

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ANÁLISE MICROMAGNÉTICA DE TENSÕES RESIDUAIS EM ANÉIS DE
ROLAMENTO

Tonilson de Souza Rosendo

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2005

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ANÁLISE MICROMAGNÉTICA DE TENSÕES RESIDUAIS EM ANÉIS DE
ROLAMENTO

TONILSON DE SOUZA ROSENDO
Engenheiro Industrial Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: ciência e tecnologia dos materiais

Porto Alegre
2005

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final , pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Afonso Reguly, PPGEM-UFRGS, Brasil.

Co-orientador: Priv- Doz. Dr. Ing. Habil. Thomas K. Hirsch, Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik-IWT-Universidade de Bremen, Alemanha.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Eng. Irionson Antônio Bassani-PUC, Curitiba, Paraná, Brasil

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Antonio Cesar Faria Vilela
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Afonso Reguly e co-orientador Dr. Thomas K. Hirsch, pela orientação, pelos ensinamentos e demais contribuições técnicas e pessoais;

Ao Dr. Telmo Roberto Strohaecker pelas oportunidades proporcionadas dentro do LAMEF e todo o apoio oferecido;

Ao Dr. Thomas Hirsch e Dr. Alexandre Rocha pela acolhida junto ao instituto IWT na Alemanha;

À toda a equipe do intituto IWT principalmente dos grupos Physicalische Analytik, Metallographische Analytik e Werkstatt. Em especial citam-se: Alex Kohl, Eduard Watjen e Radik Safin pelo auxílio prestado durante meus trabalhos;

Aos amigos que fiz na Alemanha: Alexandre Ramos, André Slaviero, Clarisse Carvalho, Dimitri Eiber, Fernando Torres, Hugo Nunes, Igor Rakovich, Jarbas Carneiro, Jérémy Epp, Jerusa Borges, Julien de Vogue, Rebeca Avelar, Renata Oliveira, Sandra Hoffmann, Tatiana Rocha, Tiago Barbosa e Timo Ebeling, pelos ótimos momentos;

A todo o pessoal da família lamefiana pelo companheirismo e acolhida no LAMEF;

Aos amigos e colegas André Cervieri, Arelise Bayer, Bruna Souza, Carlos d'Avila (Beavis), Carlos Martins (Shaq), César Olea, Dani Tozzi, “dona” Neiva, Eduardo Fonseca, Gilnei Furtado, Guilherme Schmidt, Liane Roldo, Luis Lopo, Márcio Macedo (Surfi), Odair Morais, Ralf Souza (Bigode), Rosmary Morais, Rubem Braga, Susi Marques, Thomas Clarke, Tiago Karpary, Tiago Renck, Toni Lima e Valdira Santos pelo apoio e momentos de descontração;

À família Hirsch por todo o auxílio e excelentes momentos na Alemanha;

Ao Dr. Irionson Bassani pelo incentivo, apoio, companheirismo e contribuições técnicas oferecidos na minha chegada em Porto Alegre;

Aos meus professores da graduação M. Sc. Flávio Kieckow, Dr. Irionson Bassani, Dr. Marco Tier e Dr. Sandi Souza pela influência na minha formação;

À turma do “ap”: Alexandre Braga, Felipe Darcarobo, Luciana Braga e Nicole Braga pela amizade, companheirismo e ótimos momentos dentro e fora do “ap”;

À minha família pelo apoio, dedicação, incentivo, compreensão, etc.;

A Deus pela vida e todas as oportunidades proporcionadas;

Ao CNPQ, FAURGS e DFG (Alemanha) pelo suporte financeiro.

Para ser bem sucedido é preciso ter dedicação total,
buscar o seu limite
e dar o melhor de si mesmo.

(Ayrton Senna)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE EQUAÇÕES	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XVII
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XX
1 Introdução.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Motivação	1
1.3 O projeto SFB 570	1
1.4 Objetivos.....	2
2 Revisão bibliográfica.....	3
2.1 Tensões e deformações residuais.....	3
2.2 Geração de tensões residuais em processos de usinagem.....	8
2.3 Distorções em componentes mecânicos / anéis de rolamento	9
2.4 Comportamento magnético de materiais ferromagnéticos	9
2.5 Efeito Barkhausen.....	12
3 Materiais e métodos	16
3.1 Amostras analisadas.....	16
3.2 Sistema de medição	19
3.3 Metodologia	21
4 Resultados	25
4.1 Procedimento de calibração 1	26
4.2 Procedimento de calibração 2	28
4.3 Procedimento de calibração 3	29
4.4 Procedimento de calibração 4	32
4.5 Procedimento de calibração 5	34
4.6 Procedimento de calibração 6	37
4.7 Procedimento de calibração 7	39
4.8 Procedimento de calibração 8	42
4.9 Procedimento de calibração 9	45
5 Discussão dos resultados	49
5.1 Discussão – procedimentos de calibração	52
5.2 Discussão – geral	60
6 Conclusões	66
7 Sugestões para TRABALHOS FUTUROS.....	68
8 Referências bibliográficas	69
Anexos.....	72
A.1. Todos os resultados.....	72

A.1.1.	Procedimento 1	72
A.1.2.	Procedimento 2	73
A.1.3.	Procedimento 3	74
A.1.4.	Procedimento 4	75
A.1.5.	Procedimento 5	76
A.1.6.	Procedimento 6	78
A.1.7.	Procedimento 7	79
A.1.8.	Procedimento 8	81
A.1.9.	Procedimento 9	84
A.2.	Aquisições dos parâmetros magnéticos	86
A.2.1.	Anel OVAKO 82	86
A.2.2.	Anel OVAKO 93	86
A.2.3.	Anel SPK 734	86
A.2.4.	Anel SPK 791	87
A.2.5.	Anel SPK 882	87
A.2.6.	Anel SPK 909	87
A.2.7.	Anel SPK 929	88
A.3.	Funções de calibração	88
A.3.1.	Anel OVAKO 82	88
A.3.2.	Anel OVAKO 93	89
A.3.3.	Anel SPK 734	90
A.3.4.	Anel SPK 791	91
A.3.5.	Anel SPK 882	92
A.3.6.	Anel SPK 909	93
A.3.7.	Anel SPK 929	94
A.4.	Configurações do equipamento magnético	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Formação de tensões residuais por gradiente de deformação plástica. Figura adaptada do livro <i>Materials Science and Engineering: an Introduction</i> (Callister) ^[2]	4
Figura 2.2	Diagrama esquemático indicando a tensão efetiva (TR + solicitações de serviço) observada em uma placa sob carregamento de flexão. Figura extraída do site <i>Physique & Industrie: research under contract</i> ^[6]	4
Figura 2.3	Profundidade de penetração das técnicas utilizadas atualmente para medição de TR. Figura adaptada do site <i>Los Alamos - National Laboratory</i> ^[10]	5
Figura 2.4	Classificação das tensões residuais e sua ordem de grandeza. Figuras adaptadas do site <i>Physique & Industrie: research under contract</i> ^[6]	6
Figura 2.5	(a) TR obtidas após processo de shot peening e (b) aumento da vida em fadiga em aço AISI 4340 com shot peening de diferentes intensidades. Figuras adaptadas do site <i>Physique & Industrie: research under contract</i> ^[6] , e de Torres e Voorwald ^[48]	7
Figura 2.6	Efeito do processo de usinagem na geração de tensões residuais, onde: (a) fresamento tangencial concordante, (b) fresamento tangencial discordante, (c) fresamento de topo e (d) fresamento angular. Figura adaptada de Ferraresi ^[48]	8
Figura 2.7	Movimento das paredes de domínio em resposta a um campo magnético externo de magnitude crescente. Figura adaptada do site <i>Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universitaet zu Kiel</i> ^[16]	10
Figura 2.8	Exemplo de curva de magnetização de um material ferromagnético. Figura adaptada do site <i>DW Akademie</i> ^[28]	10
Figura 2.9	Laço de histerese de um material (a) fracamente magnético e (b) fortemente magnético. Figura adaptada do site <i>DW Akademie</i> ^[28]	11
Figura 2.10	Influência da microestrutura na curva de histerese de uma liga Fe-Si: (a) temperada, (b) recozida a 800 °C e (c) recozida a 1200 °C. Figura extraída de Qiang, Li. et al ^[25]	12

Figura 2.11	Efeito de um campo magnético externo sobre os domínios magnéticos, mostrando seu realinhamento segundo as linhas do campo externo. Figura extraída do site Georgia State University ^[19]	13
Figura 2.12	Exemplo de laço de histerese de um processo de magnetização mostrando o aspecto descontínuo da curva. Figura extraída do site University of Washington ^[17]	13
Figura 2.13	Magnetização de um material ferromagnético com campo alternado e bobina para captação do ruído Barkhausen.	14
Figura 2.14	(a) Ruído Barkhausen gerado na bobina devido à magnetização não uniforme do componente e (b) ciclo de histerese mostrando sua inter-relação com o ruído Barkhausen. Figura adaptada do site Stresstech group ^[33]	14
Figura 2.15	Exemplo de medição empregando a técnica do ruído Barkhausen e do campo coercivo: (a) sinal medido em V, (b) processamento do sinal por mínimos quadrados e (c) comparação do sinal processado com o laço de histerese. Figura adaptada do site Stresstech group ^[33]	15
Figura 3.1	Seqüência esquemática do processamento empregado nos anéis de rolamento analisados no projeto SFB 570. O círculo em destaque indica a etapa do processo da qual provém os anéis analisados neste trabalho. Figura extraída de Hirsch, T. ^[11]	16
Figura 3.2	Dimensões, sistema de coordenadas e microestrutura hipereutetóide (perlita e cementita) dos anéis vista com microscopia óptica.	17
Figura 3.3	Duas formas de sujeição para o processo de usinagem: (a) dispositivo de fixação uniforme – não gera variações de tensões, (b) dispositivo de fixação a três pontos – gera tensões variáveis ao longo do perímetro do anel.....	18
Figura 3.4	Perfil de tensões residuais do anel OVAKO 16, todos os anéis apresentam (aproximadamente) este mesmo perfil de distribuição de tensões residuais. ...	18
Figura 3.5	Representação esquemática dos parâmetros magnéticos H_{cm} e M_{max} medidos com o equipamento utilizado. Figura adaptada do site Stresstech group ^[33]	19
Figura 3.6	Sistema de medição utilizado nas medições de tensões residuais pelo método magnético: equipamento 3MA Tiede Ferrotest-DUR, microcomputador PC, programa de aquisição desenvolvido em ambiente HP VEE Lab.	20
Figura 3.7	(a) Detalhe do sensor magnético e (b) acoplamento ao anel para medição dos parâmetros magnéticos. Os três elementos (dois ímãs e bobina sensor) precisam estar em contato com o componente a ser medido.	20

Figura 4.1	Distribuição de H_{cm} e M_{max} ao longo do perímetro do anel OVAKO 82 para duas medições – superfície externa, direção tangencial (filtro passa faixa de 10MHz).....	25
Figura 4.2	Média de H_{cm} e de M_{max} obtida de duas medições ao longo do perímetro do anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial (filtro passa faixa de 10MHz).....	26
Figura 4.3	Distribuição de H_{cm} e M_{max} em função da tensão. Dados obtidos com ensaio de tração/compressão num corpo de prova de material DIN 100Cr6, usinado e recozido para alívio de tensões. Dados medidos para a direção longitudinal do corpo de prova com filtro passa faixa de 10MHz.....	26
Figura 4.4	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.1 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.....	27
Figura 4.5	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.1 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.....	28
Figura 4.6	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.1 e medidas com XRD para o anel SPK 884 – superfície externa, direção tangencial.....	28
Figura 4.7	Tensões residuais calculadas com a equação 4.2 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.....	29
Figura 4.8	Tensões residuais calculadas com a equação 4.3 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.....	29
Figura 4.9	Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 82 medidas com XRD. As marcações na figura indicam as cinco posições selecionadas espaçadamente para a calibração.	30
Figura 4.10	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.4 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.....	30
Figura 4.11	Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 93 medidas com XRD. As marcações na figura indicam as cinco posições selecionadas espaçadamente para a calibração.	31
Figura 4.12	Tensões residuais calculadas com a equação 4.5 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.....	31
Figura 4.13	Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 82 medidas com XRD. As marcações na figura indicam os cinco pontos escolhidos da região com maior gradiente, para a calibração.....	32

Figura 4.14	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.6 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.....	32
Figura 4.15	Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 93 medidas com XRD. As marcações na figura indicam os cinco pontos escolhidos na região de maior gradiente de tensões.	33
Figura 4.16	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.7 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.....	33
Figura 4.17	Comparação entre a distribuição de H_{cm} medida para o anel SPK 909 (superfície externa e direção tangencial) e a distribuição de TR medida com XRD.	34
Figura 4.18	Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de H_{cm} para o anel SPK 909 – superfície externa e direção tangencial.	34
Figura 4.19	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.8 e medidas com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.....	35
Figura 4.20	Comparação entre a distribuição de M_{max} medida para o anel OVAKO 82 (superfície externa e direção tangencial) e a distribuição de TR medida com XRD.	35
Figura 4.21	Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{max} para o anel OVAKO 82 – superfície externa e direção tangencial.	36
Figura 4.22	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.9 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.....	36
Figura 4.23	Comparação entre a distribuição de M_{max} medida para o anel SPK 909 (superfície externa e direção tangencial) e a distribuição de TR medida com XRD.	37
Figura 4.24	Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{max} para o anel SPK 909, medido na superfície externa e direção tangencial.....	37
Figura 4.25	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.10 e medidas com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.....	38
Figura 4.26	Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{max} para o anel OVAKO 82, medido na superfície externa e direção tangencial.....	38
Figura 4.27	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.11 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.....	39

Figura 4.28	Distribuição de M_{\max} e TR medida com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial. Em destaque estão os pontos utilizados na calibração.	39
Figura 4.29	Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{\max} para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.	40
Figura 4.30	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.12 e medidas com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.....	40
Figura 4.31	Distribuição de M_{\max} e TR medida com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial. Em destaque estão os pontos utilizados na calibração.	41
Figura 4.32	Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{\max} para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.	41
Figura 4.33	Tensões residuais calculadas com a equação E-4.13 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.....	42
Figura 4.34	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.14, para o anel SPK 791, obtida por RLM – superfície externa, direção tangencial.	43
Figura 4.35	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.14, para o anel SPK 882, obtida por RLM – superfície externa, direção tangencial.	43
Figura 4.36	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.15, para o anel SPK 791, obtida por RLS com M_{\max} – superfície externa, direção tangencial.	44
Figura 4.37	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.15, para o anel SPK 882, obtida por RLS com M_{\max} – superfície externa, direção tangencial.	44
Figura 4.38	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.16, para o anel SPK 791, obtida por RLS com H_{cm} – superfície externa, direção tangencial... ..	45
Figura 4.39	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.16, para o anel SPK 882, obtida por RLS com H_{cm} – superfície externa, direção tangencial... ..	45
Figura 4.40	Distribuição de M_{\max} em função da TR. Curva obtida utilizando cinco valores de M_{\max} de cada anel. A curva foi obtida por interpolação quadrática.....	46
Figura 4.41	Distribuição de H_{cm} em função da TR. Curva obtida utilizando cinco valores de H_{cm} de cada anel. A curva foi obtida por interpolação quadrática.....	46
Figura 4.42	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.17 para o anel OVAKO 82 obtida por regressão quadrática com M_{\max} – superfície externa, direção tangencial.	47

Figura 4.43	TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.17 para o anel SPK 882 e obtida por regressão quadrática para M_{\max} – superfície externa, direção tangencial.	47
Figura 4.44	TR medidas com XRD no anel OVAKO 82 e tensões calculadas com a equação E-4.18 obtida por regressão quadrática para H_{cm} – superfície externa, direção tangencial.	48
Figura 4.45	TR medidas com XRD no anel SPK 882 e tensões calculadas com a equação E-4.18 obtida por regressão quadrática para H_{cm} – superfície externa, direção tangencial.	48
Figura 5.1	Discrepância entre os resultados de tensões residuais obtidos com o procedimento 1 (ensaio tração/compressão) e os resultados medidos com XRD: (a) anel OVAKO 82 e (b) anel OVAKO 93.	52
Figura 5.2	Acoplamento do sensor magnético: (a) ao corpo de prova do ensaio tração/compressão e (b) aos anéis.	52
Figura 5.3	Faixa de tensão coberta pelo ensaio de tração/compressão empregado no procedimento 1 para a calibração. Solicitações fora da área destacada podem gerar flambagem na compressão ou escoamento na tração.	53
Figura 5.4	Exemplo de um comportamento quadrático de M_{\max} em função da tensão. Um mesmo valor de M_{\max} pode relacionar-se com dois valores de tensão.	54
Figura 5.5	Resultados obtidos com o procedimento 2: (a) anel OVAKO 82 e (b) anel OVAKO 93. Valores próximos dos medidos com XRD, revelando a aplicabilidade do método magnético aos anéis em estudo.	55
Figura 5.6	Resultados obtidos com o procedimento 5 para o anel OVAKO 82: (a) M_{\max} e (b) H_{cm} . Melhor correlação obtida com M_{\max}	55
Figura 5.7	Resultados obtidos com o procedimento 3 para o anel OVAKO 93: (a) pontos selecionados da curva medida com XRD e (b) resultados calculados com a função de calibração.	56
Figura 5.8	Resultados obtidos com o procedimento 4 para o anel OVAKO 93: (a) pontos selecionados da curva medida com XRD e (b) resultados calculados com a função de calibração.	56
Figura 5.9	Comparação entre a curva de tensões residuais medida com XRD e: (a) M_{\max} , (b) H_{cm} para o anel OVAKO 93. A melhor correlação é a de M_{\max}	57

Figura 5.10	Resultados obtidos com o procedimento 6 para o anel OVAKO 93: (a) calibração feita com M_{max} e (b) calibração feita com H_{cm} . Com H_{cm} não obteve-se boa correlação com XRD.	58
Figura 5.11	Resultados obtidos com o procedimento 7 para o anel OVAKO 93: (a) calibração feita com M_{max} e (b) calibração feita com H_{cm} . Boa correlação obtida com ambos os parâmetros magnéticos.....	58
Figura 5.12	Resultados obtidos com o procedimento 8 para o anel SPK 909: calibração feita com (a) RLM, (b) RLS com M_{max} e (c) RLS com H_{cm} . Não obteve-se correlação.....	59
Figura 5.13	Regressão quadrática de M_{max} em função da tensão e curva de regressão linear para os anéis SPK 909, OVAKO 82 e OVAKO 93.....	60
Figura 5.14	Resultados obtidos com o procedimento 9, utilizando M_{max} para o anel OVAKO 82. Não obteve-se boa correlação.....	60
Figura 5.15	(a) esquema do gradiente de tensão na profundidade dos anéis e diferença na profundidade de medição entre as técnicas; e (b) detalhe da área de integração de cada técnica.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição química do aço DIN 100Cr6 (% em peso).	16
Tabela 3.2	Anéis selecionados para estudo neste trabalho mostrando a média de TR (medida com XRD) e os principais parâmetros de usinagem utilizados....	19
Tabela 3.3	Resumo dos procedimentos de calibração estudados.....	24
Tabela 4.1	Média de TR e dos parâmetros magnéticos nos cinco anéis SPK. Valores utilizados para regressão linear múltipla e simples.	42
Tabela 5.1	Resumo dos procedimentos de calibração avaliados.....	51
Tabela 5.2	Índice IE obtido com os procedimentos de calibração.....	62
Tabela 0.1	Funções de calibração para o anel OVAKO 82.....	88
Tabela 0.2	Funções de calibração para o anel OVAKO 93.....	89
Tabela 0.3	Funções de calibração para o anel SPK 734.....	90
Tabela 0.4	Funções de calibração para o anel SPK 791.....	91
Tabela 0.5	Funções de calibração para o anel SPK 882.....	92
Tabela 0.6	Funções de calibração para o anel SPK 909.....	93
Tabela 0.7	Funções de calibração para o anel SPK 929.....	94

LISTA DE EQUAÇÕES

A relação de todas as equações utilizadas neste trabalho está no anexo A3.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- AISI : American Iron and Steel Institute;
- C2 : subprojeto do SFB 570 destinado à medição de tensões residuais em anéis de rolamento, cilindros e engrenagens;
- CP : corpo de prova;
- DIN : instituto alemão de normatização (Deutsches Institut für Normung);
- FC : função de calibração;
- H ou H_{ext} : campo magnético externo;
- H_{cm} : campo coercivo (parâmetro magnético medido com o equipamento Tiede);
- HP VEE Lab : ambiente gráfico para engenharia desenvolvido pela empresa Hewlett-Packard Company destinado a aquisição de dados;
- IE : índice de erro;
- $\overline{\text{IE}} (P)$: média do índice de erro para um determinado procedimento;
- $\overline{\text{IE}} (\text{anel})$: média do índice de erro para um determinado anel;
- IWT : Stiftung Institut für Werkstofftechnik;
- M : magnetização induzida em um material por um campo magnético externo;
- M_{max} : ruído Barkhausen (parâmetro magnético medido com o equipamento Tiede);
- OVAKO : tipo de anel de rolamento utilizado para as medições;
- P : refere-se a “procedimento de calibração”;
- P5- H_{cm} : procedimento de calibração número 5 empregando regressão linear simples com H_{cm} ;
- P5- M_{max} : procedimento de calibração número 5 empregando regressão linear simples com M_{max} ;
- P6- H_{cm} : procedimento de calibração número 6 empregando regressão linear simples com H_{cm} ;
- P6- M_{max} : procedimento de calibração número 6 empregando regressão linear simples com M_{max} ;

- P7- H_{cm} : procedimento de calibração número 7 empregando regressão linear simples com H_{cm} ;
- P7- M_{max} : procedimento de calibração número 7 empregando regressão linear simples com M_{max} ;
- P8-RLM : procedimento de calibração número 8 empregando regressão linear múltipla;
- P8- H_{cm} : procedimento de calibração número 8 empregando regressão linear simples com H_{cm} ;
- P8- M_{max} : procedimento de calibração número 8 empregando regressão linear simples com M_{max} ;
- P9- H_{cm} : procedimento de calibração número 9 empregando regressão quadrática com H_{cm} ;
- P9- M_{max} : procedimento de calibração número 9 empregando regressão quadrática com M_{max} ;
- RLM : regressão linear múltipla;
- RLS : regressão linear simples;
- RQ : regressão quadrática;
- SFB : Sonderforschungsbereich (o SFB 570 é o Collaborative Research Center Distortion Engineering);
- SPK : tipo de anel de rolamento utilizado para as medições;
- TR : tensões residuais;
- XRD : difração de raios-X (X-ray diffraction);
- $\sigma_L^{RS,I}$: tensão residual do tipo I, direção longitudinal;
- $\sigma^{RS,II}$: tensão residual do tipo II;
- $\sigma^{RS,III}$: tensão residual do tipo III.

RESUMO

Neste trabalho é feita uma revisão sobre o método de medição de tensões residuais pelo ruído Barkhausen e uma tentativa de fazer uso complementar deste método com o de difração de raios-X (DRX). Busca-se reduzir o tempo necessário para medição de tensões residuais (TR), principalmente em anéis de rolamento do projeto SFB 570 (Collaborative Research Center Distortion Engineering), desenvolvido no IWT (Stiftung Institut für Werkstofftechnik) na Alemanha. O principal problema quando se trabalha com métodos magnéticos para avaliação quantitativa de TR é a obtenção de uma curva de calibração adequada. A forma mais simples de se fazer tal calibração – ensaios de tração/compressão – é comprometida pela limitada faixa de tensões conseguida no ensaio, devido aos efeitos de escoamento e flambagem que se fazem presentes. Além disso, ainda existe a necessidade de que a microestrutura do corpo de prova seja idêntica à do componente que se deseja medir. As tensões residuais nos componentes estudados neste trabalho são de elevada magnitude inviabilizando, portanto, o uso de ensaio tração/compressão, e faz-se necessário o emprego de outro procedimento de calibração. Para tanto utiliza-se dados obtidos por DRX correlacionando-os com dois parâmetros magnéticos (ruído Barkhausen e campo coercivo) medidos no material. São apresentados e discutidos vários procedimentos empreendidos na busca por uma eficiente função de calibração. Ao final é feita uma explanação dos problemas enfrentados para implementação do método e é apresentada uma idéia para reduzir o tempo de medição das TR nos anéis de rolamento do projeto SFB 570.

ABSTRACT

A review of the *Barkhausen noise* method for residual stress measurement is addressed in this work as well as an attempting to make a complementary use of this method and the X-ray diffraction (XRD) technique. The main objective is to reduce the time necessary for the measurement of residual stresses, mainly for ball bearing rings in the SFB 570 project. The SFB 570 is the Collaborative Research Center Distortion Engineering, carried out at the IWT (Stiftung Institut für Werkstofftechnik) in Germany. A problem concerning micromagnetic methods, e.g. the Barkhausen noise, is the obtention of a reliable calibration curve. Tension/compression test is thought to be the easiest way to do such a calibration, but it is not suited to this special situation due to buckling and yielding effects over the specimen. Furthermore, it is mandatory that both, parts to be measured (bearing rings) and specimens (used in the calibration), have the same microstructure. Regarding the fact that the residual stresses values measured in this work are of high magnitude, it is impossible to use tension/compression tests for the calibration, being necessary to use another source of reliable data, so as the XRD technique. XRD data are correlated with two magnetic parameters (Barkhausen noise and coercive field) measured on the samples. Finally all the procedures performed in the searching of a reliable calibration function are presented and discussed. A report about the problems endured in this work and some suggestions to minimize them are also presented, as well as a proposal to reduce the time consumed for residual stress measurement of ball bearing rings in the SFB 570 project.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Qualquer processo de fabricação de componentes mecânicos gera tensões residuais. Sua origem está relacionada a três fatores: gradiente de deformações plásticas, gradiente de transformações de fase e gradiente de temperatura. Geralmente tem-se o efeito global dos três, mas a presença de somente um (durante o processo ou vida do componente) é suficiente para a formação de tensões residuais.

Este trabalho é parte integrante do subprojeto C2 do projeto SFB 570 o qual, dentre outras atividades, se destina a avaliação de tensões residuais em anéis de rolamento.

1.2 Motivação

O problema da distorção é causador de custos de produção que se refletem no preço do produto final. A diminuição da magnitude dessas distorções ou a redução de sua ocorrência vêm a otimizar o processo de produção (através da redução ou, até mesmo, eliminação de operações de re-trabalho). Conseqüentemente isso reflete na redução de custos agregados ao produto, o que justifica o investimento que está sendo feito no projeto SFB 570.

1.3 O projeto SFB 570

O SFB 570 (Sonderforschungsbereich 570) – Collaborative Research Center Distortion Engineering é um projeto financiado pela Deutsche Forschungsgemeinschaft – órgão do governo Alemão voltado à pesquisa. Está sendo desenvolvido no Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) na cidade de Bremen na Alemanha, tendo sido iniciado em 2001 com prazo máximo de 12 anos para sua conclusão. O objetivo do projeto é avaliar e buscar soluções para os problemas oriundos da distorção gerada em componentes mecânicos durante o processo de manufatura. Para tanto, três diferentes geometrias

(cilindros, anéis e engrenagens) produzidas com variados parâmetros de fabricação estão sendo caracterizadas sob diversos aspectos. Conforme já mencionado, o fenômeno da distorção é causador de custos extras no processo de fabricação e, conseqüentemente, no preço final de produtos e equipamentos, daí a justificativa para tal investimento por parte do governo Alemão.

No subprojeto C2, o principal método utilizado para as medições de tensões residuais é a difração de raios-X que tem no tempo de medição o seu principal ponto negativo. Assim, com a finalidade de otimizar o processo de medição, busca-se, com este trabalho, a implementação do método magnético do ruído Barkhausen para execução de tais medidas. Com difração de raios-X leva-se em torno de 48 horas para medir 36 pontos na circunferência completa, em uma única direção e uma única superfície, (com os equipamentos atualmente destinados a esta finalidade) enquanto que com o método magnético o mesmo volume de dados pode ser obtido em apenas 3 horas.

1.4 Objetivos

Os objetivos gerais deste trabalho foram:

- Revisar o método de medição de tensões residuais por ruído Barkhausen;
- Avaliar diferentes formas de correlacionar tensões residuais com o comportamento magnético de materiais ferromagnéticos.
- Reduzir o tempo necessário para medição de tensões residuais fazendo uso complementar das técnicas de difração de raios-X e ruído Barkhausen.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tensões e deformações residuais

Tensões residuais são tensões elásticas auto-equilibradas existentes num componente como resultado de processamento mecânico ou de solicitações mecânicas e/ou térmicas^[1,2,3,4,5,6]. Sua origem está associada a ocorrência, durante o processamento ou vida do componente, de um gradiente de um ou mais desses três “eventos”:

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

Havendo um gradiente de qualquer um dos eventos acima citados, as tensões residuais surgem devido à forças elásticas internas que tendem a trazer o material à sua configuração inicial, que existia antes da ação do evento. Quando esses eventos ocorrem em gradiente, algumas porções do material são mais solicitadas que outras. Tomando como exemplo um caso de deformação plástica em gradiente (solicitação de flexão, por exemplo) além do limite elástico do material, uma porção do material se plastifica enquanto outra se mantém no regime elástico. Quando a solicitação é removida a porção elástica tende a trazer o material à sua configuração inicial o que não ocorre devido a porção plastificada. O resultado é o surgimento de tensões elásticas e em equilíbrio no interior material, uma vez que certas porções são solicitadas por tração e outras por compressão (devido ao princípio da ação e reação). Quanto a magnitude são sempre menores ou iguais ao limite de escoamento do material.

A Figura 2.1 mostra um caso de carregamento provocando um gradiente de deformação plástica em um cilindro maciço sob solicitação de torção. Juntamente está mostrado um gráfico da tensão de cisalhamento em função do ângulo de torção ($\tau \times \rho$). Até a linha circular tracejada da Figura 2.1-(a), a solicitação se encontra dentro do limite elástico do material; além deste ponto ocorre a plastificação do cilindro. Após a remoção da solicitação a porção mais interna do cilindro (porção elástica) tende a retornar à sua

posição inicial. A parte mais externa do cilindro, por ter sido plastificada, já se encontra em uma configuração estável. Ocorre, deste modo, um jogo de forças entre as duas porções (plastificada e não plastificada) que resulta na formação de tensões residuais. Na Figura 2.1-(b) está mostrado o método analítico para o cálculo de tensões residuais que consiste em adicionar à solicitação real uma solicitação fictícia e totalmente elástica no sentido oposto. Na Figura 2.1-(c) está mostrada a distribuição de tensões no cilindro após a remoção da solicitação; são ditas tensões residuais por serem os resíduos do processo que impôs aquela solicitação.

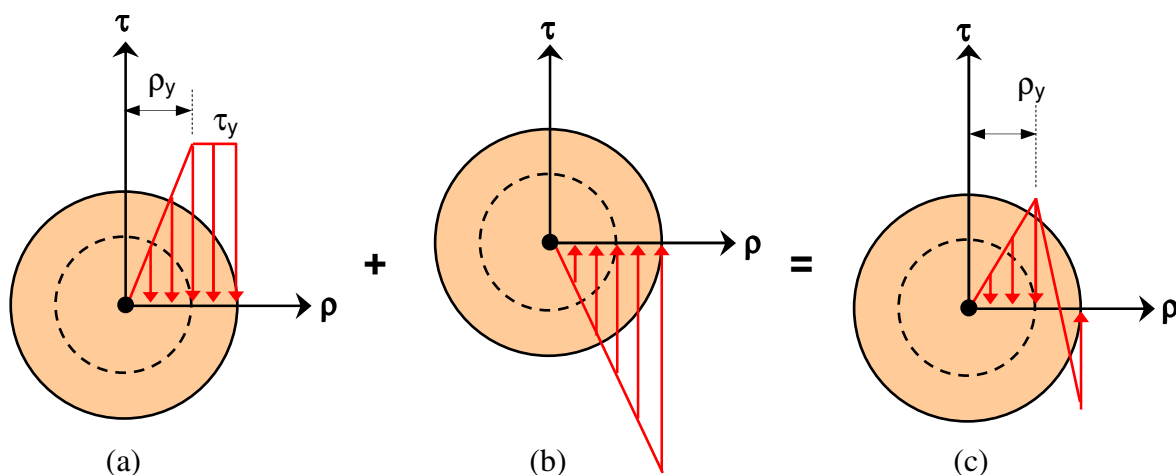


Figura 2.1 Formação de tensões residuais por gradiente de deformação plástica. Figura adaptada do livro *Materials Science and Engineering: an Introduction* (Callister)^[2].

As tensões residuais interagem com as tensões geradas no componente em serviço^[3,4,6], como está mostrado na Figura 2.2, exercendo forte influência sobre a vida do componente. A tensão efetiva será a resultante entre a tensão atuante em serviço e as tensões residuais.

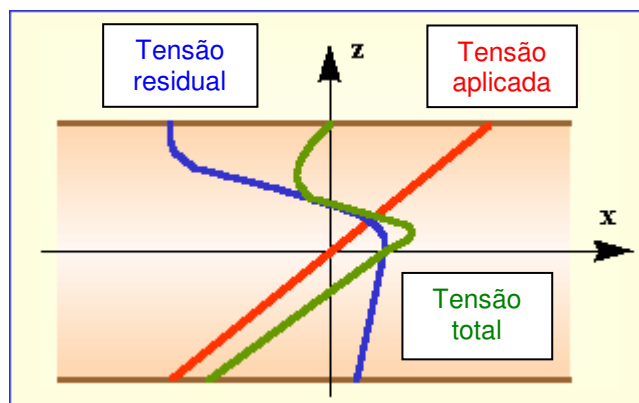


Figura 2.2 Diagrama esquemático indicando a tensão efetiva (TR + solicitações de serviço) observada em uma placa sob carregamento de flexão. Figura extraída do site *Physique & Industrie: research under contract*^[6].

O efeito das tensões residuais sobre o desempenho do componente em serviço pode ser positivo ou negativo, sendo muitas vezes necessário submetê-lo a tratamentos térmicos de alívio de tensões após o seu processamento. O tipo de tratamento térmico dependerá da magnitude e distribuição das tensões no componente^[2,3,45]. Deste modo é importante o conhecimento da magnitude e distribuição das TR, o que é feito experimentalmente com ensaios que podem ser destrutivos, semidestrutivos ou não-destrutivos^[1,4,5,9]. Embora se utilize o termo “medição de tensões residuais”, o que se mede fisicamente são as deformações residuais e a partir delas calculam-se (pela teoria da elasticidade) as tensões residuais. A Figura 2.3^[10] mostra a profundidade de penetração das técnicas de medição de TR utilizadas atualmente.

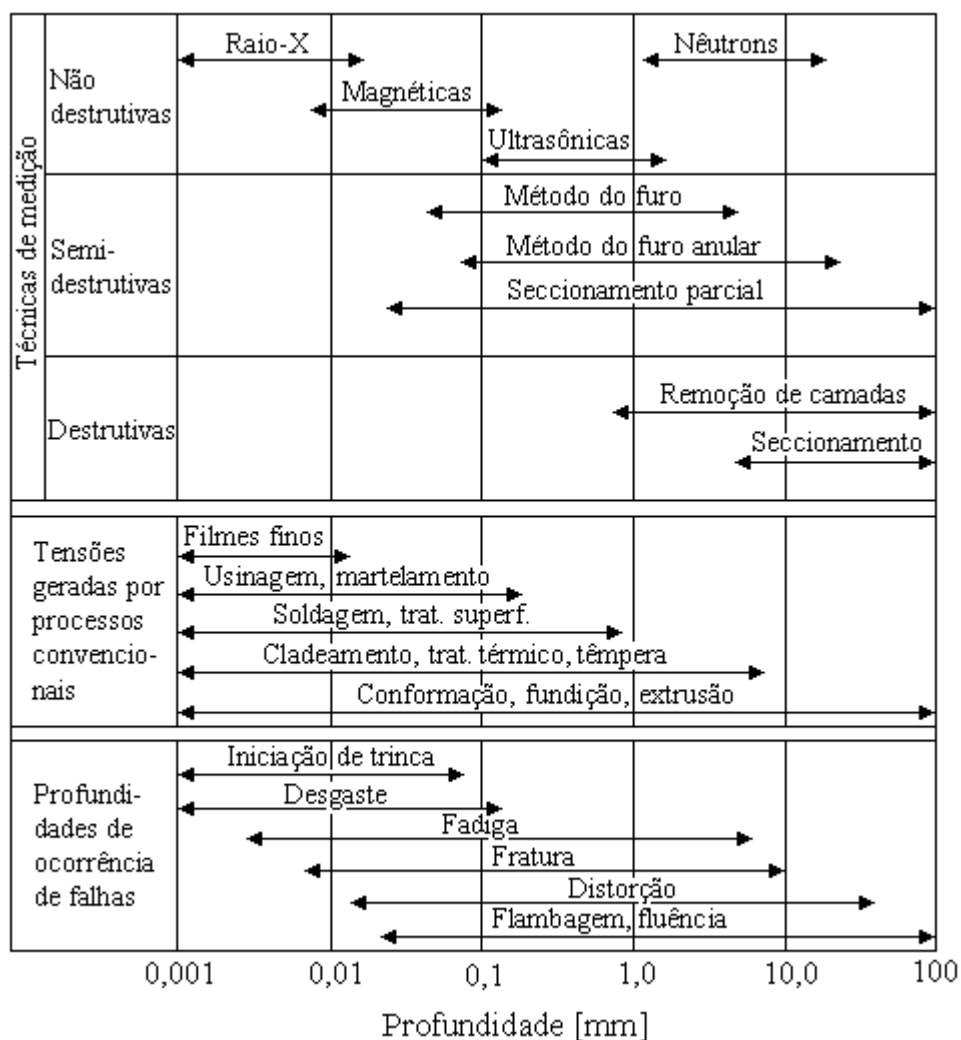


Figura 2.3 Profundidade de penetração das técnicas utilizadas atualmente para medição de TR. Figura adaptada do site *Los Alamos - National Laboratory*^[10].

Dentre as técnicas não-destrutivas, a difração de raios-X (XRD) é a mais empregada atualmente, porém apresenta algumas desvantagens sendo as principais: o custo relativamente elevado do equipamento, o elevado tempo de medição e a pequena profundidade de penetração. Métodos micromagnéticos de medição são técnicas que estão sendo empregadas atualmente como tentativa de suprir as desvantagens apresentadas pela XRD.

Classificam-se as TR em três tipos ^[1,3,4,6]: tipo I, II e III, sendo o tipo I o mais importante (de maior efeito sobre o desempenho do componente) e mais fácil de ser mensurado pois é de grandeza macro, envolvendo grandes porções do componente. Os tipos II e III são de natureza microscópica, sendo o tipo II da ordem de alguns grãos cristalinos e o tipo III da ordem de distâncias interatômicas (presentes em discordâncias). Também usam-se os termos, 1ª, 2ª e 3ª ordem para se referir às tensões I, II e III respectivamente. A Figura 2.4 mostra, esquematicamente, a ordem de grandeza dos três tipos de tensões residuais.

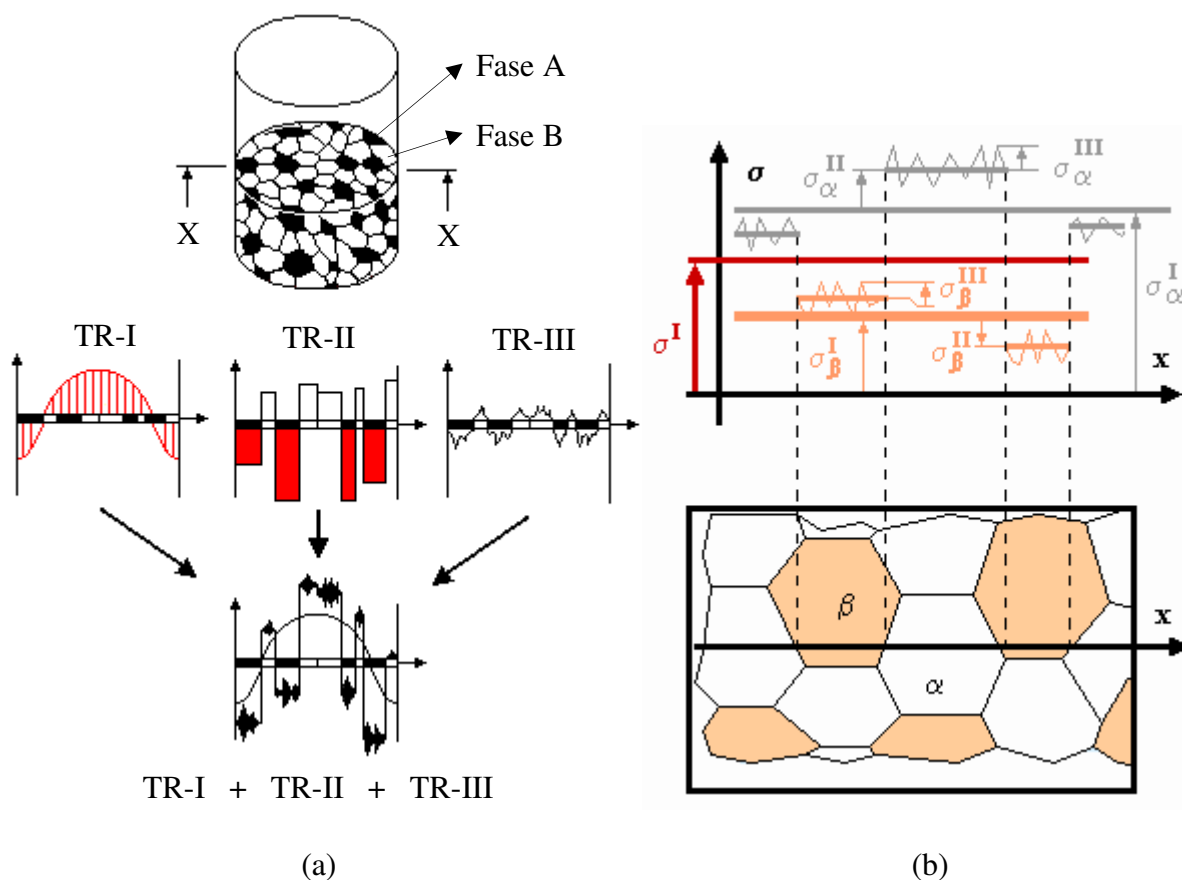


Figura 2.4 Classificação das tensões residuais e sua ordem de grandeza. Figuras adaptadas do site *Physique & Industrie: research under contract*^[6].

