

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TENSÕES RESIDUAIS EM BARRAS TREFILADAS ATRAVÉS DA REMOÇÃO DE MATERIAL ¹

Rafael Menezes Nunes²
Eduardo Moller Ferlauto³
Fabio Luiz Knewitz⁴
Adão Felipe Oliveira Skonieski⁵
Alexandre da Silva Rocha⁶

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 das mudanças dimensionais sofridas em função da remoção de material em barras de aço AISI 1048 trefiladas. A remoção de material foi realizada após cada etapa de processamento. As barras foram retiradas de cinco etapas do processo de trefilação combinada, sendo elas: pré-endireitamento, jateamento, trefilação, endireitamento e polimento por rolos cruzados (“PERC”) com 16°, 17° e 18°. Os cortes foram realizados de modo a deixar uma porção de material correspondente a uma profundidade de $\frac{1}{6}$ do diâmetro da barra em diferentes posições periféricas (0°, 90°, 180°, 270°). Desta forma a deformação medida da porção restante de material se dá pela ausência de restrição imposta pelo material anteriormente presente. A partir dos valores de deformações obtidos foi estimado o nível de tensões residuais longitudinais para cada corte realizado, determinando se o comportamento apresentado é trativo ou compressivo.

Palavras-chave: Trefilação combinada; Tensões residuais; Métodos de deflexão.

EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES EFFECTS ON DRAWN BARS THROUGH MATERIAL REMOVAL

Abstract

The residual stresses represent one of the main potentials for the appearance of distortions, bending and dimensional changes in mechanical components during the manufacturing process. This work accomplished an evaluation of the dimensional changes suffered as a function of material removal from bars. The material removal was accomplished after each processing step. The samples were removed from five steps of a combined cold-drawing process: pre-straightening, shot-blasting, cold-drawing, straightening and polishing by crossed rolls (“PERC”) with 16°, 17° and 18°. The cuts were accomplished in order to leave a material portion corresponding to $\frac{1}{6}$ of the diameter of the bar in different outlying positions to characterize imposed heterogeneities (0°, 90°, 180°, 270°). Consequently the measured deformation of the remaining material portion feels for the restriction absence imposed by the material previously present. Starting from obtained deformation values the level of longitudinal residual stresses for each accomplished cut was estimated.

Key words: Cold-drawing, residual stress, deflection methods.

¹ Contribuição técnica ao 64° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

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

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

⁴ Mestrando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. fabio.knewitz@ufrgs.br

⁵ Doutorando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. adao.skonieski@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

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 poderiam 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.

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⁽¹⁾. 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.⁽¹⁻⁴⁾

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.⁽⁵⁻⁷⁾

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. 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.^(8,9)

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.^(7,10) Na prática a determinação destas curvas é complexa, pois o estado de tensões apresentado no material é tridimensional.

As tensões residuais apresentam um caráter elástico, assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão de escoamento local do material. 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.^(7,10) 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. O método de slitting (deflexão), ou ainda, o método de remoção de material apresenta como principal vantagem o baixo custo para a sua realização, pois não é necessário o uso de equipamentos sofisticados, como por exemplo, um difratômetro de raios-X, porém a correlação entre a deflexão causada pela remoção de material e o cálculo do nível de tensões residuais presentes nem sempre é simples implicando em formulações complexas. Entretanto o método de remoção pode ser usado de forma qualitativa, apenas mostrando se o comportamento de tensões residuais é compressivo ou trativo, como demonstrado neste trabalho, desta forma ele apresenta ótimos resultados e simplicidade para análise.

