

Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100.

Martins, C. O. D.^a, Strohaecker, T. R.^a, Rocha, A. S.^b, Hirsch, T. K.^b.

Lamef, PPGEM, UFRGS, Brasil IWT, Uni-Bremen, Alemanha
Autor Correspondente: Prof. Dr. Eng. Telmo Roberto Strohaecker
Av. Osvaldo Aranha, 99-6º andar, sala 610. CEP: 90035-190, Porto Alegre-RS-Brasil
Fone/Fax: (51) 33163565, e-mail: telmo@demet.ufrgs.br

RESUMO

Atualmente, sabe-se que nenhum material apresenta-se livre de tensões residuais. Dependendo de suas características, o campo de tensões residuais pode influir positiva ou negativamente no desempenho do componente. Assim torna-se de grande importância o desenvolvimento de métodos experimentais confiáveis para a medida e controle destas tensões. No presente trabalho, uma amostra de anel para rolamento do aço ABNT 52100 foi analisada na direção tangencial por três diferentes métodos. Os resultados obtidos apontam para a necessidade do uso complementar das técnicas de análise. Alguns conceitos básicos a respeito destas técnicas são apresentados, assim como alguns critérios para a seleção e aplicação das mesmas.

Palavras -Chaves: tensões residuais, métodos mecânicos, métodos não-destrutivos.

ABSTRACT

It is well established that residual stress free materials do not exist. Depending on their characteristics, residual stress fields increase or decrease the performance of a component and are responsible for distortion during each step of a manufacturing process. Thus, the development of reliable methods for residual stress measurement becomes very important for material science and engineering. In this work, residual stress measurements of an ABNT 52100 ball bearing steel rings were made using X-ray Diffraction, Micromagnetic and Incremental Hole Drilling Methods. Results are given for the tangential direction only. Each method presented results in an expected range, proving the necessity of the complementary use of different residual stress methods in the materials characterization and for better understanding the influence of these stresses in the materials properties. Some basic concepts about these methods and some criteria for their selection and application are presented.

KeyWords: residual stresses, mechanical methods, non-destructive methods.

1 INTRODUÇÃO

Tensões residuais são aquelas que permanecem em um componente na ausência de forças externas e/ou gradientes de temperatura. Estas tensões são originadas sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou deformação elástica não-homogênea. Elas podem ser classificadas como macro ou microtensões residuais, em função da escala na qual se distribuem e seus efeitos podem ser benéficos ou prejudiciais ao componente, dependendo do sinal, magnitude e distribuição destas tensões [1-7]. As tensões residuais podem melhorar o desempenho dos materiais frente às agressividades do meio externo e reduzir as falhas por fadiga. Porém numa linha de manufatura, as tensões residuais podem gerar distorções no componente, tornando necessária a introdução de uma etapa posterior de processamento da peça no estado endurecido, encarecendo o processo [8]. Assim, para se alcançar uma melhoria significativa no processo, design, controle de produto e desempenho de componentes mecânicos é necessário incorporar informações a respeito das tensões residuais e desenvolver métodos confiáveis para a sua determinação [3].

Até o momento, não existe um método universal de medida das tensões residuais capaz de resolver todos os problemas, a baixo custo, da melhor maneira possível [3]. A técnica a ser utilizada deve ser selecionada com base numa série de parâmetros influenciados pelas características do componente e o tipo de medida a ser efetuada. Estes parâmetros baseiam-se

- 1) na natureza do componente;
- 2) no tipo de tensões residuais presentes no componente;
- 3) no gradiente de tensões residuais;
- 4) na geometria do componente;
- 5) em onde a medida será realizada (em campo ou no laboratório);
- 6) no tipo de intervenção (método destrutivo ou não-destrutivo);
- 7) no tempo disponível para a medida e apresentação dos resultados;
- 8) na precisão e a repetibilidade do método;
- 9) e no custo final da medida [3].

O presente trabalho visa à análise das tensões residuais presentes em anéis usinados para rolamento do aço ABNT 52100 através dos métodos de medida das tensões residuais por Difração de raios-X, Micromagnético e pelo Método do Furo Cego Incremental.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Material

A composição química média, em peso percentual, dos aços ABNT 52100 utilizados neste trabalho é: $C < 1,1$, $0,15 < Si < 0,35$, $0,25 < Mn < 0,45$, $P < 0,025$, $S < 0,02$, $1,3 < C < 1,60$ [9].

As propriedades destes aços no estado usinado que foram consideradas mais relevantes para este trabalho são: Tensão de escoamento ($> 500\text{MPa}$), Tensão de ruptura ($> 900\text{MPa}$), Dureza (20–26 Rockwel C), Condutividade elétrica ($2,86 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$) e Permeabilidade elétrica relativa (80) [10].

