



# ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM BARRAS DE AÇO AISI 1045 NO PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO<sup>1</sup>

Rafael Menezes Nunes<sup>2</sup>  
 Guilherme Braga Lemos<sup>3</sup>  
 Alexandre da Silva Rocha<sup>4</sup>  
 Thomas Hirsch<sup>5</sup>

## Resumo

O controle e o conhecimento do desenvolvimento e geração de tensões residuais nos processos de têmpera por indução são muito importantes para uma melhoria do processo industrial. Distorção, empenamentos e a vida em fadiga de componentes mecânicos estão diretamente relacionados ao nível e distribuição de tensões residuais. Neste trabalho, foram avaliadas as tensões residuais em barras cilíndricas de aço AISI 1045 com 20,25 mm de diâmetro após o processo de têmpera por indução. As tensões residuais foram caracterizadas utilizando as técnicas de difração de raios-X e difração de nêutrons. Utilizando-se a técnica de difração de raios-X obteve-se uma caracterização das tensões residuais na camada superficial. Na técnica de difração de nêutrons a caracterização de tensões residuais ocorre em camadas mais profundas, atingindo o núcleo do material. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que há na superfície do material um forte nível de tensões residuais compressivas que mudam para trativas com o aumento da profundidade (núcleo do material). Também observou-se que há heterogeneidades ao longo da barra, principalmente na interface da camada temperada com o núcleo não temperado.

**Palavras-chave:** Têmpera por indução; Tensões residuais; Difração de raios-X.

## STUDY AND CHARACTERIZATION OF RESIDUAL STRESSES IN AISI 1045 STEEL BARS IN INDUCTION HARDENING PROCESS

### Abstract

The control and knowledge of the development and generation of residual stresses in the process of induction hardening is very important for the improvement of a manufacturing process. Distortion, warping and fatigue life are directly related to the level and distribution of residual stresses. In this study, residual stresses were investigated for in AISI 1045 steel cylindrical bars with 20.25 mm of diameter after the induction hardening process. The residual stresses were characterized using the techniques of X-ray diffraction and neutron diffraction. Using the X-ray diffraction method, a characterization of residual stresses in the surface layer was obtained. By means of neutron diffraction method, a characterization of residual stresses for deeper layers was obtained, reaching the core of the bars. From the results obtained, it was found that the surface of the material is a strong level of compressive residual stresses that change to tensile with increasing depth (core of the material). It was also observed that there is some heterogeneity of the residual stress distribution in the bar, especially in the interface layer of tempered and untempered core.

**Key words:** Induction hardening; Residual stresses; X-ray diffraction.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [rafael.nunes@ufrgs.br](mailto:rafael.nunes@ufrgs.br)

<sup>3</sup> Mestrando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>4</sup> 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](mailto:alexandre.rocha@ufrgs.br)

<sup>5</sup> Priv Doz. Dr. Ing., IWT – Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik – Bremen - Germany



## 1 INTRODUÇÃO

A tendência atual no campo de componentes automotivos críticos é o aumento do desempenho com redução de material e de custos de processamento, por exemplo, usinagem e tratamento térmico. A têmpera por indução de ligas de aço de baixo carbono é muito utilizada, principalmente na indústria automobilística. São bem conhecidas algumas vantagens deste processo, podendo destacar o aumento da vida em fadiga, a velocidade do processo e a facilidade em ser executada dentro de uma linha de produção.

Tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sólido sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos.<sup>(1)</sup> Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos é zero. O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é a própria tensão verdadeira de escoamento do material,<sup>(1)</sup> 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.<sup>(2)</sup> 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,<sup>(1)</sup> 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.

A têmpera por indução dá origem a uma camada superficial com alta dureza e tensões residuais compressivas. Por outro lado, o núcleo terá tensões residuais trativas. Já foi provado que esta distribuição de tensões residuais aumenta a vida em fadiga, limitando a iniciação de trincas de fadiga.<sup>(3,4)</sup> Entretanto a efetividade do aumento da vida em fadiga de um componente temperado por indução depende de sua distribuição e sua relaxação durante serviço. Devido a estes fatores é muito importante o conhecimento do nível e distribuição de tensões residuais. Um aspecto importante que relaciona a magnitude de tensões residuais na superfície é a profundidade da camada temperada, Breen et. al. concluiu que o aumento da camada temperada gera tensões residuais menos compressivas na camada, comparando-se com camadas de menores.<sup>(5)</sup> As tensões residuais também estão relacionadas a empenamentos e distorções de componentes mecânicos durante o tratamento térmico e/ou usinagem.

