

ANÁLISE DAS TRANSFORMAÇÕES NAS TENSÕES RESIDUAIS DURANTE O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE EIXOS AUTOMOTIVOS

V. W. Dias; C. A. T. Soares; J. Zottis; A. da S. Rocha.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre – RS/Brasil – Caixa postal: 15021.
vinicius.waechter@ufrgs.br

RESUMO

O conhecimento do estado de tensões residuais de um componente mecânico é essencial para diversas análises com relação ao mesmo. Somando-se a esse conhecimento, um entendimento do desenvolvimento desse estado de tensões residuais durante a rota de fabricação do componente pode se tornar muito importante no projeto de um componente mecânico. O presente trabalho visa determinar a variação do estado de tensões em eixos modelos, simulados a partir de eixos automotivos, desde o processo de trefilação combinada até o processo de retífica. Para a obtenção dos perfis de tensões residuais, utilizaram-se as técnicas de difração de raios-X e difração de nêutrons. Os resultados mostram que os efeitos do processo de retífica podem ser observados através de difração de raios-X, enquanto os efeitos do processo de têmpera por indução são melhores representados através da difração de nêutrons.

Palavras-chave: tensões residuais, difração de raios-X, difração de nêutrons.

ABSTRACT

The knowledge of residual stresses state in a mechanical component is essential for several analyzes on its functionality. Adding to this knowledge an understanding of the development of this state of residual stresses during the manufacturing route can be very important in a mechanical component design. This study aims to determine the variation of the stress state in “model-shafts”, simulated from automotive shafts, since the process of combined drawing up to the grinding process. To obtain a comprehensive residual stress profiles, it was used different techniques such as X-ray diffraction and neutron diffraction. The results show that the effects of the grinding process can be observed through X-ray diffraction, while the effect of the induction hardening process are best represented by neutron diffraction.

Key words: Residual stress; X-Ray diffraction; Neutron diffraction.

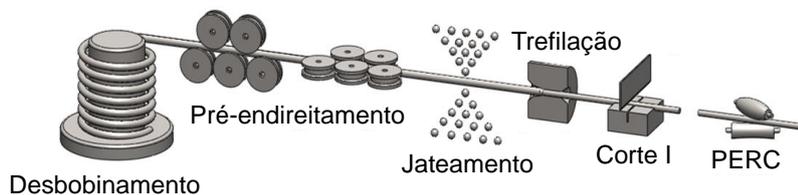
INTRODUÇÃO

A rota de fabricação de eixos automotivos é formada por processos como forjamento, trefilação, laminação, entre outros, que alteram o material tanto em sua geometria como em sua microestrutura e, conseqüentemente, sua resposta mecânica. Portanto, é de suma importância o conhecimento dos efeitos que cada processo desta rota tem no produto final, ou seja, uma visão holística da fabricação⁽¹⁾. Com essa visão, é possível diminuir perdas e gastos relacionados a distorção do produto (empenamento de eixos).

O presente trabalho insere-se no projeto de pesquisa intitulado “*Investigation and improvment of a manufacturing chain from cold drawing to induction hardening*” que visa determinar os efeitos de cada etapa, de um processo de fabricação de eixos automotivos, na distorção do produto final.

A análise do eixo tem início no processo de trefilação combinada onde o mesmo passa pelas etapas representadas na Figura 1:

Rota de Fabricação a partir do Fio- Máquina



Fabricação de um “Eixo-modelo”.

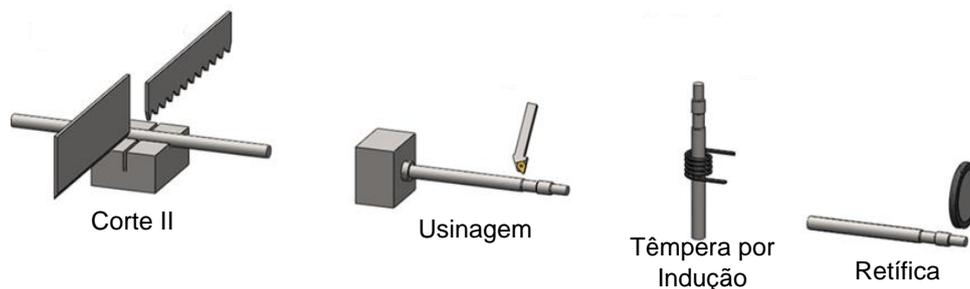


Figura 1: Ilustração do processo de fabricação utilizado.

