



ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS SUPERFICIAIS VIA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DURANTE O PROCESSO DE TREFILAÇÃO COMBINADA DE BARRAS DE AÇO AISI 1045¹

Rafael Menezes Nunes²
Alexandre da Silva Rocha³
Thomas Hirsch⁴

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 tensões residuais superficiais em barras de aço AISI 1045 trefiladas. A medição de tensões residuais superficiais 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 com ângulos de fieira de 15° e 20°, endireitamento e polimento por rolos cruzados (“PERC”) com 16° e 18°. A partir dos valores de deformações obtidos foi calculado o nível de tensões residuais longitudinais para cada posição periférica analisada, determinando se o nível e o comportamento apresentado é trativo ou compressivo.

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

EVALUATION OF SURFACE RESIDUAL STRESSES VIA X-RAY 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 of distortions, like bending and dimensional changes in mechanical components during the manufacturing process. This work accomplished an evaluation of the surface residual stresses from bars of AISI1045. The samples were removed from five steps of a combined cold-drawing process: pre-straightening, shot-blasting, cold-drawing with 15° and 20°, straightening and polishing by crossed rolls (“PERC”) with 16° and 18°. Starting from obtained deformation values the level of surface longitudinal residual stresses for each accomplished point was estimated.

Key words: Cold-drawing; Residual stress; X-ray 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 Priv Doz. Dr. Ing., IWT – Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik – Bremen - Germany

1 INTRODUÇÃO

O controle de qualidade durante os processos de manufatura de componentes mecânicos é de grande importância para a obtenção de um produto final com as características desejadas. Um dos principais problemas enfrentados pela indústria metal-mecânica são os desvios de forma e dimensão de componentes durante os processos de manufatura (denominados de distorção). Estas distorções estão associadas ao nível e distribuição das tensões residuais no componente fabricado. A medição, controle ou monitoramento de tensões residuais durante toda rota de processamento do material é de vital importância para assegurar que os desvios de forma e dimensão estejam dentro das tolerâncias previstas no projeto de engenharia em etapas subseqüentes de processamento do material.

Tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sólido sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos.⁽¹⁾ Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos é zero.^(2,3) O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é a própria tensão verdadeira de escoamento do material,⁽⁴⁾ que por sua vez é função da deformação, taxa de deformação, temperatura e microestrutura.

Existem várias técnicas de medição de tensões residuais, cada uma apresentando suas vantagens e limitações.⁽¹⁾ A determinação das tensões residuais em um componente muitas vezes pode ser realizada com a utilização de mais de uma técnica de medição. Desta forma, utilizam-se duas ou mais técnicas conforme as características do componente que será medido. Segundo Lu,⁽⁴⁾ os principais parâmetros que devem ser levados em conta na escolha da técnica de medição são: a natureza do componente, tipo de tensões residuais, gradiente de tensões residuais, geometria do componente e o custo final da medição.

Neste trabalho objetivou-se comparar as técnicas de difração de raios-x e hole-drilling para a medição de tensões residuais em barras cilíndricas de aço AISI 1045. A produção de barras cilíndricas do aço AISI 1045 atendendo determinados requisitos de resistência mecânica e geometria pode ser feita a partir de rolos de fio-máquina, que são endireitados e trefilados num processo conhecido como trefilação combinada.

O fio máquina é obtido em um processo de laminação a quente, após o fio-máquina é bobinado em rolos e estocado. Antes do processo de trefilação o fio-máquina é decapado com solução ácida para remoção de carepa e posteriormente neutralizada com solução alcalina. O processo de manufatura inicia pelo pré-endireitamento do fio-máquina que é fornecido em bobinas, sem este pré-endireitamento o processo de trefilação ficaria inviável. A próxima etapa é o jateamento, que tem como objetivos a remoção de carepas provenientes do processo de laminação e conseqüentemente a limpeza da superfície. Após o jateamento é feita a trefilação e em seguida a operação de corte da barra (6 metros). Após o corte, ainda são necessários um polimento e endireitamento final, conhecido como "PERC".

Esse processo impõe deformações plásticas ao material que induzem distribuições de tensões residuais, as quais se alteram durante as diferentes etapas do processo. Este artigo apresenta uma comparação das medidas obtidas utilizando-se as duas técnicas de medição de tensões residuais para barras cilíndricas produzidas pelo processo de trefilação combinada.⁽⁵⁻⁸⁾

Um aspecto importante associado às tensões residuais é a distorção, que em barras longas se manifesta principalmente por um empenamento. Em etapas subseqüentes

de manufatura, tais como tratamentos térmicos e operações de usinagem, as tensões residuais vão sofrendo redistribuições durante toda a rota de fabricação. As tensões residuais podem ser aliviadas (ou intensificadas) em etapas subseqüentes de processamento do material, fora da usina, tais como, usinagem e tratamentos térmicos, resultando em distorções indesejadas.⁽⁹⁻¹³⁾

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.^(14,15) 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.⁽¹¹⁾ 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.

