

## **ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS POR MÉTODOS MICROMAGNÉTICOS E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DE BARRAS DE AÇO LAMINADAS A FRIO COM FOCO EM INTEGRIDADE ESTRUTURAL<sup>1</sup>**

Allan Romário de Paula Dias<sup>2</sup>

Rafael Menezes Nunes<sup>3</sup>

Toni Roger Schifelhain<sup>4</sup>

Thomas Gabriel Rosauero Clarke<sup>5</sup>

### **Resumo**

A influência das tensões residuais no comportamento mecânico dos materiais é bem conhecida e deve ser levada em consideração na avaliação da integridade estrutural de equipamentos, componentes mecânicos e estruturas de engenharia. No entanto, a caracterização das tensões residuais nem sempre é simples e a seleção do método de medição tem importância fundamental para a determinação dos valores de tensão de maneira precisa e eficiente. Fatores como custo e tempo de ensaio, muitas vezes inviabilizam a inspeção de um grande número de componentes, principalmente em âmbito industrial. A partir deste panorama, as técnicas de medição por métodos micromagnéticos estão sendo desenvolvidas para um aumento de produtividade, minimizando o tempo despendido para a inspeção dos componentes. Os métodos micromagnéticos tem como vantagem a rapidez de medição, porém é necessário uma comparação com valores padrão de tensões residuais utilizando-se outra técnica. Neste trabalho realizou-se uma avaliação das tensões residuais superficiais em arames de aço ABNT 1060 via difração de raios-X e comparação com os parâmetros micromagnéticos medidos no material. A partir dos resultados obtidos por difração de raios-X, realizou-se uma calibração para utilização do método micromagnético para comparação e verificação dos resultados. Ensaios preliminares indicam a viabilidade de aplicação dos métodos micromagnéticos para medição de tensões residuais neste tipo de componente.

**Palavras-chave:** Tensões residuais; Métodos micromagnéticos; Difração de raios-X; Ensaios não destrutivos.

## **RESIDUAL STRESS ANALYSIS BY MICRO-MAGNETIC METHODS AND X-RAY DIFFRACTION OF STEEL COLD ROLLED BARS AIMED TO STRUCTURAL INTEGRITY**

### **Abstract**

The residual stresses in mechanical components are directly correlated to its fatigue life. At large, the methods for residual stress determination are expensive, especially if the cost of the equipment and the time needed for sample preparation and analysis are considered. Those factors make the inspection of a large number of parts in a short period feasible, especially in industrial environments. Micro magnetic methods for non-destructive testing have been studied as a way to improve productivity. However, it is an indirect method, its calibration with a standard value obtained from a direct method for residual stress being needed. In this report we have evaluated the surficial residual stress in AISI 1060 rods by X-ray diffraction and we compared the results with micro magnetic methods. Starting from this point the equipment for micro magnetic inspection was calibrated with data from the X-ray diffraction and we carried an inspection out the stressed rods. Previously tests had been demonstrated a good correlation between those methods.

**Key words:** Residual stress; Micro magnetic methods; X-ray diffraction; Non-destructive test.

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

<sup>2</sup> Eng. de Materiais. Analista técnico. Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro metalúrgico. Dr. Pesquisador em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. LAMEF, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro mecânico. Dr. Pesquisador em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. LAMEF, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro de materiais. Dr. Professor. Depto. de Metalurgia, LAMEF, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As macrotensões residuais em componentes mecânicos originam-se do gradiente de tensões imposto durante as operações de produção desses componentes – corte, tratamentos térmicos, soldagem, retífica, etc – e podem ser de natureza trativa, ou compressiva.

Quando um dado componente é submetido a algum esforço, as tensões residuais somam-se às tensões externas, podendo aumentá-las, ou diminuí-las de acordo com sua orientação. Quando há tensões compressivas em um material, essas colaboram positivamente com a sua vida em fadiga. Por outro lado, na presença de tensões residuais trativas, sua vida em fadiga tende a reduzir-se.<sup>(1)</sup>

Com o desenvolvimento da indústria pesada e offshore, tem-se incentivado a busca por métodos de inspeção por ensaios não destrutivos para estimar-se o estado de tensões de um componente metalúrgico que seja rápido e portátil. Hoje, o método internacionalmente aceito de determinação do estado de tensões residuais é a difração de raios-X.<sup>(2)</sup> No entanto, ainda são raros equipamentos dessa natureza portáteis, que possam ser levados a campo, exigindo que, na maioria das vezes, a análise seja feita em ambiente de laboratório e as peças inspecionadas tenham restrições dimensionais.