- Desbobinamento:
Retirada do fio-máquina do rolo no qual está armazenado e levado ao equipamento do processo seguinte;
- Pré-endireitamento:

Processo no qual o fio-máquina é dobrado através de sequência de rolos horizontais e depois por sequência de rolos verticais visando um fio mais retilíneo possível;

- **Jateamento:**
Etapa na qual o material é passado por um jato de granalhas de ferro com o intuito de remover as carepas oriundas do processo de resfriamento do aço durante a fabricação da bobina;
- **Trefilação:**
Processo em que ocorre a redução do diâmetro do fio-máquina para o tamanho desejado. Garante, além da geometria desejada, um aumento em propriedades mecânicas;
- **Corte I:**
Processo no qual o fio-máquina se transforma em barras de 6 metros de comprimento;
- **Polimento e endireitamento por rolos cruzados (PERC):**
Processo em que a barra de seis metros passa por uma combinação de rolos (um côncavo e outro convexo) com o objetivo de obter um acabamento superior a barra através de um polimento e um endireitamento final;
- **Corte II:**
Segunda etapa de corte na qual o material é cortado no comprimento, aproximado, do produto final;
- **Usinagem:**
Processo onde o é gerada a geometria desejada do produto. Ocorre o faceamento para a obtenção do comprimento final do produto e a geração de entalhes necessários para o desempenho do componente;
- **Têmpera por indução:**
Tratamento térmico no qual uma camada superficial do material é endurecida com o objetivo de aumento na resistência mecânica superficial sem a perda de ductilidade no núcleo do material;
- **Retífica:**
Etapa de ajuste geométrico. Corrige as distorções do processo de fabricação.

Mackensie⁽²⁾ define a existência de mais de 200 fatores apontados como potenciais de distorção, entre eles se destacam as tensões residuais como um dos mais importantes tanto para a predição de distorções quanto para a determinação de características do produto final.

Diferentes técnicas de medições de tensões residuais proporcionam diferentes avaliações em termos de profundidade de medições, danos ao material (ensaios destrutivos e não-destrutivos), confiabilidade (precisão), entre outros. O uso combinado de diferentes técnicas de determinação de tensões residuais pode levar a uma compreensão de diferentes fenômenos ocorridos em diferentes profundidades do material estudado.

Com isso, o objetivo deste trabalho é verificar as variações no estado de tensões residuais após os processos de tratamento térmico de têmpera por

indução e de retífica para a redução de distorções em componentes mecânicos fabricados com aço AISI 1045 através do uso de diferentes técnicas de medição de tensões residuais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo insere-se em um projeto de pesquisa com o objetivo de avaliar os potenciais de distorção oriundos de diferentes etapas de um processo de fabricação de eixos automotivos, exemplificado na Figura 1. Como premissa na realização de estudos de distorção, Thoben⁽³⁾ recomenda a utilização de um sistema de referenciamento guiado. Neste caso, o referenciamento foi definido através do processo de trefilação. Utilizando-se da posição da fieira e a direção de trefilação para definir os ângulos de referência. O ângulo referencial de 0° é definido pela posição superior do material (fiomáquina) em relação a ferramenta de trefilação (fieira). Os ângulos restantes são definidos a partir da direção de trefilação, variando no sentido anti-horário com relação à direção de trefilação. A Figura 2 representa esquematicamente o referencial descrito. A determinação destes ângulos permite a comparação de efeitos em diferentes etapas do processo, permitindo observar efeitos relativos a posições específicas do processo.

