



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DE TENSÕES EM MATERIAIS ESTRUTURAIS
PELO ENSAIO MAGNETOELÁSTICO**

SILVÉRIO FERREIRA DA SILVA JÚNIOR

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores.**

**Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo
2005**



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DETERMINAÇÃO DE TENSÕES EM MATERIAIS ESTRUTURAIS PELO
ENSAIO MAGNETOELÁSTICO**

Silvério Ferreira da Silva Júnior



**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear-Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

São Paulo

2005

Aos meus pais, Silvério e Neuza.

A minha querida esposa Selma.

Aos meus filhos, Gustavo e Guilherme.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Miguel Mattar Neto, pela orientação, paciência e pelo apoio durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Mário de Andrade Pinto, pela amizade e pelas contribuições dadas a este trabalho, principalmente no tratamento dos resultados dos experimentos realizados.

Ao Prof. Dr. Júlio Ricardo Barreto Cruz (CNEN) e Prof. Dr. José Domingos Ardisson (CDTN), pelas sugestões e apoio técnico.

Ao CDTN, por viabilizar a realização deste trabalho.

Ao Antônio Eugênio de Aguiar, Edilson Macena Pereira, Geraldo de Paula Martins, João Bosco de Paula, Luiz Cláudio Meira Belo, Nirlando Antônio Rocha, Ricardo Alberto Neto Ferreira, Roberto Francisco Di Lorenzo, Vlamir Caio e Wagner Reis da Costa Campos, pelo espírito de cooperação.

Um agradecimento especial aos técnicos Geraldo Antônio Scoralick Martins e José Marcos Messias, do Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos, pela colaboração na realização dos experimentos.

Aos meus companheiros do Serviço de Integridade Estrutural.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

DETERMINAÇÃO DE TENSÕES EM MATERIAIS ESTRUTURAIS PELO ENSAIO MAGNETOELÁSTICO

Silvério Ferreira da Silva Júnior

RESUMO

É apresentado neste trabalho um estudo sobre a utilização do ensaio magnetoelástico, um método eletromagnético de ensaio não destrutivo baseado na análise do ruído magnético Barkhausen, para a determinação de tensões mecânicas em materiais ferromagnéticos estruturais. Como este método de ensaio ainda não é um método padronizado, estando em fase de desenvolvimento, os estudos foram realizados em três diferentes materiais ferromagnéticos, utilizados como materiais estruturais em instalações industriais e na fabricação de componentes mecânicos, de forma a possibilitar uma melhor compreensão das variáveis envolvidas. A primeira etapa do trabalho consistiu na caracterização dos materiais selecionados para os estudos, na definição de corpos de prova e padrões de referência a serem utilizados nos experimentos e no desenvolvimento de sistemas de aplicação de carga e de posicionamento da sonda utilizada durante os ensaios. A segunda etapa consistiu na determinação dos parâmetros de ensaio mais adequados, na avaliação das variáveis que influenciam os resultados do ensaio e no desenvolvimento do processo para a calibração do sistema de ensaio. A terceira etapa envolveu a determinação das tensões atuantes em corpos de prova simulando estruturas, a comparação com os resultados obtidos através da extensometria convencional e, finalmente, a definição de uma metodologia básica a ser utilizada para o prosseguimento dos estudos sobre a determinação de tensões mecânicas utilizando o ensaio magnetoelástico. Apesar do grande número de artigos disponíveis, as informações relevantes sobre a utilização deste método de ensaio para a determinação de tensões mecânicas, como infra-estrutura, técnicas e tratamento dos dados, são muito restritas, o que fez com que o desenvolvimento deste trabalho apresentasse um desafio constante. Os dispositivos mecânicos desenvolvidos para a realização dos experimentos foram eficientes, possibilitando a produção de resultados consistentes. As avaliações realizadas para verificar a dependência direcional do ensaio

indicaram a possibilidade de aplicação deste método de ensaio para a avaliação das características de anisotropia do material devido às condições de processamento mecânico. Os resultados obtidos para estruturas submetidas a carregamentos normais, validados através do uso da extensometria convencional, indicaram a aplicabilidade deste ensaio para este tipo de avaliação.

STRESS DETERMINATION IN STRUCTURAL MATERIALS USING THE MAGNETOELASTIC TESTING

Silvério Ferreira da Silva Júnior

ABSTRACT

A study about the use of the magnetoelastic testing, an electromagnetic nondestructive testing method based on the Barkhausen noise analysis, for mechanical stresses evaluation in ferromagnetic materials is presented. The experiments were performed in three different ferromagnetic materials, in order to increase the knowledge about the test variables. These materials are used as structural materials in industrial facilities and mechanical components manufacturing. This study was performed in three stages. The first one was the characterization of the materials studied, sample test and reference standards definition and the development of the probe holders and loading devices used during the experiments. The second one was the test parameters determination, evaluation of the variables affecting the test results and test system calibration. The third one was the determination of the stresses acting in test samples simulating real structures, test results validation and the definition of a basic methodology to be used for stresses evaluation studies using the magnetoelastic testing method. In spite of the number of papers about the use of this test method, the relevant information available about its use for mechanical stresses evaluation, such as the infrastructure, technical procedures and data processing are very restricted. This fact was the development of this study a constant challenge. The mechanical devices developed for the planned experiments were efficient, allowing the production of consistent results. The measurements performed to verify the directional dependence of this test method indicated the possibility of its use for evaluation of the materials anisotropy characteristics induced by mechanical processing. The results obtained for the stresses determination in structures submitted to a normal load conditions, validated using the conventional stain gage technology, indicate the applicability of this test method for this type of evaluation.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE FIGURAS

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Definição do Tema	31
1.2	Justificativa	34
1.3	Objetivo, Originalidade e Aspectos Relevantes da Pesquisa	34
1.4	Organização do Trabalho	36
2	FUNDAMENTOS DO ENSAIO MAGNETOELÁSTICO	37
2.1	Definições Básicas	37
2.1.1	Pólo Magnético Unitário	37
2.1.2	Intensidade do Campo Magnético	37
2.1.3	Magnetização M	37
2.1.4	Suscetibilidade Magnética	38
2.1.5	Fluxo Magnético	38
2.1.6	Indução Magnética ou Densidade de Fluxo Magnético	38
2.1.7	Lei de Indução de Faraday	39
2.1.8	Permeabilidade Magnética	39
2.1.9	Relação entre B, M e H	40
2.1.10	Magnetostricção	40
2.1.11	Ponto de Curie	41
2.1.12	Ganho	41
2.2	Propriedades Magnéticas	41
2.2.1	Diamagnetismo	42
2.2.2	Paramagnetismo	42
2.2.3	Ferromagnetismo	43
2.2.4	Ferrimagnetismo	43

2.3	Dependência da Estrutura	44
2.4	Domínios Magnéticos	45
	2.4.1 Anisotropia Magnética	46
	2.4.2 Paredes de Domínios	48
	2.4.3 Energia Magnetostática	49
2.5	Curva de Magnetização	50
2.6	O Efeito Barkhausen	52
2.7	Efeito das Tensões	55
2.8	Efeito da Microestrutura	57
2.9	Análise do Ruído Magnético Barkhausen	58
2.10	Sistema de Ensaio para a Medição do Ruído Magnético Barkhausen	58
2.11	Medição das Deformações com Extensometria Convencional	62
	2.11.1 Tipos de Extensômetros Convencionais	62
	2.11.2 Seleção	63
	2.11.3 Preparação da Superfície	63
	2.11.4 Medição das Deformações	64
2.12	Determinação de Tensões Residuais pelo Método do Furo Central	67
3	METODOLOGIA	70
3.1	Seleção dos Materiais	71
3.2	Caracterização dos Materiais	72
	3.2.1 Composição Química	72
	3.2.2 Ensaio Mecânicos	72
	3.2.3 Microestrutura	73
	3.2.4 Determinação do Tamanho Médio de Grão	74
3.3	Corpos de Prova	75
	3.3.1 Vigas de Isoflexão	76
	3.3.2 Dispositivo de Carregamento por Flexão	79
	3.3.3 Corpos de Prova para Estudos de Deformação	81
	3.3.4 Corpo de Prova para Carregamentos Biaxiais	82
	3.3.5 Dispositivo de Carregamento Biaxial	83
	3.3.6 Corpos de Prova para Medições de Tensões	83
	3.3.7 Medição de Tensões Residuais	85
3.4	Determinação dos Fatores que Influenciam os Resultados do Ensaio	88

3.4.1	Determinação do Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica	88
3.4.2	Campo Magnético de Excitação	89
3.4.3	Dependência Direcional	90
3.4.4	Influência do Acabamento Superficial	92
3.4.5	Influência do Afastamento da Sonda à Superfície do Material	93
3.5	Instrumentação	95
3.5.1	Ruído Magnético Barkhausen	95
3.5.2	Extensometria	96
3.6	Calibração do Sistema de Ensaio	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
4.1	Composição Química	98
4.2	Ensaio Mecânicos	99
4.3	Microestrutura	100
4.4	Tamanho Médio de Grão	102
4.5	Rugosidade Superficial das Vigas de Isoflexão	103
4.6	Determinação do Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica	104
4.7	Dependência Direcional	120
4.8	Influência do Acabamento Superficial	134
4.9	Influência do Afastamento da Sonda à Superfície do Material	148
4.10	Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais para o Aço ASTM A 36	160
4.11	Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais para o Aço ASTM A 515	171
4.12	Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais para o Aço USI SAC 50	176
4.13	Função para Ajuste dos Dados	179
4.14	Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais nas Regiões Elástica e Plástica	180
4.15	Resultados dos Testes de Carregamento	183
4.16	Resultados dos Ensaio de Tensões Residuais	188
4.17	Aço 20 MnMoNi 5 5	192
4.18	Metodologia Básica para a Determinação de Tensões em Estruturas	193
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	196
5.1	Conclusões	196

5.2	Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros	198
	APÊNDICE A – Certificados de Ensaios Mecânicos	200
	APÊNDICE B – Parâmetros de Preparação de Amostras Metalográficas	204
	APÊNDICE C – Resultados Obtidos para o Tamanho de Grão	206
	APÊNDICE D – Viga de Isoflexão e Corpo de Prova Biaxial	212
	APÊNDICE E – Corpo de Prova para Ensaios de Deformação Elástica/Plástica	214
	APÊNDICE F – Análise da Variância	215
	APÊNDICE G - Funções de Ajuste para os Dados Adquiridos para a Determinação do Valor do Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica	217
	APÊNDICE H – Funções de Ajuste – Valor do Ruído Magnético Barkhausen em Função da Deformação no Material	226
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	235

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
END	Ensaio Não Destrutivo
CCC	Estrutura cúbica de corpo centrado
CFC	Estrutura cúbica de face centrada
RMB	Ruído Magnético Barkhausen

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1	Parâmetro de ajuste para a determinação da deformação sofrida pelo material a partir do valor RMS do RMB
A_2	Parâmetro de ajuste para a determinação da deformação sofrida pelo material a partir do valor RMS do RMB
A	ampère
A_s	Área da seção transversal do elemento sensor de um extensômetro
A_{sb}	Área da seção transversal de uma bobina
B	Densidade de fluxo magnético
B_m	Indução magnética máxima
B_r	Indução residual
dB	decibel
dN	Parâmetro de ajuste para a determinação do nível de excitação da sonda magnetoelástica
$d\epsilon$	Parâmetro de ajuste para a determinação da deformação sofrida pelo material a partir do valor RMS do RMB
e	Base dos logaritmos naturais
E	Módulo de elasticidade de um material
F_{Exc}	Frequência do campo magnético de excitação
F_{an}	Frequência de análise
G	Ganho de um sistema
H	Intensidade do campo magnético
H_c	Força coerciva
H_m	Intensidade máxima do campo magnético
I	Intensidade da corrente que circula por uma bobina
k	Sensibilidade do extensômetro
l	Comprimento de uma bobina
l_0	Comprimento inicial de um material
l_s	Comprimento útil do elemento sensor de um extensômetro
M	Magnetização induzida em um material por um campo magnético H
M_s	Magnetização de saturação de um material

N	newton
N_{Ex}	Nível de excitação da sonda magnetoelástica
N_0	Parâmetro de ajuste para a determinação do nível de excitação da sonda magnetoelástica
N_e	Número de espiras de uma bobina
R	Coefficiente de anisotropia
R_{in}	Resistência elétrica inicial do elemento sensor de um extensômetro
R_1	Parâmetro de ajuste para a determinação do nível de excitação da sonda magnetoelástica
R_2	Parâmetro de ajuste para a determinação do nível de excitação da sonda magnetoelástica
T_c	Temperatura de Curie
t	Tempo
V_e	Tensão elétrica de entrada em um sistema
V_{ind}	Tensão elétrica induzida nos terminais de uma bobina
V_s	Tensão elétrica de saída em um sistema
Δl	Varição no comprimento de um material submetido à influência de um campo magnético ou de carregamento externo
ΔR	Varição da resistência do elemento sensor de um extensômetro com a deformação
δ	Profundidade de penetração do campo magnético
ε	Deformação unitária
ε_0	Parâmetro de ajuste para a determinação da deformação sofrida pelo material a partir do valor RMS do RMB
ε_1	Deformação unitária na direção 1
ε_2	Deformação unitária na direção 2
ε_3	Deformação unitária na direção 3
ε_x	Deformação unitária na direção x
ε_y	Deformação unitária na direção y
φ	Ângulo formado entre a direção de carregamento e a direção de interesse
φ_p	Ângulo que a tensão principal máxima ou mínima forma com o extensômetro 1 de uma roseta de três elementos
Φ	Fluxo magnético
λ	Magnetostricção de um material
λ_s	Magnetostricção de um material na saturação

μ	Permeabilidade magnética de um material
μ_0	Constante de permeabilidade magnética no vácuo
μ'	Permeabilidade magnética diferencial de um material
μd	Micro deformação
μ_{in}	Permeabilidade magnética inicial de um material
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
ν	Coefficiente de Poisson do material
ρ	Resistividade elétrica de um material
σ	Tensão mecânica aplicada a um material
σ_{EI}	Condutividade elétrica de um material
$\sigma_{(\varphi)}$	Valor da tensão mecânica na direção de interesse
σ_{max}	Tensão principal máxima
σ_{min}	Tensão principal mínima
$\sigma_{(max)}$	Valor máximo da tensão mecânica na direção de interesse
σ_x	Tensão mecânica na direção x
σ_y	Tensão mecânica na direção y
χ_m	Suscetibilidade magnética do material

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Curvas de magnetização para cristais de ferro nas direções <100>, <110> e <111>.	47
FIGURA 2.2 – Curvas de magnetização para cristais de níquel nas direções <100>, <110> e <111>.	47
FIGURA 2.3 – Estrutura de uma parede de Bloch de 180°.	49
FIGURA 2.4 – Estrutura de domínios formada em um cristal de ferro a partir da saturação até o estado desmagnetizado.	49
FIGURA 2.5 – Curva de magnetização de um material ferromagnético.	50
FIGURA 2.6 – Comportamento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização.	52
FIGURA 2.7 – Variações na densidade de fluxo no processo de magnetização.	53
FIGURA 2.8 – Ruído magnético Barkhausen característico de uma amostra de aço ASTM A 36.	54
FIGURA 2.9 – Comportamento dos domínios sob diferentes condições de carregamento e campo magnético.	57
FIGURA 2.10 – Sonda magnetoelástica típica.	59
FIGURA 2.11 – Extensômetro unidirecional (a), roseta de dois elementos (b) e roseta de três elementos (c).	63
FIGURA 2.12 – Roseta tipo EA-06-060RE-120 MM utilizada para a medição de tensões residuais.	69
FIGURA 3.1 – Corpos de prova de tração instrumentados com rosetas de dois elementos tipo FCA-1-11-TML (a) e montagem utilizada para os ensaios de tração (b).	73
FIGURA 3.2 – Posição para retirada de amostras para análise metalográfica (ASTM E 3,2001).	74
FIGURA 3.3 – Corte das chapas para retirada de amostras para fabricação de corpos de prova para os aços ASTM A 36, A 515 e USI SAC 50 (a) e 20 MnMoNi55 (b).	76
FIGURA 3.4 – Posição de instalação das rosetas nas vigas de isoflexão.	77
FIGURA 3.5 – Vigas de isoflexão instrumentadas.	78
FIGURA 3.6 – Dispositivo de carregamento para vigas de isoflexão.	79

FIGURA 3.7 – Distribuição de tensões em uma viga de isoflexão sob carregamento. Dependendo da direção de aplicação da carga as tensões na superfície podem ser de tração ou compressão.	80
FIGURA 3.8 – Dispositivo de suporte da sonda magnetoelástica na viga de isoflexão.	81
FIGURA 3.9 – Corpo de Prova para estudos de deformação sob carregamentos de tração.	82
FIGURA 3.10 – Corpo de Prova cruciforme para estudos com carregamentos biaxiais.	82
FIGURA 3.11 – Dispositivo para a aplicação de esforços biaxiais no corpo de prova cruciforme.	83
FIGURA 3.12 – Corpo de Prova soldado simulando uma estrutura para validação do processo de determinação de tensões pelo ensaio magnetoelástico.	84
FIGURA 3.13 – Posição da sonda no corpo de prova para a realização de medições na região de tração (a) e na região de compressão (b) do corpo de prova instrumentado. A posição da sonda e do extensômetro, em cada superfície, está indicada pelo círculo branco.	84
FIGURA 3.14 – Prensa utilizada para os experimentos de carregamento uniaxial e corpo de prova instrumentado utilizado.	85
FIGURA 3.15 – Dispositivo de precisão composto por (microscópio para posicionamento da ferramenta na roseta) (a) e (ferramenta de furação) (b).	85
FIGURA 3.16 – Roseta para ensaio de tensões residuais pelo Método do Furo Central.	89
FIGURA 3.17 – Montagem experimental utilizada para determinar o valor do campo magnético produzido nas extremidades do núcleo ferromagnético da sonda magnetoelástica.	90
FIGURA 3.18 – Montagem experimental para avaliação da dependência direcional do valor RMS do ruído magnético Barkhausen produzido nos materiais estudados.	90
FIGURA 3.19 – Dispositivo de posicionamento da sonda magnetoelástica.	91
FIGURA 3.20 – Posicionamento da sonda magnetoelástica para a medição do ruído magnético Barkhausen (a), direção de lixamento e de medição da rugosidade superficial da amostra (b).	93
FIGURA 3.21 – Sistema de ensaio para as medições das variações nas resistências dos extensômetros durante os experimentos.	96
FIGURA 3.22 – Sistema de ensaio para as medições do ruído magnético Barkhausen e de deformações (a) e sonda magnetoelástica (b).	96
FIGURA 4.1 – Microestrutura do aço ASTM A 36 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (superfície D). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).	100

FIGURA 4.2 – Microestrutura do aço ASTM A 36 na seção transversal do material (superfície F). (b). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).	100
FIGURA 4.3 – Microestrutura do aço ASTM A 515 na seção transversal do material (superfície F). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).	101
FIGURA 4.4 – Microestrutura do aço ASTM A 515 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (superfície D). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).	101
FIGURA 4.5 – Microestrutura do aço USI SAC 50 na seção transversal do material (superfície F). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).	101
FIGURA 4.6 – Microestrutura do aço USI SAC 50 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (superfície D). (b). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).	102
FIGURA 4.7 – Microestrutura do aço 20MnMoNi55 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (a) e da seção transversal do material (superfície F). Aumento 200X.	102
FIGURA 4.8 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	104
FIGURA 4.9 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	104
FIGURA 4.10 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	105
FIGURA 4.11 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	105
FIGURA 4.12 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	105
FIGURA 4.13 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	106
FIGURA 4.14 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	106
FIGURA 4.15 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	106
FIGURA 4.16 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	107