As dimensões do anel estão representadas na Figura 1a, onde: D_{int} é o diâmetro interno, sendo este de 133mm; D_{ext} é o diâmetro externo, sendo este de 145mm; e a largura do anel é de 26mm. A Figura 1b apresenta a microestrutura destes anéis. Percebe-se que a microestrutura apresentada é de uma matriz ferrítica com os a cementita esferoidizada ideal para facilitar a usinagem destes materiais

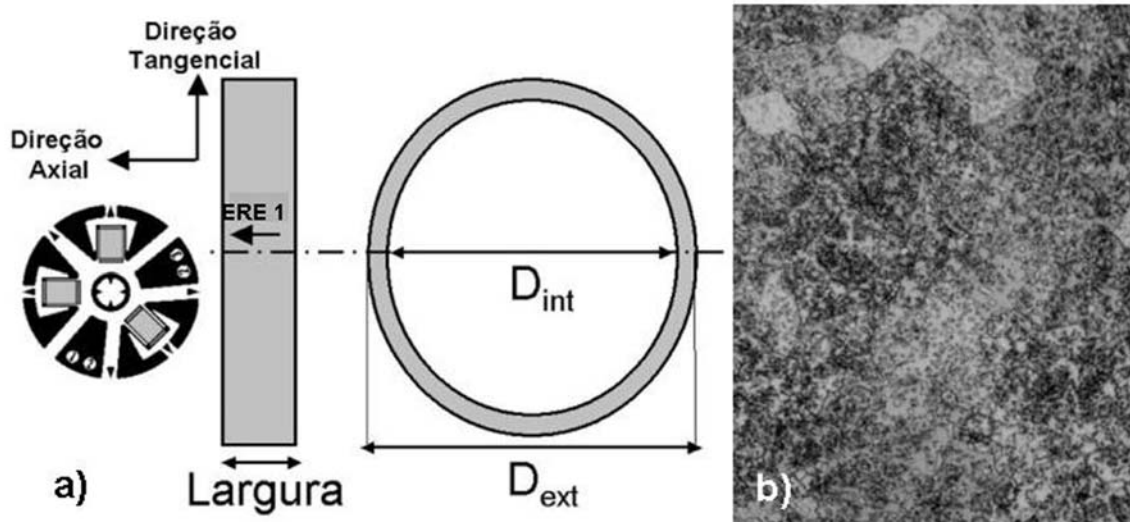


Figura 1: Dimensões e microestrutura (magnificação de 1000 vezes) dos aços ABNT 52100 no estado usinado.

2.2 Análise das Tensões Residuais por Difração de raios-X

Na análise das tensões residuais por difração de raios-X a variação no retículo cristalino, induzida pela presença de tensões, é medida com base na lei de Bragg e as tensões residuais são calculadas assumindo-se que a distorção no ocorre no regime linear elástico [1,4,6,11]. Esta é uma técnica não-destrutiva que, devido à forte absorção dos raios-X pela matéria, é limitada às camadas superficiais onde estes percorrem distâncias da ordem de $10 \mu\text{m}$.

O volume analisado depende do grau de penetração e da área do feixe incidente na amostra [1,11].

Foram realizadas trinta e seis medidas superficiais de tensões residuais por difração de raios-X na direção tangencial da amostra (Figura 1a), sendo estas espaçadas a uma distância angular constante de 10° .

As medidas foram realizadas em um difratômetro desenvolvido no IWT–Bremen, através da técnica do $\sin^2\psi$. A radiação incidente foi escolhida buscando a evitar a fluorescência da amostra reduzindo o ruído de fundo de escala do difratograma [1,4,11]. Os parâmetros mais relevantes destas análises foram:

A radiação incidente ($\text{CrK}\alpha$), o volume analisado ($4,5 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$), o pico de difração analisado (156° Fe), a variação angular 2θ ($151 < 2\theta < 160^\circ$), o tempo de medida (2 horas por ponto analisado), quinze ângulos ψ distribuídos de -45° a $+45^\circ$, em uma distribuição equidistante em $\sin^2\psi$, com a utilização de um filtro de vanádio.

Após as medidas na superfície, dois perfis de tensões residuais foram medidos nas posições angulares de 160° e 210° por difração de raios-X com remoção de camada, onde a remoção foi realizada por eletropolimento em solução ácida incrementalmente até uma profundidade de $300\mu\text{m}$.

2.3 Análise das Tensões Residuais pelo Método Micromagnético

A densidade de fluxo magnético num material ferromagnético, sujeito a um campo magnético oscilante, varia de forma descontínua, em pequenos incrementos chamados saltos Barkhausen. A Figura 2 mostra o laço de histerese para um material ferromagnético onde B é a densidade de fluxo magnético e H é a intensidade do campo magnético oscilante aplicado [2, 12].

