

ESTUDO DAS DISTORÇÕES E DISTRIBUIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS EM EIXOS TEMPERADOS POR INDUÇÃO*

Carolina Vaghetti¹
Vinicius Waechter Dias²
Jérémy Epp³
Juan Dong⁴
Alexandre da Silva Rocha⁵

Resumo

Aliar qualidade do produto final e otimização dos custos de produção é o que toda indústria de componentes mecânicos almeja. Um dos problemas enfrentado na produção de eixos automotivos é o surgimento das distorções de formas, e saber as causas dessas distorções vem se tornando cada vez mais imprescindíveis. Dentre os processos de fabricação, o tratamento térmico é conhecido como uma etapa da produção que potencializa os efeitos dos potenciais de distorção acumulados ao longo da cadeia. As tensões residuais são consideradas um dos principais potenciais de distorção e, por isso, é de grande importância o seu entendimento. Sendo assim, o presente artigo, inserido no âmbito do projeto "*Investigation and improvement of a manufacturing process chain from cold drawing processes to induction hardening*", realiza uma análise das distorções e da distribuição das tensões residuais após a têmpera por indução e uma análise das tensões residuais após o processo de retificação durante a fabricação de eixos automotivos de aço ABNT 1045. Foram variados parâmetros nos processos de trefilação e têmpera por indução. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar a influência da profundidade de camada temperada, onde a maior camada apresentou, em média, maiores distorções.

Palavras-chave: Distorção; Têmpera por indução; Tensões residuais.

STUDY OF DISTORTION AND RESIDUAL STRESSES DISTRIBUTIONS IN INDUCTION HARDENING SHAFTS

Abstract

Connect product quality and production costs optimization is the aim of mechanical components industries. One of the problems faced in the automotive shafts production is the shapes distortions, and knowing the causes of these distortions is becoming increasingly essential. Heat treatment is known as a production step that potentiates the accumulated effects of distortion potential along the production chain. Residual stresses are considered one of the major distortion potentials. Therefore, their understanding is very important. The present article, as part of the project "*Investigation and improvement of a manufacturing process chain from cold drawing processes to induction hardening*", makes an analysis of the distortions and the residual stresses distribution after induction hardening and analysis of residual stresses after grinding process during the automotive shafts manufacture with ABNT 1045 steel. Drawing and induction hardening parameters were varied in order to understand their effects. From the results obtained, it was possible verify the influence of the depth of hardened layer, where deeper layer showed, on average, higher distortions.

Keywords: Distortion; Induction hardening; Residual stress.

¹ Graduanda Eng. Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

² M. Sc. Eng. Metalúrgico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ M.Sc., IWT – Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen, Alemanha.

⁴ Dr-Ing, IWT – Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen, Alemanha.

⁵ Prof. Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A distorção de forma de componentes mecânicos é um grande problema enfrentado na indústria metal-mecânica, pois ocasiona retrabalhos e, frequentemente, peças em estágio intermediário ou até mesmo produtos finais de produção são descartados. Segundo Thoben [1], perdas econômicas de cerca de EUR 85 milhões por ano, nas indústrias de componentes automotivos, são causadas por distorções após o tratamento térmico. Estes dados confirmam a necessidade de melhorias e controle de distorções nas rotas de fabricações. Distorções de forma e tamanho dos componentes geralmente precisam ser eliminadas através do processo de retífica, o que é uma das tecnologias de produção mais caras atualmente [2].

Sendo assim, o presente trabalho insere-se no âmbito do projeto de pesquisa chamado "*Investigation and improvement of a manufacturing process chain from cold drawing processes to induction hardening*" do Programa BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura) que visa estudar as distorções na rota de fabricação de eixos automotivos de aço ABNT 1045. As amostras analisadas passaram por sete etapas diferentes de manufatura, sendo elas: pré-endireitamento, jateamento, trefilação, polimento e endireitamento por rolos cruzados (PERC), usinagem, tratamento térmico e retífica. A Figura 1 ilustra a rota de fabricação estudada.