Walton afirma que primeiramente, para a determinação de tensões residuais é necessário classificar qual tipo de tensão está sendo medido pelo método.⁽¹¹⁾ Podemos classificar as tensões residuais como macroscópicas tipo I e microscópicas do tipo II e tipo III.⁽⁷⁾ As tensões macroscópicas são as tensões residuais que se distribuem em larga escala e se equilibram por todo o componente. Segundo Lodini, 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. 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.⁽¹²⁾

O método de medição de tensões residuais a partir da remoção de material baseia-se no equilíbrio da distribuição de tensões no material e ao princípio de superposição de tensões. Baseando-se em um cilindro de aço maciço com tensões residuais trativas na superfície e compressivas no núcleo. Fazendo-se a remoção de material deste cilindro, conforme a figura 1 ocorrerá um novo estado de tensões e a partir deste novo estado de tensões de acordo com o nível de tensões o material poderá empenar.⁽¹⁰⁾

As tensões residuais trativas na superfície deste cilindro estão forçando o material a ocupar uma área maior do que a que está sendo ocupada. Por outro lado, as tensões residuais compressivas no núcleo do material estão forçando este material a ocupar uma área menor do que a que está sendo ocupada no momento, porém todo este estado de tensões está em equilíbrio, e assim o material mantém a sua forma. Após a remoção de material o que ocorre é uma redistribuição de tensões residuais no material, fazendo com que este se deforme plasticamente para aliviar as tensões sobressalentes. Neste caso em específico, a deformação ocorre de forma que o material superficial tenderá a ocupar uma área maior e assim este irá “abrir” (Figura 1), pois os efeitos das tensões residuais trativas na superfície sobrepõem-se ao efeito de tensões residuais compressivas do núcleo pela remoção do material. O inverso irá ocorrer em um cilindro com tensões residuais compressivas na superfície e trativas no núcleo, fazendo-se a mesma remoção de material observada na Figura 1, de forma análoga ao caso anterior, o material superficial irá “fletir para dentro”, pois o efeito das tensões residuais compressivas neste caso é maior.⁽¹¹⁾

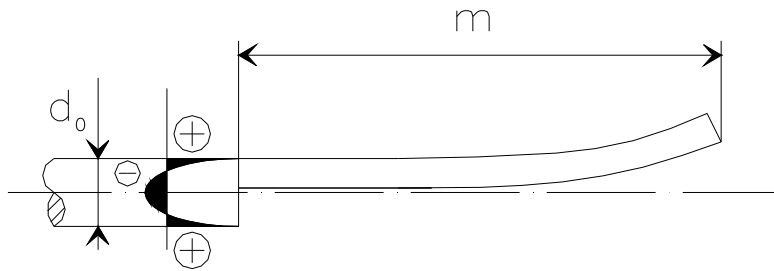


Figura 1 - Exemplo de uma remoção de material para caracterização de tensões residuais em uma barra cilíndrica.

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⁽⁸⁾. 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 2, bem como, são indicados com uma seta os pontos de retirada de amostras.

Nakagiri demonstrou que os parâmetros do processo de trefilação, tais como, coeficiente de atrito, geometria da fierra, velocidade de trefilação, grau de redução afetam diretamente a qualidade do produto trefilado, em especial tensões residuais longitudinais (AXIAL) podem afetar o componente por uma mudança nas dimensões ou ainda empenamentos em etapas subsequentes de processamento, por exemplo, tratamentos térmicos ou usinagem.⁽¹³⁾

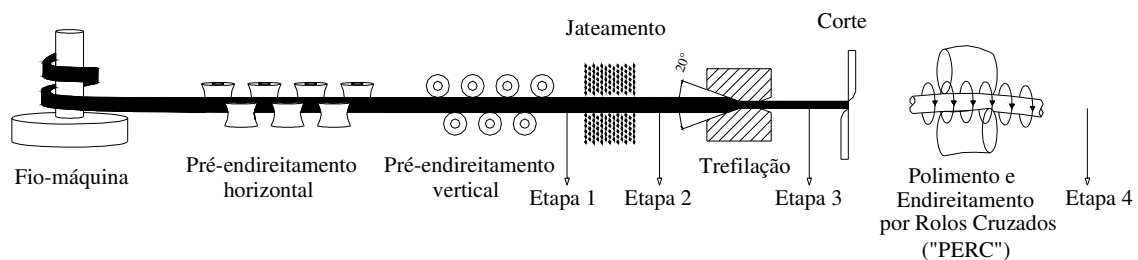


Figura 2 - Principais etapas do processo de trefilação combinada.