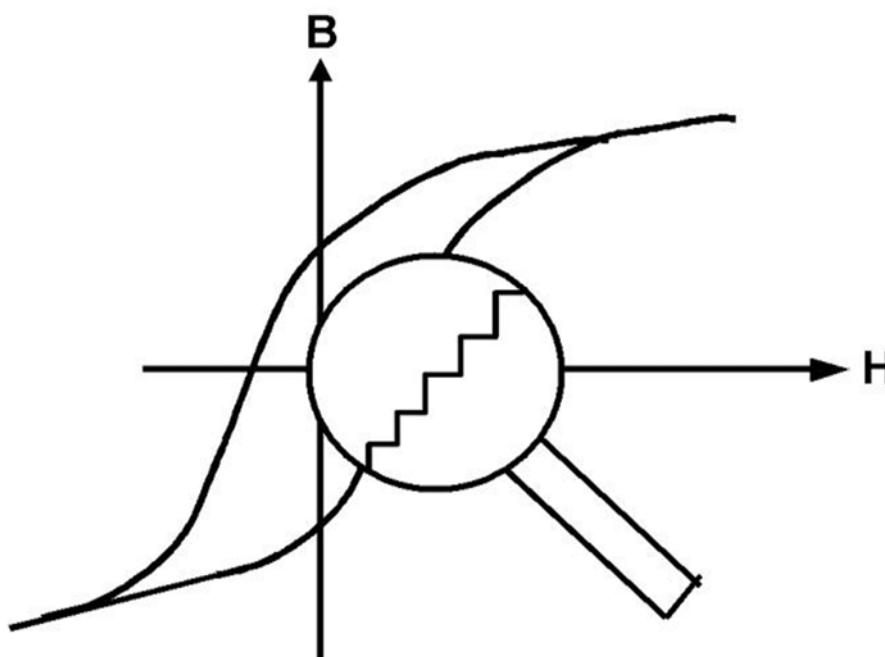


Figura 2: Representação do laço de Histerese para um material ferromagnético.

Estes saltos estão diretamente relacionados aos movimentos das paredes dos domínios magnéticos e ao processo de rotação que ocorrem no interior do domínio durante a magnetização de alta intensidade [5,12]. Se colocarmos uma bobina indutora na superfície da amostra, durante o movimento dos domínios magnéticos, esta captará um pulso elétrico decorrente da mudança da orientação dos domínios chamado de ruído Barkhausen. Este ruído é fortemente influenciado pelo estado de tensões residuais e pela microestrutura do material [4,6,13].

Para um material ferromagnético, magnetostrictivamente positivo, a presença de tensões residuais compressivas reduz a taxa de alinhamento dos domínios magnéticos na direção do campo magnético externo e a intensidade do ruído Barkhausen produzido, para tensões trativas o efeito é o oposto [4].

Como este é um método indireto, uma etapa posterior de calibração deve ser efetuada a fim de se ter à relação entre os sinais medidos e a magnitude das tensões presentes no componente. Esta calibração pode ser efetuada através de ensaios mecânicos ou através de outros métodos de determinação das tensões residuais tais como difração de raios-X ou pelo método do furo [4].

O volume analisado depende da área do sensor em contato com a amostra e a frequência do sinal gravado a qual pode ser relacionada com a profundidade de emissão do sinal [12].

As medidas Micromagnéticas foram realizadas em um equipamento Ferrotest Dur III fabricado pela Tiede, nos mesmos pontos das medidas por difração de raios-X, utilizando-se dois filtros de frequência de 10 e 0,4MHz, relativos às profundidades aproximadas de 10 e $52\mu\text{m}$ respectivamente. Os demais parâmetros utilizados nestas

análises são: Intensidade do Campo magnético (100A/cm), frequência de oscilação do campo magnético (100Hz), desamplificação do sinal magnético (-6dB), amplificação do sinal magnético medido (30dB para a frequência de 10 MHz e 10 dB para a frequência de 0,4MHz), tempo de medida (6 minutos por ponto analisado) e a área de contato do sensor magnético (28,3mm²).

2.4 Análise das Tensões Residuais pelo Método do Furo Cego Incremental

Na análise das tensões residuais pelo Método do Furo Cego Incremental um pequeno furo é introduzido na superfície do componente e a deformação aliviada é registrada por um extensômetro especial ou por um sensor óptico [2]. O diâmetro médio do furo utilizado é de 1,8mm e a profundidade analisada depende das dimensões do extensômetro, sendo em geral 40% do seu diâmetro (Figura 3) [2].