FIGURA 4.31 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	112
FIGURA 4.32 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequências de excitação 10 Hz e 100 Hz e de análise de 500 Hz e 2 kHz.	113
FIGURA 4.33 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequências de excitação 10 Hz e 100 Hz e de análise de 500 Hz e 2 kHz.	113
FIGURA 4.34 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequências de excitação 10 Hz e 100 Hz e de análise de 500 Hz e 2 kHz.	113
FIGURA 4.35 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação 10 Hz frequência de análise de 500 Hz.	118
FIGURA 4.36 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 500 Hz.	121
FIGURA 4.37 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 2 kHz.	121
FIGURA 4.38 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 8 kHz.	121
FIGURA 4.39 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 32 kHz.	122
FIGURA 4.40 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 500 Hz.	122
FIGURA 4.41 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 2 kHz.	122
FIGURA 4.42 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 8 kHz.	123

FIGURA 4.17 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	107
FIGURA 4.18 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	107
FIGURA 4.19 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	108
FIGURA 4.20 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	108
FIGURA 4.21 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	108
FIGURA 4.22 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	109
FIGURA 4.23 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	109
FIGURA 4.24 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	109
FIGURA 4.25 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	110
FIGURA 4.26 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	110
FIGURA 4.27 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	110
FIGURA 4.28 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	111
FIGURA 4.29 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	111
FIGURA 4.30 – Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	111

FIGURA 4.43 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 32 kHz.	123
FIGURA 4.44 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 500 Hz.	123
FIGURA 4.45 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 2 kHz.	124
FIGURA 4.46 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 8 kHz.	124
FIGURA 4.47 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 32 kHz.	124
FIGURA 4.48 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 500 Hz.	125
FIGURA 4.49 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 2 kHz.	125
FIGURA 4.50 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 8 kHz.	125
FIGURA 4.51 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 32 kHz.	126
FIGURA 4.52 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 500 Hz.	126
FIGURA 4.53 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 2 kHz.	126

FIGURA 4.54 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 8 kHz.	127
FIGURA 4.55 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 32 kHz.	127
FIGURA 4.56 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 500 Hz.	127
FIGURA 4.57 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 2 kHz.	128
FIGURA 4.58 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 8 kHz.	128
FIGURA 4.59 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 32 kHz.	128
FIGURA 4.60 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	129
FIGURA 4.61 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	129
FIGURA 4.62 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	130
FIGURA 4.63 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	130

- FIGURA 4.64 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. 131
- FIGURA 4.65 – Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. 131
- FIGURA 4.66 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 500 Hz. 134
- FIGURA 4.67 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 2 kHz. 134
- FIGURA 4.68 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 8 kHz. 135
- FIGURA 4.69 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 32 kHz. 135
- FIGURA 4.70 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 500 Hz. 135
- FIGURA 4.71 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 2 kHz. 136
- FIGURA 4.72 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 8 kHz. 136
- FIGURA 4.73 – Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 32 kHz. 136
- FIGURA 4.74 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. 137
- FIGURA 4.75 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. 137

FIGURA 4.76 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 500 Hz.	138
FIGURA 4.77 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 2 kHz.	138
FIGURA 4.78 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 8 kHz.	138
FIGURA 4.79 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 32 kHz.	139
FIGURA 4.80 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 500 Hz.	139
FIGURA 4.81 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 2 kHz.	139
FIGURA 4.82 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 8 kHz.	140
FIGURA 4.83 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 32 kHz.	140
FIGURA 4.84 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	141
FIGURA 4.85 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	141
FIGURA 4.86 Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 500 Hz.	142
FIGURA 4.87 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 2 kHz.	142
FIGURA 4.88 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 8 kHz.	142

FIGURA 4.89 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 32 kHz.	143
FIGURA 4.90 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 500 Hz.	143
FIGURA 4.91 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 2 kHz.	143
FIGURA 4.92 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 8 kHz.	144
FIGURA 4.93 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 32 kHz.	144
FIGURA 4.94 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	145
FIGURA 4.95 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	145
FIGURA 4.96 - Perfil da superfície obtido por ensaio de rugosidade superficial para o aço ASTM A 36 com o material na condição como recebido e após a última fase de lixamento.	146
FIGURA 4.97 - Perfil da superfície obtido por ensaio de rugosidade superficial para o aço ASTM A 515 com o material na condição como recebido e após a última fase de lixamento.	146
FIGURA 4.98 - Perfil da superfície obtido por ensaio de rugosidade superficial para o aço USI SAC 50 com o material na condição como recebido e após a última fase de lixamento.	147
FIGURA 4.99 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	148
FIGURA 4.100 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	148
FIGURA 4.101 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	149

FIGURA 4.102 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	149
FIGURA 4.103 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	149
FIGURA 4.104 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	150
FIGURA 4.105 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	150
FIGURA 4.106 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	150
FIGURA 4.107 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 36. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz.	151
FIGURA 4.108 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 36. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz.	151
FIGURA 4.109 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	152
FIGURA 4.110 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	152
FIGURA 4.111 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	152
FIGURA 4.112 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	153
FIGURA 4.113 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	153
FIGURA 4.114 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	153

FIGURA 4.115 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	154
FIGURA 4.116 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	154
FIGURA 4.117 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 515. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz.	155
FIGURA 4.118 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 515. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz.	155
FIGURA 4.119 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	156
FIGURA 4.120 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	156
FIGURA 4.121 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	156
FIGURA 4.122 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	157
FIGURA 4.123 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	157
FIGURA 4.124 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	157
FIGURA 4.125 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	158
FIGURA 4.126 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	158
FIGURA 4.127 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço USI SAC 50. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz.	159

FIGURA 4.128 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço USI SAC 50. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz.	159
FIGURA 4.129 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	160
FIGURA 4.130 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	161
FIGURA 4.131 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	161
FIGURA 4.132 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	161
FIGURA 4.133 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	162
FIGURA 4.134 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	162
FIGURA 4.135 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	162
FIGURA 4.136 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	163
FIGURA 4.137 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	163
FIGURA 4.138 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	163

FIGURA 4.139 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	164
FIGURA 4.140 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	164
FIGURA 4.141 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	164
FIGURA 4.142 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	165
FIGURA 4.143 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	165
FIGURA 4.144 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	165
FIGURA 4.145 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa. frequência de excitação de 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	166
FIGURA 4.146 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa. frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	167
FIGURA 4.147 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. frequência de excitação de 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	167
FIGURA 4.148 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	168
FIGURA 4.149 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	169

- FIGURA 4.150 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz. 169
- FIGURA 4.151 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz. 170
- FIGURA 4.152 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz e 8 kHz. 171
- FIGURA 4.153 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz. 171
- FIGURA 4.154 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz. 172
- FIGURA 4.155 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz. 172
- FIGURA 4.156 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz. 172
- FIGURA 4.157 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz. 173
- FIGURA 4.158 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz. 173
- FIGURA 4.159 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz. 173
- FIGURA 4.160 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz. 174

FIGURA 4.161 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	174
FIGURA 4.162 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	175
FIGURA 4.163 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	175
FIGURA 4.164 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	175
FIGURA 4.165 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.	176
FIGURA 4.166 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	176
FIGURA 4.167 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	177
FIGURA 4.168 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	177
FIGURA 4.169 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	177
FIGURA 4.170 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.	178
FIGURA 4.171 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.	178

FIGURA 4.172 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.	178
FIGURA 4.173 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	179
FIGURA 4.174 - Comportamento do ruído magnético Barkhausen emitido pelo material em resposta a carregamentos nas regiões elástica e plástica. Aço ASTM A 36 com frequência de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz, 32 kHz.	180
FIGURA 4.175 - Comportamento do ruído magnético Barkhausen emitido pelo material em resposta a carregamentos aplicados após a deformação plástica sofrida pelo material apresentada na FIG. 4.174. Aço ASTM A 36 com frequência de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2kHz, 8 kHz, 32 kHz.	181
FIGURA 4.176 - Comportamento do ruído magnético Barkhausen emitido pelo material em resposta a carregamentos aplicados após a deformação plástica sofrida pelo material apresentada na FIG. 4.174., para o aço ASTM A 36 com frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.	182
FIGURA 4.177 - Local e posicionamento da sonda e roseta para medições de tensões residuais.	188
FIGURA 4.178 - Resultados obtidos para o valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função do nível de excitação da sonda magnetoelástica para o aço 20 MnMoNi 5 5, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz (a). Curva e parâmetros de ajuste para o conjunto de dados obtidos (b).	192

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Tema

A integridade estrutural de vasos e tubulações de pressão depende de fatores como a presença de descontinuidades estruturais (trincas, poros, inclusões, dentre outros), a presença, o valor, a natureza e a distribuição de tensões residuais, das tensões originadas dos carregamentos de serviço e das propriedades mecânicas da microestrutura dos materiais utilizados em sua fabricação, que se degradam sob as condições de operação do componente.

Os procedimentos para a avaliação de integridade de componentes estruturais exigem o conhecimento prévio das tensões que atuam no componente. A sua distribuição pode ser obtida por meio de métodos numéricos ou através de procedimentos experimentais. Dependendo da complexidade do componente a ser avaliado, a distribuição de tensões obtidas através de métodos numéricos não é, por si só, suficiente para fornecer as informações necessárias para a sua avaliação, devendo ser complementada por medidas experimentais realizadas sob condições controladas.

Uma das razões que justificam a necessidade de medidas experimentais é que, durante as etapas de fabricação, podem ocorrer problemas de montagem que provocarão alterações no padrão de tensões inicialmente previsto para o componente durante o serviço. Por exemplo, pequenos desalinhamentos durante a montagem podem promover o aparecimento de concentradores de tensão, modificando o padrão esperado de distribuição de tensões em determinadas regiões. Outras razões são a possibilidade de ocorrência de sobrecargas ou de carregamentos não previstos (Hoffmann K., 1989) e a presença de tensões residuais (Lu J., 1996). Estas tensões são incorporadas no componente durante praticamente todas as etapas de sua fabricação, como no processo de calandragem das chapas para a obtenção de superfícies curvas, durante as operações de usinagem, de soldagem, dentre outros. Embora seus efeitos não sejam geralmente evidentes até que os componentes ou estruturas sejam submetidos a um carregamento externo ou expostos a um ambiente adverso, elas exercem um papel de fundamental importância na vida útil dos mesmos. Elas se superpõe às tensões de trabalho, resultando em uma mudança da capacidade de carga da estrutura, podendo contribuir para a falha do material por sobrecarga. Podem também atuar em conjunto com um meio agressivo e promover a falha prematura do componente.

As informações obtidas pela realização de medidas experimentais servem para confirmar, corrigir ou refinar o modelo numérico elaborado, bem como para auxiliar na validação de teorias e procedimentos para avaliação da integridade estrutural. As informações relativas ao estado de tensões atuante, em conjunto com a caracterização geométrica dos defeitos ou trincas existentes e as propriedades de resistência mecânica e à fratura do material constituem os dados necessários para uma avaliação da integridade estrutural do componente, cujos resultados fornecerão subsídios para os programas de gerenciamento e de extensão de vida a serem aplicados ao mesmo.

Para a determinação do estado de tensões atuante em um componente ou estrutura de interesse, com a finalidade de se realizar uma avaliação de integridade estrutural, é necessário o conhecimento tanto das tensões oriundas dos carregamentos de serviço quanto das tensões residuais presentes no material. Portanto, o desenvolvimento e a disponibilização de processos, métodos e técnicas de ensaio que possibilitem a determinação do estado real de tensões atuante em componentes estruturais apresenta uma importância considerável, havendo uma gama de ensaios destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos disponíveis para esta finalidade, principalmente para a determinação de tensões residuais, cada um deles apresentando vantagens e limitações quanto a sua utilização (Lu, J., 1996).

O principal método utilizado para a medida experimental de tensões em estruturas tem sido a extensometria (Hoffmann K., 1989). Neste método, extensômetros elétricos resistivos são fixados na superfície da estrutura nas áreas de interesse e, durante testes de carregamento ou durante a operação, as deformações sofridas pelo componente são medidas pelos extensômetros e, através de equações conhecidas da resistência dos materiais, os valores das tensões correspondentes são determinados. Quando, além disso, se deseja conhecer o valor das tensões residuais presentes, utiliza-se o método do furo central, que entretanto apresenta o inconveniente de introduzir um furo na superfície do material. Ambos os métodos exigem uma preparação cuidadosa da superfície do material para a fixação dos extensômetros e rosetas e apresentam limitações quanto à realização de medições em médias e altas temperaturas.

Devido à necessidade de se avaliar os componentes e estruturas no menor tempo possível e, preferencialmente, nas condições de operação, novos métodos de ensaio tem sido investigados como potencialmente adequados para a determinação das tensões atuantes em componentes estruturais, basicamente, métodos de ensaios não destrutivos (END). Estes métodos, durante os últimos anos, foram utilizados principalmente para a

detecção e o dimensionamento de descontinuidades em componentes estruturais, aplicação esta de extrema importância em programas de avaliação da integridade estrutural de componentes. Entretanto, recentemente, a busca pela utilização destes métodos de ensaio para a caracterização de materiais estruturais tem adquirido uma importância cada vez maior, em virtude do potencial de aplicações existente. Assim, uma série de métodos de ensaio para a determinação de características microestruturais e do estado de tensões em materiais de interesse para a engenharia tem sido estudados.

Dentre os métodos disponíveis e em estudo na atualidade, tem havido um grande desenvolvimento nos métodos magnéticos para a caracterização de materiais ferromagnéticos, podendo ser aplicados na avaliação das condições da maior parte dos aços utilizados como materiais estruturais. Dentre eles, destaca-se o método de ensaio magnetoelástico, baseado na análise do ruído magnético Barkhausen (RMB), emitido por um material ferromagnético quando excitado por um campo magnético variável. O ruído se origina da interação que ocorre entre os domínios magnéticos e as heterogeneidades estruturais existentes no interior de um material ferromagnético durante o processo de magnetização. É sensível a alterações microestruturais e ao estado de tensões existente no material, sendo sensível a características do material como o tamanho de grão, a composição química, o teor de precipitados, a densidade de deslocamentos e com o nível das tensões residuais ou aplicadas atuantes no material (Jiles, 1998). Esta dependência faz com que este método de ensaio possa ser utilizado como uma ferramenta para a avaliação não destrutiva do estado de tensões atuante no material bem como para a avaliação de processos como fadiga, fragilização por nêutrons, deformação mecânica e eficiência de processos de endurecimento superficial.

O ruído magnético Barkhausen é afetado por todas as características do material e processos de degradação citados. Assim, é necessária uma boa compreensão do mecanismo de atuação dos mesmos durante o processo de magnetização do material, de forma a possibilitar a avaliação das variáveis de interesse e minimizar o efeito das demais variáveis atuantes, permitindo a obtenção de medidas corretas, confiáveis e reprodutíveis, dentro dos limites possíveis de serem atingidos no processo.

Desta forma, o desenvolvimento deste projeto de pesquisa irá contribuir para uma melhor compreensão deste método de ensaio, tanto na aplicação específica para a medição de tensões como para as demais aplicações possíveis, em virtude dos procedimentos a serem adotados para a eliminação de variáveis indesejáveis.

1.2 Justificativa

A disponibilidade de um método de ensaio não destrutivo (END) para a avaliação de componentes e materiais estruturais que possa ser empregado com um grau adequado de confiabilidade apresenta vantagens para a realização de medidas experimentais de tensões, tanto aquelas devidas à carregamentos de serviço como as tensões residuais introduzidas durante os processos de fabricação e/ou montagem. O ensaio magnetoelástico apresenta vantagens em relação aos demais métodos de END, como a facilidade de utilização em trabalhos de campo, a possibilidade de monitoramento em tempo real, a facilidade para montagem do sistema de inspeção e a possibilidade de ser utilizado para medições em temperaturas acima da ambiente, o que poderia inviabilizar o uso de outros métodos de ensaio.

Uma das principais dificuldades para a utilização de métodos de ensaios não destrutivos, como é o caso do ensaio magnetoelástico, é o desenvolvimento da metodologia a ser utilizada para a realização do ensaio de forma adequada, abrangendo um estudo dos processos e variáveis envolvidos, o desenvolvimento de padrões para a calibração dos sistemas de ensaio, de processos de calibração e de técnicas para a análise e interpretação dos resultados obtidos.

Os produtos obtidos com o desenvolvimento deste trabalho poderão ser utilizados para o desenvolvimento de técnicas para avaliação de componentes em diversos setores industriais bem como aumentar o conhecimento a respeito de outras possíveis aplicações deste método de ensaio, como para a avaliação de características da microestrutura do material.

1.3 Objetivo, Originalidade e Aspectos Relevantes da Pesquisa

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia para a utilização do ensaio magnetoelástico como método experimental para a determinação de tensões em componentes estruturais. São apresentados os procedimentos utilizados para a determinação dos parâmetros de ensaio a serem utilizados para a avaliação de um determinado material, o projeto e o desenvolvimento de corpos de prova e de dispositivos de carregamento para a calibração do sistema de ensaio e de dispositivos e acessórios para avaliação das variáveis que exercem influência nos resultados do ensaio, de forma a possibilitar a redução da influência de variáveis indesejáveis no ensaio e um aumento na relação sinal/ruído obtida.

Atualmente poucos grupos no país se dedicam ao desenvolvimento deste método de ensaio, havendo um número bem restrito de publicações de pesquisadores no país a respeito do assunto, principalmente para a determinação de tensões mecânicas.

Com relação a tensões atuantes em estruturas, onde devem ser consideradas as tensões devidas ao carregamento aplicado e as tensões residuais presentes no material, poucas referências foram encontradas (Posgay, 1983; Lisowyj, 1989; Posgay, 1994; Kuznetsov, 2000), havendo espaço para desenvolvimentos para esta aplicação.

Trabalhos recentes mostram a aplicação do ensaio magnetoelástico para estudos referentes à determinação de tensões residuais em materiais ferromagnéticos em componentes nucleares (Rodriguez, 1997; Posgay, 1999), componentes estruturais (Dobmann, 1997) e para a determinação do nível de tensões atuante em pontes metálicas durante testes de carregamento.

O trabalho desenvolvido apresenta contribuições importantes, como o desenvolvimento de um sistema mecânico de baixo custo, constituído por um dispositivo de carregamento acionado por parafusos/conjunto de peso morto, que possibilita a calibração do sistema de ensaio de forma simples e eficiente. O sistema apresenta como vantagens um tamanho reduzido, permitir a obtenção de tensões elevadas nos materiais testados com cargas relativamente baixas e uma precisão elevada, devido às características de seu projeto, com a utilização de vigas de isoflexão e o uso de extensômetros elétricos resistivos para as medições de deformações. Não foi encontrado sistema semelhante para esta finalidade na literatura disponível e nos trabalhos consultados. Os trabalhos mencionando a calibração do sistema de ensaio sob condições de carregamento uniaxial citam apenas a utilização de vigas engastadas, que são causa da introdução de erros nos resultados do ensaio.

Uma outra contribuição importante é representada pela análise das variáveis que exercem influência no sistema de ensaio. Dependendo da metodologia aplicada, os resultados do ensaio magnetoelástico para a avaliação de tensões podem apresentar uma dispersão elevada ou uma baixa sensibilidade. A dispersão elevada se origina principalmente devido a fatores como o estado da superfície dos materiais avaliados e a geometria do ensaio. Neste aspecto, os dispositivos de posicionamento desenvolvidos e as técnicas de ensaio utilizadas possibilitaram a avaliação da influência de variáveis como a rugosidade superficial, a dependência direcional e a geometria de teste nos resultados do ensaio. Uma baixa sensibilidade do sistema de ensaio está associada a parâmetros de teste como a frequência de excitação utilizada, os filtros de análise utilizados e o nível de

excitação da sonda magnetoelástica e, conseqüentemente, do campo magnético aplicado ao material para a realização do ensaio. Os estudos realizados possibilitaram uma melhor compreensão da influência destes parâmetros na sensibilidade do sistema de ensaio.