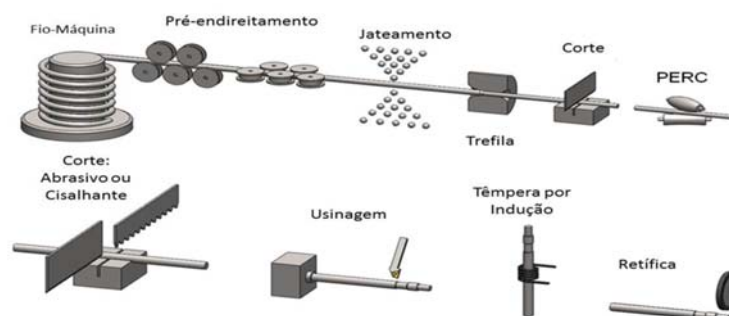


Figura 1: Rota de fabricação estudada.

Rocha [3] afirma que no processo de trefilação combinada, o controle das tensões residuais está relacionado ao controle de distorções das barras durante o processo de trefilação ou em etapas subsequentes do processo, como: usinagem e tratamentos térmicos. Este controle de distorções é muito importante para diminuir custos de produção aumentando a competitividade do produto.

Com isso, este artigo tem como objetivo avaliar a influência da profundidade de camada temperada e do ângulo de trefilação na distorção de barras cilíndricas. Assim como também, verificar a influência do processo de retífica nas tensões residuais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

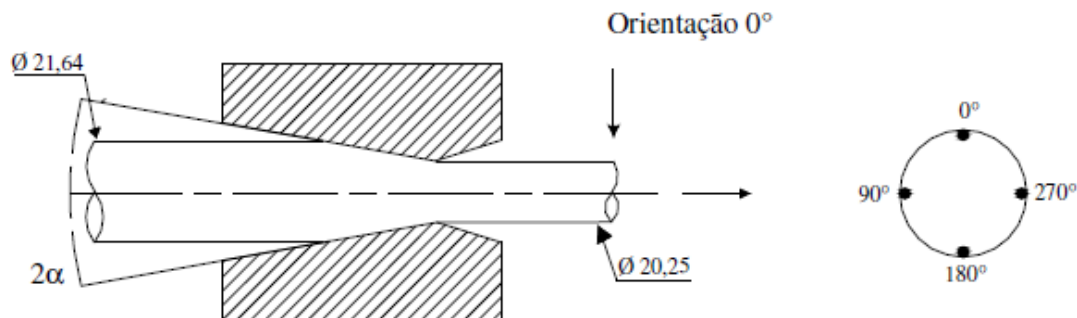
Com 0,45% de carbono em sua composição, o aço 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com boas propriedades mecânicas e tenacidade bem como boas usinabilidade e soldabilidade quando laminado a quente ou normalizado. As suas aplicações compreendem eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais e de máquinas, virabrequim [4]. A tabela 1 apresenta a composição química das amostras

Tabela 1: Composição química das amostras.

Composição Química	
Elemento	%
C	0.48
Si	0.235
Mn	0.871
P	0.025
S	0.035
Cr	0.087
Ni	0.0802
Mo	0.017

Durante a manufatura foram variados os parâmetros: ângulos de trefilação 2α (15° e 20°) e camada temperada (1,2 mm e 2,2 mm). As amostras possuem as dimensões finais de 400 mm de comprimento e um diâmetro de 20,25 mm.

De acordo com Thoben [1], a realização de uma análise de sistema orientado se faz necessário para um controle das distorções. Sendo assim, no decorrer do processo foi criado um sistema de orientação em relação a um referencial fixo. Foi levada em consideração a direção de trefilação das amostras possibilitando a comparação entre etapas do processo a partir destes pontos, conforme ilustrado na Figura 2.

**Figura 2:** Orientações das Amostras [3].

Foi realizado o tratamento de têmpera por indução com a finalidade de se obter duas profundidades de camada temperada: 1,2 mm e 2,2 mm. A tabela 2 mostra os parâmetros do tratamento térmico.

Tabela 2: Parâmetros do processo de tempera por indução.

Equipamento:	SINAC 200/300 S FMC (EFD)
Diâmetro do Indutor:	22 mm
Velocidade de Rotação:	500 1/min
Velocidade de Avanço	900 mm/min
Frequência:	12.1 kHz (MF)
P1 max:	52-55% de max. 200 kW (1.2mm)
P2 max:	63-68% de max. 200kW (2.2mm)
I max:	501A de max. 548A
Distância do Indutor:	10 mm
Fluido de Resfriamento:	12% Aquatensid

Após o tratamento térmico, as amostras passaram pelo processo de revenimento com temperatura de 120 °C durante 180 minutos. Com base na rota de fabricação sugerida e após uma verificação dimensional, as amostras sofreram um processo de retífica objetivando uma remoção de camada de 100 µm.