Asakawa demonstrou que os parâmetros do processo de trefilação, tais como, coeficiente de atrito, geometria da fieira, velocidade de trefilação, grau de redução afetam diretamente a qualidade do produto trefilado, em especial tensões residuais longitudinais (axiais) podem afetar o componente por uma mudança nas dimensões ou ainda empenamentos em etapas subseqüentes de processamento, por exemplo, tratamentos térmicos ou usinagem.⁽⁵⁾

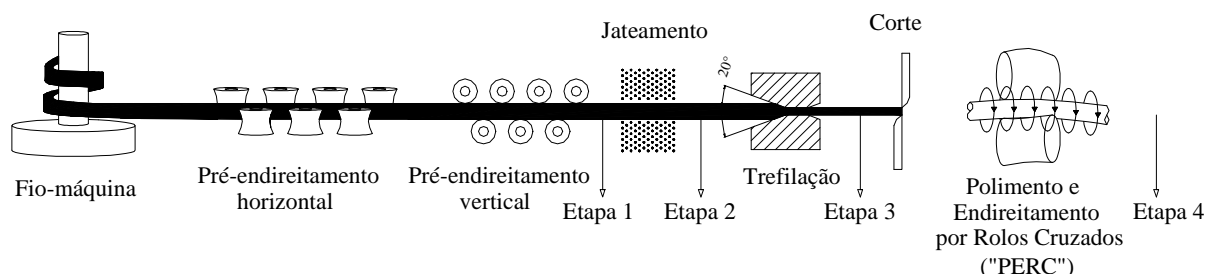


Figura 1 - Principais etapas do processo de trefilação combinada.

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,^(11,12) conforme mostrado na Figura 2. A marcação também levou em conta o ângulo e o sentido com que a barra é processada conforme a Figura 3.

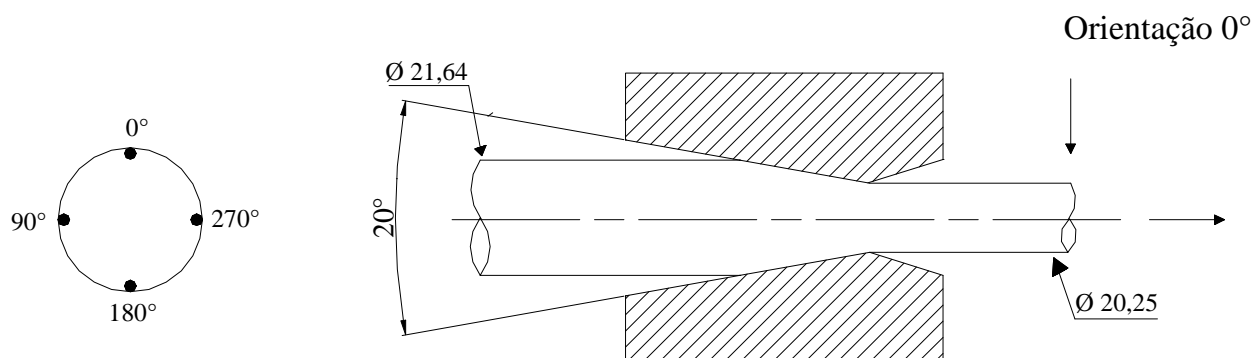


Figura 2 - Sistema de marcação das amostras, orientação na amostra e vista lateral da fieira.

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

- Pré-endireitada;
- Jateada;
- Trefilada com ângulo de 15° e 20° e 15° com revestimento superficial Balinit B®; e
- Endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 16° e 18°.

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

Tabela 1 - Composição Química do aço AISI 1045

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

As barras foram medidas utilizando difratômetros ψ (modo de inclinação lateral) equipados com tubos de raios-X de Cr-K α com abertura primária de 1mm de diâmetro. As linhas de difração {211} do ferro- α foram registradas para 11 ângulos de inclinação na faixa de $45^\circ < \psi < -45^\circ$. As tensões residuais foram calculadas usando o método de $\sin^2 \psi$ com $E = 210000 \text{ MPa}$ e $\nu = 0.28$.^(4,16)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Tensões Residuais Superficiais no Fio-Máquina

Na Figura 3 são mostradas as tensões residuais superficiais do fio-máquina medidas via difração de raios-X. Observa-se um nível de tensões residuais compressivos. Também nota-se a presença de variações do nível de tensões residuais apresentados ao longo do perímetro do fio-máquina. Estas variações nos níveis de tensões residuais estão relacionadas à curvatura do rolo do fio-máquina e também a diferenças de perda de temperatura durante o resfriamento na etapa de fabricação do fio-máquina, laminação a quente.

