

ANÁLISE MICROMAGNÉTICA DE TENSÕES RESIDUAIS EM ANÉIS PARA ROLAMENTO¹

*Tonilson de Souza Rosendo²
Alexandre Rocha³
Afonso Reguly³
Thomas Hirsch⁴
Telmo Strohaecker³*

Resumo

Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão do método de medição de tensões residuais pelo sinal Barkhausen, avaliando diversas formas de correlacionar tensões residuais (TR) com o comportamento magnético de materiais ferromagnéticos. Busca-se com isso, reduzir o tempo necessário para medição de TR fazendo uso complementar das técnicas de difração de raios-X e sinal Barkhausen; bem como possibilitar a medição de tensões residuais na superfície interna de anéis para rolamento sem precisar cortá-los. Para tanto, parâmetros magnéticos de anéis para rolamento usinados foram medidos a cada cinco graus ao longo de seu perímetro. A calibração foi feita utilizando vários métodos na tentativa de determinar o mais adequado para a distribuição de tensão e geometria do componente analisado. Regressão linear simples e múltipla entre tensões residuais medidas com raios-X e parâmetros magnéticos do material, foram experimentadas, empregando todos e somente cinco pontos do anel. Com a equação de calibração obtida, através das regressões lineares, são calculadas as tensões para o restante do anel. São apresentados e discutidos os principais resultados obtidos nos experimentos empregados para fazer a calibração. Também é apresentada uma alternativa para reduzir significativamente o tempo de medição utilizado atualmente para medição das tensões residuais nos componentes estudados.

Palavras-chave: Tensões residuais; Ruído Barkhausen; Calibração.

MICROMAGNETIC ANALYSIS ON BALL BEARING RINGS

Abstract

A review of the Barkhausen noise method for residual stress determination was performed in this work, analysing different ways to correlate residual stresses and the magnetic parameters in ferromagnetic materials. The main objective is to find a way to reduce the time necessary for residual stresses measurements (mainly in ball bearing rings) making complementary use of the X-ray diffraction (XRD) technique and the Barkhausen method. This method also allows the measurements on the inside of the rings. Magnetic parameter of the rings were measured at every five degrees on the outer surface along their perimeter. Several procedures were used for the calibration, looking for the one better suited for the stress distribution and geometry of the samples. Simple and multiple linear regression between residual stresses measured with XRD and the magnetic parameters were analysed using 36 or just 5 points of X-ray. With the calibration equation obtained by the linear regressions, in every procedure, the stresses were calculated all over the rings. The most important results obtained are presented and discussed, as well as an alternative to reduce the time consuming for residual stress measurements on the components studied.

Key words: Residual stress; Barkhausen noise; Calibration.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Aluno de doutorado do programa de pós-graduação PPGEM / UFRGS, Brasil*

³ *Professor Dr. do programa de pós-graduação PPGEM / UFRGS, Brasil*

⁴ *Dr. -Ing. Habil Chefe do departamento de física analítica do instituto IWT, Alemanha*

1 INTRODUÇÃO

A parte experimental deste trabalho foi desenvolvida no Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) na cidade de Bremen na Alemanha. É parte integrante do subprojeto C2 do projeto SFB 570. O SFB 570 (Sonderforschungsbereich) – Collaborative Research Center Distortion Engineering é um projeto financiado pela Deutsche Forschungsgemeinschaft – órgão do governo Alemão voltado à pesquisa. Tem como objetivo principal buscar métodos para reduzir os custos com desempenho em componentes que sofrem distorção durante as fases do processo de produção. Para tanto, no SFB 570, componentes com três diferentes geometrias (cilindros, anéis e engrenagens) produzidas com variados parâmetros de fabricação estão sendo caracterizados em diversos aspectos. O fenômeno da distorção é grande causador de custos nos processo de fabricação e, conseqüentemente, no preço final de produtos e equipamentos, daí a justificativa para tal investimento por parte do governo Alemão.

O subprojeto C2 se encarrega das medições de tensões residuais nos componentes nas diversas etapas do processo. O principal método de medição empregado neste subprojeto é a difração de raios-X (XRD). Esta apresenta como ponto negativo o elevado tempo de medição, que vem impondo dificuldades para atender a demanda do SFB 570.

Com a finalidade de otimizar o processo de medição de tensões residuais no subprojeto C2 está sendo feito um estudo para implantação da técnica micromagnética do ruído Barkhausen neste subprojeto. Esta técnica apresenta como principal vantagem a rapidez das medições e como desvantagens citam-se a forte dependência com a microestrutura do material, a baixa reprodutibilidade dos resultados e a dificuldade de calibração.