As tensões residuais presentes num componente serão o somatório das três escalas de grandeza I, II e III, como mostra a Figura 2.4-(a). Na Figura 2.4-(b) estão mostradas, esquematicamente, as três escalas de TR num material policristalino com as fases α e β .

O efeito das TR sobre a tensão efetiva atuante no componente permite seu uso de forma benéfica, aumentando sua vida útil, bem como possibilitando aplicações que seriam impossíveis sem a sua presença. Exemplos deste tipo de aplicação são vidros temperados, vigas I para construção civil, tubulações de indústrias petroquímicas, molas de suspensão automotiva e indústria aeronáutica. Deste modo foram desenvolvidos diversos processos para produzir tensões residuais em componentes mecânicos de forma controlada. Um dos processos mais utilizados para este fim é o shot peening, que está mostrado esquematicamente na Figura 2.5-(a). Neste processo a camada superficial do material é plastificada através do jateamento com esferas (metálicas ou cerâmicas). O jateamento tende a causar um alongamento ΔL da superfície (superfície A na figura) enquanto o núcleo se mantém intacto com seu comprimento L . O alongamento da superfície é, contudo, dificultado pelo núcleo levando à formação de TR: compressivas na superfície do componente e trativas no núcleo. Isto dificulta a nucleação e propagação de trincas superficiais e, conseqüentemente, aumenta a vida em fadiga do componente. Na Figura 2.5-(b) está mostrado, de forma ilustrativa, o aumento da vida em fadiga conseguida com shot peening no caso de um componente solicitado com carga intermitente.

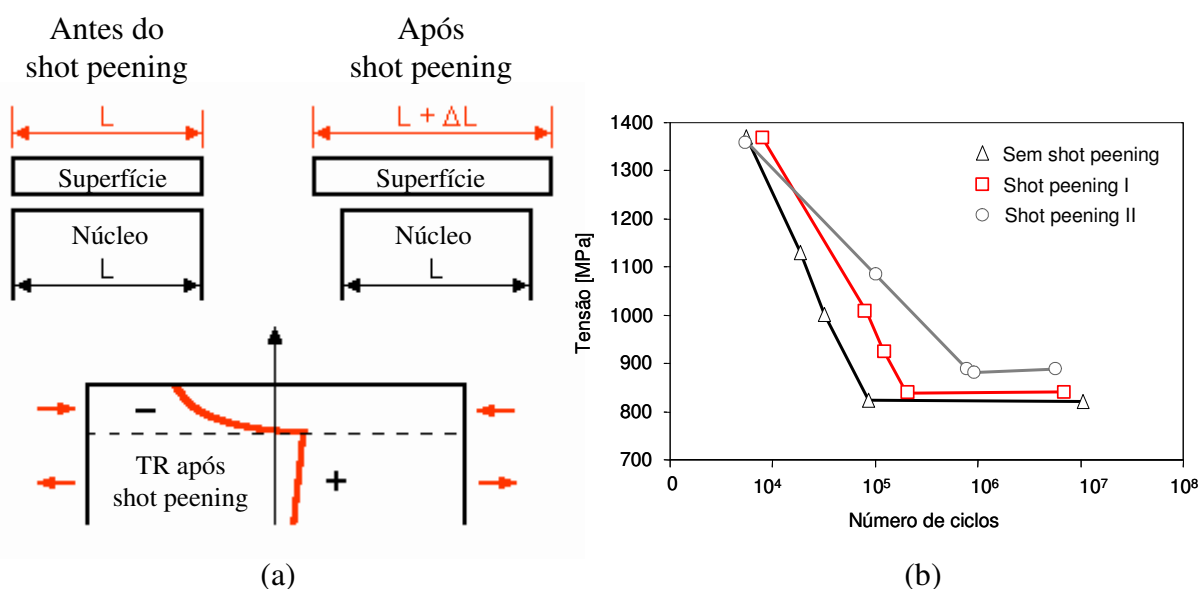


Figura 2.5 (a) TR obtidas após processo de shot peening e (b) aumento da vida em fadiga em aço AISI 4340 com shot peening de diferentes intensidades. Figuras adaptadas do site *Physique & Industrie: research under contract*^[6], e de Torres e Voorwald^[48].

2.2 Geração de tensões residuais em processos de usinagem

No processo de usinagem o mecanismo de formação de cavaco envolve a deformação plástica de pequenas porções do material próximas à superfície de corte da ferramenta^[47]. Deste modo tem efeito sobre a geração de tensões residuais no componente sendo usinado. O mecanismo envolve as seguintes etapas^[47]:

(a) Uma pequena porção do material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta;

(b) O material recalcado sofre deformação plástica que aumenta progressivamente até que as tensões de cisalhamento sejam suficientemente grandes para iniciar o deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça;

(c) Na seqüência ocorre a ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo das propriedades do material;

(d) O processo prossegue com a pastificação de outra porção adjacente àquela cisalhada.

Várias teorias foram desenvolvidas para determinar analiticamente o grau de deformação (e conseqüentemente as tensões residuais) gerado na usinagem a partir dos parâmetros do processo. Contudo sua determinação de forma precisa só é possível através de medições experimentais. A Figura 2.6 mostra alguns exemplos do efeito da usinagem sobre a formação de tensões residuais^[48].

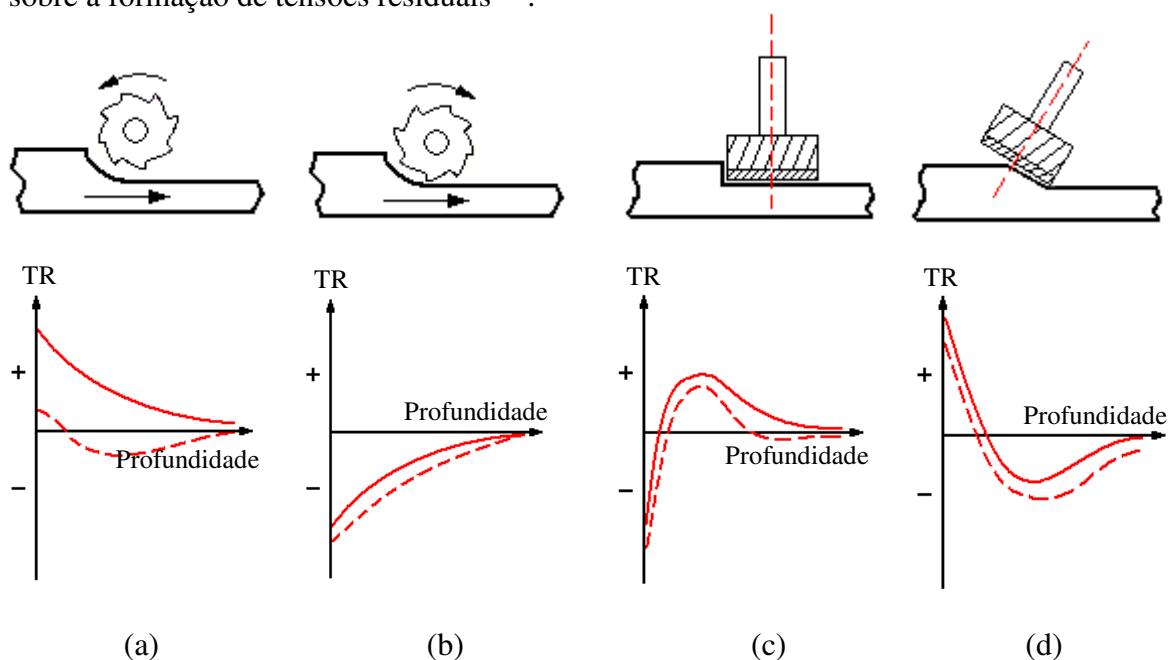


Figura 2.6 Efeito do processo de usinagem na geração de tensões residuais, onde: (a) fresamento tangencial concordante, (b) fresamento tangencial discordante, (c) fresamento de topo e (d) fresamento de topo inclinado. Figura adaptada de Ferraresi^[48].

2.3 Distorções em componentes mecânicos / anéis de rolamento

Não somente as operações de usinagem são geradoras de tensões residuais nos processos de fabricação, mas sim qualquer operação (conformação, forjamento, soldagem, dentre outros) não importando quão bem feito e cuidadoso seja o processo^[2,7]. Cada etapa do processo de fabricação exerce um efeito sobre as TR de forma que ao final tem-se o efeito global de cada etapa sobre o estado de tensões residuais. A temperatura desenvolvida no processo de fabricação também tem efeito sobre o estado de tensões, pois permite o rearranjo das tensões residuais ou até mesmo a sua eliminação através do reordenamento, em nível atômico, do material. Este reordenamento e alívio (total ou parcial) das TR resulta, muitas vezes, em alterações na forma do componente (distorções). Disto surge o problema da distorção em processos de fabricação.

Trabalhos desenvolvidos dentro do projeto SFB 570^[7,8] mostram os efeitos do dispositivo de sujeição (fixação da peça ao torno) e dos parâmetros de torneamento (velocidade de corte, profundidade de corte e avanço) sobre a distorção e tensões residuais dos anéis de rolamento. Foi observado que tratamentos térmicos de recozimento para alívio de TR intensificam ainda mais a distorção – neste caso mensurado em termos de desvio da circunferência – já existente nos anéis. Também foi observado que a sujeição em três pontos tem efeito prejudicial neste contexto, sendo preferível o uso de um dispositivo em forma de mandril garantindo uma sujeição mais uniforme^[7,8].

2.4 Comportamento magnético de materiais ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos são constituídos de pequenas regiões magnéticas que se assemelham a pequenos ímãs, denominadas *domínios magnéticos*. Esses domínios estão separados entre si por contornos denominados *paredes de domínio*, sendo que cada domínio orienta-se segundo uma direção cristalográfica mais favorável para ele^[13,14,16,19]. Num material ferromagnético não magnetizado, os domínios magnéticos estão orientados aleatoriamente, anulando-se no material como um todo^[19]. Porém na presença de um campo magnético externo, os domínios magnéticos são “forçados” a se reorientar segundo a direção do campo, tornando o material magnetizado^[1,16,20]. Além do seu efeito sobre a reorientação dos domínios, o campo magnético externo também interfere na forma deles, através do movimento das paredes de domínio. A Figura 2.7 mostra, de maneira

esquemática, como acontece o movimento das paredes de domínio na presença de um campo magnético externo.

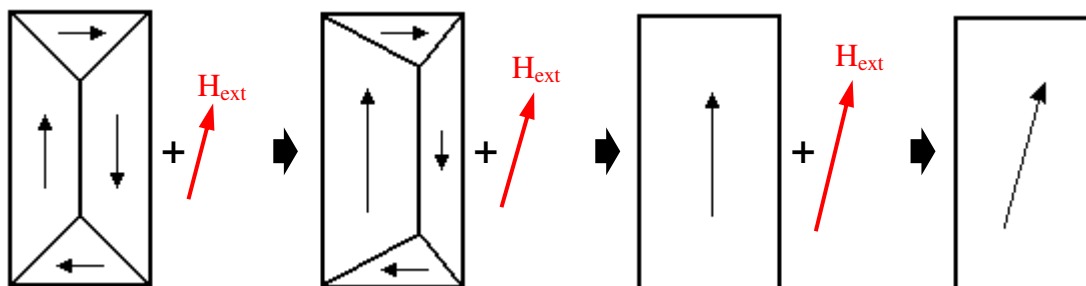


Figura 2.7 Movimento das paredes de domínio em resposta a um campo magnético externo de magnitude crescente. Figura adaptada do site *Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel*^[16].

A resposta do material ao processo de magnetização não é instantânea, existindo um atraso em relação ao campo magnético externo^[13]. Existe, assim, uma histerese no processo de magnetização e se este for alternado obtém-se uma curva denominada *laço de histerese*. Isto está mostrado na Figura 2.8 onde tem-se um exemplo esquemático da curva de magnetização de um material ferromagnético num processo alternado.

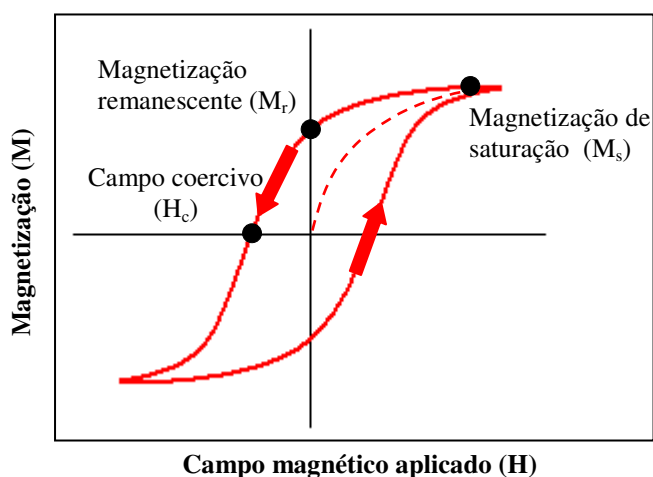


Figura 2.8 Exemplo de curva de magnetização de um material ferromagnético. Figura adaptada do site DW Akademie^[28].

Na Figura 2.8, o eixo das abscissas representa o campo magnético externo, indicado pela letra H; enquanto o eixo das ordenadas representa a magnetização do material, indicado por M. O início do processo de magnetização é descrito pela curva tracejada da figura, partindo da origem. Elevando a magnitude do campo externo H o material

magnetiza-se no mesmo sentido mas somente até um determinado limite a partir do qual o valor de M não aumenta mais. A magnetização do material permanece constante mesmo aumentando-se o valor de H . Este ponto é denominado de *magnetização de saturação* (M_s) e indica o máximo de magnetização que o material admite^[13]. Invertendo o sentido do campo externo o material se desmagnetiza, contudo numa taxa mais lenta que o campo; mesmo quando H chega a zero o material apresenta uma *magnetização remanescente* (M_r)^[13]. Aumentando mais a magnitude de H neste novo sentido, observa-se que a magnetização do material só chega a zero quando o campo externo atinge um determinado valor no sentido oposto (parte negativa do eixo X da Figura 2.8). Este campo é denominado *campo coercivo* (H_c)^[13] e indica a magnitude do campo externo que, no sentido oposto, desmagnetiza completamente o material previamente magnetizado.

Conforme as propriedades do material o laço de histerese pode se apresentar de diferentes formas^[24,25,26,27], geralmente expressas pela razão M_r/M_s . A Figura 2.9 mostra dois exemplos extremos, um material dito fracamente magnético (baixo valor de M_r/M_s) e outro fortemente magnético (M_r/M_s próximo de 1)^[28].

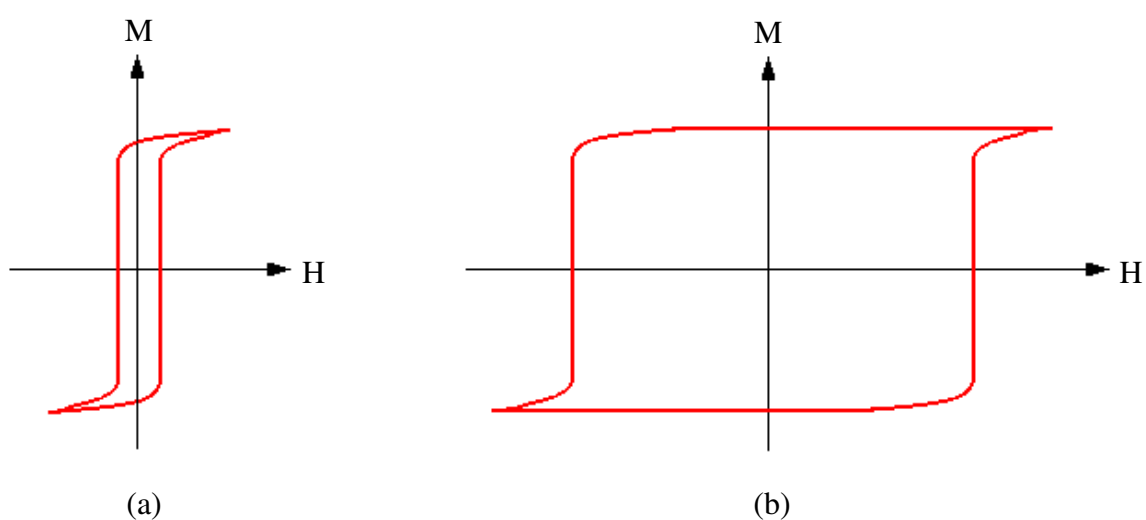


Figura 2.9 Laço de histerese de um material (a) fracamente magnético e (b) fortemente magnético. Figura adaptada do site DW Akademie^[28].

A microestrutura é um dos fatores que exercem influência no comportamento magnético do material e, conseqüentemente, na forma da curva de magnetização^[24,25,26,27]. Na Figura 2.10 são mostradas as curvas de magnetização para três tipos de microestrutura de uma liga Fe-Si.

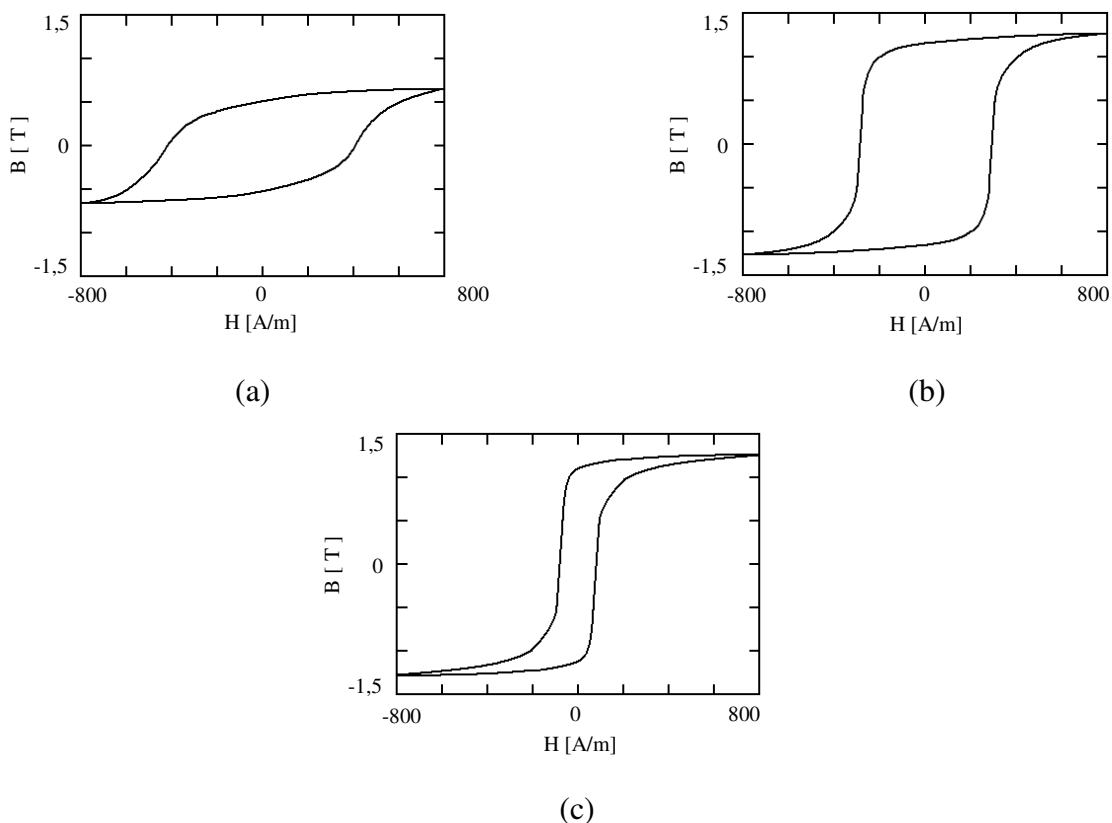


Figura 2.10 Influência da microestrutura na curva de histerese de uma liga Fe-Si: (a) temperada, (b) recozida a 800 °C e (c) recozida a 1200 °C. Figura extraída de Qiang, Li. et al^[25].

2.5 Efeito Barkhausen

Colocando um material ferromagnético próximo a um campo magnético externo alternado (AC) as paredes de domínio se movimentarão em dois sentidos (expandindo e contraindo) continuamente. Esta movimentação das paredes de domínio e reorientação dos mesmos em dois sentidos ciclicamente gera, conseqüentemente, mudanças também cíclicas na magnetização do material como um todo^[1,17,18,23,29]. A Figura 2.11 mostra o efeito do campo magnético externo sobre os domínios magnéticos, realinhando-os segundo suas linhas de campo.

Este processo de realinhamento dos domínios, contudo, não é suave ocorrendo com movimentos abruptos. O cientista alemão Heinrich Barkhausen descobriu em 1919 que colocando-se uma bobina de fio condutor próximo ao componente sendo magnetizado, ou seja, enquanto as paredes de domínio se movimentam, as mudanças abruptas na magnetização induzirão pulsos elétricos à bobina. Conectando a bobina a um auto-falante

ouve-se ruídos durante o processo de magnetização, devido aos pulsos elétricos gerados na bobina^[1,17,21,22].

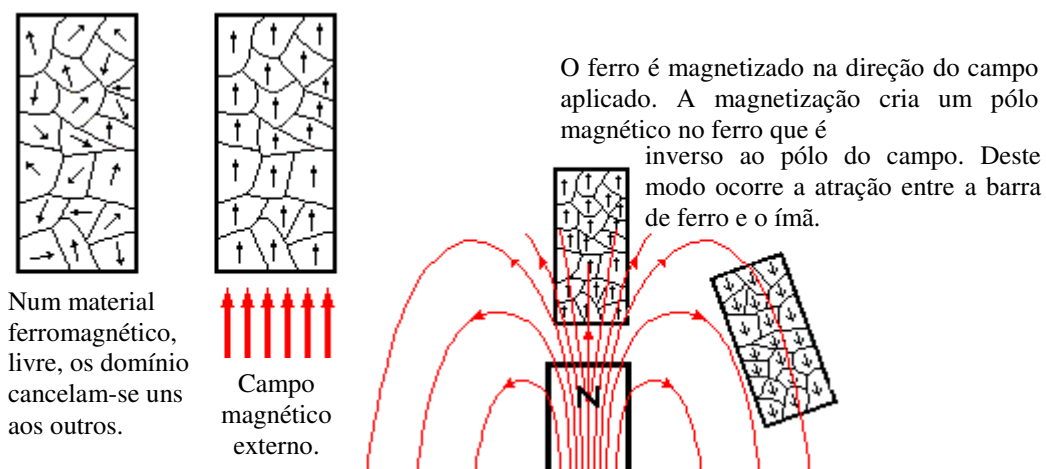


Figura 2.11 Efeito de um campo magnético externo sobre os domínios magnéticos, mostrando seu realinhamento segundo as linhas do campo externo. Figura extraída do site Georgia State University^[19].

Barkhausen comprovou com seu experimento que o processo de magnetização caracterizado pela curva de histerese não é contínuo, e sim, constituído de vários pulsos. A Figura 2.12^[17] mostra, esquematicamente, um detalhe de parte da curva de magnetização, onde se pode ver os pulsos descobertos por Barkhausen. Tais pulsos só poderiam ser observados visualmente com equipamentos de extrema sensibilidade, inexistentes na época. Devido aos ruídos ouvidos no auto-falante este fenômeno foi denominado de ruído Barkhausen (*Barkhausen noise*).

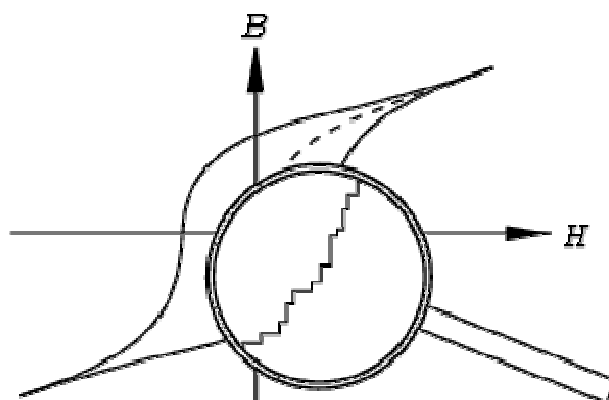


Figura 2.12 Exemplo de laço de histerese de um processo de magnetização mostrando o aspecto descontínuo da curva. Figura extraída do site University of Washington^[17].

A Figura 2.13 mostra um componente sendo magnetizado por um campo magnético alternado e uma “bobina sensor” na qual a corrente elétrica é induzida. Este é um exemplo típico de construção de sensores para avaliação do ruído Barkhausen^[32,34].

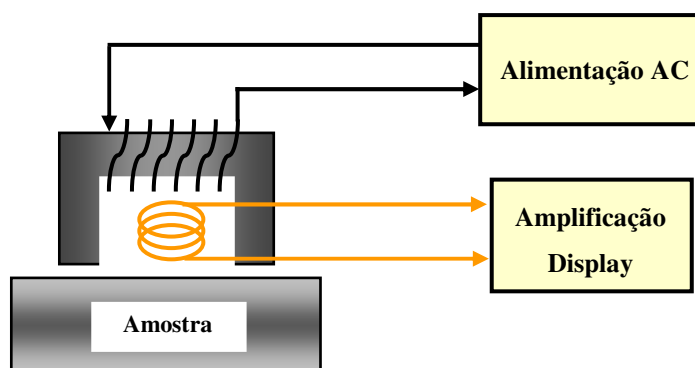


Figura 2.13 Magnetização de um material ferromagnético com campo alternado e bobina para captação do ruído Barkhausen.

A Figura 2.14 mostra, esquematicamente, os pulsos de tensão gerados na bobina em decorrência da magnetização da amostra. Estes pulsos são denominados de ruído Barkhausen.

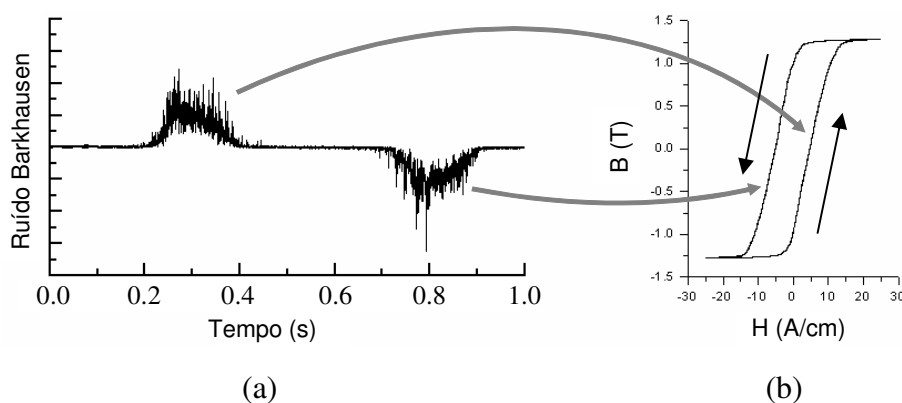


Figura 2.14 (a) Ruído Barkhausen gerado na bobina devido à magnetização não uniforme do componente e (b) ciclo de histerese mostrando sua inter-relação com o ruído Barkhausen. Figura adaptada do site Stresstech group^[33].

Além da microestrutura, o estado de tensão no componente também exerce influência no movimento dos domínios magnéticos e, conseqüentemente, na curva de magnetização do material^[9,18,22,24]. A relação entre tensão e propriedades magnéticas é denominada *magnetoelasticidade*^[9], sendo que tensões trativas tendem a aumentar a intensidade do ruído Barkhausen enquanto tensões compressivas tendem a diminuí-la. Deste modo a magnetoelasticidade permite o uso do magnetismo para avaliação (qualificação e quantificação) de tensões residuais, bastando para isso fazer uma calibração prévia.

Os parâmetros magnéticos mais utilizados para esta finalidade são a intensidade do ruído Barkhausen, que indica a mobilidade dos domínios magnéticos, e o valor do campo coercivo. Outros parâmetros também podem ser utilizados melhorando a resolução das medidas, porém tornam o processo de calibração mais dispendioso^[9,23,30,31]. Um exemplo de medição utilizando o ruído Barkhausen e o campo coercivo está mostrado na Figura 2.15, onde também está mostrado o significado de cada um em relação à curva de histerese. Na Figura 2.15-(a) está mostrado o sinal tal como ele é captado pela bobina (em V); na Figura 2.15-(b) tem-se o mesmo sinal submetido a tratamento matemático com mínimos quadrados e na Figura 2.15-(c) o sinal após este tratamento junto com laço de histerese, mostrando a relação existente entre ambos^[33].

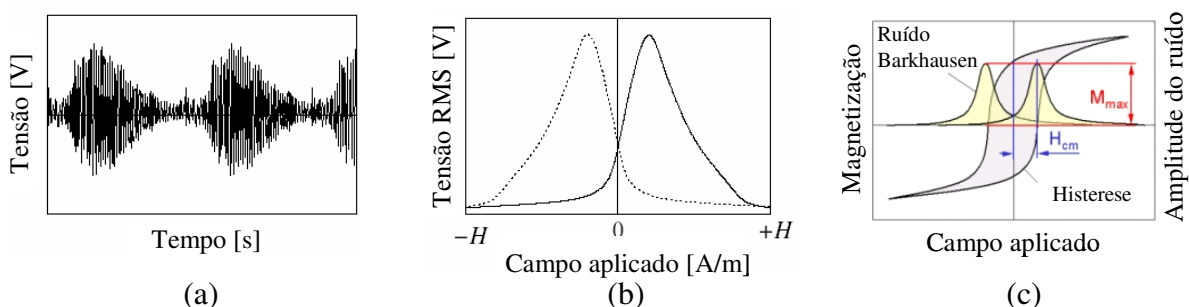


Figura 2.15 Exemplo de medição empregando a técnica do ruído Barkhausen e do campo coercivo: (a) sinal medido em V, (b) processamento do sinal por mínimos quadrados e (c) comparação do sinal processado com o laço de histerese. Figura adaptada do site Stresstech group^[33].

A calibração é feita correlacionando os parâmetros magnéticos com valores conhecidos de tensões residuais. Para fazer esta correlação constrói-se um gráfico dos parâmetros magnéticos em função da tensão. A forma mais usual de calibração consiste em extrair das curvas obtidas, por regressão linear múltipla (RLM), a função de calibração^[30,35,43]. A equação E-2.1 mostra o formato da função de calibração obtida para um caso onde se tem dois parâmetros magnéticos.

$$\sigma = A + B \cdot M_{max} + C \cdot H_{cm} \quad (E-2.1)$$

onde:

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

Com essa função de calibração é possível calcular tensões residuais correspondentes a pares de valores de parâmetros magnéticos (H_{cm} e M_{max}).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostras analisadas

A Figura 3.1 mostra, esquematicamente, o processo de fabricação ao qual são submetidos os anéis de rolamento no projeto SFB 570^[11].

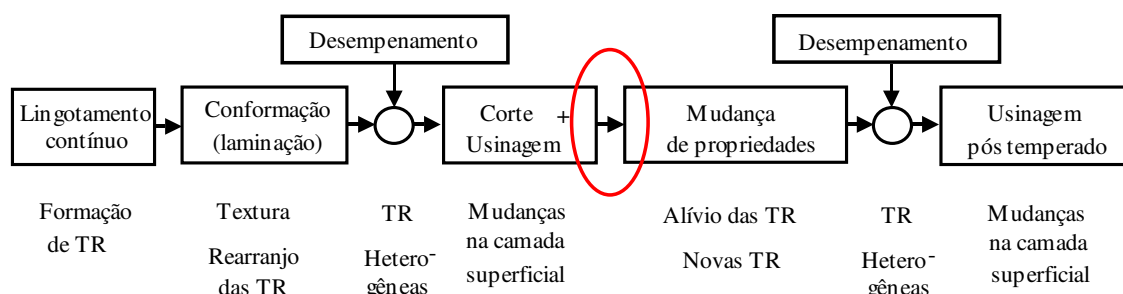


Figura 3.1 Seqüência esquemática do processamento empregado nos anéis de rolamento analisados no projeto SFB 570. O círculo em destaque indica a etapa do processo da qual provém os anéis analisados neste trabalho. Figura extraída de Hirsch, T.^[11].

Neste trabalho foram avaliados somente anéis provenientes da primeira etapa de usinagem, ou seja, o ponto do processo destacado na Figura 3.1. São anéis sem tratamento térmico para alívio de tensões (somente esferoidização pré-usinagem) e com diferentes níveis de tensões residuais devidos ao processo de conformação e às diferenças nos parâmetros de usinagem. Todos os anéis analisados foram manufacturados com aço DIN 100Cr6 (AISI 52100) cuja composição química está mostrada na Tabela 3.1. Existem dois fornecedores deste material (OVAKO e SPK) mas ambos utilizam as mesmas especificações.

Tabela 3.1 Composição química do aço DIN 100Cr6 (% em peso).

DIN 100Cr6 (AISI 52100)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0,966	0,236	0,468	0,008	0,005	1,58	0,107	0,11	Bal.

Na Figura 3.2 estão mostradas as dimensões dos anéis juntamente com uma fotomicrografia onde se pode ver a microestrutura perlítica com cementita pró-eutetóide.

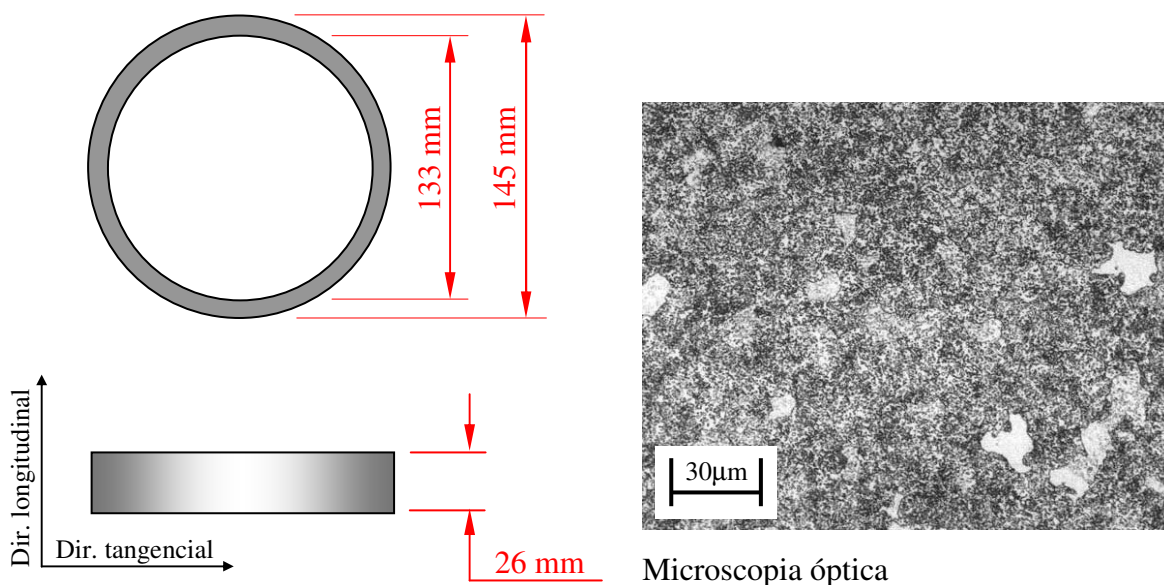


Figura 3.2 Dimensões, sistema de coordenadas e microestrutura hipereutetóide (perlita e cementita) dos anéis vista com microscopia óptica.

A sujeição dos anéis para usinagem pode ser feita por dois dispositivos diferentes, sendo que ambos têm influência na modificação do estado de TR já existente^[7,8]. Um deles, por sujeitar os anéis em três pontos localizados, induz à formação de TR variáveis ao longo de sua circunferência. Este tipo de sujeição causa deformação elástica do anel, o que leva à remoção irregular de material em sua espessura ao longo da circunferência durante o torneamento. Isto causa uma reorganização das TR na busca por uma condição de equilíbrio e reflete em distorção da geometria circunferencial do anel. O outro dispositivo de sujeição foi desenvolvido com a finalidade de minimizar este efeito, utilizando um sistema que se afixa aos anéis de maneira mais uniforme. A deformação elástica do anel deixa de ser tão variável ao longo da circunferência e o resultado é menor distorção pós-usinagem. A Figura 3.3-(a) mostra o dispositivo inicialmente utilizado, que se afixa aos anéis de maneira a causar a distribuição de tensões residuais que estão mostradas (esquemáticamente) na figura. A Figura 3.3-(b) mostra o segundo dispositivo de sujeição; observa-se que a distribuição de tensões residuais pós-usinagem tende a ser de menor magnitude.

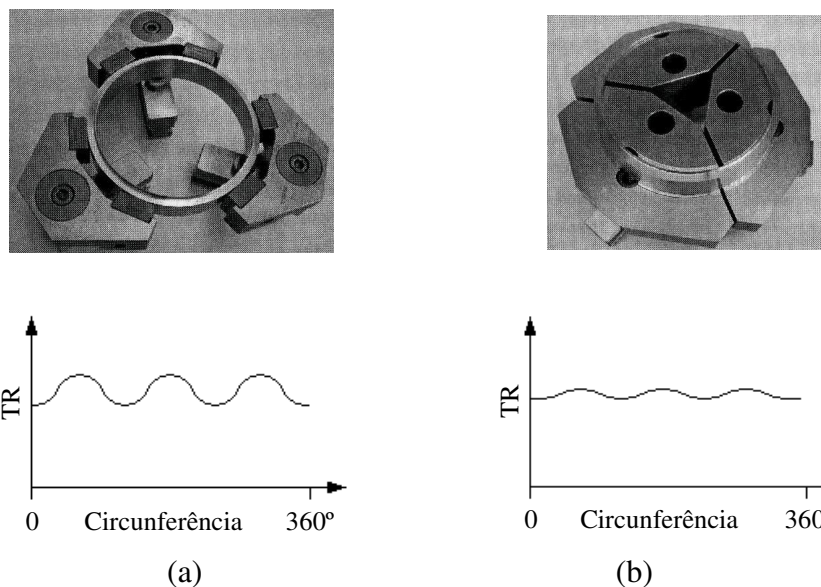


Figura 3.3 Duas formas de sujeição para o processo de usinagem: (a) dispositivo de fixação uniforme – não gera variações de tensões, (b) dispositivo de fixação a três pontos – gera tensões variáveis ao longo do perímetro do anel.

O perfil de TR a partir da superfície do anel é semelhante para todos: trativo externamente, compressivo ao centro e trativo novamente na superfície interna. Na Figura 3.4 está mostrado parte do perfil das TR na direção tangencial do anel OVAKO 16.

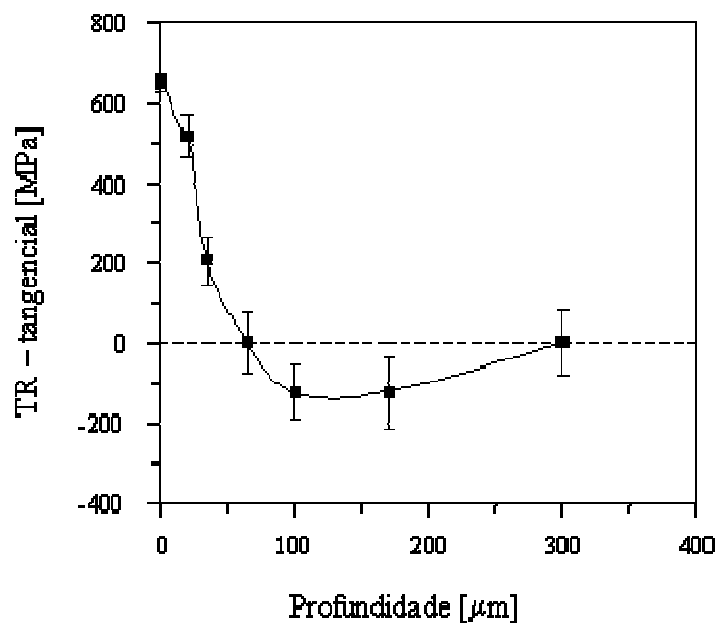


Figura 3.4 Perfil de tensões residuais do anel OVAKO 16, todos os anéis apresentam (aproximadamente) este mesmo perfil de distribuição de tensões residuais.