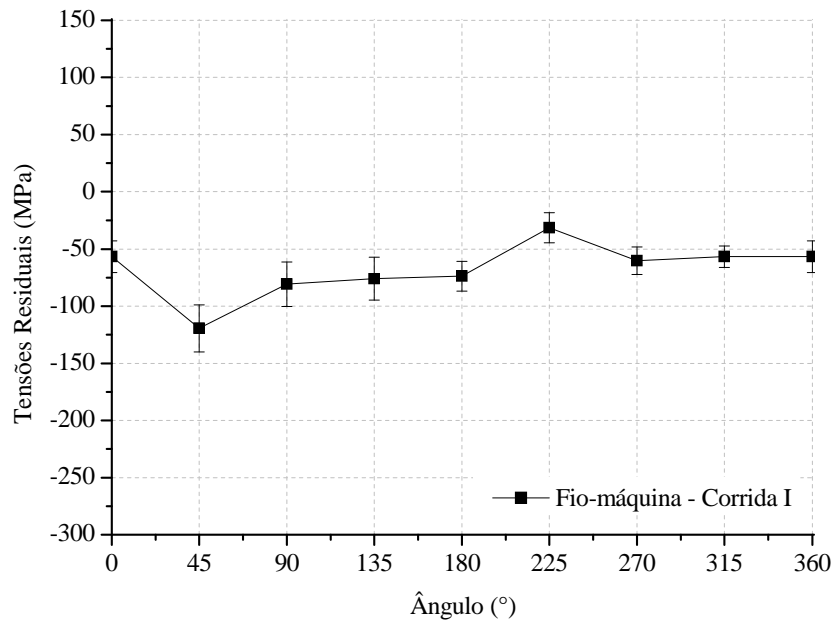


Figura 3 - Tensões residuais longitudinais superficiais no fio-máquina.

3.2 Tensões Residuais Superficiais após o Pré-endireitamento

Na Figura 4 são apresentadas as tensões residuais longitudinais no fio-máquina pré-endireitado caracterizado por difração de raios-X. Observa-se uma comparação de tensões residuais superficiais para o fio-máquina pré-endireitado quatro corridas distintas. O comportamento de tensões residuais apresentado durante o pré-endireitamento varia de compressivo a trativo, dependendo da posição periférica analisada. Este comportamento pode ser explicado por diferentes momentos aplicados durante o pré-endireitamento do fio-máquina. Estas diferentes carregamentos durante o endireitamento são necessários para eliminar a curvatura inicial do fio-máquina, pois este é armazenado em bobinas.

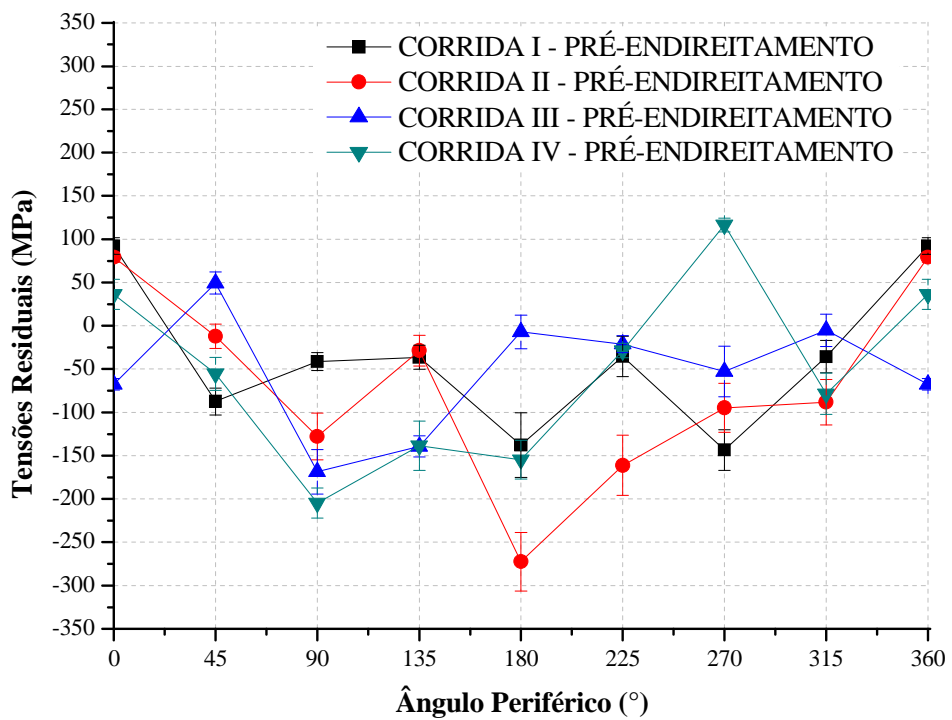


Figura 4 - Tensões residuais superficiais, Pré-endireitamento.

