensões residuais por difração de raios-X. A determinação das tensões residuais presentes no material por difração de nêutrons segue o princípio da lei de Bragg. Este método utiliza o retículo cristalino do material como um strain-gage interno, baseado na equação de Bragg, equação 1.⁽²⁰⁾

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta \text{ (equação 1)}$$

O espaçamento interplanar “d” e sua variação (tensão) podem ser medidos. Em um difratômetro monocromático, a tensão ε é determinada medindo o ângulo de espalhamento do material tensionado, θ , e o mesmo ângulo para o material não tensionado, θ_0 , conforme a equação 2.⁽²⁰⁾

$$\varepsilon = \frac{\text{sen}\theta_0}{\text{sen}\theta} - 1 \text{ (equação 2)}$$

Em uma medida de difração o espaçamento interplanar, d, medidos na direção da bissetriz do feixe de nêutrons difratado. Desde que a tensão apresenta um tensor é necessário medir as tensões em três diferentes direções ortogonais entre si nas direções x, y e z para se obter os componentes normais de tensões para as três direções (equação 3). Os componentes normais de tensão, θ_x , θ_y e θ_z podem ser calculados a partir da (Equação 2). Sendo E o modulo de Young e ν o coeficiente de Poison.⁽²⁰⁾

$$\sigma_i = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_i + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z), \quad i = x, y, z \quad (\text{equação 3})$$

A montagem do experimento para medição de tensões residuais por difração de nêutrons é mostrado na Figura 3. Os parâmetros básicos do equipamento de difração de nêutrons são:

- Instrumento - E3 – HMI – Berlin;
- Ângulo do monocromador [η] – 65°;
- Comprimento de onda [nm] - 0.1486;
- Colimação [θ] – aberta;
- FWHM [η] - ~0.3 (a $2\theta = 90^\circ$);
- Fluxo [n/cm²/s] - ~5 x 10⁶;
- Detector - PSD 30 x 30 cm²;
- Monocromador - Si (400), Double Focussing; e
- Aberturas primárias e secundárias de 2mm.