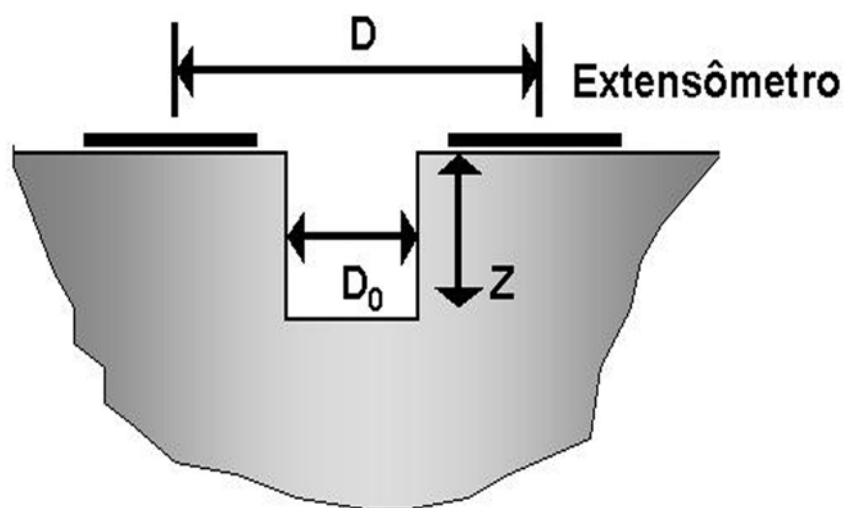


Figura 3: Relação entre as dimensões do extensômetro e as dimensões do furo onde D é o diâmetro médio do extensômetro, D₀ o diâmetro do furo e Z a sua profundidade final.

Durante o processo de usinagem o extensômetro especial grava as deformações a cada passo em três direções conhecidas. A partir destes dados é possível calcular as tensões residuais assumindo-se um estado plano de tensões [2]. As medidas pelo Método do Furo Cego Incremental foram realizadas no equipamento MTS 3000 da HBM onde dois furos de 2mm de profundidade, nas posições de 0° e 140°, foram usinados em 35 passes distribuídos polinomialmente segundo a Equação 1: $Z_n = 8 \times 10^{-4} N + 2,86 \times 10^{-2} N - 3 \times 10^{-4}$ (onde Z_n é a profundidade da medida, e N é o número do passe correspondente). o método de calculo utilizado foi o método da Integral de Schajer [2,3]. Os demais parâmetros relevantes destas medidas foram: Velocidade de avanço da broca (0,07mm/min), tipo de extensômetro utilizado (MM EA-0,62RE-120), diâmetro médio do furo (~1,9mm), diâmetro da broca (1,8mm), tempo de medida (1 hora por furo), sistema de usinagem do furo (turbina de alta velocidade), com uma seqüência automática de usinagem do furo.

3 RESULTADOS

As Figuras a seguir apresentam os resultados obtidos para os anéis usinados do aço ABNT 52100. Estes anéis foram usinados incrementalmente, até 1mm de profundidade, com uma velocidade de corte de aproximadamente de 300 m/min.

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados obtidos através do Método de difração de raios-X. A distribuição de tensões residuais encontrada é típica de componentes usinados [14]. A presença de tensões residuais trativas na superfície (Figura 4) é devido ao aquecimento da peça durante o processo de usinagem. Porém percebe-se que estas se distribuem apenas nas camadas mais superficiais não apresentando grande variação em outras profundidades. A baixo da superfície (Figura 5), a presença de tensões residuais compressivas é devido à superposição das tensões residuais originadas pela deformação plástica localizada (causada pela remoção de material e pelo contato da ferramenta com a peça) e às tensões residuais pré-existentes no componente [14].