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 subsequentes de processamento do material. As tensões residuais podem ser aliviadas (ou intensificadas) em etapas adjacentes de processamento do material, dentro ou fora da usina siderúrgica resultando em distorções indesejadas.<sup>(6)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A matéria-prima utilizada no processo de têmpera por indução é proveniente do processo de trefilação, barras cilíndricas com diâmetro de 20,25 mm de aço AISI

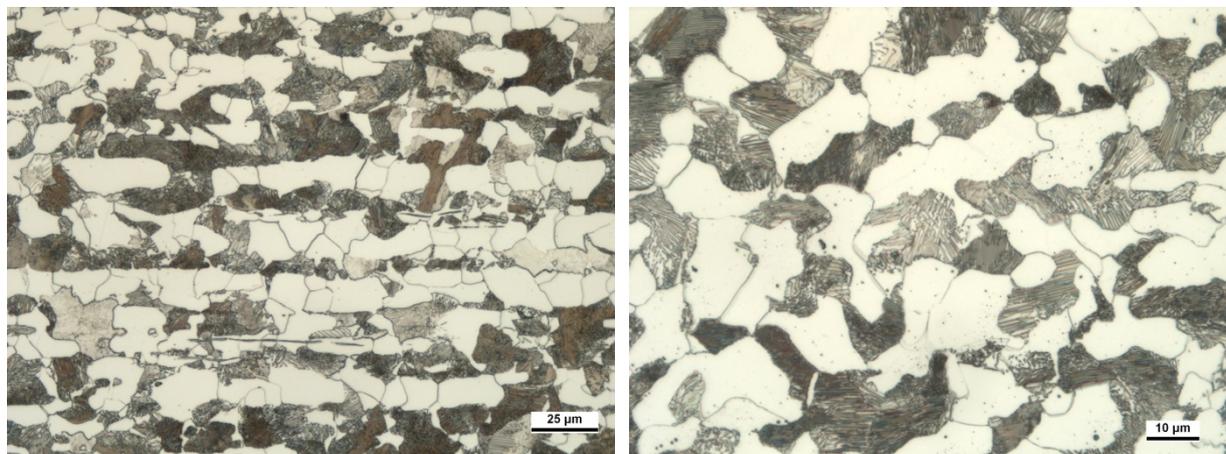
1045. Após o processo de trefilação há um endireitamento por rolos cruzados, este endireitamento garante a retinidade da barra.

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

**Tabela 1 - Composição Química do aço AISI 1045**

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

Na Figura 1 é mostrada a microestruturas da matéria-prima, barra trefilada de aço AISI 1045, as microestruturas são formadas tipicamente de Perlita, região escura da micrografia, e Ferrita, região clara das micrografias, observa-se também um bandeamento típico de materiais que foram laminados a quente. Nas Figura e 3 são apresentadas as micrografias após o tratamento térmico de têmpera por indução. Observa-se na Figura 2 a profundidade de camada temperada, aproximadamente 0,63mm. Na Figura 3 observa-se a formação de martensita na camada mais externa.



**Figura 1 - Micrografias da matéria-prima, ataque Nital 2%**

Nas Figuras 4 e 5 são mostradas as microestruturas da barra temperada por indução com profundidade de 1,21 mm. Na Figura 4 observa-se a interface de camada temperada e não temperada, nota-se a formação de martensita na camada mais externa e para camadas mais internas a estrutura perlítica e ferrítica são mantidas. Na Figura observa-se a camada mais externa com a formação de martensita.

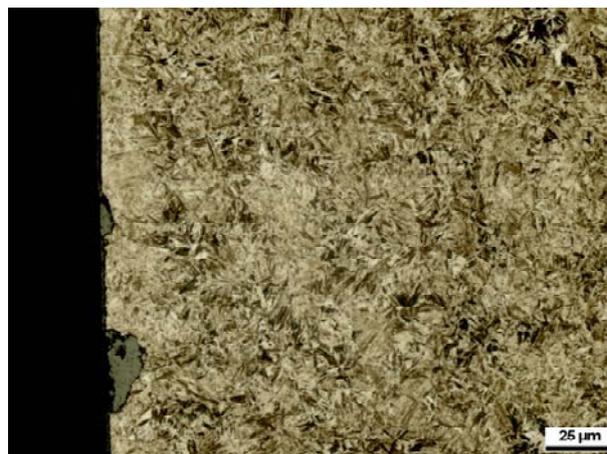
Perfis de microdureza foram realizados para determinação da profundidade de camada temperada. Foi utilizada uma carga de 1 kg (HV1) e as indentações com avanço de 0,5 mm da superfície até 2 mm, e após a cada 1mm até o núcleo da barra.