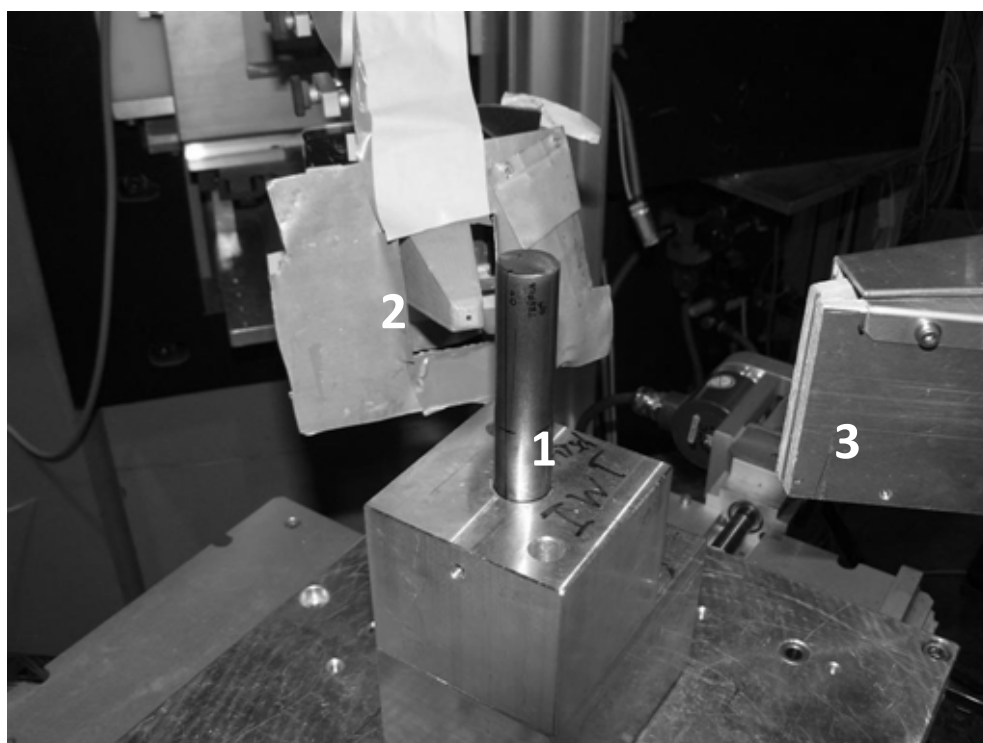


Figura 3 - Montagem da amostra no equipamento para medição de tensões residuais radiais e transversais na técnica de difração de nêutrons, reator nuclear BER II do HMI, 1 – Amostra, 2 – Abertura primária, 3 – Abertura secundária.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O nível de tensões residuais nas barras foram determinados utilizando-se a técnica de difração de nêutrons desde a superfície até o núcleo do material. A Figura 4 mostra o perfil de tensões residuais na barra trefilada com ângulo de ferramenta de 15° caracterizado por difração de nêutrons, observa-se que as tensões residuais longitudinais e transversais são altamente trativas na superfície mantendo este comportamento até uma profundidade de 2 mm em relação a superfície. Após esta profundidade as tensões residuais longitudinais tornam-se compressivas mantendo este comportamento até o núcleo do material e chegando a valores de aproximadamente – 600 MPa para o centro da barra. Ko et al.⁽²²⁾ determinarm por

elementos finitos os efeitos das tensões residuais em relação ao ângulo de ferramenta e em relação à redução para um aço AISI1080 trefilado, mostrados na Figura 5⁽²²⁾ e na Figura 6.⁽²²⁾

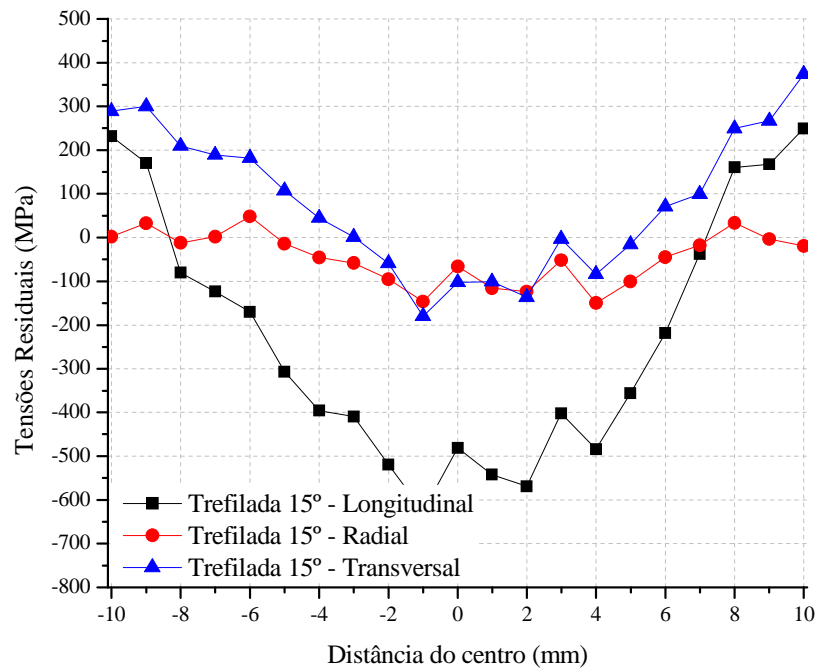


Figura 4 - Perfil de tensões residuais, amostra trefilada 15°, medição por difração de Nêutrons.

Observa-se na Figura 5⁽²²⁾ onde são mostrados os efeitos das tensões residuais variando-se o ângulo de ferramenta (fieira), nota-se que há uma grande variação no perfil das tensões residuais próximas a superfície, porém não há grandes variações para o perfil das tensões residuais próximas do núcleo, somente houve variações para um semi-ângulo de 3° que é extremamente baixo e não é usual para aços no meio industrial. Na Figura 6⁽²²⁾ observa-se o perfil das tensões residuais longitudinais para várias reduções diferentes, observa-se que para reduções entre 15% e 30% há diferenças no perfil de tensões residuais próximo a superfície, porém aproximando-se do núcleo do material este perfil de tensões residuais tende a ter o mesmo comportamento. Observa-se também na Figura 6⁽²²⁾ que para reduções entre 5% e 10% o comportamento do perfil de tensões residuais tende a mudar, para regiões próximas a superfície as tensões residuais tendem a valores mais trativos comparando-se com o perfil de tensões residuais em reduções maiores, porém as tensões residuais tendem a serem menos compressivas no núcleo do material utilizando-se uma redução entre 5% e 10%.

