

IDENTIFICAÇÃO DE POTENCIAIS DE DISTORÇÃO EM COMPONENTES CILÍNDRICOS TEMPERADOS POR INDUÇÃO¹

Rafael Menezes Nunes²
Alexandre da Silva Rocha³
Thomas Hirsch⁴

Resumo

As distorções de forma de componentes mecânicos, que ocorrem durante a fabricação, constituem um sério problema enfrentado pela indústria metal-mecânica. Neste trabalho, avaliou-se uma rota de fabricação de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 envolvendo os processos de trefilação, alívio de tensões e têmpera por indução utilizando-se uma visão holística do processo. Após um estudo detalhado, variou-se 5 parâmetros do processo, sendo eles: corrida, ângulo de fieira, ângulo de endireitamento, temperatura de alívio de tensões e profundidade de camada temperada. Caracterizou-se as tensões residuais, em todas as etapas do processo, utilizando-se as técnicas de difração de raios-X, difração de nêutrons, bem como, a microestrutura do material. Após as etapas de trefilação combinada e tratamento térmico avaliou-se as distorções de forma, utilizando-se um equipamento de medição por coordenadas e posteriormente calculou-se os vetores distorção. Os dados obtidos foram analisados utilizando-se o software Minitab® através da montagem de uma matriz DoE (*Design of Experiments*). A partir dos resultados obtidos, avaliou-se quais etapas do processo induzem maior "potencial de distorção" nos componentes.

Palavras-chave: Distorção; Tratamento térmico; Tensões residuais.

DISTORTION POTENTIAL IDENTIFICATION IN INDUCTION HARDENED CYLINDRICAL COMPONENTS

Abstract

Shape distortions and bending are a serious problem in the metalworking industry, distortion due to heat treatment is responsible for additional and cost machining operations. In this study, were evaluated a fabrication route involving wire drawing, stress relieving and induction hardening processes of cylindrical ABNT 1045 steel. After a detailed study, the evaluations of 5 parameters of the process were carried out: bath, die angle, angle of straightening, stress relieving temperature and hardened layer depth. Residual stresses characterizations in all steps were carried out, using X-ray diffraction, neutron diffraction and the material microstructure. After combined drawing and heat treatment steps the shape distortions were evaluated using a coordinate measuring machine and subsequently were calculated distortion vectors. The distortion vectors were analyzed using Minitab® software by assembling an array DoE (*Design of Experiments*). From the results obtained, it was evaluated steps in the process which induce high "distortion potential" in these mechanical components.

Key words: Shape distortions; Heat treatment; Residual stress.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Dr. Eng. Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. rafael.nunes@ufrgs.br

³ Prof. Dr. Eng. do PPGEM – UFRGS e pesquisador da Escola de Engenharia da UFRGS, Brasil. alexandre.rocha@ufrgs.br;

⁴ Priv Doz. Dr. Ing., IWT – Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik – Universität Bremen, Alemanha.

1 INTRODUÇÃO

A nova realidade industrial, aliada à modernização dos processos de manufatura e à forte competitividade, para se obter um produto com baixo custo e de qualidade, exercem pressão para que sempre se busque um conhecimento profundo e detalhado das etapas envolvidas em um processo de fabricação. O conhecimento de fatores que alteram as propriedades dos produtos semiacabados durante a fabricação é o primeiro passo para a minimização de custos e para a melhoria da qualidade do produto final. A partir do controle de parâmetros de processo, pode-se obter um produto com as propriedades desejadas evitando perda de matéria-prima. Neste contexto, as distorções de forma constituem um sério problema enfrentado pela indústria metal-mecânica. Muitas vezes este tipo de problema é abordado com melhorias apenas no tratamento térmico, ou seja, o processo não é visto como um todo. O estudo das distorções de forma em aços temperados não é usual, apesar de sua importância econômica. Em um levantamento realizado por Zoch,⁽¹⁾ concluiu que na Alemanha, no ano de 2005, são gastos 850 milhões de Euros/ano apenas na correção de distorções de engrenagens de transmissão. Este custo elevado serve como motivação para a realização de pesquisas científicas na área de distorções em tratamentos térmicos.

Os tratamentos térmicos são uma etapa essencial no processo de fabricação de componentes mecânicos. De acordo com Rohde e Jeppsson⁽²⁾ não é possível fabricar um componente mecânico em sua forma final antes do tratamento térmico. Como correções ao problema distorção são requeridas altas remoções de material, por usinagem, após o tratamento térmico. Este material removido causa um aumento de custos de matéria-prima, pois são requeridas maiores espessuras de componentes para compensar a remoção de material na usinagem. Também há o aumento dos custos do componente devido à usinagem, pois a usinagem de componentes temperados tem um custo mais elevado e também é necessário um tempo maior de processamento do material, devido à dureza elevada.

A rota de estudos deste trabalho compreende os processos típicos de manufatura de eixos ou hastes de amortecedores automotivos. O processo inicia na usina siderúrgica com a produção do fio-máquina, neste processo de produção são feitas operações de fusão da sucata, refino, lingotamento contínuo e laminação a quente. O fio-máquina poderá ainda ser transformado, dentro da usina siderúrgica, em barra trefilada, para isto, é utilizado um processo de trefilação combinada.