3.3 Tensões Residuais Superficiais após o Jateamento por Granalhas

São apresentadas na Figura 5 as tensões residuais superficiais do fio-máquina jateado caracterizado pelo método de difração de raios-X. Observa-se um nível de tensões residuais compressivos ao longo da periferia do fio-máquina com pequenas variações ao longo da posição periférica. Estas pequenas diferenças estão associadas a variações na pressão do jato durante o jateamento.⁽¹⁷⁾ Também pode-se associar estas diferenças a alterações induzidas anteriormente na etapa de pré-endireitamento que não foram totalmente eliminadas, pois a deformação plástica superficial induzida durante o jateamento não foi suficiente para eliminar estas diferenças.

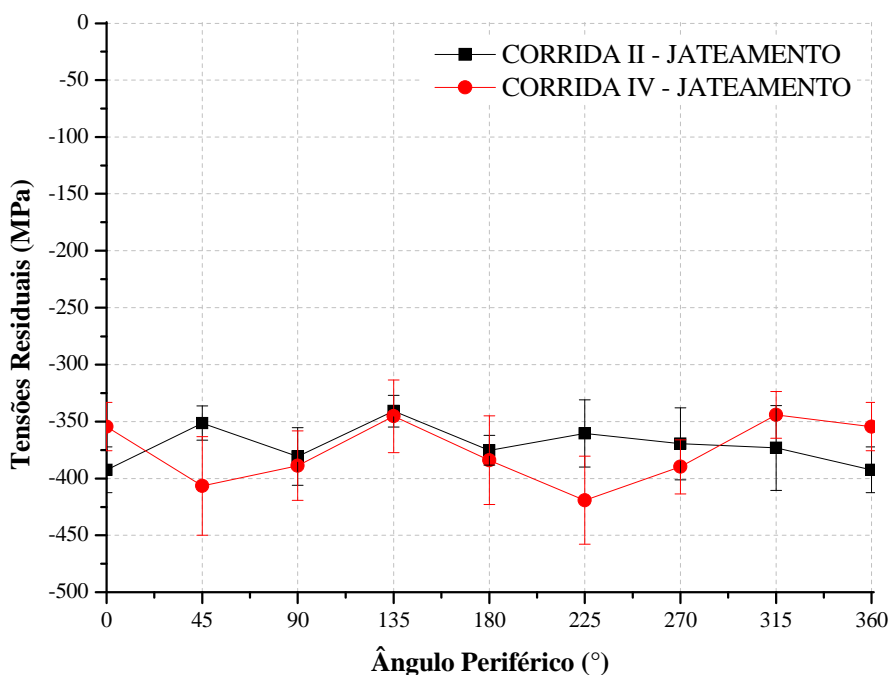


Figura 5 - Tensões residuais superficiais, Jateamento por granalhas.

3.4 Tensões Residuais Superficiais após a Trefilação

Na Figura 6 são mostrados os valores de tensões residuais superficiais caracterizados pelo método de difração de raios-X na barra trefilada utilizando-se um ângulo de fieira de 15° em três corridas distintas. Observa-se um nível de tensões residuais trativos ou próximos a zero ao longo das posições periféricas das barras trefiladas, independente da corrida, este comportamento já foi verificado por diversos autores.^(13,18- 20)

Também observa-se uma variação significativa de tensões ao longo da posição periférica das barras, este fator está associado a vários fatores de processo, tais como, variação de resistência mecânica do fio-máquina, erro de forma da matéria-prima, trepidações do maquinário e pré-endireitamento não satisfatório.

Na Figura 7 são apresentados os níveis de tensões residuais para a barra trefilada utilizando-se um ângulo de ferramenta de 20° para quatro corridas distintas.

Observa-se níveis de tensões residuais trativos com valores próximos a 450 MPa na posição periférica de 45° para a corrida IV, ou próximos a zero para a corrida III na posição periférica de 45°.