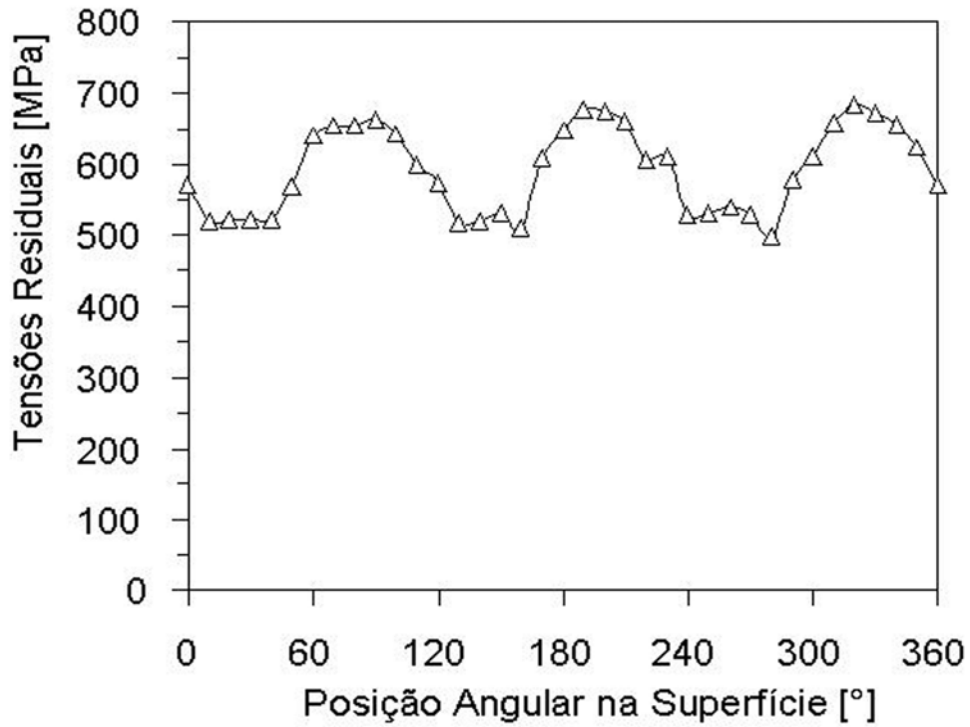


Figura 4: Resultados das análises superficiais das tensões residuais através do Método de difração de raios-X.

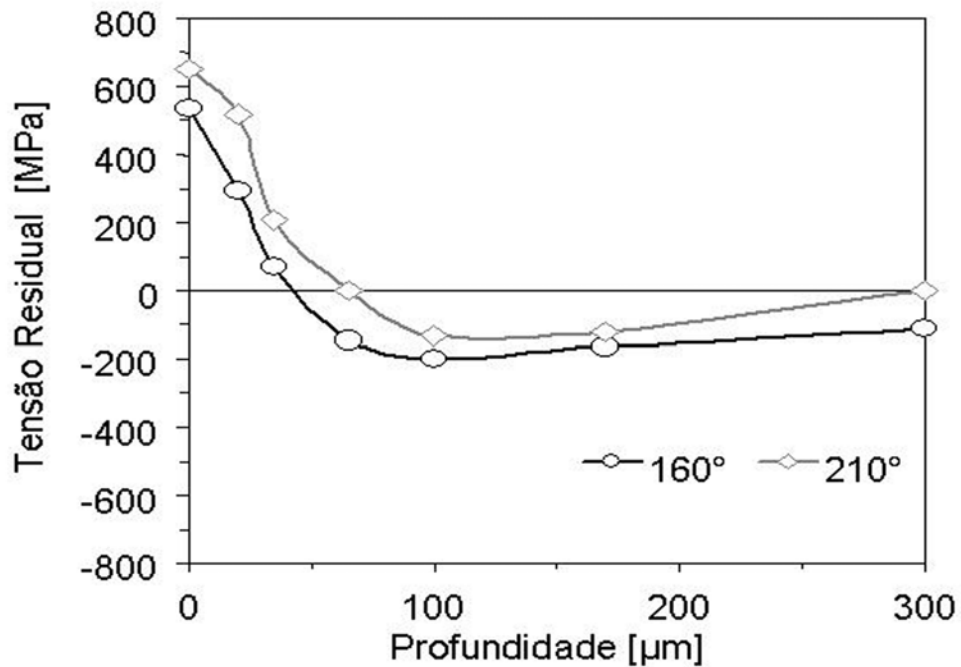


Figura 5: resultados das análises da variação das tensões residuais com a profundidade através do Método de difração de raios-X.

A Figura 6 apresenta os resultados das medidas por realizadas pelo Método Micromagnético. Percebe-se que o sinal Barkhausen (M_{max}) segue a distribuição encontrada no método de difração de raios-X para a frequência de

10MHz, apresentando-se constante na frequência de 0,4MHz. A Coercitividade (H_{cm}) não apresentou grande variação nas medidas realizadas, mostrando ser este um parâmetro mais dependente da variação microestrutural do material [4].