Muitas vezes, estas distorções geradas durante o processo de fabricação precisam ser eliminadas por um novo processo de endireitamento. Este endireitamento provavelmente não será suficiente para remover todas as mudanças nas dimensões e na forma, portanto é necessária posteriormente uma retificação, aumentando os custos de produção.

Em consequência a esta usinagem, são necessárias espessuras iniciais maiores, devido à perda de material e também tratamentos térmicos superficiais mais profundos, acarretando um aumento no tempo de produção e custo de matéria-prima. Desta forma fica claro que problemas de distorção devem ser avaliados como uma propriedade de toda rota de fabricação, desde o projeto do componente e seleção dos materiais até o processo de solidificação, do processo de lingotamento contínuo até a usinagem e operações de tratamentos térmicos.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A rota analisada envolve os processos de trefilação combinada alívio de tensões e têmpera por indução, conforme indicado na Figura 1. Em geral, este tipo de rota de fabricação envolve os processos típicos de produção de eixos automotivos iniciando-se na usina siderúrgica e os processos de tratamentos térmicos aplicados e este tipo de componente mecânico.

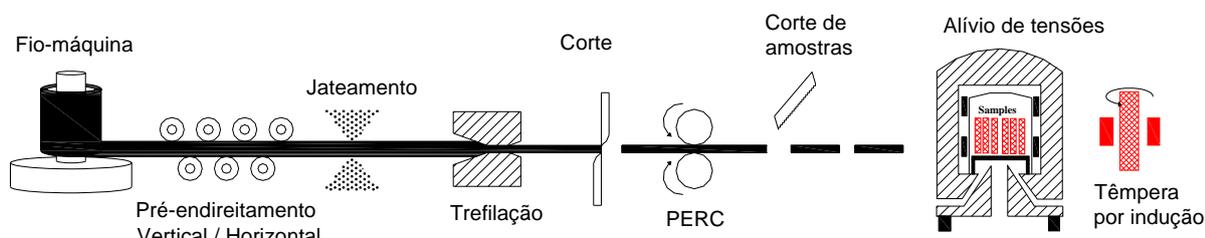


Figura 1 - Rota de processamento analisada, variações de parâmetros na trefilação, alívio de tensões e têmpera por indução.

A partir das características do processo e resultados preliminares de várias pesquisas,^(3,4) foram definidos os parâmetros de estudo e foi preparada uma matriz DoE do processo, foi utilizado o software Minitab® versão 16.0. Os principais parâmetros estudados durante a rota de fabricação de hastes temperadas por indução foram:

- Corrida; A – B
- Ângulo de fieira; 15° – 20°
- Ângulo de “PERC”; 16° – 18°
- Temperatura de alívio de tensões; 500°C – 600°C
- Têmpera por indução, profundidade de camada; 0,63 mm – 1,1 mm.

Realizaram-se análises dimensionais e de tensões residuais e da microestrutura do material, maiores detalhes podem ser vistos em Nunes.⁽⁵⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química

Objetivando-se verificar a variabilidade de composição química em cada corrida, verificou-se a composição química a cada corrida de teste. Utilizou-se um espectrômetro de emissão ótica - Spectrolab LAVMB08B, e os resultados das duas corridas analisadas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química das duas corridas analisadas, aço ABNT 1045

Corrida	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
A	0,43	0,24	0,79	0,03	0,02	0,13	0,08	0,03
B	0,44	0,23	0,66	0,03	0,03	0,09	0,05	0,01
Norma	0,43-0,5	-	0,6-0,9	Máx. 0,04	Máx. 0,05	-	-	-

Na Figura 2 é mostrada uma descrição do teor de carbono na seção transversal da amostra. A corrida A apresenta uma segregação positiva, pois há um aumento do teor de carbono no centro do material. Para a corrida B, não se consegue detectar este mesmo comportamento, parece que há uma indicação de uma segregação negativa, o que significa uma diminuição do teor de carbono local. Deve-se ficar

claro que esta é apenas uma imagem localizada de uma seção transversal ao longo do comprimento das barras de manufaturados. Na Figura 3 é mostrada uma descrição qualitativa do teor de Mn para as duas corridas analisadas. Nota-se que há diferenças significativas no teor de Mn para as duas corridas analisadas, porém não se observam diferenças significativas na distribuição de Mn ao longo do perfil transversal nas duas corridas analisadas.

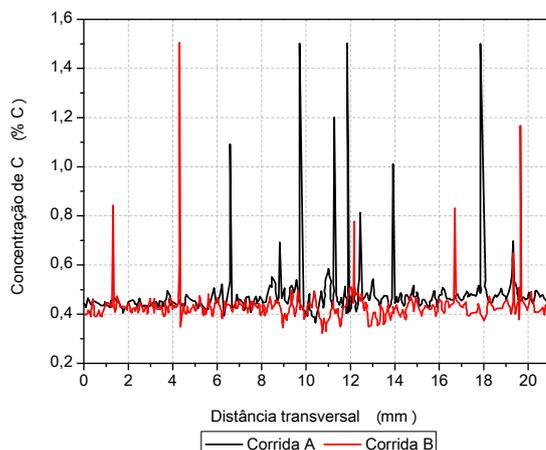


Figura 2 - Descrição quantitativa C-K α obtidos por microsonda com um feixe de 20 μ m e uma tensão de 15 KV em uma área de 1000x100 pontos, corrida A e B.