Os sete anéis selecionados para este trabalho apresentam diferentes níveis de tensões residuais tangenciais na superfície externa, medidos previamente com difração de

raios-X. A nomenclatura adotada para designá-los aqui é a mesma utilizada no projeto SFB 570. Na tabela 3.2 estão indicados os anéis selecionados, juntamente com o nível médio de TR tangenciais na superfície externa e os principais parâmetros de usinagem empregados em cada um.

Tabela 3.2 Anéis selecionados para estudo neste trabalho mostrando a média de TR (medida com XRD) e os principais parâmetros de usinagem utilizados.

Anel	$\overline{\text{TR}}$ 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

3.2 Sistema de medição

Para as medições magnéticas foi utilizado o equipamento Tiede Ferrotest-DUR^[14]. Este equipamento é 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 a medição dos anéis, um campo magnético alternado é induzido nas amostras e as respostas do material a este campo são monitoradas. Com este equipamento pode-se medir dois parâmetros magnéticos: o campo coercivo H_{cm} (A/cm) e a intensidade do ruído Barkhausen M_{max} (V). Estes parâmetros estão mostrados, esquematicamente, na Figura 3.5^[33].

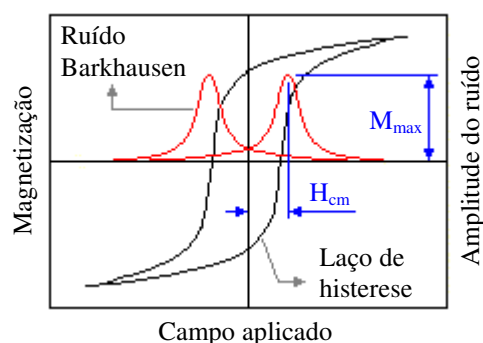


Figura 3.5 Representação esquemática dos parâmetros magnéticos H_{cm} e M_{max} medidos com o equipamento utilizado. Figura adaptada do site Stresstech group^[33].

Na Figura 3.6 encontra-se uma foto do equipamento utilizado. Mais detalhes sobre o equipamento são encontrados no anexo A4.

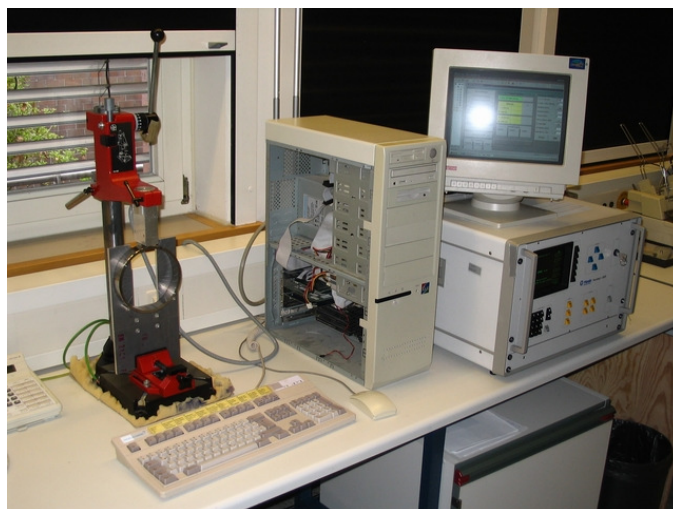
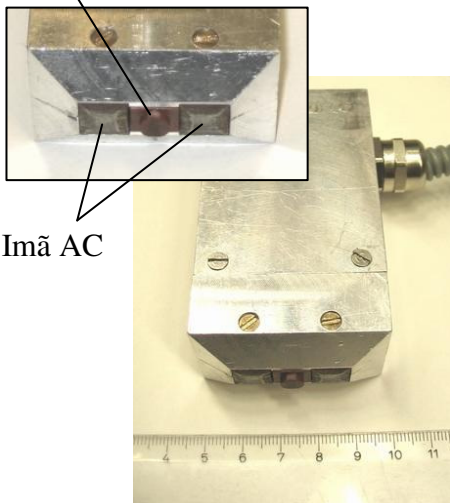


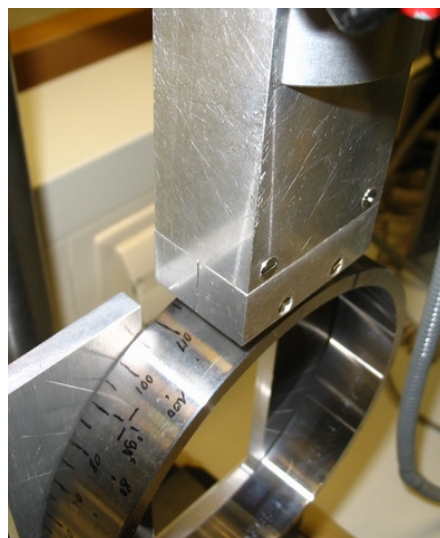
Figura 3.6 Sistema de medição utilizado nas medições de tensões residuais pelo método magnético: equipamento 3MA Tiede Ferrotest-DUR, microcomputador PC, programa de aquisição desenvolvido em ambiente HP VEE Lab.

A Figura 3.7 mostra o sensor magnético, e o seu acoplamento aos anéis.

Bobina (elemento sensor)



Ímã AC



(a)

(b)

Figura 3.7 (a) Detalhe do sensor magnético e (b) acoplamento ao anel para medição dos parâmetros magnéticos. Os três elementos (dois ímãs e bobina sensor) precisam estar em contato com o componente a ser medido.

3.3 Metodologia

As medições do campo coercivo H_{cm} e do ruído Barkhausen M_{max} foram conduzidas a cada dez graus ao longo do perímetro dos anéis na superfície externa e direção tangencial. Tomou-se a média de duas medições realizadas em cada ponto. Para a aquisição dos dados foi utilizado um programa desenvolvido em ambiente HP VEE Lab (Hewlett-Packard Company) pela empresa Tiede Rissprüfanlagen. O equipamento foi configurado para gerar um campo de 20A/cm a uma frequência de 100Hz, utilizando um filtro *passa-faixa* de 10MHz. A frequência do filtro passa-faixa é o fator determinante da profundidade de medição das tensões residuais, sendo que quanto maior a frequência, mais próxima da superfície é a medição. Para o equipamento e amostras utilizadas neste trabalho, uma frequência de 10MHz permite medições a, aproximadamente, 10 μ m de profundidade^[12]. Mais detalhes da configuração do equipamento são encontrados no anexo A4.

Para a calibração precisa-se utilizar valores conhecidos de tensões residuais, tomados como referência^[30,35,43]. Ensaios de *tração/compressão* são a alternativa mais simples para isto; contudo, apresenta o problema da faixa de tensão coberta pelo ensaio ser limitada. Esta limitação se deve aos efeitos de flambagem (em compressão) e escoamento (em tração) do corpo de prova que podem ocorrer nesse tipo de ensaio. Além disso, ainda existe a forte dependência do comportamento magnético do material com a microestrutura, exigindo que o corpo de prova utilizado no ensaio tenha microestrutura idêntica a dos anéis.

Outra forma de fazer a calibração é utilizando valores de TR do próprio anel medidos previamente com outras técnicas de medição, como difração de raios-X por exemplo. Assim se evita o problema da diferença de microestrutura entre o corpo de prova e o material em análise (anéis). Por outro lado traz um inconveniente: em processos de calibração é desejável uma faixa ampla da variável de referência para fazer a devida correlação com a variável a ser calibrada. Ao usar informações de TR dos próprios anéis, não se tem este gradiente de tensões.

A correlação de tensão com os parâmetros magnéticos H_{cm} e M_{max} é feita, geralmente, por regressão linear múltipla (RLM) obtendo-se uma função do tipo representado pela equação E-3.1^[30,35,43].

$$Y = A \cdot X_1 + B \cdot X_2 \quad (E-3.1)$$

sendo:

- Y : variável dependente;
- X₁ : primeira variável independente;
- X₂ : segunda variável independente;
- A e B : constantes da regressão linear múltipla.

Em termos de H_{cm} e M_{max}, que são os parâmetros magnéticos utilizados neste trabalho, a equação E-3.1 fica da forma mostrada na equação E-3.2:

$$TR = A \cdot H_{cm} + B \cdot M_{max} \quad (3.2)$$

Foram experimentados vários métodos de calibração – aqui denominados de *procedimentos* – na busca por uma boa correlação entre os parâmetros magnéticos e as TR. Isto porque esta técnica ainda não é normatizada e apresenta alguns inconvenientes – descritos no item 5 (*discussão dos resultados*) – ainda a serem solucionados para permitir a quantificação de TR com precisão “aceitável”. A seguir tem-se a descrição dos nove procedimentos de calibração experimentados.

Procedimento 1:

Calibração feita com ensaio de tração/compressão em um corpo de prova instrumentado com strain gage. Com uma máquina universal de tração foram aplicadas solicitações de -100 até 300MPa em um corpo de prova (CP) retangular construído com o mesmo material dos anéis (DIN 100Cr6). O CP foi instrumentado com um strain gage do tipo folha, orientado longitudinalmente em seu centro, com o qual se fez o monitoramento das deformações durante o ensaio. O sensor magnético foi acoplado ao CP também em seu centro, sendo tomados os resultados de H_{cm} e M_{max} para cada incremento de deformação (equivalente a 50 MPa) na faixa coberta pelo ensaio. Através de regressão linear múltipla (RLM) obteve-se a *função de calibração* (FC).

Somente neste procedimento foi feito uso de ensaio tração/compressão. Os demais procedimentos de calibração experimentados foram todos utilizando resultados de TR medidos com XRD nos próprios anéis.

Procedimento 2:

A calibração foi feita utilizando todos os valores de tensões residuais disponíveis para o anel ao longo de sua circunferência (a cada dez graus). Obteve-se a FC por RLM.

Procedimento 3:

A FC foi obtida utilizando cinco valores de TR (quantidade mínima de pontos para RLM envolvendo três variáveis) escolhidos de forma uniformemente espaçada ao longo da circunferência de todo o anel. A função de calibração foi obtida com RLM.

Procedimento 4:

Cinco pontos adjacentes foram escolhidos da curva de TR medida por difração de raios-X. Os valores foram tomados da região onde se observou maior gradiente de TR. Função de calibração obtida por RLM.

Procedimento 5:

Calibração utilizando todos os valores de TR no perímetro do anel. Foram obtidas duas FC por *regressão linear simples* (RLS): uma com M_{\max} e outra com H_{cm} . Este procedimento difere do procedimento 2 por utilizar somente um parâmetro magnético para a calibração, daí o emprego de RLS no lugar de RLM.

Procedimento 6:

Foram utilizados cinco pontos adjacentes de TR, selecionados da região de maior gradiente. Duas FC foram obtidas por RLS para cada anel: uma com M_{\max} e outra com H_{cm} .

Procedimento 7:

Cinco pontos uniformemente espaçados foram utilizados para a calibração. Com RLS foram obtidas duas FC para cada anel.

Procedimento 8:

Calibração feita com a média de TR dos cinco anéis SPK. Foi tomada a média das tensões residuais e dos valores de H_{cm} e M_{\max} no perímetro dos anéis. Três funções de calibração foram obtidas: uma com RLM e duas com RLS (H_{cm} e M_{\max}).

Procedimento 9:

Foram utilizados os valores de H_{cm} e M_{\max} de todos os anéis (OVAKO e SPK). Cinco pontos espaçados de cada anel foram plotados juntos em função da tensão em um gráfico para H_{cm} e em outro gráfico para M_{\max} . Com regressão quadrática foi feita uma tentativa de obter uma FC que servisse para todos os anéis. Duas funções de calibração foram obtidas: uma para H_{cm} e outra para M_{\max} .

A Tabela 3.3 traz um resumo dos procedimentos de calibração.

Tabela 3.3 Resumo dos procedimentos de calibração estudados.

Proced.	Tensão de referência	Quantidade de pontos utilizados	Tipo de regressão
1	Ensaio tração/compressão	7 (-100MPa até 250MPa)	RLM
2	XRD	36 (todos disponíveis no perímetro do anel)	RLM
3	XRD	5 uniformemente espaçados	RLM
4	XRD	5 adjacentes	RLM
5	XRD	36 (todos disponíveis no perímetro do anel)	RLS
6	XRD	5 adjacentes	RLS
7	XRD	5 uniformemente espaçados	RLS
8	XRD	5 (média dos anéis SPK)	RLM e RLS
9	XRD	35 (5 pontos de cada um dos 7 anéis)	Quadrática

4 RESULTADOS

Na Figura 4.1 está mostrada a distribuição de H_{cm} e M_{max} ao longo do perímetro do anel OVAKO 82, medida com o equipamento magnético na superfície externa e direção tangencial. Esta medição foi feita utilizando um filtro passa faixa de 10 MHz.

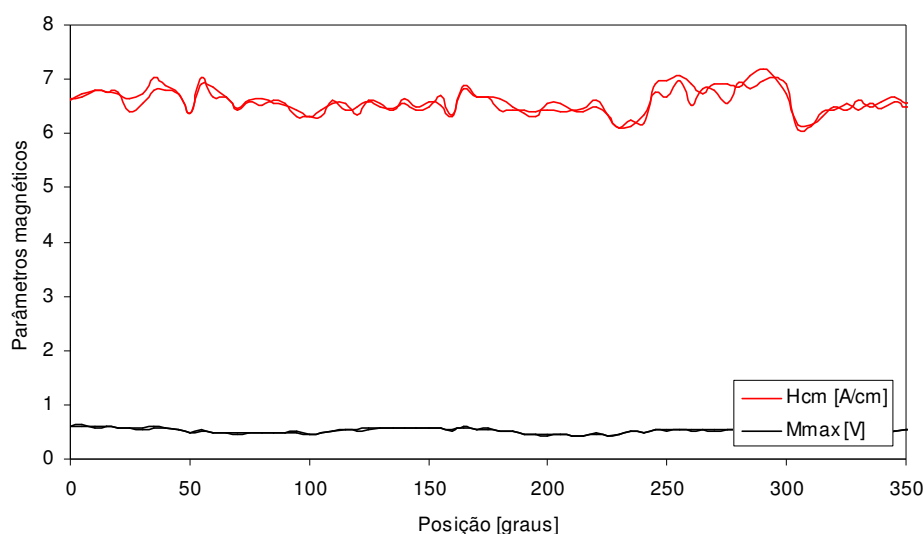


Figura 4.1 Distribuição de H_{cm} e M_{max} ao longo do perímetro do anel OVAKO 82 para duas medições – superfície externa, direção tangencial (filtro passa faixa de 10MHz).

A diferença de magnitude entre M_{max} e H_{cm} torna difícil sua representação num gráfico com somente uma escala, como o da Figura 4.1. Portanto, os gráficos contendo os resultados das medições magnéticas serão apresentados em gráficos com duas ordenadas. O gráfico da Figura 4.2 contém os mesmos dados daquele da Figura 4.1, mas está plotado com duas ordenadas. Somente a média de H_{cm} e de M_{max} está mostrada.

Alguns resultados obtidos em cada um dos nove procedimentos de calibração descritos no item 3.3 são apresentados separadamente nos itens que seguem. A listagem completa de todos os resultados de TR é encontrada no anexo A1.

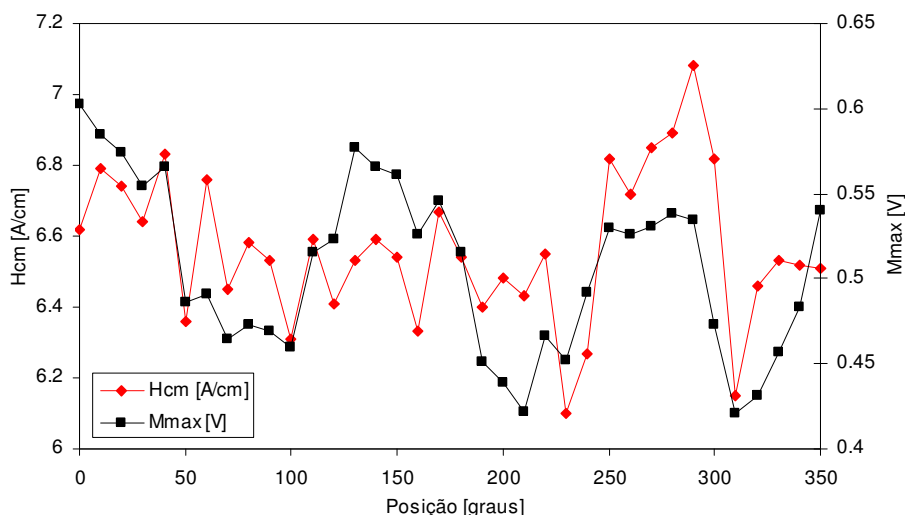


Figura 4.2 Média de H_{cm} e de M_{max} obtida de duas medições ao longo do perímetro do anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial (filtro passa faixa de 10MHz).

4.1 Procedimento de calibração 1

A calibração foi feita utilizando valores de tensão obtidos com ensaio de tração/compressão. O ensaio foi realizado numa faixa de deformação equivalente a -100MPa até 300MPa de tensão em um corpo de prova de mesmo material dos anéis (DIN 100Cr6) instrumentado com um strain gage uniaxial e com o sensor magnético.

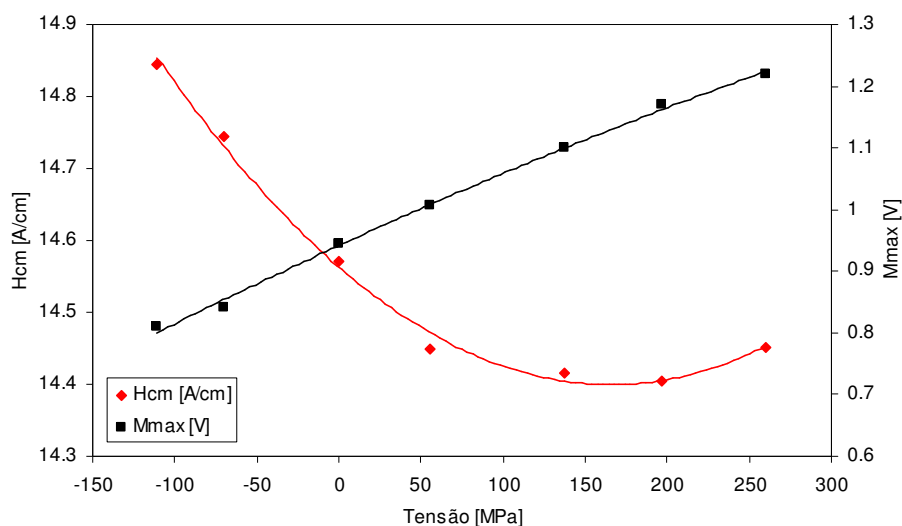


Figura 4.3 Distribuição de H_{cm} e M_{max} em função da tensão. Dados obtidos com ensaio de tração/compressão num corpo de prova de material DIN 100Cr6, usinado e recozido para alívio de tensões. Dados medidos para a direção longitudinal do corpo de prova com filtro passa faixa de 10MHz.

Os valores de tensão foram calculados com a Lei de Hooke, a partir das deformações medidas pelo strain gage. O strain gage e o sensor magnético estavam ambos orientados na direção longitudinal e situados ao centro do corpo de prova. Os resultados de H_{cm} e M_{max} foram obtidos usando um filtro passa faixa de 10MHz e estão mostrados na Figura 4.3.

Com os valores de H_{cm} e M_{max} mostrados na figura 4.3 foi feita regressão linear múltipla (RLM) usando o software Analyse-it (módulo para MS Excel produzido pela empresa Analyse-it Software Ltd.). Utilizando os valores de tensão como variável dependente e H_{cm} e M_{max} como independentes obteve-se a função de calibração E-4.1.

$$TR = -105,08 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{max} + 1130,505 \quad R^2 = 0,98 \quad (E-4.1)$$

Nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 são apresentados os resultados de TR obtidos com a equação E-4.1 para os anéis OVAKO 82, OVAKO 93 e SPK 882, respectivamente. Também são mostrados os valores de TR medidos com difração de raios-X (XRD).

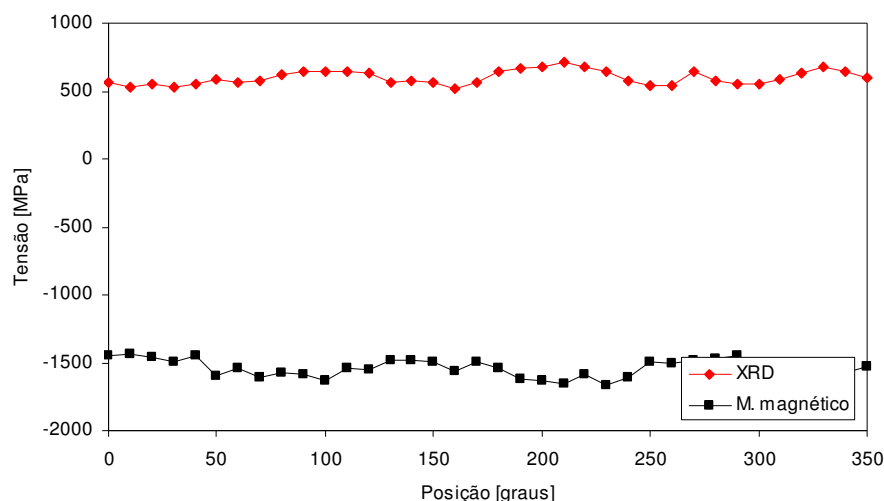


Figura 4.4 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.1 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

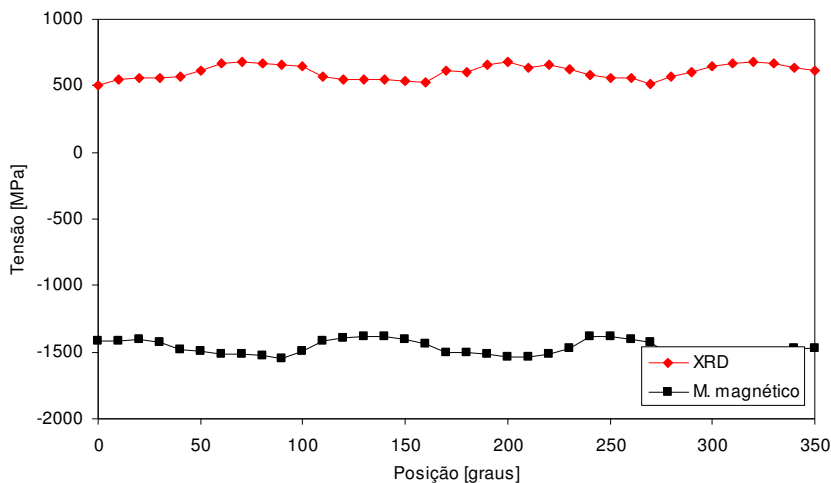


Figura 4.5 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.1 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.

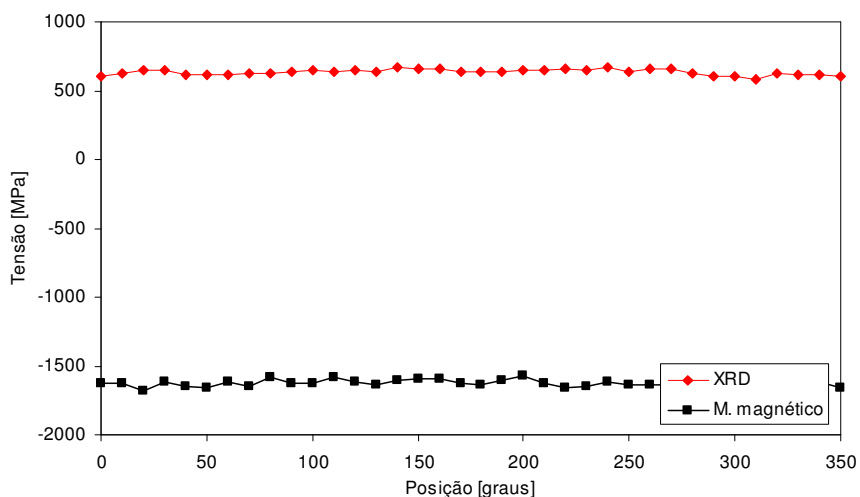


Figura 4.6 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.1 e medidas com XRD para o anel SPK 884 – superfície externa, direção tangencial.

4.2 Procedimento de calibração 2

Calibração feita com valores de tensões residuais medidos previamente com XRD. Foram utilizados todos os 36 valores de TR medidos no perímetro do anel. A função de calibração (uma para cada anel) foi obtida através de RLM com o software Analyse-it.

Para o anel OVAKO 82 obteve-se a função de calibração E-4.2.

$$TR = -7,3 \cdot H_{cm} - 706,86 \cdot M_{max} + 1003,53 \quad R^2 = 0,46 \quad (E-4.2)$$

Para o anel OVAKO 93 obteve-se a função de calibração E-4.3:

$$TR = -63,84 \cdot H_{cm} - 825,49 \cdot M_{max} + 1500,97 \quad R2 = 0,64 \quad (E-4.3)$$

Na Figura 4.7 e Figura 4.8 estão mostrados os resultados calculados para os anéis OVAKO 82 e OVAKO 93, respectivamente, cada qual com sua função de calibração.

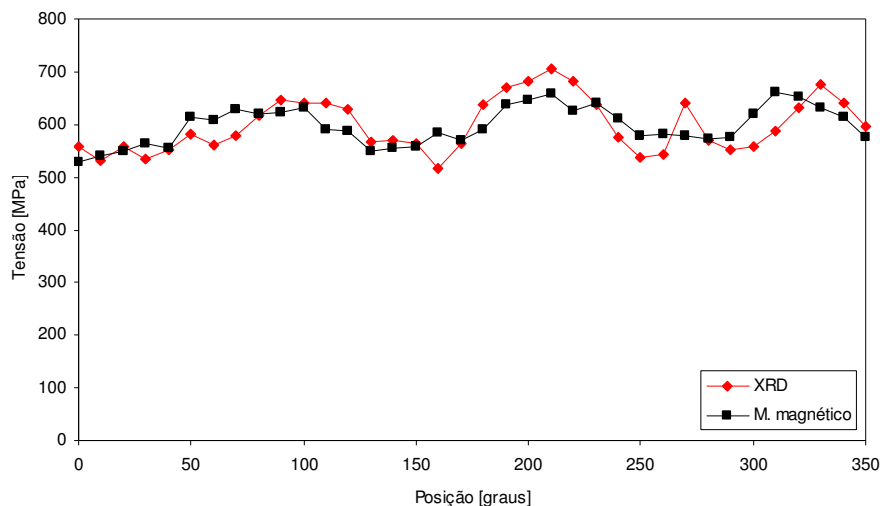


Figura 4.7 Tensões residuais calculadas com a equação 4.2 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

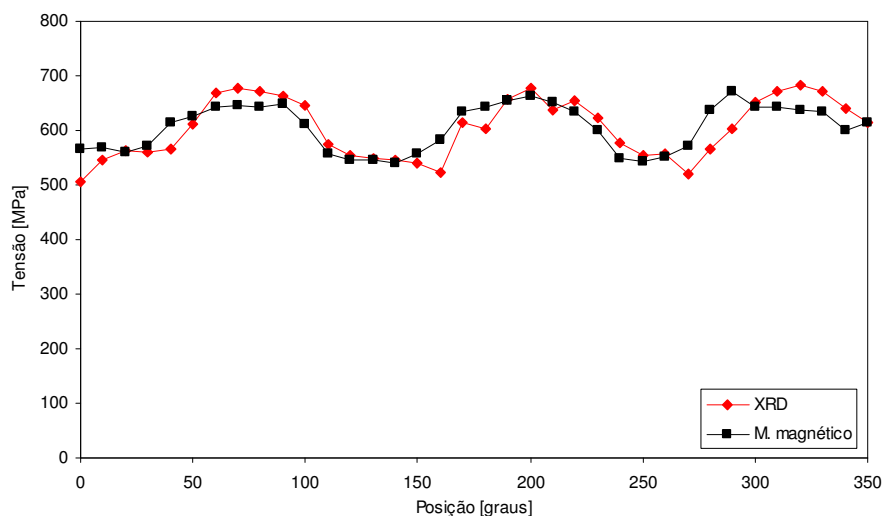


Figura 4.8 Tensões residuais calculadas com a equação 4.3 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.

4.3 Procedimento de calibração 3

Calibração feita com cinco pontos de TR uniformemente espaçados medidos com XRD no perímetro do anel. A função de calibração foi obtida com RLM, uma para cada anel.

A Figura 4.9 mostra a curva de TR do anel OVAKO 82 medida com XRD destacando as cinco posições selecionadas para a calibração.

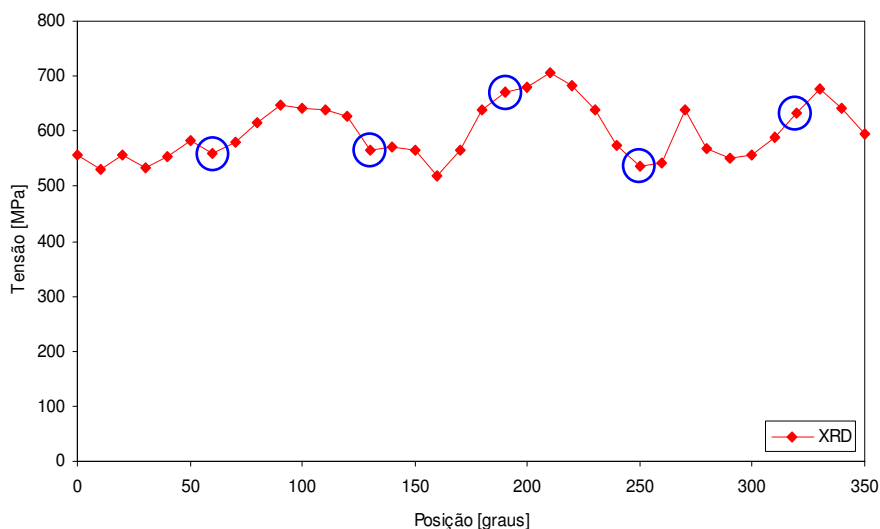


Figura 4.9 Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 82 medidas com XRD. As marcações na figura indicam as cinco posições selecionadas espaçadamente para a calibração.

Da regressão linear múltipla obteve-se a equação E-4.4.

$$TR = -299,7 \cdot H_{cm} - 279,44 \cdot M_{max} + 2700,76 \quad R^2 = 0,96 \quad (E-4.4)$$

Com esta função de calibração obteve-se o resultado mostrado na Figura 4.10.

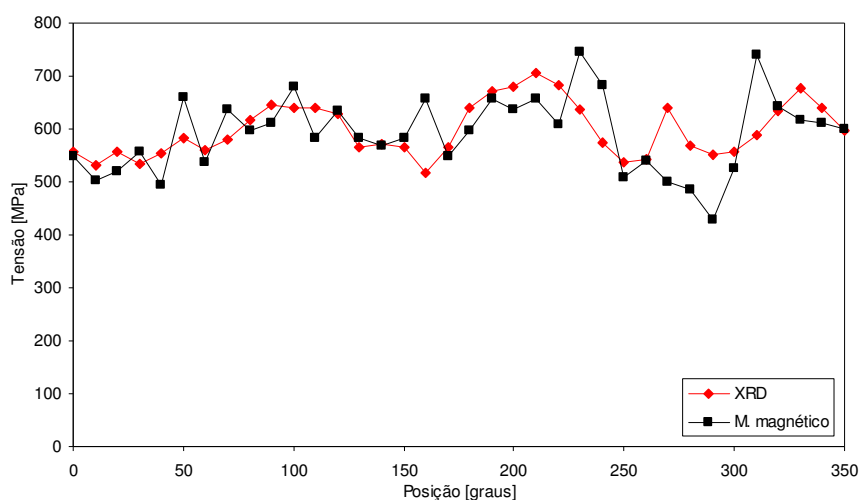


Figura 4.10 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.4 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

Para o anel OVAKO 93 está mostrada, na Figura 4.11, a curva de TR medida com XRD, juntamente com as cinco posições selecionadas de maneira uniformemente espaçada para a calibração.

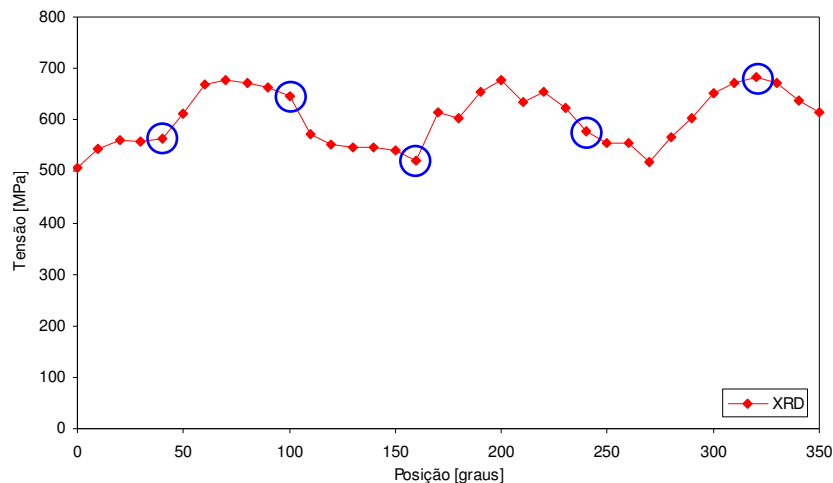


Figura 4.11 Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 93 medidas com XRD. As marcações na figura indicam as cinco posições selecionadas espaçadamente para a calibração.

Com RLM e empregando os valores de H_{cm} e M_{max} respectivos aos cinco pontos selecionados, obteve-se a equação E-4.5.

$$TR = -170,92 \cdot H_{cm} - 789,45 \cdot M_{max} + 2213,83 \quad R^2 = 0,63 \quad (E-4.5)$$

Empregando a equação E-4.5 obteve-se o resultado mostrado na Figura 4.12.

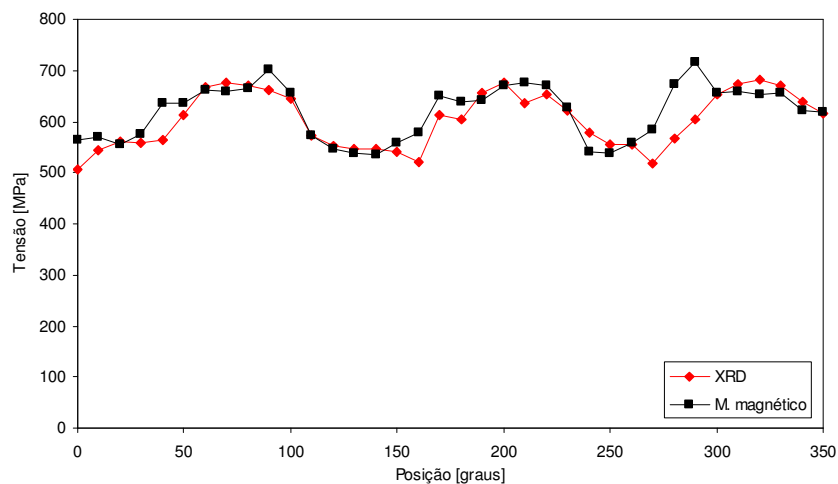


Figura 4.12 Tensões residuais calculadas com a equação 4.5 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.

4.4 Procedimento de calibração 4

Calibração feita com cinco pontos adjacentes de TR medidos com XRD no perímetro do anel. Os pontos foram escolhidos da região de maior gradiente de tensão e com RLM foi obtida uma função de calibração para cada anel.

A Figura 4.13 mostra a curva de TR do anel OVAKO 82 medida com XRD destacando os cinco pontos selecionados para a calibração.

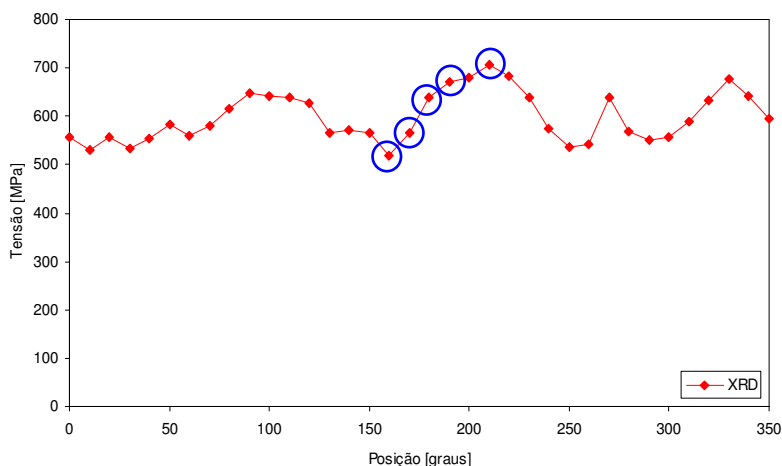


Figura 4.13 Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 82 medidas com XRD. As marcações na figura indicam os cinco pontos escolhidos da região com maior gradiente, para a calibração.

Com RLM, empregando os valores de H_{cm} e M_{max} referentes aos cinco pontos selecionados, obteve-se a função de calibração E-4.6.

$$TR = -193,82 \cdot H_{cm} - 620,33 \cdot M_{max} + 2207,38 \quad R^2 = 0,93 \quad (E-4.6)$$

O resultado obtido com o emprego da equação E-4.6 está mostrado na Figura 4.14.

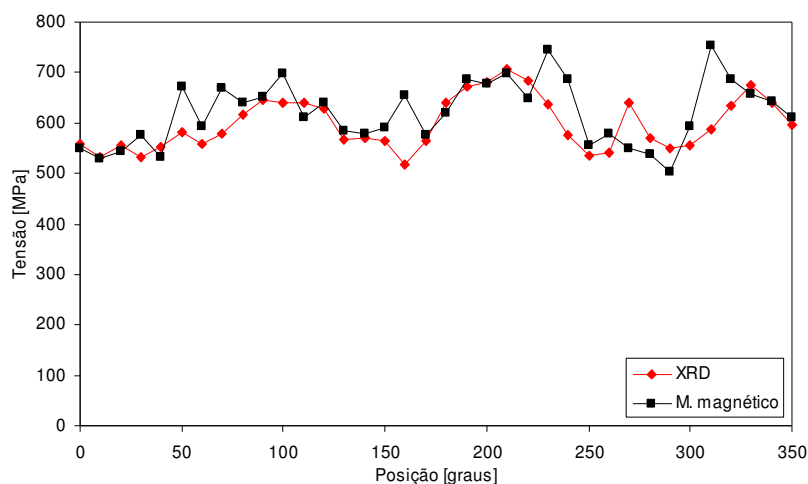


Figura 4.14 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.6 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

Para o anel OVAKO 93 foram escolhidos os pontos mostrados na Figura 4.15.

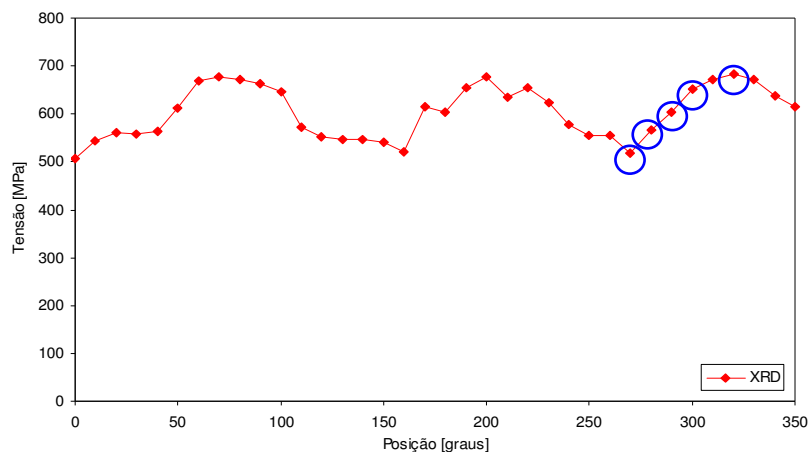


Figura 4.15 Tensões residuais tangenciais na superfície externa do anel OVAKO 93 medidas com XRD. As marcações na figura indicam os cinco pontos escolhidos na região de maior gradiente de tensões.

Com regressão linear múltipla obteve-se a equação de calibração E-4.7.

$$TR = 330,84 \cdot H_{cm} - 1705,38 \cdot M_{max} - 651,6 \quad R^2 = 0,84 \quad (E-4.7)$$

O resultado obtido com esta função de calibração está mostrado na Figura 4.16.