A infra-estrutura de laboratório montada e as metodologias utilizadas para a avaliação de tensões utilizando-se o ensaio magnetoelástico foram totalmente desenvolvidas no âmbito deste trabalho, representando uma contribuição para o desenvolvimento de novos trabalhos de pesquisa e de desenvolvimento nesta área.

1.4 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 apresentam-se os fundamentos do ensaio magnetoelástico, abrangendo aspectos teóricos, equipamentos de teste utilizados para a detecção do ruído magnético Barkhausen, para a medição de deformações utilizando-se a extensometria convencional e para a medição de deformações utilizando-se o Método do Furo Central.

No Capítulo 3, descreve-se a metodologia experimental utilizada para o desenvolvimento dos trabalhos, abrangendo a seleção e a caracterização dos materiais estudados, os métodos empregados no desenvolvimento dos padrões de calibração, corpos de prova e dispositivos de carregamento e de posicionamento da sonda magnetoelástica e os procedimentos utilizados para a medição de tensões de carregamento e residuais. A seguir são apresentados os métodos utilizados para a avaliação das variáveis que exercem influência no ensaio magnetoelástico e descrita a instrumentação utilizada para a medição do ruído magnético Barkhausen e para a extensometria convencional.

Os resultados obtidos e as discussões referentes aos mesmos são apresentados no Capítulo 4. A influência das variáveis como o acabamento superficial, a dependência direcional e a geometria de teste é demonstrada. São apresentados os resultados referentes à resposta do sistema de ensaio a carregamentos uniaxiais utilizando-se o sistema de carregamento por viga de isoflexão desenvolvido para os materiais examinados. A metodologia para a determinação de tensões devidas a carregamentos normais é demonstrada em um corpo de prova de aço ASTM A 36. São apresentados os resultados referentes ao ensaio de tensões residuais dos materiais testados.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas a partir da realização deste trabalho e as recomendações para a realização de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS DO ENSAIO MAGNETOELÁSTICO

Este texto foi elaborado com o objetivo de proporcionar uma visão geral dos princípios e das possibilidades de aplicação do ensaio magnetoelástico para a avaliação de tensões mecânicas em materiais ferromagnéticos estruturais e não tem a pretensão de ser um apanhado completo de tudo o que já se fez até o presente sobre este método de ensaio.

2.1 Definições Básicas

2.1.1 Pólo Magnético Unitário p

As forças de atração e repulsão entre corpos magnéticos atuam de forma similar às produzidas por cargas elétricas, sendo que pólos magnéticos similares se repelem mutuamente e pólos magnéticos diferentes se atraem. O pólo magnético unitário é aquele pólo que, quando colocado a um metro de distância de um pólo de mesma natureza no vácuo, é repelido por uma força de $1/4\pi\mu_0$ (N), sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, definida no item 2.1.8.

2.1.2 Intensidade do Campo Magnético H

A intensidade do campo magnético H , em um ponto do espaço, é uma grandeza vetorial medida pela magnitude e direção da força atuante sobre um pólo unitário colocado naquele ponto. A unidade (SI) utilizada para expressar a intensidade do campo magnético é o ampère-espira/metro ou simplesmente o ampère/metro (A/m), que representa o campo magnético produzido no interior de uma bobina com geometria cilíndrica, com um número de espiras N_e e um comprimento l (m), pela qual circula uma corrente de intensidade I (A), ou seja,

$$H = \frac{N_e I}{l} \quad (2.1)$$

2.1.3 Magnetização M

Quando um material magnético é submetido à influência de um campo magnético H os momentos magnéticos em seu interior tendem a se alinhar na direção do campo aplicado, reforçando o mesmo devido à contribuição de seus próprios campos magnéticos. O valor desta magnetização induzida é medido pela magnetização M , uma grandeza

vetorial. A unidade (SI) utilizada para expressar a magnetização M é o ampère/metro (A/m).

2.1.4 Suscetibilidade Magnética

A magnetização M é proporcional à intensidade do campo magnético H aplicado. A relação entre M e H é definida por:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (2.2)$$

sendo χ_m a suscetibilidade magnética do material. Dependendo do tipo de material, a magnetização M e a densidade de fluxo B não variam como funções lineares de H . Define-se então:

$$\chi'_m = \frac{dM}{dH} \quad (2.3)$$

sendo χ'_m a suscetibilidade diferencial do material.

2.1.5 Fluxo magnético

O fluxo magnético Φ representa o número total de linhas de força existentes no campo magnético gerado em uma bobina, que atravessam uma superfície aberta escolhida como referência. A unidade (SI) utilizada para expressar o fluxo magnético é o Weber (Wb).

2.1.6 Indução Magnética ou Densidade de Fluxo Magnético B

A indução magnética ou densidade do fluxo magnético B em um ponto é uma grandeza vetorial, originária do campo magnético H e da magnetização M do meio. Ela representa o valor do campo no interior de um material submetido à influência de um campo magnético H . A unidade (SI) utilizada para expressar a densidade de fluxo magnético é o Tesla (Wb/m^2). Considerando-se o fluxo atravessando a seção transversal de uma bobina, a densidade de fluxo magnético é definida como:

$$B = \frac{\Phi}{A_{\perp}} \quad (2.4)$$

sendo,

B a densidade de fluxo magnético

A_{sb} a área da seção transversal da bobina

2.1.7 Lei de indução de Faraday

Quando o fluxo magnético em um circuito elétrico varia, uma tensão elétrica é induzida no circuito, sendo este fenômeno chamado indução eletromagnética. Considerando-se uma bobina contendo N_e espiras, atravessada perpendicularmente por um fluxo magnético variável no tempo, a tensão elétrica induzida em seus terminais pode ser determinada por:

$$V_{ind} = -N_e \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.5)$$

2.1.8 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética de um meio é a relação entre a densidade de fluxo magnético B e o campo magnético H que a produz, definida por:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.6)$$

sendo μ a permeabilidade magnética do material. A unidade (SI) utilizada para a permeabilidade magnética é H/m. Como no caso da suscetibilidade, dependendo do tipo de material, a magnetização M e a densidade de fluxo B não variam como funções lineares de H . Define-se então:

$$\mu' = \frac{dB}{dH} \quad (2.7)$$

sendo μ' a permeabilidade magnética diferencial do material.

No vácuo ou em um meio não magnético, a magnetização M é igual a zero e a permeabilidade μ é conhecida como μ_0 . Assim:

$$B_0 = \mu_0 H \quad (2.8)$$

sendo,

B_0 a densidade de fluxo magnético ou indução magnética no vácuo

μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, uma constante universal com valor igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

A relação entre a densidade de fluxo magnético B produzida no meio e aquela produzida no vácuo é denominada permeabilidade relativa do meio, ou seja:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.9)$$

Sendo μ_r a permeabilidade relativa de um material, que representa uma medida da facilidade com que o material pode ser magnetizado. A relação entre permeabilidade relativa e a suscetibilidade magnética de um material é expressa por:

$$\mu_r = \chi_m + 1 \quad (2.10)$$

2.1.9 Relação entre B, M e H

A indução magnética B pode ser expressa em função de H e M pela seguinte expressão:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.11)$$

2.1.10 Magnetostricção

A magnetostricção representa a variação que ocorre nas dimensões de um material magnético quando colocado sob a influência de um campo magnético. A magnetostricção, designada por λ , é definida por:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.12)$$

sendo,

λ a magnetostricção

l_0 o comprimento inicial do material

Δl a variação no comprimento experimentada por um material submetido à influência de um campo magnético

O valor de λ medido na saturação magnética é denominado magnetostricção na saturação, designado por λ_s .

Existem dois tipos de magnetostricção a considerar: a magnetostricção espontânea, que se origina do ordenamento dos momentos magnéticos nos domínios, abaixo da temperatura de Curie e a magnetostricção induzida pelo campo (Jilles, 1998).

2.1.11 Ponto de Curie

O ponto de Curie ou temperatura de Curie T_c é a temperatura em que o comportamento de um material ferromagnético muda para paramagnético. Nesta temperatura a permeabilidade do material cai rapidamente e a coercividade e a remanência se tornam iguais a zero. Para o ferro, níquel e cobalto estas temperaturas são 770°C , 358°C e 1130°C respectivamente.

2.1.12 Ganho

O ganho é a medida da capacidade apresentada por um circuito eletrônico, de aumentar a magnitude de um parâmetro de entrada, como a corrente ou tensão elétrica. O ganho é normalmente expresso através de uma unidade denominada decibel (dB), definida por:

$$G = 20 \log \frac{V_s}{V_e} \quad (2.13)$$

sendo:

G ganho do sistema

V_s tensão elétrica de saída

V_e tensão elétrica de entrada

2.2 Propriedades Magnéticas

As propriedades magnéticas de um determinado material são devidas aos momentos magnéticos produzidos pelo núcleo e pelos elétrons de seus átomos. O momento magnético produzido pelo núcleo exerce uma contribuição muito pequena ao momento

magnético total do átomo. Os momentos magnéticos produzidos pelos elétrons, em virtude de seu movimento, contribuem para a quase totalidade do momento magnético do átomo.

Existem dois tipos de movimentos realizados pelos elétrons. O primeiro é o movimento orbital ao redor do núcleo, que dá origem a um momento angular mecânico e a um momento angular magnético associado ao mesmo, normal ao plano da órbita. O segundo é o movimento de rotação ao redor de seu próprio eixo, dando origem ao momento magnético intrínseco ou momento magnético do spin, paralelo ao eixo de rotação. O momento magnético associado a cada um destes movimentos é uma quantidade vetorial. O momento magnético total do átomo é a soma vetorial de todos os momentos, dando origem a diferentes classes de materiais em termos de propriedades magnéticas.

Os materiais em que os momentos magnéticos de todos os elétrons são orientados de forma a se anularem uns aos outros, fazendo com que o átomo não apresente um momento magnético resultante, são classificados como materiais diamagnéticos. Os materiais em que os momentos magnéticos não se anulam totalmente, apresentando um momento magnético resultante, são classificados como materiais paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos (Cullity, 1972). As características de cada uma destas classes serão abordadas a seguir.

2.2.1 Diamagnetismo

O diamagnetismo é uma forma muito fraca de magnetismo não permanente que existe somente enquanto o material está submetido à ação de um campo magnético externo, sendo induzido por uma mudança no movimento orbital dos elétrons devido ao campo aplicado. O valor do momento magnético induzido é extremamente pequeno e de direção oposta ao campo aplicado. A permeabilidade relativa μ_r é levemente menor do que a unidade, e a suscetibilidade magnética é negativa, da ordem de 10^{-5} a 10^{-6} , fazendo com que a magnitude da indução magnética B no interior de um material diamagnético seja ligeiramente menor do que no vácuo. O diamagnetismo é encontrado em todos os materiais mas devido ao seu valor, só pode ser observado quando as outras formas de magnetismo estão ausentes.

2.2.2 Paramagnetismo

O paramagnetismo é uma forma de magnetismo apresentada por alguns materiais devido a cada átomo do material apresentar um momento de dipolo permanente, em virtude do não cancelamento dos momentos magnéticos orbitais e do spin. Na ausência de

um campo magnético externo as orientações destes momentos magnéticos atômicos são aleatórias e o material como um todo não apresenta uma magnetização resultante. Sob a ação de um campo magnético externo os dipolos tendem a se alinhar por rotação em direções próximas à do campo aplicado, resultando no efeito denominado paramagnetismo. Os dipolos atuam individualmente, não havendo interação entre dipolos adjacentes. A permeabilidade relativa μ_r é levemente maior do que a unidade e a suscetibilidade magnética é positiva, da ordem de 10^{-5} a 10^{-3} , fazendo com que a magnitude da indução magnética B no interior de um material paramagnético seja ligeiramente maior do que no vácuo. Exemplos de materiais paramagnéticos são o alumínio, a platina e o manganês.

2.2.3 Ferromagnetismo

O ferromagnetismo é uma forma de magnetismo apresentada por materiais que possuem um momento magnético permanente, mesmo na ausência de um campo magnético externo. Estes materiais apresentam altos níveis de magnetização e o efeito da magnetização permanente, que será maior ou menor dependendo das características da sua microestrutura. Os momentos magnéticos permanentes apresentados pelos materiais ferromagnéticos são devidos quase em sua totalidade aos momentos magnéticos resultantes dos spins, sendo pequena a contribuição dos momentos magnéticos orbitais. Nestes materiais há uma interação entre os momentos magnéticos resultantes dos spins de átomos adjacentes, que faz com que os momentos se alinhem uns em relação aos outros, mesmo sem a influência de um campo magnético externo. Este alinhamento persiste sobre regiões relativamente grandes do cristal, denominadas domínios magnéticos. Esta forma de magnetismo é característica dos metais de transição ferro (estrutura CCC), cobalto, níquel e de algumas terras raras como o gadolínio, disprosio, érbio, hólmio e túlio. As suscetibilidades magnéticas podem atingir valores da ordem de 10^6 , fazendo com que a magnitude da indução magnética B no interior de um material ferromagnético atinja valores extremamente altos comparados ao campo que as produziu.

2.2.4 Ferrimagnetismo

O ferrimagnetismo é a forma de magnetismo apresentada por alguns materiais, que exibem uma magnetização permanente. As características magnéticas macroscópicas dos materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos são similares, havendo distinção na origem do momento magnético resultante apresentado pelos materiais ferrimagnéticos. Estes

materiais apresentam alinhamentos paralelos e antiparalelos dos momentos magnéticos atômicos, havendo, entretanto, uma magnetização resultante em uma direção.

2.3 Dependência da Estrutura

As propriedades mecânicas dos materiais magnéticos como a dureza, limite de resistência, ductilidade e características de encruamento são dependentes da estrutura do material, estando diretamente relacionadas com a sua microestrutura, composição química e processo de fabricação.

As propriedades magnéticas dos materiais magnéticos são dependentes, em maior ou menor grau, de sua composição química, do tipo, distribuição e quantidade de impurezas presentes e do processo de fabricação utilizado para a sua obtenção, incluindo o tipo de processamento mecânico e de tratamentos térmicos realizados. Algumas destas propriedades são pouco afetadas por variações da composição química e, praticamente, não são afetadas por variações nas variáveis de processamento mecânico e tratamentos térmicos, como é o caso da magnetização de saturação. Outras propriedades, como a permeabilidade, coercividade, remanência, a perda por histerese e o espectro de emissão do ruído magnético Barkhausen são extremamente sensíveis às variações que ocorrem nestas características dos materiais, permitindo que elas sejam utilizadas como ferramentas para a avaliação não destrutiva de materiais ferromagnéticos (Kankolenski et al., 2000).

A diferença de comportamento exibida pelas propriedades magnéticas dos materiais dependendo das características de sua estrutura permite classificá-las como propriedades sensíveis e insensíveis à estrutura, conforme pode ser observado na TAB. 2.1.

TABELA 2.1 – Propriedades sensíveis e insensíveis à estrutura.

Propriedades Magnéticas		Fatores que Afetam as Propriedades
Insensíveis à Estrutura	Sensíveis à Estrutura	
Magnetização de saturação	Permeabilidade	Composição química, impurezas, processamento mecânico, microestrutura, temperatura, orientação cristalina e irradiação
Magnetoestricção na saturação	Coercividade	
Ponto Curie	Remanência	
Constante de anisotropia cristalina	Perda por histerese	
	Espectro do ruído magnético Barkhausen	

As características dos materiais magnéticos se modificam com alterações na temperatura. Um aumento na temperatura de um sólido resulta em um aumento da amplitude das vibrações térmicas dos seus átomos. Os momentos magnéticos são livres para se orientar e, um aumento na temperatura, com o conseqüente aumento na movimentação térmica dos átomos, tende a ocasionar uma diminuição do grau de alinhamento dos momentos em uma dada direção, ou seja, tende a tornar aleatórias as direções de alinhamento dos momentos.

Para materiais ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos os movimentos atômicos devidos ao aumento de temperatura atuam contra as forças de interação entre momentos de dipolo atômicos adjacentes, ocasionando algum desalinhamento dos dipolos, havendo ou não um campo magnético externo presente. Isto resulta em um decréscimo na magnetização de saturação para materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos. A magnetização de saturação é máxima a 0 K, temperatura na qual as vibrações térmicas são mínimas. Com o aumento da temperatura a magnetização de saturação diminui gradualmente, caindo abruptamente a zero na temperatura chamada temperatura de Curie T_C .

2.4 Domínios Magnéticos

Na busca para uma melhor compreensão do ferromagnetismo houve contribuições de vários pesquisadores. Ampère, em 1827, sugeriu que a origem dos momentos atômicos era devida a correntes elétricas circulando continuamente dentro dos átomos. Weber, em 1852, sugeriu a existência de momentos magnéticos orientados de forma aleatória no interior dos materiais ferromagnéticos, que se tornavam ordenados sob a ação de um campo magnético externo. Mais tarde Ewing, desenvolveu trabalhos para explicar a histerese baseado nos trabalhos de Weber. Entretanto, somente em 1907 foi proposta a existência dos domínios magnéticos, por Pierre Weiss (Jilles, 1998).

Os domínios magnéticos consistem de regiões discretas, distribuídas no volume de um material ferromagnético, nas quais os momentos magnéticos estão alinhados paralelamente. Nestas regiões o valor local da magnetização é igual ao valor da magnetização de saturação do material.

No estado desmagnetizado, ou seja, quando o material não está submetido à influência de um campo magnético externo ou de deformações ocasionadas por carregamentos externos ou tensões residuais, cada domínio encontra-se magnetizado ao longo de certas direções cristalográficas. Estas direções são denominadas direções de fácil

magnetização e são diferentes para diferentes materiais. Para o ferro, o níquel e o cobalto estas direções são [100], [111] e [001] respectivamente. Entretanto, as direções em que cada domínio encontra-se magnetizado variam entre domínios adjacentes e estão distribuídas de forma aleatória no material, sendo a magnetização resultante apresentada pelo mesmo igual ou próxima a zero.

Sob a influência de um campo magnético externo, os momentos magnéticos no interior dos domínios sofrem uma rotação conjunta, cada magneto atômico em volta de seu próprio eixo. Após o equilíbrio os momentos em cada domínio permanecem paralelos uns em relação aos outros, porém alinhados em uma direção mais próxima à direção do campo magnético aplicado, produzindo uma mudança na direção de magnetização em um dado volume do material, não alterando, entretanto o valor da magnetização naquele volume (Bozorth, 1951).

2.4.1 Anisotropia Magnética

Na ausência de um campo magnético externo, de deformações induzidas por carregamentos externos ou de deformações devido à presença de tensões residuais, a direção de magnetização em um domínio é influenciada pela estrutura cristalina do material, havendo direções cristalinas preferenciais para a sua magnetização. Assim, a forma da curva de magnetização de um material ferromagnético é fortemente influenciada pela sua estrutura cristalina e o valor de suas propriedades magnéticas varia, em função da direção em que elas são medidas. O termo utilizado para exprimir este comportamento é a anisotropia magnética ou anisotropia magnetocristalina.

As curvas de magnetização para cristais de ferro com estrutura CCC, obtidas nas três direções principais [100], [111] e [110], podem ser observadas na FIG. 2.1.