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,^(8,14) 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.

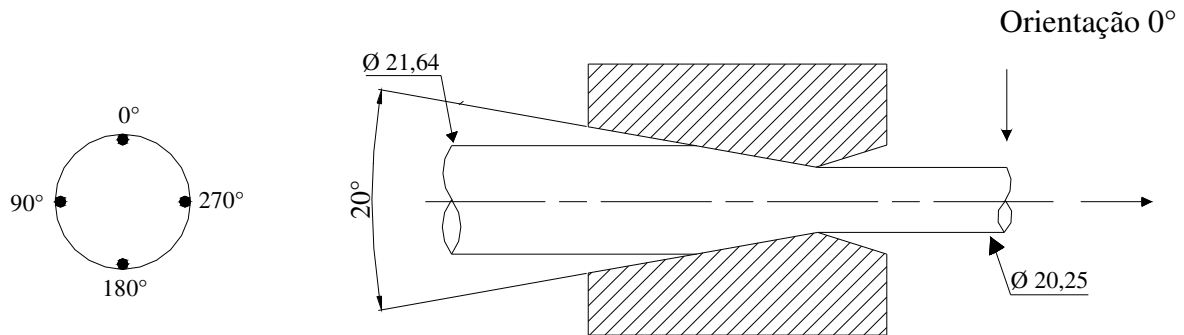


Figura 3 - Sistema de marcação das amostras, orientação na amostra e vista lateral da feira.

As amostras foram retiradas em quatro etapas da trefilação combinada, sendo que na etapa de polimento e endireitamento por rolos cruzados (“PERC”) houve variação no ângulo dos rolos. Em cada etapa foram retiradas seis amostras sendo elas:

- pré-endireitada;
- jateada;
- trefilada;
- endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 16°;
- endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 17°; e
- endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 18°.

As medições das barras foram executadas em uma máquina de medição por coordenadas Mitutoyo Beyond 710, com resolução de 0,001mm. Para a retirada de material foram realizados cortes longitudinais à uma distância $\frac{1}{6}$ diâmetro da superfície em um corte transversal a uma distância de 3,6mm do topo da amostra. Nos cortes foi usada uma máquina de eletroerosão a fio Mitsubishi FX-10K usando-se um diâmetro de fio de 0,25mm. Cada corte longitudinal foi efetuado em uma posição periférica específica conforme a realização da retirada de amostras levando-se em conta a orientação do maquinário mostrado na Figura 4.

A Tabela 1 mostra a análise química do material, aço ABNT 1048.

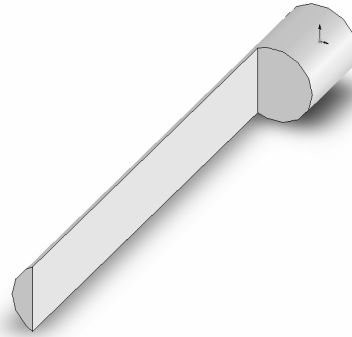
Tabela 1 - Composição Química do aço AISI 1048

Elemento	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb
% em peso	98,00	0,43	0,21	0,73	0,01	0,02	0,19	0,01	0,19	0,08	<0,01

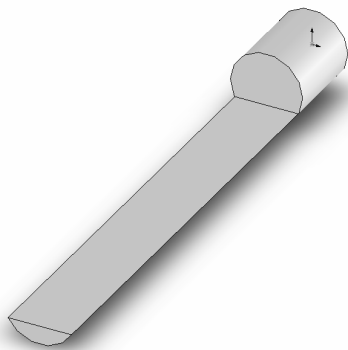
Na Figura 4 são mostradas as posições periféricas das remoções realizadas, as remoções 1 a 4 foram realizadas a $\frac{1}{6}$ do diâmetro inicial da amostras e as remoções, sempre observando a orientação original do maquinário.