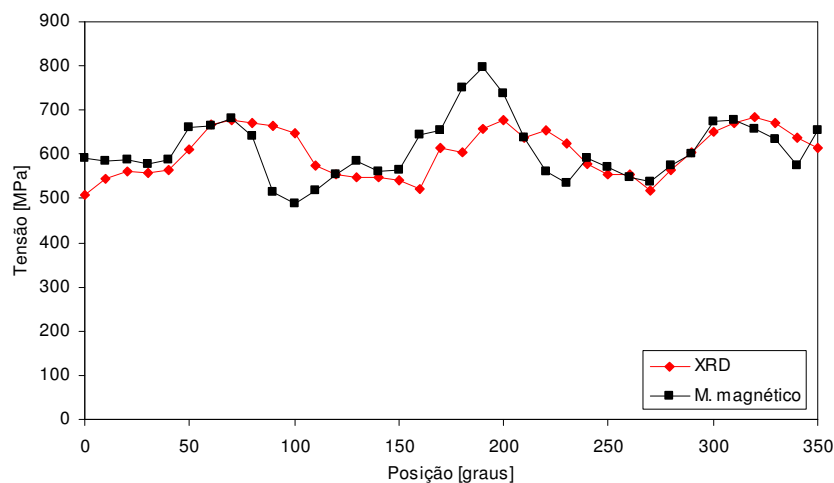


Figura 4.16 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.7 e medidas com XRD para o anel OVAKO 93 – superfície externa, direção tangencial.

4.5 Procedimento de calibração 5

A calibração foi feita com todos os 36 pontos de TR medidos com XRD no perímetro do anel. Duas funções de calibração foram obtidas com RLS para cada anel: uma com M_{\max} e outra com H_{cm} . A regressão linear foi feita com o software Microsoft Excel.

A Figura 4.17 mostra a distribuição de H_{cm} medida no perímetro do anel SPK 909, juntamente com os resultados de TR medidos com XRD.

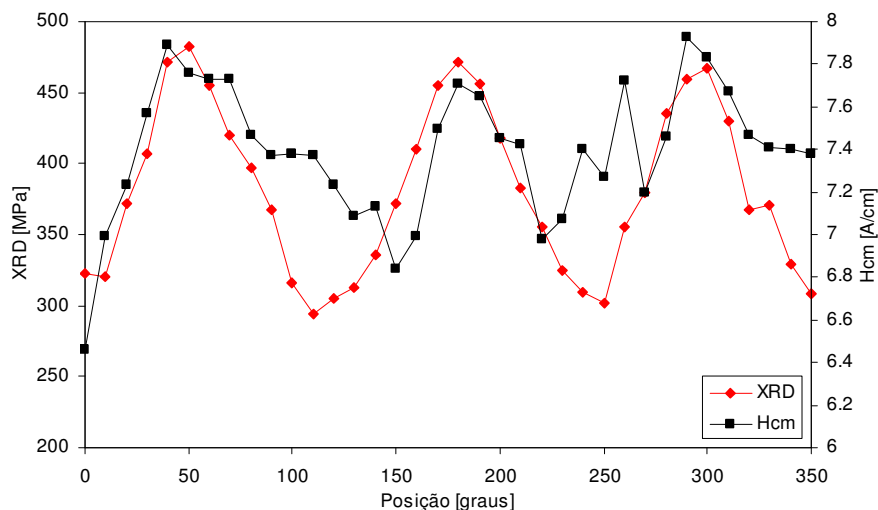


Figura 4.17 Comparação entre a distribuição de H_{cm} medida para o anel SPK 909 (superfície externa e direção tangencial) e a distribuição de TR medida com XRD.

Na Figura 4.18 está mostrada a distribuição dos valores de TR (medidos com XRD) em função de H_{cm} , juntamente com a curva e a função de calibração obtida com RLS.

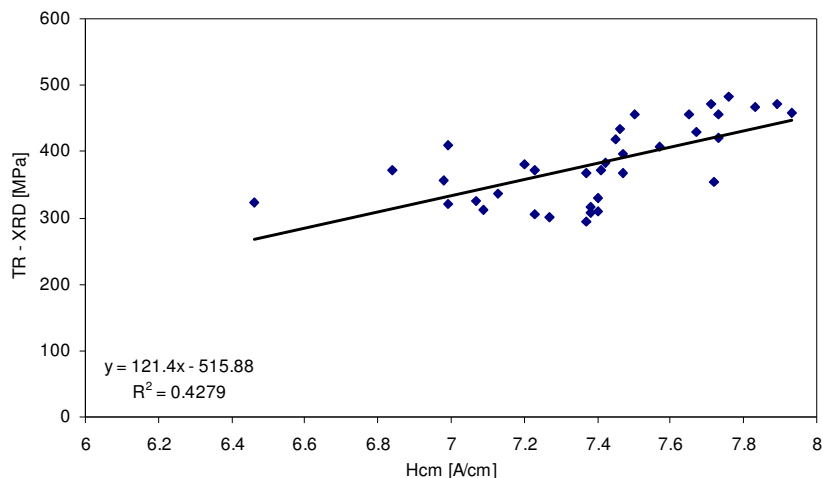


Figura 4.18 Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de H_{cm} para o anel SPK 909 – superfície externa e direção tangencial.

Da regressão linear foi obtida a equação E-4.8 como função de calibração.

$$TR = 121,4 \cdot H_{cm} - 515,88 \quad R^2 = 0,4279 \quad (E-4.8)$$

O resultado obtido com esta equação E-4.8 está mostrado na Figura 4.19.

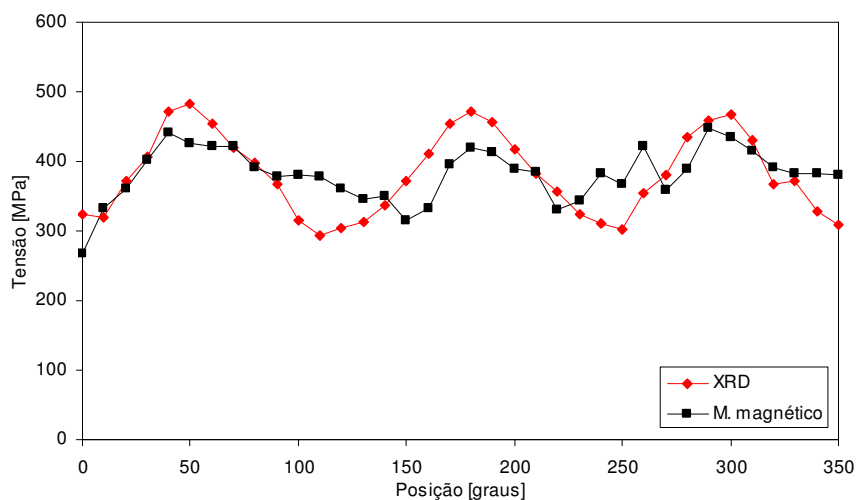


Figura 4.19 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.8 e medidas com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.

A figura 4.20 mostra as distribuições de M_{max} e de TR (medida com XRD) no perímetro do anel OVAKO 82.

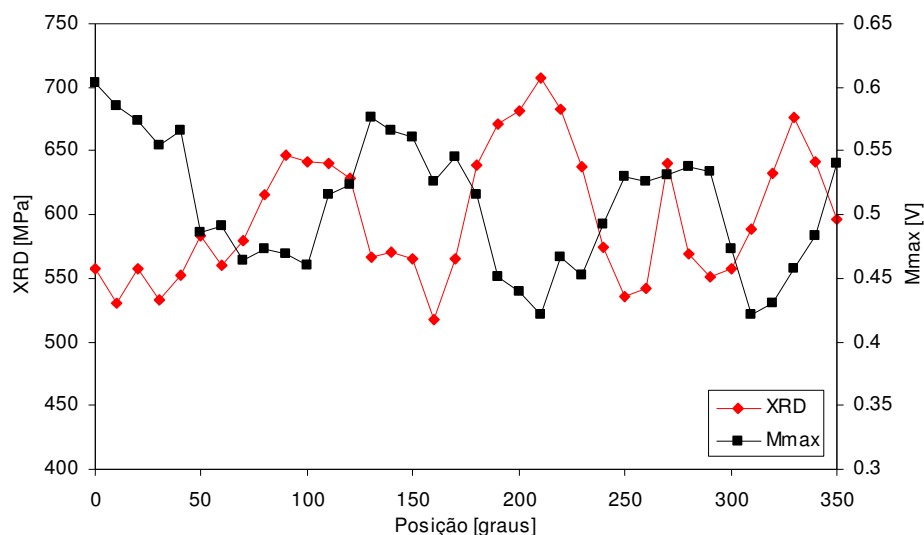


Figura 4.20 Comparação entre a distribuição de M_{max} medida para o anel OVAKO 82 (superfície externa e direção tangencial) e a distribuição de TR medida com XRD.

Na Figura 4.21 está mostrada a distribuição dos valores de TR medidos com XRD em função de M_{\max} , juntamente com a curva e a função de calibração obtida com regressão linear simples.

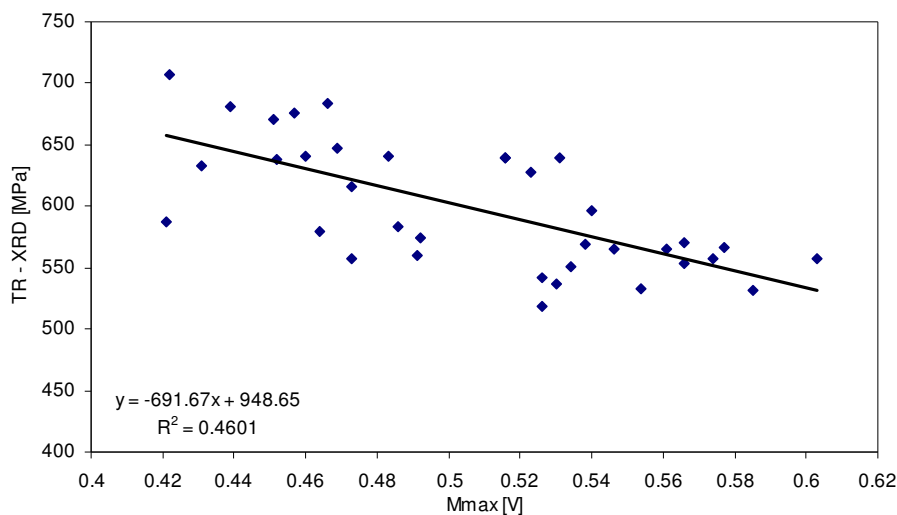


Figura 4.21 Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{\max} para o anel OVAKO 82 – superfície externa e direção tangencial.

Da regressão linear foi obtida a equação E-4.9 como função de calibração.

$$TR = -691,67 \cdot M_{\max} + 948,65 \quad R^2 = 0,46 \quad (E-4.9)$$

O resultado obtido com esta equação está mostrado na Figura 4.22.

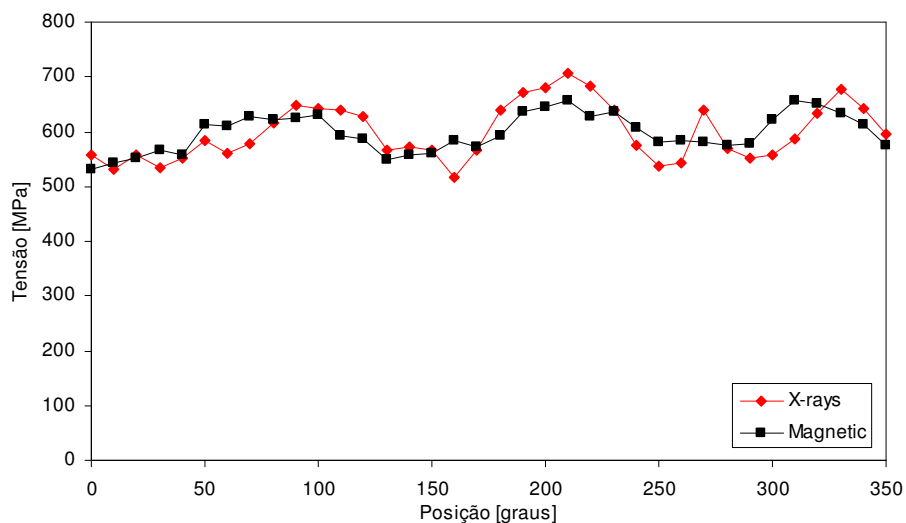


Figura 4.22 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.9 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

4.6 Procedimento de calibração 6

Calibração feita com cinco pontos adjacentes de TR medidos com XRD no perímetro do anel. Os pontos foram escolhidos da região de maior gradiente de tensão da curva. Com RLS (utilizando o software Microsoft Excel) foram obtidas duas funções de calibração para cada anel: uma com M_{\max} e outra com H_{cm} .

A Figura 4.23 mostra os valores de M_{\max} medidos no anel SPK 909, juntamente com a curva de TR medida com XRD.

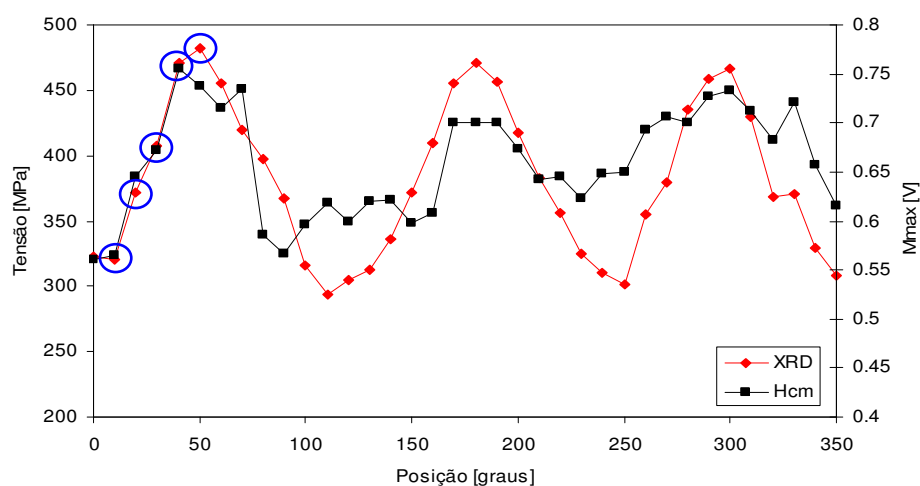


Figura 4.23 Comparação entre a distribuição de M_{\max} medida para o anel SPK 909 (superfície externa e direção tangencial) e a distribuição de TR medida com XRD.

Na figura 4.24 está plotado o gráfico TR x M_{\max} , juntamente com a curva e a função de calibração obtida com a regressão linear.

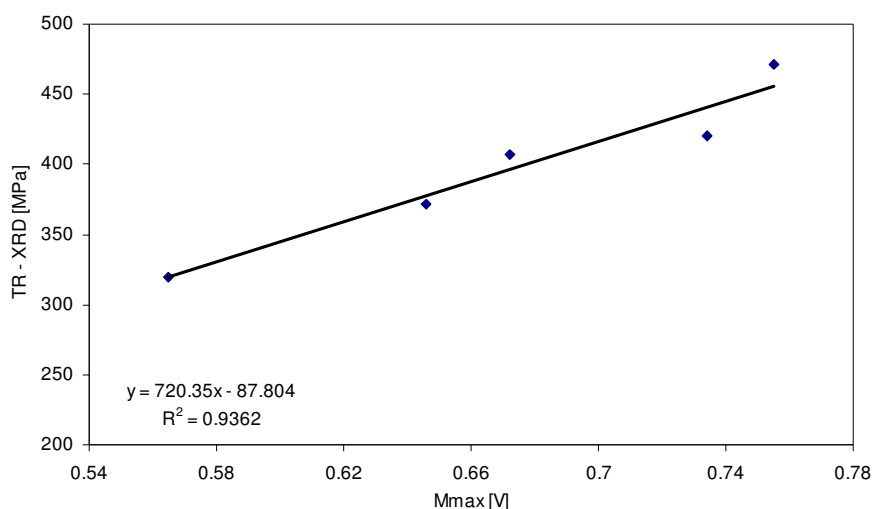


Figura 4.24 Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{\max} para o anel SPK 909, medido na superfície externa e direção tangencial.

Com a regressão linear foi obtida a função de calibração E-4.10.

$$TR = 720,35 \cdot M_{\max} - 87,8 \quad R^2 = 0,93 \quad (E-4.10)$$

Empregando esta equação foi obtido o resultado mostrado na Figura 4.25.

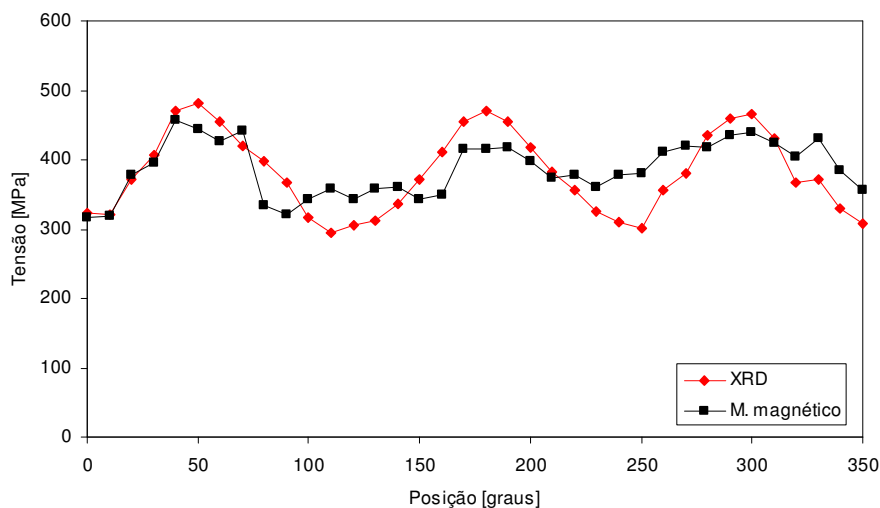


Figura 4.25 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.10 e medidas com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.

Na figura 4.26 está plotado o gráfico $TR \times M_{\max}$, juntamente com a curva e a função de calibração obtida para o anel OVAKO 82. A distribuição de M_{\max} e TR no perímetro deste anel já foi mostrada anteriormente na Figura 4.20.

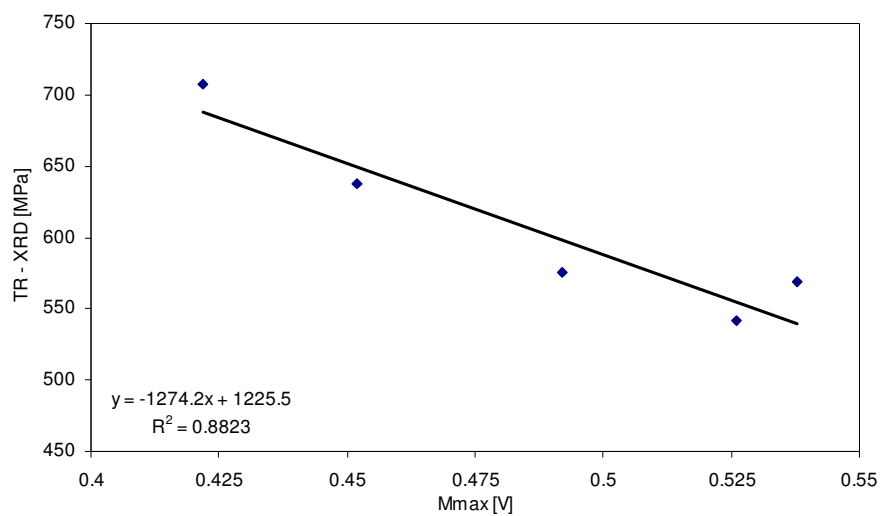


Figura 4.26 Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{\max} para o anel OVAKO 82, medido na superfície externa e direção tangencial.

Da regressão linear foi obtida a equação E-4.11 como função de calibração.

$$TR = -12742 \cdot M_{\max} + 1225,5 \quad R^2 = 0,88 \quad (E-4.11)$$

Empregando esta equação foi obtido o resultado plotado na Figura 4.27.

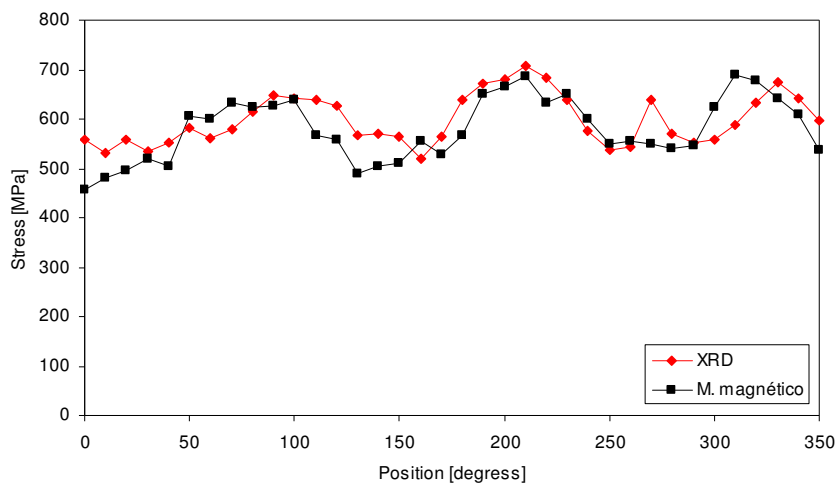


Figura 4.27 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.11 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

4.7 Procedimento de calibração 7

Calibração feita com cinco pontos uniformemente espaçados de TR medidos com XRD no perímetro do anel. Com RLS foram obtidas duas funções de calibração para cada anel: uma com M_{\max} e outra com H_{cm} .

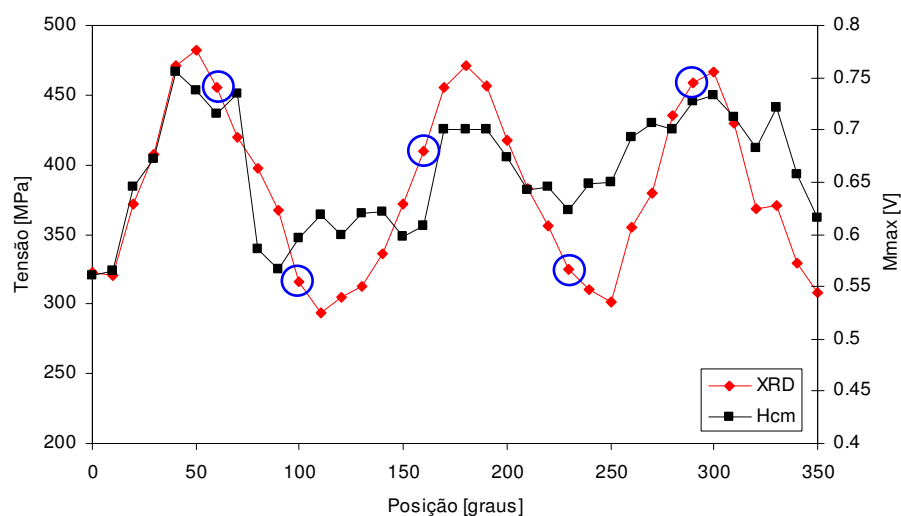


Figura 4.28 Distribuição de M_{\max} e TR medida com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial. Em destaque estão os pontos utilizados na calibração.

A Figura 4.28 mostra a distribuição de M_{\max} medida no perímetro no anel SPK 909, a curva de TR medida com XRD e os pontos selecionados para a calibração.

Na Figura 4.29 está plotado o gráfico TR x M_{\max} , juntamente com a curva e a função de calibração obtida.

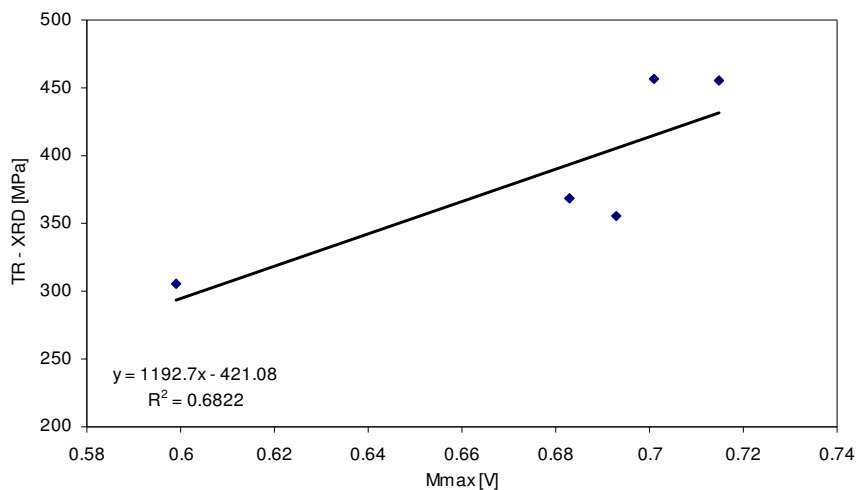


Figura 4.29 Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{\max} para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.

Com a regressão linear foi obtida a função de calibração E-4.12.

$$TR = 1192,7 \cdot M_{\max} - 421,08 \quad R^2 = 0,6822 \quad (E-4.12)$$

Empregando a equação E-4.12 foram obtidos os resultados de tensão mostrados na Figura 4.30.

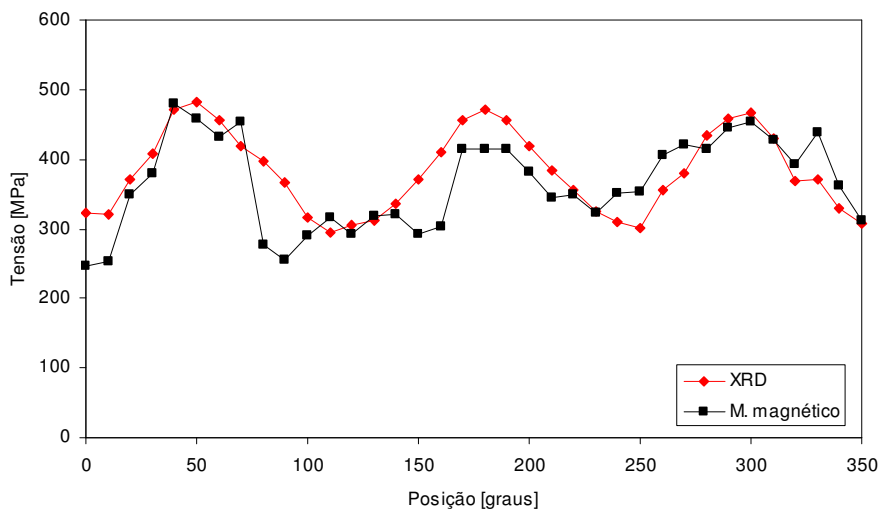


Figura 4.30 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.12 e medidas com XRD para o anel SPK 909 – superfície externa, direção tangencial.

Para o anel OVAKO 82, está mostrada na Figura 4.31 a distribuição de M_{\max} , a distribuição de TR (medidas com XRD) e os pontos selecionados, espaçadamente, para a calibração.

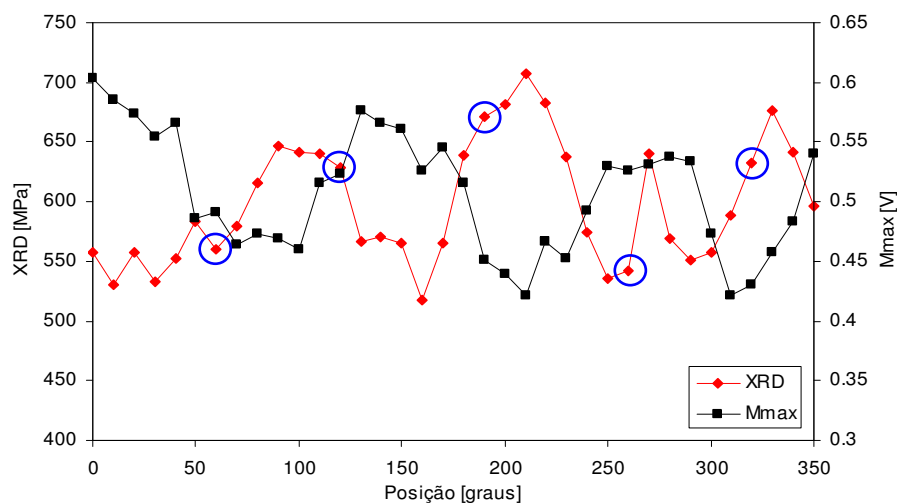


Figura 4.31 Distribuição de M_{\max} e TR medida com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial. Em destaque estão os pontos utilizados na calibração.

Na Figura 4.32 está plotado o gráfico TR x M_{\max} , juntamente com a curva e a função de calibração obtida para este anel.

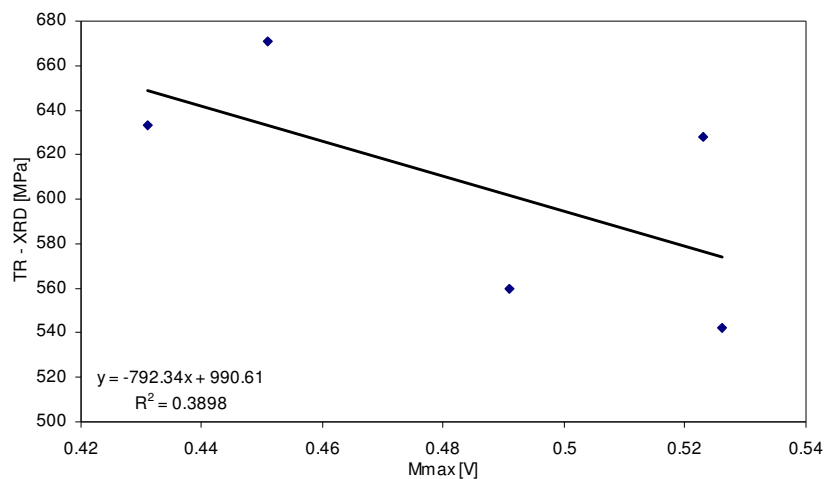


Figura 4.32 Regressão linear sobre a distribuição de TR em função de M_{\max} para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

Com a regressão linear foi obtida a função de calibração E-4.13.

$$TR = -792,34 \cdot M_{\max} + 990,61 \quad R^2 = 0,39 \quad (E-4.13)$$

Empregando esta equação foi obtido o resultado mostrado na Figura 4.33.

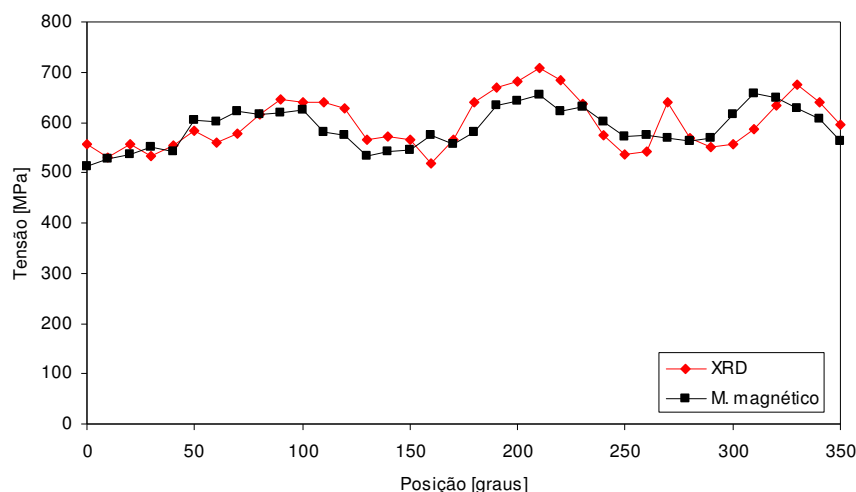


Figura 4.33 Tensões residuais calculadas com a equação E-4.13 e medidas com XRD para o anel OVAKO 82 – superfície externa, direção tangencial.

4.8 Procedimento de calibração 8

Foi elaborada uma tabela para a calibração com a média de TR tangencial na circunferência de cada um dos cinco anéis SPK (734, 791, 882, 909 e 929) e a média dos valores de H_{cm} e M_{max} em cada anel. Três equações foram obtidas para cada anel, uma com RLM e duas com RLS (uma para H_{cm} e outra para M_{max}). A Tabela 4.1 mostra a planilha construída.

Tabela 4.1 Média de TR e dos parâmetros magnéticos nos cinco anéis SPK. Valores utilizados para regressão linear múltipla e simples.

Anel SPK	Média de tensões residuais [MPa]	Média de M_{max} [V]	Média de H_{cm} [A/cm]
929	144	0,54	7,66
791	185	0,68	7,41
734	254	0,59	7,27
909	383	0,65	7,39
882	634	0,41	6,62

Com regressão linear múltipla foi obtida a função de calibração E-4.14.

$$TR = -454,5 \cdot H_{cm} - 70,23 \cdot M_{max} + 3669,03 \quad R^2 = 0,85 \quad (E-4.14)$$

Com regressão linear simples foram obtidas as funções de calibração para M_{\max} (E-4.15) e H_{cm} (E-4.16).

$$TR = -1237 \cdot M_{\max} + 1039,2 \quad R^2 = 0,45 \quad (\text{E-4.15})$$

$$TR = -468,17 \cdot H_{\text{cm}} + 3727,7 \quad R^2 = 0,85 \quad (\text{E-4.16})$$

Na Figura 4.34 e na Figura 4.35 estão mostrados os resultados de tensões residuais, obtidos por regressão linear múltipla (equação E-4.14), para os anéis SPK 791 e SPK 882, respectivamente.

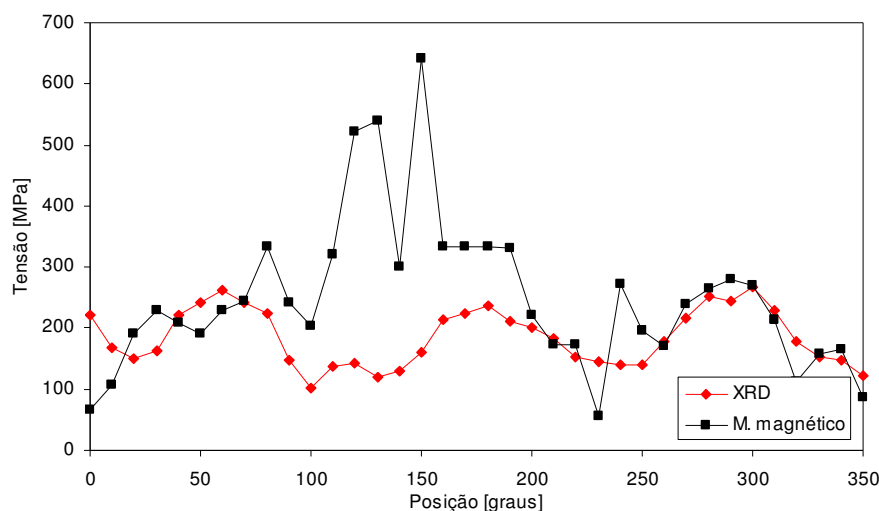


Figura 4.34 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.14, para o anel SPK 791, obtida por RLM – superfície externa, direção tangencial.

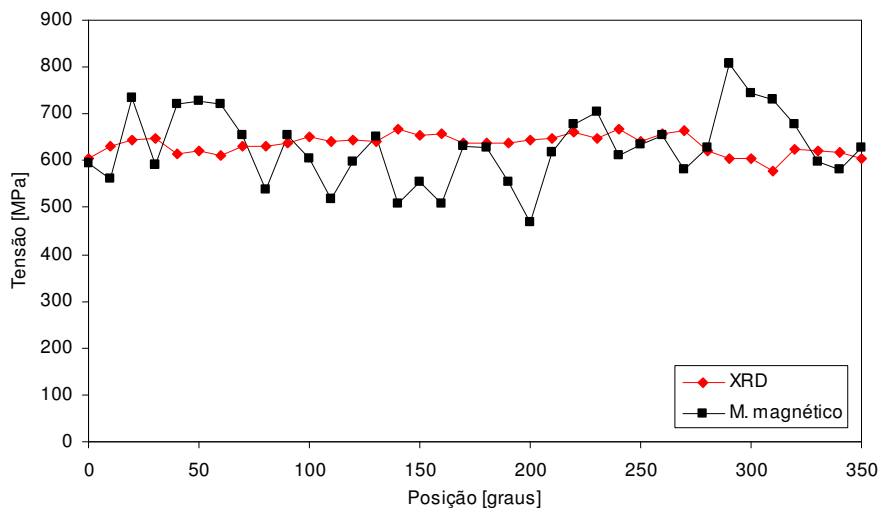


Figura 4.35 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.14, para o anel SPK 882, obtida por RLM – superfície externa, direção tangencial.

Na Figura 4.36 e na Figura 4.37, respectivamente, estão mostrados os resultados de tensões residuais obtidos por regressão linear simples com M_{\max} (equação E-4.15) para os anéis SPK 791 e SPK 882.

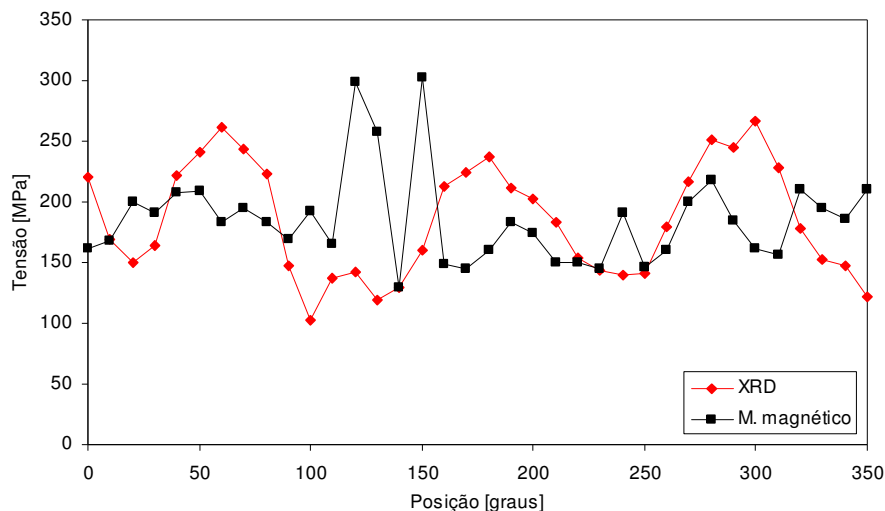


Figura 4.36 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.15, para o anel SPK 791, obtida por RLS com M_{\max} – superfície externa, direção tangencial.

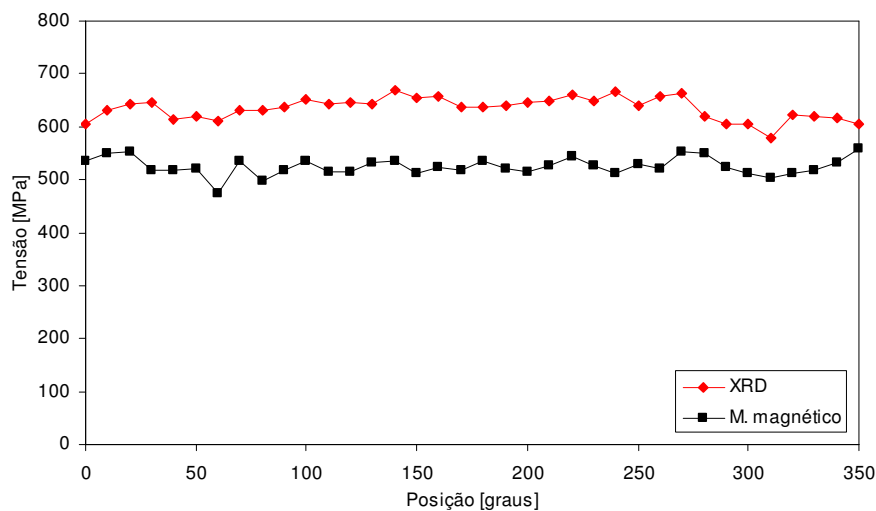


Figura 4.37 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.15, para o anel SPK 882, obtida por RLS com M_{\max} – superfície externa, direção tangencial.

Na Figura 4.38 e na Figura 4.39 estão mostrados os resultados de tensões residuais obtidos por regressão linear simples com H_{cm} (equação E-4.16) para os anéis SPK 791 e SPK 882, respectivamente.

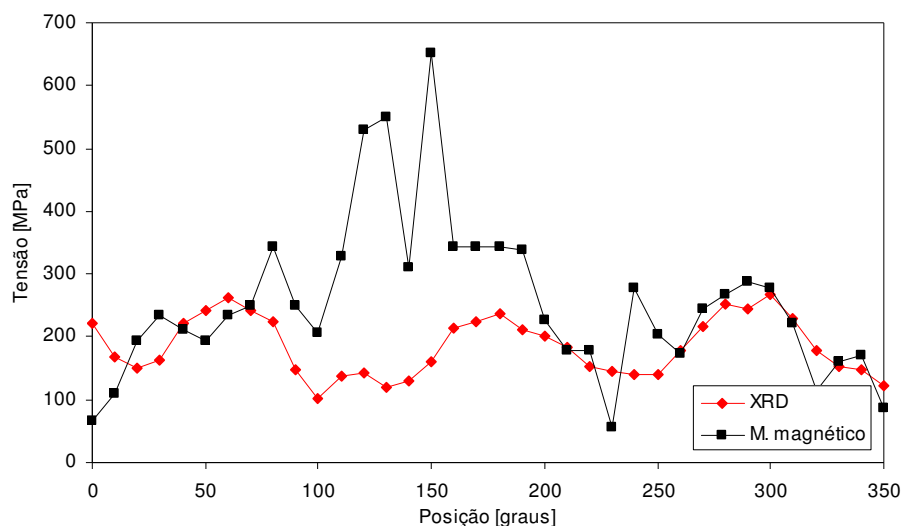


Figura 4.38 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.16, para o anel SPK 791, obtida por RLS com H_{cm} – superfície externa, direção tangencial.