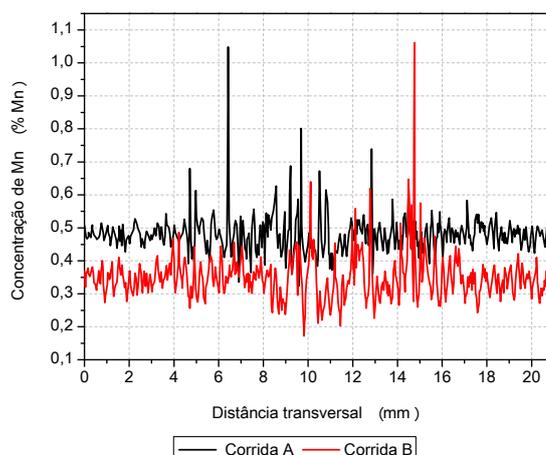


Figura 3 - Descrição quantitativa Mn-K α obtidos por microsonda com um feixe de 20 μ m e uma tensão de 15 KV em uma área de 1000x100 pontos, corrida A e B.

Nas Figuras 4 e 5 são mostradas as macrografias em corte transversal das corridas A e B, utilizou-se o reagente HCl 50% para o ataque. Observa-se uma pequena diferença de alinhamento das segregações nas duas corridas analisadas. Estas diferenças são relativas a estrutura primária do material após o lingotamento contínuo. Segundo Prinz et al.,⁽⁶⁾ estas diferenças estão relacionadas a parâmetros de extração térmica do processo de lingotamento contínuo. O processo de lingotamento contínuo gera uma zona de micro-segregação, em regiões próximas a superfície, devido à morfologia da solidificação dendrítica superposta de uma zona de macro-segregação ao longo da seção transversal. Este fato gera uma distribuição heterogênea e não simétrica de elementos químicos ao longo do perfil da barra. Esta distribuição, não simétrica, considerando-se principalmente os elementos Mn e S levará a diferenças volumétricas na transformação martensítica durante o tratamento

térmico e poderá ter como consequência um aumento do grau de distorção do componente fabricado.

As macrografias em corte transversal, das duas corridas analisadas, são apresentadas nas Figuras 6 e 7, observa-se que os alinhamentos das segregações são diferentes para as duas corridas analisadas, na corrida A o alinhamento está mais centralizado em comparação com a corrida B.

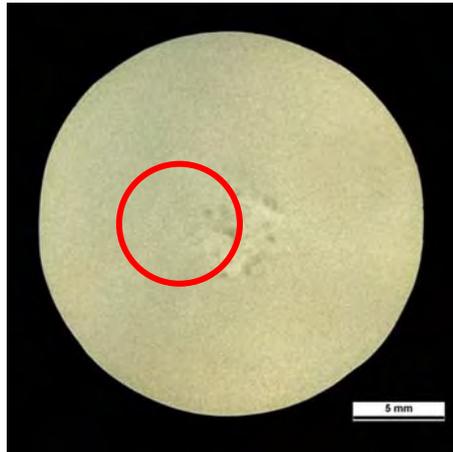


Figura 4 – Macrografia, corrida B, ataque 50% de HCl.

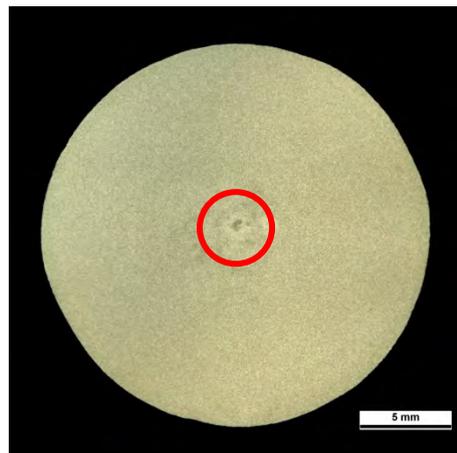


Figura 5 – Macrografia, corrida A, ataque 50% de HCl.

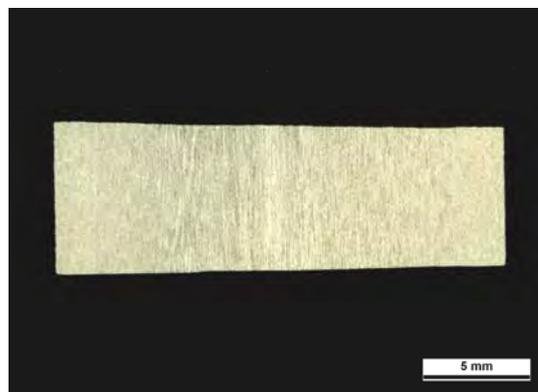


Figura 6 – Macrografia, corrida A, ataque 50% de HCl.