Para a análise das tensões residuais antes e após o processo de retífica, foi utilizada a técnica de difração de raios-X. Segundo Nune [5], esta técnica é baseada no princípio de que a distância entre os planos cristalográficos é definida pelas características físicas do material. Assim, quando um material é irradiado por raios-X monocromáticos, as características dos picos de difração são alteradas conforme variam as propriedades do material, incluindo as tensões residuais.

De acordo com Frerichs [6], para a medição da distorção de um componente cilíndrico é necessário o cálculo de vetor distorção, para isso, utilizou-se a máquina de medição por coordenada (3D). O equipamento realiza a medição da geometria real do componente e compara com um elemento geométrico ideal. Em virtude de ser um componente cilíndrico, o equipamento define pontos específicos da amostra onde são medidos círculos. Assim, são estimados três círculos, o que apresenta menor raio (círculo interior), o que apresenta maior raio (Círculo exterior) e o círculo de melhor ajuste. A Figura 3(A) mostra como é realizado o cálculo dos círculos medidos e a Figura 3(B) ilustra o cálculo do vetor distorção. A análise destes vetores determina quais parâmetros do processo que tem maior influência na geração de mudanças dimensionais e desta forma é determinado o “potencial distorção” de cada etapa do processo [5].

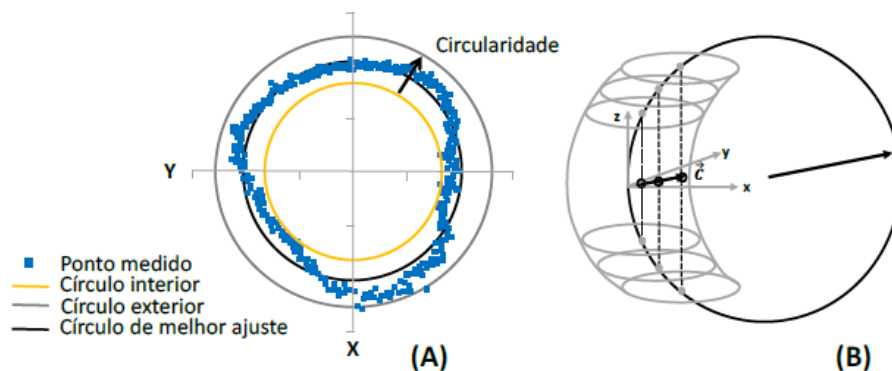


Figura 3: Cálculo da circularidade (A) e representação do vetor distorção C (B). Fonte: Nunes, 2012.

Realizou-se as medições da superfície ao longo do eixo entre as posições de 140 mm e 190 mm, variando as posições periféricas para oito diferentes ângulos (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°) conforme está ilustrado na Figura 4.

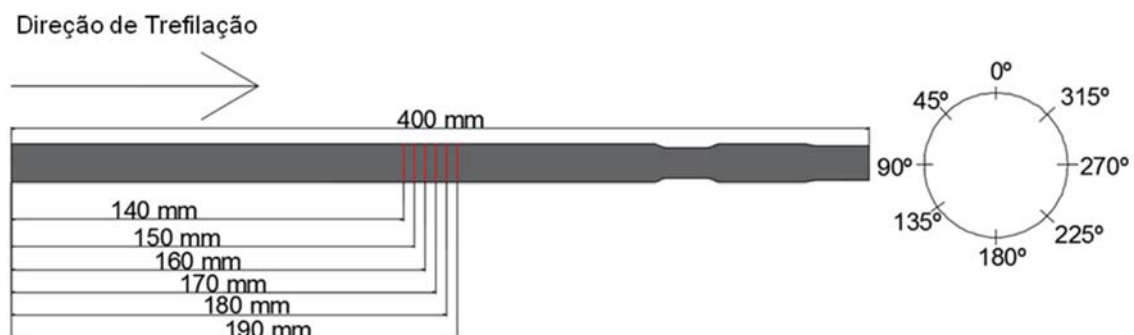


Figura 4: Pontos de Medições.