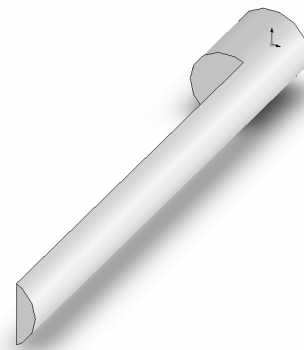
Remoção I – Área analisada referente a posição $0^\circ - \frac{1}{6}\varnothing$



Remoção II – Área analisada referente a posição $90^\circ - \frac{1}{6}\varnothing$



Remoção III - Área analisada referente a posição $180^\circ - \frac{1}{6}\varnothing$



Remoção IV - Área analisada referente a posição $270^\circ - \frac{1}{6}\varnothing$

Figura 4 - Principais etapas do processo de trefilação combinada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a remoção de material, as barras foram medidas para avaliar a deflexão causada e assim estimar o nível de tensões residuais médio presentes na superfície do material apresentado em cada etapa do processo. Seguem os resultados obtidos.

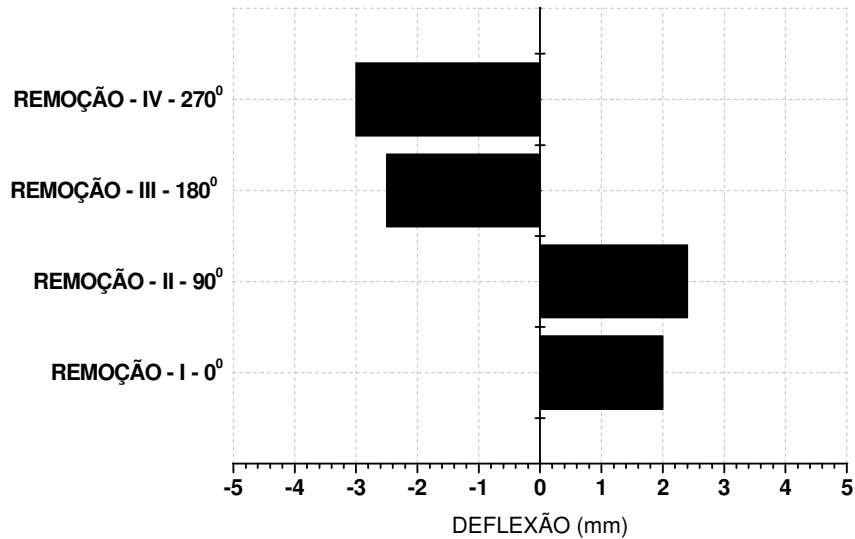


Figura 5 - Deflexões apresentadas pelo fio-máquina pré-endireitado.

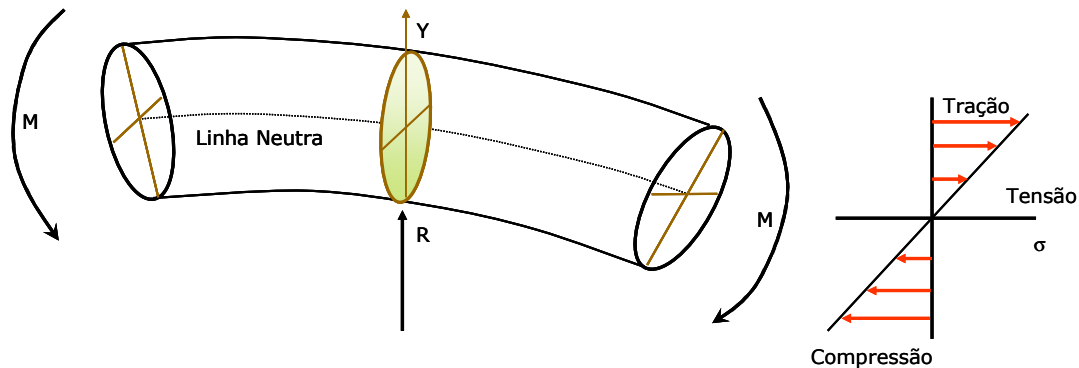


Figura 6 - carregamentos durante o pré-endireitamento.