Observa-se também que a utilização de outro ângulo de fieira não altera de forma significativa o comportamento das tensões residuais superficiais ao longo do ângulo periférico da barra, pois da mesma forma apresentada pelo ângulo de fieira de 15° observou-se uma grande variação ao longo da posição periférica. Um aspecto importante a ser observado é a variação de tensões residuais ao longo do perímetro para uma mesma amostra, nota-se na corrida III que há diferenças de 350 MPa no nível de tensões residuais superficiais ao longo do perímetro da amostra. Por outro lado, observa-se na corrida I que as diferenças nos níveis de tensões residuais superficiais ao longo do perímetro da amostra são muito baixos, aproximadamente 25 MPa, o que está dentro da faixa de incerteza de medição. O fato de uma corrida apresentar diferenças elevadas e outra corrida não apresentar diferenças significativas pode estar relacionado ao nível de pré-endireitamento prévio do



material, pois um fio-máquina que apresenta um bom endireitamento teoricamente apresentará na etapa de trefilação esforços mais homogêneos.

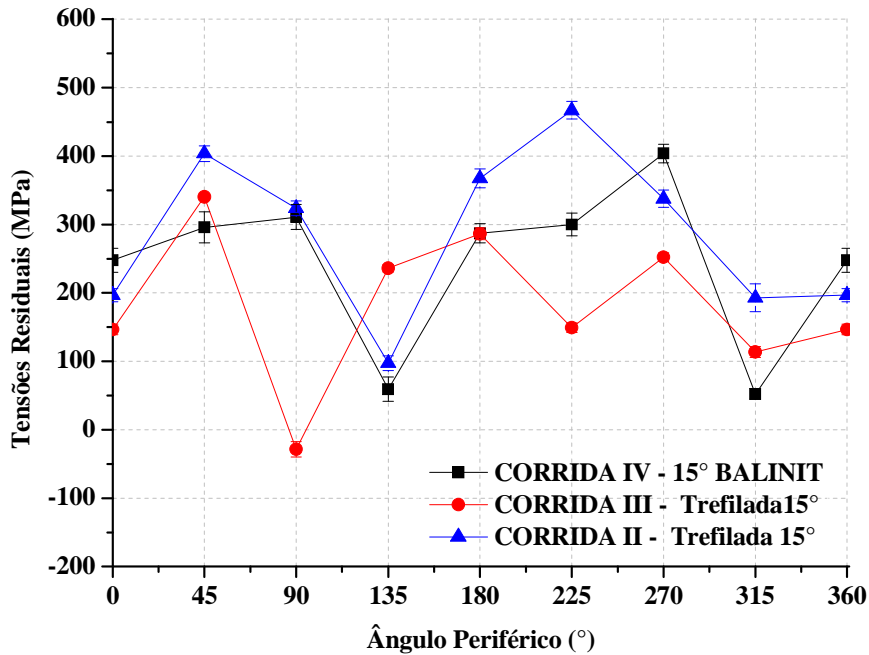


Figura 6 - Tensões residuais superficiais, trefilação com fieira de 15°.

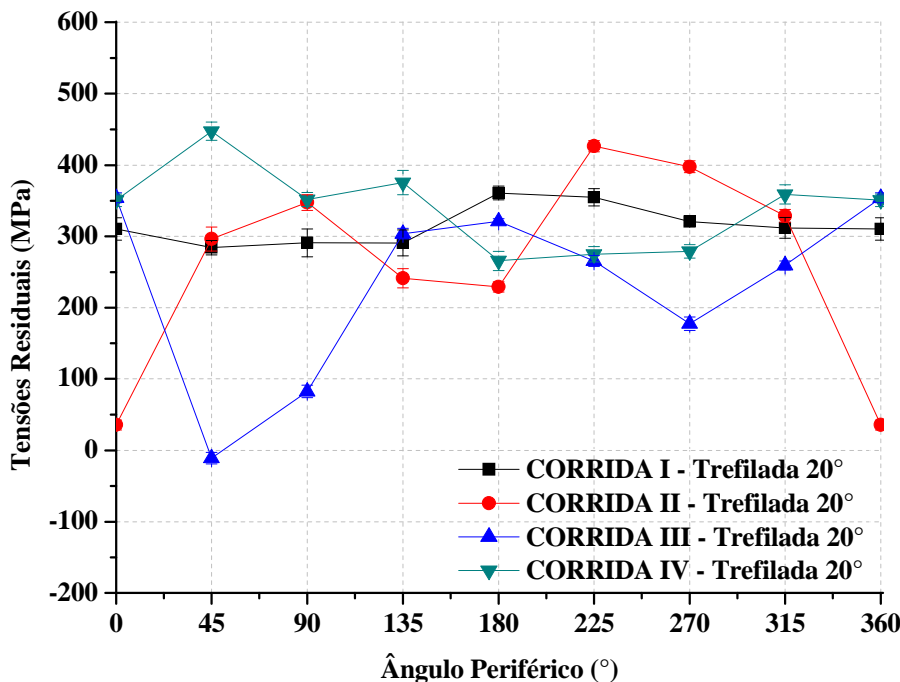


Figura 7 - Tensões residuais superficiais, trefilação com ângulo de fieira de 20°.