Após a análise superficial das amostras, utilizando a técnica de ataque eletrolítico em meio ácido (fosfórico - H_3PO_4 e sulfúrico - H_2SO_4), foram feitas remoções de 50 μ m, 100 μ m, 200 μ m e 300 μ m e antes de cada remoção, foi realizada uma nova medição das tensões residuais em cada camada a fim de obter uma análise das tensões residuais em função da profundidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados

A Tabela 3 apresenta os valores médios dos vetores distorção obtidos por meio da análise dos resultados dimensionais.

Tabela 3: Resultados dimensionais das amostras analisadas.

Ângulo da Ferramenta	Camada Temperada	Curvatura Média (μ m)	Desvio Padrão (μ m)
20°	1.2 mm	66	28
20°	2.2 mm	96	47
15°	1.2 mm	184	54
15°	2.2 mm	193	63

A comparação entre os resultados dimensionais antes e após o tratamento térmico de têmpera por indução, apresentado na Figura 5, permite a conclusão de que, em média, as amostras trefiladas com ângulo de fiada de 15° (lado direito do gráfico) apresentaram maiores curvaturas que as amostras trefiladas com o ângulo de fiada de 20° (lado esquerdo). Além disso, é possível verificar a influência da profundidade de camada temperada na distorção, sendo que as maiores camadas (2,2 mm) apresentaram maiores distorções para ambos os ângulos de ferramenta de trefilação.

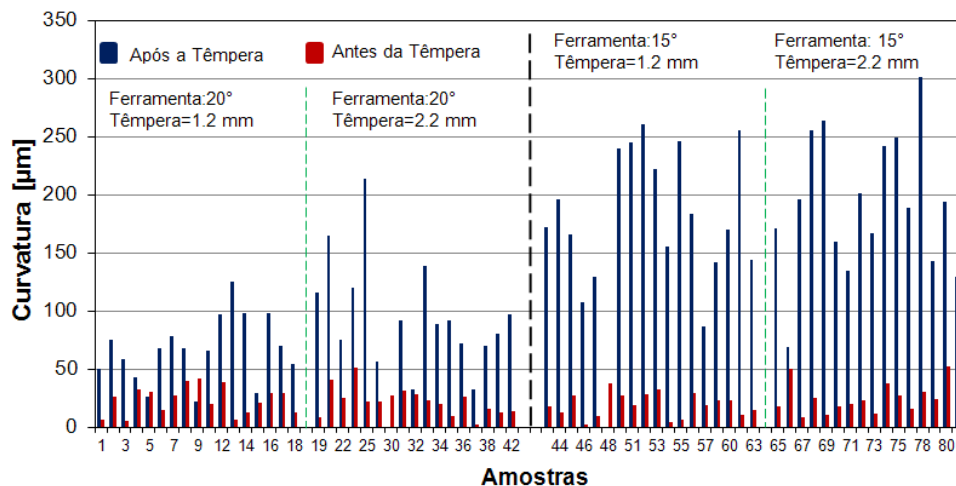


Figura 5: Curvatura antes e após o processo de têmpera por indução das amostras trefiladas com fiada de 15° e 20°.

A Figura 6 apresenta o resultado do perfil das tensões residuais e a largura a meia altura (L.M.A) em função da remoção de camadas para a barra com fiada de 20° e 1,2 mm de profundidade de camada temperada. Nota-se que existe uma dispersão das tensões residuais nas regiões superficiais com um gradiente de aproximadamente 200 MPa, enquanto após a posição de 50 μ m este valor se reduz

para, aproximadamente, 60 MPa (equivalente ao erro de medição associado ao equipamento).