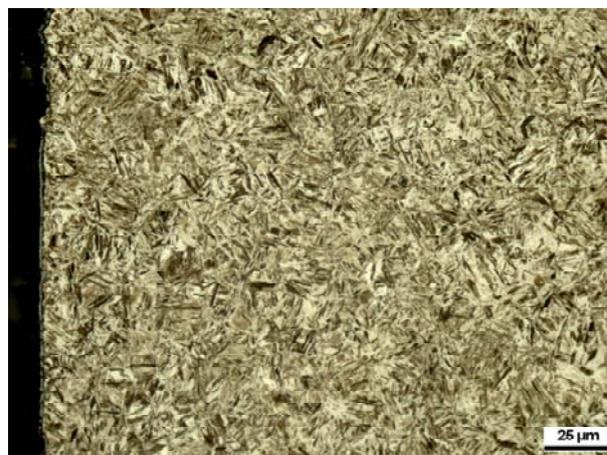
A têmpera por indução foi realizada em amostras de 200 mm de comprimento, temperando duas profundidades de camada, 0,63 mm e 1,21 mm. Os parâmetros do processo são mostrados na

Tabela 2.

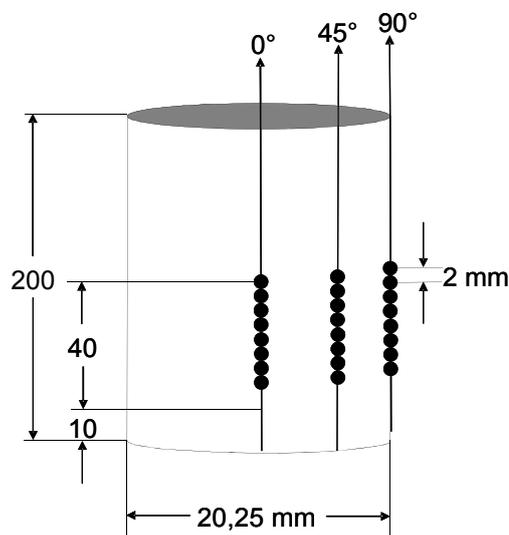
**Tabela 2 – Parâmetros do processo de têmpera por indução**

Equipamento:	SINAC 200/300 S FMC (EFD)
Diâmetro do Indutor:	22mm
Velocidade de rotação:	500 1/min
Velocidade de avanço:	2 m/min (0,63mm); 1,4 m/min (1,21mm)
Frequência:	238 kHz - max. 250kHz
P max:	70 kW - max. 110 kW
I max:	189 A
Distância do indutor:	10 mm
Fluido de resfriamento:	12% Aquatensid
Taxa de fluido:	10 l/min


**Figura 2 – Macrografia da amostra temperada por indução 0,63 mm, ataque Nital 2%.**

**Figura 3 – Micrografia da amostra temperada por indução 0,63 mm, ataque Nital 2%.**

**Figura 4 - Macrografia da amostra temperada por indução 1,21 mm, ataque Nital 2%.**

**Figura 5 - Macrografia da amostra temperada por indução 1,21 mm, ataque Nital 2%.**

A caracterização de tensões residuais foi realizada utilizando-se as técnicas de difração de raios-X e difração de nêutrons. Foram avaliados pontos ao longo da superfície da amostra e também em posições periféricas específicas, conforme mostrado na Figura .



**Figura 6** – Procedimento de medição de tensões residuais por difração de raios-X.

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

O método de medição de tensões residuais por difração de nêutrons é análogo ao método de medição de tensões residuais por difração de raios-X. A determinação das tensões residuais presentes no material por difração de nêutrons segue o princípio da lei de Bragg. Este método utiliza o retículo cristalino do material como um strain-gage interno, baseado na equação de Bragg, equação 1: <sup>(7)</sup>

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (\text{equação 1})$$

O espaçamento interplanar “d” e sua variação (tensão) podem ser medidos. Em um difratômetro monocromático, a tensão  $\varepsilon$  é determinada medindo o ângulo de espalhamento do material tensionado,  $\theta$ , e o mesmo ângulo para o material não tensionado,  $\theta_0$ , conforme a equação 2: <sup>(8)</sup>

$$\varepsilon = \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta} - 1 \quad (\text{equação 2})$$