3.5 Tensões Residuais Superficiais após o Polimento e Endireitamento por Rolos Sruzados (“PERC”)

Na Figura 8 são apresentadas as tensões residuais superficiais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 16° e ângulo de fieira de 15°. Observa-se que as tensões residuais superficiais tem caráter compressivo com

valores próximos a -250 MPa, nota-se também que há pouca variação no nível de tensões residuais em relação a posição periférica para a corrida III e para a corrida IV há uma pequena variação na posição 180°. Outro aspecto importante que pode-se verificar é a relação entre a utilização de um revestimento superficial na ferramenta da etapa anterior do processo (fieira) e as tensões residuais na etapa posterior. Verifica-se pela comparação entre as tensões residuais superficiais entre as duas corridas que não há influência entre a utilização do revestimento da etapa anterior do processo e as tensões residuais superficiais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados, este fato está relacionado com as deformações plásticas superficiais causadas pelos rolos de polimento e endireitamento.⁽²¹⁾

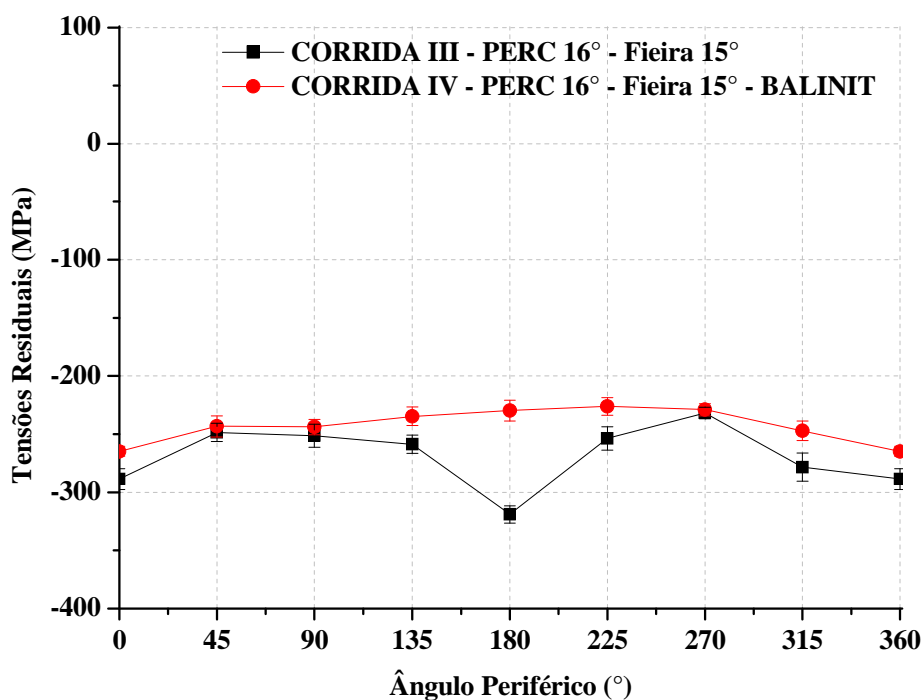


Figura 8 - Tensões residuais superficiais, “PERC” 16 ° com ângulo de fieira de 15°.

Na Figura 9 são mostradas as tensões residuais superficiais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados utilizando-se um ângulo de 16° e utilizando-se o ângulo de fieira de 20°, observa-se que as tensões residuais são compressivas com valores próximos a -250 MPa. Comparando-se os valores obtidos utilizando-se um ângulo de fieira de 15° com o ângulo de 20°, observa-se que o ângulo de fieira exerce pouca influência nas tensões superficiais utilizando-se um ângulo de PERC de 16 °.

Na Figura 10 são mostradas as tensões residuais superficiais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 18° e um ângulo de fieira de 20°. Observa-se que as tensões residuais superficiais são compressivas e apresentam um comportamento semelhante comparando-se com um ângulo de “PERC” de 16°. Comparando-se duas corridas I e II, observa-se que há uma maior variação entre as duas corridas sendo -200 MPa valor médio da corrida I e -300 MPa para a corrida II. Este fato está relacionado à variação de ângulo de polimento, pois utilizando um ângulo maior a área de contato entre a barra a ser polida e o rolo de polimento é menor, assim as tensões superficiais da etapa anterior (trefilação) não são totalmente homogêneas na etapa de polimento.