Uma alternativa é a utilização complementar das técnicas de difração de raios-X e micromagnética do ruído Barkhausen, buscando extrair os pontos positivos de cada técnica.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é buscar uma metodologia para reduzir o tempo de medição de tensões residuais em componentes mecânicos (principalmente em anéis de rolamento do projeto SFB 570) utilizando a técnica micromagnética do ruído Barkhausen.

Para tanto foi necessário fazer uma revisão da técnica do ruído Barkhausen, avaliando diferentes formas de correlacionar tensões residuais com o comportamento magnético de materiais ferromagnéticos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tensões Residuais

Tensões residuais são tensões elásticas auto-equilibradas existentes num componente como resultado de processamento mecânico ou de solicitações mecânicas e/ou térmicas.⁽¹⁾ Qualquer processo de fabricação de componentes mecânicos leva à formação de tensões residuais.^(1,2) Logo, dependendo da aplicação e do grau de responsabilidade da peça, é preciso submetê-la a tratamentos térmicos de alívios de tensões antes de destiná-la à sua função. O tipo de tratamento a ser

aplicado dependerá da magnitude das tensões e de sua distribuição na peça.^(2,3) A determinação da magnitude e a distribuição das tensões residuais é feita através de técnicas de medição, simulação por elementos finitos ou técnicas analíticas.

Não somente o processo de fabricação, mas também as condições de serviço são responsáveis pela introdução de tensões residuais em componentes mecânicos. Sua origem está associada à ocorrência de um gradiente de um ou mais dos seguintes agentes externos sobre o material:⁽¹⁻³⁾

- Deformação plástica;
- Temperatura;
- Transformação de fase.

As tensões residuais são classificadas em três tipos:⁽¹⁾ tipos I, II e III, sendo o tipo I o mais importante por ser de grandeza macro, englobando grandes porções do componente. Os tipos II e III são de natureza microscópica.

3.2 Técnica Micromagnética do Ruído Barkhausen

Os materiais ferromagnéticos são constituídos de pequenas regiões magnéticas que se assemelham a pequenos ímãs, denominados domínios magnéticos. A fronteira entre um domínio e outro define os contornos denominados “paredes de domínio” (domain walls). Cada domínio orienta-se segundo uma direção cristalográfica mais favorável.^(4,5) Num material ferromagnético não magnetizado os domínios magnéticos estão orientados aleatoriamente, anulando-se no material como um todo.⁽⁶⁾ Quando da presença de um campo magnético externo, os domínios magnéticos são reorientados segundo a direção do campo e o material se torna magnetizado.^(6,7) Além da reorientação dos domínios, o campo magnético externo também tem efeito sobre a sua forma através do movimento das paredes de domínio. Se o campo magnético externo for alternado as paredes de domínio se movimentam em dois sentidos (expandindo e recuando) continuamente. Esta movimentação das paredes e reorientação dos domínios em dois sentidos ciclicamente gera, conseqüentemente, mudanças também cíclicas na magnetização do material.⁽⁸⁾ A Figura 1 mostra este efeito do campo magnético externo sobre o alinhamento dos domínios magnéticos.