Pela análise da FIG. 2.1 pode-se observar que a magnetização se processa mais facilmente nas direções paralelas aos eixos cúbicos (direções $\langle 100 \rangle$), ou seja, a magnetização M atinge o seu valor máximo com menores valores do campo magnético H aplicado nestas direções. Assim, em um domínio magnético em um cristal de ferro não sujeito a deformação ou à ação de um campo magnético externo, a magnetização é sempre paralela a um dos eixos do cristal, ou seja, às direções $\langle 100 \rangle$. Havendo seis destas direções que são equivalentes, um cristal de ferro desmagnetizado tem normalmente um sexto de seus domínios orientados em cada uma destas direções.

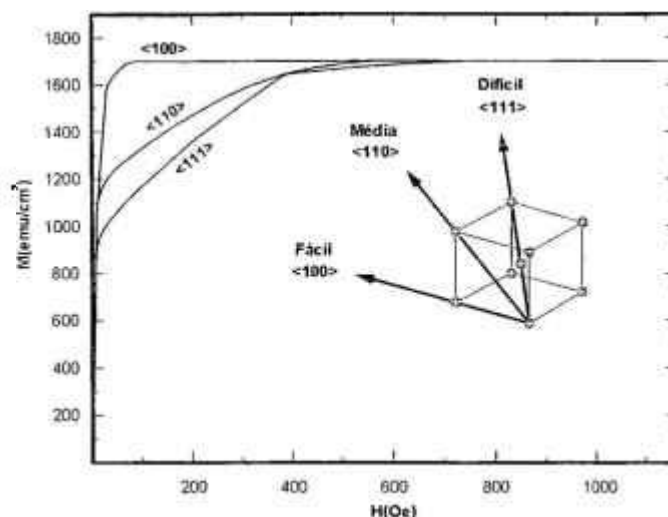


FIGURA 2.1 – Curvas de magnetização para cristais de ferro nas direções $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$.

Para cristais de níquel, com estrutura CFC, as curvas de magnetização obtidas nas três direções principais $[100]$, $[111]$ e $[110]$ podem ser observadas na FIG. 2.2. Pela sua análise pode-se observar que a magnetização se processa mais facilmente nas direções paralelas à diagonal do cubo (direções $\langle 111 \rangle$), ou seja, nestas direções a magnetização M atinge o seu valor máximo com menores valores do campo magnético H aplicado. Desta forma, em um domínio magnético em um cristal de níquel não sujeito a deformação ou à ação de um campo magnético externo, a magnetização é sempre paralela à diagonal da célula. Como existem oito destas direções que são equivalentes, um cristal de níquel desmagnetizado tem normalmente um oitavo de seus domínios orientados em cada uma destas direções.

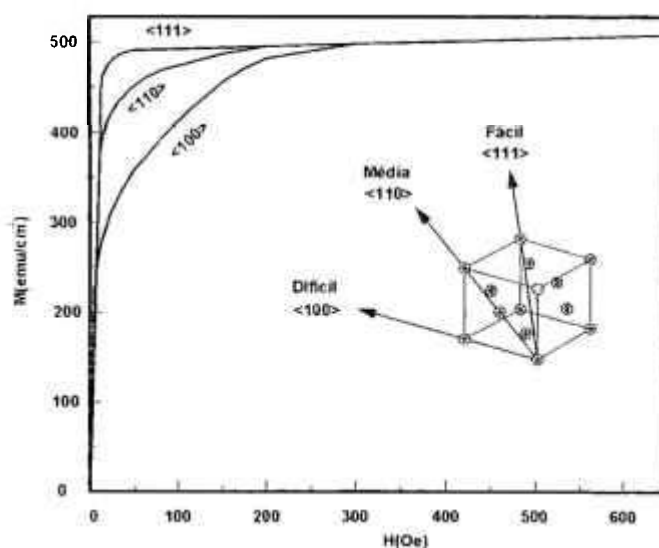


FIGURA 2.2 – Curvas de magnetização para cristais de níquel nas direções $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$.

Não existe uma relação direta entre as direções de fácil, média e difícil magnetização em um material e a maneira com que os átomos deste material se encontram arranjados em sua estrutura cristalina. Para o ferro com estrutura CCC, as direções mais compactas são as direções $\langle 111 \rangle$, correspondentes às direções do eixo de difícil magnetização. Para o níquel, que possui estrutura CFC, as direções mais compactas são as direções $\langle 110 \rangle$, correspondentes às direções do eixo de média dificuldade para magnetização (Cullity, 1972).

2.4.2 Paredes dos Domínios

Em um material ferromagnético, as direções em que cada domínio encontra-se magnetizado variam entre domínios adjacentes. O limite entre dois domínios consiste de uma região, denominada parede do domínio ou parede de Bloch, na qual a orientação dos momentos magnéticos muda suavemente da direção em que eles se encontram em um determinado domínio para a direção de magnetização do domínio adjacente.

As paredes dos domínios são classificadas como paredes de 180° , nas quais os spins giram de 180° de um domínio para o domínio adjacente e paredes de 90° , nas quais os spins giram de 90° de um domínio para o domínio adjacente.

No ferro, com estrutura CCC e magnetoestricção positiva (Jiles, 1998) as direções de fácil magnetização são as direções $\langle 100 \rangle$. Neste caso pode haver dois tipos de paredes. O primeiro tipo são as paredes entre domínios com orientação $[100]$ e $[010]$, formando ângulos de 90° entre si, denominadas paredes de 90° . O segundo tipo, as paredes entre domínios com orientação $[100]$ e $[\bar{1}00]$, formando ângulos de 180° entre si, denominadas paredes de 180° .

No níquel, com estrutura CFC e magnetoestricção negativa, as direções de fácil magnetização são as direções $\langle 111 \rangle$. Neste caso pode haver fronteiras de 180° , 71° e 109° . Normalmente as fronteiras de 71° e 109° são designadas como fronteiras de 90° , porque elas se distinguem das fronteiras de 180° com relação à sensibilidade à presença de tensões (Jiles, 1998).

Na FIG 2.3 pode ser observada, de forma esquemática, a estrutura de uma parede de Bloch de 180° . Quando as fronteiras entre os domínios coincidem com os contornos de grão em materiais policristalinos podem ocorrer outras orientações (Bhattacharya et al., 1993).

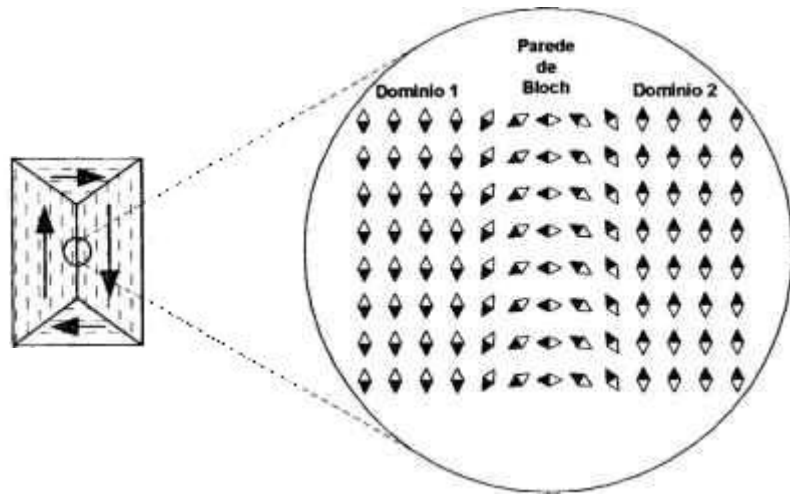


FIGURA 2.3 – Estrutura de uma parede de Bloch de 180°.

2.4.3 Energia Magnetostática

A existência de vários domínios em um material ferromagnético é uma consequência direta da minimização da energia do sistema. Uma amostra com apenas um domínio magnético possui uma alta energia magnetostática inerente. Ao se dividir em vários domínios, com o aparecimento de domínios nas extremidades da amostra, a energia magnetostática é reduzida. Os domínios na extremidade da amostra proporcionam um caminho para que as linhas de fluxo sejam conduzidas para o interior do material. Eles nucleiam a partir de defeitos existentes na estrutura. A estrutura de domínios formada em um cristal de ferro, desde a saturação até o estado desmagnetizado pode ser observada, de forma esquemática, na FIG. 2.4 (Jilles, 1998).

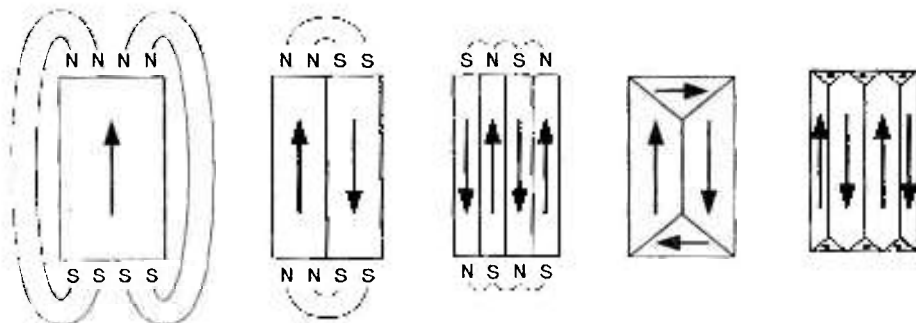


FIGURA 2.4 – Estrutura de domínios formada em um cristal de ferro a partir da saturação até o estado desmagnetizado.

2.5 A Curva de Magnetização

Quando um material ferromagnético é colocado sob a influência de um campo magnético H crescente, o valor da magnetização induzida no material aumenta até atingir um valor denominado magnetização de saturação. Durante este processo, quatro regiões distintas podem ser identificadas na curva de magnetização, conforme pode ser observado na FIG. 2.5.

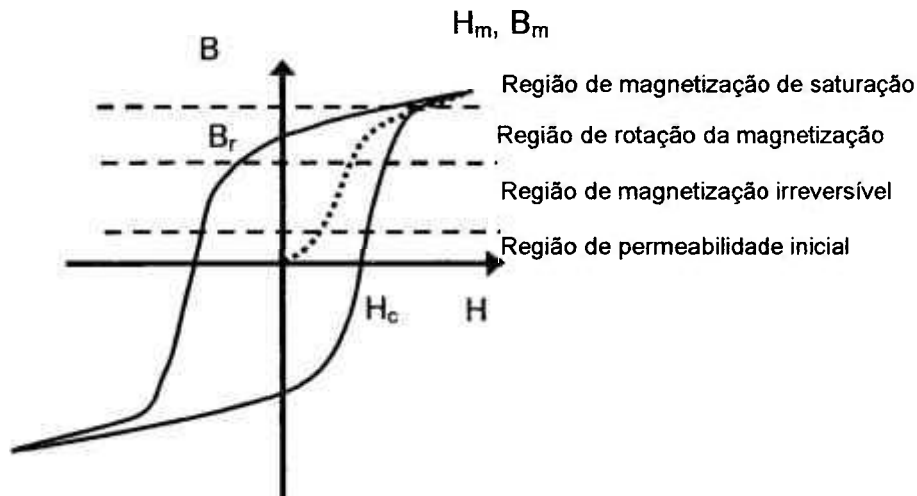


FIGURA 2.5 – Curva de magnetização de um material ferromagnético.

A primeira região é denominada região de permeabilidade inicial. Nesta região a magnetização ocorre de forma reversível. Com um aumento no valor do campo magnético aplicado, o vetor magnetização dos domínios, em cada domínio, gira de forma reversível a partir de sua posição original, ao mesmo tempo em que as paredes dos domínios também se deslocam de forma reversível, a partir de suas posições originais. Retirando-se o campo magnético atuante, o material volta à sua condição inicial, existente antes da aplicação do campo, percorrendo a curva de magnetização em sentido contrário.

A segunda região, situada logo após a região de permeabilidade inicial, é denominada região de magnetização irreversível, caracterizada por um aumento drástico na intensidade de magnetização. O mecanismo de magnetização principal atuante nesta região é o de deslocamento irreversível das paredes dos domínios, de uma posição estável para outra, podendo ainda ocorrer a rotação irreversível do vetor magnetização dos domínios em materiais heterogêneos que contenham grande quantidade de inclusões e precipitados. Nesta região, retirando-se o campo magnético que excita o material, ele já não retorna à sua condição inicial, apresentando um grau de magnetismo residual. Com um aumento no

valor do campo magnético aplicado, a curva de magnetização torna-se menos inclinada e o processo de magnetização torna-se mais uma vez reversível.

Na terceira região o movimento das paredes dos domínios já se completou e o aumento da magnetização ocorre basicamente pelo mecanismo de rotação dos domínios. Esta região é denominada região de rotação da magnetização.

Na quarta região a magnetização se aproxima da região de magnetização de saturação do material (Cullity, 1972).

Quando a intensidade do campo magnético aplicado a um material ferromagnético é tal que se atinja a região de magnetização irreversível, observa-se que, com a diminuição do valor do campo, a curva de magnetização inicial do material não é retraçada. Este fenômeno é denominado histerese e ocorre devido a dois mecanismos: o deslocamento irreversível das paredes dos domínios e a rotação irreversível da magnetização dos domínios.

O comportamento do material durante a magnetização segue uma curva característica, denominada curva de histerese magnética. Na curva de magnetização do material, com o aumento do campo magnético H o valor da indução magnética B varia de zero até um máximo que ocorre na região de saturação do material, indicada pela linha mais espessa. Ao ser reduzido o valor do campo magnético aplicado, a curva percorre uma trajetória descendente passando pelo zero e, com a inversão do campo aplicado, atinge novamente a saturação, em sentido contrário ao anterior. A partir deste ponto, repetindo-se este procedimento em sentido contrário, a curva descreve uma trajetória ascendente até atingir novamente a saturação na parte superior da figura. Este comportamento é descrito pela curva de histerese do material.

Na curva de histerese, o valor da intensidade do campo magnético H para a qual a indução magnética B é igual a zero é denominado força coerciva H_c e o valor da indução magnética B para o qual a intensidade do campo magnético H é igual a zero é denominado indução residual B_r . Quando a intensidade do campo magnético H aplicado ao material é suficiente para fazê-lo atingir a região de saturação, a força coerciva e a indução residual são denominadas coercividade e retentividade respectivamente e os valores de H e B nos extremos da curva denominados H_m e B_m , ou seja, intensidade máxima do campo magnético e indução magnética máxima, respectivamente (Bozorth, 1951).

Durante a magnetização, as fronteiras dos domínios se deslocam pelo material. Neste processo, os domínios existentes tendem a se alinhar com a direção do campo magnético aplicado. Domínios orientados em direções próximas à do campo tendem a

criar e domínios com outras orientações tendem a desaparecer, como apresentado na FIG. 2.6, com o material (aço CrMoV) sob a influência de um campo magnético variável (Kim, 1994). O valor da intensidade do campo magnético H necessário para que a região de saturação magnética seja atingida depende do material em estudo.

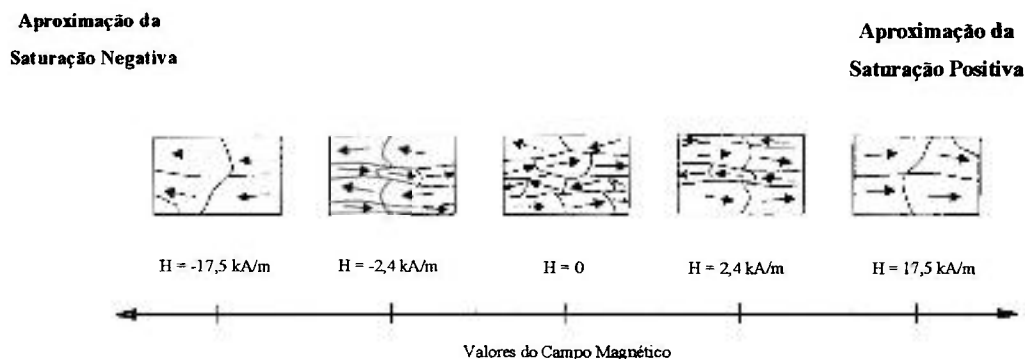


FIGURA 2.6 – Comportamento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização.

2.6 O Efeito Barkhausen

O processo de magnetização de um material ferromagnético é representado pela sua curva de histerese magnética. Em escala microscópica, as variações que ocorrem na magnetização são devidas às modificações que ocorrem na estrutura de domínios existente no material. Com o aumento do valor do campo magnético aplicado ao material, a estrutura de domínios se altera, com a ocorrência dos processos de movimento das paredes e de rotação do vetor magnetização dos domínios. A mobilidade das paredes dos domínios está relacionada com a energia magnetostática total, que varia com o tamanho, a forma e a microestrutura do material, sendo fortemente influenciada pela estrutura de defeitos como cavidades, inclusões, partículas de segunda fase, discordâncias, defeitos pontuais, contornos de grãos e pela presença de tensões. Estas heterogeneidades atuam como barreiras à movimentação das paredes, produzindo um decréscimo em sua velocidade (Lindgren et al, 2004). Confrontado com um defeito (barreira), o movimento das paredes é impedido de forma repentina, continuando somente após o campo magnético externo aplicado ao material ter atingido um valor que possibilite a ultrapassagem daquela barreira. Desta forma, durante o processo de magnetização, o movimento das paredes dos domínios através do material não ocorre de forma suave e sim aos saltos, de uma barreira de energia à outra, à medida que o valor do campo magnético aplicado aumenta.

O movimento descontínuo das paredes dos domínios provoca mudanças descontínuas no fluxo magnético durante a magnetização. A curva de magnetização do material, que a princípio aparenta expressar uma variação suave da densidade de fluxo magnético com o campo magnético aplicado, observada em escala microscópica, apresenta o comportamento indicado na FIG. 2.7 (Jilles, 1998).

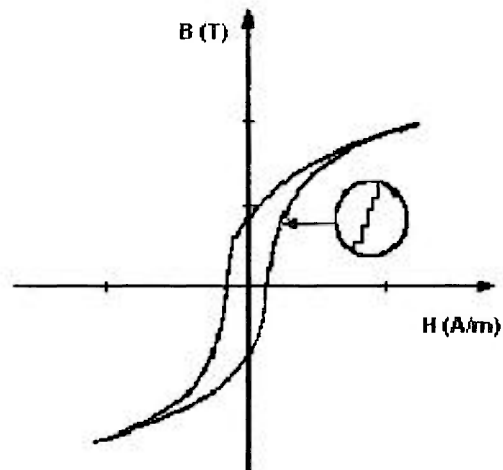


FIGURA 2.7 – Variações na densidade de fluxo no processo de magnetização.

Na região ampliada da curva, cada linha vertical nos degraus representa o movimento discreto de um conjunto de paredes de domínios de uma barreira de energia para outra, com o conseqüente aumento na densidade de fluxo magnético no material. Cada linha horizontal representa o acréscimo necessário ao valor do campo magnético aplicado, antes que o próximo movimento das paredes ocorra.

O movimento repentino de uma parede de domínio produz um evento Barkhausen elementar. A soma de todos os eventos Barkhausen durante a magnetização produz o ruído magnético Barkhausen (Desvaux et al., 2004). O ruído pode ser detectado através de uma bobina posicionada na superfície do material, pois as variações bruscas na densidade de fluxo no material induzem impulsos elétricos na bobina, que podem ser processados e analisados. Este efeito foi observado inicialmente em 1919, pelo físico alemão H. Barkhausen. No experimento, uma amostra de ferro foi envolvida por uma bobina que, por sua vez, foi conectada a um amplificador e a um alto falante. Com a variação do campo magnético aplicado ao sistema, uma série de ruídos foram ouvidos através do auto falante. A origem dos ruídos foi associada a pequenos pulsos de voltagem induzidos na bobina, causados por pequenas mudanças na densidade de fluxo provocadas pelas mudanças descontínuas na magnetização M no material (Jilles, 1998).