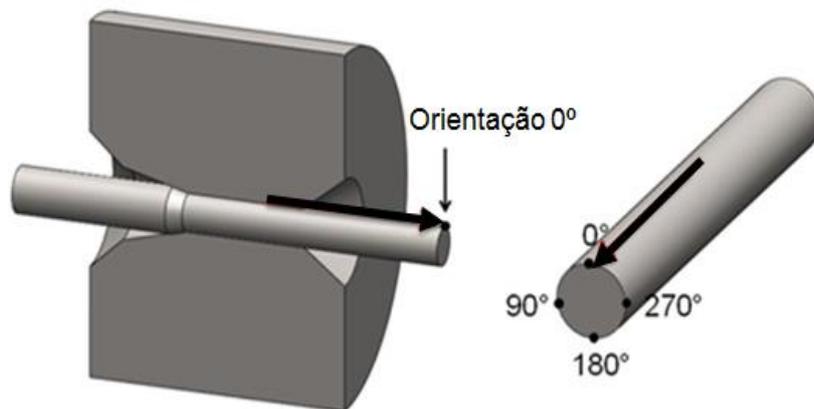


Figura 2: Sistema de referenciamento guiado com base no processo de trefilação.

Como parte da metodologia do processo de investigação de distorção, foram variados parâmetros de diferentes etapas da rota de fabricação. Entre elas o tratamento térmico de têmpera por indução e retífica. As variações escolhidas para o processo de têmpera por indução foram na camada temperada,

escolhendo-se camadas de 1,2 e 2,2 milímetros (mm). Para o processo de retífica foi variado a profundidade de remoção entre 100 e 200 μm . Para as avaliações presentes neste trabalho, foram utilizadas somente as amostras com camadas temperadas de 1,2 e 2,2 mm e a profundidade de retífica com 200 μm . Como neste trabalho será avaliada somente uma profundidade de retífica, o processo será tratado apenas por retífica, não sendo necessário se referir posteriormente a profundidade de remoção utilizada.

Para as medições das tensões residuais foram escolhidos os métodos de medição por difração de raios-X e difração de nêutrons. Tais métodos já foram amplamente explanados e discutidos na literatura⁽⁴⁾. A escolha é devido ao fato de o método de difração de raios-X medir regiões superficiais, já o método de difração de nêutrons permite medições de profundidades maiores⁽⁵⁾, permitindo a medição de um perfil de tensões bastante abrangente.

Na medição de tensões residuais por difração de raios-X, foi adotada uma estratégia de remoção de camada de material através de ataque eletrolítico de $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ com o intuito de se obter um perfil superficial (baixas profundidades). Com a remoção, foram medidos perfis em quatro ângulos de referência para as profundidades de 50, 100, 200 e 300 μm para apenas uma posição longitudinal (meio da barra) e considerando o ponto medido sem remoção como a posição zero (0 μm) de profundidade. Estas medições foram feitas para as amostras de tratamento térmico de têmpera por indução e retífica.

O ensaio de difração de nêutrons⁽⁶⁾ foi realizado no *Helmholtz-Zentrum* em Berlin (HZB), Alemanha. Foram realizados perfis ao longo de uma secção transversal nas barras selecionadas, com medições a cada milímetro (01 mm) de distância no meio da barra.

A escolha da secção avaliada foi determinada a partir de medições tridimensionais com as quais foi possível calcular o vetor de distorção, vetor criado para determinar a direção de curvatura (empenamento) das barras⁽⁵⁾. Com base neste vetor, foram determinadas as posições de medição para as amostras avaliadas. Para as amostras avaliadas através de difração de nêutrons, o ângulo para qual está direcionado o vetor distorção foi determinado

como a posição +10 mm e para o ângulo oposto a posição -10 mm. Já para as amostras avaliadas por difração de raios-X, foram medidas as posições de referência mais próximas a direção de curvatura, seu ângulo oposto e ângulos perpendiculares. A tabela 1 apresenta as amostras medidas, juntamente com a direção de seus vetores distorção e os ângulos de referência medidos.

Tabela 1: Relação de processos, métodos, direção do vetor distorção e posições de medição. Onde T representa o processo de Têmpera por indução e R o processo de Retífica com profundidade de 200 μm .