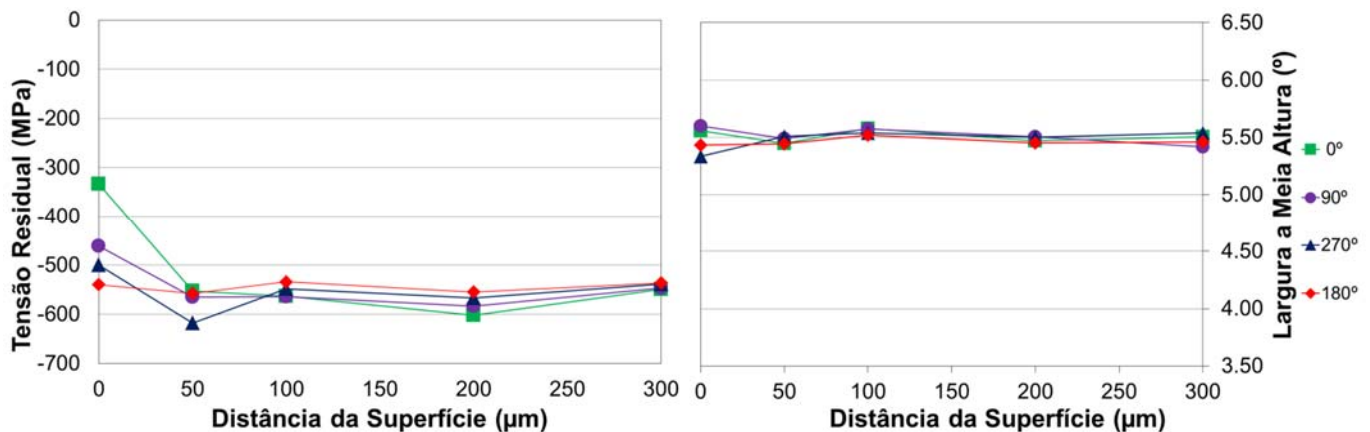


Figura 6: Perfil das tensões residuais para barra com fiara de 20° e 1,2 mm de camada temperada.

Avaliando-se o perfil das tensões residuais e a largura a meia altura em função da camada removida para a barra com fiara de 15° e 1,2 mm de profundidade de camada temperada mostrada na Figura 7, é possível verificar que as tensões residuais apresentam uma variação semelhante à amostra trefilada com ângulo de 20°, apenas com valores, em média, menos compressivo. Já os valores de L.M.A. se mantêm em torno de 5,5°, assim como a amostra anterior.

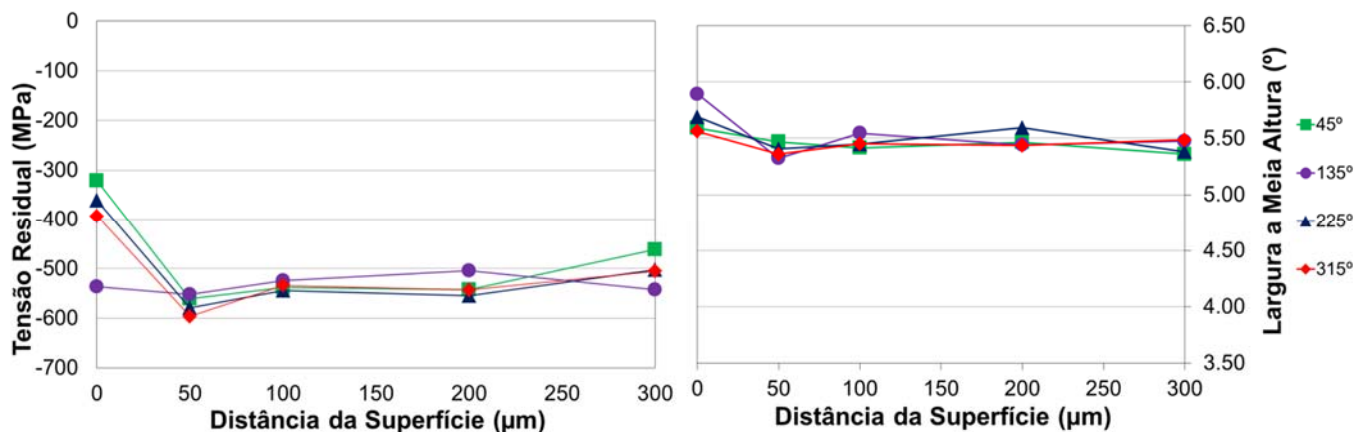


Figura 7: Perfil das tensões residuais para barra com fiara de 15° e 1,2 mm de camada temperada.

A análise dos gráficos representados na Figura 8 que apresenta o resultado da distribuição das tensões residuais e a largura a meia altura para a barra trefilada com fiara de 15° e 2,2 mm de profundidade de camada temperada, nota-se que, neste caso, tanto as tensões quanto a L.M.A. apresentam dispersões até a remoção de 100 μm, onde estes valores se aproximam.