A forma característica do ruído magnético Barkhausen gerado durante o processo de magnetização de uma amostra de aço ASTM A 36 é apresentada na FIG. 2.8. Estão representados a tensão de excitação (forma de onda senoidal) aplicada à sonda magnetoelástica para excitar o material e o ruído magnético Barkhausen gerado, em função do tempo. Durante um ciclo de magnetização, são gerados dois blocos do ruído, correspondentes aos valores positivo e negativo do campo magnético de excitação. O ruído gerado é processado e os parâmetros de interesse selecionados em função da característica do material que se deseja avaliar. A tensão de excitação e o ruído magnético Barkhausen estão apresentados em escalas diferentes, apenas para facilitar a visualização do aspecto do ruído.

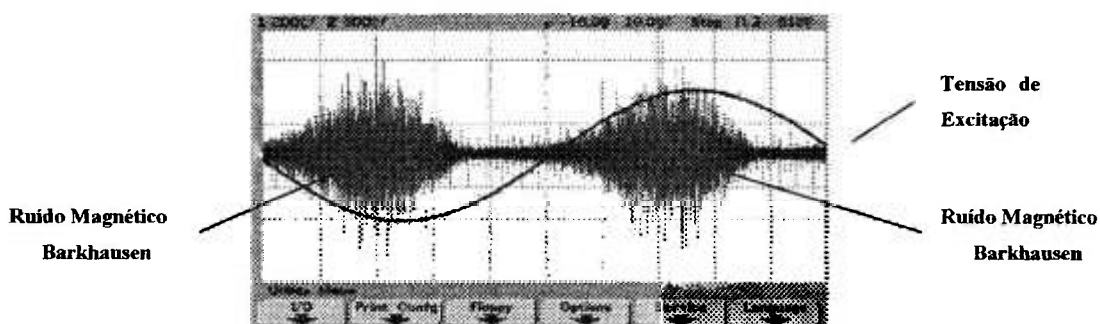


FIGURA 2.8 – Ruído magnético Barkhausen característico de uma amostra de aço ASTM A 36.

Durante o processo de magnetização, dois ruídos característicos são gerados. O ruído magnético Barkhausen e o ruído acústico Barkhausen.

O ruído acústico Barkhausen (Desvaux et al., 2004), também denominado emissão magneto-acústica, consiste de ondas elásticas emitidas pelo material devido às súbitas variações nos campos de tensão que ocorrem durante a interação dinâmica das paredes dos domínios com defeitos no interior do material. Quando as paredes se libertam de uma barreira ao seu movimento de forma repentina, elas produzem uma mudança localizada na magnetostrição local, gerando a emissão de ondas elásticas de alta frequência. O mecanismo de geração do sinal acústico Barkhausen é geralmente atribuído ao movimento das paredes de domínios de 90° (Yuehuang, 1994). Os pulsos de baixa energia acústica gerados no processo podem ser detectados por um transdutor piezelétrico posicionado na superfície do material. A emissão magneto-acústica não pode ser gerada pelo processo de movimento das paredes de Bloch de 180° ou rotação do vetor magnetização de domínios de 180° , pois estes dois mecanismos não envolvem mudanças na magnetostrição.

O ruído magnético Barkhausen é causado pelas mudanças na magnetização que são provocadas, principalmente, pelo movimento irreversível das paredes de Bloch de 180° ao se deslocarem pelo material durante o processo de magnetização (Lindgren, 2004). Em uma escala menor, o processo de rotação da direção de magnetização também contribui para a geração do ruído magnético Barkhausen.

A intensidade máxima do ruído magnético Barkhausen ocorre na região mais inclinada da curva de histerese, correspondente ao ponto de coercividade H_c . Ela depende das tensões presentes no material e de sua microestrutura.

2.7 Efeito das Tensões

A estrutura de domínios existente em um material ferromagnético, além de ser afetada pela aplicação de um campo magnético ao material, também é afetada pelo estado de tensões presente no mesmo, através do efeito magnetoelástico. As tensões mecânicas influenciam a distribuição dos domínios e o movimento das fronteiras através da interação magnetoelástica (Devine, 1992). A tensão produz um campo magnético efetivo H_σ expresso por:

$$H_\sigma = 3 \lambda_s \sigma / 2 \mu_0 M_s \quad (2.14)$$

sendo,

λ_s é a magnetostricção quando o material está na magnetização de saturação

σ é a tensão aplicada

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo

M_s é a magnetização de saturação

As tensões elásticas afetam as emissões do ruído Barkhausen devido ao efeito da deformação elástica, que faz com que a configuração dos domínios mude para um arranjo energeticamente mais favorável, devido à minimização da energia magnetoelástica quando a magnetização dos domínios se alinha com relação ao eixo de deformação principal da rede.

Em materiais com constante de magnetostricção (λ) positiva, a aplicação ou a presença de uma tensão de tração provoca o alinhamento dos domínios no material ao longo dos eixos cristalográficos mais próximos ao eixo de aplicação da tensão, o mesmo ocorrendo quando um campo magnético é aplicado ao material. Quando um campo

magnético é aplicado ao longo de um eixo onde atue uma tensão de tração, a amplitude do ruído magnético Barkhausen gerado aumenta até atingir o limite elástico do material. Quando o mesmo campo é aplicado em uma direção perpendicular ao eixo de aplicação de tração, o efeito é contrário, ou seja, a amplitude do ruído magnético gerado diminui. Caso a tensão aplicada seja de compressão, o comportamento é o inverso ao descrito para tração (Desvaux et al., 2004). Esta é a base para a detecção de tensões elásticas pela análise do ruído magnético Barkhausen.

A amplitude do ruído magnético Barkhausen depende do número de eventos Barkhausen, seu valor e sua duração. Tensões de tração podem aumentar o número de paredes de domínio de 180° em movimento, reorientando domínios ou modificando as barreiras de energia que dificultam a sua movimentação. Tensões de compressão, ao contrário, contribuem para o decréscimo do número de paredes de domínios de 180° . A interação entre a estrutura dos domínios e as tensões em um material está indicada esquematicamente na FIG. 2.9 (Karpuschewski, 1998).

A aplicação de um esforço de tração no material favorece o crescimento dos domínios orientados na mesma direção do esforço e a diminuição dos domínios com outras orientações. A aplicação de um campo magnético no material favorece o crescimento dos domínios orientados na mesma direção e sentido da aplicação do campo, com a conseqüente diminuição dos domínios com outras orientações. Com a aplicação de esforços de compressão, os domínios orientados perpendicularmente à direção de aplicação do esforço sofrem uma expansão e aqueles, com outras orientações, sofrem uma diminuição. Se as tensões e o campo magnético aplicados ao material geram o mesmo tipo de mudança na configuração dos domínios, seu efeito cumulativo produz níveis elevados do ruído magnético Barkhausen, ou seja, um alto sinal magnetoelástico. Se a tensão e o campo aplicados geram efeitos conflitantes no movimento das paredes, o nível do ruído magnético Barkhausen é reduzido, resultando em um baixo sinal magnetoelástico (Desvaux et al., 2004).

Da mesma forma que para a microestrutura e propriedades mecânicas, a análise do ruído magnético Barkhausen pode ser utilizada para a determinação de tensões aplicadas e residuais em materiais ferromagnéticos, após uma calibração adequada.

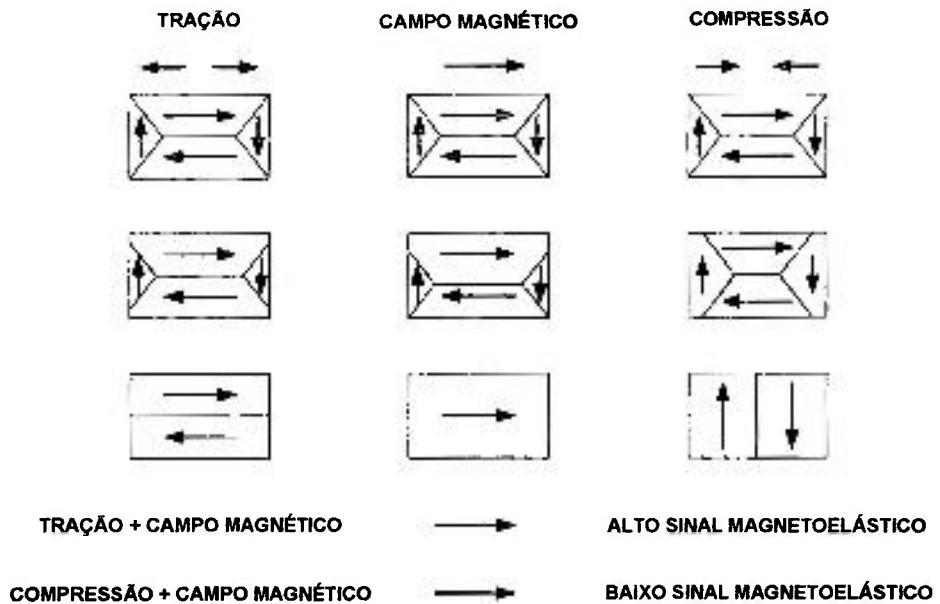


FIGURA 2.9 – Comportamento dos domínios sob diferentes condições de carregamento e campo magnético.

2.8 Efeito da microestrutura

A microestrutura do material determina as configurações e as características de ancoragem das paredes dos domínios. As barreiras ao deslocamento das paredes de domínios diminuem a sua velocidade, reduzindo a amplitude do ruído gerado. Em microestruturas complexas, os diferentes componentes microestruturais exercem diferentes forças de retardo a este movimento (Lindgren, 2004).

Materiais ou regiões com propriedades magnéticas diferentes da matriz de um material ferromagnético são denominados inclusões. As inclusões podem ser de vários tipos como partículas de segunda fase que aparecem quando a solubilidade de um determinado material na matriz é excedida, óxidos, carbonetos (como o caso da cementita em aços) poros, cavidades, trincas, dentre outros. As inclusões, ao serem atravessadas por uma parede de domínio durante a magnetização, atuam como barreiras ao seu movimento por dois motivos: a redução da área da parede e a formação de uma estrutura de domínios em forma de agulha, durante a passagem da parede.

Sendo o ruído magnético Barkhausen sensível às variações da microestrutura e às propriedades mecânicas dos materiais ferromagnéticos (Kankolenski et al., 2000), a sua análise pode ser utilizada para a caracterização de microestruturas e de propriedades mecânicas nestes materiais, após uma calibração adequada. Em estudos realizados para

avaliar a relação entre o ruído magnético Barkhausen e a microestrutura em vários tipos de aços, concluiu-se que a maior parte das barreiras para a movimentação dos domínios são contornos de grão ou estão localizadas nos contornos de grão. Assim, a amplitude do ruído é, portanto, afetada pelo tamanho médio dos mesmos, tendo-se determinado o tamanho de grão ASTM, no intervalo de 3 a 11 ASTM, com uma precisão de ± 1 ASTM em amostras de aço de baixo carbono (Bussiére, 1986). O ruído Barkhausen também mostrou ser sensível à precipitação, teor de carbono e morfologia da perlita, dureza e precipitação de carbonetos (Kameda, 1987).

2.9 Análise do Ruído Magnético Barkhausen

O ruído magnético Barkhausen pode ser analisado de várias maneiras. Alguns dos métodos são a análise da distribuição de amplitude do ruído para a determinação do seu valor médio, a detecção da envoltória do ruído para determinação do seu valor máximo e seu espectro de frequências. Entretanto, o valor RMS do ruído magnético Barkhausen tem sido utilizado por grande parte dos pesquisadores para estudos da microestrutura e do estado de tensões em materiais ferromagnéticos (Meszaros et al., 2004).

2.10 Sistema de Ensaio para a Medição do Ruído Magnético Barkhausen

O sistema básico de ensaios utilizado para a investigação de materiais ferromagnéticos pela análise do ruído magnético Barkhausen (RMB) é formado por uma unidade de magnetização, um sistema de aquisição e processamento de dados e um sensor eletromagnético, para a detecção do ruído magnético Barkhausen gerado.

A unidade de magnetização é composta por um gerador de funções, que gera uma forma de onda triangular (Moorthy et al., 2004) ou senoidal (Mészáros et al., 2004) e um amplificador bipolar, que amplifica o sinal do gerador e alimenta um eletroímã em forma de U, responsável pela geração do campo magnético para excitação do material. A forma do sinal de excitação exerce uma grande influência na natureza do RMB emitido pelo material, sendo os sinais com a forma de onda senoidal os mais adequados para a realização de medidas para a caracterização do material (Sipahi, 1993). A detecção do ruído magnético Barkhausen é feita por um sensor eletromagnético, que consiste de uma bobina superficial geralmente com núcleo ferromagnético.

Um sistema de amplificação e filtragem do ruído detectado e um sistema de aquisição de dados para permitir o processamento dos sinais adquiridos complementa o conjunto.

Em geral, o eletroímã responsável pela excitação do material e a bobina responsável pela detecção do ruído magnético Barkhausen são montados em um único conjunto, denominado neste trabalho de sonda magnetoelástica. Uma sonda magnetoelástica típica pode ser observada na FIG. 2.10.

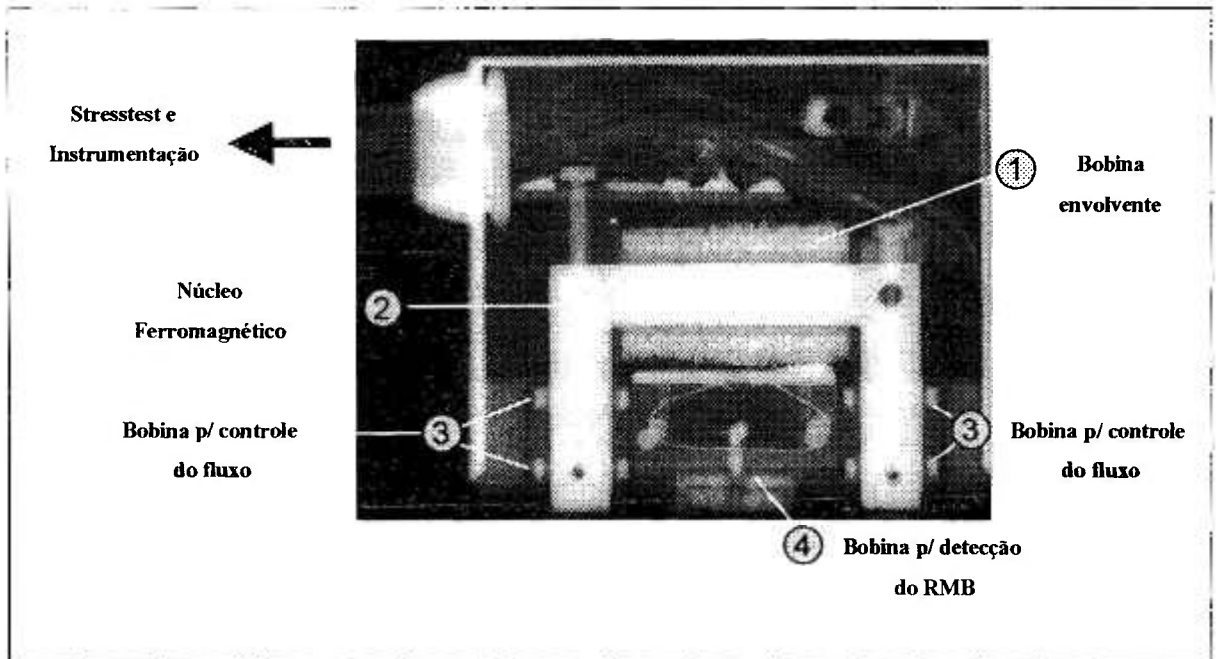


FIGURA 2.10 – Sonda magnetoelástica típica.

A bobina envolvente (1), enrolada ao redor de um núcleo ferromagnético em forma de U (2), produz o campo magnético responsável pela excitação do material. Um conjunto de uma ou duas bobinas adicionais (3) podem ser utilizadas para o controle do fluxo magnético gerado. A sonda é posicionada sobre o material de forma que as extremidades do núcleo ferromagnético estejam em contato com a superfície do material. Nesta condição a densidade de fluxo no material é a maior possível, para um determinado conjunto de parâmetros de teste. Um afastamento da superfície ocasiona uma diminuição do fluxo magnético introduzido no material. A bobina de detecção do ruído magnético Barkhausen (4) é montada entre as extremidades do núcleo ferromagnético e de forma a permanecer em contato direto com a superfície do material. Um afastamento da superfície resulta em uma redução da amplitude do ruído magnético Barkhausen detectado.

A frequência do sinal de excitação representa a frequência com que o campo magnético de excitação é aplicado ao material. A frequência de excitação apresenta dois aspectos importantes na medição do ruído magnético Barkhausen: a profundidade de

penetração (profundidade do material afetada pelo campo magnético de excitação) e a velocidade com que as medições podem ser realizadas (velocidade de varredura).

A profundidade de penetração varia em função da frequência do campo de excitação. Altas frequências de excitação restringem as medidas às regiões superficiais do material sendo, portanto, adequadas para a medição de suas propriedades próximas à superfície. Baixas frequências resultam em uma maior penetração do campo magnético, possibilitando a realização de medições em profundidades maiores.

Os campos magnéticos decaem exponencialmente com a profundidade no material. A profundidade de penetração (δ), considerada para definir a penetração do campo magnético é dada por (Moorthy and Evans, 2003):

$$\delta = \sqrt{1/\pi F_{Exc} \sigma_{El} \mu_0 \mu_r} \quad (2.15)$$

sendo,

F_{Exc} é a frequência do campo em Hertz

σ_{El} é a condutividade elétrica do material em $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$

μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, igual a $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

μ_r é a permeabilidade magnética relativa do material

Esta expressão para a profundidade de penetração do campo magnético (δ) somente é aplicável para ondas planas incidindo sobre uma superfície plana e na maior parte das situações práticas a penetração pode ser de somente 30 a 50% deste valor (Jilles, 1998). A profundidade de penetração (δ) representa a profundidade em que a intensidade das correntes parasitas induzidas no material é igual a 1/e de seu valor na superfície, ou seja, aproximadamente 37%.

A dependência existente entre a velocidade com que as medidas podem ser realizadas e a frequência do campo magnético de excitação está relacionada com o tempo necessário para que o material percorra uma vez a curva de histerese durante a magnetização. Neste tempo é possível a aquisição do ruído durante o ciclo positivo e negativo de aplicação do campo. Em função do número de aquisições desejado e da frequência de ensaio, pode-se determinar a velocidade máxima de deslocamento da sonda (varredura) para a realização das medições. Portanto, a escolha da frequência de excitação

depende da característica do material que se deseja avaliar e, a partir do seu valor, pode-se determinar a velocidade máxima para a realização das medições.

As referências indicam a utilização de frequências de magnetização entre 0,05 Hz a 1 kHz, sendo de uma maneira geral utilizadas frequências entre 1 e 100 Hz (Theiner, 1988). Em trabalhos recentes, realizados utilizando-se sistemas fabricados pela empresa Stresstech, a frequência mais utilizada para o campo magnético de excitação é de 125 Hz (Lindgren and Lepisto, 2004), (Lindgren and Lepisto, 2004).

O ruído magnético Barkhausen é atenuado pelas correntes parasitas no material. Desta forma, a profundidade de detecção do ruído magnético Barkhausen é limitada a uma certa profundidade a partir da superfície. Embora não seja possível determinar esta profundidade com precisão, a expressão geral para a determinação da profundidade de penetração do campo magnético δ (ver EQ. 2.15) é utilizada para este fim (Moorthy et al., 2003). Desta forma o conteúdo de alta frequência do ruído Barkhausen é atribuído principalmente à magnetização próxima à superfície. Já os conteúdos de baixa frequência do ruído contém informações que se originam a profundidades maiores no material.