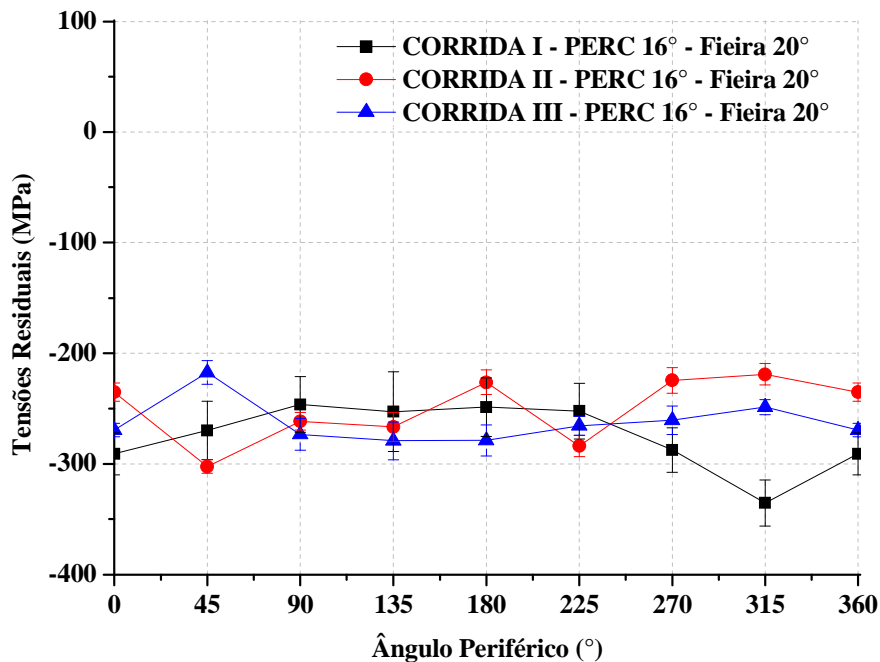


Figura 9 - Tensões residuais superficiais, “PERC” 16 ° com ângulo de feira de 20°.

Comparando-se um ângulo de “PERC” de 16° com um ângulo de “PERC” de 18°, Figura 9 e Figura 10, observa-se que o ângulo de 16° induz tensões residuais superficiais mais homogêneas independente do ângulo de feira utilizado o que não ocorre no ângulo de “PERC” de 18°, pois há diferenças significativas nos níveis de tensões residuais comparando-se duas corridas distintas e mesmos parâmetros de processo.

Na Figura 11 são apresentadas as tensões residuais superficiais medidas por difração de raios-X após a etapa de polimento e endireitamento por rolos cruzados (“PERC”) utilizando-se um ângulo de feira de 15°, etapa anterior ao “PERC”. Observa-se que o nível de tensões residuais superficiais apresenta-se compressivo para as duas corridas analisadas. Analisando-se a corrida IV onde utilizou-se uma ferramenta na etapa anterior (trefilação) com revestimento, observa-se que o nível de tensões residuais e o comportamento em relação a posição periférica na amostra é muito semelhante comparando-se com a corrida III. Este fato deve-se ao processo em si, pois no polimento há um grande contato entre a superfície do rolo de polimento (rolo côncavo) e a barra trefilada, e isto altera os níveis de tensões residuais superficiais por efeito de atrito e contato entre as superfícies, alterando os níveis da etapa anterior de trefilação.

Outro fator importante que altera as tensões residuais superficiais é a deformação plástica superficial que ocorre durante o endireitamento da barra,⁽²⁰⁾ esta deformação é a principal responsável pela mudança do nível de tensões residuais superficiais. As barras ao passar por estes rolos de endireitamento sofrem uma pequena deformação superficial, induzida pelo rolo convexo, que induz tensões residuais compressivas em sua superfície, e este nível de tensões residuais compressivas induzidos pode mudar o comportamento do nível de tensões residuais presentes nas barras trefiladas, passando de trativo na superfície para compressivo dependendo do ângulo com que estão posicionados estes rolos.^(14,15)