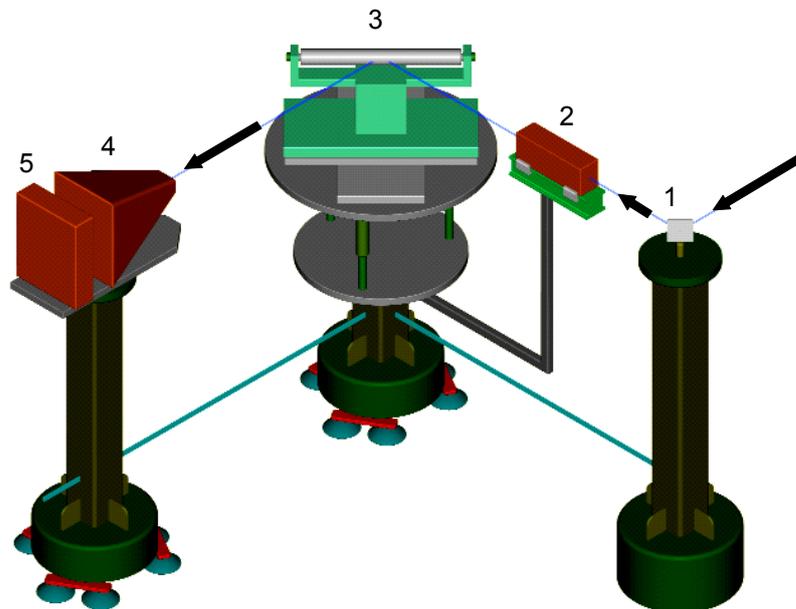
Em uma medida de difração o espaçamento interplanar, d, medidos na direção da bissetriz do feixe de nêutrons difratado. Desde que a tensão apresenta um tensor é necessário medir as tensões em três diferentes direções ortogonais entre si nas direções x, y e z para se obter os componentes normais de tensões para as três direções (equação 3). Os componentes normais de tensão,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  e  $\theta_z$  podem ser

calculados a partir da (Equação 2). Sendo E o módulo de Young e  $\nu$  o coeficiente de Poisson:<sup>(8)</sup>

$$\sigma_i = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_i + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z), \quad i = x, y, z \quad (\text{equação 3})$$

A montagem do experimento para medição de tensões residuais por difração de nêutrons é mostrado na Figura . Os parâmetros básicos do equipamento de difração de nêutrons são:

- Instrumento - E3 – Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB);
- Ângulo do monocromador [°] – 65;
- Comprimento de onda [nm] - 0.1486;
- Colimação [°] – aberta;
- FWHM [°] - ~0.3 (a  $2\theta = 90^\circ$ );
- Fluxo [n/cm<sup>2</sup>/s] - ~5 x 10<sup>6</sup>;
- Detector - PSD 30 x 30 cm<sup>2</sup>;
- Monocromador - Si (400), Double Focussing;
- Aberturas primárias e secundárias de 2 mm.



**Figura 7** - Montagem da amostra no equipamento para medição de tensões residuais na técnica de difração de nêutrons, reator nuclear BER II do HMI, 1 – monocromador, 2 – Abertura do feixe incidente, 3 – Amostra, 4 – Máscara feixe difratado, 5 - Detector.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 8 mostra os perfis de dureza das amostras temperadas por indução, a dureza para a amostra temperada com 0,63 mm é de 700 HV e decai até a dureza de núcleo 300 HV. Na amostra temperada por indução com camada de 1,21 mm a dureza na superfície é de 600 HV e decai para 300 HV com o aumento da profundidade. Observa-se diferenças na dureza para as duas camadas temperadas, estas diferenças estão relacionadas ao avanço do indutor, parâmetro de tratamento térmico de têmpera por indução. Utilizaram-se dois avanços do indutor diferentes, 2 m/min para a camada de 0,63 mm e 1,4 m/min para a camada de 1,21 mm, único parâmetro que se variou nas duas condições analisadas. Esta diferença resultou em diferentes tempos de aquecimento e conseqüentemente na profundidade de camada

temperada. A diferença de tempos de aquecimento e resfriamento que resultaram também em diferenças de dureza, principalmente em camadas mais próximas a superfície.