A bobina sensora responsável pela detecção do ruído magnético Barkhausen consiste de um enrolamento construído com fios de cobre, podendo ou não conter um núcleo de ferrita. A geometria da bobina sensora normalmente é cilíndrica. São disponíveis bobinas sensoras superficiais ou envolventes, sendo as características dos sinais detectados dependentes da configuração do sensor (Swartzendruber, 1993).

Quando o material é excitado pela unidade de magnetização, a bobina sensora posicionada em sua superfície detecta as variações que ocorrem no fluxo magnético, a partir das voltagens (V) induzidas devido à movimentação descontínua das fronteiras dos domínios (Krause, 1994), dadas pela lei de Faraday como:

$$V = - N d\phi / dt \quad (2.16)$$

sendo,

N o número de espiras da bobina

ϕ o fluxo magnético

t o tempo

O ruído magnético Barkhausen abrange uma ampla faixa de frequências, de cerca de 100 Hz a alguns MHz (Desvaux et al., 2004). Os sinais detectados pela bobina sensora são filtrados e amplificados utilizando-se ganhos de até 100 dB. A avaliação dos sinais Barkhausen emitidos pelo material é realizada utilizando-se filtros com determinadas frequências, denominadas frequências de análise, variando normalmente na faixa de 500 Hz a 1 MHz. A utilização de altas frequências de análise favorece a avaliação dos sinais provenientes de regiões próximas à superfície e a utilização de baixas frequências de análise favorece a avaliação de sinais provenientes de regiões mais profundas.

A seleção das frequências de análise depende da característica do material que se deseja avaliar. Na avaliação de componentes submetidos a tratamentos superficiais de endurecimento, para a determinação da espessura ou profundidade da camada endurecida, a utilização de altas frequências de análise possibilita a realização de avaliações quantitativas da espessura de camadas superficiais finas enquanto que a utilização de frequências de análise mais baixas favorecem a avaliação de camadas superficiais mais espessas (Theiner, 1988).

2.11 Medição das Deformações com Extensometria Convencional

O método mais utilizado para a medição de deformações em componentes estruturais é a extensometria, que pode ser definida como o conjunto de técnicas utilizadas para a medição de deformações sofridas por componentes e estruturas através da utilização de dispositivos denominados extensômetros elétricos.

Para a medição das deformações, os extensômetros são fixados na superfície da estrutura que deve ser monitorada. Quando a estrutura se deforma, sob a ação de carregamentos externos, carregamentos de trabalho ou de carregamentos produzidos durante as etapas de fabricação ou montagem, estas deformações são transmitidas ao extensômetro. Pela monitoração da deformação sofrida pelo extensômetro, pode-se determinar a deformação sofrida pelo componente e, conseqüentemente, as tensões atuantes.

2.11.1 Tipos de Extensômetros Convencionais

Os extensômetros elétricos podem ser resistivos, capacitivos, indutivos ou semicondutores, sendo de uso mais generalizado os extensômetros resistivos tipo lâmina, que consistem de uma resistência elétrica depositada sobre uma base flexível. São disponíveis extensômetros contendo um elemento sensor (unidirecionais); dois elementos

sensores (rosetas de dois elementos) ou três elementos sensores (roseta de três elementos). A configuração destes extensômetros pode ser observada na FIG. 2.11.

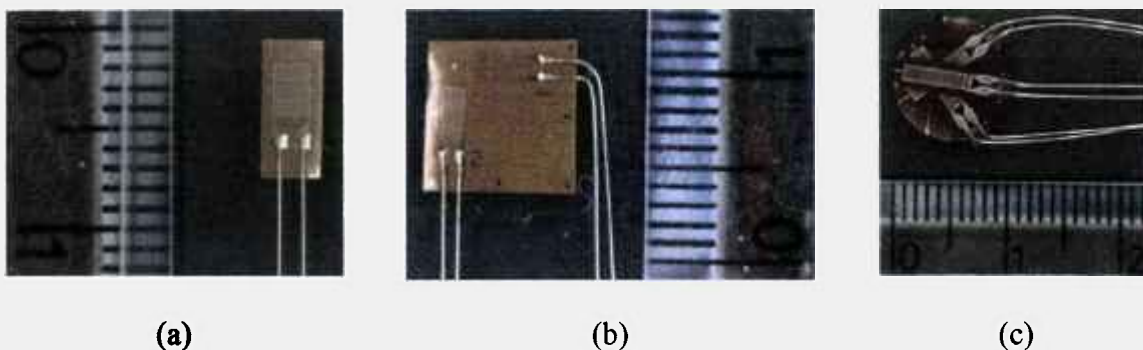


FIGURA 2.11 – Extensômetro unidirecional (a), roseta de dois elementos (b) e roseta de três elementos (c).

2.11.2 Seleção

A seleção de um extensômetro é feita considerando-se o tipo de material a ser avaliado, a precisão e a estabilidade necessárias, o valor esperado para as deformações nos materiais estudados, o tipo de carregamento aplicado e o tipo de informação desejada, o espaço disponível para instalação do extensômetro na superfície do material, o tempo de duração dos ensaios, a facilidade e a simplicidade de instalação e as condições ambientais (atmosfera, temperatura de utilização).

2.11.3 Preparação da Superfície

Para que as deformações sofridas pelo componente sejam integralmente transmitidas ao extensômetro, a superfície sobre a qual ele é fixado deve ser preparada de forma a apresentar um acabamento superficial adequado (rugosidade superficial), especificado pelo fabricante do extensômetro, a ausência de contaminantes como gorduras, óleos, graxas, poeira e a ausência de resíduos de oxidação.

Após a preparação, o extensômetro é fixado à superfície com o auxílio de um adesivo, selecionado de acordo com as características do extensômetro e das condições de teste. Adesivos normalmente utilizados são a base de Poliéster, Cianoacrilato, Epoxy, Polivinil Butiral e Fenol (TML Pam E-101O, 2000). Após a aplicação do adesivo é necessário um tempo de espera antes que a instalação seja utilizada, para que ocorra a cura do adesivo. O tempo de espera é função do tipo de adesivo utilizado. As etapas seguintes consistem na proteção do extensômetro e das regiões vizinhas com um recobrimento

especial, de forma a proteger o extensômetro de danos externos e a superfície da peça de oxidação superficial e a ligação dos terminais do extensômetro à instrumentação de medida.

2.11.4 Medição das deformações

As deformações sofridas pelo material são determinadas a partir das deformações sofridas pelo extensômetro. Isto é possível pela monitoração das variações que ocorrem na resistência do elemento sensor do extensômetro durante a deformação. A resistência elétrica inicial R_{in} do elemento sensor do extensômetro, que apresenta um comprimento inicial l , é definida como:

$$R_{in} = \rho \frac{l_s}{A_s} \quad (2.17)$$

sendo,

R_{in} a resistência elétrica inicial do elemento sensor em Ω

ρ a resistividade elétrica do material do elemento sensor em $\Omega \cdot m$

l_s o comprimento útil do elemento sensor do extensômetro em m

A_s a área da seção transversal do elemento sensor do extensômetro em m^2

Com a deformação do componente e a conseqüente deformação do extensômetro, o comprimento inicial do elemento sensor l sofre uma variação Δl e, conseqüentemente, a sua resistência elétrica inicial R_{in} sofre uma variação ΔR . A sensibilidade k do extensômetro é definida como:

$$k = \frac{\Delta R / R_{in}}{\Delta L / L} \quad (2.18)$$

A razão $\Delta l / l$ é denominada deformação unitária, sendo então definida como:

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad (2.19)$$

Desta forma, a deformação ε sofrida pelo extensômetro e, conseqüentemente, pelo material pode ser determinada por:

$$\varepsilon = \frac{1}{k} * \frac{\Delta R}{R_{i..}} \quad (2.20)$$

sendo,

k a sensibilidade do extensômetro

ε a deformação unitária

A variação da resistência do elemento sensor com a deformação apresenta um comportamento linear, sendo uma medida da deformação média do componente na região situada sob o extensômetro.

O valor da sensibilidade k do extensômetro é dependente do material utilizado como elemento sensor, apresentando valores aproximados de 2,05 para Constantan, 2,1 para Karma, 2,2 para Nichrome V e 4 para ligas Platina-Tungstênio

A resistência inicial e a sensibilidade do elemento sensor do extensômetro são fatores conhecidos, fornecidos pelos fabricantes junto com a documentação de cada extensômetro. Pela monitoração da variação da resistência pode-se determinar a deformação sofrida pelo extensômetro e, portanto, pelo componente ou estrutura monitorada.

O método mais utilizado para se medir as variações de resistência que ocorrem no extensômetro é o método da ponte de Wheatstone, onde o extensômetro faz parte de um ou mais braços da ponte. Na ausência de deformação a ponte se encontra em equilíbrio. Com a deformação e a conseqüente variação da resistência do extensômetro, a ponte sofre um desbalanceamento que é proporcional à deformação. Um outro método, que foi o adotado neste trabalho, é a medida direta das variações da resistência do extensômetro, que apresenta a vantagem de eliminar os efeitos de variação da temperatura e do comprimento dos cabos, que interferem com as medições ao se usar um circuito de Ponte de Wheatstone.

Nas situações em que o estado de tensões presente é o estado uniaxial de tensões, como o existente em barras submetidas a esforços de tração e compressão simples, a tensão máxima de tração ou compressão ocorre na direção do carregamento aplicado. O valor da tensão em uma determinada direção pode ser obtido a partir de:

$$\sigma_{(\varphi)} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} (1 + \cos 2\varphi) \quad (2.21)$$

sendo,

$\sigma_{(\varphi)}$ o valor da tensão na direção de interesse

$\sigma_{(\max)}$ o valor da tensão máxima atuante

φ o ângulo formado entre a direção de carregamento e a direção de interesse

Para o estado uniaxial de tensões, dentro da região elástica do material, as tensões podem ser determinadas através das deformações utilizando-se a Lei de Hooke, expressa por:

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (2.22)$$

sendo:

σ o valor da tensão normal atuante no componente

ε o valor da deformação mecânica

E o módulo de elasticidade do material

Nas situações em que o estado de tensões presente é o estado biaxial de tensões, as tensões atuantes podem ser determinadas a partir da Lei de Hooke por:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (2.23)$$

e

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (2.24)$$

Sendo:

σ_x a tensão na direção x (MPa)

σ_y a tensão na direção y (MPa)

ε_x a deformação na direção x

- ε_y a deformação na direção y
 ν o coeficiente de Poisson do material
 E o módulo de elasticidade do material (MPa)

Para uma roseta com três elementos, defasados de 0° , 45° e 90° entre si, o valor e a direção das tensões principais atuantes podem ser determinados a partir de:

$$\sigma_{\max,\min} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \mu} \pm \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right] \quad (2.25)$$

e

$$\varphi_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (2.26)$$

sendo,

σ_{\max} a tensão principal máxima (MPa)

σ_{\min} a tensão principal mínima (MPa)

ε_1 a deformação na direção 1

ε_2 a deformação na direção 2

ε_3 a deformação na direção 3

φ_p o ângulo que uma das tensões principais forma com o extensômetro nº 1 da roseta, de acordo com o critério abaixo:

Se $\varepsilon_1 > \varepsilon_3 \Rightarrow \varphi_p$ é de σ_{\max}

Se $\varepsilon_1 < \varepsilon_3 \Rightarrow \varphi_p$ é de σ_{\min}

Se $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ e $\varepsilon_2 < \varepsilon_1 \Rightarrow \varphi_p = -45^\circ$ é de σ_{\max}

Se $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ e $\varepsilon_2 > \varepsilon_1 \Rightarrow \varphi_p = +45^\circ$ é σ_{\max}

2.12 Determinação de Tensões Residuais pelo Método do Furo Central

O método do furo central, para a medição das tensões residuais atuantes em um material, componente ou estrutura, é um método padronizado pela ASTM (ASTM E 837, 2001). Ele consiste na introdução de um furo na superfície do material examinado e na monitoração do alívio local das tensões que ocorre no material devido à introdução do furo.

O processo utilizado para a usinagem do furo na região de interesse não deve modificar o padrão de tensões residuais presentes no material, ou seja, não deve introduzir um padrão de tensões residuais adicional. Vários processos tem sido avaliados tais como o de jato de partículas abrasivas e a fresagem com altas rotações utilizando-se turbinas a ar, dentre outros, havendo limitações na utilização de cada um deles.

As tensões são calculadas a partir da medida das deformações que ocorrem no material devido à introdução do furo, medidas através de uma roseta de três elementos. A roseta é constituída por três extensômetros elétricos montados sobre uma base especial. No centro da roseta existe um pequeno anel com indicadores, utilizados para tornar mais fácil a centralização do sistema de furação. Dispostos ao redor do anel central se encontram três extensômetros, orientados na direção radial e equidistantes do centro da roseta, dois deles defasados de 90° entre si e o terceiro alinhado com a bissetriz dos outros dois, de forma a facilitar o cálculo das tensões residuais a partir das deformações lidas em cada extensômetro (MM TN 503, 1996). Para a realização deste trabalho utilizaram-se rosetas para medição de tensões residuais do tipo EA-06-060RE-120, fabricadas pela MM (MM Precision Strain gages, 2000) e que pode ser observada na FIG. 2.12.

Após a escolha da região de interesse para a determinação das tensões residuais, a superfície do material deve ser preparada para permitir a fixação adequada da roseta, de maneira a assegurar a obtenção de medidas confiáveis. O processo de preparação segue os mesmos passos utilizados para a instalação de extensômetros convencionais, ou seja, o condicionamento mecânico e químico da superfície do material sobre o qual a roseta será fixada, seguindo-se do posicionamento, da colagem da roseta e de um tempo de espera para a cura do adesivo. A seguir fazem-se as ligações dos terminais dos extensômetros que constituem a roseta com a instrumentação utilizada para a execução das medidas e protege-se a sua superfície com um recobrimento especial.

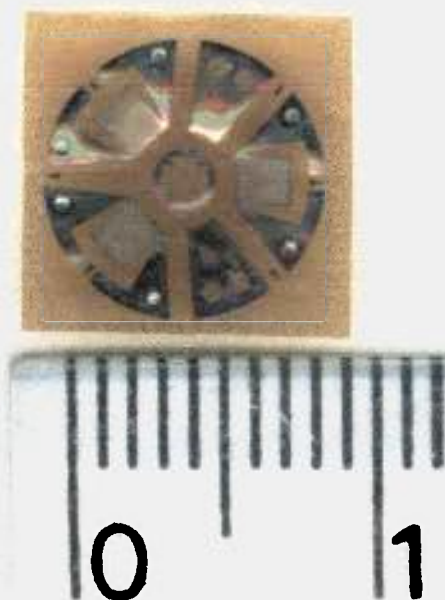


FIGURA 2.12 – Roseta tipo EA-06-060RE-120 MM utilizada para a medição de tensões residuais.

Finda a preparação, posiciona-se o dispositivo de furação utilizado para a usinagem do furo, de modo que o eixo da ferramenta permaneça alinhado com o centro do anel existente na roseta. A seguir faz-se a leitura das resistências iniciais de cada elemento sensor (referências) e inicia-se então a usinagem gradual do furo, fazendo-se a leitura das deformações aliviadas após o término de cada etapa de furação. Com os valores das deformações aliviadas em cada etapa, determinam-se então os valores das tensões principais atuantes no material bem como a sua orientação para cada uma das profundidades atingidas em cada etapa de furação (ASTM E 837, 2001) e (MM TN 503, 1996).

O método do furo central a partir da padronização ASTM pode ser aplicado na determinação de tensões residuais em todos os casos em que as tensões não variem significativamente com a profundidade e que não excedam à metade da tensão de escoamento do material (ASTM E 837, 2001).

3 METODOLOGIA

A utilização dos métodos eletromagnéticos (JILES, 1998) para o ensaio de materiais estruturais pode ser dividida em duas categorias principais. Na primeira, a finalidade dos ensaios é a detecção e o dimensionamento de descontinuidades que possam comprometer o uso de um componente ou equipamento (como trincas de resfriamento ou de fadiga), fabricado a partir de um determinado material. Na segunda categoria, a finalidade dos ensaios é a caracterização de um determinado material, abrangendo aspectos como a quantificação de suas características microestruturais, determinação de suas propriedades físicas e a determinação do estado de tensões presente no mesmo. Um exemplo clássico de um método de ensaio eletromagnético utilizado com estas finalidades é o método de ensaio por correntes parasitas, com o seu uso já bem definido por normas, como a ASTM, para diversas aplicações.

Os métodos eletromagnéticos de ensaios não destrutivos apresentam alguns aspectos fundamentais, que devem ser considerados tanto para definir o seu campo de aplicação como as suas limitações. O primeiro é que eles são métodos de ensaio superficiais. Isto significa que as regiões de um determinado material que podem ser avaliadas por estes métodos se restringem àquelas próximas à sua superfície, sua profundidade variando em função das características do sistema de ensaio utilizado e das propriedades elétricas e magnéticas do material examinado. Sendo ensaios superficiais, fatores como a rugosidade superficial e a presença de camadas de recobrimento ou de óxido em sua superfície podem exercer uma forte influência nos resultados dos ensaios. Um segundo aspecto de importância é que eles são influenciados por todas as características do material que possam produzir variações em sua condutividade elétrica e permeabilidade magnética. Conseqüentemente, características da microestrutura como o tamanho de grão e as fases presentes, a dureza superficial, a composição química e o processamento térmico e mecânico devem ser conhecidos nos materiais em estudo, de forma a permitir a elaboração de procedimentos adequados para a sua avaliação. O terceiro aspecto a ser considerado é a dependência da geometria de ensaio. A posição relativa dos sensores e do material examinado deve ser mantida inalterada durante os experimentos, de forma a manter a coerência dos resultados. Embora haja referências de que o erro devido ao posicionamento do sensor na superfície do material examinado (colocação e retirada do sensor) seja de cerca de 2% (Tiitto, 1996), na maior parte das situações é necessária a fabricação de dispositivos de posicionamento que possibilitem a realização dos ensaios

mantendo a mesma geometria de inspeção, sendo o posicionamento citado como uma das grandes razões das dispersões do ensaio (Flammini, 2001). O quarto aspecto é a necessidade de padrões que permitam a calibração do sistema de ensaio para a avaliação das características de interesse do material. Os padrões devem ser selecionados de forma que, após o processo de calibração, a característica do material que se necessita avaliar seja a que produza as maiores variações no sistema de ensaio durante o exame do material. Assim, quanto mais a característica que se deve avaliar no material seja evidente no padrão de calibração, mais precisos os resultados das avaliações. Desta forma, para atingir os objetivos propostos no trabalho, adotou-se a seguinte metodologia experimental:

- Seleção dos materiais a serem examinados;
- Caracterização dos materiais selecionados;
- Definição dos corpos de prova e padrões para a calibração do sistema de ensaio e projeto e fabricação de dispositivos e acessórios para a realização dos experimentos;
- Determinação dos parâmetros mais adequados para a realização do ensaio;
- Avaliação dos fatores que influenciam nos resultados do ensaio;
- Elaboração de procedimentos para a calibração do sistema de ensaio;
- Validação dos procedimentos propostos.
- Descrição da metodologia básica para a realização do ensaio magnetoelástico.

3.1 Seleção dos Materiais

Devido aos resultados obtidos nos primeiros experimentos realizados neste trabalho, verificou-se a necessidade da realização dos estudos em mais de um material, de forma a possibilitar uma melhor avaliação do comportamento do sistema e dos parâmetros básicos do ensaio no exame de materiais ferromagnéticos. Os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram selecionados considerando-se a sua importância como materiais estruturais, conforme descrição a seguir:

Aço ASTM A 36 – aço de qualidade estrutural utilizado na construção de estruturas rebitadas, parafusadas e soldadas de pontes e edifícios e para aplicações estruturais em geral (ASTM A 36/A 36M, 2000).