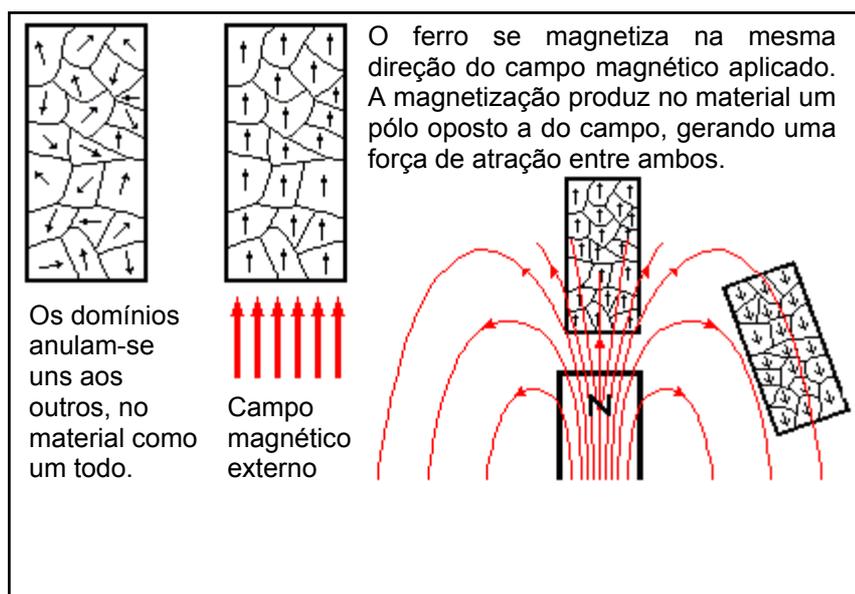


Figura 1. Efeito do campo magnético externo sobre o alinhamento dos domínios.⁽⁸⁾

Se uma bobina de fio condutor for colocada próxima ao material enquanto as paredes de domínio se movimentam, as mudanças na magnetização induzirão pulsos elétricos a ela.

O cientista alemão Heinrich Barkhausen observou, em 1919, que conectando a bobina a um aut falante ouvem-se ruídos durante o processo de magnetização. Com seu experimento ele mostrou que o processo de magnetização cíclico, caracterizado pela curva de histerese, não é contínuo, ocorrendo em pulsos. Devido aos ruídos ouvidos no aut falante, este fenômeno foi denominado de ruído Barkhausen (Barkhausen noise). A Figura 2 mostra um material sendo magnetizado ciclicamente e uma bobina condutora na qual a corrente elétrica é induzida. Também está mostrado o sinal (ou ruído) Barkhausen gerado durante o processo de magnetização.

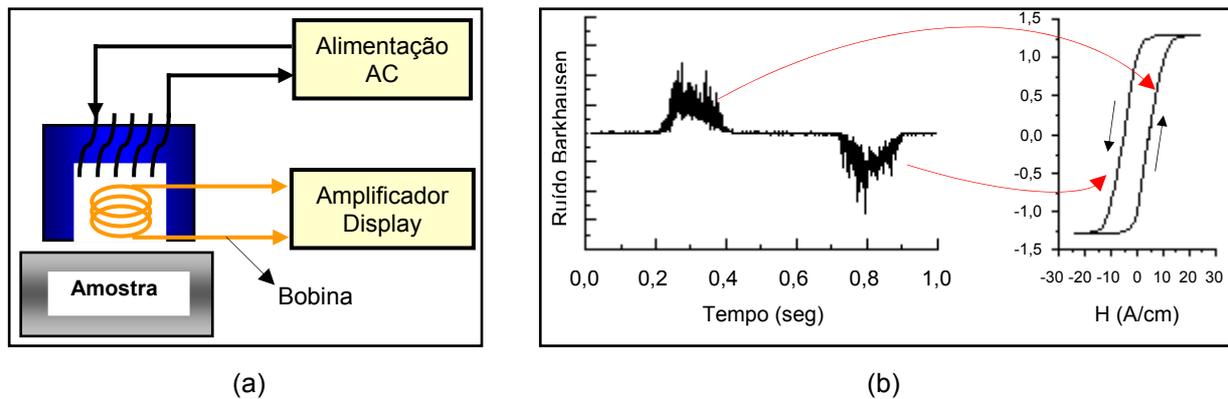


Figura 2. (a) Material ferromagnético sendo magnetizado ciclicamente e (b) ruído Barkhausen gerado na bobina.⁽⁹⁾

O estado de tensões presente no material tem influência sobre a intensidade do ruído Barkhausen: tensões trativas intensificam o ruído enquanto tensões compressivas diminuem sua intensidade.⁽¹⁰⁾ O comportamento magnético de um material também é fortemente influenciado pela sua microestrutura. Devido a este fato faz-se necessária a avaliação de mais de um parâmetro magnético para se obter uma boa correlação com as tensões residuais. Um parâmetro magnético muito utilizado, além do ruído Barkhausen, é o campo coercivo.