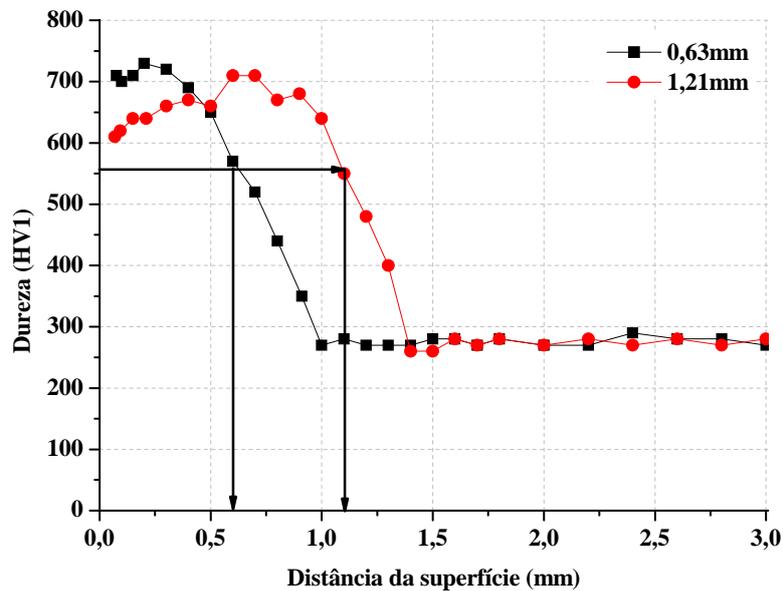


Figura 2 – Perfis transversais de dureza das amostras temperadas.

### 3.1 Tensões Residuais Superficiais Caracterizados por Difração de Raios-X

Na Figura 3 são mostradas as tensões residuais superficiais caracterizados por difração de raios-X na matéria-prima, barra trefilada, endireitada e polida. As tensões residuais superficiais tem um comportamento compressivo, o valor médio é de 225 MPa na superfície, observa-se também que há uma diferença de aproximadamente 80 MPa para o menor valor medido em relação ao maior valor. Esta diferença está relacionada ao processo de trefilação, que induz estas diferenças na superfície da barra. <sup>(9)</sup>

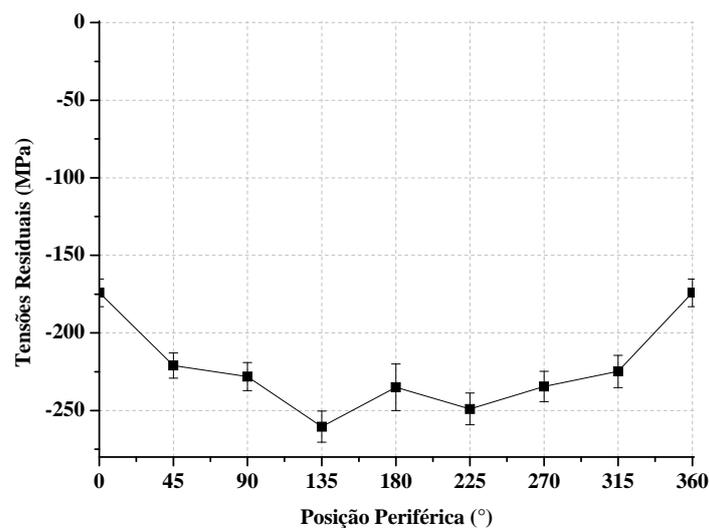


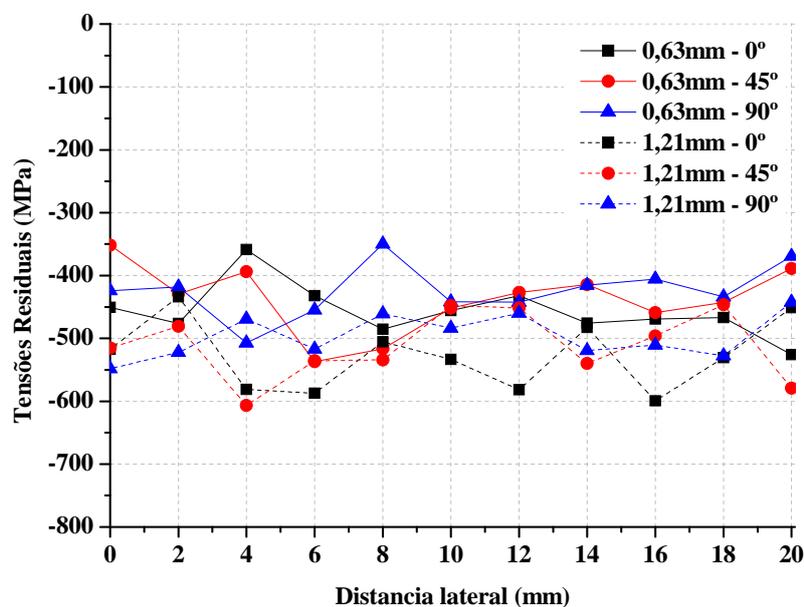
Figura 3 - Tensões residuais longitudinais superficiais na matéria-prima, barra trefilada e endireitada por rolos cruzados.