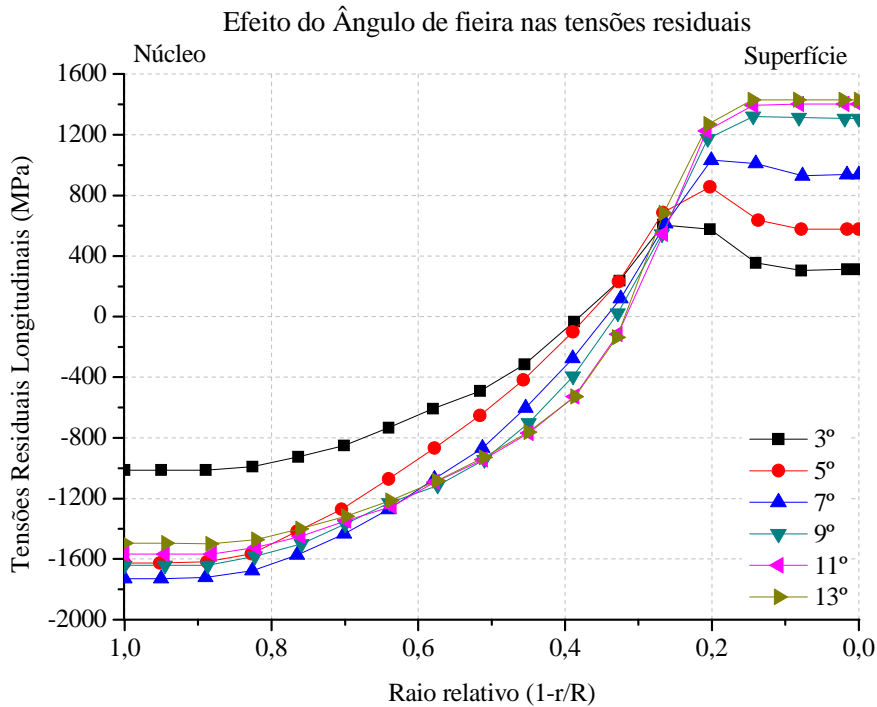


Figura 5 - Efeito do semi-ângulo de ferramenta (fiação) nas tensões residuais longitudinais.⁽²²⁾