Sabe-se que a estrutura de domínios magnéticos de um material ferromagnético, como o aço, é fortemente influenciada por defeitos microestruturais – elementos de segunda fase, discordâncias e tensões residuais.<sup>(3)</sup> Diversos autores tem estudado a influência de variáveis metalúrgicas e mecânicas na estrutura de domínios magnéticos e indicado direções para o desenvolvimento de técnicas de caracterização de materiais através de seu comportamento magnético.<sup>(4,5)</sup>

Nesse contexto, inserem-se os métodos micromagnéticos, aqui representados pela Análise de impedância de correntes parasitas (AICP), Análise da Permeabilidade Incremental (API) e Análise harmônica do campo tangencial (AHCT). Os métodos micromagnéticos surgem dessa estreita relação entre a estrutura de domínios magnéticos do material e sua condição microestrutural. Tem-se na Tabela 1 a relação dos parâmetros micromagnéticos analisados para cada técnica.

**Tabela 1.** Relação dos parâmetros micromagnéticos para as técnicas estudadas

| Técnica | Parâmetro   | Símbolo     |
|---------|---|-------------|
| AHCT    | Amplitude da harmônica de ordem n {n=1, 3, 5, 7}          | $A_n$       |
|         | Fase da harmônica de ordem n                              | $Ph_n$      |
|         | Amplitude harmônica                                       | UHS         |
|         | Distorção harmônica                                       | K           |
|         | Força coerciva  | Hco         |
| API     | Harmônicas superiores com $H_{ex}=0$                      | $H_{RO}$    |
|         | Máxima permeabilidade incremental                         | $\mu_{MAX}$ |
|         | Permeabilidade magnética residual ( $H_{ext}=0$ )         | $\mu_r$     |
| AICP    | Força do campo coercivo para $\mu_{MAX}$                  | Hc $\mu$    |
|         | Parte real do plano de impedância das correntes parasitas | Re $_n$     |
|         | Parte imaginária do plano de impedância                   | Im $_n$     |

Nesse trabalho, buscou-se avaliar a viabilidade da aplicação da técnica micromagnética como ferramenta de ensaios não destrutivos para a determinação

do estado de tensões do material quando deformado por operações corriqueiras em campo, como no caso da fixação de elementos de conjuntos ancoráveis por ação mecânica, operação muito típica na indústria *offshore*, além de aplicar um estado complexo de tensões ao componente. Como objeto de estudo, foram utilizadas amostras de aço AISI 1060 laminadas a frio com diferentes estados de tensões residuais imposto pela aplicação de diferentes níveis de deformação plástica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, lançou-se mão de barras de aço AISI 1060 laminado a frio e submetidas a um tratamento térmico para alívio de tensões. Após tratadas, as barras foram dobradas com diferentes níveis de deformação plástica, de modo a gerar diferentes níveis de tensões residuais (Tabela 2). Após, foi executada a análise de tensões pela técnica de difração de raio-X, com um difratômetro de raios-X GE, *modelo Seifer Charon XRD M*, equipado com um tubo emissor de radiação K $\alpha$ Cr e detector linear. Então, utilizou-se um “*Analísador Micromagnético de Tensões e Microestrutura 3MA-II*” fornecido pelo instituto Franhofer para a comparação dos dados obtidos por difração de raios-X.