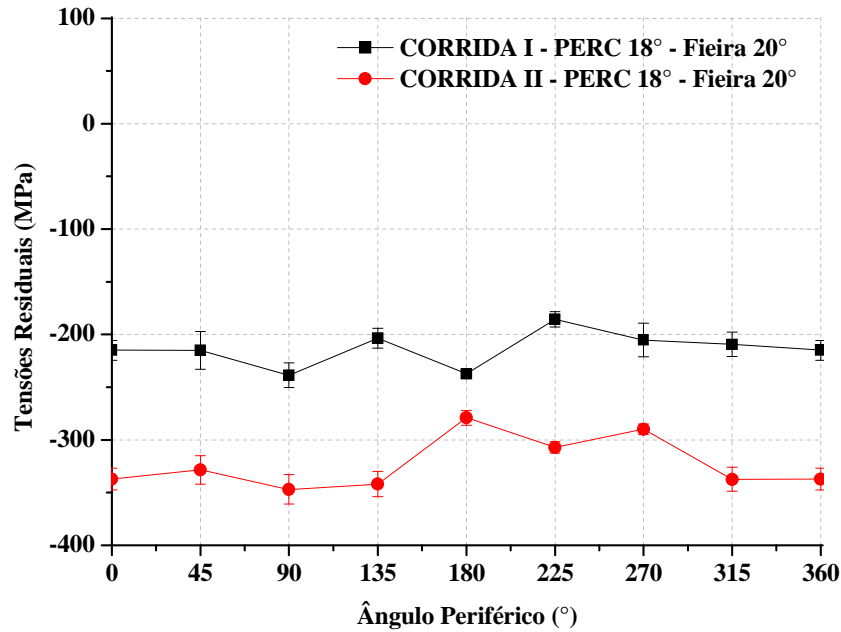


Figura 10 - Tensões residuais superficiais, “PERC” 18° com ângulo de fieira de 20°.

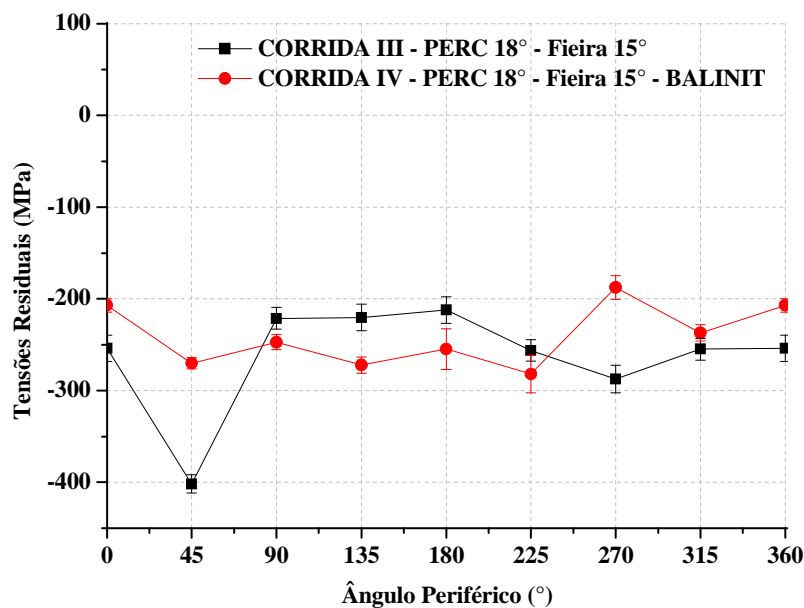


Figura 11 - Tensões residuais superficiais, “PERC” 18° com ângulo de fieira de 15°.

4 CONCLUSÕES

Após os ensaios conclui-se:

- o pré-endireitamento induz diferenças no comportamento de tensões residuais em relação a posição periférica do fio-máquina;
- 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 quê 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; e
- 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 mais heterogêneas na superfície comparando-se com o ângulo de 16°.

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 projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 Macherauch, E., Kloos, K. “Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress”. *Residual Stress em: Science and Technology*, Vol. 1, p 3–27, Alemanha 1987.
- 3 Metz M., Santos C., Rocha A. S., Análise Qualitativa Das Tensões Residuais Longitudinais Em Barras Trefiladas De Aço Sae 1045 Através Do Método Slliting. 8º Congresso Iberoamericano De Engenharia Mecânica. Cusco, 2007. p-1213.
- 4 Lu, J. “Handbook of Measurement of Residual Stresses”. SEM, Inc. 1996. p-238.
- 5 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
- 6 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.
- 7 Dieter G., *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill Science, 1986. p-800.
- 8 Dieter, G. E.; Kuhn H. A.; “Handbook of Workability and Process Design”, ASM International, Parks Ohio 2003. p280.
- 9 Lange, K.; “Handbook of Metal Forming”. Society of Manufacturing Engineers. Gmbh, 2006, p-1176.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Walton H. W., Deflection Methods Chapter, *Handbook of Measurement of Residual Stress*, G. E. Totten, 2002 pg. 89-98;
- 13 Wang Z., Gong B., *Residual Stress in the Forming of Materials*. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, 2002.
- 14 Altan, T.; “Conformação de Metais – fundamentos e aplicações”. USP, 1999, p-290.
- 15 Lodini, A. “Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation”. Taylor & Francis, 2003, p368.



- 16 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.
- 17 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.
- 18 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
- 19 Nunes, R. 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.
- 20 Withers, P., Bhadeshia, K. "Residual Stress, Part 1..." *Material Science and Technology*, Vol. 17, 2001, p 355–365.
- 21 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.