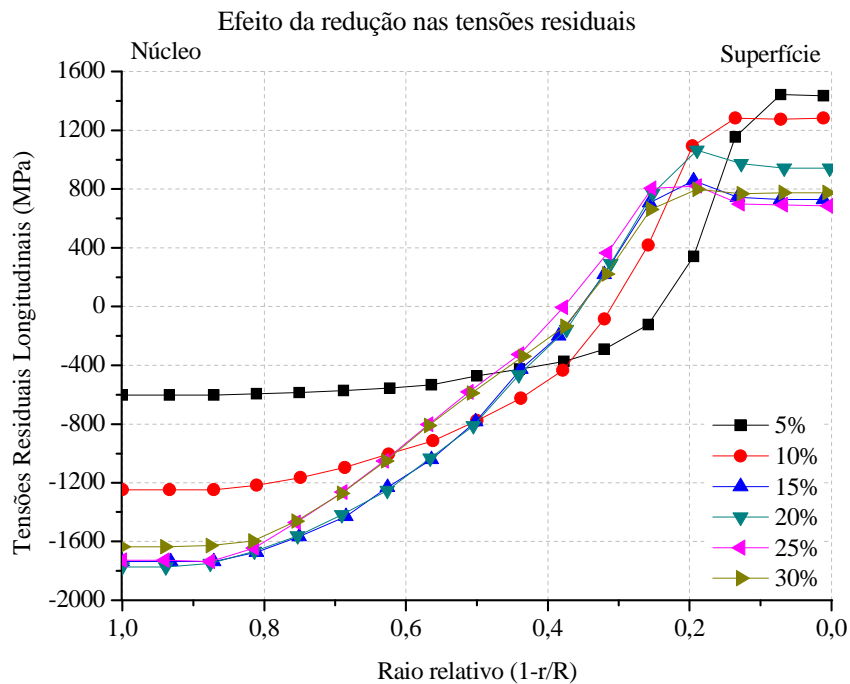


Figura 6 - Efeito da redução nas tensões residuais longitudinais.⁽²²⁾

Na Figura 7 é apresentado o perfil de tensões residuais caracterizado por difração de nêutrons em uma amostra trefilada com ângulo de fiação de 20°. Observa-se que as tensões residuais longitudinais são trativas na superfície da barra trefilada até uma profundidade de 2mm aproximadamente, após esta profundidade assumem um caráter compressivo com valores de tensões residuais de aproximadamente - 400MPa. As tensões residuais transversais apresentam um caráter trativo na

superfície da amostra trefilada tendendo a zero conforme aproxima-se do núcleo do material. As tensões radiais tendem a zero em todo o raio do material.

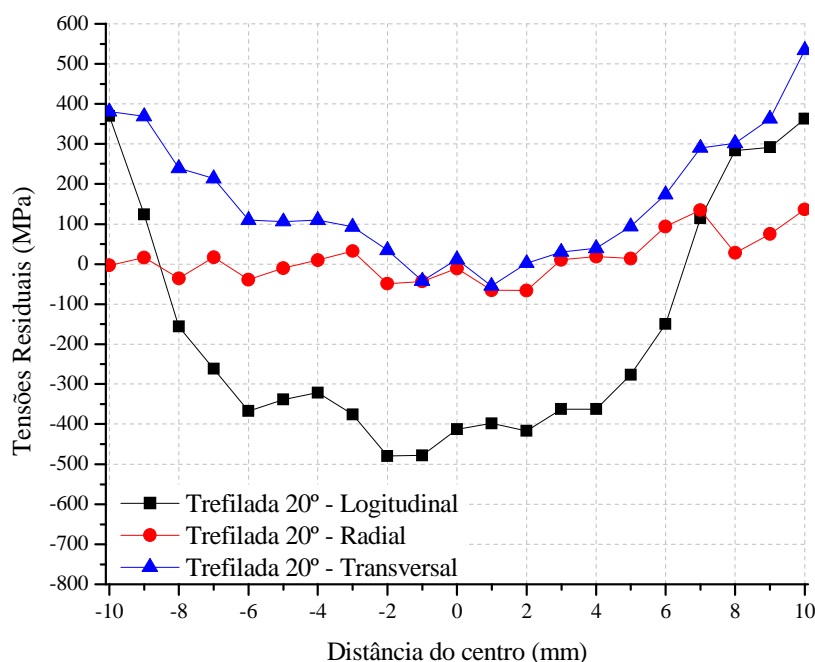


Figura 7 - Perfil de tensões residuais, amostra trefilada 20°, medição por difração de Nêutrons.

Na Figura 8 são apresentados os perfis de tensões residuais para a amostra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 16° e ângulo de fieira de 15°. Observa-se que as tensões residuais longitudinais são compressivas na superfície e tendem a zero até uma profundidade de 2mm. Após esta profundidade as tensões residuais longitudinais voltam novamente a tender a valores compressivos chegando a -400 MPa no núcleo da barra. As tensões residuais transversais tem valores compressivos na superfície com valores variado de -250 MPa a -100MPa em cada lado da amostra, posições periféricas de 0° e 180° respectivamente. Após a profundidade de 2,5 mm as tensões transversais e radiais seguem o mesmo comportamento, tendendo a serem trativas com valores próximos a 100 MPa.