**Tabela 2.** Nomenclatura e condição aplicada a cada corpo de prova

| Código | Condição  |
|--------|---|
| 90R10  | Curvatura de 90° com raio de 10 mm e retorno até 15°  |
| 133R30 | Curvatura de 133° com raio de 30 mm e retorno até 15° |

Para a inspeção das amostras, foi executada uma regressão linear dos resultados para tensão preditos pelos parâmetros micromagnéticos e cruzados com as medidas obtidas por difração de raios-X, obtendo-se além da reta, os coeficientes para os parâmetros mais dependentes do estado de tensões do material, obtidos por regressão multivariável. Essa regressão linear foi obtida depois de 60 medidas por pontos sendo que cada ponto constava da média de 3 ciclos de magnetização por ponto.

Ainda, as medidas foram efetuadas com o campo magnético orientado longitudinalmente à direção de laminação com os parâmetros de ajuste apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Parâmetros de ajuste para inspeção micromagnética

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Campo magnético externo           | 50 A/cm       |
| Frequência de excitação           | 300 Hz        |
| Ganho RMB                         | 6 db          |
| Ganho API                         | 10 db         |
| Frequência de correntes parasitas | 5 kHz, 10 kHz |

A caracterização de tensões residuais utilizando a método DRX foi realizada em um difratômetro  $\psi$  (modo de inclinação lateral) marca GE modelo Seifert Charon XRD M – Research Edition, equipado com tubo de raios-X de Cr-K $\alpha$  com abertura primária de 2 mm de diâmetro e um detector linear de 20° marca GE modelo Meteor 1D.

As tensões residuais foram medidas na direção longitudinal da amostra e calculadas pelo método de  $\sin^2 \psi$  com  $E = 210000$  MPa e  $\nu = 0.28$  utilizando o software GE Analyze.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Determinação dos Parâmetros Micromagnéticos

Para a determinação correta dos parâmetros micromagnéticos empregados na inspeção, utilizou-se o campo de saturação para o ferro, 50 A/cm e a frequência de excitação do campo magnético externo foi determinada de acordo com a profundidade de penetração padrão do campo magnético para o material,  $\delta$  (Figura 1).

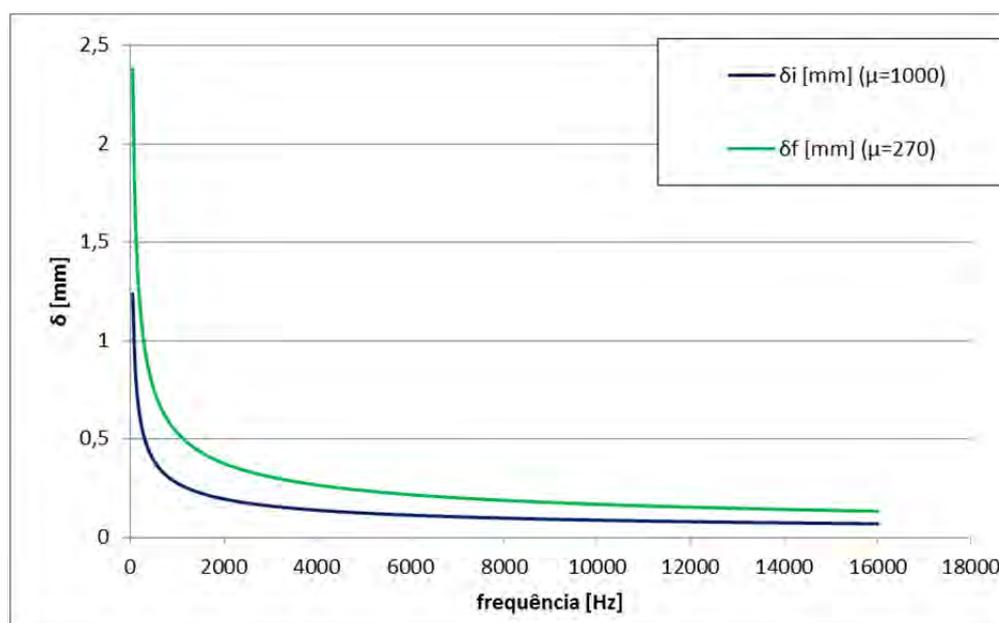


Figura 1. Profundidade de penetração padrão do campo magnético para o ferro.