Um exemplo de medição utilizando o ruído Barkhausen (M_{max}) e o campo coercivo (H_{cm}) está mostrado, esquematicamente, na Figura 3 juntamente com a representação desses parâmetros com a curva de histerese da magnetização de um material.⁽⁹⁾

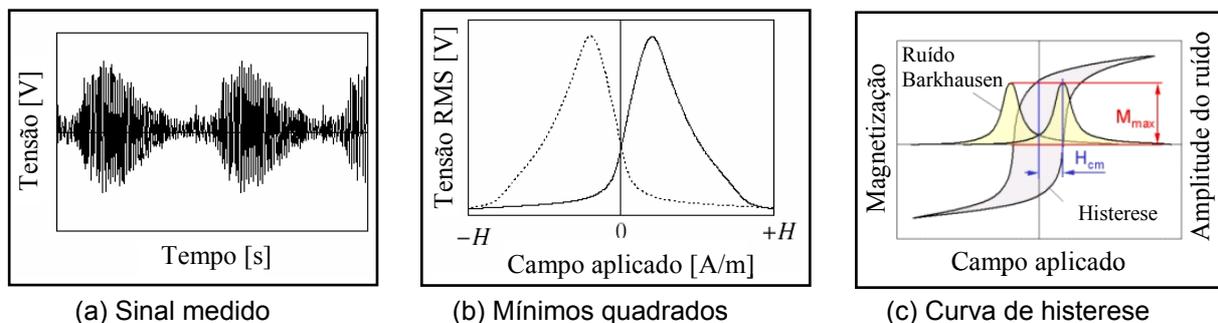


Figura 3. Representação esquemática do: (a) Ruído Barkhausen como ele é medido, (b) sinal processado por mínimos quadrados e (c) comparação com a curva de histerese.⁽⁹⁾

A técnica consiste em fazer uma calibração correlacionando os parâmetros magnéticos com a propriedade em interesse no material, tensões residuais no caso deste trabalho. Para a calibração plota-se um gráfico de M_{\max} e H_{cm} em função da tensão (já medida com outras técnicas de medição como XRD, por exemplo) e com as curvas obtidas se extrai, por regressão linear múltipla, a função de calibração⁽¹¹⁾. A equação 01 mostra a função de calibração que se obtém.

$$\sigma = A + B \cdot M_{\max} + C \cdot H_{cm} \quad (01)$$

onde:

- σ : tensão residual conhecida;
- M_{\max} : ruído Barkhausen;
- H_{cm} : campo coercivo;
- A, B e C : constantes da regressão linear múltipla.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Várias metodologias para calibração, denominadas de procedimentos, foram experimentados na busca pela melhor forma de se obter a função de calibração.

Sete anéis para rolamento do projeto SFB 570 com níveis variados de tensões residuais foram selecionados e medidos na direção tangencial. São anéis usinados, sem tratamento térmico para alívio de tensões. Na Figura 4 tem-se um esquema simplificado do processo de fabricação dos anéis, onde está mostrada a etapa da qual provém os anéis estudados neste trabalho.

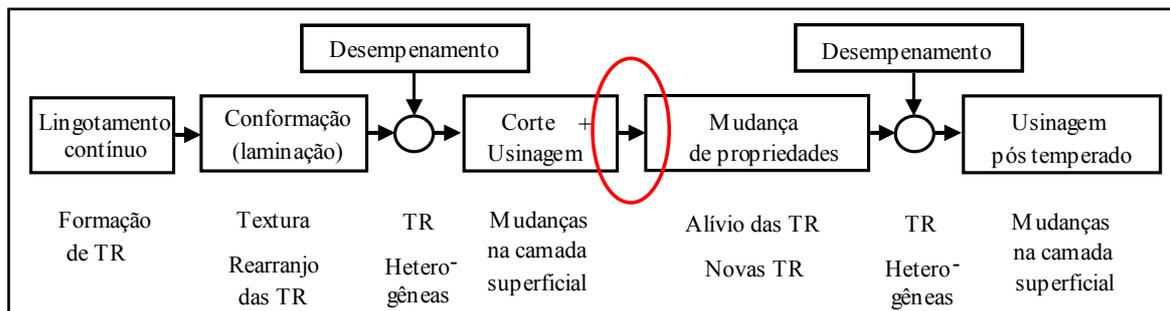


Figura 4. Esquema do processo de fabricação dos anéis em estudo.

Para os anéis selecionados já se dispunha dos valores de tensões residuais, medidos anteriormente com difração de raios-X (XRD). A tabela 01 mostra as principais informações dos anéis utilizados, sendo que a nomenclatura utilizada é a mesma empregada no projeto SFB.

Tabela 1. Anéis utilizados neste trabalho – média de tensões residuais no perímetro dos anéis e principais parâmetros de usinagem.