Na Figura 9 é mostrada uma comparação no perfil de tensões residuais longitudinais medidos por difração de nêutrons nas amostras: Trefilada 20°, trefilada 15°, e "PERC" 16° com ângulo de fieira de 15°. Para a etapa de trefilação independente do ângulo de fieira utilizado as tensões residuais axiais apresentam um comportamento trativo na superfície e tendem a compressão no núcleo do material. Comparando-se os ângulos de fieira de 15° e 20° observa-se que as tensões residuais próximas a superfície são mais trativas utilizando-se um ângulo de fieira de 20°, o inverso ocorre no núcleo do material, onde o ângulo de 20° induz tensões residuais mais compressivas, comparando-se com o ângulo de 15°. Comparando-se com as tensões residuais axiais apresentadas na etapa de "PERC", na superfície da amostra após o "PERC" há uma inversão de tensões residuais, passando a ter comportamento compressivo e no núcleo do material as tensões axiais continuam a ter um comportamento compressivo, porém menos compressivos que a etapa de trefilação.

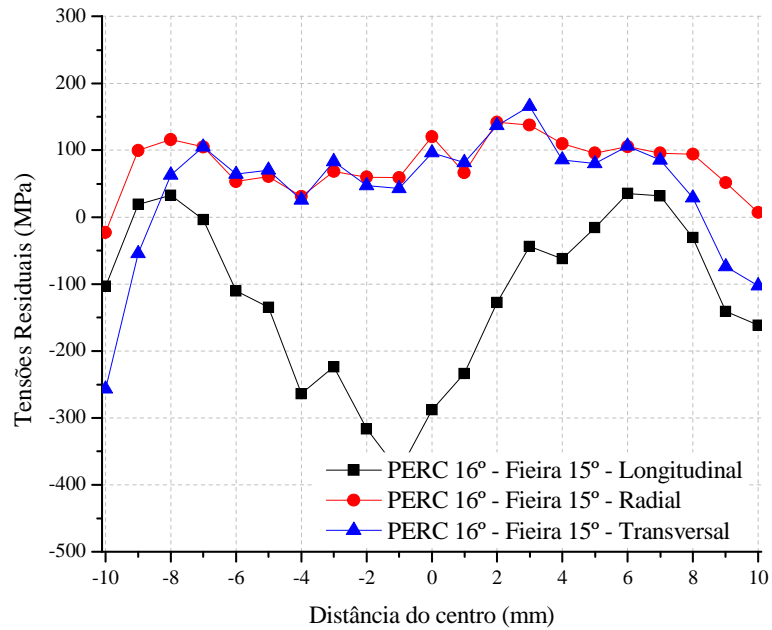


Figura 8 - Perfil de tensões residuais, amostra “PERC” 16 ° - Feira 15°, medição por difração de Nêutrons.

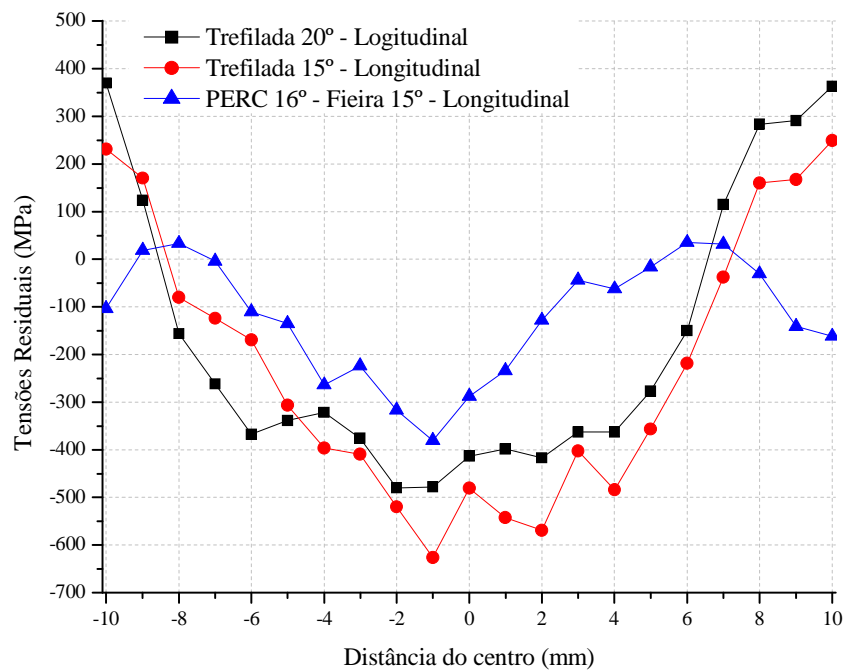


Figura 9 – Comparação de tensões residuais longitudinais após a etapa de trefilação e “PERC”.