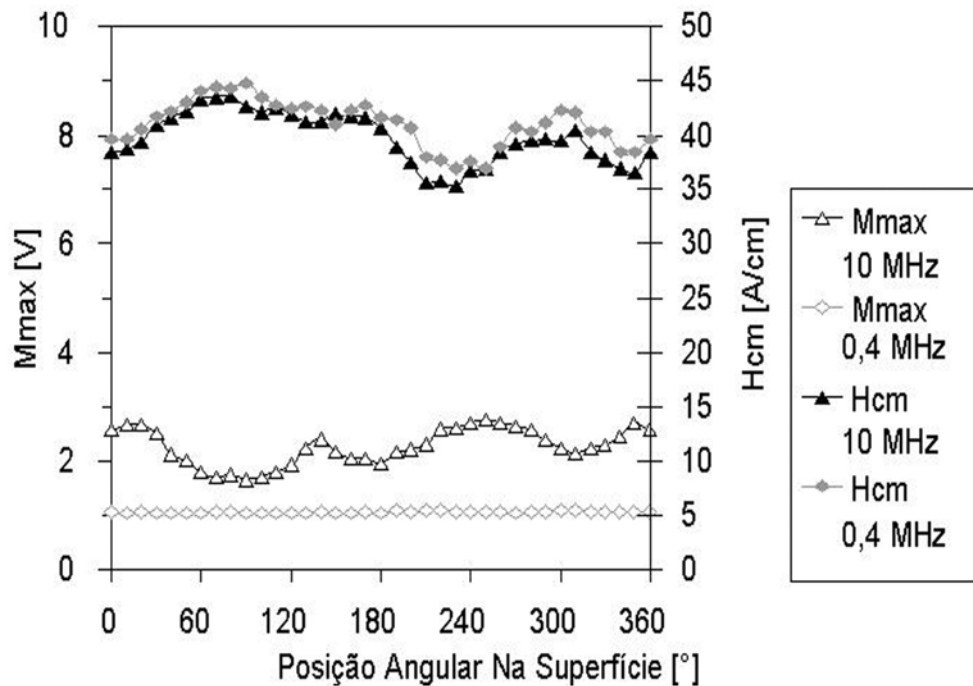


Figura 6: Resultados das medidas micromagnéticas.

Utilizando-se alguns valores dos resultados obtidos por XRD e com o auxílio de um software de regressão linear, pode-se efetuar a calibração do método magnético obtendo-se as seguintes equações para as tensões residuais (σ_{MM}) calculadas por este método:

$$\text{Equação 1 } \sigma_{MM}(10 \text{ MHz}) = 2091 - 261,36 * M_{\max}(10 \text{ MHz}) - 22,75 * H_{cm}(10 \text{ MHz})$$

$$\text{Equação 2 } \sigma_{MM}(0,4 \text{ MHz}) = 72,97 - 10,18 * M_{\max}(0,4 \text{ MHz}) - 0,42 * H_{cm}(0,4 \text{ MHz})$$

Os resultados, Figura 7, apresentam-se satisfatórios quando comparados com os resultados de difração de raios-X. É importante observar que, enquanto a difração de raios-X fornece uma medida mais localizada na superfície, o método Micromagnético fornece como resultado um sinal médio, proveniente de um maior volume analisado, distribuído a partir da superfície até a profundidade estimada.

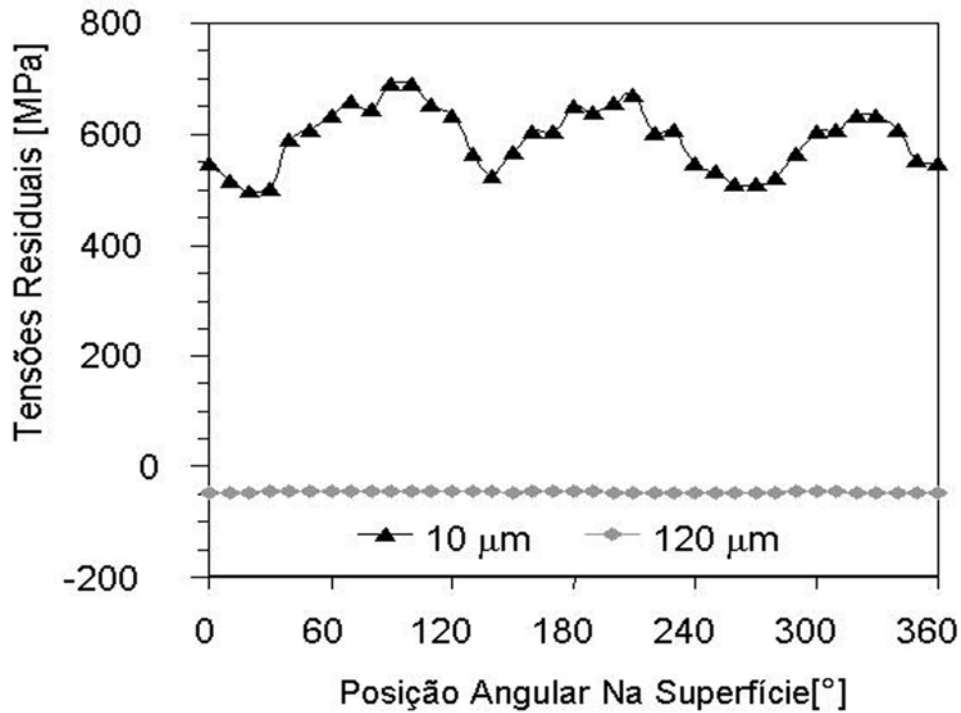


Figura 7: Resultados do método micromagnético, após a calibração por difração de raios-X.