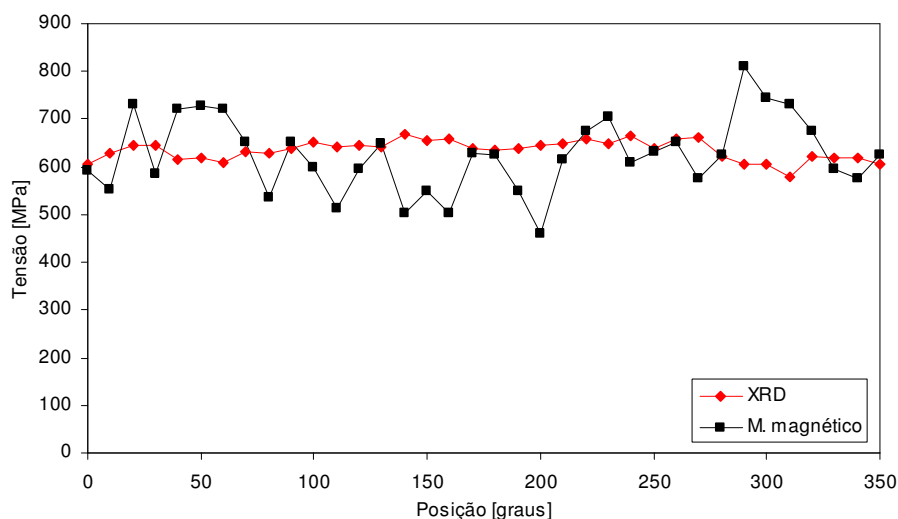


Figura 4.39 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.16, para o anel SPK 882, obtida por RLS com H_{cm} – superfície externa, direção tangencial.

4.9 Procedimento de calibração 9

Foi construído um gráfico do tipo $M_{max} \times TR$ e outro $H_{cm} \times TR$ utilizando dados de cinco pontos, selecionados de maneira uniformemente espaçada, de todos os anéis analisados neste trabalho. Esta foi uma tentativa de obter uma única equação de calibração que permitisse o cálculo das TR para qualquer um dos anéis (OVAKO e SPK). Essas curvas são semelhantes às obtidas através de ensaios de tensão/compressão, obtendo-se a

distribuição de H_{cm} e M_{max} em função da tensão numa faixa ampla de tensão. Para as duas curvas foi feita interpolação quadrática (com o software Excel) para obtenção da função de calibração. Na Figura 4.40 e na Figura 4.41 estão mostrados os cinco pontos de M_{max} e H_{cm} em função das TR, respectivamente, de cada anel juntamente com a curva obtida na interpolação.

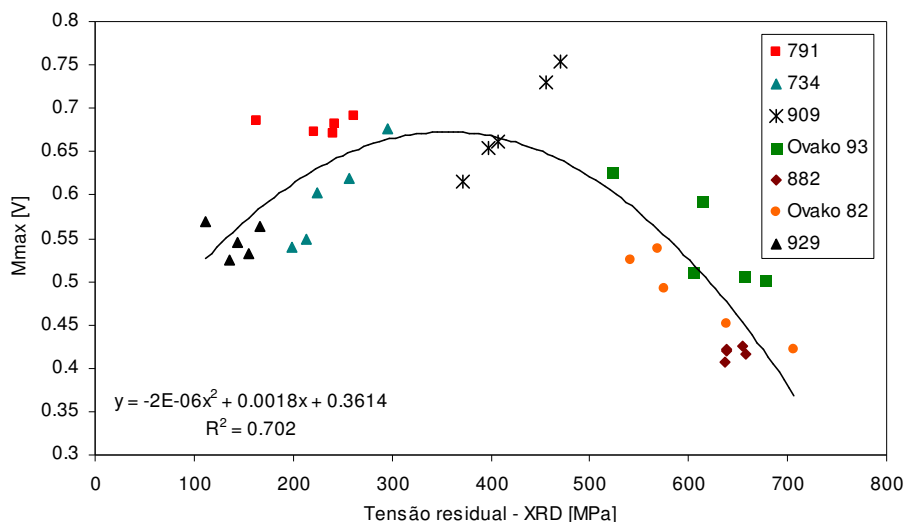


Figura 4.40 Distribuição de M_{max} em função da TR. Curva obtida utilizando cinco valores de M_{max} de cada anel. A curva foi obtida por interpolação quadrática.

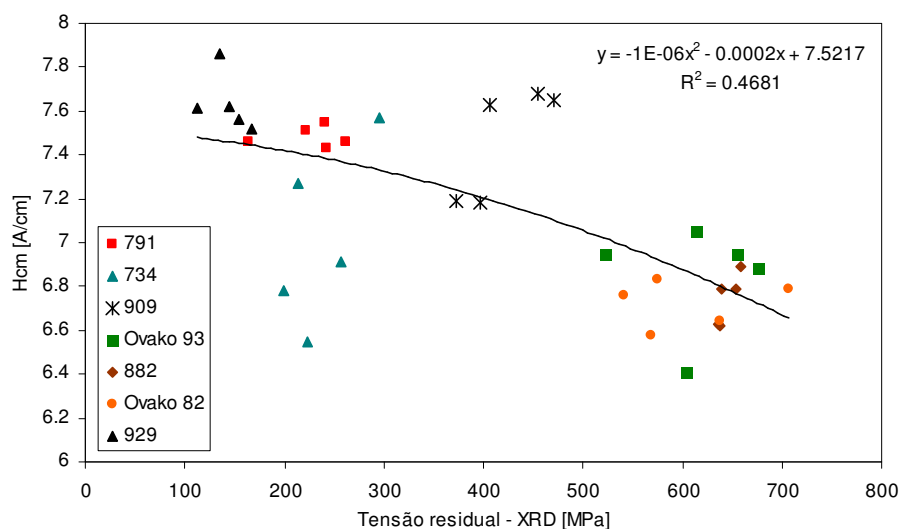


Figura 4.41 Distribuição de H_{cm} em função da TR. Curva obtida utilizando cinco valores de H_{cm} de cada anel. A curva foi obtida por interpolação quadrática.

As equações E-4.17 e E-4.18 mostram, respectivamente, as funções de calibração obtidas para M_{max} e H_{cm} com a regressão quadrática.

$$M_{max} = -2 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \times 10^{-3} \cdot TR + 0,36 \quad R^2 = 0,7 \quad (E-4.17)$$

$$H_{cm} = -1 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 2 \times 10^{-4} \cdot TR + 7.52 \quad R^2 = 0,46 \quad (E-4.18)$$

Resolvendo a equação E-4.17 foram obtidos os resultados de tensões residuais mostrados na Figura 4.42 e na Figura 4.43, para os anéis OVAKO 82 e SPK 882, respectivamente. É de interesse a abscissa obtida pela raiz negativa da equação.

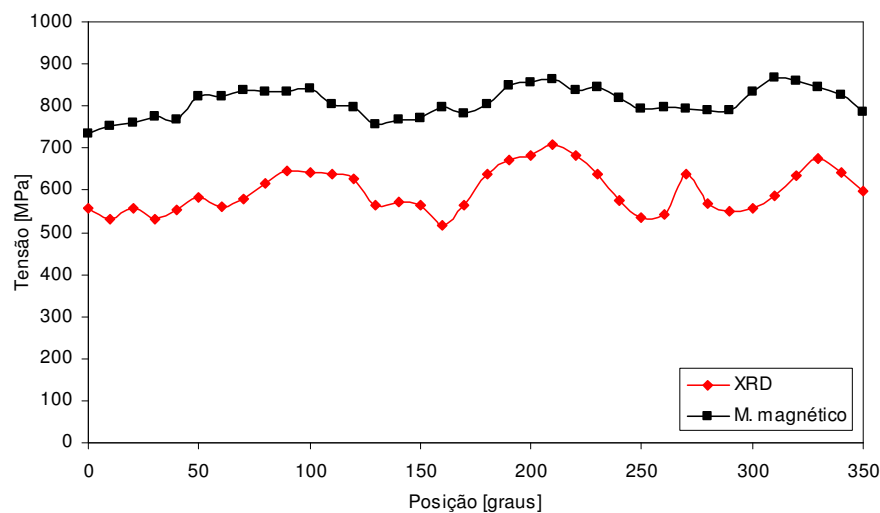


Figura 4.42 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.17 para o anel OVAKO 82 obtida por regressão quadrática com M_{max} – superfície externa, direção tangencial.

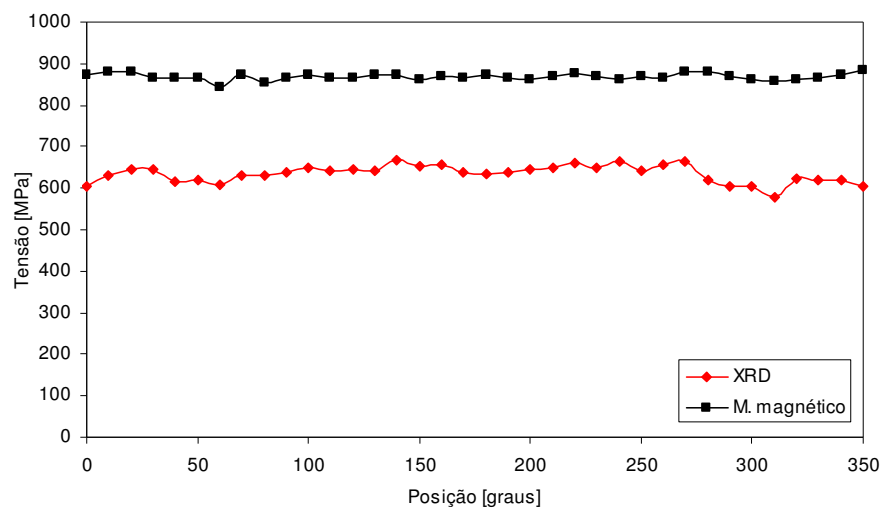


Figura 4.43 TR medidas com XRD e tensões calculadas com a equação E-4.17 para o anel SPK 882 e obtida por regressão quadrática para M_{max} – superfície externa, direção tangencial.

Com a equação E-4.18 foram obtidos os resultados de tensões residuais mostrados na Figura 4.44 e na Figura 4.45 para os anéis OVAKO 82 e SPK 882, respectivamente. Novamente, tem-se interesse pela raiz negativa da solução.

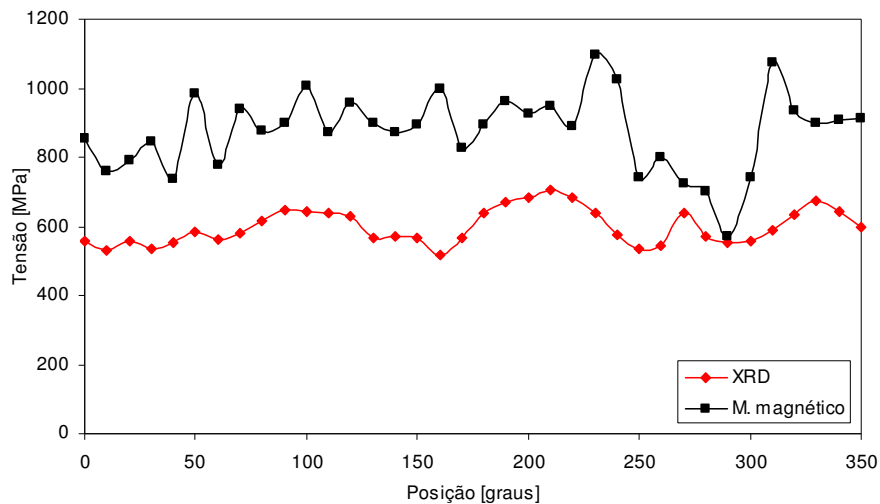


Figura 4.44 TR medidas com XRD no anel OVAKO 82 e tensões calculadas com a equação E-4.18 obtida por regressão quadrática para H_{cm} – superfície externa, direção tangencial.

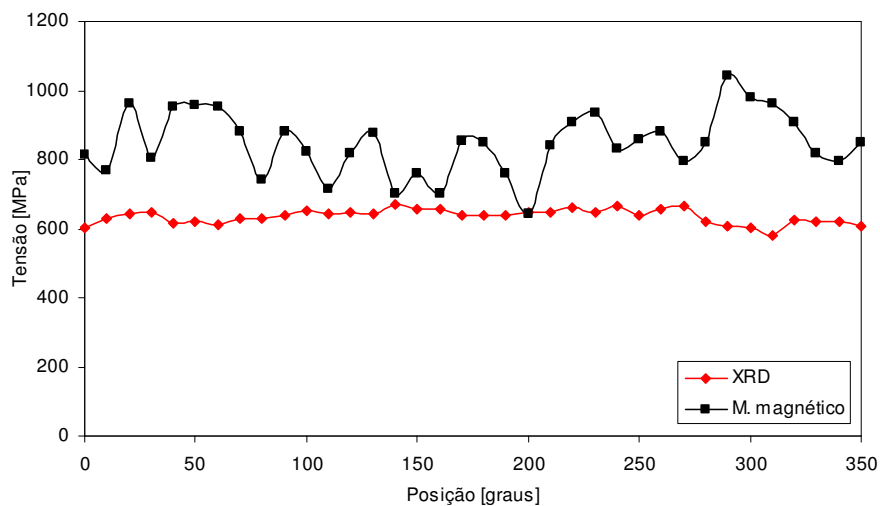


Figura 4.45 TR medidas com XRD no anel SPK 882 e tensões calculadas com a equação E-4.18 obtida por regressão quadrática para H_{cm} – superfície externa, direção tangencial.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho foi feita uma revisão do método de medição de tensões residuais (TR) pelo método do ruído Barkhausen, com o objetivo de utilizá-lo para otimizar o processo de medição de TR em anéis de rolamento no subprojeto C2 do projeto SFB 570.

O projeto SFB 570 (em execução no instituto IWT, Alemanha) tem como objetivo a investigação das causas e efeitos da distorção gerados em processos de fabricação de componentes mecânicos. Com isto busca-se meios de minimizar problemas oriundos da distorção, principalmente em termos de custos com operações de “endireitamento”. Para tanto, componentes mecânicos (anéis de rolamento, engrenagens e cilindros) estão sendo fabricados com variações no processo, obtendo-se diferentes níveis de tensões residuais, os quais são submetidos a vários tipos de análises. O subprojeto C2 executa as medições de tensões residuais nos componentes, sendo a difração de raios-X (XRD) a principal técnica utilizada para esta finalidade, a qual tem como principal desvantagem o elevado tempo de medição.

Os métodos magnéticos podem ser aplicados para medir tensões residuais, uma vez que os parâmetros magnéticos dos materiais ferromagnéticos são dependentes do estado de tensões presente no mesmo. O ruído Barkhausen é o parâmetro magnético mais utilizado para este fim, embora raramente seja utilizado sozinho, sendo conveniente medir outros parâmetros conjuntamente, utilizando todos para o cálculo das TR. Mesmo assim é comum denominar a técnica de “método do ruído Barkhausen” (*Barkhausen noise method*). O método exige calibração que é feita usualmente com ensaios de tração/compressão. No ensaio, um corpo de prova (CP) de material idêntico ao dos componentes a serem medidos é submetido a uma determinada faixa de tensão. Os parâmetros magnéticos são medidos durante a aplicação da carga e com regressão linear múltipla (RLM) obtém-se uma função de calibração (FC). Esta função é usada para o cálculo das TR no componente. Outras formas de calibração também podem ser utilizadas, desde que se disponha de valores precisos de tensão. A principal vantagem do método é a rapidez das medições.

O método magnético é, contudo, muito sensível aos aspectos microestruturais do material em análise, o que o torna de difícil aplicação para quantificação de tensões residuais^[29,36,39]. É difícil separar os efeitos da microestrutura daqueles produzidos pelas tensões, sendo necessário que a amostra utilizada para a calibração tenha uma microestrutura idêntica a do componente a ser medido. Além disso, foi observado que aspectos operacionais como o acoplamento e alinhamento do sensor na amostra exercem influência sobre os resultados. Estes aspectos devem ser considerados quando se utilizam métodos micromagnéticos para quantificação de tensões residuais, para minimizar seus efeitos. Por outro lado é um método bastante adequado e difundido para qualificação de tensões residuais, principalmente no controle de qualidade em processos industriais^[40,41,42,45].

Para o caso dos anéis de rolamento do projeto SFB 570, a calibração com ensaio de tração/compressão não se mostrou adequada. Os valores calculados a partir da função de calibração não corresponderam com as medições realizadas com XRD. Sendo assim, foram avaliadas várias formas alternativas para fazer a calibração (denominadas aqui de *procedimentos de calibração*) utilizando dados de XRD medidos nos próprios anéis.

Um total de nove procedimentos foi avaliado para uma amostra de sete anéis provenientes de dois fornecedores diferentes (OVAKO e SPK). Todos os anéis são constituídos do mesmo material DIN 100Cr6 (AISI 52100), cuja composição química está mostrada na Tabela 3.1. Os anéis são produzidos segundo o processo mostrado na Figura 3.1, contudo as sete amostras estudadas neste trabalho (cinco anéis SPK e dois OVAKO) foram retiradas do processo após a primeira operação de usinagem. As dimensões dos anéis estão mostradas na Figura 3.2 e detalhes do sensor utilizado nas medições bem como seu acoplamento aos anéis estão mostrados na Figura 3.7. O acoplamento sensor/anel mostrado na Figura 3.7 permite medir tensões na direção tangencial. Para medir tensões na direção longitudinal basta rotacionar o sensor de 90° em relação à superfície do anel. Detalhes do equipamento magnético utilizado são encontrados no anexo A4. O fator diferencial entre os anéis da amostragem estudada são os parâmetros de processo de fabricação, que implicam em diferentes níveis de tensões residuais. O nível médio de TR na superfície dos anéis bem como os principais parâmetros de usinagem estão mostrados na Tabela 3.2.

A Tabela 5.1 traz uma descrição resumida dos procedimentos analisados neste trabalho.

Tabela 5.1 Resumo dos procedimentos de calibração avaliados.

Proced.	Tensão de referência	Quantidade de pontos utilizados	Tipo de regressão
1	Ensaio tração/compressão	7 (-100MPa até 250MPa)	RLM
2	XRD	36 (todos disponíveis no perímetro do anel)	RLM
3	XRD	5 uniformemente espaçados	RLM
4	XRD	5 adjacentes	RLM
5	XRD	36 (todos disponíveis no perímetro do anel)	RLS
6	XRD	5 adjacentes	RLS
7	XRD	5 uniformemente espaçados	RLS
8	XRD	5 (média dos anéis SPK)	RLM e RLS
9	XRD	35 (5 pontos de cada um dos 7 anéis)	Quadrática

Os procedimentos de calibração serão aqui referidos pela letra P seguida do número do procedimento; p. ex. o procedimento 3 será referido como P3. Para os procedimentos P5, P6 e P7, quando for feita referência ao parâmetro magnético usado na regressão linear simples, será posto o referido parâmetro após o número do procedimento, separado com hífen. O termo P7- H_{cm} , p. ex., se refere ao procedimento 7 utilizando H_{cm} para a regressão linear simples. Para o procedimento 8 se tem três situações: P8-RLM, P8- H_{cm} e P8- M_{max} , e para o procedimento 9 tem-se P9- H_{cm} e P9- M_{max} , porém neste último trata-se de regressão quadrática. Nos anexos A1, A2 e A3 estão listados, respectivamente, todos os resultados de TR, as aquisições de M_{max} e H_{cm} e as equações de calibração obtidas para todos os anéis.

A seguir é feita uma descrição dos principais aspectos e dos principais resultados alcançados com cada procedimento. Ao final é feita uma discussão contendo os aspectos gerais de todos os resultados obtidos.

5.1 Discussão – procedimentos de calibração

A calibração feita com o procedimento 1, ou seja, utilizando ensaio de tração/compressão, embora muito recomendada na literatura^[9,15,18,22], não se mostrou eficaz para o caso estudado, revelando valores de TR diferentes dos obtidos com XRD. Esta discrepância pode ser observada na Figura 5.1 (a) e (b) e está associada, provavelmente, às diferenças geométrica e microestrutural entre o corpo de prova e os anéis estudados^[24,25,35,37].

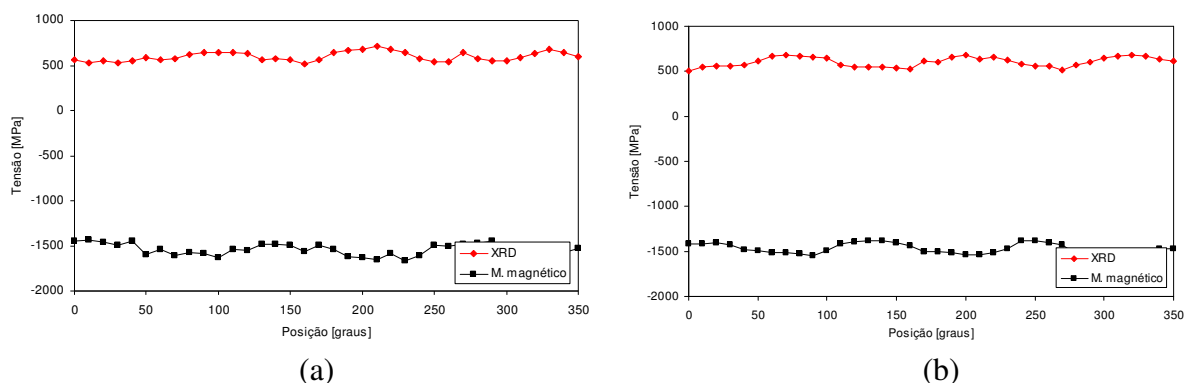


Figura 5.1 Discrepância entre os resultados de tensões residuais obtidos com o procedimento 1 (ensaio tração/compressão) e os resultados medidos com XRD: (a) anel OVAKO 82 e (b) anel OVAKO 93.

A Figura 5.2 mostra o acoplamento do sensor magnético ao corpo de prova (utilizado no ensaio de tração/compressão) e aos anéis de rolamento.

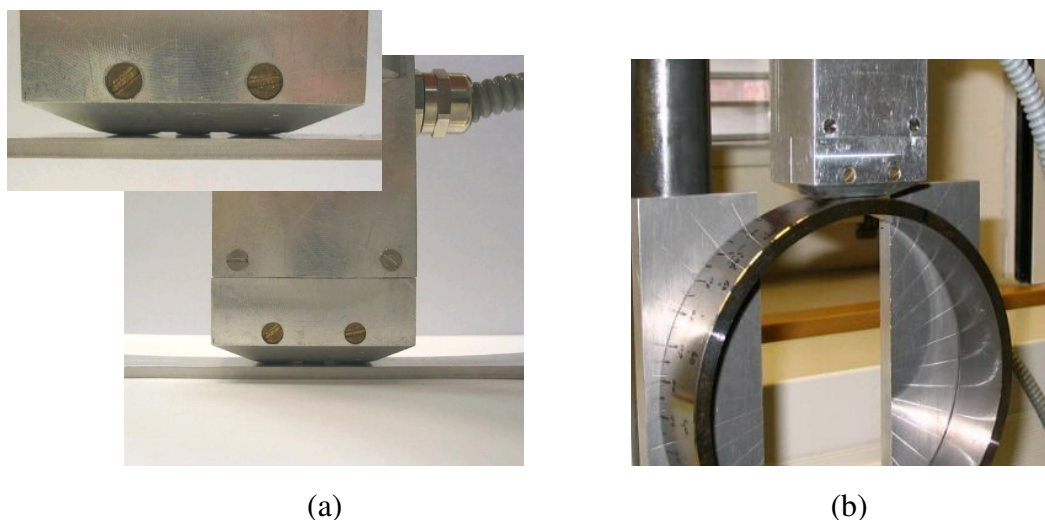


Figura 5.2 Acoplamento do sensor magnético: (a) ao corpo de prova do ensaio tração/compressão e (b) aos anéis de rolamento.

A Figura 5.2 (a) mostra o acoplamento entre o sensor e o corpo de prova, e Figura 5.2 (b) mostra como é o acoplamento com os anéis de rolamento. Pode-se observar que existe diferença em termos de geometria e, conseqüentemente, de acoplamento entre o

corpo de prova e os anéis. Embora não se tenha informações específicas dos efeitos dessa diferença para as condições deste trabalho, informações encontradas na literatura^[30,32] mostram que ela exerce influência. Efeitos do ângulo de contato entre o sensor magnético e a amostra foram avaliados para o equipamento utilizado e mostraram influência sobre a aquisição dos parâmetros magnéticos, acentuando a dispersão dos resultados.

O ensaio de tração/compressão, realizado em um corpo de prova padrão, cobriu uma pequena faixa de tensão o que se mostrou como um aspecto negativo. Isso torna este método de calibração inaplicável para a condição dos anéis em estudo que apresentam tensões residuais de elevada magnitude. A Figura 5.3 ilustra este problema, que existe devido à possibilidade de ocorrência de flambagem nos esforços de compressão e escoamento em tração para solicitações elevadas.

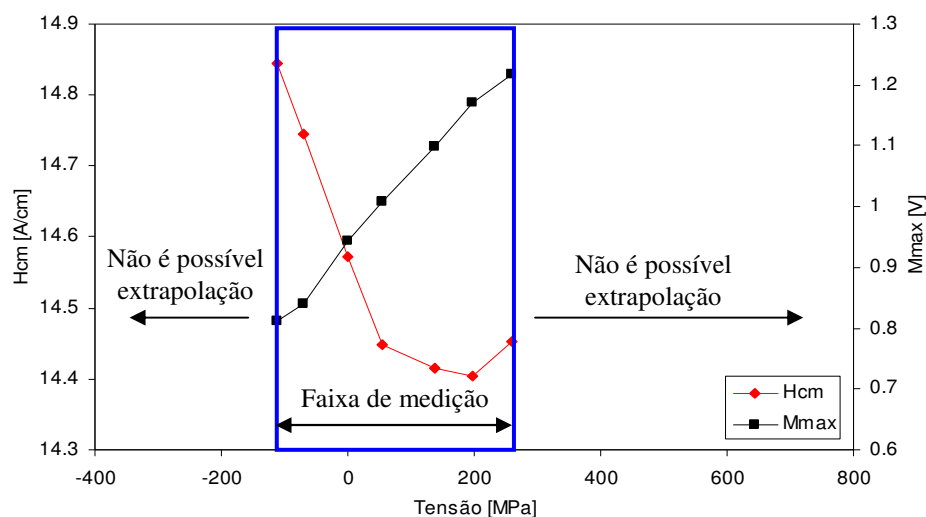


Figura 5.3 Faixa de tensão coberta pelo ensaio de tração/compressão empregado no procedimento 1 para a calibração. Solicitações fora da área destacada podem gerar flambagem na compressão ou escoamento na tração.

Outro aspecto deste procedimento de calibração é que ele exige a avaliação conjunta de, no mínimo, dois parâmetros magnéticos do material em análise. Dependendo das características do material, apenas um parâmetro magnético poderia levar a resultados errôneos. Isto está ilustrado na Figura 5.4 onde está mostrado um exemplo em que existe um comportamento quadrático de M_{max} em função da tensão. Neste caso, para uma determinada faixa de tensão um único valor de M_{max} se correlaciona com dois valores de tensão. Medindo-se ao menos mais um parâmetro magnético (na Figura 5.4 está mostrado H_{cm}), praticamente anula-se a ocorrência deste problema. Além disso, o uso de dois ou mais parâmetros magnéticos contribuem para “separar” os efeitos da microestrutura sobre

as propriedades magnéticas do material, porém exige o emprego de regressão linear múltipla para a obtenção da função de calibração.

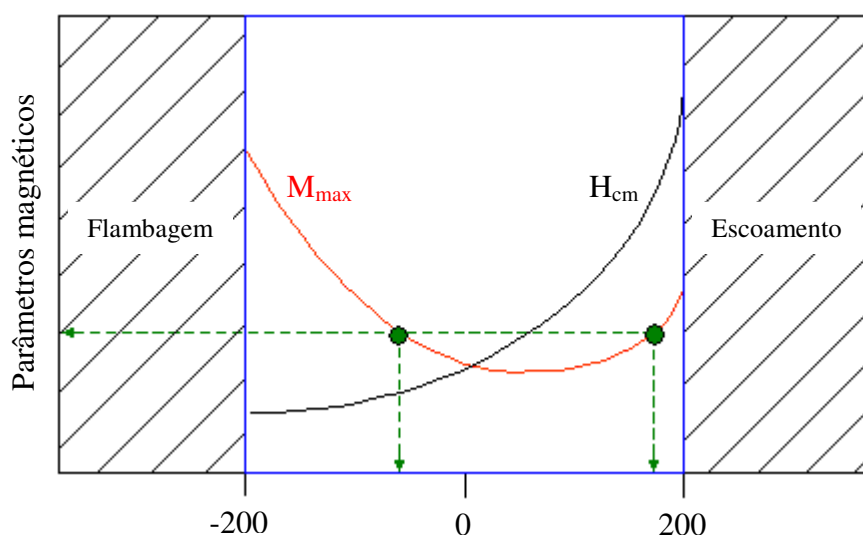


Figura 5.4 Exemplo de um comportamento quadrático de M_{\max} em função da tensão. Um mesmo valor de M_{\max} pode relacionar-se com dois valores de tensão.

O procedimento 1, contudo, contribuiu para mostrar as dificuldades que se tem quanto ao uso de ensaio tração/compressão para a calibração. Também permitiu dar um novo direcionamento ao trabalho utilizando dados de XRD para a calibração.

A calibração com o procedimento 2, utilizando todos os valores de H_{cm} e M_{\max} disponíveis para o anel e regressão linear múltipla, foi feita individualmente para cada anel. Mostrou resultados coerentes, muito próximos dos obtidos com XRD. 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. Isso desconsiderando o fato de se poder medir tensões na profundidade com o método magnético, pois neste caso este procedimento até poderia ser considerado viável. Na Figura 5.5 (a) e (b) estão os resultados dos anéis OVAKO 82 e OVAKO 93, respectivamente, onde pode-se ver a boa correspondência dos resultados.

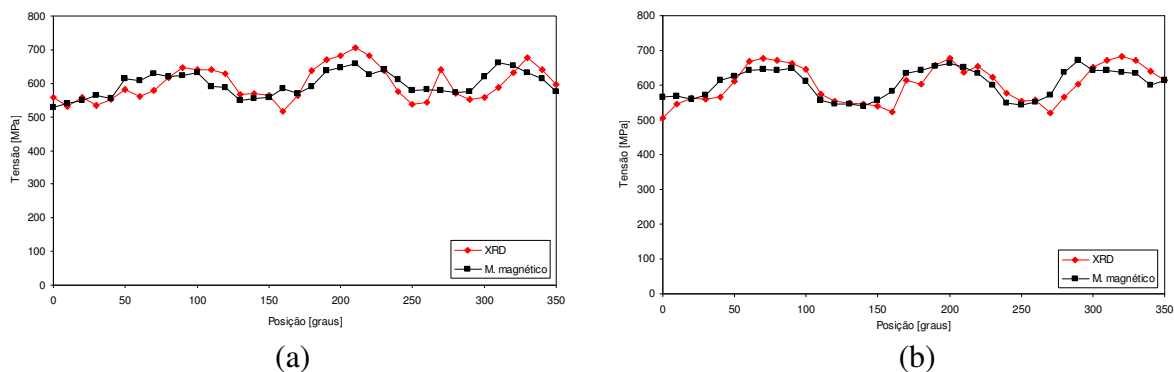


Figura 5.5 Resultados obtidos com o procedimento 2: (a) anel OVAKO 82 e (b) anel OVAKO 93. Valores próximos dos medidos com XRD, revelando a aplicabilidade do método magnético aos anéis em estudo.

No P5 também foram utilizados todos os valores de tensões residuais disponíveis para o anel, mas a calibração foi feita com regressão linear simples ao invés de RLM. Assim como o P2 este não tem aplicação prática no projeto SFB por necessitar do conhecimento prévio das tensões residuais com XRD. Com este procedimento foi verificada a aplicabilidade de somente um parâmetro magnético para a calibração, daí o uso de RLS. Isto é possível por estarem sendo utilizados valores de uma faixa relativamente estreita de tensão (resultados de XRD) para a calibração, onde o comportamento dos parâmetros magnéticos é próximo do linear. Esta faixa estreita de tensão elimina a ocorrência do problema mostrado na Figura 5.4, permitindo o uso de regressão linear simples. Para alguns anéis obteve-se boa correlação em relação às 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 explicado pelo efeito da microestrutura. Na Figura 5.6 estão mostrados os resultados obtidos para o anel OVAKO 82.

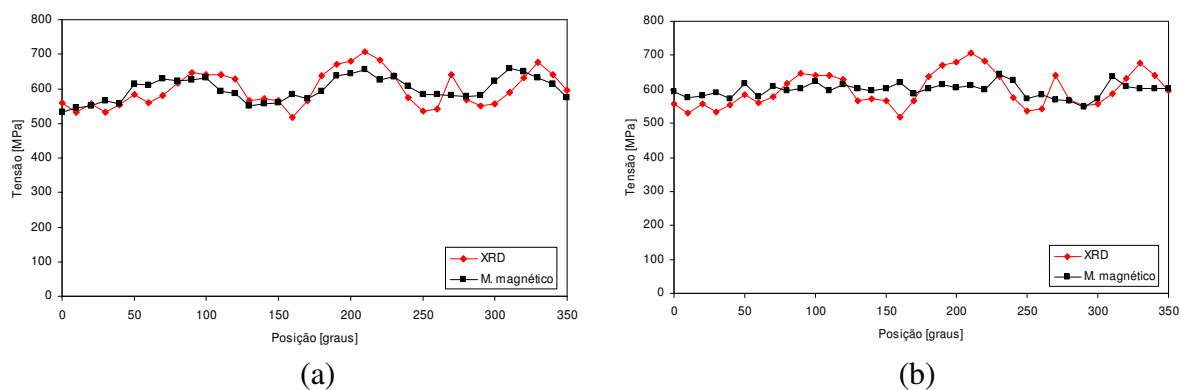


Figura 5.6 Resultados obtidos com o procedimento 5 para o anel OVAKO 82: (a) M_{max} e (b) H_{cm} . Melhor correlação obtida com M_{max} .

Os procedimentos 3, 4, 6 e 7 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 RLM com duas variáveis independentes. Os resultados obtidos com estes procedimentos mostraram a viabilidade do emprego de somente cinco pontos de XRD para a calibração. Nos procedimentos 3 e 4 foi usada RLM, sendo P3 com cinco pontos uniformemente espaçados e (P4) com cinco pontos adjacentes. Na Figura 5.7 está mostrado o resultado obtido com o P3 (pontos espaçados e RLM) para o anel OVAKO 93. Pode-se ver que é próximo do resultado obtido com o P2 (Figura 5.5) que é tomado como referência.

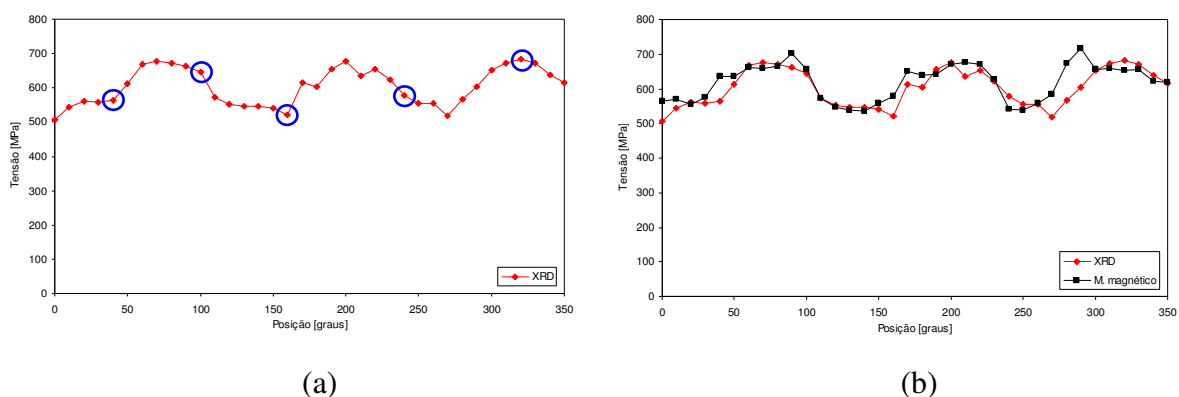


Figura 5.7 Resultados obtidos com o procedimento 3 para o anel OVAKO 93: (a) pontos selecionados da curva medida com XRD e (b) resultados calculados com a função de calibração.

O P4 (pontos adjacentes e RLM) mostrou correlação inferior em comparação com o P3 para a maioria dos anéis. Na Figura 5.8 está mostrado o resultado obtido para o anel OVAKO 93. Pode-se ver que a correlação com a curva medida com XRD é inferior àquela obtida com o P3 para este mesmo anel (Figura 5.7).

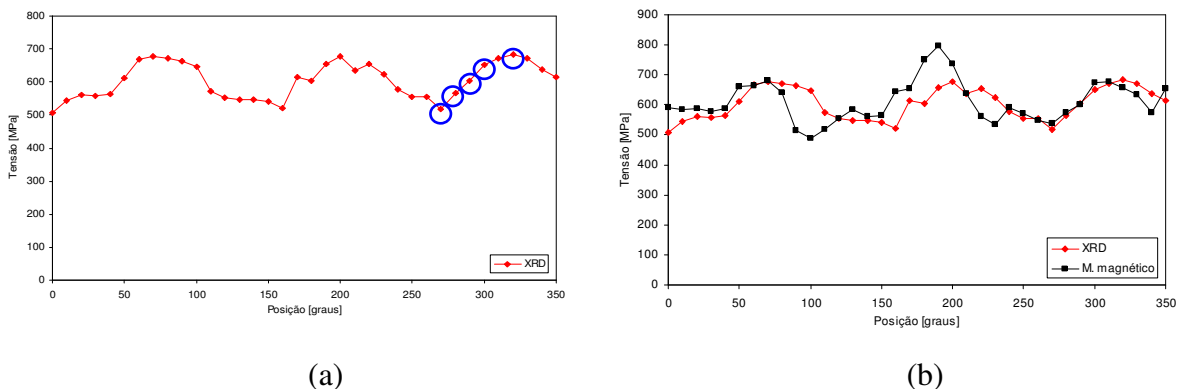


Figura 5.8 Resultados obtidos com o procedimento 4 para o anel OVAKO 93: (a) pontos selecionados da curva medida com XRD e (b) resultados calculados com a função de calibração.

O uso de cinco pontos adjacentes no P4 apresenta-se como uma desvantagem pois, para esta seleção de pontos em gradiente de tensão, é necessário o conhecimento prévio das TR no perímetro do anel. Isto não atende ao principal objetivo deste trabalho que é a redução do tempo de medição no projeto SFB 570. Apesar deste fato, como o método magnético pode ser utilizado para medições sub-superficiais, este procedimento foi avaliado por ser, neste contexto, aplicável ao projeto.

Para os procedimentos 6 e 7 foi usada RLS, sendo P6 com cinco pontos adjacentes P7 com cinco pontos uniformemente espaçados. Ficou provada a aplicabilidade de RLS com somente cinco pontos para a calibração. Também foi observado que para alguns anéis a calibração feita com M_{\max} mostrou melhores resultados enquanto para outros foi com H_{cm} . A comparação da aquisição de H_{cm} e M_{\max} com a curva de TR medida com XRD já revela qual dos parâmetros apresenta melhor correlação com as tensões para o anel em questão. Na Figura 5.9 está mostrada a comparação do sinal de M_{\max} e H_{cm} adquirido no anel OVAKO 93 com a curva de tensões residuais medida com XRD.

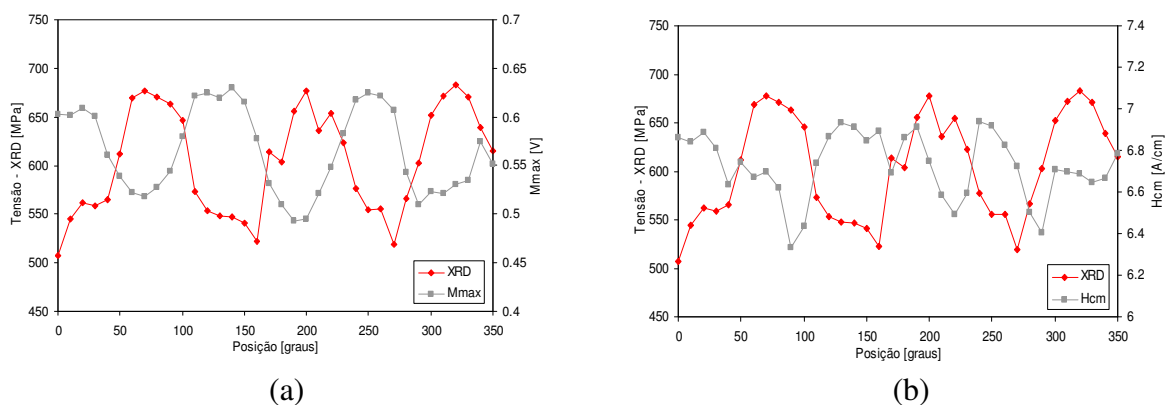


Figura 5.9 Comparação entre a curva de tensões residuais medida com XRD e: (a) M_{\max} , (b) H_{cm} para o anel OVAKO 93. A melhor correlação é a de M_{\max} .