Na Figura 5 são mostrados os resultados para o fio-máquina pré-endireitado nota-se que há diferenças no nível e comportamento das tensões residuais apresentado na região periférica do fio-máquina após a remoção de material deixando $\frac{1}{6}$ do diâmetro inicial da barra. Nas remoções de material 1 e 2 as tensões tem caráter trativo, nas remoções 3 e 4 as tensões apresentam-se compressivas. O principal motivo deste comportamento está na matéria-prima inicial, pois o fio-máquina é fornecido em rolos e é necessário o pré-endireitamento deste fio-máquina para a realização da trefilação.^(9,14) Para a realização do pré-endireitamento do fio-máquina é necessário a aplicação de diferentes níveis de tensões ao longo da periferia devido ao formato inicial apresentar uma curvatura acentuada, desta forma aplica-se tensões contrárias nos ângulos de 0° e 180° (posição superior e inferior da barra), assim como nas posições de 90° e 270° (laterais da barra) conforme observa-se na Figura 6.

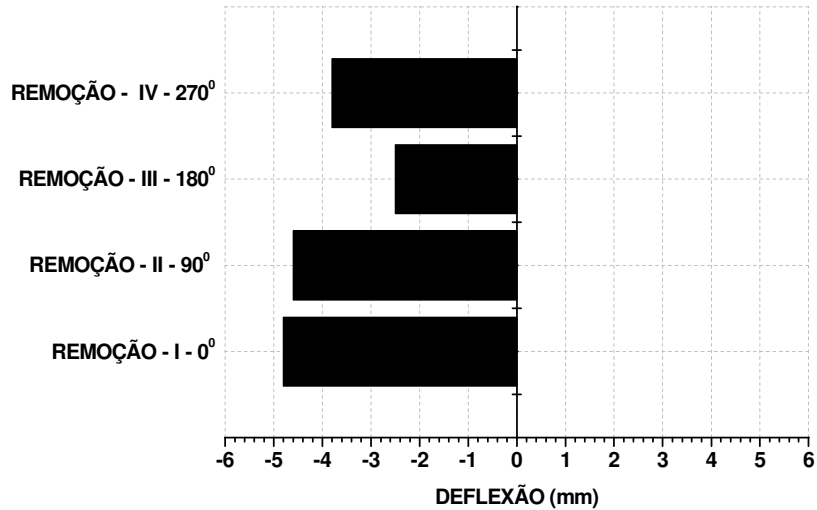


Figura 7 - Deflexões apresentadas pelo fio-máquina jateado.

No fio-máquina (figura 7) após o jateamento as tensões residuais apresentam um comportamento compressivo em toda superfície, remoções 1 a 4 ($1/6$ do diâmetro inicial), apresentando pequenas diferenças no nível de tensões ao longo da periferia da barra. Este comportamento também demonstrado nos trabalhos de Kennedy.⁽¹⁵⁾ Estas pequenas diferenças podem ser explicadas por pequenas variações do equipamento durante o processamento do material ou ainda estas diferenças podem estar sendo ocasionadas pela variação de tensões residuais presentes na superfície do fio-máquina devida a etapa de pré-endireitamento. Esta influência do pré-endireitamento (etapa anterior) já foi demonstrada em outros trabalhos.^(16,17)