Na Figura 4 observa-se a distribuição das tensões residuais na camada temperada por indução, profundidade de camada de 0,63 mm e 1,21 mm, mediu-se as tensões residuais em três posições periféricas da barra, (0°, 45° e 90°), com uma distância de 2 mm a cada ponto de medição.

Analisando-se os valores de tensões residuais para a camada temperada de 0,63 mm observa-se que há diferenças significativas ao longo da amostra e também em relação à posição periférica analisada.

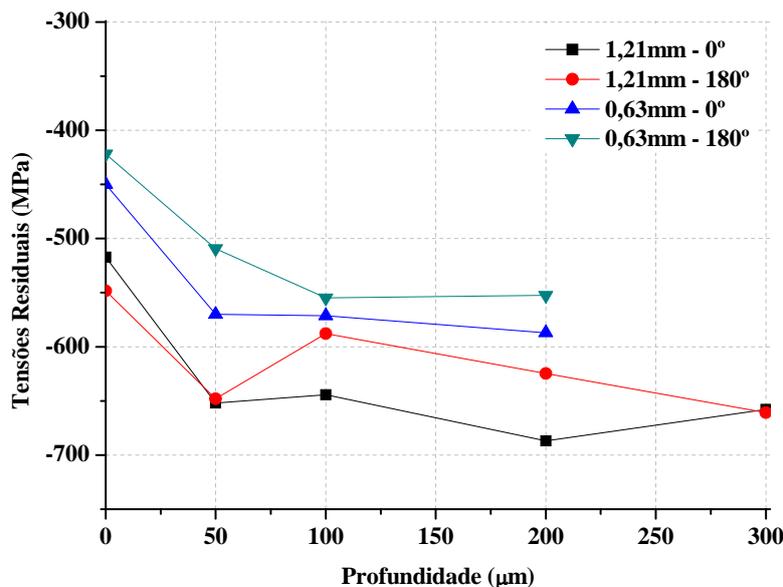
Observa-se que os valores de tensões residuais superficiais para a camada de 1,21 mm apresentam valores mais compressivos comprando-se com os valores medidos para a camada de 0,63 mm. Nota-se que há diferenças significativas do nível de tensões residuais, para uma mesma posição periférica e também ao longo da superfície da barra.

Comparando-se a o perfil de tensões residuais apresentados pela matéria-prima (Figura 9), e pela barra após a têmpera por indução (Figura 10), observa-se que o mesmo tipo de heterogeneidade apresentada na matéria-prima é mantido na barra após o tratamento térmico independente da profundidade de camada temperada.



**Figura 4** - Tensões residuais superficiais, camada temperada por indução, camada de 0,63mm e 1,21mm.

Na Figura 5 são mostrados perfis de tensões residuais até uma profundidade de 300µm para a camada temperada de 1,21 mm e duas posições periféricas 0° e 180°. Também são mostrados dois perfis de tensões até uma profundidade de 200 µm para a amostra com camada temperada de 0,63 mm. Observa-se que os valores de tensões residuais superficiais para a camada de 1,21 mm apresentam valores mais compressivos comprando-se com os valores medidos para a camada de 0,63 mm. Nota-se que há diferenças significativas do nível de tensões residuais, para as duas posições periféricas analisadas, independente da condição de têmpera, mas estas diferenças são menores dos que as apresentadas na superfície da barra. Analisando-se camadas mais profundas, as diferenças de tensões residuais, em relação à posição periférica, são mantidas comparando-se as duas condições de têmpera por indução.