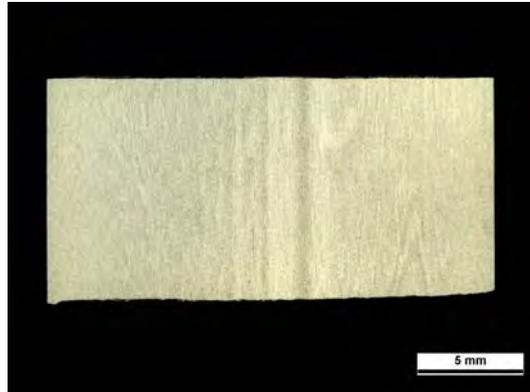


Figura 7 - Macrografia, corrida B, ataque 50% de HCl.

O perfil de tensões residuais longitudinais, “como medido”, no fio-máquina jateado é apresentado na Figura 8. Realizaram-se as medições utilizando-se a técnica de difração de nêutrons. Neste gráfico comparou-se posições simétricas de mesma profundidade em relação à superfície, esta comparação é indicada por linhas horizontais no gráfico. Nota-se claramente que há uma inclinação nas linhas de comparação, e todas estas linhas seguem o mesmo comportamento. Este comportamento indica um estado de tensões residuais causado por um processo de endireitamento, nota-se que a penetração deste endireitamento, mesmo não sendo em todo perfil da barra, gera uma redistribuição de tensões residuais até o núcleo da barra. Fica claro que o jateamento, apesar de ter causado uma distribuição homogênea de tensões residuais superficiais, não foi capaz de redistribuir as tensões residuais causadas pelas deformações impostas no pré-endireitamento. Pode-se salientar que as medições foram realizadas iniciando-se na posição periférica 0° até a posição 180° , e nestas posições há um menor grau de deformações impostas pelos rolos de pré-endireitamento. Acredita-se, desta forma, que existe uma tendência de maiores diferenças para as posições periféricas 90° - 270° , pois nestas posições há a aplicação de maiores tensões no processo de pré-endireitamento.

Na Figura 9 é apresentado o perfil de tensões residuais longitudinais após o processo de trefilação com ângulo de fiação de 15° , observa-se que as tensões residuais longitudinais são mais homogêneas das que as apresentadas para o ângulo de 20° . No ângulo de 15° há uma penetração das deformações plásticas maiores comparando-se com o ângulo de 20° . Esta maior penetração das deformações, indicada pelo parâmetro Δ ,⁽⁷⁾ resulta em uma melhor redistribuição das tensões residuais provenientes de etapas anteriores do processo.

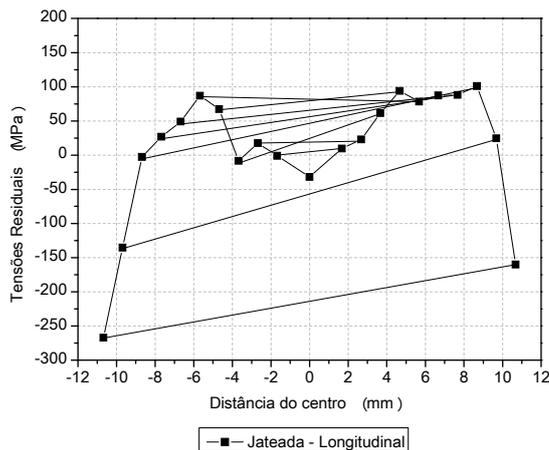


Figura 8 – Perfil de tensões residuais longitudinais no fio-máquina jateado, caracterização por difração de nêutrons, dados “como medidos”, corrida A.

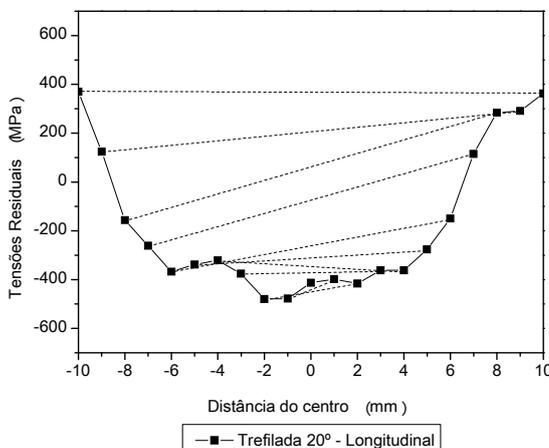


Figura 9 – Perfil de tensões residuais longitudinal para o processo de trefilação com ângulo de fieira de 15°. Corrida B.