Anel	\overline{TR} tangencial superfície externa (MPa)	Parâmetros de usinagem			
		Vel. corte (m/min)	Prof. corte (mm)	Avanço (mm)	Dispositivo de sujeição
OVAKO 82	600 (500 – 700)	200	0,75	0,4	três pontos
OVAKO 93	600 (500 – 700)	275	0,75	0,4	três pontos
SPK 734	250 (180 – 320)	240	0,75	0,1	três pontos
SPK 791	180 (120 – 240)	240	0,75	0,1	três pontos
SPK 882	630	240	0,75	0,4	uniforme
SPK 909	385 (300 – 470)	240	0,75	0,1	três pontos
SPK 929	140	240	0,75	0,1	uniforme



Figura 5. Sistema de medição utilizado

As medições magnéticas foram realizadas utilizando o equipamento Tiede Ferrotest-DUR, produzido pela empresa Alemã Tiede Rissprüfanlagen com uma licença pertencente à série de equipamentos do tipo 3MA – Multi, Micro, Magnetic Analysis. Através de um sensor especialmente desenvolvido para os anéis do projeto SFB 570, um campo magnético alternado é induzido sobre os mesmos e as respostas (M_{max} e H_{cm}) do material a este campo são monitoradas. A Figura 5 mostra o sistema de medição utilizado.

Foram estudados sete procedimentos de calibração, que diferem entre si pelo número de dados utilizados e pelo tipo de regressão empregada (linear simples ou linear múltipla) para obtenção da função de calibração. A Tabela 2 apresenta uma listagem e descrição dos procedimentos estudados.

Tabela 2. Relação e descrição dos procedimentos de calibração estudados

Proced.	Tensão de referência	Quantidade de pontos utilizados	Tipo de regressão
P1	Ensaio tração/compressão	7 (-100MPa até 250MPa)	RLM
P2	XRD	36 (todos disponíveis no perímetro do anel)	RLM
P3	XRD	5 uniformemente espaçados	RLM
P4	XRD	5 adjacentes	RLM
P5	XRD	36 (todos disponíveis no perímetro do anel)	RLS
P6	XRD	5 adjacentes	RLS
P7	XRD	5 uniformemente espaçados	RLS

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Somente os resultados mais relevantes são apresentados, discutindo-se as principais dificuldades e avanços conseguidos com os vários procedimentos estudados. O procedimento P1, apesar de ser o método mais usual em processos de calibração^(1,10) (ensaio tração/compressão), não se mostrou aplicável ao caso em estudo. Um corpo de prova de tração foi instrumentado com um strain gage e com o sensor magnético. Vários incrementos de tensão foram aplicados e os parâmetros magnéticos medidos. Ao final obteve-se a curva mostrada na Figura 6.

Os valores de H_{cm} e M_{max} foram medidos numa faixa de solicitação de -100MPa a 260MPa. Possibilidade de escoamento em tração e flambagem em compressão impossibilitaram maiores valores de tensão. O corpo de prova utilizado é do mesmo material dos anéis, porém recozido para alívio de tensões. Com regressão linear múltipla (RLM) foi obtida a função de calibração para o cálculo das tensões residuais nos anéis.

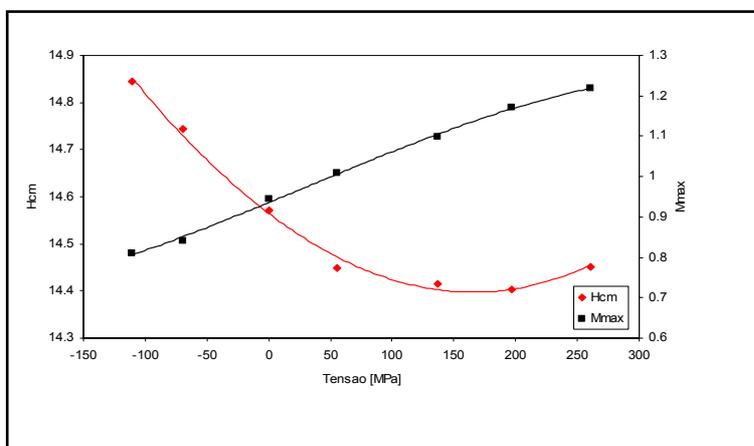


Figura 6. Distribuição de M_{max} e H_{cm} em função da tensão em corpo de prova de tração (P1).

A Figura 7 mostra o resultado obtido para o anel OVAKO 93. Resultados semelhantes foram obtidos para os demais anéis estudados.