Os dados são referentes à máxima e mínima permeabilidade magnética para o aço laminado, visto que essa propriedade é variável com o campo magnético e a máxima verifica-se para valores baixos de campo magnético externo e a mínima, quando o material já está próximo à sua saturação magnética.<sup>(3)</sup>

#### 3.2 Tensões Residuais Antes do Dobramento

Inicialmente, foi determinado o perfil de tensões residuais das amostras submetidas ao tratamento térmico. Na Figura 2 são apresentadas as tensões residuais e o FWHM (*Full width at half maximum*) pode ser traduzido para o português como “largura a meia altura” do pico de difração, e é um indicativo de deformação no material, pois quanto maior a deformação ou dureza no material maior será o alargamento do pico de difração e conseqüentemente maior o FWHM.

O tratamento de alívio de tensões demonstrou-se eficiente, reduzindo as tensões residuais a níveis bastante baixos. Ainda, é importante verificar que virtualmente não há variação do alargamento dos picos de difração ao longo das barras, FWHM.

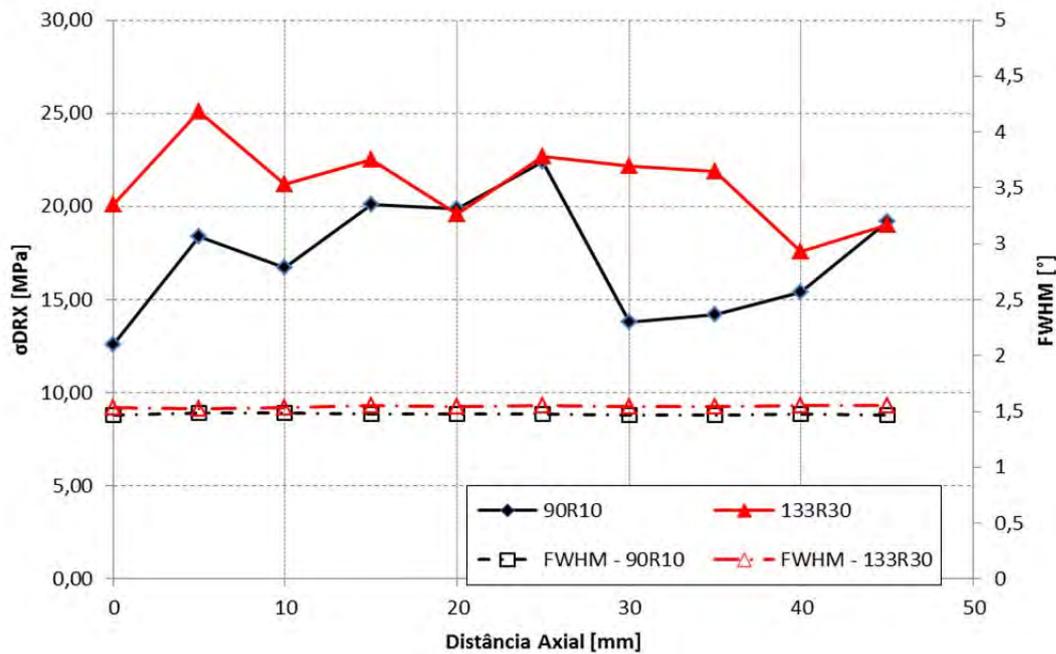


Figura 2. Perfil de tensões residuais das amostras submetidas ao alívio de tensões.

### 3.3 Tensões Residuais Após o Dobramento

Os perfil de tensões residuais após o dobramento são apresentados nos gráficos das Figuras 3 e 4 para a amostra 90R10 e 133R30, respectivamente.