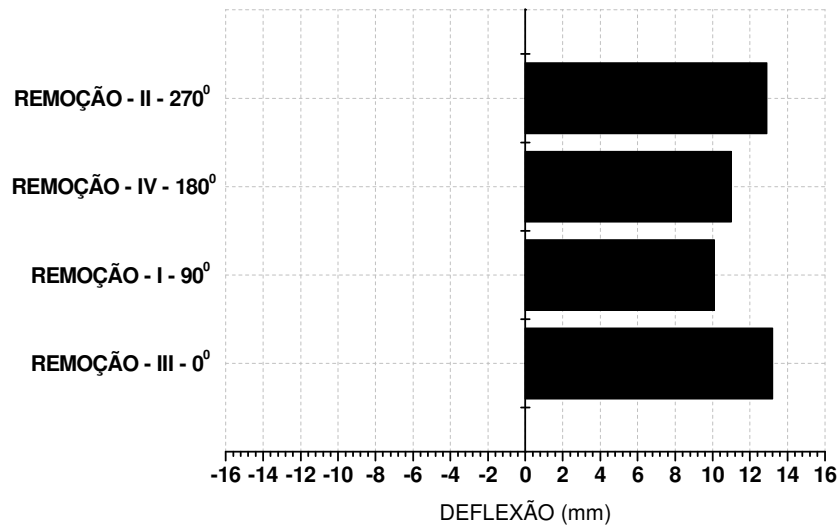


Figura 8 - Deflexões apresentadas pela barra após a trefilação.

Na Figura 8 observa-se o comportamento apresentado pela barra trefilada, o comportamento na superfície (remoções 1 a 4) é trativo e com uma alta deflexão após os ensaios. Apresentando a maior deflexão comparando-se todas etapas de

processamento do material. Este comportamento (trativo) também foi demonstrado por diversos autores.^(2,13,18-20)

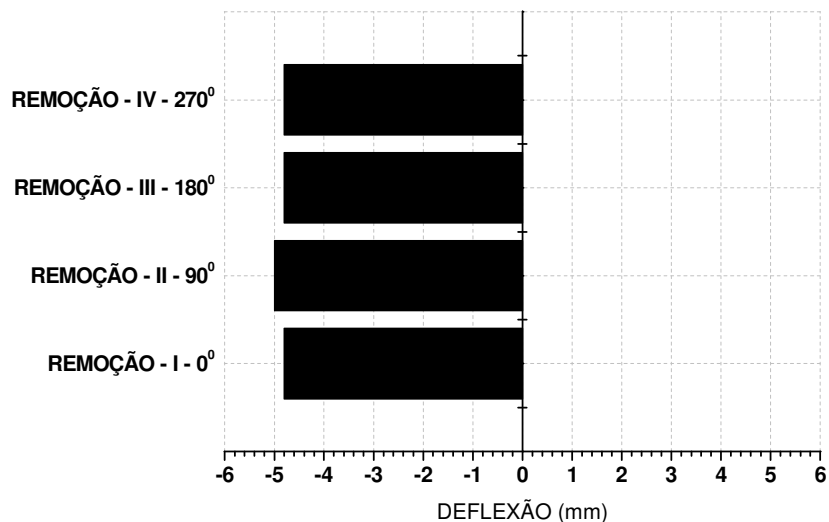


Figura 9 - Deflexões apresentadas pela barra após o endireitamento por rolos cruzados (“PERC” 16°).

Na Figura 9 observa-se os resultados para a barra endireitada e polida por rolos cruzados (“PERC”) com ângulo de 16°, as tensões residuais e deflexões na superfície da barra (remoções 1 a 4) apresentam caráter compressivo. Também observa-se que a ultima etapa de processamento do material “PERC” induz tensões mais homogêneas ao longo da posição periférica da barra polida e endireitada. Este comportamento está associado a pequena deformação superficial induzida pelos rolos de endireitamento e polimento. Um aspecto positivo desta homogeneidade de tensões ao longo da periferia da barra está associado a minimização de distorções de forma em etapas subsequentes de processamento do material, como por exemplo, tratamentos térmicos.^(8,9)