As razões para a discrepância dos resultados podem ser várias, conforme já verificado em outros trabalhos,^(7,9,11) sendo as principais: (1) a limitada faixa de tensão coberta pelo ensaio, que é menor que a magnitude de tensões existente nos anéis; (2) diferença de microestrutura entre o corpo de prova e os anéis; (3) diferença no acoplamento do sensor magnético com o corpo de prova e os anéis.

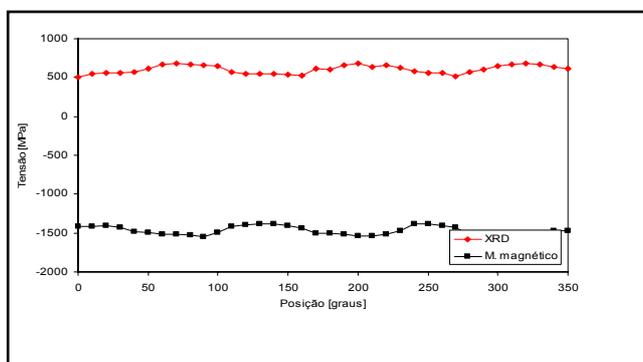


Figura 7. Resultados de tensões residuais obtidos com o procedimento P1 para o anel OVAKO 93.

O procedimento P2 utiliza dados de XRD para a calibração. Um total de 36 pontos medidos previamente com XRD é utilizado e a calibração é feita com regressão linear múltipla. Por utilizar todos os 36 pontos disponíveis com XRD, este procedimento é tomado como referência, uma vez que apresenta os melhores resultados comparando com a difração de raios-X. Contudo, apesar da boa correspondência dos resultados, serviu apenas para comprovar a aplicabilidade do método magnético para os anéis em estudo, não sendo útil como um procedimento de calibração. Não haveria razão em utilizar o método magnético se já se dispusesse de resultados completos de tensões residuais medidos com XRD.

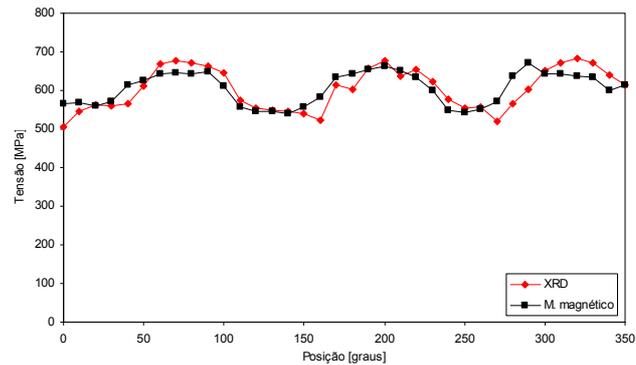


Figura 8. Resultados de tensões residuais obtidos com o procedimento P2 para o anel OVAKO 93.

O procedimento P5 também utiliza 36 pontos, porém a calibração é feita com regressão linear simples (RLS), obtendo-se duas funções de calibração para cada anel (uma para cada parâmetro magnético – M_{max} e H_{cm}). Assim como o procedimento P2, não é viável ao projeto SFB 570 por necessitar do conhecimento completo das TR medidas com XRD. Contudo serviu para verificar a aplicabilidade de regressão linear simples na calibração. Para alguns anéis obteve-se boa correlação em relação as medições de XRD tanto com H_{cm} quanto com M_{max} . Outros anéis, no entanto, mostraram bons resultados com somente um dos parâmetros e ruim com o outro; o que é pode ser explicado pelo efeito da microestrutura. A Figura 9 mostra os resultados obtidos com o procedimento P5 para o anel OVAKO 82 com os dois parâmetros magnéticos. Pode-se ver que a melhor correlação foi obtida com o ruído Barkhausen (M_{max}).