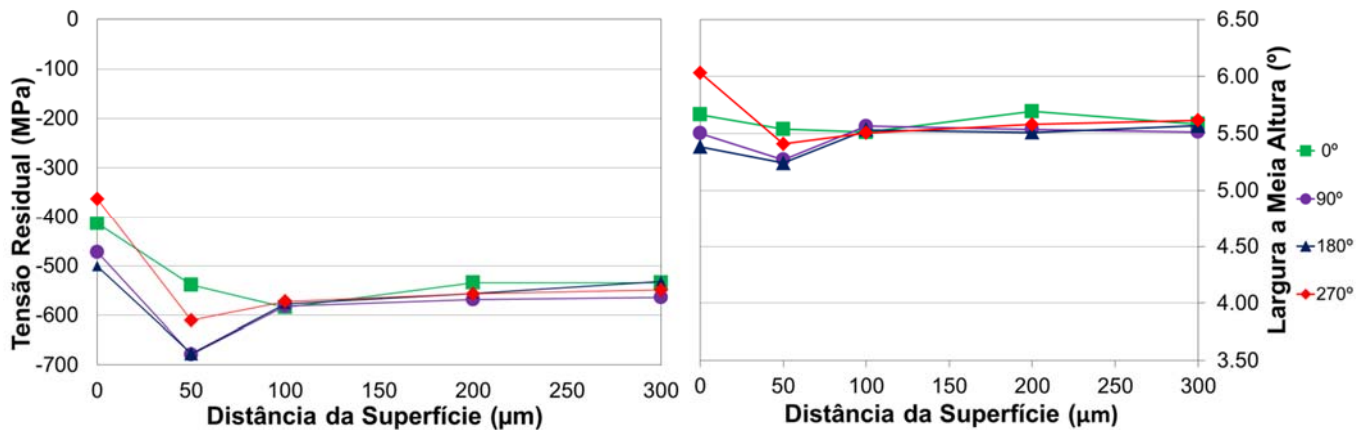


Figura 8: Perfil das tensões residuais da barra com fieira de 15° e 2,2 mm de camada temperada.

A Figura 9 ilustra o resultado do perfil das tensões residuais e a largura a meia altura em função da camada removida para a barra trefilada com fieira de 15°, 2,2 mm de profundidade de camada temperada e retificada com remoção de 100 μm. É possível notar que existe uma influência desse último processo tanto nas tensões residuais quanto na L.M.A. que demonstram alterações até a remoção 100 μm. Vale ressaltar que os valores a serem comparados da amostra temperada (Figura 8) são os observados na remoção de 200 μm na barra retificada (Figura 9), visto que o processo de retífica retirou 100 μm das amostras após a têmpera.

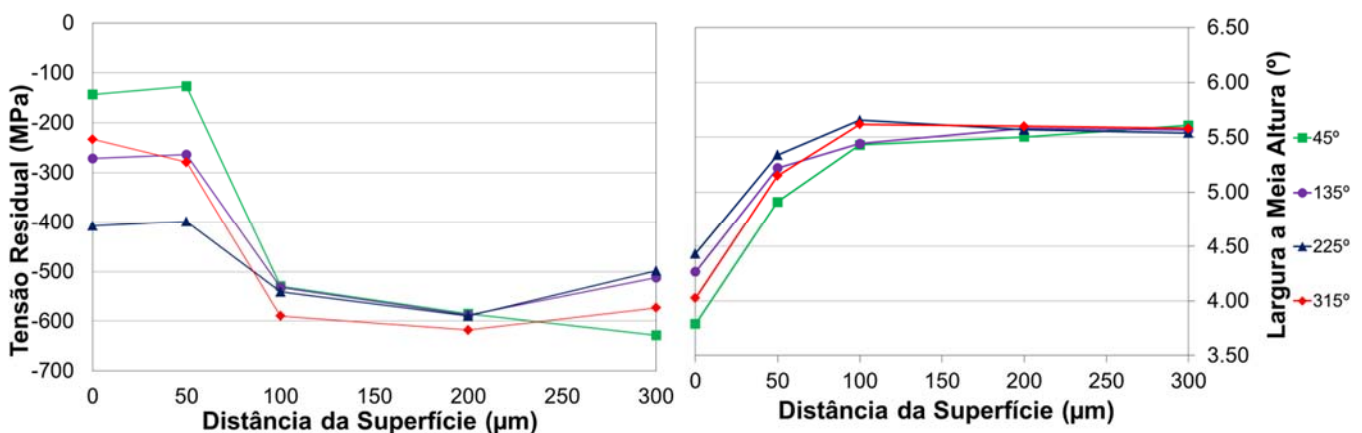


Figura 9: Perfil das tensões residuais da barra com fieira de 15°, 2,2 mm de camada temperada e retificada.