Na Figura 10 é apresentado o perfil de tensões residuais longitudinal para uma amostra após o processo de PERC com ângulo de 16° em uma barra previamente trefilada com ângulo de fieira de 20°. Neste gráfico são apresentadas linhas, pontilhadas, de comparação dos níveis de tensões residuais em duas posições simétricas na amostra. Observa-se que as tensões residuais em regiões próximas a superfície são homogêneas, as linhas pontilhadas não apresentam uma inclinação significativa. Para regiões mais próximas ao núcleo do material, as tensões residuais apresentam diferenças significativas para as posições simétricas. Nota-se que a partir de 4 mm da superfície as tensões nas posições a direita do gráfico tem um comportamento mais trativo em relação as posições simétricas. Analisando-se o perfil de tensões longitudinais para uma amostra trefilada com ângulo de 20°, Figura 9, observa-se uma mesma tendência neste comportamento, porém as tensões residuais são mais homogêneas em regiões próximas ao núcleo da barra. Assim, pode-se afirmar que após o processo de PERC há uma interação das tensões residuais prévias do material, tensões residuais geradas no processo de trefilação, esta redistribuição de tensões residuais que ocorre no processo de PERC não elimina as heterogeneidades do processo de trefilação, considerando-se a distribuição de tensões residuais longitudinais ao longo do perfil da barra.

Na Figura 11 é apresentado o perfil de tensões residuais longitudinais para uma amostra após o processo de PERC com ângulo de 16° em uma barra previamente trefilada com ângulo de 15°. Observa-se o mesmo comportamento caracterizado utilizando-se um ângulo de fieira de 20°, as tensões em posições simétricas são mais homogêneas em regiões próximas a superfície e tornam-se mais heterogêneas em posições próximas ao núcleo do material.

Na Figura 12 são mostrados os valores de distorção para as amostras trefiladas, Corrida A, com dois ângulos de fieira, 15° e 20°. Observa-se diferenças significativas na distorção após o processo de trefilação. Após o processo de trefilação, o ângulo de fieira de 15° apresentou uma distorção maior, comparando-se com o ângulo de 20°.

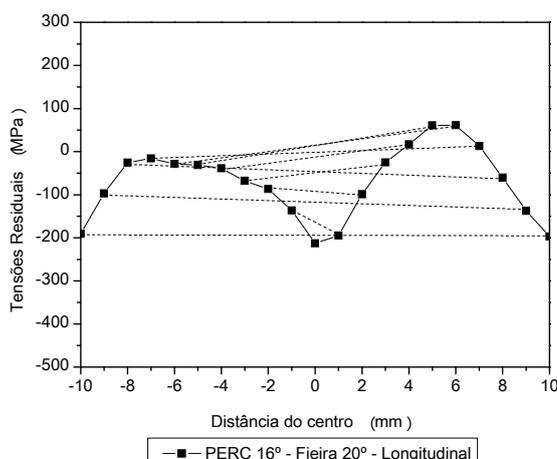


Figura 10 – Perfil de tensões residuais longitudinais para uma amostra após o processo de PERC com ângulo de 16° em uma amostra previamente trefilada com ângulo de 20°, corrida B.

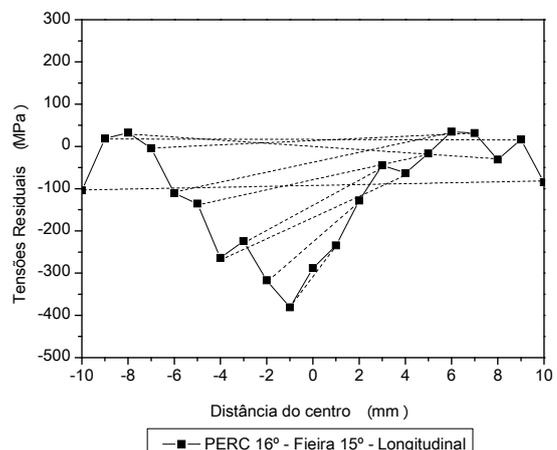


Figura 11 – Perfil de tensões residuais longitudinais para uma amostra após o processo de PERC com ângulo de 16° em uma amostra previamente trefilada com ângulo de 15°, corrida B.

Observa-se que há uma alta variação de distorção para um mesmo parâmetro de processo, por exemplo, no ângulo de fieira de 20° a amostra número 6 apresenta a menor distorção 6 µm, porém para a amostra número 5 para o mesmo ângulo de fieira a deflexão apresentada é de 110 µm, isto mostra uma alta dispersão nas deflexões após o processo de trefilação.

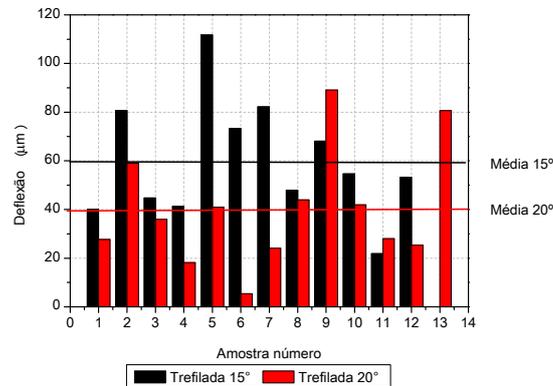


Figura 12 – Distorções medidas após a etapa de trefilação, ângulos de fieira de 15° e 20°, Corrida A.