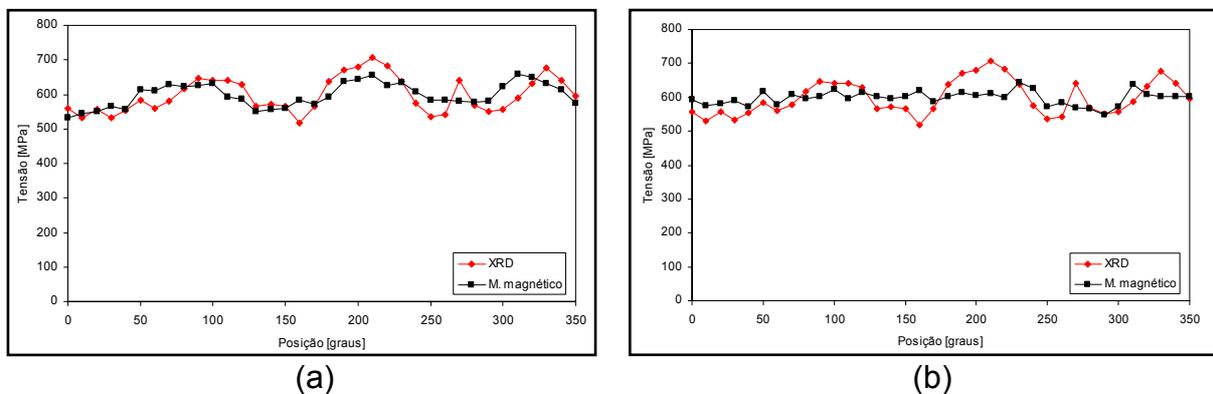


Figura 9. Resultados obtidos com o procedimento P5 para o anel OVAKO 82: (a) M_{max} e (b) H_{cm} . Melhor correlação obtida com M_{max} .

Os procedimentos P3, P4, P6 e P7 utilizam somente 5 pontos de TR medidos previamente com XRD sendo, portanto, passíveis de aplicação no projeto SFB 570. Cinco é o número mínimo de pontos necessários para regressão linear múltipla com duas variáveis independentes. Os resultados obtidos foram positivos, mostrando a viabilidade do emprego de somente cinco pontos para a calibração. Conforme já descrito na tabela 02, nos procedimentos P3 e P4 foi usada RLM, sendo P3 com cinco pontos uniformemente espaçados ao longo do perímetro do anel e (P4) com cinco pontos adjacentes. Na Figura 10 está mostrado o resultado obtido com o P3 (pontos espaçados e RLM) para o anel OVAKO 93. Pode-se ver a boa correspondência com a XRD.

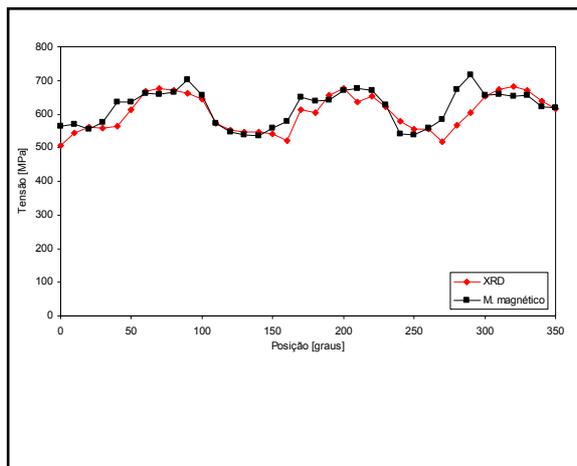
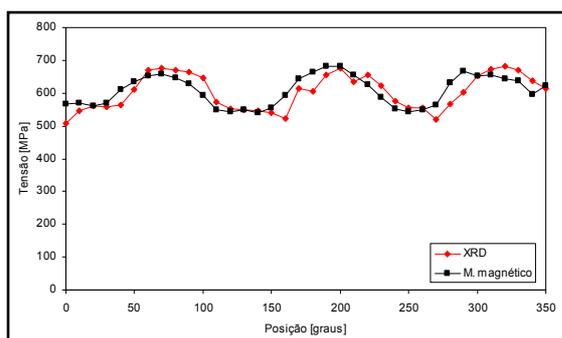
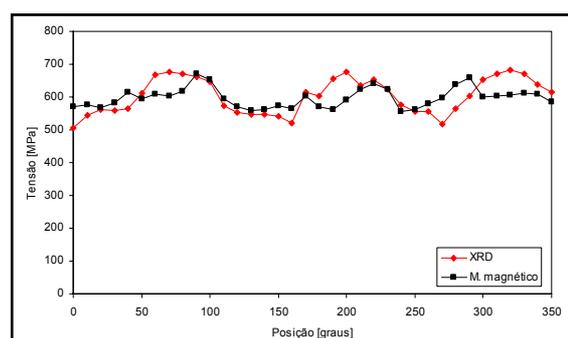


Figura 10. Resultados obtidos com o procedimento P3 para o anel OVAKO 93.

A utilização de pontos espaçados do perímetro do anel (procedimentos P3 e P7) se mostrou mais eficaz para a calibração. Com o procedimento P7 obteve-se dois resultados (um utilizando M_{max} e outro utilizando H_{cm} para calibração) que estão mostrados na Figura 11. Também pode-se ver boa correspondência com a XRD para este procedimento.