3.2 Discussão

Foi possível verificar que após o tratamento térmico há uma dispersão de valores das tensões residuais nas superfícies das amostras analisadas, isso pode ser explicado devido à descarbonetação ocorrida na superfície. Pois, segundo [5], a têmpera por indução é um tratamento térmico que ocorre sem proteção de atmosfera, por isso, poderá haver uma descarbonetação e/ou oxidação em uma camada superficial de aproximadamente 10 μm. Como os resultados da L.M.A. não são conclusivos com relação a esta descarbonetação, uma análise superficial no material é a única maneira de se provar a ocorrência deste processo.

Com o objetivo de encontrar possível relação entre os vetores distorção e as tensões residuais, a Figura 10 ilustra a comparação entre a distribuição dessas tensões em

função dos ângulos de referência (com as respectivas remoções de camada) e o vetor distorção. Como se pode observar, não foi possível identificar nenhuma relação direta entre os resultados de tensões residuais e a curvatura da amostra após os processos analisados dessa rota em específico. Ressaltando que os módulos dos vetores da Figura 10 estão mostrados de maneira ilustrativa, entretanto representando a direção.

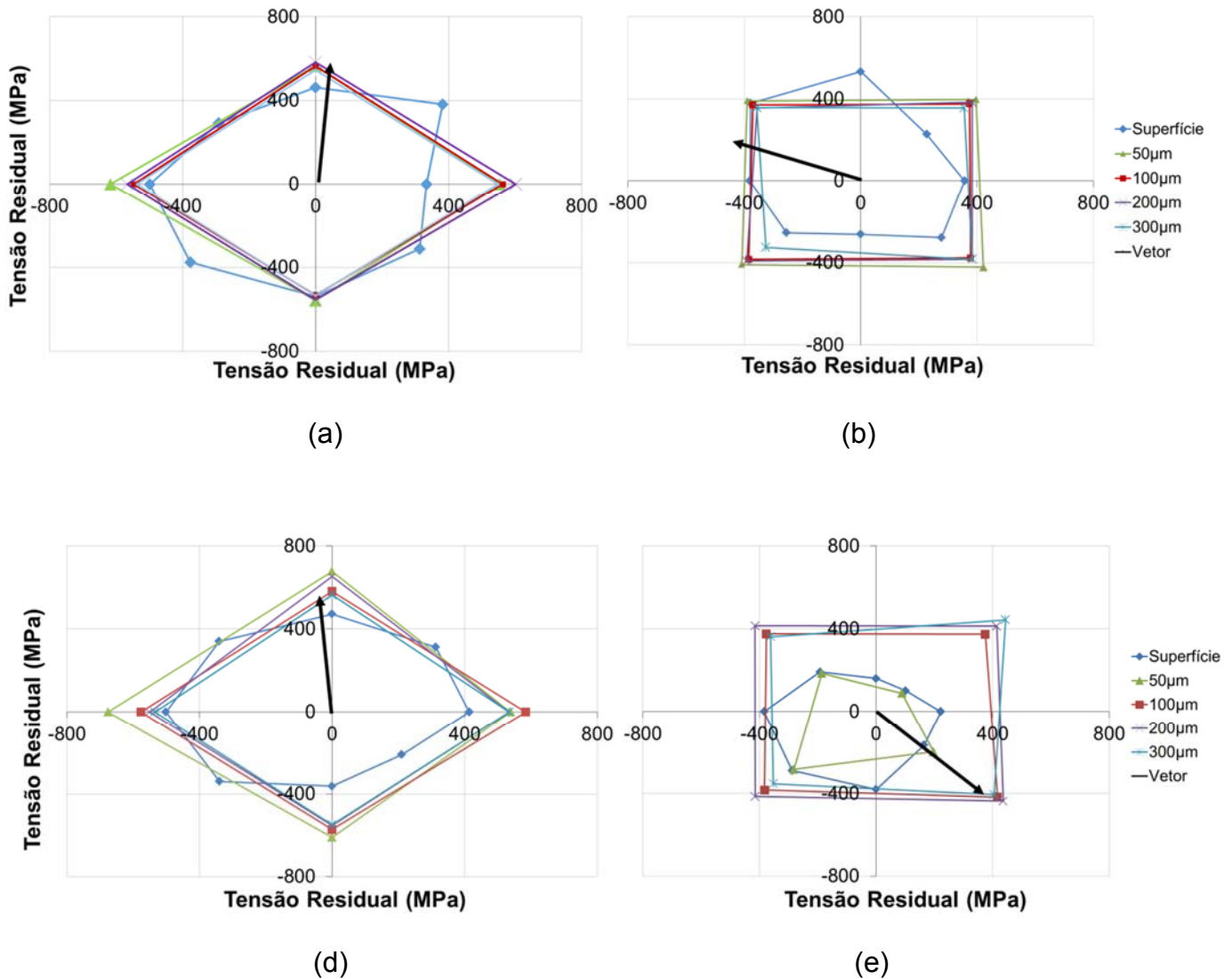


Figura 10: Perfil das tensões residuais e vetor distorção da barra trefilada com fiara de 20° e 1,2 mm de camada temperada em (a), com fiara de 15° e 1,2 mm de camada em (b), com fiara de 15° e 2,2 mm de camada em (c) e com fiara de 15°, 2,2 mm de camada e retificada em (d).

A provável explicação para o fato desta relação não ser direta se dá pela ocorrência de diversos processos durante a têmpera por indução como a transformação de fases, o gradiente prévio das tensões residuais do material, bem como possíveis heterogeneidades tanto no processo quanto na secção transversal do material.

4 CONCLUSÃO

As amostras que passaram pelo processo de trefilação com fiara de 15° apresentaram maior distorção quando comparada com as que passaram pelo processo com ângulo de 20°.

A profundidade de camada temperada possui influência na distorção. As barras temperadas com profundidade de 2,2 mm apresentaram maiores distorções para ambos os ângulos de ferramenta de trefilação.