Aço ASTM A 515 – aços para a fabricação de caldeiras e vasos de pressão (ASTM A 515/A 515M, 2000).

USI SAC 50 – aços estruturais para estruturas e equipamentos em que a soldabilidade e a resistência à corrosão atmosférica são os requisitos primordiais (Usiminas, 2000).

Aço 20 MnMoNi55 – aço utilizado na tubulação principal do refrigerante do reator, vaso de pressão do reator, no pressurizador e no casco do gerador de vapor da Usina Nuclear Angra 2.

Os experimentos foram dirigidos inicialmente para os aços ASTM A 36 e A 515, devido à disponibilidade destes materiais para a fabricação de corpos-de-prova de calibração e corpos-de-prova simulando estruturas reais. A seguir foram realizados experimentos com o aço USI SAC 50, devido à disponibilidade do mesmo e à sua aplicabilidade. Após o estabelecimento de uma metodologia para a avaliação destes materiais, os estudos foram direcionados para o aço 20MnMoNi55, de forma a verificar o comportamento do sistema de ensaio com relação a este material.

3.2 Caracterização dos Materiais

3.2.1 Composição Química

A análise química dos materiais em estudo foi realizada em um Espectrômetro de Emissão Ótica ARL – Modelo 3560 OES.

3.2.2 Ensaio Mecânicos

Os ensaios de tração foram executados segundo condições padronizadas (ASTM E 8 M, 1996). Os ensaios foram realizados em uma Máquina de Ensaio Universal Instron com capacidade para 100.000 N. Para os aços ASTM A 36 e ASTM A 515, foram retiradas amostras das chapas utilizadas nas direções de laminação, na direção perpendicular à direção de laminação e na direção a 45° das mesmas, para a preparação de corpos de prova para ensaios de tração. Foram preparados três corpos de prova para cada uma das direções citadas. Para o aço USI SAC 50 foram retiradas amostras apenas na direção paralela à direção de laminação, devido às dimensões do material disponível, tendo sido preparados três corpos de prova para esta condição. Após usinados, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de metrologia dimensional para verificação da conformidade com a normalização utilizada e a ensaios de dureza (ASTM E 92-82, 1996). A seguir foram

instrumentados com extensômetros elétricos resistivos tipo FCA-1-11-TML (TML, 2005), para possibilitar a monitoração das deformações na região elástica durante os ensaios de tração e para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson dos materiais. Também foi utilizado um Clip-Gage para a monitoração das deformações nas regiões elástica e plástica. Os corpos de prova e a montagem utilizada para a realização dos ensaios podem ser observados na FIG. 3.1.

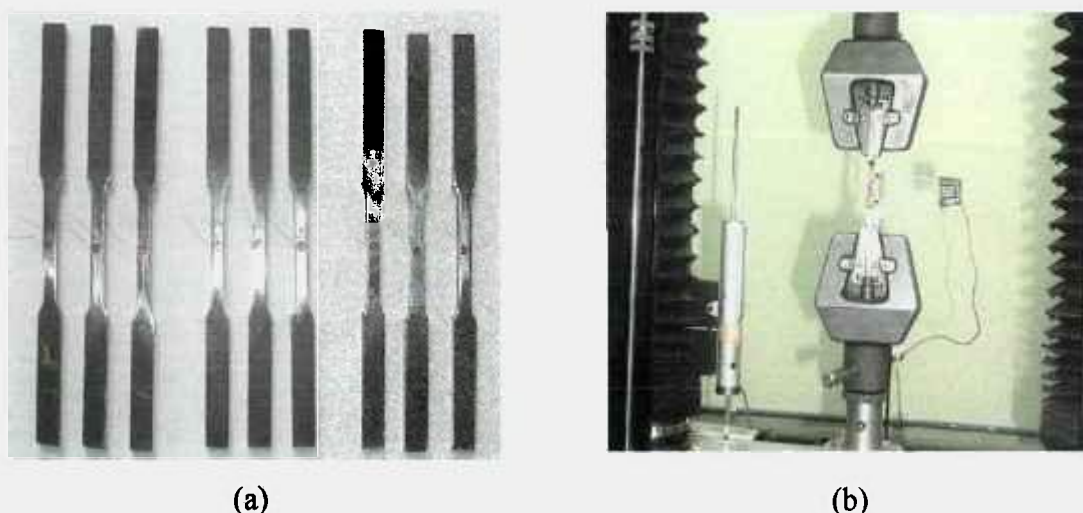


FIGURA 3.1. Corpos de prova de tração instrumentados com rosetas de dois elementos tipo FCA-1-11-TML (a) e montagem utilizada para os ensaios de tração (b).

O certificado com os resultados dos ensaios de tração para os aços ASTM A 36, ASTM A 515 e USI SAC 50, realizados no CDTN, podem ser observados no APÊNDICE A. No APÊNDICE A também está a cópia do certificado de ensaio do aço 20 MaMoNi 5, emitido pela empresa alemã KWU, fornecedora do produto.

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados em um Durômetro Wolpert, utilizando-se uma carga de 100 N.

3.2.3 Microestrutura

As amostras destinadas à análise metalográfica foram retiradas de forma a permitir a avaliação da superfície do material paralela à direção de laminação (superfície D), da seção longitudinal do material paralela à direção de laminação e perpendicular à superfície de laminação (superfície E) e da seção transversal do material (superfície F) (ASTM E 3, 2001). A posição de retirada das amostras está indicada na FIG. 3.2.

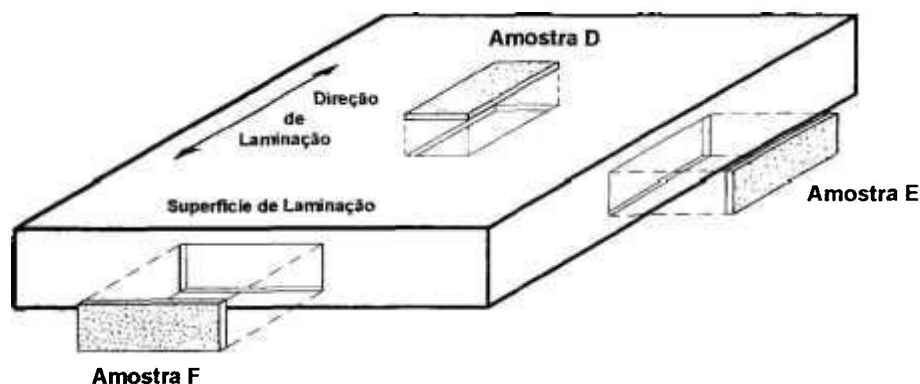


FIGURA 3.2. Posição para retirada de amostras para análise metalográfica (ASTM E 3, 2001).

O corte das amostras foi feito utilizando-se o equipamento de corte Discotom – STRUERS. Após as operações de corte, as amostras foram embutidas a quente com resina (baquelite) utilizando-se o equipamento Labopress-3 – Struers.

O lixamento/polimento das amostras, após o embutimento, foi executado em uma politriz automática Phoenix 4000 - Buehler. Foram utilizadas nas etapas de lixamento/desbaste lixas de carboneto de silício 3M, com granulometrias 80, 120, 180, 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000. Para as etapas de polimento foram utilizadas pastas de diamante Buehler, com granulometrias de 3 μm e 1/4 μm . As condições e os parâmetros utilizados na preparação das amostras estão registrados no APÊNDICE B.

Após a preparação, as amostras foram atacadas com solução de Nital a 2% para possibilitar a análise da microestrutura e a determinação do tamanho médio de grão. As amostras do material 20MnMoNi55 foram preparadas e atacadas com o mesmo procedimento usado para as amostras de aço carbono. Após o ataque as amostras foram observadas e fotografadas utilizando-se o microscópio Ortholux II POL-BK – Leitz.

3.2.4 Determinação do Tamanho Médio de Grão

O tamanho médio dos grãos das amostras foi determinado utilizando-se o software Quantikov Image Analyzer (Pinto, 2003). Não foi determinado o tamanho de grão das amostras de 20MnMoNi55 devido às dificuldades apresentadas para a visualização da sua microestrutura. Os relatórios emitidos podem ser observados no APÊNDICE C.

3.3 Corpos de Prova

Uma característica inerente aos métodos de ensaios não destrutivos é que eles são métodos comparativos e, portanto, necessitam de padrões de comparação para a avaliação de um determinado componente ou material. O tipo de padrão ou de corpo de prova utilizado como referência para a calibração do sistema de ensaio é dependente de qual característica do material deve ser avaliada. Ensaio eletromagnéticos são afetados pelas características microestruturais e pelo estado de tensões existentes nos componentes ou materiais testados, fato que deve ser levado em consideração durante o projeto e a seleção dos padrões de referência que devem ser utilizados para uma determinada aplicação. Para ensaios eletromagnéticos padronizados, como o ensaio por correntes parasitas, uma recomendação básica é o uso de padrões de referência com as mesmas características físicas, químicas e metalúrgicas que as do componente testado (ASME V – A 8, 2001). Neste método de ensaio, variações na microestrutura ou a presença de descontinuidades (trincas e inclusões) no material sob teste produzem variações locais em sua condutividade elétrica e permeabilidade magnética que, por sua vez, produzem variações na impedância do sistema de ensaio. No ensaio magnetoelástico, variações na microestrutura e a presença de descontinuidades ou de campos de tensões no material provocam alterações no movimento das paredes de Bloch durante o processo de magnetização, ocasionando uma variação nas características do ruído magnético Barkhausen resultante ((Kroning et al, 1997). Desta forma, todas as características que possam provocar alterações nos resultados do ensaio devem ser consideradas durante o projeto dos padrões de referência.

Os padrões utilizados no desenvolvimento deste estudo foram obtidos a partir das mesmas chapas utilizadas para a construção da estrutura usada para a validação da metodologia proposta na conclusão do trabalho.

O corte das peças para a confecção dos corpos de prova a partir das chapas de aço ASTM A 36, ASTM A 515 e USI SAC 50 foi feito em um equipamento de corte a plasma PC Plasmet – Messer Griesheim. O corte foi efetuado sob condições controladas, de forma a não provocar um aquecimento excessivo das chapas. As peças destinadas aos corpos de prova foram cortadas de forma que a região útil permanecesse distante 25 mm da região de corte, de forma a não haver alterações microestruturais na mesma. O corte final para a retirada de amostras foi executado por processo a laser e de forma a não alterar a microestrutura das amostras retiradas na região de interesse. Para o aço 20 MaMoNi55 o corte foi feito apenas por processo a laser. As chapas destes materiais após a realização do

corte podem ser observadas na FIG. 3.3.



FIGURA 3.3. Corte das chapas para retirada de amostras para fabricação de corpos de prova para os aços ASTM A 36, A 515 e USI SAC 50 (a) e 20 MnMoNi55 (b).

Os corpos de prova e dispositivos auxiliares estão descritos a seguir.

3.3.1 Vigas de Isoflexão

Para verificar o comportamento dos materiais sob condições de carregamento uniaxial no regime elástico foram utilizados corpos de prova com a forma de vigas de isoflexão, similares às utilizadas para determinação das características de desempenho de extensômetros elétricos (ASTM E 251, 2001). O projeto detalhado das vigas utilizadas pode ser observado no APÊNDICE D.

As vigas foram fabricadas a partir de chapas dos materiais em estudo, para conservar todas as características dos materiais avaliados. Foram usinadas duas vigas para cada material, uma delas com o eixo longitudinal paralelo à direção de laminação das chapas e a outra com o eixo longitudinal perpendicular à mesma. As medições realizadas durante a etapa de calibração do sistema de ensaio também foram feitas nestas duas direções.

Como o objetivo do estudo é a verificação do comportamento do método de ensaio magnetoelástico para a avaliação de tensões mecânicas, as vigas, após usinadas, foram submetidas a um tratamento térmico para alívio de tensões. Para o tratamento térmico foi utilizado um forno de resistência a vácuo Leybold Workhorse, para evitar a oxidação da superfície das vigas. As vigas foram colocadas no forno, aquecidas até a temperatura de 650°C, na qual permaneceram durante 15 minutos para uniformização da temperatura (Chiaverini, 2002) e, a seguir, foram resfriadas no próprio forno. Para confirmar a não

introdução de alterações na microestrutura devido ao tratamento térmico, foram retiradas amostras adicionais que foram tratadas juntamente com as vigas e depois preparadas para análise metalográfica, para comparação com as amostras examinadas antes do tratamento, não sendo verificadas alterações.

Após o tratamento térmico as vigas foram submetidas a ensaios de metrologia dimensional e instrumentadas com rosetas de três elementos tipo KFG-5-120-C1-11 e KFG-5-120-D17-11, ambas fabricadas pela Kyowa (Kyowa, 2004). As características das rosetas utilizadas podem ser observadas na TAB. 3.1.

TABELA 3.1 – Características das rosetas utilizadas nas vigas de isoflexão.

Viga	Roseta			
	Tipo	Denominação	Constante (K)	Resistência (Ω)
ASTM A 36 0°		KFG-5-120-C1-11	2,12±1,0%	120,2±0,2
ASTM A 36 90°	Roseta de três elementos	KFG-5-120-C1-11	2,12±1,0%	120,2±0,2
ASTM A 515 0°		KFG-5-120-C1-11	2,12±1,0%	120,2±0,2
ASTM A 515 90°		KFG-5-120-C1-11	2,12±1,0%	120,2±0,2
USI SAC 50 0°		KFG-5-120-D17-11	2,11±1,0%	120,4±0,4
USI SAC 50 90°		KFG-5-120-D17-11	2,11±1,0%	120,4±0,4

O local de instalação das rosetas nas vigas pode ser observado na Fig. 3.4 e um conjunto de vigas instrumentadas pode ser observado na FIG. 3.5.

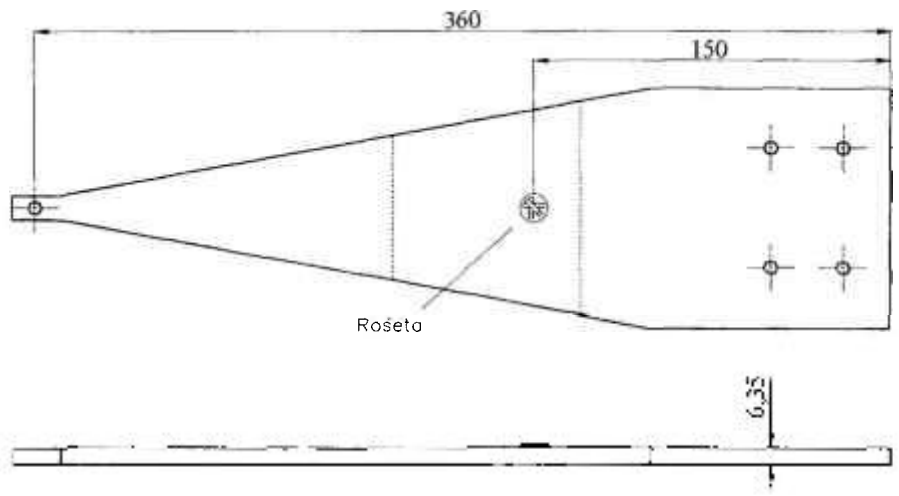


FIGURA 3.4 – Posição de instalação das rosetas nas vigas de isoflexão.

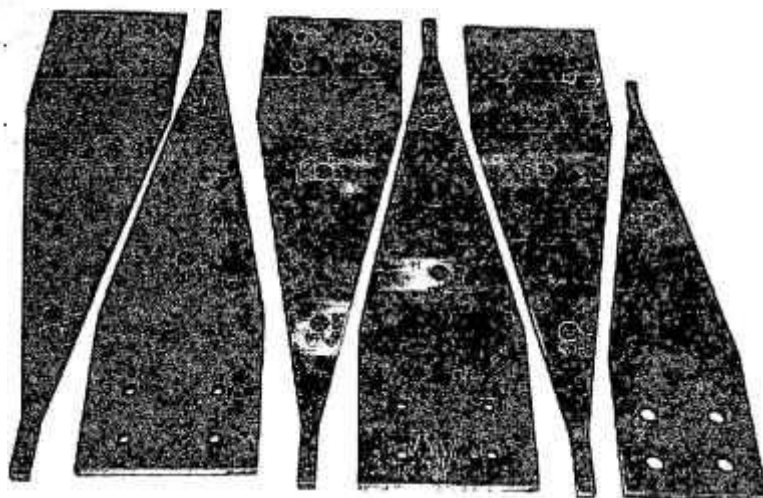


FIGURA 3.5 – Vigas de isoflexão instrumentadas.

Vários trabalhos consultados citaram a utilização de vigas engastadas para a calibração do sistema de ensaio (Moorthy et al., 2004). Entretanto, neste trabalho, optou-se pelo uso de vigas do tipo isoflexão. A escolha de corpos de prova do tipo viga de isoflexão para a avaliação do comportamento dos materiais sob carregamento uniaxial apresenta algumas vantagens. Um dispositivo que aplica carregamentos através de esforços de flexão possibilita a obtenção de altos valores de tensões em suas superfícies (superior e inferior) com a aplicação de carregamentos relativamente pequenos. Isto torna possível a realização dos experimentos com uma facilidade bem maior do que com a utilização de dispositivos que trabalham com carregamentos axiais. Outra vantagem, a mais importante para a realização deste trabalho, é que as vigas de isoflexão, devido à sua geometria, apresentam em um mesmo plano, paralelo à sua superfície, o mesmo valor de tensão para um dado carregamento aplicado. Esta característica é interessante porque quando se utilizam vigas com seção constante para esta finalidade, com uma de suas extremidades engastada e com o carregamento aplicado na outra extremidade, o momento atuante na seção da viga varia de forma crescente desde o ponto de aplicação do carregamento até o engaste. Nas vigas de isoflexão, o aumento do momento atuante é compensado pelo aumento da seção resistente da viga, de forma que a tensão gerada ao longo da viga, em um mesmo plano, permanece constante.

Na calibração do sistema de ensaio, as deformações sofridas pela viga foram monitoradas utilizando-se extensômetros elétricos resistivos, neste caso específico, rosetas de três elementos. Estes extensômetros possuem dimensões finitas e, as deformações medidas através deles representam o valor médio das deformações que ocorrem no

material sob os mesmos. Assim, em uma viga com seção constante, a deformação medida pelo extensômetro e, conseqüentemente, a tensão atuante determinada, corresponde à tensão média que ocorre na superfície do material ao longo do comprimento do elemento sensor do extensômetro. No caso das vigas de isoflexão, como as deformações e, conseqüentemente as tensões na superfície da viga não sofrem variações ao longo de seu comprimento, a tensão determinada corresponde à tensão real atuante na viga. O mesmo efeito ocorre para o sensor da sonda magnetoelástica utilizado para a detecção do ruído magnético Barkhausen. O sensor da sonda utilizada possui um diâmetro de 15 mm e é sensível às variações de tensões que ocorrem na região do material em que está localizado. Da mesma forma que para o extensômetro, a utilização de uma viga de isoflexão para a calibração do sistema de ensaio, gerando valores iguais de tensão na região onde se localiza o sensor, torna mais fácil o estabelecimento de uma relação entre o valor RMS do ruído magnético Barkhausen e a tensão mecânica atuante. Assim o uso deste tipo de viga, para a calibração do sistema de ensaio sob condições de carregamento uniaxiais, possibilita um aumento na precisão das medições realizadas, sendo uma inovação para este tipo de aplicação.