**Figura 5** – Perfis de tensões residuais, camada temperada por indução, camada de 0,63mm e 1,21mm.

### 3.2 Tensões Residuais Superficiais Caracterizados por Difração de Nêutrons

Na Figura 6 são mostrados os perfis de tensões residuais longitudinais, transversais e radiais para a barra temperada por indução, a camada temperada foi de 0,63 mm. Observa-se o nível de tensões residuais longitudinais e transversais fortemente compressivos na superfície, este comportamento já foi caracterizado por outros autores. Observa-se que após o final da camada temperada há uma inversão de tensões residuais tornando o comportamento trativo, aproximadamente 450 MPa e este comportamento volta a ser compressivo no núcleo do material. Os mecanismos de formação de tensões residuais após a têmpera por indução são mostrados na Figura 7,<sup>(10)</sup> no primeiro estágio observa-se o ciclo de aquecimento da peça cilíndrica, a seção do cilindro que está sendo aquecida pela bobina sofre uma dilatação térmica tentando a expansão, mas a temperatura do cilindro ainda é baixa neste estágio, menor que 500°C. Durante este estágio, o aço ainda não apresenta uma condição de fácil expansão, como resultado, tensões são geradas no cilindro. O aumento de temperatura irá causar um aumento de tensões compressivas na superfície, na faixa de temperatura entre 520°C e 750°C, assim o aço sofrerá uma expansão plástica volumétrica e haverá redução das tensões. Quando a temperatura excede os 850°C, a superfície do cilindro irá expandir, e o diâmetro da parte aquecida irá aumentar em relação ao diâmetro inicial. Isto é devido ao fato do limite de escoamento na superfície ser consideravelmente menor, assim o material irá escoar plasticamente, como consequência, as tensões na superfície irão diminuir significativamente.<sup>(10)</sup> Após o fluido de resfriamento é pulverizado na superfície, se este resfriamento for eficiente irá causar a formação de martensita na superfície. A formação da martensita causa uma expansão volumétrica em relação ao núcleo do material, formando tensões residuais compressivas na superfície, para camadas mais profundas há uma complexa formação de tensões variando de compressivas a trativas formando um equilíbrio entre elas. Todo mecanismo exemplificado na Figura 7 mostrou-se muito semelhante aos resultados obtidos na difração de nêutrons, mostrando a coerência nos resultados obtidos.

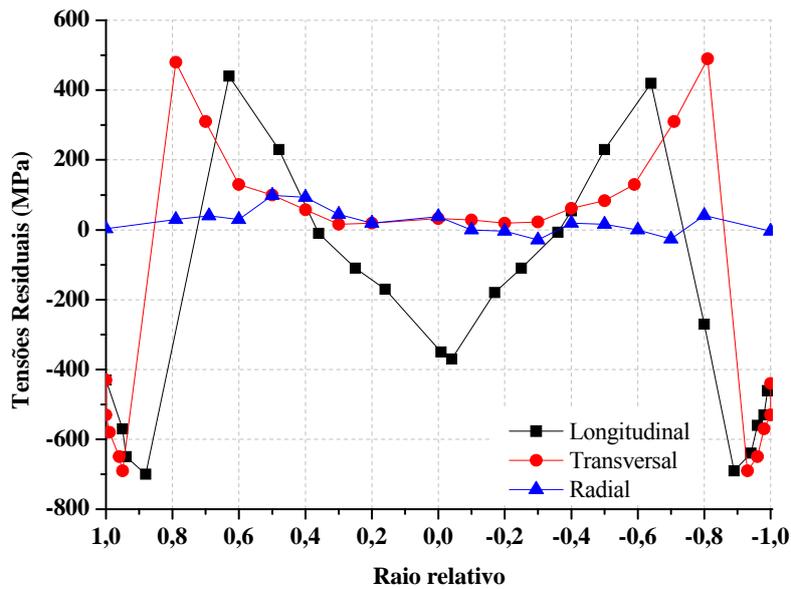


Figura 6 - Tensões residuais superficiais, interface de têmpera, camada temperada de 0,63 mm.