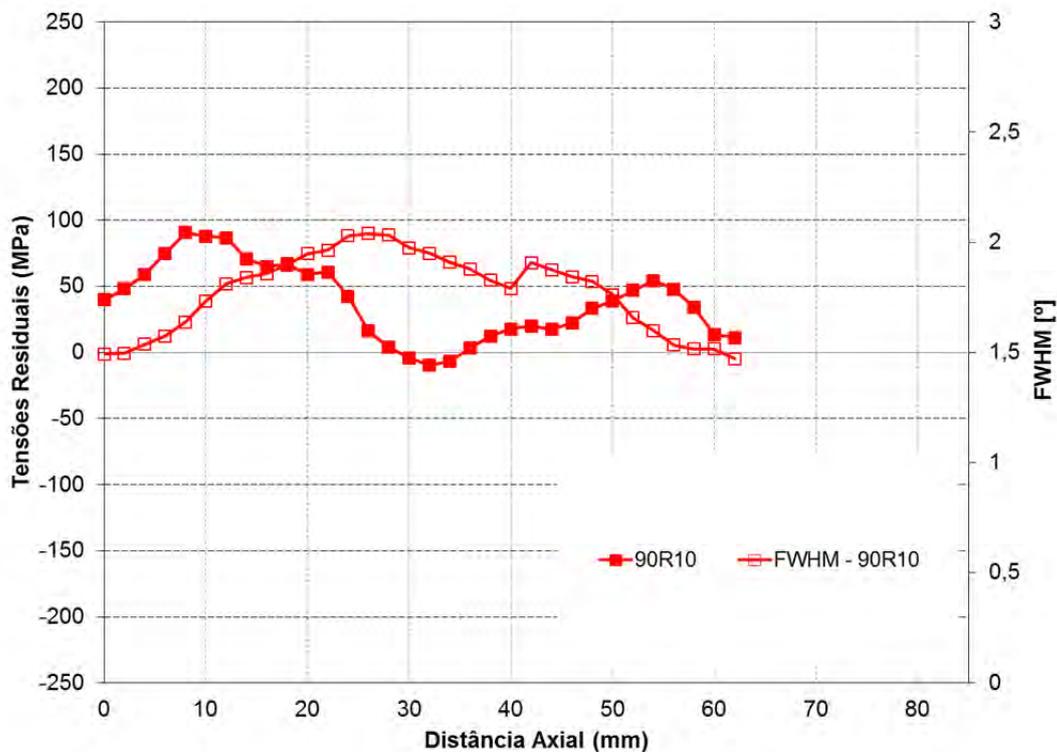


Figura 3. Perfil de tensões residuais para a amostra 90R10.