Na Figura 10 observa-se as tensões residuais e deflexões para a barra endireitada e polida por rolos cruzados (“PERC” com ângulo de 17°) na superfície da barra apresentam caráter compressivo e da mesma forma que usando-se um ângulo de 16° este não apresenta variações significativas ao longo do perímetro da barra, comparando-se os valores de deflexão obtidos nos ensaios usando-se um ângulo de 17° e 16° nota-se que o ângulo de 16° induz tensões mais compressivas na superfície e também observa-se que um ângulo de endireitamento e polimento de 17° induz tensões residuais mais homogêneas ao longo do perímetro da barra.

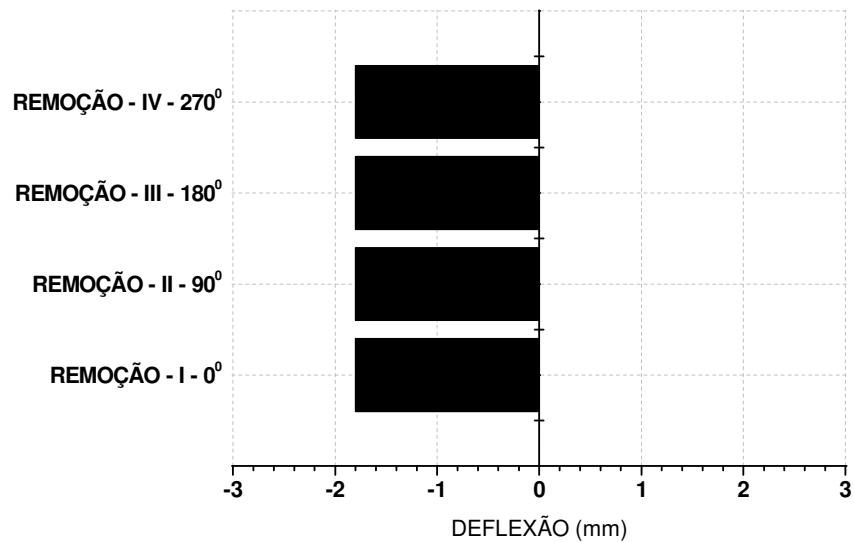


Figura 10 - Deflexões apresentadas pela barra após o endireitamento por rolos cruzados (“PERC” 17°).

Na Figura 11 observa-se o comportamento apresentado pela barra com ângulo de endireitamento e polimento por rolos cruzados (“PERC”) com ângulo de 18°, da mesma forma que os resultados de ângulos diferentes para esta etapa do processo, o comportamento é compressivo na superfície. Comparando-se os resultados apresentados pelo ângulo de “PERC” 18° com o ângulo de “PERC” 16° nota-se um nível menos compressivo na superfície da barra, comportamento similar ao apresentado utilizando-se um ângulo de 17°, porém a homogeneidade de tensões ao longo do perímetro da barra.