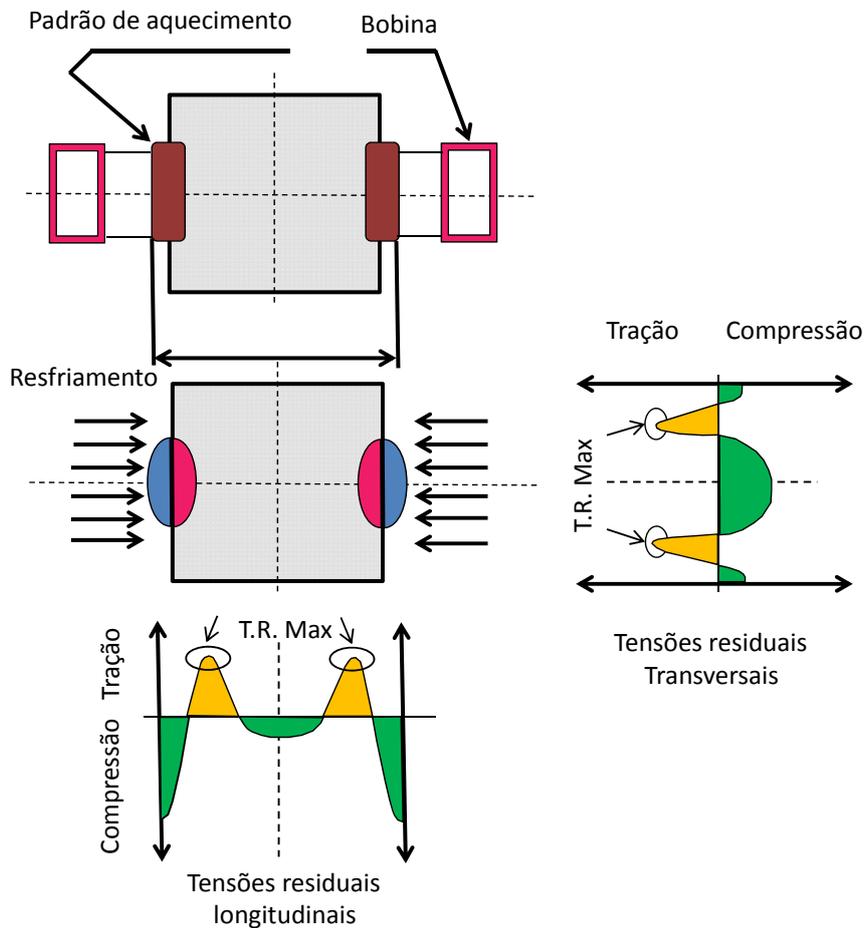


Figura 7 – Distribuição de tensões residuais após a têmpera por indução. T.R. Max = Tensões Residuais máximas.<sup>(10)</sup>

#### 4 CONCLUSÕES



- Como esperado a têmpera por indução induz tensões residuais compressivas significativamente elevadas na superfície da barra temperada;
- Na Interface entre regiões temperadas superficialmente e não temperadas ocorre um pico de tensões trativas que, no caso de têmpera superficial para uma profundidade de 1,21 mm, atingiu valores da ordem de 350 MPa. Isto sugere que um cuidado especial deve ser tomado, visando a cobertura completa do comprimento da haste pela camada temperada. Há diferenças significativas de tensões residuais ao longo das amostras analisadas e também nas diversas posições periféricas analisadas.
- Foram observadas variações de dureza nas duas condições de têmpera por indução analisadas.
- A velocidade do indutor tem forte influencia nas tensões residuais, camada temperada e dureza de camada.

### 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, CNPq e DFG pelo suporte financeiro para a realização deste projeto. Os autores também agradecem o Helmholtz-Zentrum Berlin pela disponibilização do equipamento para medição de tensões residuais por difração de nêutrons.

### REFERÊNCIAS

- 1 LU, J.; SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS (U.S.). Handbook of measurement of residual stresses. Lilburn, GA Upper Saddle River, NJ: Fairmont Press ; Distributed by Prentice Hall PTR, 1996. xv, 238 p.
- 2 HAUK, V.; BEHNKEN, H. Structural and residual stress analysis by nondestructive methods : evaluation, application, assessment. Amsterdam: Elsevier, 1997. xiv, 640 p.
- 3 BERTINI, L.; FONTANARI, V. Fatigue behavior of induction hardened notched components. International Journal of Fatigue, v. 21, n. 6, p. 611-617, Jul 1999.
- 4 MELANDER, A.; LARSSON, M. The effect of stress amplitude on the cause of fatigue crack initiation in a spring steel. International Journal of Fatigue, v. 15, n. 2, p. 119-31, Mar 1993.
- 5 BREEN, D.H.; WENE, E.M (1979). Fatigue in Machine Structures (ground vehicles), Fatigue and Microstructures, ASM, Metals Park (OH), p.88.
- 6 WITHERS, P. J.; BHADSHIA, H. K. D. H. Overview - Residual stress part 1 - Measurement techniques. Materials Science and Technology, v. 17, n. 4, p. 355-365, Apr 2001.
- 7 HUTCHINGS, M. T. Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005. 401 p.
- 8 FITZPATRICK, M. E.; LODINI, A. Analysis of residual stress by diffraction using neutron and synchrotron radiation. London; New York: Taylor & Francis, 2003. xi, 354 p.
- 9 ROCHA, A. S., NUNES, R. M., METZ, M., HIRSCH, T. Analysis of the distortion potential in AISI 1048 steel bars induced by a combined drawing-straightening process. In: 2nd International Conference on Distortion Engineering, 2008, Bremen. 2nd International conference on distortion engineering. Bremen: University of Bremen, 2008. v.1. p. 13 – 20.
- 10 RUDNEV, V. Handbook of induction heating. New York: Marcel Dekker, 2003. xi, 777 p.