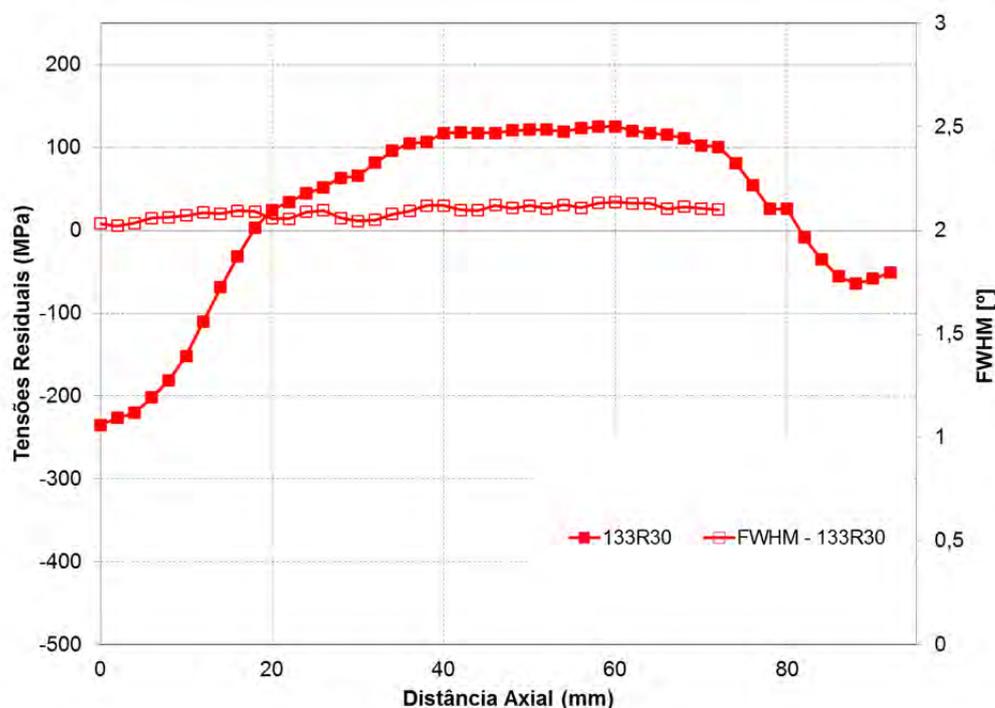


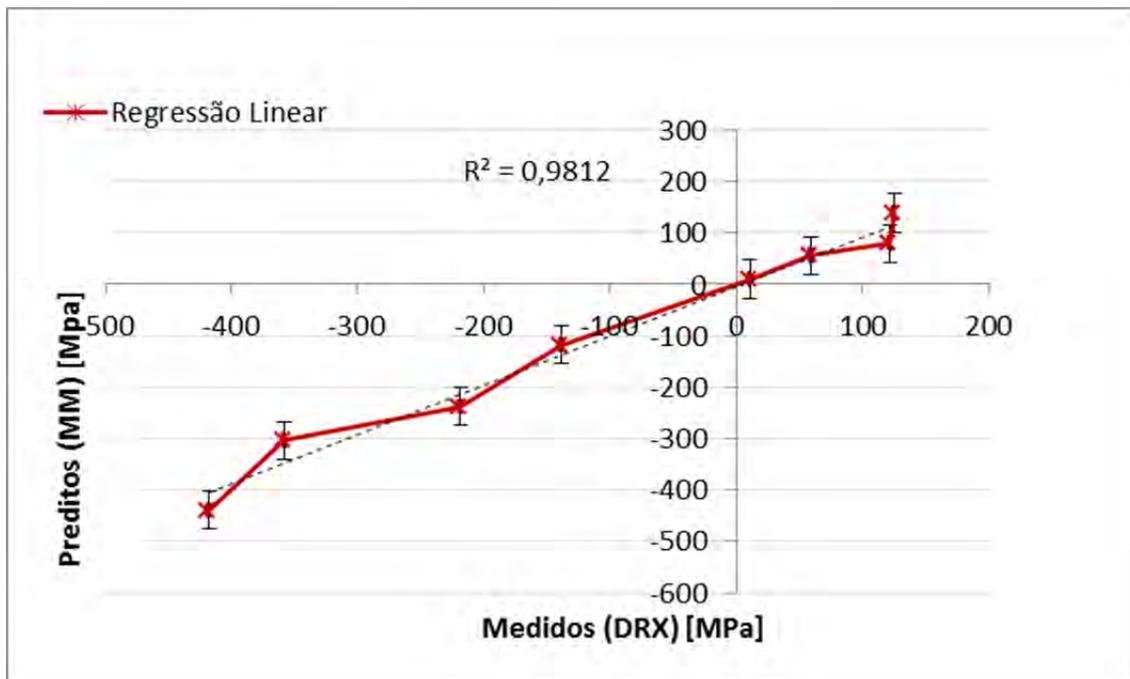
Figura 4. Perfil de tensões residuais para amostra 133R30.

O dobramento das amostras foi efetivo para os objetivos do trabalho, uma vez que permitiu a geração de diferentes níveis de tensões residuais distribuídos em forma de gradientes diferentes ao longo de cada amostra. A amostra 90R10, submetida a condição menos severa de deformação mecânica, menor grau de curvatura durante o dobramento, apresentou valores menores de tensões residuais, variando entre -10 e 90 MPa. Já para a amostra 133R30, verificou-se uma variação bem maior ao longo da amostra, desde -230 MPa até 120 MPa.

Analisando-se o grau de alargamento à meia altura dos picos de difração, FWHM, é possível verificar que a amostra 90R10 sofreu uma maior texturização, uma maior distorção do retículo cristalino, possivelmente por deformação plástica. Esse fenômeno explica o menor gradiente de tensões ao longo da amostra devido à relaxação das tensões com a deformação.

### 3.4 Correlação Entre os Métodos de Medição

Tendo sido determinado o estado de tensões nas barras, correlacionou-se os dados obtidos com difração de raios-X com os dados micromagnéticos, sendo obtida a reta de regressão linear da Figura 4.



**Figura 5.** Retas de calibração do equipamento para medidas micromagnéticas a partir dos resultados para difração de raios-X em diferentes pontos de tensão.