O P6, por utilizar pontos adjacentes, também apresenta a desvantagem de se basear no conhecimento prévio da curva de TR do material. Na Figura 5.10 está mostrado o resultado de tensões residuais obtido para o anel OVAKO 93 utilizando M_{\max} e H_{cm} . Pode-se ver que a tensão calculada com H_{cm} não correspondeu à medição com XRD.

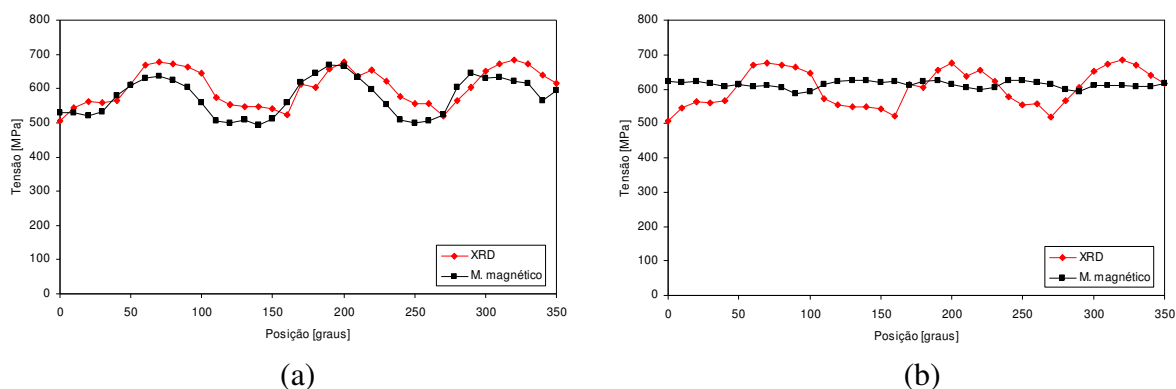


Figura 5.10 Resultados obtidos com o procedimento 6 para o anel OVAKO 93: (a) calibração feita com M_{max} e (b) calibração feita com H_{cm} . Com H_{cm} não obteve-se boa correlação com XRD.

Já o P7 tem como vantagem o fato de utilizar cinco pontos espaçados, que não necessita do conhecimento prévio das tensões residuais no anel. Assim como no P6, para alguns anéis a melhor correlação é com M_{max} enquanto para outros é com H_{cm} . De um modo geral, a correlação do P7 com a difração de raios-X se mostrou melhor em comparação com o P6. Na Figura 5.11 está mostrado o resultado obtido para o anel OVAKO 93, onde se vê que tanto M_{max} como H_{cm} mostram boa correlação com XRD.

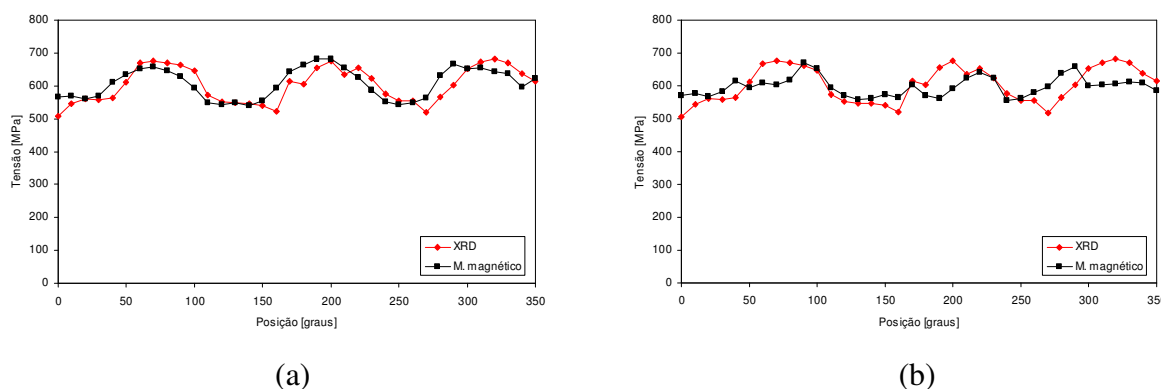


Figura 5.11 Resultados obtidos com o procedimento 7 para o anel OVAKO 93: (a) calibração feita com M_{max} e (b) calibração feita com H_{cm} . Boa correlação obtida com ambos os parâmetros magnéticos.

Também foram feitas tentativas para obter uma única função de calibração que permitisse o cálculo das tensões residuais para todos os anéis, tal qual seria o ensaio de tração/compressão do procedimento 1, não fossem os problemas já descritos. Para tanto foram implementados os procedimentos 8 e 9.

No procedimento 8 a calibração foi feita utilizando a média de valores de tensões residuais e dos parâmetros magnéticos dos cinco anéis SPK estudados neste trabalho. Três

possibilidades foram avaliadas: RLM, RLS com M_{\max} e RLS com H_{cm} . Nenhuma das três alternativas se mostrou eficaz, não sendo viável a implementação do método para os anéis em estudo. Vários são os fatores que contribuem para as discrepâncias entre os resultados das duas técnicas encontrados neste procedimento. Principalmente citam-se possíveis diferenças microestruturais entre as amostras, o processamento ao qual o sinal magnético é submetido (antes de ser convertido em M_{\max} e H_{cm}), diferença de penetração das técnicas no material e acoplamento entre o sensor magnético e os anéis. A Figura 5.12 mostra os resultados obtidos com este procedimento para o anel SPK 909.

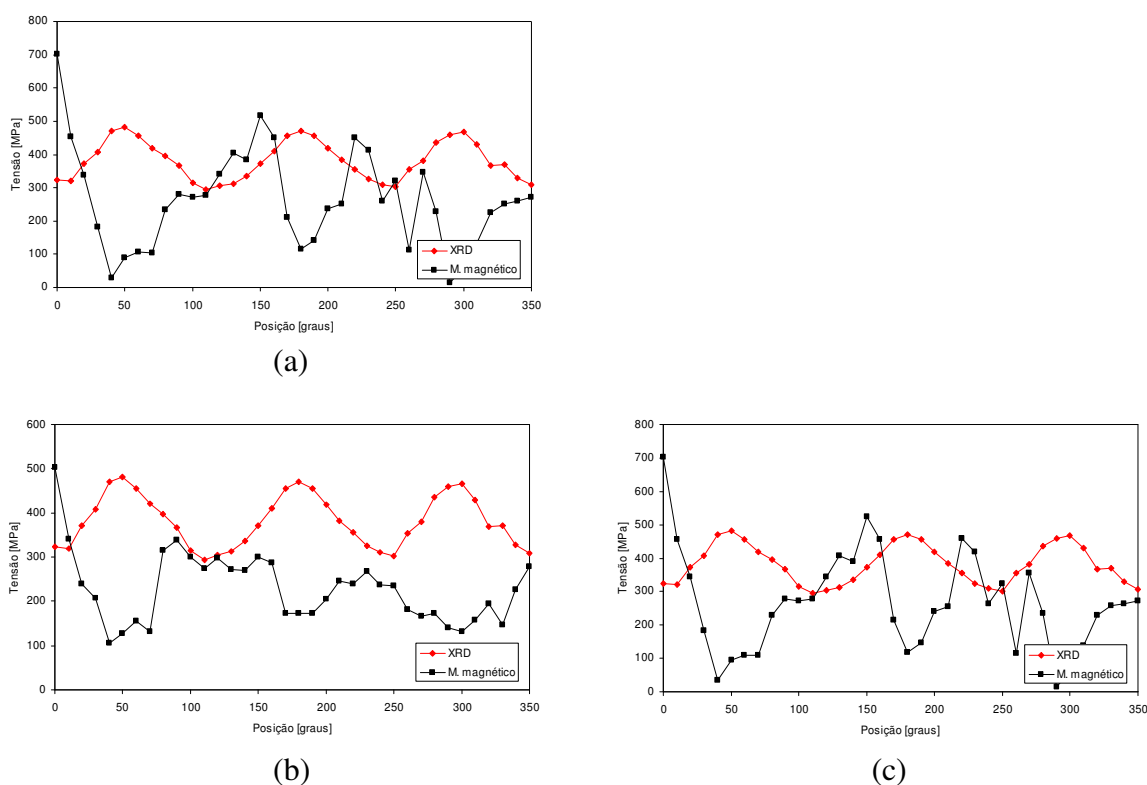


Figura 5.12 Resultados obtidos com o procedimento 8 para o anel SPK 909: calibração feita com (a) RLM, (b) RLS com M_{\max} e (c) RLS com H_{cm} . Não obteve-se correlação.

Com o P9 foram utilizados dados de todos os anéis OVAKO e SPK. Os parâmetros magnéticos de cinco pontos espaçados de cada anel foram plotados em função da tensão em um único gráfico, obtendo-se a distribuição de M_{\max} e H_{cm} numa faixa ampla de tensão. A função de calibração foi obtida por regressão quadrática entre os valores de todos os anéis. Na Figura 5.13 está mostrada a curva obtida com a regressão quadrática.

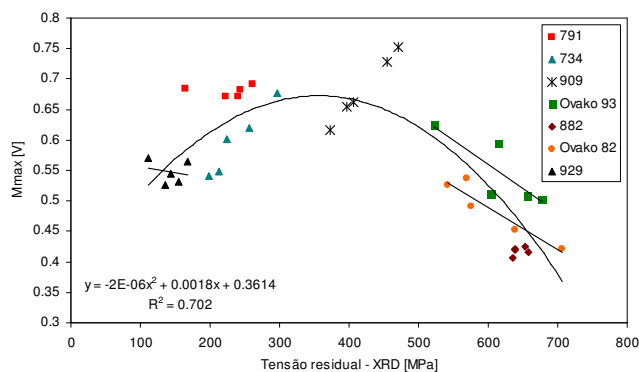


Figura 5.13 Regressão quadrática de M_{\max} em função da tensão e curva de regressão linear para os anéis SPK 909, OVAKO 82 e OVAKO 93.

Este procedimento não se mostrou eficaz pois não foi obtida correlação entre os resultados calculados e as tensões medidas com XRD. Assim como no caso do P8, vários fatores podem ser responsáveis pelas discrepâncias dos resultados. Novamente, citam-se efeitos microestruturais, diferença de penetração entre as técnicas, acoplamento entre sensor e anéis e processamento do sinal magnético. Esperava-se que houvesse tangência entre as curvas individuais de cada anel com a curva da regressão quadrática, o que não foi observado para vários anéis. A não tangência da curva do anel SPK 929, p. ex., (ver Figura 5.13) pode ser explicada pelos fatores já descritos e também pela pequena faixa de tensão deste anel que é quase constante ao longo da circunferência. Os anéis OVAKO 82 e 93, que apresentam uma faixa maior de tensão, possuem uma certa tangência com curva da regressão quadrática. São justamente estes anéis que mostraram os resultados mais próximos dos obtidos com XRD utilizando este procedimento. A Figura 5.14 mostra o resultado obtido para o anel OVAKO 82.

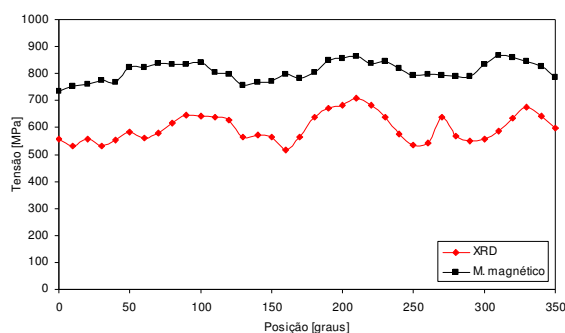


Figura 5.14 Resultados obtidos com o procedimento 9, utilizando M_{\max} para o anel OVAKO 82. Não obteve-se boa correlação.

5.2 Discussão – geral

O P2 é tomado como referência, ou seja, o melhor que se pode conseguir utilizando resultados de XRD para a calibração, pois utiliza todos os pontos disponíveis e ambos os

parâmetros magnéticos com regressão linear múltipla. Dos nove procedimentos avaliados, além do P2 outros cinco (P3, P4, P5, P6 e P7) apresentaram correspondência com as medições com XRD, porém somente dois (P3 e P7) são viáveis para o caso estudado neste trabalho. Estes últimos apresentaram resultados satisfatórios, comparáveis ao P2, não exigindo uma medição prévia completa do anel com XRD.

Para a comparação dos resultados e melhor análise entre os procedimentos estudados, foi criado um índice indicativo da diferença entre os métodos magnético e a XRD, denominado aqui de “*índice de erro*” (IE). O índice IE é expresso matematicamente da forma mostrada na equação E-5.1. Como o somatório resulta num número elevado, optou-se por dividir o valor final por 1000.

$$IE = \left(\sum_0^{350^\circ} |P - XRD| \right) \div 1000 \quad (E-5.1)$$

onde:

P : resultado de TR calculado com a função de calibração obtida em um dos nove procedimentos de calibração;

XRD : valor de tensão residual medido com a técnica de difração de raios-X.

Os valores de IE e a sua média para cada procedimento ($\overline{IE}(P)$) e anel ($\overline{IE}(\text{anel})$) estão mostrados na Tabela 5.2. A tabela permite a comparação do valor de IE entre procedimentos e entre anéis.

Analisando o índice IE em termos dos procedimentos, fazendo a comparação do índice entre P3 e P7, pode-se ver que o P7- M_{\max} apresentou um erro menor em relação ao P3 e ao P7- H_{cm} . Isto porque, em geral, M_{\max} (ruído Barkhausen) tem uma distribuição mais coerente com a XRD, do que o tem H_{cm} (campo coercivo). Isto pode ser verificado para outros anéis nas curvas de aquisição do anexo A2. Como o P3 utiliza ambos os parâmetros magnéticos e regressão linear múltipla, seu índice IE apresenta-se intermediário aos índices de P7- M_{\max} e P7- H_{cm} . Para alguns anéis H_{cm} se mostra melhor que M_{\max} para a calibração, é o caso do anel SPK 882 onde P7- H_{cm} mostra um IE menor que P7- M_{\max} .

Analisando agora o índice IE em termos dos anéis, para o anel OVAKO 82, o P7- M_{\max} mostra melhores resultados em relação ao P3; o que pode ser verificado no anexo A1 e pelo índice IE na Tabela 5.2. Para este anel os valores de H_{cm} (ver anexo A2) não

apresentam boa correlação com as TR, o que tende a prejudicar o “*fitting*” quando se usa RLM. Comparando os resultados obtidos com o P7- H_{cm} e P7- M_{max} (Figura 5.11) pode-se ver a diferença na correspondência entre as respectivas curvas e aquela medida com XRD. Devido a esta baixa correspondência de H_{cm} com as TR os resultados do P3 são parecidos com os do P7- H_{cm} (ver anexos A1.3 e A1.7) para este anel (OVAKO 82). Estas mesmas observações são válidas para o anel SPK 734.

Para o anel OVAKO 93, também foi verificada melhor correspondência de M_{max} com as TR do que o fez H_{cm} . Apesar disso, o P3 apresentou um índice IE menor em comparação com P7- M_{max} e P7- H_{cm} , mostrando que a baixa correlação de H_{cm} com as tensões residuais não prejudicou o *fitting* com RLM.

Tabela 5.2 Índice IE obtido com os procedimentos de calibração.

Proced.	Tipo de regressão	$IE = \left(\sum_0^{350^\circ} P - XRD \right) \div 1000$							$\overline{IE} (P)$
		OVAKO 82	OVAKO 93	SPK 734	SPK 791	SPK 882	SPK 909	SPK 929	
P1	RLM	4,1	4,7	5,8	8,0	5,9	2,6	8,1	5,6
P2	RLM	1,1	0,9	1,2	1,4	0,4	1,2	1,1	1,0
P3	RLM	1,7	0,9	1,4	1,5	0,6	1,4	1,4	1,3
P4	RLM	1,4	1,6	1,6	2,7	0,9	1,1	1,7	1,6
P5	RLS M_{max}	1,1	0,9	1,2	1,4	0,5	1,3	1,1	1,1
	RLS H_{cm}	1,4	1,3	1,2	1,4	0,5	1,2	1,1	1,2
P6	RLS M_{max}	1,5	0,9	1,7	1,7	1,0	1,2	1,5	1,4
	RLS H_{cm}	1,6	1,3	2,5	2,0	0,6	1,2	1,4	1,5
P7	RLS M_{max}	1,1	1,4	1,2	1,5	0,6	1,3	1,4	1,2
	RLS H_{cm}	1,7	1,9	1,4	1,5	0,5	1,6	1,6	1,5
P8	RLM	-	-	4,9	3,3	2,4	6,2	2,5	3,9
	RLS M_{max}	-	-	3,8	1,8	3,9	5,7	7,8	4,6
	RLS H_{cm}	-	-	5,0	3,4	2,5	6,1	2,5	3,9
P9	RQ M_{max}	-	-	-	-	-	-	-	-
	RQ H_{cm}	-	-	-	-	-	-	-	-
$\overline{IE} (anel)$	P2 ao P7	1,7	1,6	1,9	2,3	1,1	1,4	2,0	
	P1 ao P7	1,4	1,3	1,4	1,5	0,6	1,3	1,4	
	P1 ao P8	-	-	2,5	2,5	1,6	2,5	2,6	

A Tabela 5.2 não apresenta índice IE para o P9 devido à não coerência deste procedimento com os resultados de XRD.

Com os anéis SPK 791 e SPK 929 não foi possível obter bons resultados com nenhum dos procedimentos avaliados. Não há correlação entre os parâmetros magnéticos e as TR para estes anéis, o que pode ser comprovado nas curvas do anexo A2. O fator em comum entre estes dois anéis é o baixo valor de TR (média de 185MPa para o anel SPK 791 e média de 144MPa para o anel SPK 929). Atribui-se a este fato a não correlação apresentada por estes anéis, provavelmente devido a questões de sensibilidade do equipamento magnético utilizado^[36,38,44]. Acredita-se que, devido aos baixos valores de tensão, os efeitos da microestrutura sobre as propriedades magnéticas se sobressaem em relação aos efeitos da tensão para estes anéis.

Sumarizando, para alguns anéis como SPK 734 e SPK 909, tanto H_{cm} como M_{max} se mostram coerentes com a distribuição de tensões residuais. Portanto, quando se utiliza o P7 para a calibração sempre se obtém bons resultados para esses anéis. Para outros, como OVAKO 82 e OVAKO 93 a curva de M_{max} se mostra mais coerente com a distribuição de tensões residuais do que o faz a curva de H_{cm} . Neste caso, com o P7 se obtém um melhor *fitting* quando se usa M_{max} . O P3, contudo, por usar RLM (H_{cm} e M_{max} em conjunto) tende a fornecer bons resultados mesmo quando um dos parâmetros (M_{max} ou H_{cm}) mostra baixa correlação.

Com base nessas observações, pode-se dizer que mesmo não sendo necessários dois parâmetros magnéticos (já que se utiliza uma faixa estreita de tensão para a calibração), o procedimento 3 se mostra o mais adequado. O emprego da regressão linear múltipla funciona como uma certa segurança, contrabalançando os efeitos de M_{max} e H_{cm} sobre a função de calibração.

As discrepâncias encontradas entre o método magnético e a difração de raios-X se devem a, pelo menos, quatro fatores: 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. Devido a impossibilidade de interferir na integridade dos anéis nesta fase do projeto SFB 570, não foi possível fazer avaliação da microestrutura. Contudo, sabe-se que os processos de usinagem têm influência sobre a textura nas proximidades a superfície do componente. Quanto a profundidade de medição conseguida com o equipamento magnético, foi

determinado analiticamente^[12] que esta é da ordem de $10\mu\text{m}$ quando se usa um filtro passa faixa de 10MHz. Já a profundidade de penetração dos raios-X no aço é em torno de $6\mu\text{m}$. Como existe um intenso gradiente de tensão próximo a superfície do anel (ver Figura 3.4), esta diferença na profundidade de medição ($4\mu\text{m}$) leva à diferenças quando comparam-se resultados das duas técnicas. A Figura 5.15 exemplifica este fato mostrando, esquematicamente, o gradiente de tensão tangencial e axial na espessura do anel. Na Figura 5.15 (a) está mostrada a profundidade de medição de cada técnica e em (b) o detalhe da área na qual é feita a integração da tensão medida numa determinada profundidade.

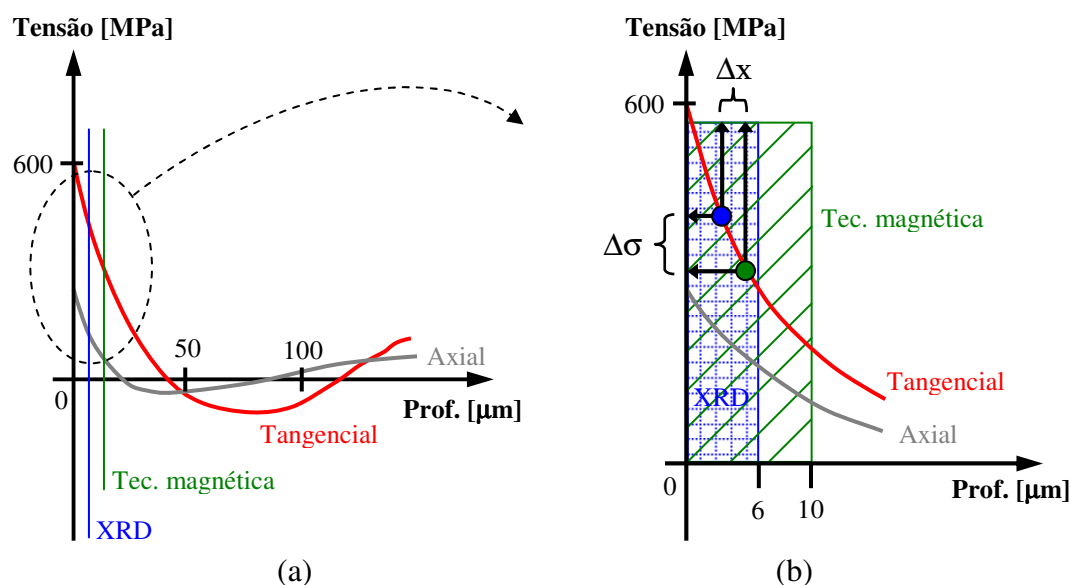


Figura 5.15 (a) esquema do gradiente de tensão na profundidade dos anéis e diferença na profundidade de medição entre as técnicas; e (b) detalhe da área de integração de cada técnica.

Pode-se ver a dificuldade que se tem para conseguir concordância quando se faz comparação de resultados de técnicas de medição diferentes, principalmente no caso de XRD que é uma técnica de caráter micrométrico^[46]. Apesar da pequena profundidade de penetração da técnica magnética ($6\mu\text{m}$), ela analisa um raio do material maior que isso, proporcional ao diâmetro da bobina existente no sensor. Ou seja, a técnica magnética fornece o valor de tensões residuais médio existente num certo volume de material que é bem maior daquele da difração de raios-X.

Ainda vale ressaltar que a principal vantagem do método magnético é o reduzido tempo de medição. Com os difratômetros utilizados hoje no projeto SFB 570 leva-se, aproximadamente, 48 horas para medir as tensões residuais em cada direção (longitudinal e tangencial) dos anéis, além de medir somente tensões superficiais. Já o método magnético

necessita de aproximadamente 3 horas para medir ambos os parâmetros magnéticos (M_{\max} e H_{cm}) no mesmo número de pontos que a XRD, e ainda pode ser empregado para medições sub-superficiais. Medições sub-superficiais podem ser realizadas utilizando diferentes frequências para o filtro passa-faixa. O equipamento utilizado permite três configurações de frequência para este filtro: 10Mhz (utilizada neste trabalho); 2,5MHz e 0,4MHz. Quanto maior a frequência do filtro mais próxima da superfície é a medição^[12].

6 CONCLUSÕES

Uma revisão da técnica magnética do ruído Barkhausen para medição de TR foi realizada com o objetivo de utilizar o método para reduzir o tempo de medição de anéis de rolamento no projeto SFB 570. Devido às dificuldades encontradas para a calibração foi conduzido um estudo onde foram avaliados diversos “procedimentos” para este fim, no intuito de determinar o mais adequado para as condições dos anéis em estudo. Um total de nove procedimentos foram experimentados em uma amostragem de sete anéis de rolamento semi-acabados com diferentes níveis de TR medidos previamente com XRD. Com cada procedimento foi obtido uma ou mais funções de calibração com a qual é feito o cálculo das TR nos anéis.

Seis procedimentos de calibração mostraram resultados satisfatórios, porém somente dois são viáveis para aplicação aos anéis estudados: os procedimentos 3 e 7. Ambos utilizam cinco pontos espaçados de TR, medidos com XRD, para a calibração. O procedimento 3 utiliza regressão linear múltipla enquanto o procedimento 7 utiliza regressão linear simples.

Para alguns anéis não são os dois parâmetros magnéticos que apresentam boa correlação com a tensão. Um exemplo é o anel OVAKO 93 para o qual M_{\max} (ruído Barkhausen) mostra melhor correlação que H_{cm} (campo coercivo) em relação a curva de tensões residuais medida com XRD (ver anexo A.2.2). Para este anel usando o procedimento 3 (RLM e pontos espaçados) obteve-se boa correlação com a difração de raios-X. Empregando o procedimento 7 (RLS e pontos espaçados) foram obtidos bons resultados mas a melhor correlação foi para M_{\max} .

Com base nas observações para este e outros anéis, pode-se dizer que é preferível o emprego do procedimento 3 pois este utiliza RLM para a calibração, o que atua como um fator de segurança, contrabalançando os efeitos de M_{\max} e H_{cm} sobre a função de calibração.

Foi observado que, sozinho, o índice de correlação R^2 obtido nas regressões não serve como indicativo da eficiência da função de calibração para o cálculo das TR em todo o anel. Muitas funções de calibração que apresentaram um índice R^2 muito baixo mostraram coerência com os resultados de XRD. O inverso também se observou, onde funções com R^2 próximo de 1 conduziram a resultados insatisfatórios.

Vários fatores que exercem influência nas medições com o equipamento magnético impossibilitam a obtenção de uma única função de calibração aplicável a todos os anéis. Esses fatores são: diferenças microestruturais entre os anéis, diferença na profundidade de penetração entre as técnicas, acoplamento entre sensor magnético e anéis, e processamento do sinal magnético. Ainda pode-se citar a complexidade do estado de tensão existente nos anéis. Por isso a calibração deve ser feita individualmente, preferencialmente com o procedimento 3 (RLM).

Através dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se dizer que fazendo uso complementar de ambas as técnicas (XRD e método magnético) é possível medir a tensão nos anéis num tempo menor. Conforme executado nos procedimentos 3 e 7, 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). Este é o principal ponto positivo deste método, com vista ao atendimento das necessidades do projeto SFB 570.

Uma estratégia para a otimização do processo de medição de tensões residuais nos anéis de rolamento envolve a adoção da seguinte seqüência:

1. Medir M_{\max} e H_{cm} com o método 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 se obtém uma redução de aproximadamente 80% (38 horas) no tempo de medição gasto atualmente no projeto SFB 570 empregando somente XRD.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar as tensões residuais na direção longitudinal dos anéis usando as funções de calibração já determinadas neste trabalho;
- Empregar os procedimentos de calibração aqui avaliados em anéis tratados termicamente;
- Avaliar a funcionalidade dos procedimentos de calibração em função da profundidade (medições com 0,4 e 2,5 MHz) usando a função de calibração obtida para a superfície do anel;
- Fazer medições na superfície interna dos anéis e comparar com difração de raios-X. Verificar a funcionalidade, na superfície interna, da função de calibração obtida para a superfície externa do anel;
- Submeter um anel usinado a tratamento de recozimento e têmpera, medindo os parâmetros magnéticos e as tensões residuais com XRD nos três estados. Após, fazer calibração com P3 e P7;
- Preparar amostras com mesmo estado de tensões e diferentes níveis de rugosidade superficial para avaliar o efeito da rugosidade no acoplamento com o sensor e no resultado das medições;
- Avaliar o efeito da diferença na profundidade de penetração das técnicas nos resultados. Isto pode ser feito ajustando a distribuição de TR através da integração do perfil ajustando-o aquele medido pela técnica magnética. Fazer a calibração após este ajuste.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses**. SEM – Society or Experimental Mechanics, Inc. TFP – The Fairmount Press, Inc. Lilburn, GA.
- 5 RUUD, C. **Measurement of residual stresses. Handbook of residual stress and deformation**.ASM, 2002.
- 6 **Physique & industrie: research under contract**. Residual stress theory. <http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.htm> Acesso em 9 Mai. 2004.
- 7 BRINKSMEIER, E. et al. **Influence of the longitudinal turning process on workpiece distortion of rings**. Proceedings of the Fourth International Conference on Quenching and the Control of Distortion, 20-23 May, 2003, Beijing.
- 8 BRINKSMEIER, E. **Analyse des mechanischen und thermischen Belastungskollektivs als Verzugspotenzial bei der spanende Bearbeitung**. SFB 570 Distortion Engineering / Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A4. Finanzierungsantrag 2001-2003. Universität Bremen, 2003.
- 9 HAUKE, V. **Structural residual stress analysis by nondestructive methods**. Institut für Werkstoffkunde. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Elsevier - Aachen, Germany, 1997.

- 10 **Los Alamos – National Laboratory.** The slitting method for residual stress measurement – Comparison with other residual stress measurement methods. <<http://www.lanl.gov/residual/compare.shtml>> Acesso em 10 Mai. 2004.
- 11 **HIRSCH, T. Schnelle bauteilspezifische Spannungs-/Eigenspannungsanalyse durch in situ Experimente bei kompletten Temperatur-Zeit-Zyklen.** SFB 570 Distortion Engineering / Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C2. Finanzierungsantrag 2004-2007. Universität Bremen, 2003.
- 12 **MARTINS, C. Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis para rolamentos.** Dissertação de mestrado. PPGEM. UFRGS, 2004.
- 13 **JILES, D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis.** Elsevier Science Publishers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 61, North-Holland, Amsterdam, 1986.
- 14 **Tiede Rissprüfanlagen. Technisches Handbuch und Bedienungsanleitung.** Ferrotest - DUR. V.3.01 , novembro 1991. (Manual de informações técnicas e operacionais).
- 15 **KWUN, H. Electromagnetic techniques for residual stress measurements.** Methods of Nondestructive Evaluation. ASTM Handbook, vol. 17.
- 16 **Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.** Domain movements in external fields. <http://www.techfak.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_4/backbone/r4_3_4.html> Acesso em 10 Mai. 2004.
- 17 **University of Washington – Barkhausen noise.** Barkhausen noise and avalanches. <<http://bragg.phys.washington.edu/bark.html>> Acesso em 10 Mai. 2004.
- 18 **PASLEY, R. L. Barkhausen effect – An indication of stress.** Materials Evaluation, pp. 157-161, July, 1970.
- 19 **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.
- 20 **HEINLEIN, J. Zerstörungsfreie Randzonenanalyse mit mikromagnetischen Prüfverfahren.** Master Thesis, Universität Bremen, 2002.

- 21 **Instituto Electrotecnico Nazionale (IEN) – Homepage de Gianfranco Durin.** The Barkhausen effect. <<http://www.ien.it/~durin/barkh.html>> Acesso em 10 Mai. 2004.
- 22 **ATHERTON, D. L., JILES, D.C. Effects of stress on magnetization.** Butterworth & Co (publishers) Ltd. NDT International, volume 19, number 1, February, 1988.
- 23 **JILES, D. C. Review of magnetic methods for nondestructive evaluation.** Butterworth & Co (publishers) Ltd. NDT International, volume 21, number 5, October, 1988.
- 24 **KIM, H.C. et al. Evaluation of residual stress and texture in ferromagnetic crystalline material by Barkhausen noise measurements.** Gordon and Breach S.A. Nondestr. Test. Eval., vol. 8-9, pp 575-590, United Kingdom, 1992.
- 25 **QIANG, Li. et al. Theoretical analysis of the influence of different microstructure on Barkhausen noise.** College of Mechanical and Electric Engineering. Northern Jiaotong University, Beijing.
- 26 **SAQUET, O. Barkhausen noise from plain carbon steel: analysis of the influence of microstructure.** Elsevier Science S.A. Materials Science and Engineering A269, pp. 73-82, 1999.
- 27 **KUZNETSOV, N. S. Examination of the relationship of parameters of magnetic noise with changes in the structure of ferromagnetic steels.** Technical Diagnostics and Nondestructive Testing. Moscow, 1992.
- 28 **LANGMAN, R. Measurement of stress by a magnetic method.** Department of Electrical Engineering, University of Tasmania, Australia. Elsevier Science Ltd, vol. 29, October, 1996.
- 29 **Deutsche Welle Akademie.** Fundamental laws of the magnetic fields. <http://www.dw-world.de/rtc/infotheque/electronic_components/inductors.html> Acesso em 12 Mai. 2004.
- 30 **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.

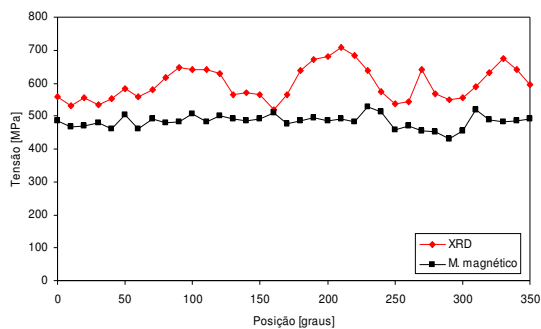
- 31 THEINER, W. A. **Physical basis of micromagnetic methods and sensor systems and their application areas.** Proceedings of the 1st International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. Hannover, Germany, 1998.
- 32 **Stresstech group.** Grinding burn and heat treat defect testing equipment / Barkhausen noise analysis. <<http://www.stresstech.fi/products?id=85&c=1&l=1&parent=1&s=2>> Acesso em 11 Mai. 2004.
- 33 SWARTZENDRUBER, L. J., HICHO, G. E. **Effect of sensor configuration on magnetic Barkhausen observations.** Metallurgy Division, National Institute of Standards and Technology. Springer-Verlag New York Inc, 1993.
- 34 SCHNEIDER, E. **Nondestructive analysis of stress states in components using micromagnetic and ultrasonic techniques – An Overview.** Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Universität des Saarbrücken, Germany.
- 35 GRUM, J. et al. **Identification of structural changes and residual stresses based on magnetic Barkhausen noise.** 5th International Conference on Residual Stresses - ICRE-5, June 16-18, pp. 694-702, 1997.
- 36 KARPUSCHEWKI, B. et al. **Residual stress determination of ferromagnetic sheets.** 5th International Conference on Residual Stresses - ICRE-5, June 16-18, pp. 1145-1149, 1997.
- 37 RIVERA, J. A. et al. **Magnetic Barkhausen noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials 231, pp. 299-306, 2001.
- 38 ALLISON, A. et al. **Correlation of Barkhausen noise signal and X-ray residual stress determination in grinding-burned 52100 steel.** 5th International Conference on Residual Stresses - ICRE-5, June 16-18, pp. 640-645, 1997.
- 39 STEFANITA, C. G. et al. **Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel.** Department of Physics, Queen's University, Kingston; Ontario, Canada. Elsevier Science Ltd, 2000.
- 40 LAMONTANARA, J. et al. **Monitoring Fatigue damage in industrial steel by Barkhausen noise.** Gordon and Breach S.A. Nondestr. Test. Eval., vol. 8-9, pp 603-614, United Kingdom, 1992.

- 41 BACH, G. et al. **Characterization of hardening depth by Barkhausen Noise measurement.** The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Materials Evaluation, 46, november, 1988.
- 42 WOJTAS, A. **Surface and Subsurface Residual Stresses after Shot Peening – their qualitative and quantitative Analysis by X-Ray diffraction and Barkhausen Noise Analysis.** Science Update. Vol.5, setembro 2004.
- 43 MAKAR, J. M., TANNER, B. K. **The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials 222, pp. 291-304, 2000.
- 44 KRAUSE, T. W., ATHERTON, D. L. **High resolution magnetic Barkhausen noise measurements.** Butterworth-Heinemann Ltd. NDT & E International, volume 27, number 4, 1994.
- 45 TÖNSHOFF; H. et al. **Micromagnetic stress determination on tailored blanks.** Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen. 15th World Conference on Nondestructive Testings – Roma, Italy, 2000.
- 46 HIRSCH, T. **Entwicklung von Eigenspannungszuständen in Fertigungsprozessen.** HTM 58, number 3, pp.110-126, 2003.
- 47 FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** Ed. Edgard Blücher, Ltda., 9ª edição, São Paulo, 1995.
- 48 TORRES, M. A. S., VOORWALD, H. J. C. **An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel.** International Journal of fatigue, vol. 24, pp. 877-886, 2002.

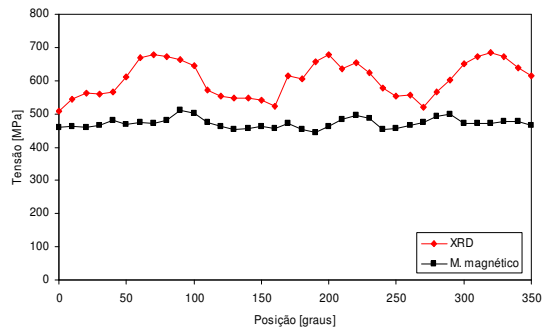
ANEXOS

A.1. Todos os resultados

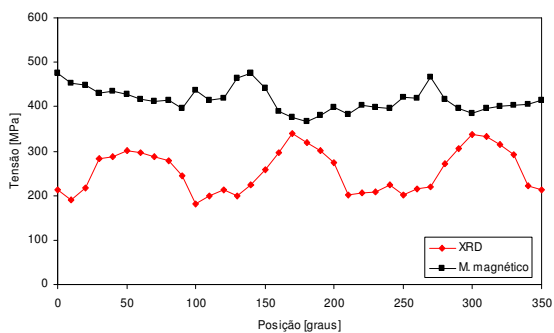
A seguir são apresentados todos os resultados de TR obtidos para os anéis em cada um dos procedimentos de calibração.