Processo	Método	Direção do Vetor Distorção	Posição de Medição
T: 1,2 mm	Raios-X	150°	45°, 135°, 225° e 315°
T: 2,2 mm	Raios-X	95°	0°, 90°, 180° e 270°
T: 2,2 mm + R	Raios-X	123°	45°, 135°, 225° e 315°
T: 2,2 mm	Nêutrons	262°	82° e 262°
T: 2,2 mm + R	Nêutrons	128°	128° e 308°

RESULTADOS

Trabalhos anteriores^(7,8) já demonstraram que as tensões residuais de maiores intensidades no caso de componentes cilíndricos são as tensões axiais. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho serão apenas sobre as tensões residuais axiais.

Os perfis de tensões residuais apresentados na Figura 3a referem-se à amostra temperada por indução com camada de 1,2 mm e medido com difração de raios-X combinada com remoção de camada. Observa-se uma leve dispersão na superfície do material. Já a partir da profundidade 50 μm esta dispersão diminui. Uma possível causa para isso é a presença de austenita retida próxima a superfície devido as altas temperaturas do processo de tempera por indução⁽⁵⁾. A análise dos valores da Largura a meia altura (L.M.A.) apresentados na Figura 3b não indica a existência de austenita retida, mas isto só pode ser confirmado através de análises metalográficas.

Para a camada de 2,2 mm, apresentada na Figura 4a, observa-se o aumento da profundidade da dispersão descrita na amostra de 1,2 mm, que neste caso é observado na profundidade de 50 μm além da superfície. Isto aumenta as chances de o fato da austenita retida estar presente, pois com o aumento da

camada, necessita-se um aumento da temperatura máxima na superfície e em regiões próximas. Os resultados das L.M.A. visualizados na Figura 4b apresentam dispersões nas mesmas posições que as tensões residuais, um claro indicativo de variações microestruturais nas posições medidas.

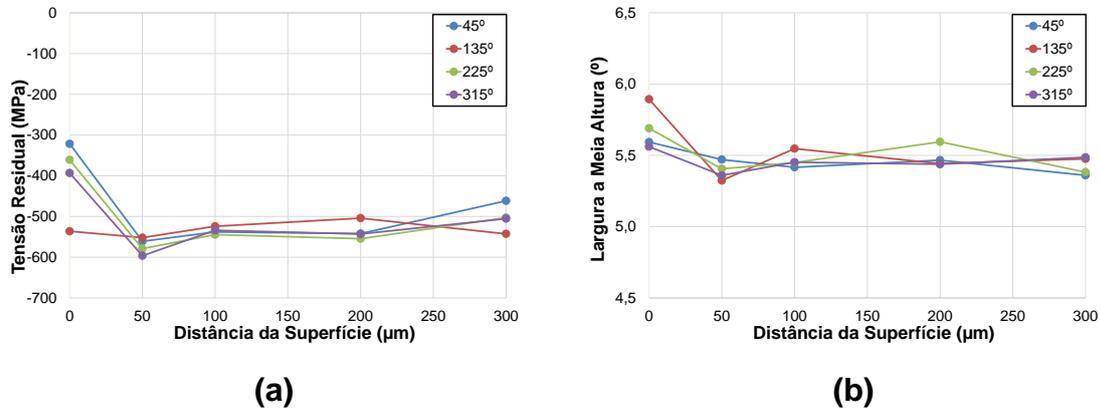


Figura 3: Tensões residuais (a) e largura a meia altura (L.M.A.) (b) na amostra temperada por indução com camada de 1,2 mm.