Os dados apresentaram correlacionados através da reta de regressão linear do tipo  $Y = \beta x_1 + \beta x_2 + \beta x_3 + \dots + \beta x_n$  com coeficientes  $\beta$  constantes na Tabela 4, obtendo-se um erro *RMSE* de aproximadamente 35 Mpa por ponto.

**Tabela 4.** Coeficientes da reta de regressão linear para os parâmetros micromagnéticos

| Parâmetro micromagnético | Coefficiente $\beta$ |
|--------------------------|----------------------|
| A3                       | $4 \times 10^3$      |
| P3                       | $4,62 \times 10^3$   |
| Hco                      | $1,75 \times 10^2$   |
| Hro                      | $-3,39 \times 10^3$  |
| K                        | $-1,79 \times 10^3$  |
| $\mu\Delta_{MAX}$        | $2,94 \times 10^3$   |
| $\mu\Delta_r$            | $-1,33 \times 10^4$  |
| $H_{c\mu}$               | $1,72 \times 10^2$   |
| Re1                      | $1,3 \times 10^5$    |
| Im1                      | $-2,8 \times 10^4$   |
| Re2                      | $-6,5 \times 10^4$   |
| Im2                      | $-1,0 \times 10^5$   |

Ao inspecionarem-se as barras deformadas, quando cruzados os dados entre as medidas micromagnéticas ajustadas através dos dados calibrados equação de coeficientes apresentados na Tabela 4, foram obtidas as correlações das Figuras 6 e 7.

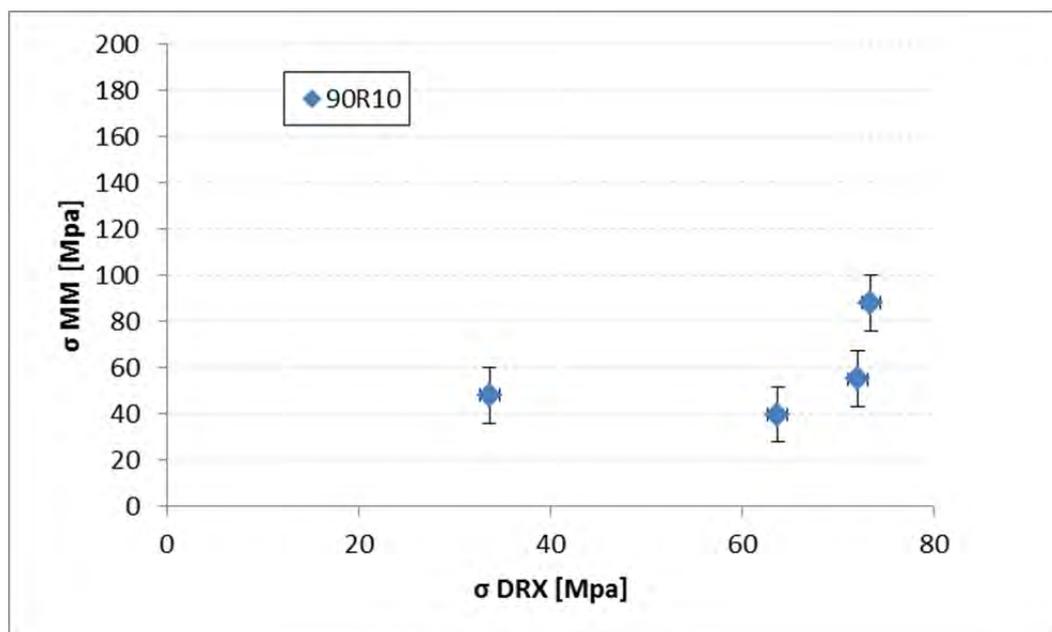


Figura 6. Comparação dos valores para a inspeção micromagnética com os obtidos por DRX da barra 90R10.