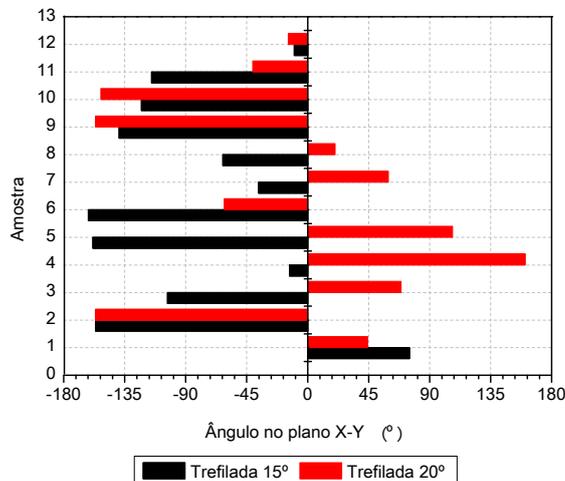


Figura 13 - Ângulos no plano X-Y das distorções após a etapa de trefilação, Corrida A.

A direção angular da distorção em relação ao plano X-Y nas amostras após o processo de trefilação é mostrada na Figura 13. A partir dos resultados obtidos nota-se que não houve uma direção preferencial para a distorção

As deflexões após o processo de PERC em barras trefiladas com ângulo de fieira de 20° são mostradas na Figura 14. A média de deflexão após o processo de PERC com barras trefiladas utilizando-se um ângulo de fieira de 20° é de 13,8 µm para um ângulo de PERC de 16° e 10,6 µm para um ângulo de PERC de 18°. Comparando-se os resultados obtidos com as deflexões da etapa anterior, nota-se que há um forte decaimento destas distorções após o processo de PERC. De fato, espera-se este comportamento após um processo de endireitamento, pois se realiza o PERC objetivando-se a minimização de distorção após a etapa de trefilação.

A Figura 15 sumariza os resultados obtidos após o processo de PERC em barras trefiladas com ângulo de fieira de 15°. Observa-se que utilizando o ângulo de fieira de 15° os valores médios de distorção após o processo de PERC são menores comprando-se com o ângulo de fieira de 20°.

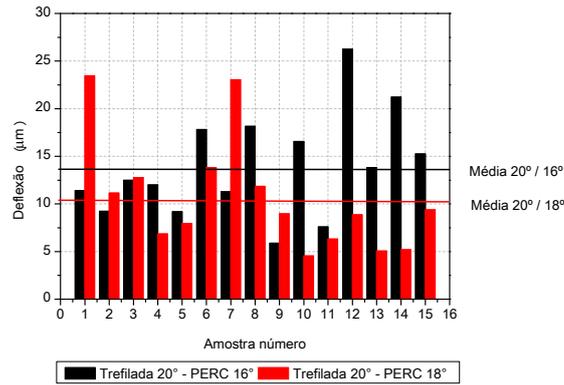


Figura 14 – Deflexão do vetor distorção para amostras após o processo de PERC com ângulos de 16° e 18°, amostras de 200 mm previamente trefiladas com ângulo de fieira de 20°.

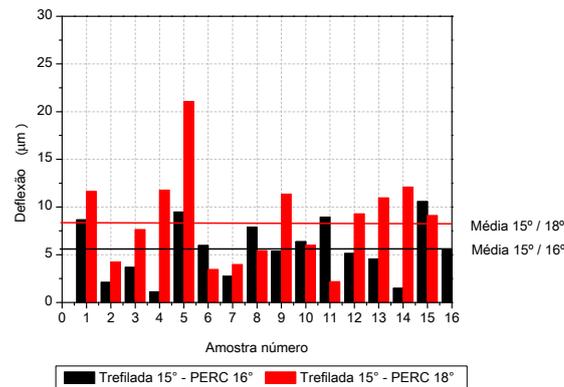


Figura 15 - Deflexão do vetor distorção para amostras após o processo de PERC com ângulos de 16° e 18°, amostras de 200 mm previamente trefiladas com ângulo de fieira de 15°.

Na Figura 16 são apresentadas as distorções médias após o processo de alívio de tensões para as barras após o processo de PERC da corrida A. Observa-se nesta figura que há uma variação significativa da distorção média conforme se varia os parâmetros de PERC e a temperatura do alívio de tensões. Para o ângulo de fieira de 15° nota-se que não há diferença significativa na distorção média após o alívio de tensões, independente do ângulo de PERC e da temperatura de alívio de tensões utilizada. Por outro lado, utilizando-se um ângulo de fieira de 20° notam-se diferenças mais significativas nas distorções entre os parâmetros de processo utilizados, temperatura de alívio de tensões e o ângulo de PERC.