A.1.1. Procedimento 1

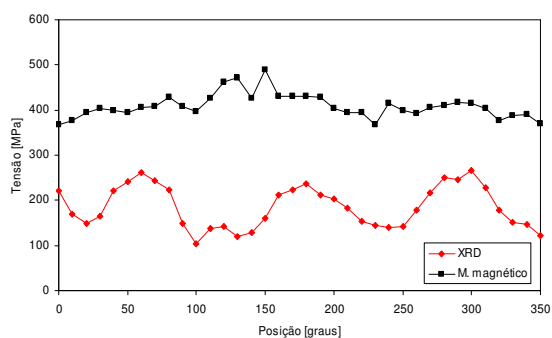
OVAKO 82



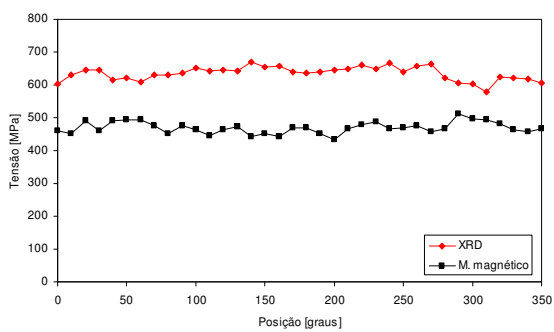
OVAKO 93



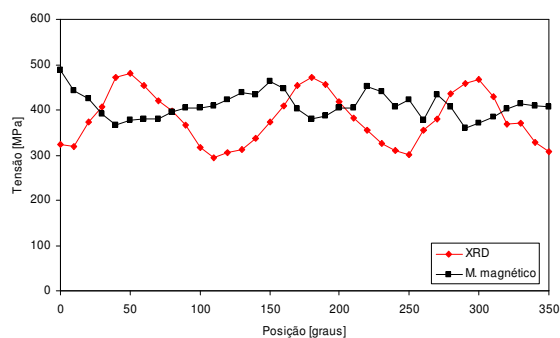
SPK 734



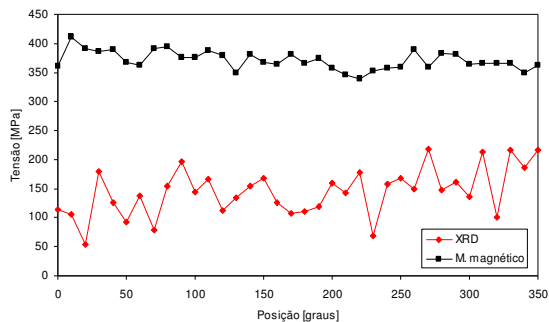
SPK 791



SPK 882

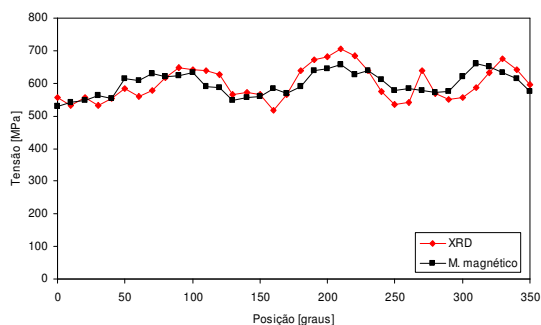


SPK 909

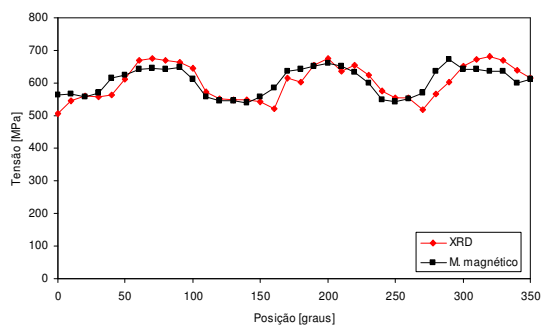


SPK 929

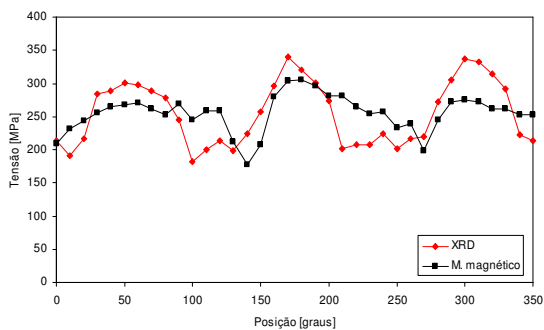
A.1.2. Procedimento 2



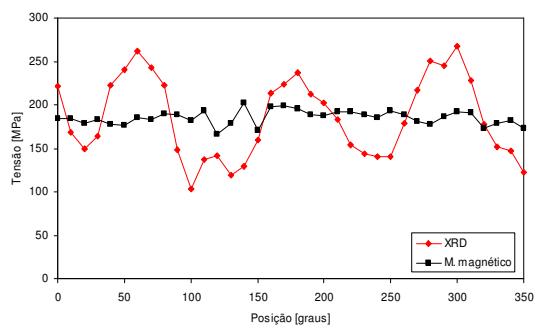
OVAKO 82



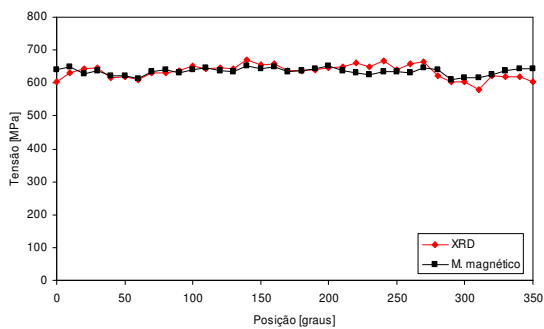
OVAKO 93



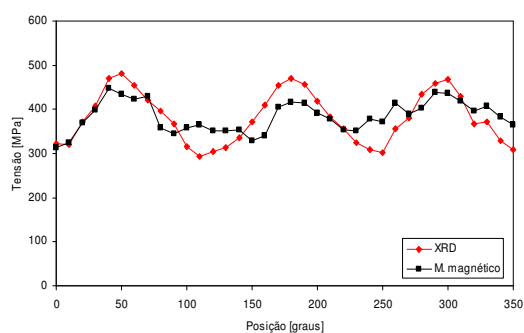
SPK 734



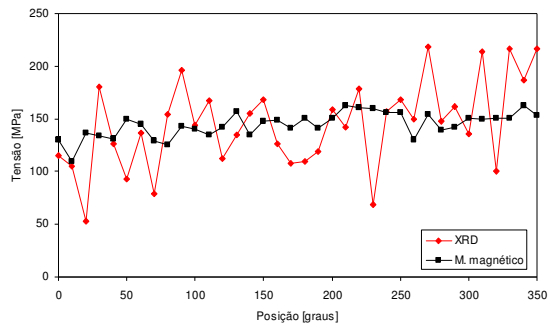
SPK 791



SPK 882

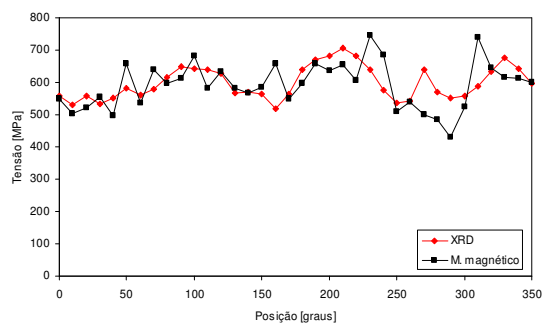


SPK 909

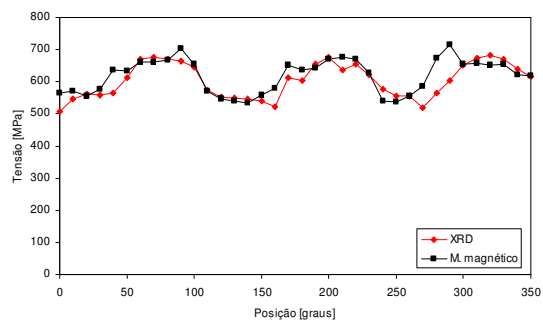


SPK 929

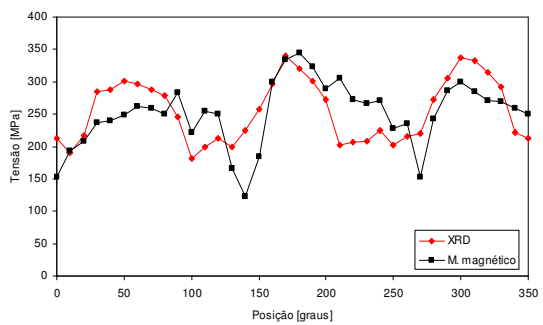
A.1.3. Procedimento 3



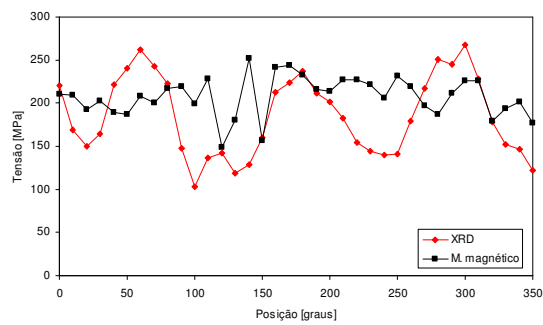
OVAKO 82



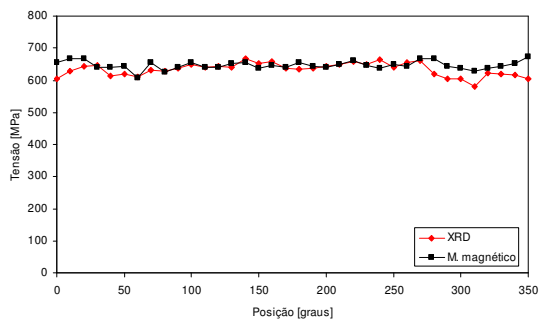
OVAKO 93



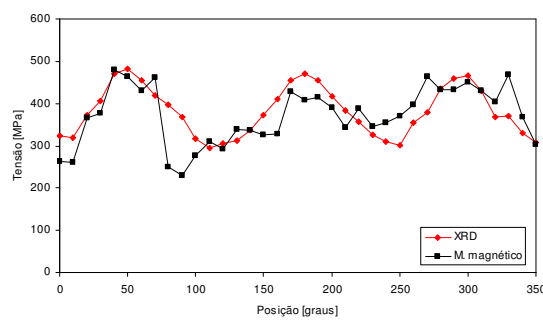
SPK 734



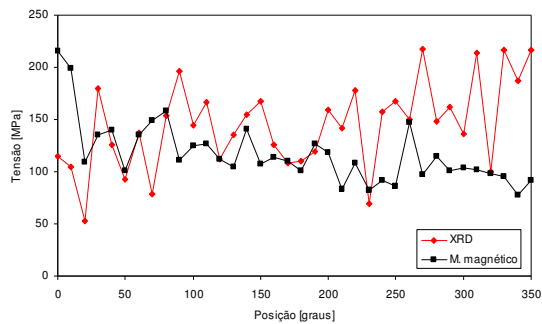
SPK 791



SPK 882

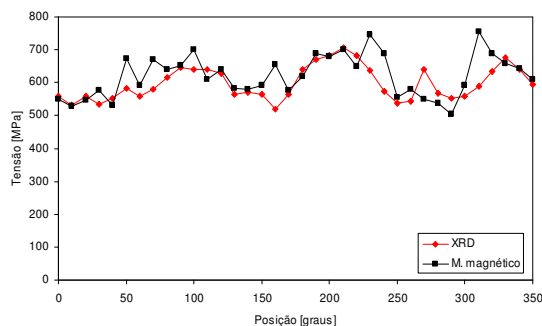


SPK 909

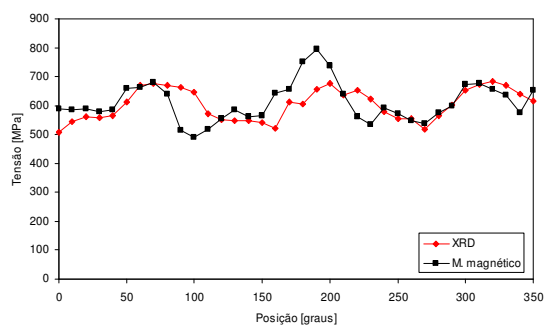


SPK 929

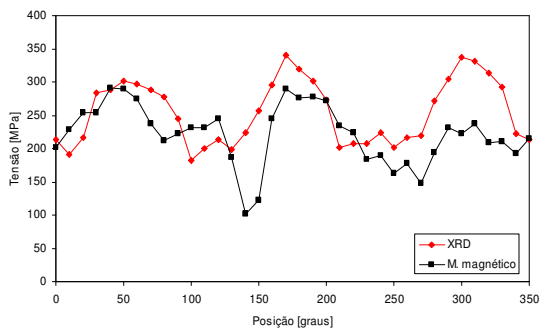
A.1.4. Procedimento 4



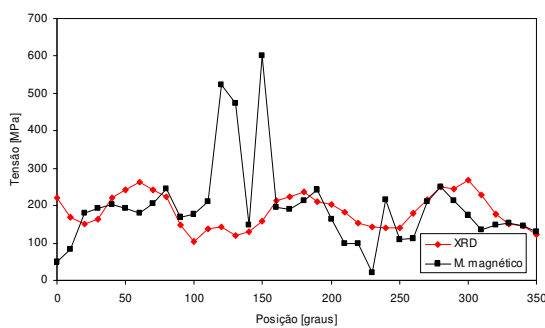
OVAKO 82



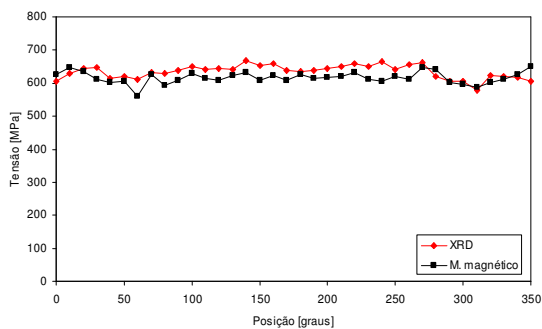
OVAKO 93



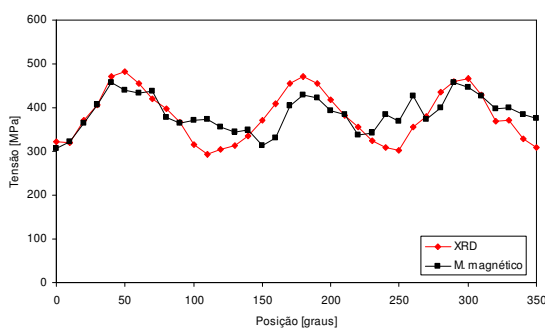
SPK 734



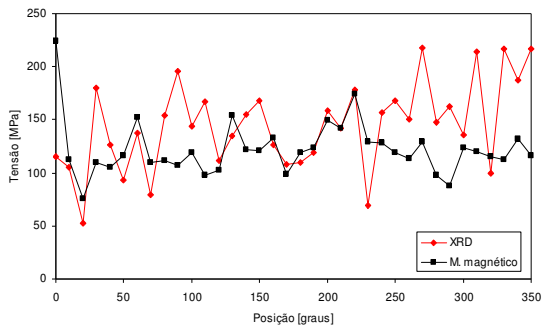
SPK 791



SPK 882

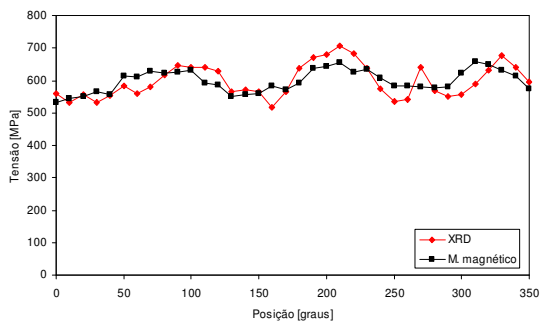


SPK 909

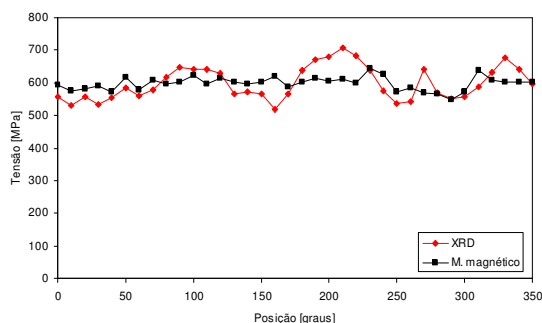


SPK 929

A.1.5. Procedimento 5

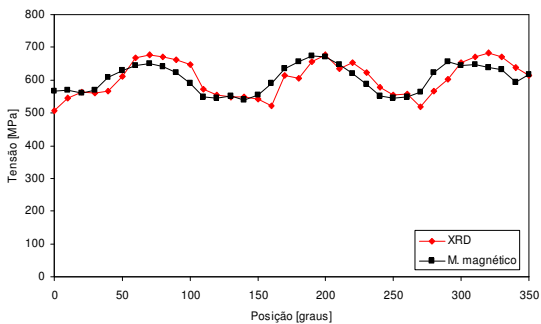


(M_{max})

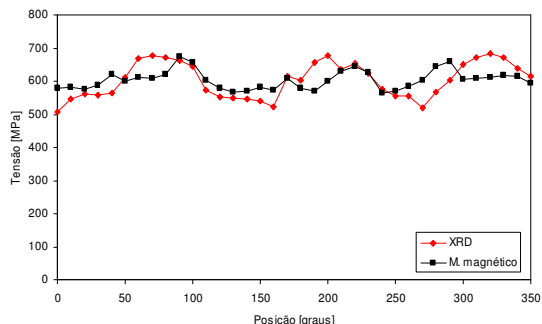


(H_{cm})

OVAKO 82

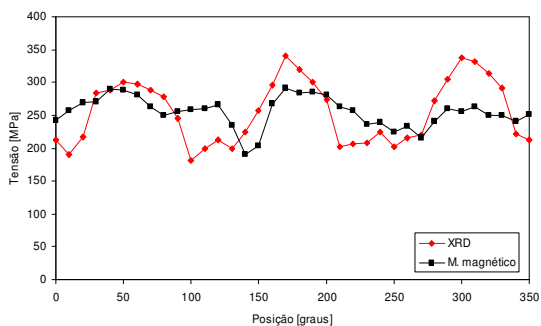


(M_{max})

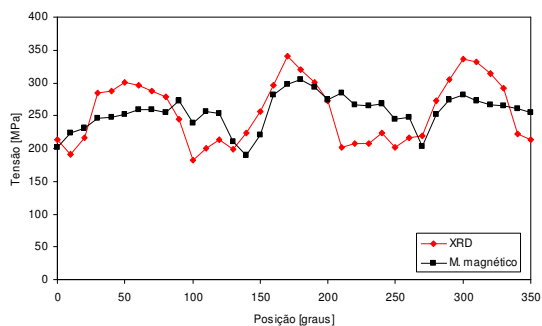


(H_{cm})

OVAKO 93

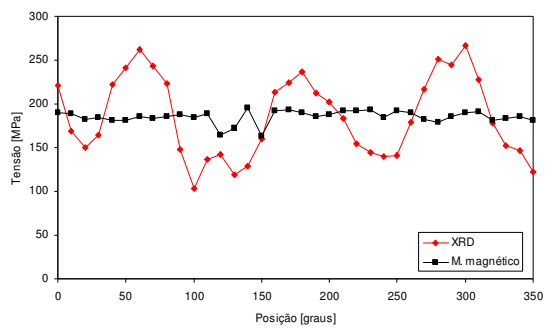
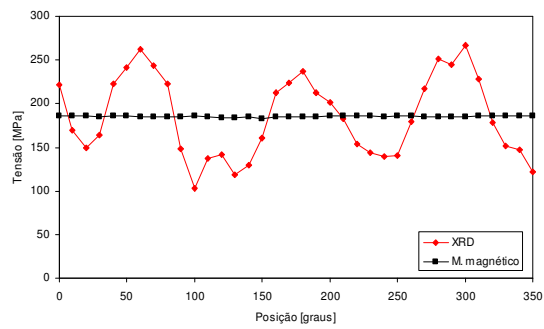


(M_{max})

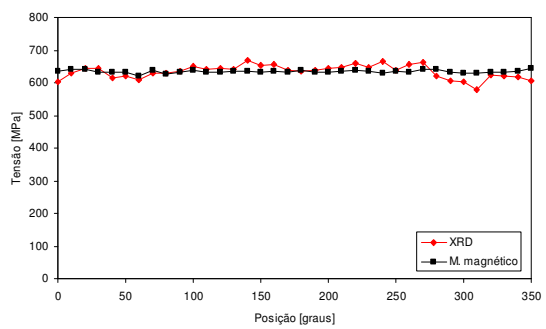
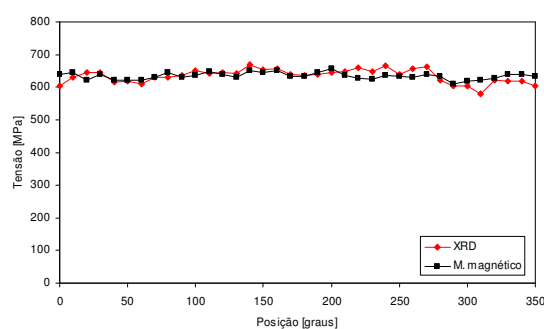


(H_{cm})

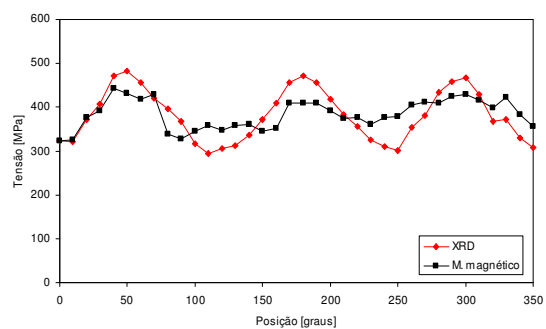
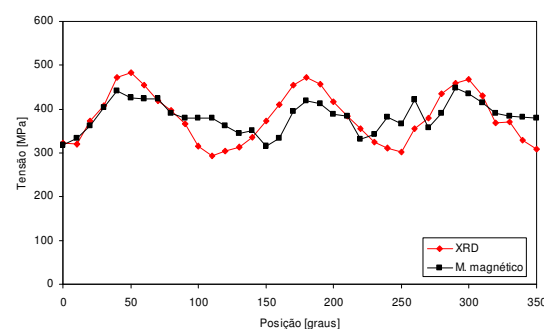
SPK 734

 (M_{\max})  (H_{cm})

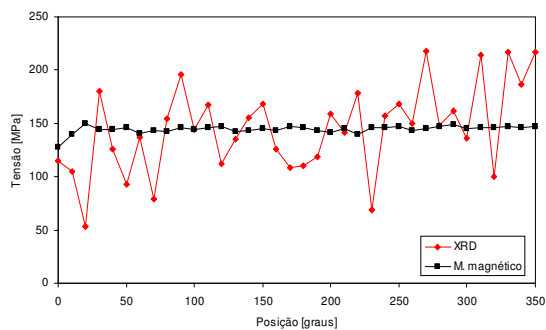
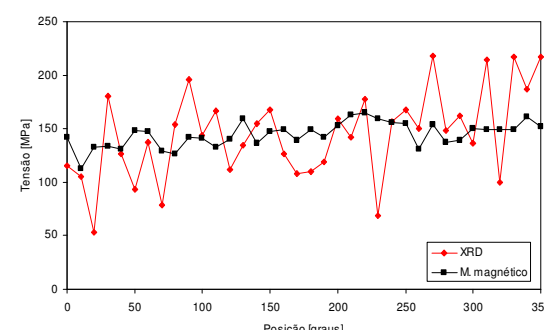
SPK 791

 (M_{\max})  (H_{cm})

SPK 882

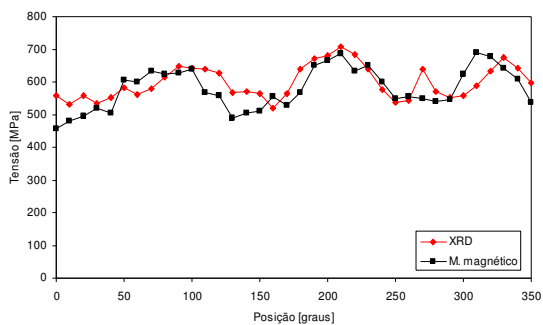
 (M_{\max})  (H_{cm})

SPK 909

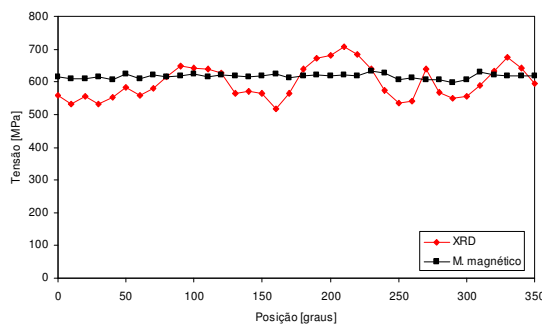
 (M_{\max})  (H_{cm})

SPK 929

A.1.6. Procedimento 6

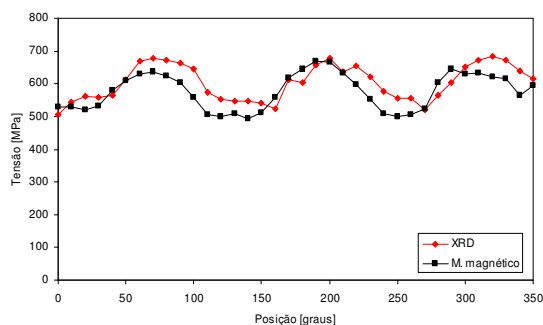


(M_{max})

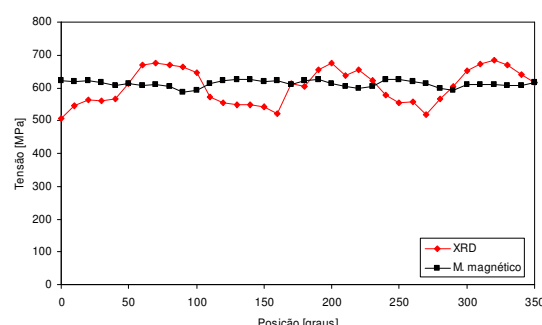


(H_{cm})

OVAKO 82

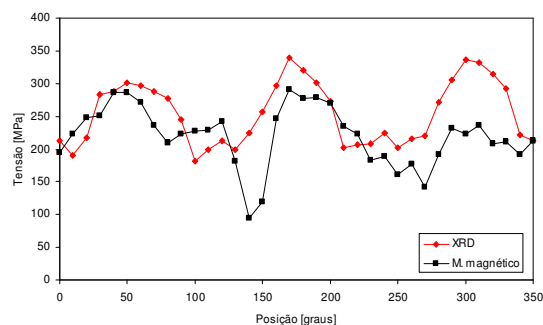


(M_{max})

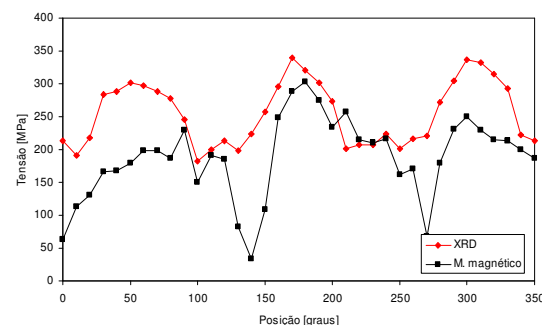


(H_{cm})

OVAKO 93

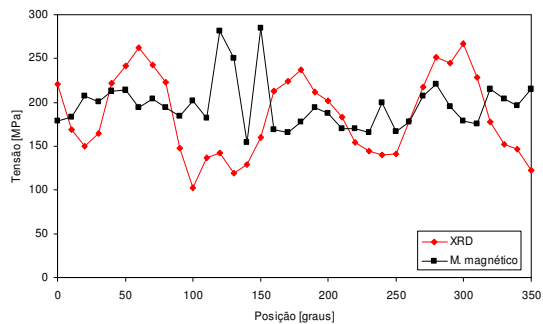


(M_{max})

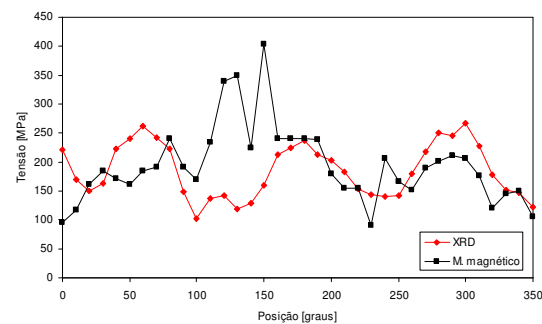


(H_{cm})

SPK 734

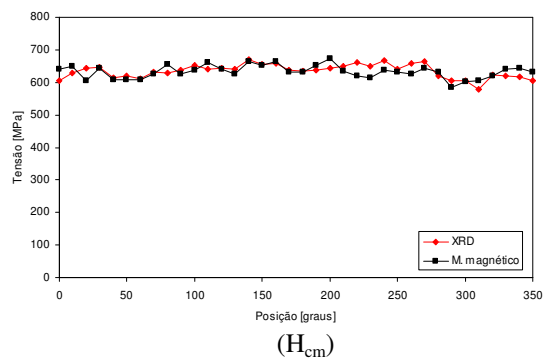
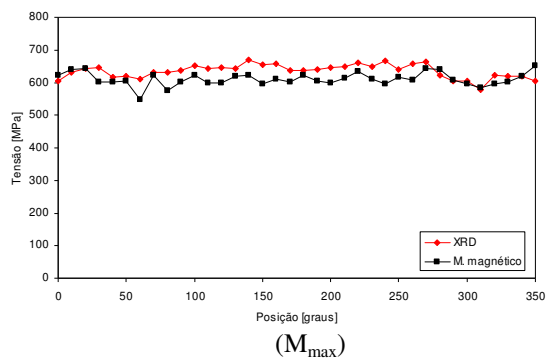


(M_{max})

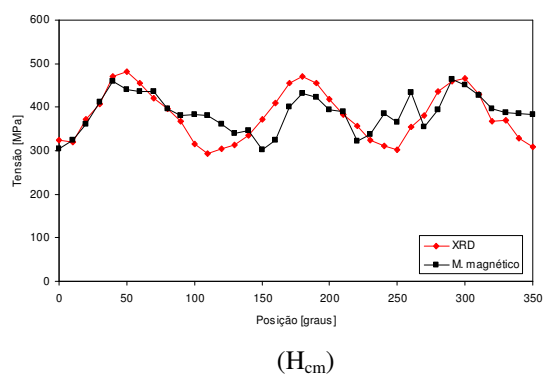
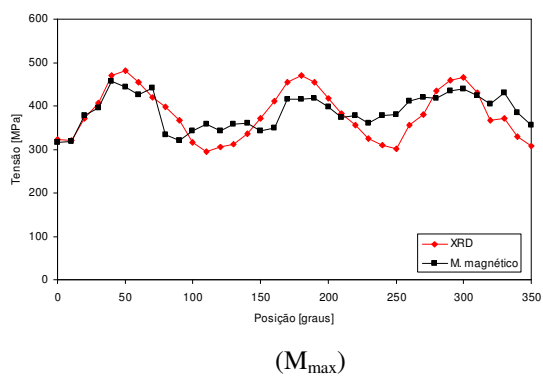


(H_{cm})

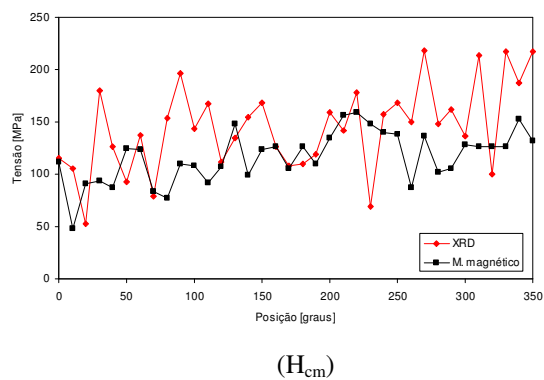
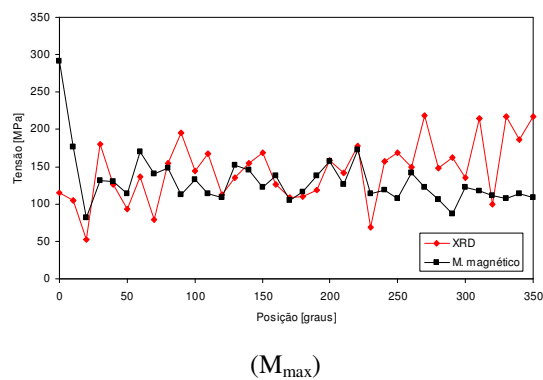
SPK 791



SPK 882

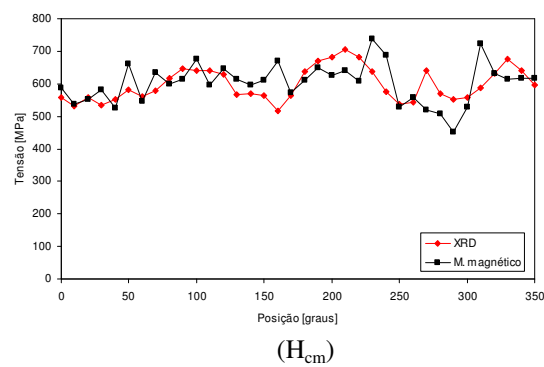
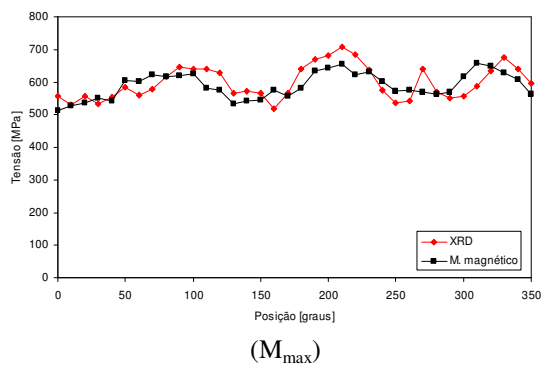


SPK 909

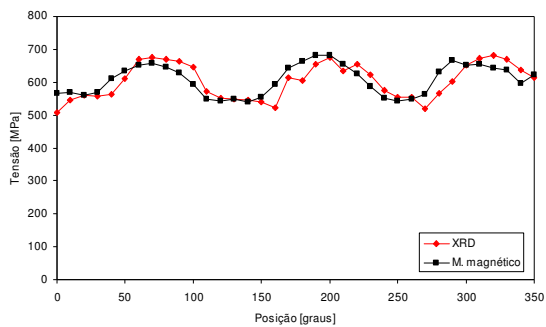


SPK 929

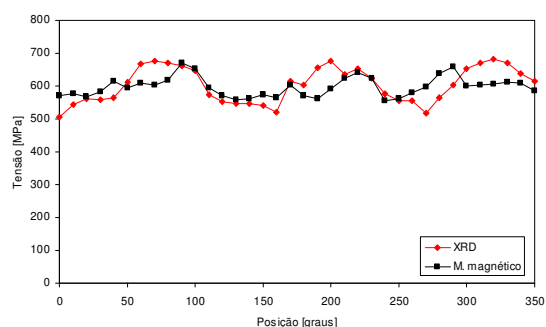
A.1.7. Procedimento 7



OVAKO 82

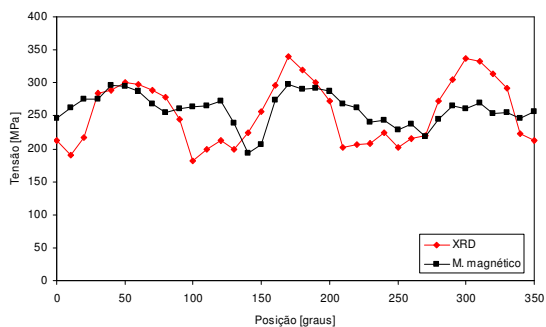


(M_{max})

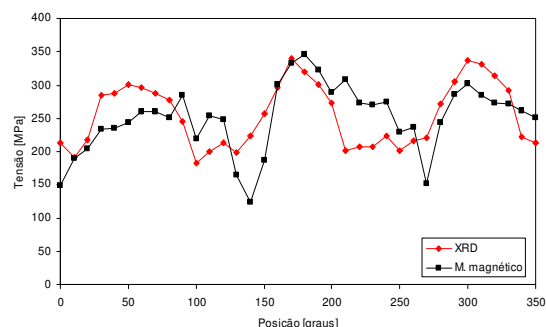


(H_{cm})

OVAKO 93

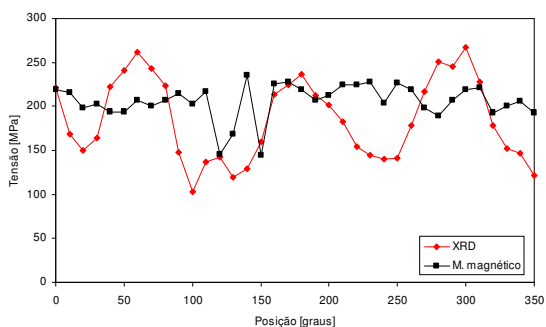


(M_{max})

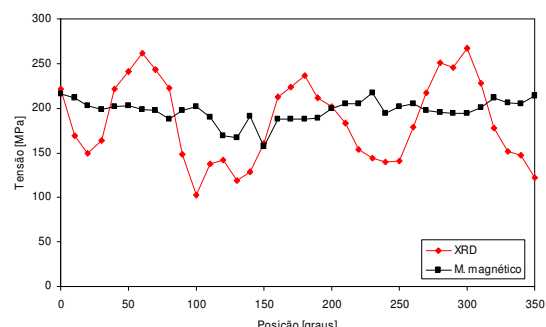


(H_{cm})

SPK 734

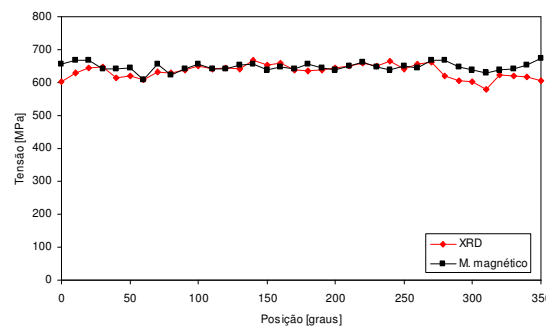


(M_{max})

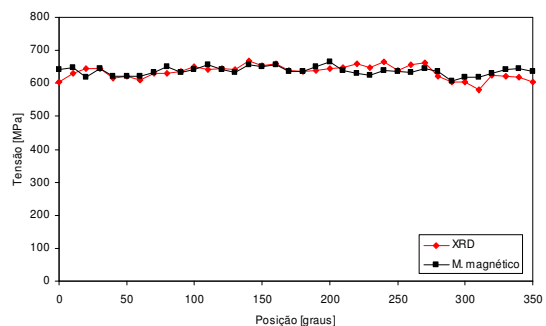


(H_{cm})

SPK 791

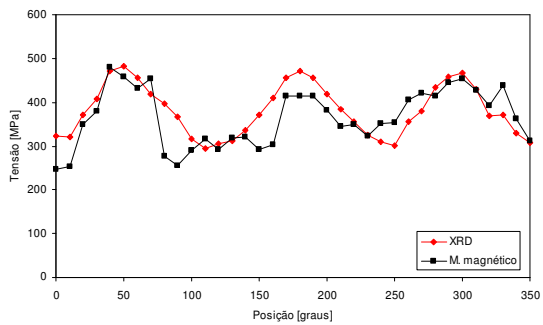


(M_{max})

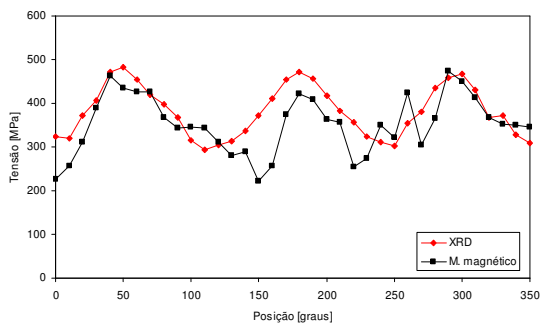


(H_{cm})

SPK 882

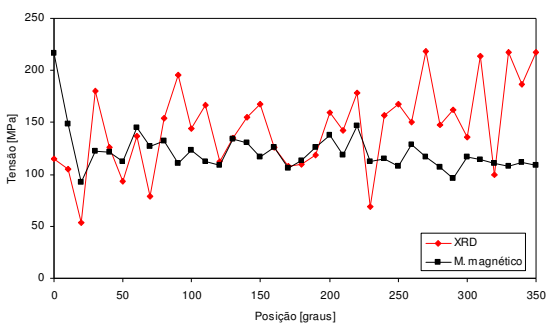


(M_{max})

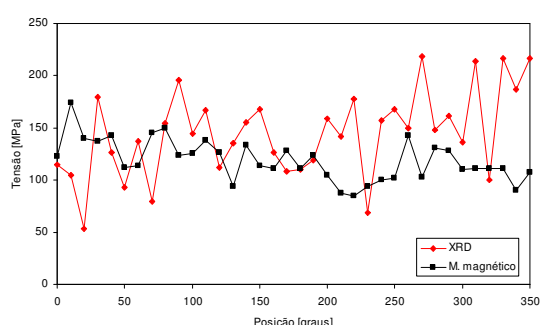


(H_{cm})

SPK 909



(M_{max})

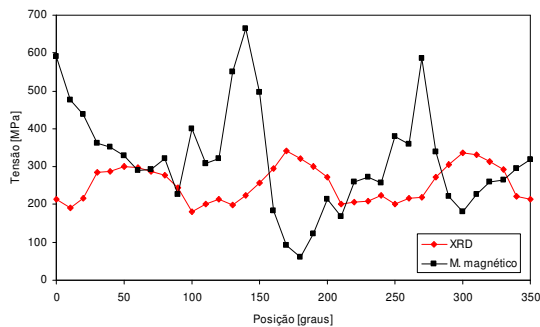


(H_{cm})

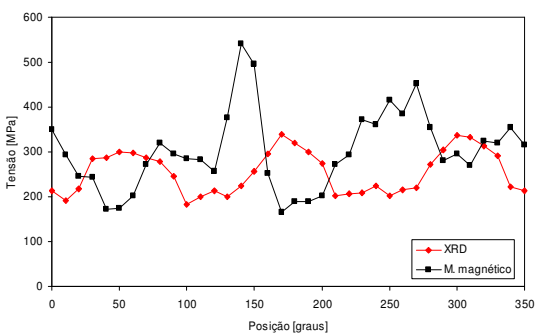
SPK 929

A.1.8. Procedimento 8

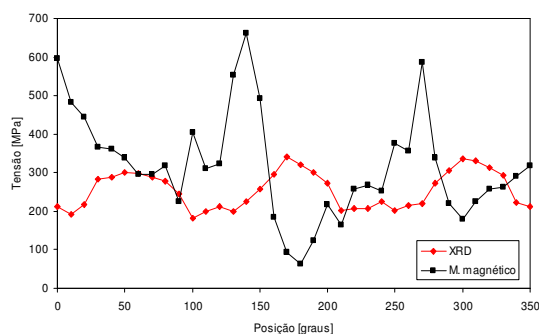
Anel SPK 734



(RLM)