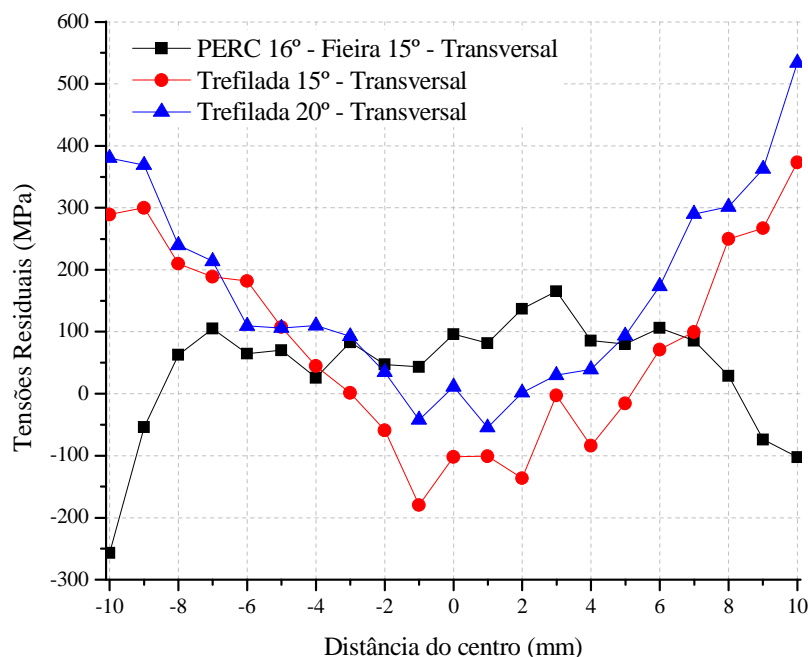


Figura 10 - Comparação de tensões residuais transversais após a etapa de trefilação e “PERC”.

Na Figura 10 é mostrada uma comparação dos perfis de tensões residuais transversais caracterizados por difração de nêutrons nas amostras: Trefilada 15°, trefilada 20° e “PERC” 16° com fieira de 15°. Observa-se nas regiões próximas a superfície que a etapa de trefilação gera tensões residuais transversais trativas e a etapa de “PERC” gera tensões residuais transversais compressivas. Comparando-se os dois ângulos de fieira na geração de tensões residuais transversais, observa-se que o ângulo de fieira de 15° gera tensões residuais menos trativas na superfície e mais compressivas no núcleo do material, comparando-se com o ângulo de 20°. Na etapa de “PERC”, após a etapa de trefilação, há uma redistribuição de tensões residuais, a superfície do material passa a ter tensões residuais com comportamento compressivo e o núcleo passa a ter comportamento trativo.⁽²³⁾ Esta redistribuição de tensões após a trefilação é benéfica ao material, pois é desejável ter um componente com tensões residuais compressivas na superfície, pois há um aumento da vida em fadiga. Observa-se também que não há uma homogeneidade de tensões comparando-se as posições periféricas de 0° e 180° para as duas etapas do processo estudadas. Este comportamento não é desejável, pois esta variação de tensões ao longo da barra pode ser o principal responsável por ocasionar empenamentos em etapas subsequentes de processo.

4 CONCLUSÕES

O método empregado mostrou ser simples e eficaz na determinação do comportamento das tensões residuais das barras após a trefilação. Após os ensaios conclui-se:

- durante a etapa de trefilação tensões residuais longitudinais e transversais trativas são geradas na superfície independente do ângulo de fieira utilizado;
- o ângulo de fieira de 15 graus induz menores níveis de tensões residuais longitudinais e transversais para regiões próximas a superfície em comparação com o ângulo de 20 graus;

- o ângulo de fieira de 20 graus induz tensões residuais longitudinais e transversais mais compressivas em regiões próximas ao centro da barra comprando-se com o ângulo de 15 graus; e
- após a trefilação, na etapa de “PERC”, há uma alteração no nível de tensões residuais longitudinais e transversais superficiais tornando-se compressivas.