A distorção média após o processo de têmpera por indução para as duas corridas analisadas, A e B, em função dos ângulos de Fieira e PERC, em relação a profundidade de camada são apresentados na Figura 17. Observa-se que há uma diferença significativa entre as duas corridas analisadas, por exemplo, utilizando-se um ângulo de fieira de 15° e um ângulo de PERC de 16°, nota-se que para a camada de 1,1 mm a diferença entre a distorção média da corrida A e B apresenta diferenças significativas, nota-se que a distorção apresentada pela corrida B é quase o dobro da apresentada pela corrida A. O mesmo comportamento pode ser notado utilizando-se o ângulo de fieira de 15° em conjunto com o ângulo de PERC de 18°. Por outro lado, utilizando-se um ângulo de fieira de 20° e um ângulo de PERC de 16° a corrida B apresenta uma menor distorção comparando-se com a corrida A. A partir dos resultados obtidos, fica claro a contribuição de cada parâmetro do processo no “potencial de distorção” após o tratamento térmico. Na corrida A, a medida que os

ângulos de ferramenta aumentam a distorção aumenta, entretanto, para a corrida B ocorre o comportamento inverso.

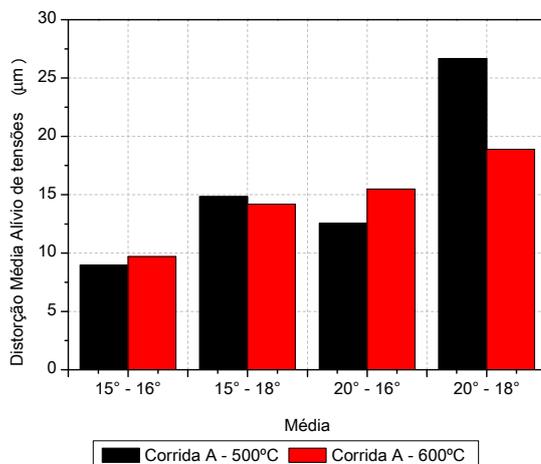


Figura 16 – Variação de distorção após o processo de alívio de tensões para a corrida A.

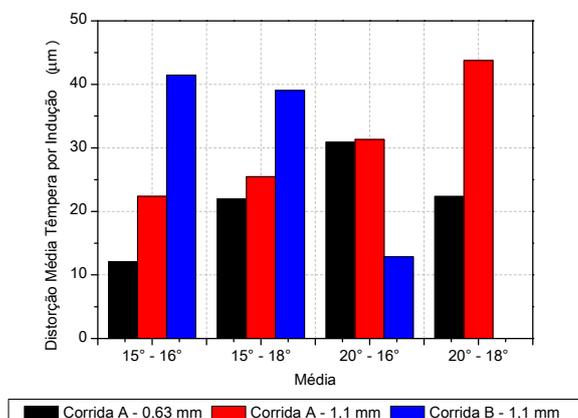


Figura 17 - Distorção média após a têmpera por indução para as duas corridas analisadas, A e B em função dos ângulos de feira e ângulo de PERC respectivamente.

A Figura 18 apresenta o gráfico de Pareto com interações de segunda ordem para os cinco parâmetros de processo analisados. Observa-se que o fator de maior significância na variável resposta distorção é a interação da corrida e do ângulo de feira. O segundo fator com significância é o ângulo de feira, o cálculo das interações de segunda ordem mostram grandes diferenças para o fator ângulo de feira, nas interações de primeira ordem o ângulo de feira mostrou-se o menos significativo entre os fatores analisados, por outro lado, nas interações de segunda ordem o fator ângulo de feira apresentou significância nos dois primeiros fatores mais significantes. Observando-se os resultados da análise estatística e comparando-se com trabalhos anteriores,⁽⁸⁻¹⁰⁾ nota-se que uma das premissas apresentadas neste trabalho é baseado no “potencial de distorção”, ou seja, em cada etapa do processo há acumulação ou liberação de um “potencial de distorção” que poderá ser aliviado em forma de distorção em etapas posteriores do processamento do material. Por isso, considera-se que a análise estatística de interações de maior ordem são as que apresentam resultados mais coerentes quando se avalia as distorções de forma. Os resultados apresentados na análise estatística confirmam os resultados na análise dimensional e principalmente na análise de tensões residuais e análise da microestrutura do material. Baseado na

análise de tensões residuais observa-se diferenças significativas entre os ângulos de fieira analisados nas corridas A e B, assim como a microestrutura do material. Essas diferenças nos níveis de tensões residuais e histórico mecânico em função do ângulo de fieira e microestrutura do material se refletem em diferentes comportamentos durante a têmpera por indução, e conseqüentemente haverá diferenças entre os ângulos de fieira e corridas analisadas. Desta forma, os resultados apresentados na análise estatística com interações de segunda ordem mostram-se coerentes com a caracterização das demais propriedades do material.