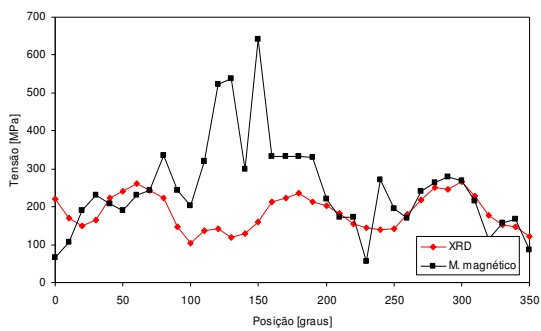


(RLS -M_{max})

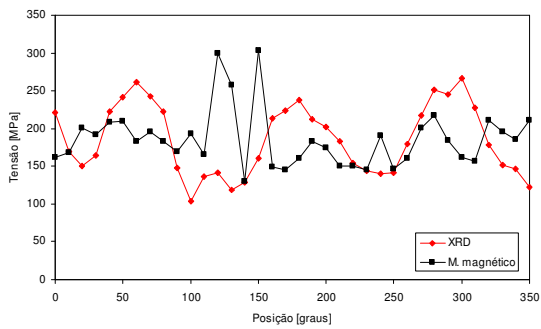


(RLS -H_{cm})

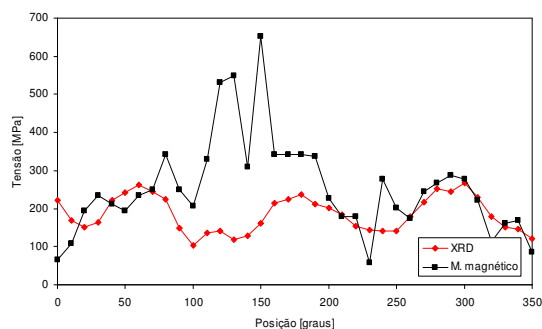
Anel SPK 791



(RLM)

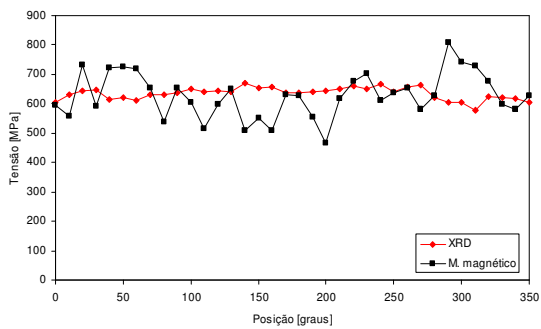


(RLS -M_{max})

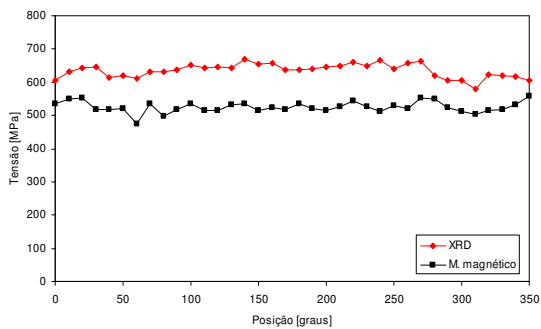


(RLS -H_{cm})

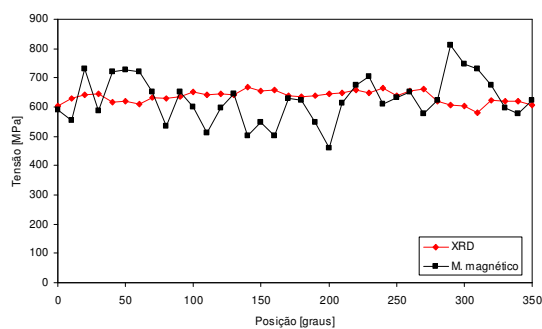
Anel SPK 882



(RLM)

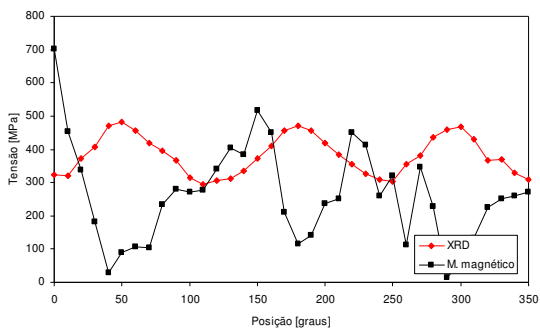


(RLS -M_{max})

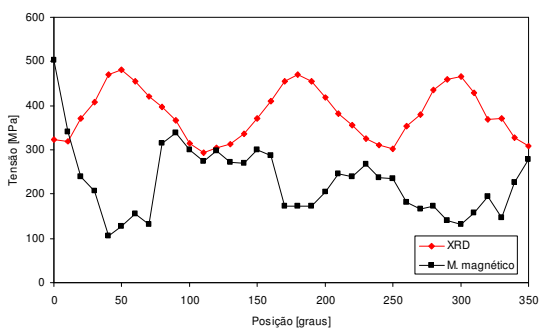


(RLS -H_{cm})

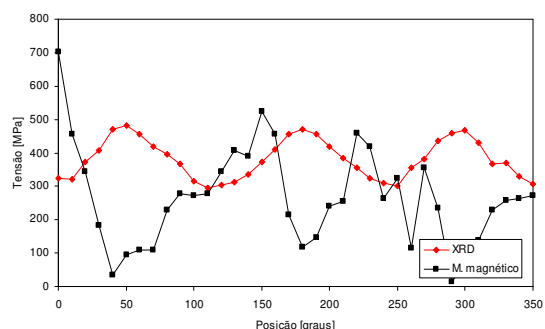
Anel SPK 909



(RLM)

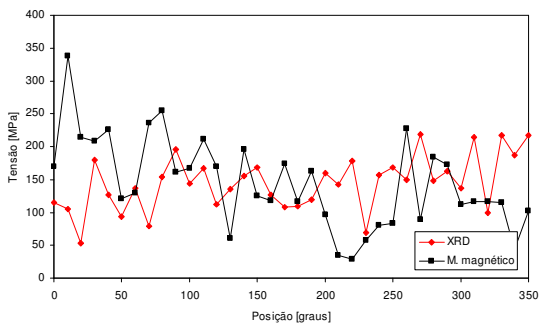


(RLS -M_{max})

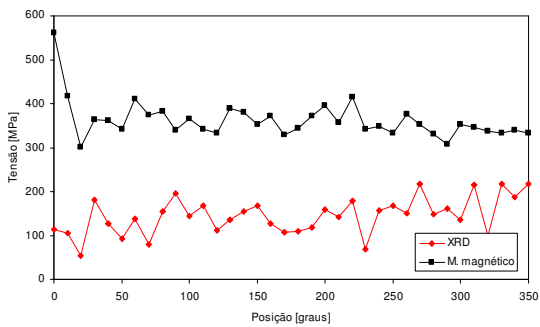


(RLS -H_{cm})

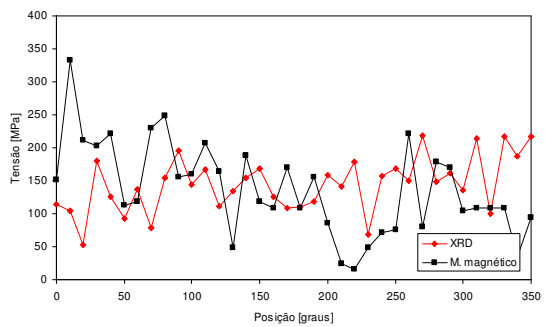
Anel SPK 929



(RLM)

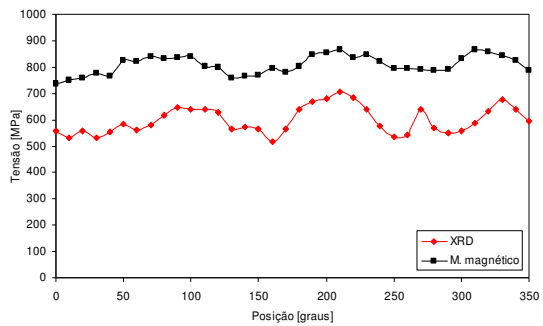


(RLS -M_{max})

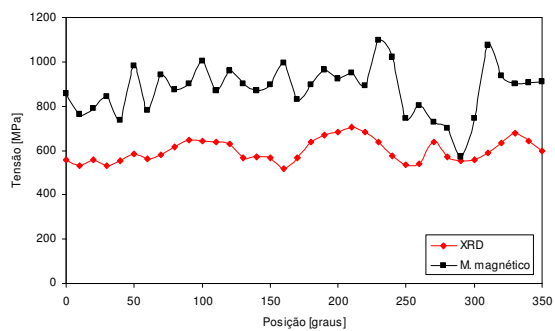


(RLS -H_{cm})

A.1.9. Procedimento 9

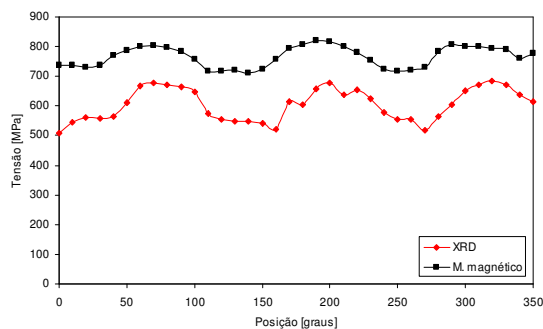


(M_{max})

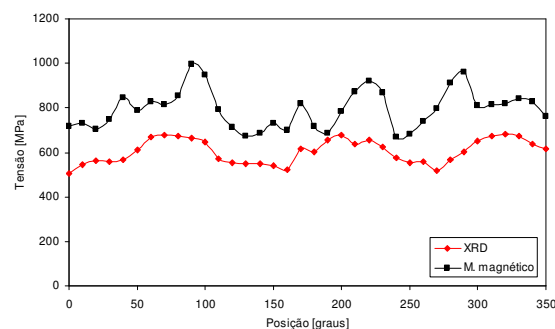


(H_{cm})

OVAKO 82

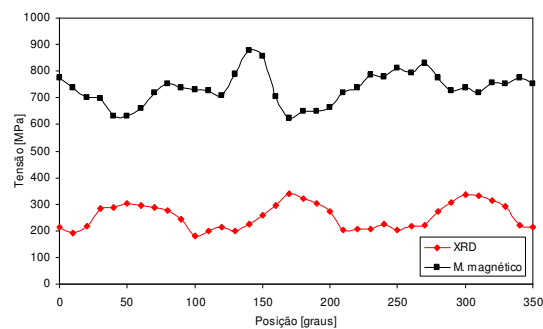


(M_{max})

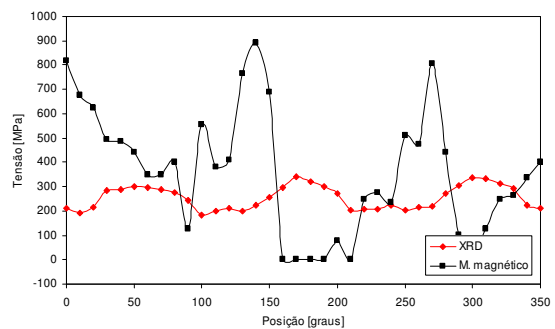


(H_{cm})

OVAKO 93

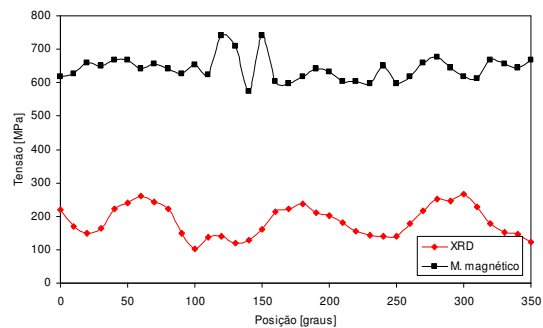


(M_{max})

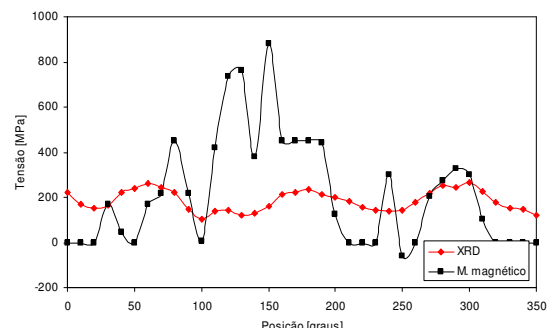


(H_{cm})

OVAKO 734

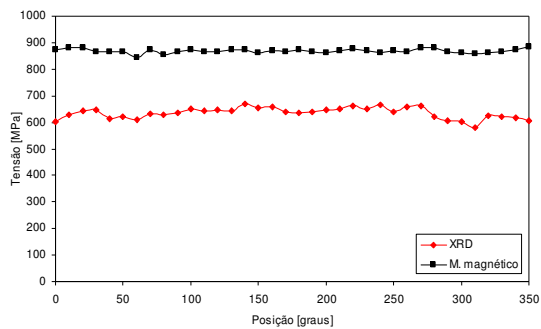


(M_{max})

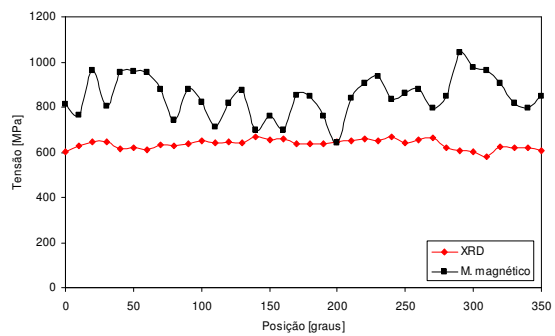


(H_{cm})

OVAKO 791

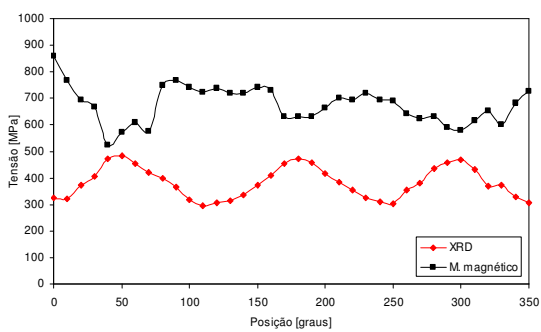


(M_{max})

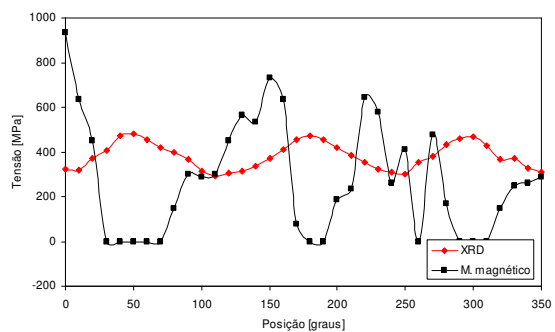


(H_{cm})

OVAKO 882

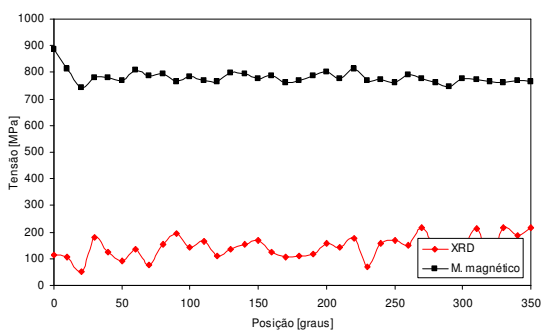


(M_{max})

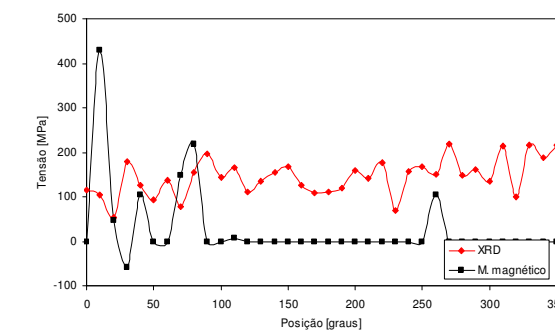


(H_{cm})

OVAKO 909



(M_{max})



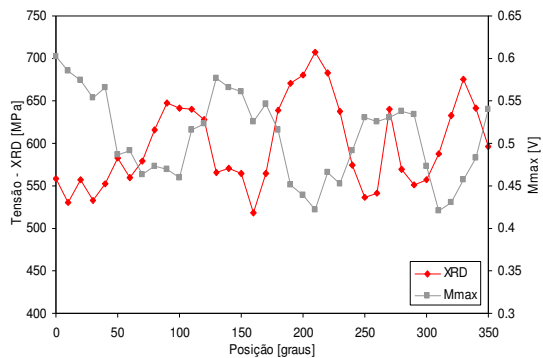
(H_{cm})

OVAKO 929

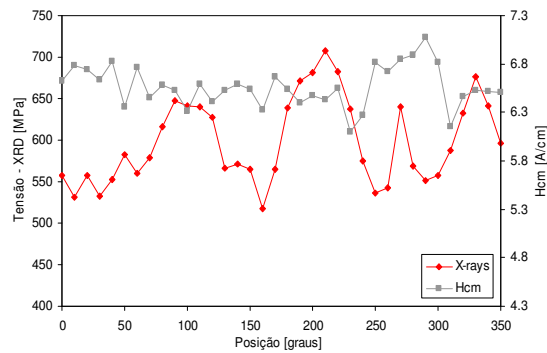
A.2. Aquisições dos parâmetros magnéticos

A seguir são apresentadas as curvas de H_{cm} e M_{max} medidas para cada um dos anéis.

A.2.1. Anel OVAKO 82

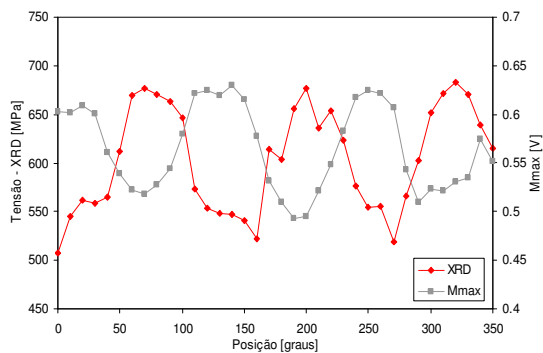


M_{max}

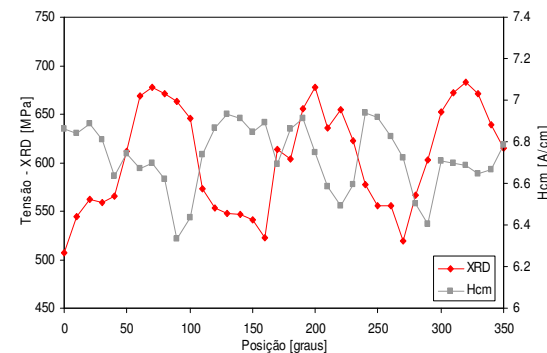


H_{cm}

A.2.2. Anel OVAKO 93

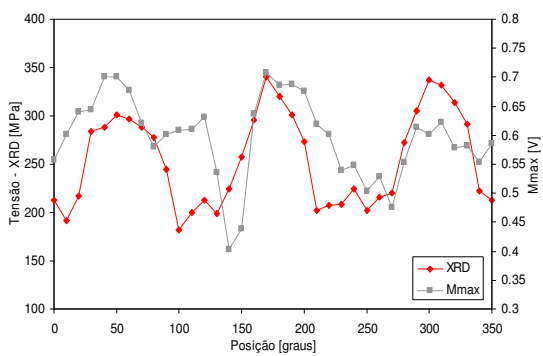


M_{max}

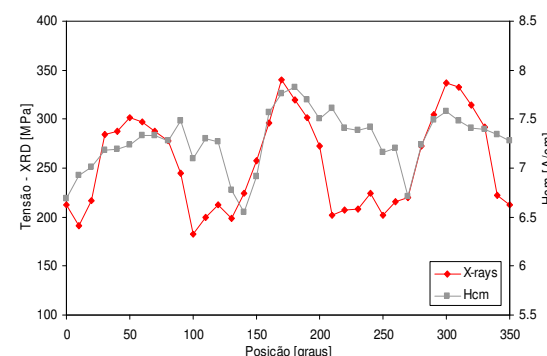


H_{cm}

A.2.3. Anel SPK 734

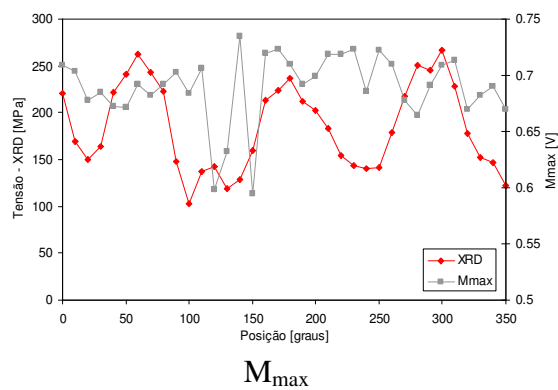
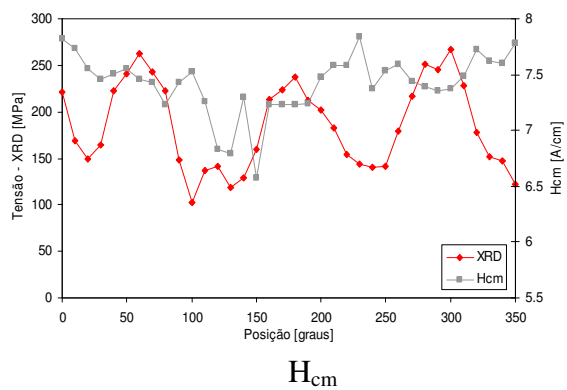


M_{max}

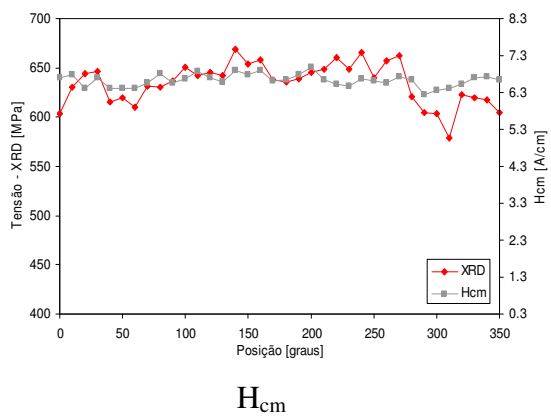
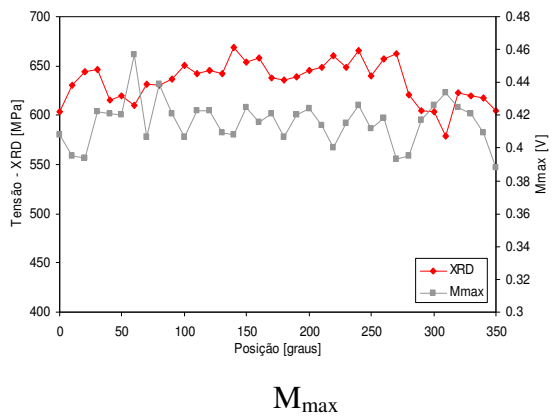


H_{cm}

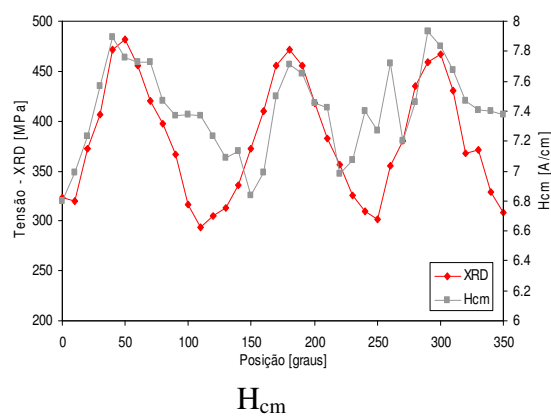
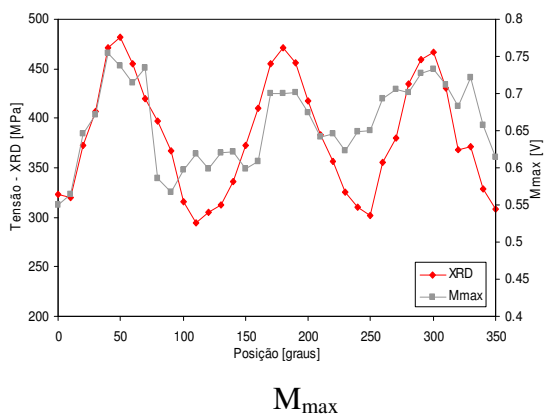
A.2.4. Anel SPK 791



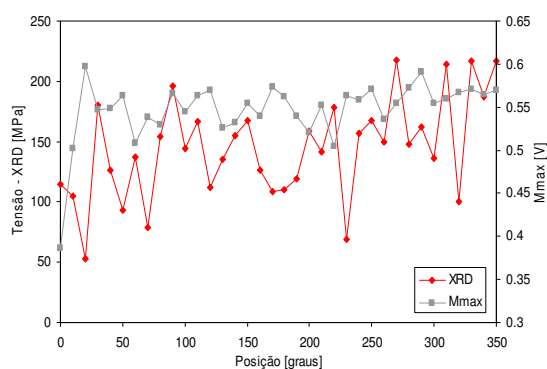
A.2.5. Anel SPK 882



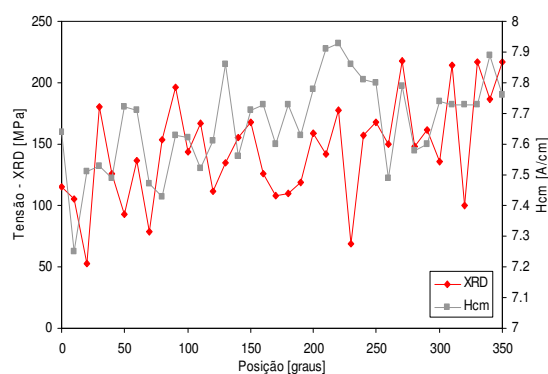
A.2.6. Anel SPK 909



A.2.7. Anel SPK 929



M_{\max}



H_{cm}

A.3. Funções de calibração

Nos itens seguintes encontra-se a relação das funções de calibração obtidas para cada anel.

A.3.1. Anel OVAKO 82

Na tabela Tabela 0.1 encontram-se as funções de calibração obtidas para o anel OVAKO 82 em todos os procedimentos de calibração estudados.

Tabela 0.1 Funções de calibração para o anel OVAKO 82.

Proced.	Tipo de regressão	Referência	Função de calibração	R^2
P1	RLM	Ensaio T/C	$TR = -105,1 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{\max} + 1130,5$	1,00
P2	RLM	Todos pts.	$TR = -7,3 \cdot H_{cm} - 706,8 \cdot M_{\max} + 1003,5$	0,46
P3	RLM	5 pts aleat.	$TR = -299,7 \cdot H_{cm} - 279,4 \cdot M_{\max} + 2700,7$	0,96
P4	RLM	5 pts adj	$TR = -193,8 \cdot H_{cm} - 620,3 \cdot M_{\max} + 2207,3$	0,93
P5	RLS	Todos pts.	$TR = -691,6 \cdot M_{\max} + 948,6$	0,46
			$TR = -96,7 \cdot H_{cm} + 1233,3$	0,16
P6	RLS	5 pts adj	$TR = -1274,2 \cdot M_{\max} - 1225,5$	0,88
			$TR = -34,4 \cdot H_{cm} + 842,7$	0,0035
P7	RLS	5 pts aleat.	$TR = -792,3 \cdot M_{\max} + 990,6$	0,38
			$TR = -290,58 \cdot H_{cm} + 2510,1$	0,89
P8	-	-	-	-
P9	RQ	Todos anéis	$M_{\max} = -2 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \cdot TR + 0,36$	0,7
			$H_{cm} = -1 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 2 \times 10^{-6} \cdot TR + 7,52$	0,46

A.3.2. Anel OVAKO 93

Na tabela Tabela 0.2 encontram-se as funções de calibração obtidas para o anel OVAKO 93 em todos os procedimentos de calibração estudados.

Tabela 0.2 Funções de calibração para o anel OVAKO 93.

Proced.	Tipo de regressão	Referência	Função de calibração	R ²
P1	RLM	Ensaio T/C	$TR = -105,1 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{max} + 1130,5$	1,00
P2	RLM	Todos pts.	$TR = -63,84 \cdot H_{cm} - 825,5 \cdot M_{max} + 1500,9$	0,64
P3	RLM	5 pts aleat.	$TR = -170,92 \cdot H_{cm} - 789,4 \cdot M_{max} + 2213,8$	0,63
P4	RLM	5 pts adj	$TR = 330,84 \cdot H_{cm} - 1705,4 \cdot M_{max} - 651,6$	0,84
P5	RLS	Todos pts.	$TR = -965,27 \cdot M_{max} + 1148,9$	0,61
			$TR = -179,56 \cdot H_{cm} + 1811,3$	0,27
P6	RLS	5 pts adj	$TR = -1266,7 \cdot M_{max} + 1292$	0,54
			$TR = 63,6 \cdot H_{cm} + 184,3$	0,018
P7	RLS	5 pts aleat.	$TR = -1053,1 \cdot M_{max} + 1202,4$	0,26
			$TR = -189,24 \cdot H_{cm} + 1870$	0,35
P8	-	-	-	-
P9	RQ	Todos anéis	$M_{max} = -2 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \cdot TR + 0,36$	0,7
			$H_{cm} = -1 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 2 \times 10^{-6} \cdot TR + 7,52$	0,46

A.3.3. Anel SPK 734

Na tabela Tabela 0.3 encontram-se as funções de calibração obtidas para o anel SPK 734 em todos os procedimentos de calibração estudados.

Tabela 0.3 Funções de calibração para o anel SPK 734.

Proced.	Tipo de regressão	Referência	Função de calibração	R ²
P1	RLM	Ensaio T/C	$TR = -105,1 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{max} + 1130,5$	1,00
P2	RLM	Todos pts.	$TR = 67,8 \cdot H_{cm} + 145,2 \cdot M_{max} - 325,93$	0,34
P3	RLM	5 pts aleat.	$TR = 163,4 \cdot H_{cm} + 40,7 \cdot M_{max} - 963,7$	0,46
P4	RLM	5 pts adj	$TR = -10,1 \cdot H_{cm} + 657,5 \cdot M_{max} - 96,4$	0,76
P5	RLS	Todos pts.	$TR = 328,6 \cdot M_{max} + 58,9$	0,23
			$TR = 90,386 \cdot H_{cm} - 403,1$	0,31
P6	RLS	5 pts adj	$TR = 210,48 \cdot H_{cm} - 1345$	0,37
			$TR = 640,9 \cdot M_{max} - 162,5$	0,7
P7	RLS	5 pts aleat.	$TR = 338,38 \cdot M_{max} + 58,06$	0,21
			$TR = 172,33 \cdot H_{cm} - 1004$	0,45
P8	RLM / RLS	5 anéis SPK	$TR = -454,5 \cdot H_{cm} - 70,2 \cdot M_{max} + 3669,03$	0,85
			$TR = -1237 \cdot M_{max} + 1039,2$	0,45
			$TR = -468,1 \cdot H_{cm} + 3727,7$	0,85
P9	RQ	Todos anéis	$M_{max} = -2 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \cdot TR + 0,36$	0,7
			$H_{cm} = -1 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 2 \times 10^{-6} \cdot TR + 7,52$	0,46

A.3.4. Anel SPK 791

Na tabela Tabela 0.4 encontram-se as funções de calibração obtidas para o anel SPK 791 em todos os procedimentos de calibração estudados.

Tabela 0.4 Funções de calibração para o anel SPK 791.

Proced.	Tipo de regressão	Referência	Função de calibração	R ²
P1	RLM	Ensaio T/C	$TR = -105,1 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{max} + 1130,5$	1,00
P2	RLM	Todos pts.	$TR = -17,9 \cdot H_{cm} + 875,1 \cdot M_{max} + 99,1$	0,03
P3	RLM	5 pts aleat.	$TR = -36,9 \cdot H_{cm} + 875,1 \cdot M_{max} - 121,6$	0,44
P4	RLM	5 pts adj	$TR = -278,2 \cdot H_{cm} - 1769,2 \cdot M_{max} + 3480,6$	0,2
P5	RLS	Todos pts.	$TR = 228,6 \cdot M_{max} + 27,5$ $TR = 3 \cdot H_{cm} + 163$	0,023 0,0003
P6	RLS	5 pts adj	$TR = -928,05 \cdot M_{max} + 836,71$ $TR = -247,4 \cdot H_{cm} + 2030$	0,013 0,16
P7	RLS	5 pts aleat.	$TR = 651,13 \cdot M_{max} - 243,2$ $TR = 47,1 \cdot H_{cm} - 152,5$	0,4 0,13
P8	RLM / RLS	5 anéis SPK	$TR = -454,5 \cdot H_{cm} - 70,2 \cdot M_{max} + 3669,03$ $TR = -1237 \cdot M_{max} + 1039,2$ $TR = -468,1 \cdot H_{cm} + 3727,7$	0,85 0,45 0,85
P9	RQ	Todos anéis	$M_{max} = -2x10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \cdot TR + 0,36$ $H_{cm} = -1x10^{-6} \cdot TR^2 + 2x10^{-6} \cdot TR + 7,52$	0,7 0,46

A.3.5. Anel SPK 882

Na Tabela 0.5 encontram-se as funções de calibração obtidas para o anel SPK 882 em todos os procedimentos de calibração estudados.

Tabela 0.5 Funções de calibração para o anel SPK 882.

Proced.	Tipo de regressão	Referência	Função de calibração	R ²
P1	RLM	Ensaio T/C	$TR = -105,1 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{max} + 1130,5$	1,00
P2	RLM	Todos pts.	$TR = 59,3 \cdot H_{cm} - 250,3 \cdot M_{max} + 345,3$	0,28
P3	RLM	5 pts aleat.	$TR = 2,7 \cdot H_{cm} - 937,2 \cdot M_{max} + 1018,3$	0,69
P4	RLM	5 pts adj	$TR = 30,6 \cdot H_{cm} - 1218,9 \cdot M_{max} + 919,7$	0,79
P5	RLS	Todos pts.	$TR = -322,2 \cdot M_{max} + 768,5$	0,045
			$TR = 61,3 \cdot H_{cm} + 227,9$	0,249
P6	RLS	5 pts adj	$TR = -1486,7 \cdot M_{max} + 1228,4$	0,77
			$TR = 117,5 \cdot H_{cm} - 146,01$	0,59
P7	RLS	5 pts aleat.	$TR = -954,8 \cdot M_{max} + 1044,1$	0,7
			$TR = 76,9 \cdot H_{cm} + 126,8$	0,36
P8	RLM / RLS	5 anéis SPK	$TR = -454,5 \cdot H_{cm} - 70,2 \cdot M_{max} + 3669,03$	0,85
			$TR = -1237 \cdot M_{max} + 1039,2$	0,45
			$TR = -468,1 \cdot H_{cm} + 3727,7$	0,85
P9	RQ	Todos anéis	$M_{max} = -2 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \cdot TR + 0,36$	0,7
			$H_{cm} = -1 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 2 \times 10^{-6} \cdot TR + 7,52$	0,46

A.3.6. Anel SPK 909

Na Tabela 0.6 encontram-se as funções de calibração obtidas para o anel SPK 909 em todos os procedimentos de calibração estudados.

Tabela 0.6 Funções de calibração para o anel SPK 909.

Proced.	Tipo de regressão	Referência	Função de calibração	R ²
P1	RLM	Ensaio T/C	$TR = -105,1 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{max} + 1130,5$	1,00
P2	RLM	Todos pts.	$TR = 56,1 \cdot H_{cm} + 388,5 \cdot M_{max} - 287,8$	0,49
P3	RLM	5 pts aleat.	$TR = -90,2 \cdot H_{cm} + 1584,1 \cdot M_{max} - 4,27$	0,69
P4	RLM	5 pts adj	$TR = 108,6 \cdot H_{cm} + 204,4 \cdot M_{max} - 552,55$	0,96
P5	RLS	Todos pts.	$TR = 614,8 \cdot M_{max} - 21,5$	0,45
			$TR = 121,4 \cdot H_{cm} - 515,8$	0,43
P6	RLS	5 pts adj	$TR = 720,3 \cdot M_{max} - 87,8$	0,93
			$TR = 149,5 \cdot H_{cm} - 721,1$	0,95
P7	RLS	5 pts aleat.	$TR = 1192,7 \cdot M_{max} - 421,1$	0,68
			$TR = 230,6 \cdot H_{cm} - 1355,7$	0,54
P8	RLM / RLS	5 anéis SPK	$TR = -454,5 \cdot H_{cm} - 70,2 \cdot M_{max} + 3669,03$	0,85
			$TR = -1237 \cdot M_{max} + 1039,2$	0,45
			$TR = -468,1 \cdot H_{cm} + 3727,7$	0,85
P9	RQ	Todos anéis	$M_{max} = -2 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \cdot TR + 0,36$	0,7
			$H_{cm} = -1 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 2 \times 10^{-6} \cdot TR + 7,52$	0,46

A.3.7. Anel SPK 929

Na Tabela 0.7 encontram-se as funções de calibração obtidas para o anel SPK 929 em todos os procedimentos de calibração estudados.

Tabela 0.7 Funções de calibração para o anel SPK 929.

Proced.	Tipo de regressão	Referência	Função de calibração	R ²
P1	RLM	Ensaio T/C	$TR = -105,1 \cdot H_{cm} + 84,5 \cdot M_{max} + 1130,5$	1,00
P2	RLM	Todos pts.	$TR = 75,3 \cdot H_{cm} + 76,4 \cdot M_{max} - 475,2$	0,08
P3	RLM	5 pts aleat.	$TR = -130,5 \cdot H_{cm} - 588 \cdot M_{max} + 1440,4$	0,95
P4	RLM	5 pts adj	$TR = 93,3 \cdot H_{cm} - 649,5 \cdot M_{max} - 238,1$	0,94
P5	RLS	Todos pts.	$TR = 104,1 \cdot M_{max} + 87,6$	0,008
			$TR = 76,9 \cdot H_{cm} - 445,2$	0,08
P6	RLS	5 pts adj	$TR = -992,5 \cdot M_{max} + 673,9$	0,79
			$TR = 163,6 \cdot H_{cm} - 1138,2$	0,73
P7	RLS	5 pts aleat.	$TR = -588,8 \cdot M_{max} + 444,1$	0,56
			$TR = -130,8 \cdot H_{cm} + 1122,4$	0,39
P8	RLM / RLS	5 anéis SPK	$TR = -454,5 \cdot H_{cm} - 70,2 \cdot M_{max} + 3669,03$	0,85
			$TR = -1237 \cdot M_{max} + 1039,2$	0,45
			$TR = -468,1 \cdot H_{cm} + 3727,7$	0,85
P9	RQ	Todos anéis	$M_{max} = -2 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 1,8 \cdot TR + 0,36$	0,7
			$H_{cm} = -1 \times 10^{-6} \cdot TR^2 + 2 \times 10^{-6} \cdot TR + 7,52$	0,46

A.4. Configurações do equipamento magnético

O equipamento magnético utilizado neste trabalho foi o Tiede Ferrotest-DUR, produzido pela empresa alemã Tiede Rissprüfanlagen. O equipamento é produzido sob licença pertencente à série de equipamentos do tipo 3MA – Multi-Micro-Magnetic Analysis. Utiliza um sensor especialmente desenvolvido pela própria empresa Tiede para a medição dos anéis deste trabalho.

Para medição do ruído Barkhausen e do campo coercivo, utiliza-se o módulo M (HF) do equipamento que permite medições de altas frequências (até 10MHz). O ruído Barkhausen captado pela bobina do sensor é amplificado e, através de um filtro passa baixa, é suavizado.

A seguir encontra-se a descrição dos parâmetros passíveis de configuração do equipamento. Entre parênteses estão os valores ou faixa de valores permitidos pelo equipamento e entre colchetes o valor utilizado para cada parâmetro nas medições realizadas.

- f_E [Hz] : frequência de excitação do campo (1 – 159) [100]
- H_{max} [A/cm] : amplitude do campo de magnetização (0 – 100) [20]
- Bandpass [MHz] : filtro passa faixa (0,4 ; 2,5; 10) [10]
- Hochpass [kHz] : filtro passa alta (0,1 – 160) [1]
- Tiefpass [kHz] : filtro passa baixa (0,1 – 160) [5]
- Verst_G1 [kHz] : retificador do ganho (-6, 0, +6) [6]
- M_gain [dB] : ganho no sinal (0, 10, 20, 30) [30]
- TP Gleichr [kHz] : retificador do passa alta (0,1 – 160) [2]

É o filtro passa faixa que determina a profundidade de medição do método magnético, sendo que quanto maior a frequência mais próxima é a medida da superfície. Para as medições realizadas, foi utilizado um filtro passa-faixa de 10 MHz, o qual permite medir numa profundidade de aproximadamente 10 μm da superfície^[12].