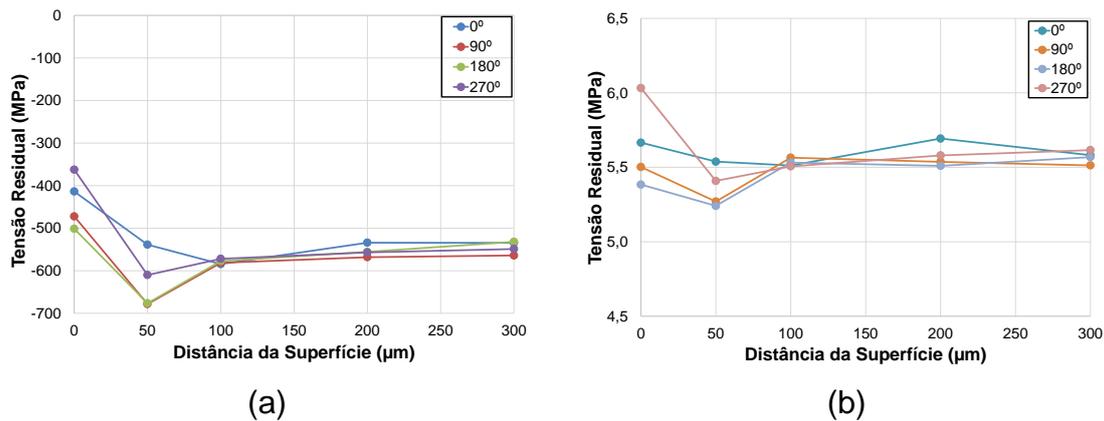


Figura 4: Tensões residuais (a) e largura a meia altura (L.M.A.) (b) na amostra temperada por indução com camada de 2,2 mm.

Para o processo de retífica (Figura 5a), fica bastante evidente a influência do processo nas tensões residuais próximas a superfície, até 100 μm. Na Figura 5b, o resultado observado da L.M.A. permite a afirmação de que esta redução nas tensões compressivas está relacionada a uma queima de retífica.

O perfil de tensões residuais obtido de uma amostra de tratamento térmico de 2,2 mm através do método de difração de nêutrons, observado na Figura 6a, é bastante similar ao descrito por Rudnev⁽⁹⁾ para uma amostra temperada por indução, apresentando tensões compressivas próximas a superfície (região

endurecida) e um pico de tensões trativas logo após a região da camada temperada.

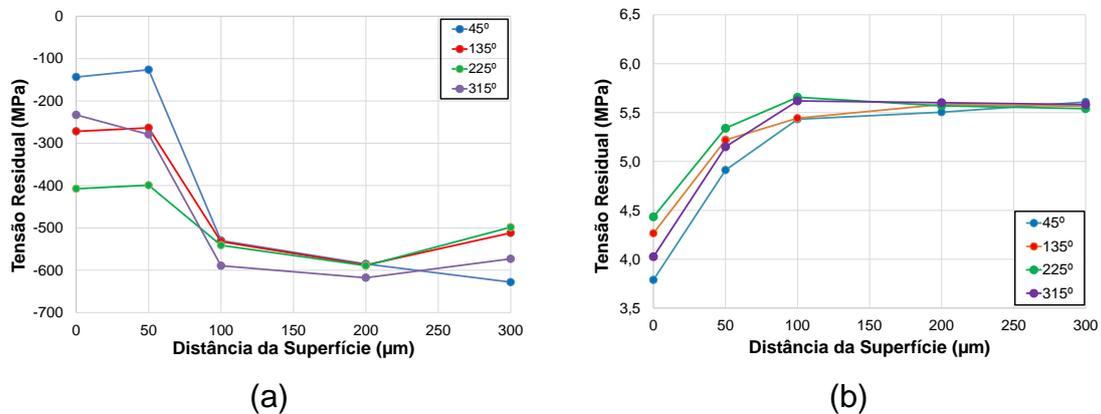


Figura 5: Tensões residuais (a) e largura a meia altura (L.M.A.) (b) na amostra temperada com camada de 2,2 mm e retífica.

O perfil de tensões residuais após o processo de retífica (Figura 6b) não apresenta uma variação considerável em relação ao processo de têmpera, isto pode ser explicado pelo fato de que os efeitos principais são mais restritos a região próxima da superfície e já foram descritos anteriormente. A principal diferença observada é próximo à superfície, onde existe uma diferença apenas em dos lados (-10 a 0), o que pode estar mais relacionada à distorção do que aos processos em si.