(a)



(b)

Figura 11. Resultados obtidos com o procedimento P7 para o anel OVAKO 93: (a) com M_{max} e (b) com H_{cm} . Melhor correlação obtida com M_{max} .

As discrepâncias encontradas entre o método magnético e a difração de raios-X se devem a, pelo menos, quatro fatores:^(7,9,11) 1) possíveis diferenças microestruturais entre os anéis, 2) diferença na profundidade de penetração das técnicas, 3) acoplamento entre o sensor magnético e os anéis, e 4) o processamento do sinal magnético pelo equipamento de medição.

6 CONCLUSÕES

Somente os procedimentos P3 e P7 se mostraram viáveis para aplicação aos anéis estudados pois forneceram bons resultados utilizando apenas cinco pontos conhecidos de TR para calibração. O procedimento P3 utiliza regressão linear múltipla enquanto o procedimento P7 utiliza regressão linear simples, ambos com pontos selecionados espaçadamente.

Com base nos resultados obtidos com estes dois procedimentos, pode-se dizer que é preferível o emprego do procedimento P3 por utilizar regressão linear múltipla. Observou-se que a RLM atua como um fator de segurança, contrabalançando os efeitos de M_{max} e H_{cm} sobre a função de calibração.

Também foi verificado que fazendo uso complementar de ambas as técnicas (XRD e método magnético) é possível medir as tensões residuais nos anéis em um tempo menor. Os procedimentos P3 e P7 provaram que cinco pontos (mínimo necessário para RLM com duas variáveis) para a calibração são suficientes para obter resultados satisfatórios. Estes cinco pontos necessitam de, aproximadamente, sete horas de medição com XRD; logo, com apenas 10 horas (7 horas em XRD e 3 horas no método magnético) é possível fazer a mesma medição que levaria 48 horas com XRD (utilizando difratômetros convencionais).

Logo, uma estratégia para otimização do processo de medição de tensões residuais nos anéis de rolamento do projeto SFB 570 envolve a adoção da seguinte metodologia:

1. Medir M_{max} e H_{cm} com o equipamento magnético em toda a superfície do anel;
2. Medir com XRD cinco pontos uniformemente espaçados na superfície do anel;
3. Usar estes pontos para fazer a calibração com RLM (procedimento 3);
4. Calcular as tensões para o restante do anel com a função de calibração obtida.

Assim obtém-se uma redução de aproximadamente 80% (38 horas) no tempo de medição gasto atualmente no projeto SFB 570 empregando somente XRD.

REFERÊNCIAS

- 1 MACHERAUCH, E., KLOOS, K. **Origin, measurement and evaluations of residual stresses**. Residual stress em: Science and Technology. Vol.1, Alemanha, 1987.
- 2 CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. University of Utah Wiley, 5TH edition, 2003.
- 3 TOTEN, G. et al. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. ASM International – The materials information society. Materials Park, OH, 2002.
- 4 JILES, D. C. **Theory of ferromagnetic hysteresis**. Elsevier Science Publishers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 61, North-Holland, Amsterdam, 1986.
- 5 Tiede Rissprüfanlagen. **Technisches Hanbuch und Bedienungsanleitung**. Ferrotest - DUR. V.3.01 , novembro 1991. (Manual de informações técnicas e operacionais).
- 6 **Georgia State University**. Department of Physics and Astronomy / Hyperphysics. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/imgsol/domain.gif>> Acesso em 11 Mai. 2004.
- 7 HEINLEIN, J. **Zerstörungsfreie Randzonenanalyse mit mikromagnetischen Prüfverfahren**. Master Thesis, Universität Bremen, 2002.
- 8 **University of Washington – Barkhausen noise**. Barkhausen noise and avalanches. <<http://bragg.phys.washington.edu/bark.html>> Acesso em 10 Mai. 2004.
- 9 SWARTZENDRUBER, L. J., HICHO, G. E. **Effect of sersor conFiguration on magnetic Barkhausen observations**. Metallurgy Division, National Institute of Standards and Technology. Springer-Verlag New York Inc, 1993.
- 10 HAUK, V. **Structural residual stress analysis by nondestructive methods**. Institut für Werkstoffkunde. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Elsevier - Aachen, Germany, 1997.
- 11 DOBMANN, W. A. et al. **Progress in the Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis (3MA)**. Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, IZFP. Universität des Saarbrücken, Germany.