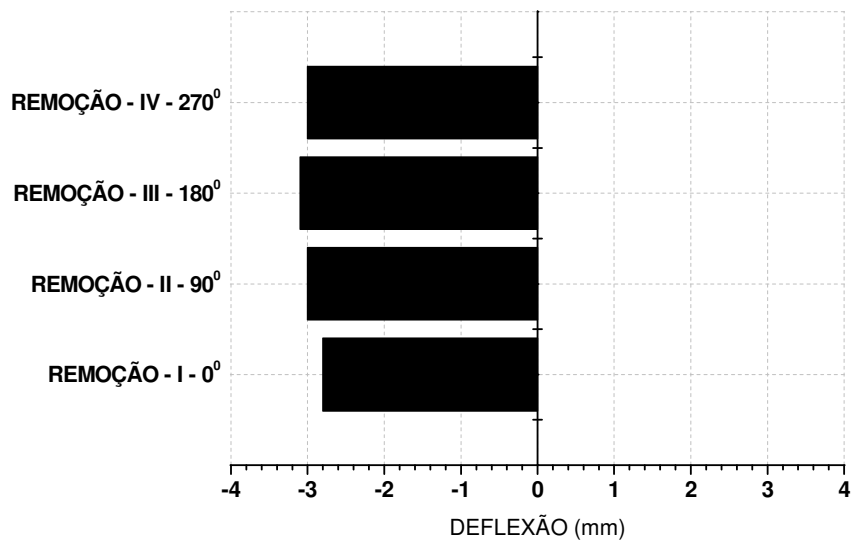


Figura 11 - Deflexões apresentadas pela barra após o endireitamento por rolos cruzados (“PERC” 18°).

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:

- o pré-endireitamento induz diferenças no comportamento de tensões residuais em relação a posição periférica do fio-máquina. Considerando $\frac{1}{2} \varnothing$ do fio-máquina as tensões são trativas e o nível é baixo comparando-se com as tensões residuais superficiais.
- o jateamento induz tensões fortemente compressivas na superfície do fio-máquina, e não há uma homogeneidade em relação a posição periférica do fio-máquina o que corresponderia ao efeito do pré-endireitamento ou de variação no equipamento de jateamento.
- após a trefilação as tensões são fortemente trativas na superfície da barra.
- independente do ângulo de “PERC” as tensões são compressivas na superfície.
- o ângulo de “PERC” de 16° induz tensões mais compressivas na superfície das barras comparando-se com os outros ângulos ensaiados.
- O ângulo de “PERC” de 17° apresenta um menor nível de tensões residuais na superfície comparando-se com os ângulos de 16° e 18° e também apresentou uma maior homogeneidade em relação as tensões.
- o ângulo de “PERC” de 18° apresentou um comportamento semelhante comparando-se com os outros ângulos de “PERC”, porém, o ângulo de “PERC” 18° induz tensões menos compressivas na superfície comparando-se com o ângulo de 16° . Por outro lado o ângulo de “PERC” 18° apresenta um comportamento mais compressivo na superfície comparando-se com o ângulo de 17° , porém menos homogêneo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FINEP, CNPq e a CAPES pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Dieter G., Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Science, 1986. p-800.
- 2 Dieter, G. E.; Kuhn H. A.; “Handbook of Workability and Process Design”, ASM International, Parks Ohio 2003. p280.
- 3 Altan, T.; “Conformação de Metais – fundamentos e aplicações”. USP, 1999, p-290.
- 4 Lange, K.; “Handbook of Metal Forming”. Society of Manufacturing Engineers. GmbH, 2006, p-1176.
- 5 Macherauch, E., Kloos, K. “Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress”. Residual Stress em: Science and Technology, Vol. 1, p 3–27, Alemanha 1987.
- 6 Withers, P., Bhadeshia, K. “Residual Stress, Part 1...” Material Science and Technology, Vol. 17, 2001, p 355–365.
- 7 Hauk, V. “Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods...” ELSEVIER, 1997 p654.
- 8 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

- 9 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.
- 10 Lu, J. "Handbook of Measurement of Residual Stresses". SEM, Inc. 1996. p-238.
- 11 Walton H. W., Deflection Methods Chapter, Handbook of Measurement of Residual Stress, G. E. Totten, 2002 pg. 89-98;
- 12 Lodini, A. "Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation". Taylor & Francis, 2003, p368.
- 13 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.
- 14 Nunes, R. M.; M. Metz ; T. K. Hirsch; 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.
- 15 Kennedy D.M., Vahey J., Hanney D., Micro shot blasting of machine tools for improving surface finish and reducing cutting forces in manufacturing. Materials and Design 26, 2005 p203–208.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 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.
- 19 Wang Z., Gong B., Residual Stress in the Forming of Materials. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, 2002.
- 20 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