Apesar do furo ter sido realizado até uma profundidade de 2mm, o cálculo das tensões residuais para Método do Furo Cego Incremental só foi possível até a profundidade de 1 mm como mostra a Figura 8. Isto é devido às limitações do método onde as medidas das deformações só são efetivas até uma profundidade referente a 40% do diâmetro médio da roseta extensométrica utilizada. Porém, percebe-se uma distribuição de tensões não-homogênea onde as tensões apresentam valores trativos em regiões próximas à superfície, compressivos nas regiões adjacentes caindo a 0 próximo de 0,5mm.

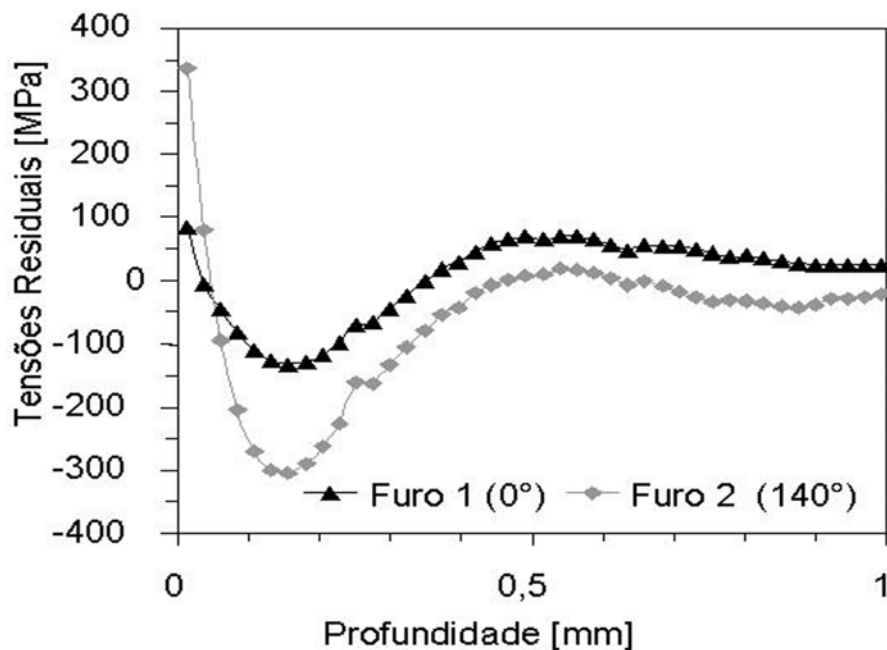


Figura 8: Resultados da análise das tensões residuais através do Método do Furo Cego Incremental calculados pelo método da Integral.

4 DISCUSSÃO

Apesar da expressão medida das tensões residuais ser comumente utilizada, é importante lembrar que o campo de tensões residuais é uma propriedade extrínseca do material e não pode ser medida diretamente. Assim as tensões residuais são determinadas a partir da medida de alguma propriedade intrínseca do material [1].

A difração de raios-X baseia-se na medida da distância interplanar, o método micromagnético na medida dos saltos Barkhausen e da coercitividade relativa e o método do furo na medida da deformação aliviada pela remoção de material [3].

É importante salientar que este trabalho não tem como objetivo discutir detalhadamente as origens das tensões residuais em materiais usinados. Porém é importante dizer que a distribuição das tensões residuais presentes no componente é devido à superposição das tensões residuais desenvolvidas durante o processo de usinagem por influência dos fatores térmicos (aquecimento superficial do componente devido ao atrito com a ferramenta de corte durante o processo de usinagem), fatores mecânicos (devido à relaxação de tensão causada pela remoção de material e introdução de tensões originadas pela ocorrência de deformação plástica localizada na superfície durante o processo de usinagem) além das tensões residuais pré-existentes no componente, decorrentes da etapa anterior do processo [14].

Os resultados apresentados estão dentro do esperado para cada técnica de análise [3]. Antes de uma comparação direta, deve-se levar em conta as diferenças entre as técnicas de análise, sendo a principal o volume analisado. Contudo percebe-se que cada método apresentou resultados satisfatórios provando a necessidade da utilização de cada técnica na caracterização do campo de tensões residuais.

A pesar da grande precisão, a análise das tensões residuais por difração de raios-X limita-se a medidas na superfície do componente. Medidas de perfil de tensões residuais só são possíveis através da remoção de camada. Contudo pode ocorrer de o processo de remoção utilizada alterar o perfil de tensões, gerando erros indesejáveis. Além disso, as medidas de perfis de tensões residuais por difração de raios-X apresentam como desvantagem o aumento considerável do tempo de análise. Isto limita o uso do método para ocasiões especiais e justificando o uso de técnicas que apresentem um menor tempo de resposta.