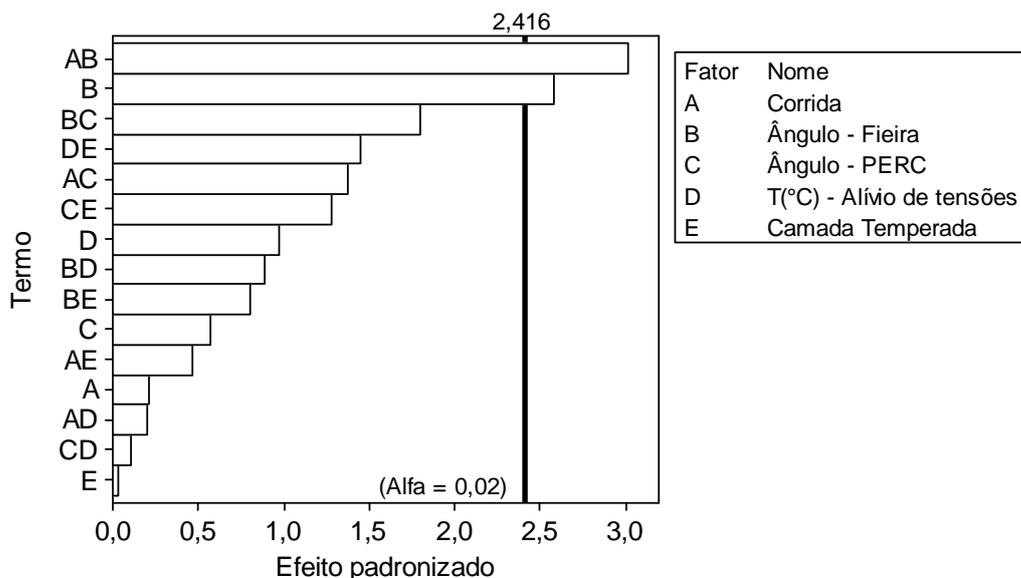


Figura 18 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, interações de 2º ordem, Corrida A e Corrida B, alfa = 0,02.

4 CONCLUSÕES

Após os ensaios conclui-se:

- A profundidade de têmpera afeta o comportamento do material em relação à distorção e quanto maior a camada temperada, maior o empenamento.
- Diferenças na distribuição de segregações e microestrutura afetam o empenamento e quanto mais alinhadas as segregações em relação ao centro, melhor o comportamento do material nas diversas etapas do processo.
- Para o processo e os ângulos de ferramenta estudados, uma combinação de ângulos de ferramentas menores, ou seja, maiores penetrações de deformações plásticas são benéficas na distribuição de tensões residuais e conseqüentemente induzem um menor “potencial de distorção”.
- O alívio de tensões diminui o “potencial de distorção” e a temperatura de 600°C foi mais benéfica em relação à distorção.
- Etapas anteriores em uma rota de fabricação induzem “potenciais de distorção” que são aliviados em etapas onde ocorrem tratamentos térmicos.
- A melhor combinação de parâmetros encontrados na rota analisada foi: ângulo de fieira de 15° e o ângulo de PERC de 16°, temperatura de alívio de tensões 600°C e camada temperada de 0,63mm.

Agradecimentos

Este trabalho é parte dos resultados da Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura – Bragecrim. Os autores agradecem a Capes, CNPq, FINEP e DFG pelo suporte financeiro para a realização deste projeto. Os autores também agradecem o Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) pelo "bean time" no difratômetro E3 sob responsabilidade do Dr. Robert Wimpory, referente às propostas MAT-01-3080, MAT-01-2995 e MAT-01-2820 para medição de tensões residuais via difração de nêutrons.

REFERÊNCIAS

- 1 Zoch H. W., Distortion engineering: vision or ready to application? Proc. 2nd Int. Conf. On Distortion Engineering IDE 2008, 17.-19. September 2008, Bremen, Germany, p. 3-12.
- 2 Rohde U, Jeppsson A. Literature review of heat treatment simulations with respect to phase transformation, residual stresses and distortion. Scand J Metall. 2000;29(2):47-62.
- 3 Rocha AD, Nunes RM, Hirsch T. Analysis by Design of Experiments of Distortion Potentials in Drawn and Induction Hardened Wire. Mater Res-Ibero-Am J. 2012;15(2):266-76.
- 4 Rocha AS, Nunes RM, Hirsch T. Changes in the axial residual stresses in AISI 1045 steel bars resulting from a combined drawing process chain. P I Mech Eng B-J Eng. 2012;226(B3):459-65.
- 5 Nunes R. M., Estudo de distorção de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada e têmpera por indução. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2012. p220. Orient. Alexandre da Silva Rocha – PPGEM – UFRGS, Co-orient. Thomas K. Hirsch – IWT – Bremen.
- 6 Prinz C, Hunkel M, Clausen B, Hoffmann F, Zoch HW. Characterization of segregations and microstructure and their influence on distortion of low alloy SAE 5120 steel. Materialwiss Werkst. 2009;40(5-6):368-73.
- 7 Totten GE, Howes MAH, Inoue T. Handbook of residual stress and deformation of steel. Materials Park, Ohio: ASM International; 2002. vii, 499 p. p.
- 8 Hoffmann F, Kessler O, Lubben T, Mayr P. "Distortion engineering" - Distortion control during the production process. Heat Treat Met-Uk. 2004;31(2):27-30.
- 9 Zoch HW. Distortion engineering – interim results after one decade research within the Collaborative Research Center Distortion Engineering – ein Zwischenbericht nach einem Jahrzehnt des Sonderforschungsbereichs. Materialwiss Werkst. 2012;43(1-2):9-15.
- 10 Frerichs F, Landek D, Lubben T, Hoffmann F, Zoch HW. Prediction of distortion of cylinders without phase transformations. Materialwiss Werkst. 2006;37(1):63-8.