Agradecimentos

Este trabalho é parte dos resultados da Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura - BRAGECRIM, os autores agradecem a CAPES, FINEP e DFG pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho. Agradecemos também ao Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH pela utilização do reator nuclear BER II para medição das tensões residuais por difração de nêutrons.

REFERÊNCIAS

- 1 Klein D., Thoben K.-D., Nowag L., Using Indicators to Describe Distortion Along a Process Chain. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2006, 37, No. 1. p19-22.
- 2 Zoch H.-W., From Single Production Step to Entire Process Chain – the Global Approach of Distortion Engineering. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2006, 37, No. 1 p6-10.
- 3 Dieter G., *Mechanical Metallurgy.* McGraw-Hill Science, 1986. p-800.
- 4 Dieter, G. E.; Kuhn H. A.; “Handbook of Workability and Process Design”, ASM International, Parks Ohio 2003. p280.
- 5 Altan, T.; “Conformação de Metais – fundamentos e aplicações”. USP, 1999, p-290.
- 6 Lange, K.; “Handbook of Metal Forming”. Society of Manufacturing Engineers. GmbH, 2006, p-1176.
- 7 Hauk, V. “Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods...” ELSEVIER, 1997 p654.
- 8 Macherauch, E., Kloos, K. “Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress”. *Residual Stress em: Science and Technology*, Vol. 1, p 3–27, Alemanha 1987.
- 9 Withers, P., Bhadeshia, K. “Residual Stress, Part 1...” *Material Science and Technology*, Vol. 17, 2001, p 355–365.
- 10 Asakawa M., Sasaki W., Shishido S., Effect of die approach geometry and bearing length on residual stress after bar drawing. *Wire Journal International* 35 no10 October 2002, p68-72
- 11 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.
- 12 Wang Z., Gong B., Residual Stress in the Forming of Materials. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM International, 2002.
- 13 Metz M., Santos C., Rocha A. S., Análise Qualitativa Das Tensões Residuais Longitudinais Em Barras Trefiladas De Aço Sae 1045 Através Do Método Slliting. 8^o Congresso Iberoamericano De Engenharia Mecânica. Cusco, 2007. p-1213.
- 14 Nunes R. M., Análise De Tensões Residuais No Processo De Trefilação Combinada Do Aço AISI 1048 Visando Minimizar Distorções Pós Processamento. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2008. p110
- 15 Nunes, R. M.; Metz M.; Hirsch T. K.; Rocha, A. S. Análise de Tensões Residuais em Barras de Aço AISI 1048 Produzidas por Trefilação Combinada. in: 63 congresso anual da ABM, 2008, Santos. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. v. 1. p. 341-350.

- 16 Rocha, A. S., Nunes, R. M., Metz, M., Hirsch, T. Analysis of the distortion potential in AISI 1048 steel bars induced by a combined drawing-straightening process. In: 2nd International Conference on Distortion Engineering, 2008, Bremen. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTORTION ENGINEERING. Bremen: University of Bremen, 2008. v.1. p. 13 – 20.
- 17 Lu, J. “Handbook of Measurement of Residual Stresses”. SEM, Inc. 1996. p-238.
- 18 Walton H. W., Deflection Methods Chapter, Handbook of Measurement of Residual Stress, G. E. Totten, 2002 pg. 89-98;
- 19 Kandil, F. A.; Lord, J. D.; “NPL Report MATC(A)04. A Review of residual Stress Measurement Methods – a Guide to Technique Selection”, Feb 2001.
- 20 Lodini, A. “Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation”. Taylor & Francis, 2003, p368.
- 21 Nakagiri A., Yamano T., Konaka M., Asakawa M., Sasaki W., Yoshida K., Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment. Wire Journal International 34 no8 August 2001 p73.
- 22 Ko, D. C., Lee, S. K., Hwangb, W. H., Kim, B. M., Bae, C. M., The evaluation of residual stress on the drawn wire using nano-indentation test. Journal of Materials Processing Technology, vol. 191, 2007, p64-67.
- 23 Wu B.J., Chan L.C., Lee T.C., Ao L.W.. A study on the precision modeling of the bars produced in two cross-roll straightening. Journal of Materials Processing Technology 99, 2000 p202-206.