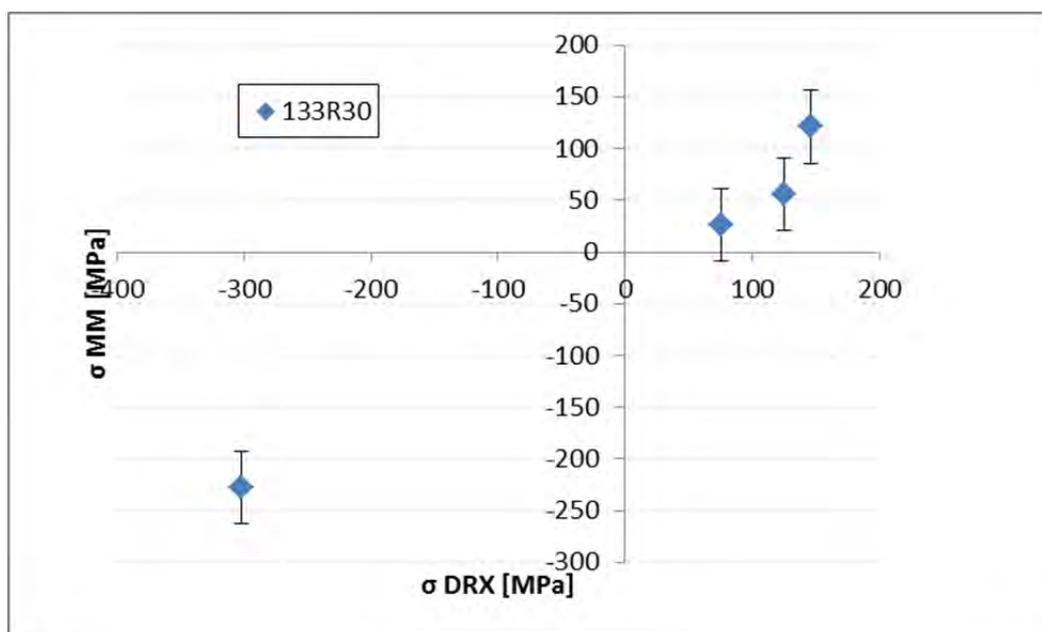


Figura 7. Comparação dos valores para a inspeção micromagnética com os valores de DRX para a amostra 133R30.

Para as medidas da amostra 133R30, obteve-se boa correlação de valores, tanto para tensões altamente compressivas, quanto para as tensões trativas. Já para as medidas de 90R10, a correlação não deu-se linearmente.

Ao comparar-se as medidas de FWHM para as amostras, verifica-se que a amostra 90R10 foi submetida à maior texturização cristalográfica que a 133R30, possivelmente um grau maior de deformação plástica. Este fato, por sua vez, pode mascarar os resultados, pois o material foi microestruturalmente modificado. Assim, isso pode configurar um indício para a variação não linear das medidas dessa amostra, uma vez que o comportamento magnético de um material é diretamente ligado à sua orientação cristalográfica.<sup>(3,4)</sup>

## 4 CONCLUSÃO

A metodologia utilizada para a preparação das amostras mostrou-se adequada, de acordo com os objetivos do trabalho, resultando em amostras com diferentes níveis de tensões residuais distribuídos em forma de gradientes diferentes ao longo de cada amostra.

O método micromagnético apresenta-se como uma ferramenta eficaz para estimar o estado de tensões residuais no material. Entretanto é necessário a correta calibração do equipamento e, ainda, deve-se observar as condições de acoplamento do sensor com a superfície para que haja o correto acoplamento entre as partes, minimizando-se as variações de *lift-off* e *offset*. Uma vez que a garantia desse parâmetro é elementar para a qualidade das medições.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook - Fatigue and fracture. [S.I.]: ASM International, v. 19, 1999.
- 2 TOTTEN, G. E. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. [S.I.]: ASM Internatinoal, 2002.
- 3 CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. Introduction to magnetic materials. 2ª. ed. [S.I.]: IEEE Press, 2009.
- 4 DOBMANN, G. Physical basics and industrial applications of 3MA - Micromagnetic Multiparameter microstructure and stress analysis. ENDE2007. Cardiff: [s.n.]. 2007. p. 1 - 17.
- 5 ASM INTERNATIONAL. Nondestructive inspection for quality control.9ª. ed. [S.I.]: ASM International, v. 17, 1992.