O método do furo é um dos métodos mais utilizados para medida das tensões residuais. É relativamente simples rápido e pode ser considerado um método semidestrutivo se o volume de material removido for relativamente pequeno ou se este volume pode ser tolerado ou devidamente reparado [2]. A precisão do método depende muito do ajuste do equipamento, da escolha do extensômetro e do método de cálculo utilizado. O volume analisado é similar ao volume de material removido, onde a sensibilidade da medida cai rapidamente com a profundidade.

Assim, valores semelhantes aos obtidos por difração de raios-X na superfície não foram encontrados, pois além da grande diferença entre os volumes analisados (quase duas vezes maior na superfície), o método do furo apresenta uma sensibilidade limitada dentro deste volume.

O método Micromagnético é um método rápido, de baixo custo e é muito sensível a microestrutura dos materiais. É um método limitado a análise de materiais, ou fases, ferromagnéticos. O tempo rápido de resposta faz com que este seja um método muito indicado para a análise On-Line de tensões residuais, podendo inclusive se inspecionar até 100% das peças produzidas.

Todos os métodos apresentam vantagens e desvantagens e, conseqüentemente, fontes de incerteza na apresentação dos resultados. Contudo a literatura aponta a habilidade do operador como o fator mais importante na confiabilidade destes ensaios [3].

5 CONCLUSÕES

A determinação das tensões residuais é de grande importância o aumento da confiabilidade dos componentes mecânicos;

Atualmente não existe um método absoluto de medida e determinação das tensões residuais;

O estudo realizado mostrou a importância do uso complementar das técnicas de análise das tensões residuais em componentes mecânicos;

A difração de raios-X foi a técnica que apresentou melhor precisão nos resultados, o método micromagnético tem grande reprodutibilidade e apresenta o melhor tempo de resposta. Porém o método do furo fornece-nos informações sobre maiores profundidades em um tempo rápido e não necessitando de uma etapa posterior de calibração como no caso do método micromagnético.

Todos os métodos apresentam vantagens e desvantagens, contudo, a habilidade do operador em selecionar o método adequado para cada situação e corrigir os possíveis erros que venham a acontecer durante o ensaio é um fator crucial para o aumento da confiabilidade dos resultados.

6 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é parte do projeto SFB 570, Distortion Engineering, da Deutsche Forschungsgemeinschaft-DFG (Associação Alemã de Pesquisa) que visa o estudo das causas da distorção em componentes mecânicos durante o processo de manufatura.

Os autores gostariam de agradecer ao apoio da DFG e do DAAD (Alemanha), e do CNPq (Brasil).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FRY, T., “**Measurement Good Practice Guide No. 52** “ National Physical Laboratory, UK, 2000.
- [2] FRY, T., “**Measurement Good Practice Guide No. 53** “ National Physical Laboratory, UK, 2000.
- [3] LU, J. “Handbook of Measurement of Residual Stresses“. SEM, Inc. 1996.
- [4] HAUKE, V. “Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods...” ELSEVIER, 1997.
- [5] RUUD C., “Measurement of Residual Stresses...” in: **Handbook of Residual Stress and Deformation**, ASM, 2002, p. 99–117.
- [6] WITHERS, P., BHADRESHIA, K. “Residual Stress, Part 1...” **Material Science And Technology**, Vol. 17, 2001, p 355–365 .
- [7] MACHERAUCH, E., KLOOS, K. “Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress”. Residual Stress in Science and Technology, Vol. 1, p 3–27, Germany 1987.
- [8] THOBEN, K. D., at all, “Distortion Engineering–Eine Systemorientierte Betrachtung des Bauteilvergugs“ HTM 57(2002) 4, S. 276–282.
- [9] **Metals Handbook**, “Properties and Selection...” Vol. 1, Tenth Edition, 1990, p. 152.
- [10] KLÜMPER-WESTKAMP, H., “Entwicklung und Anwendung eines Nitriertensors zur in-situ-Erfassung des Nitrierprozesses“ PHD Thesis, University of Bremen, 1989.
- [11] PREVÉY, P. S., “X-ray Diffraction Residual Stress techniques” **Metals Handbook**, ASM, 1986, p. 380–392.
- [12] KARPUSCHEWSKI, B., OBERBECK–SPRINTIG, I., “Residual Stress Determination of Ferromagnetic Sheets“ ICRS5, Sweden, 1997, p.1145–1149.
- [13] STEFANITA, C. G., ATHERTON, D. L., CLAPHAN, L. , “Plastic Versus Elastic Deformation Effects on Magnetic Barkhausen Noise in Steel”, Acta Materialia, Vol. 48, 2000, p. 3545–3551.
- [14] BRINKSMEIER, E., at all, “Residual Stresses–Measurement and Causes in Machining Processes”, CIRP Annals 31 (1982), s. 491–510.