A análise das tensões residuais nas barras temperadas por indução permite concluir que há uma clara variação dessas tensões na superfície das amostras. No entanto, essa variação não é observada nas regiões mais internas do material.

Os resultados obtidos das tensões residuais da amostra retificada, mostram que o processo de retificação tem influência nas tensões residuais somente em uma região superficial (até 100 μm), pois nas camadas mais internas observa-se que essas tensões se assemelham com as barras que passaram somente pela têmpera por indução.

Nessa rota de fabricação específica, não foi possível realizar alguma relação direta entre o vetor distorção e as tensões residuais.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq e CAPES pelo financiamento deste trabalho e o IWT – Stiftung Institut für Werkstofftechnik – Bremen, Alemanha pela parceria na realização das medições de tensões residuais.

REFERÊNCIAS

- 1 Thoben KD, Lübben TH, Clausen B, Prinz C, Schulz A, Rentsch R, et al. "Distortion Engineering" Eine systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs. HTM. 2002, 57, 276-282.
- 2 Zoch HW. From single production step to entire process chain – the global approach of distortion engineering. Werkstofftech. 2006; 37: 6-10.
- 3 Rocha AS, Nunes RM, Ferlauto EM. Avaliação dos efeitos de tensões residuais através da remoção de material. Estudos tecnológicos. 2008; 3: 157-169.
- 4 Buerger GR, Domingues TG, José DR, Manske GA, Oliveira RD, Vieira LN. Estudo do Tratamento Térmico sobre a Conformação do Aço 1045. Universidade de Santa Catarina – UDESC/CCT. Joinville – SC, 2010.
- 5 Nunes RM. Estudo de Distorção de Barras Cilíndricas de Aço ABNT 1045 em uma Rota de Fabricação Envolvendo Trefilação Combinada e Tempera por Indução. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2012.
- 6 Frerichs F, Lübben TH, Hoffmann F, Zoch HW. Numerical analysis of distortion due to inhomogeneous distribution of martensite start temperature within SAE 52100 bearing ring. In: Proceeding of the 3rd. International Conference on Thermal Process Modeling and Simulation; 2006; Budapest.