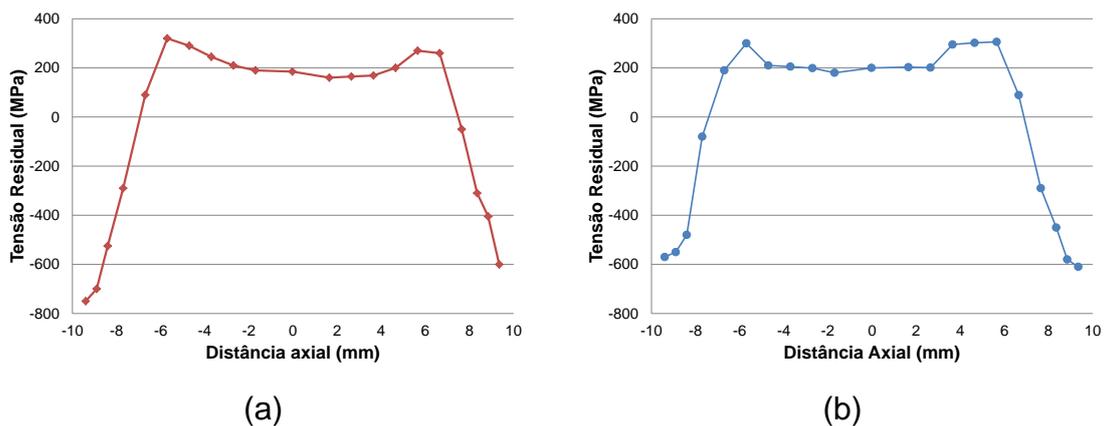


Figura 6: Perfis de tensões residuais por difração de Nêutrons após o processo de têmpera por indução com camada de 2,2 mm (a) e após o processo de retífica (b).

Os resultados das L.M.A. não foram apresentados para os perfis de nêutrons, pois os mesmos indicaram apenas a transformações de fases oriundas do tratamento térmico, indicando a profundidade de camada conforme esperado.

CONCLUSÕES

O processo de têmpera por indução apresentou variações superficiais observadas pelo método de difração de raios-X dependentes da profundidade de camada avaliada.

O perfil de tensões residuais obtido pelo método de difração de nêutrons é coerente em relação à literatura.

O processo de retífica apresentou uma variação nas tensões residuais somente nas regiões observadas com o método de difração de raios-X.

A análise combinada das tensões residuais e L.M.A. permitem a conclusão de que ocorreu uma transformação de fases no processo de retífica devido ao aquecimento excessivo da peça.

A combinação de diferentes técnicas permite a obtenção de uma visão mais ampla e completa dos diferentes efeitos obtidos em função dos processos de fabricação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências CNPq pelo financiamento da pesquisa através do processo número 141374/2014-4 (bolsa de doutorado). E também ao HZB (Helmholtz-Zentrum Berlin) pela disponibilização do equipamento de medição de difração de nêutrons.

REFERÊNCIAS

1. Zoch, H. W. From single production step to entire process chain – the global approach of “distortion engineering”. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* v.1, p. 6-10, 2006.
2. Mackensie, D. S.; Ferguson, B. L.; Li, Z. Effect of quenching variables on the residual stress and distortion of a heat treated disk. In: *Proceedings of the 23rd ASM Heat Treating Society Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. p. 232-238. Setembro, 2005.

3. Thoben, K. D. et al. Approaches to describe distortion along process chains. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* v. 43, p. 178-185, 2012
4. Withers, P. J. Mapping residual and internal stress in materials by neutron diffraction. *C. R. Physique*, v. 8, p. 806-820, 2007.
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. 2012, 219p. Tese (Doutorado em Processos de fabricação) PPGE3M – UFRGS, Porto Alegre.
6. Lodini, A. Analysis of residual stress using neutron and synchrotron radiation. Taylor & Francis, p. 48. 2003
7. Souza, T. F. Simulações computacionais para análise e minimização das tensões residuais no processo de trefilação. 2011, 68p. Dissertação (Mestrado em Processos de fabricação) PPGE3M – UFRGS, Porto Alegre.
8. Soares, C. A. T. Análise das tensões residuais no processo de trefilação considerando os efeitos de anisotropia. 2012, 86p. Dissertação (Mestrado em Processos de fabricação) PPGE3M – UFRGS, Porto Alegre.
9. Rudnev, V. Handbook of induction heating. New York: Marcel Dekker; p. 777, 2003.