3.3.2 Dispositivo de Carregamento por Flexão

Para a aplicação dos carregamentos nas vigas foi desenvolvido, neste trabalho, um dispositivo de carregamento por flexão, conforme pode ser observado na FIG. 3.6.

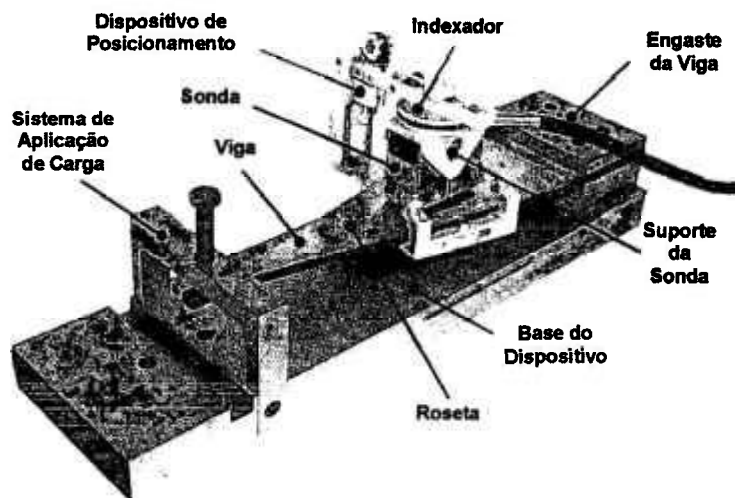


FIGURA 3.6 – Dispositivo de carregamento para vigas de isoflexão.

O dispositivo foi projetado com as seguintes características:

a) Possibilitar a aplicação de carregamentos que produzam deformações nas vigas que gerem tensões de tração e de compressão em sua superfície – foram previstas duas formas de aplicação de carregamentos nas vigas. Na primeira, um sistema de parafusos, apoiados na extremidade da viga, em sua parte superior ou inferior, possibilita a sua flexão, gerando esforços de compressão e de tração em sua superfície. Na segunda, estes esforços são gerados por um sistema de polia e de peso morto. A base do dispositivo garante rigidez suficiente para possibilitar a aplicação de esforços que produzam tensões próximas aos limites de escoamento à tração e à compressão para aços de uso geral. O perfil das tensões gerado pela aplicação de um carregamento na extremidade da viga de isoflexão pode ser observado na FIG. 3.7. As tensões máximas de tração ou compressão ocorrem nas superfícies da viga.

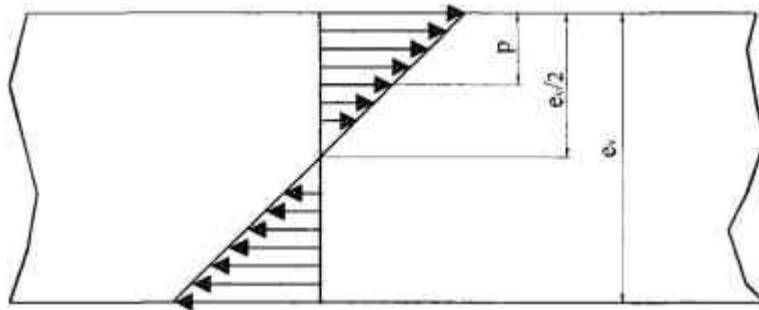


FIGURA 3.7 – Distribuição de tensões em uma viga de isoflexão sob carregamento. Dependendo da direção de aplicação da carga as tensões na superfície podem ser de tração ou compressão.

A tensão atuante em uma profundidade p pode ser determinada por:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= e_v/2 \\ \sigma_p &= e_v/2 - p \end{aligned} \quad (3.1)$$

sendo,

σ_s a tensão na superfície da viga

σ_p a tensão a uma profundidade p (p entre 0 e $e_v/2$)

e_v a espessura da viga

b) Manter constante a posição e a pressão da sonda contra a superfície da viga durante a sua utilização – um dispositivo de posicionamento da sonda possibilita a sua fixação ao longo da viga e um sistema de molas adaptado ao dispositivo assegura uma pressão

constante da sonda contra a superfície da viga. O dispositivo pode ser observado na FIG. 3.8.

c) Possibilitar a variação do ângulo que a direção do campo magnético de excitação faz com a direção de aplicação do carregamento na viga - um sistema de indexação, montado na parte superior do suporte da sonda, possibilita a variação entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da viga, em intervalos de 15° .

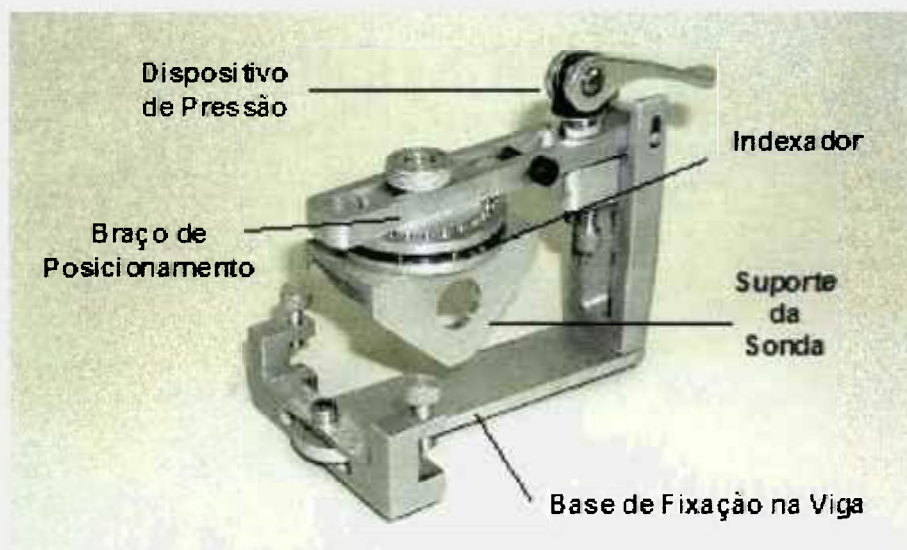


FIGURA 3.8. Dispositivo de suporte da sonda magnetoelástica na viga de isoflexão.

No local de posicionamento do sensor eletromagnético nas vigas, para a realização das medições do ruído magnético Barkhausen, foram realizadas medições para a determinação da rugosidade superficial. Utilizou-se um rugosímetro TAYLOR-ROBSON, modelo TALYSURF 10. Foram realizadas três medições na região de interesse, sendo cada uma delas a média de 5 leituras realizadas pelo equipamento.

3.3.3 Corpos de Prova para Estudos de Deformação

Para monitorar o comportamento do ruído magnético Barkhausen durante as etapas de deformação elástica e plástica, foram utilizados corpos de prova com a geometria indicada na FIG. 3.9. O projeto do corpo de prova pode ser observado no APÊNDICE E.

Foram preparados corpos de prova com eixo longitudinal paralelo à direção de laminação. Após a usinagem, eles foram submetidos ao mesmo tratamento térmico das vigas de isoflexão e instrumentados com rosetas de dois elementos do tipo FCA-1-11-TML (TML, 2005). Foi ensaiado um corpo de prova de aço ASTM A 36, com eixo longitudinal

paralelo à direção de laminação das chapas. O ensaio foi realizado na mesma máquina de ensaio utilizada para os ensaios de tração. Neste corpo de prova foi instalado um clip-gage e fixada a sonda para medição do ruído magnético Barkhausen durante a deformação, tendo sido monitorada a emissão do ruído durante a fase de deformação elástica e em parte da fase de deformação plástica. Neste ensaio, além de registrado o valor RMS em diferentes carregamentos, foi ainda adquirido o ruído através da placa de aquisição de dados NI-PCI 7080 e do software LabView, para análise posterior. Após o ensaio do corpo de prova de ao ASTM A 36, a máquina de ensaios de tração sofreu uma manutenção e, na retomada dos trabalhos, ocorreu a introdução de um ruído no sistema de ensaio que não foi possível eliminar, provocando o encerramento dos testes naquele equipamento.



FIGURA 3.9. Corpo de Prova para estudos de deformação sob carregamentos de tração.

3.3.4 Corpo de Prova para Carregamentos Biaxiais

O corpo-de-prova para carregamento biaxial, projetado para utilização neste trabalho, é do tipo cruciforme e pode ser observado na FIG. 3.10.

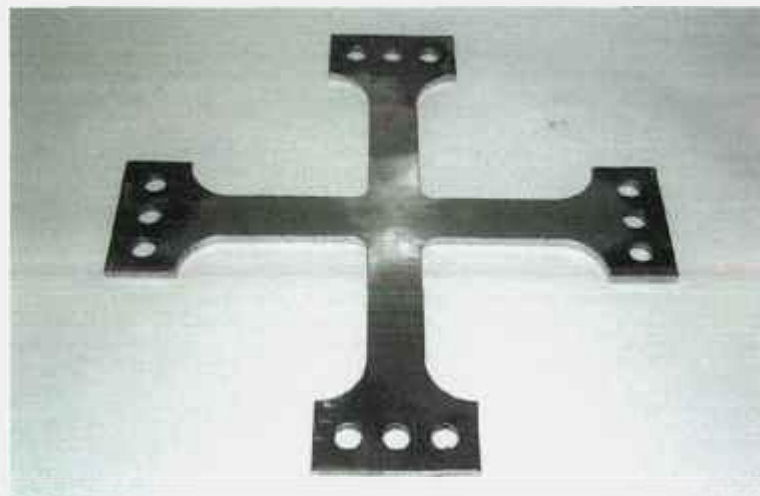


FIGURA 3.10. Corpo de Prova cruciforme para estudos com carregamentos biaxiais.

Da mesma forma que para as vigas de isoflexão, a direção de retirada da peça da chapa utilizada para a fabricação deste tipo de corpo-de-prova é extremamente importante. Assim, o eixo longitudinal de um dos braços do corpo-de-prova coincide com a direção de laminação do material e o eixo longitudinal do outro, com a direção perpendicular à mesma. Este tipo de corpo de prova foi montado em um dispositivo construído para permitir a aplicação de carregamentos que possibilitam o aparecimento de um estado biaxial de tensões em sua superfície. O projeto deste corpo de prova pode ser observado no APENDICE D.

3.3.5 Dispositivo de Carregamento Biaxial

O dispositivo de carregamento trabalha com a aplicação de carregamentos axiais, aplicados por parafusos. Para evitar esforços de torção o dispositivo possui quatro guias de alinhamento e, durante a aplicação de esforços, o deslocamento do corpo de prova no dispositivo é controlado através de relógios comparadores. As deformações no corpo de prova cruciforme, foram medidas utilizando-se extensômetros simples do tipo FLA – 3 – 11 (TML, 2005). O dispositivo de carregamento para esforços biaxiais pode ser observado na FIG. 3.11.



FIGURA 3.11. Dispositivo para a aplicação de esforços biaxiais no corpo de prova cruciforme.

3.3.6 Corpos de Prova para Medições de Tensões

Para a determinação de tensões de carregamento em estruturas, após a fase de calibração, foi utilizado o corpo de prova apresentado na FIG. 3.12.



FIGURA 3.12. Corpo de Prova soldado simulando uma estrutura s para validação do processo de determinação de tensões pelo ensaio magnetoelástico.

O corpo de prova foi projetado para atuar como uma treliça e foi instrumentado com duas rosetas de três elementos do tipo KFG – 5 – 120 – D17 – 11 (Kyowa, 2004). O corpo de prova foi construído com chapas de aço ASTM A 36, COM 6,35 mm de espessura, com eixo longitudinal perpendicular à direção de laminação, a partir das mesmas chapas usadas para os demais experimentos. Uma das rosetas foi posicionada em sua base e a outra em uma de suas laterais conforme pode ser observado na FIG. 3.13, nas regiões indicadas com um círculo.



(a)



(b)

FIGURA 3.13. Posição da sonda no corpo de prova para a realização de medições na região de tração (a) e na região de compressão (b) do corpo de prova instrumentado. A posição da sonda e do extensômetro, em cada superfície, está indicada pelo círculo branco.

A sonda magnetoelástica foi posicionada na mesma região das rosetas durante os carregamentos. Neste local a superfície foi preparada com lixa 320 3M. Após a instrumentação o corpo de prova foi montado em uma prensa com capacidade para 120.000 N, para a aplicação dos carregamentos de teste, conforme mostrado na FIG. 3.14. Os carregamentos foram aplicados na parte superior do corpo de prova, gerando esforços de compressão em suas laterais e esforços de tração em sua base. Foram aplicados carregamentos de até 60.000 N no corpo de prova. A partir deste valor a montagem se tornou instável e o ensaio foi interrompido. Para cada carregamento aplicado as leituras de cada elemento sensor das rosetas foram registradas. O mesmo procedimento foi adotado para o registro do ruído magnético Barkhausen, tendo sido registrado o ruído para cada par frequência de excitação/frequência de análise.

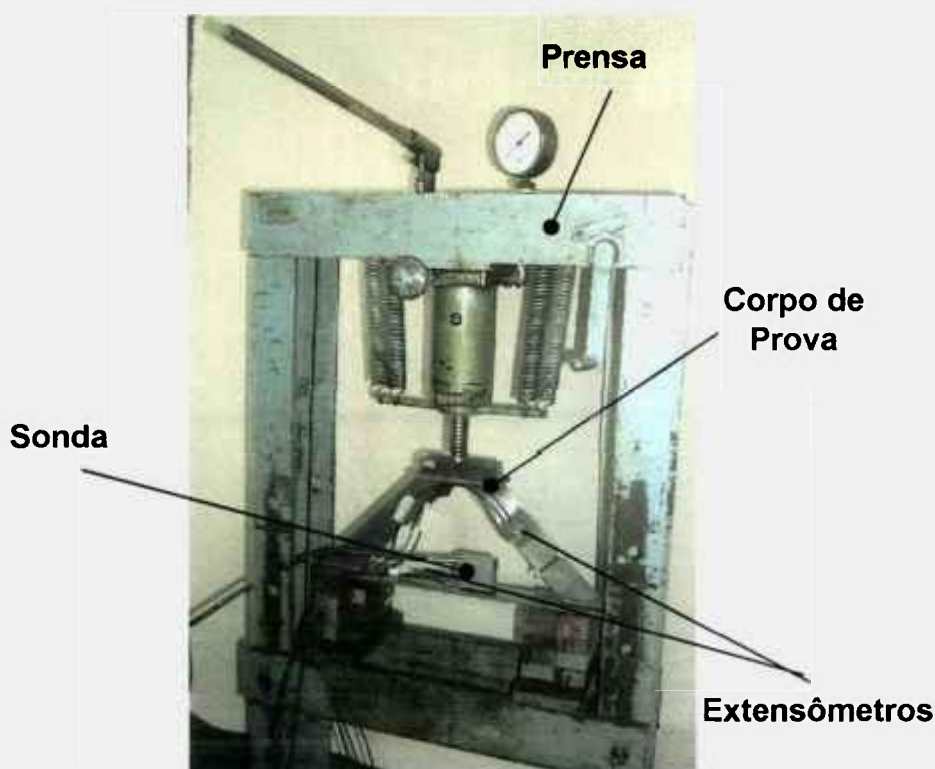


FIGURA 3.14. Prensa utilizada para os experimentos de carregamento uniaxial e corpo de prova instrumentado utilizado.

3.3.7 Medição de Tensões Residuais

Os experimentos para a determinação de tensões residuais foram realizados em partes das chapas utilizadas para a construção dos corpos de prova e da estrutura em forma de treliça. Após a realização do tratamento térmico para alívio de tensões nas vigas de isoflexão, verificou-se um aumento no valor RMS do ruído magnético Barkhausen

detectado durante a magnetização, indicando a presença de tensões residuais nas chapas originais. Assim, os ensaios de tensões residuais foram realizados nas chapas preparadas para os testes de avaliação da influência da rugosidade superficial no comportamento do RMB gerado no material. Estas chapas não foram submetidas ao tratamento térmico sofrido pelas vigas, mas a sua superfície foi preparada da mesma forma, apresentando valores similares de rugosidade superficial.

A determinação das tensões residuais foi feita utilizando-se o ensaio magnetoelástico e o Método do Furo Central (ASTM E 837, 2001). Foram utilizadas rosetas do tipo EA-06-062RE-120 (MM, 2000), cujas características podem ser observadas na TAB. 3.2.

TABELA 3.2 – Características das rosetas utilizadas nos ensaios para a determinação de tensões residuais pelo método do furo central.

Chapa	Roseta		
	Denominação	Constante (K)	Resistência (Ω)
ASTM A 36	MM EA-06-062RE-120	1,945 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%
		1,930 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%
ASTM A 515	MM EA-06-062RE-120	1,945 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%
		1,945 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%
		1,930 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%
USI SAC 50	MM EA-06-062RE-120	1,945 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%
		1,945 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%
		1,930 \pm 0,5%	120,2 \pm 0,2%

Para a usinagem do furo foi utilizado um dispositivo de furação de precisão modelo RS-200 (MM TN-503, 1996), fabricado pela MICRO MEASUREMENTS. Este dispositivo permite a usinagem de um furo no material para produzir um alívio de tensões local, segundo as recomendações da Norma ASTM E 837, atendendo a dois requisitos básicos: a precisão necessária para a usinagem do furo no centro da roseta e a alta rotação necessária para que o processo de usinagem não modifique o padrão de tensões residuais existente no material. O dispositivo de precisão pode ser observado na FIG. 3.15 (a)

(microscópio para posicionamento da ferramenta na roseta) e (b) (ferramenta de furação). A roseta instalada na superfície da chapa para a realização do ensaio pode ser observada na FIG. 3.16.

Para a realização do ensaio pelo método magnetoelástico, o ruído magnético Barkhausen foi medido na região onde, posteriormente, a roseta para a medição de tensões residuais foi instalada. As medições foram realizadas nas direções paralela e perpendicular à direção de laminação da chapa. O valor do RMB medido foi utilizado então para a determinação das tensões presentes nos materiais. O ensaio foi realizado em chapas dos aços ASTM A 36, ASTM A 515 e USI SAC 50.



FIGURA 3.15. Dispositivo de precisão composto por (microscópio para posicionamento da ferramenta na roseta) (a) e (ferramenta de furação) (b).



FIGURA 3.16. Roseta para ensaio de tensões residuais pelo Método do Furo Central.

3.4 Determinação dos Fatores que Influenciam os Resultados do Ensaio

Na calibração do sistema de ensaio os corpos-de-prova foram submetidos a uma série de carregamentos de valores conhecidos e em condições padronizadas, de forma a se produzir estados de tensões previsíveis nos mesmos. O valor das deformações produzido por cada carregamento foi determinado com o auxílio de extensômetros elétricos resistivos, que foram fixados na superfície dos corpos-de-prova de calibração. As tensões correspondentes foram determinadas através das equações clássicas da resistência dos materiais (Beer e Johnston, 1995) e (Willems, 1981).

Para cada carregamento aplicado, foi medido o valor RMS do ruído magnético Barkhausen correspondente, possibilitando verificar as alterações que um determinado estado de tensões produziu na estrutura dos domínios magnéticos do material durante o processo de magnetização. Desta forma foi obtida, para cada material, uma curva que expressa a relação entre o estado de tensões atuante no corpo-de-prova ou as deformações e o valor do ruído magnético Barkhausen correspondente. A medição do ruído magnético Barkhausen foi realizada em direções bem definidas no material, como nas direções de laminação e perpendicular à mesma, em virtude da forte dependência das propriedades magnéticas do material com a direção em que são medidas. Nos corpos de prova testados, estas direções foram mantidas.

Para a execução do ensaio de forma padronizada, reprodutível e com parâmetros otimizados, foi realizado um estudo abordando os principais fatores que exercem influência nos resultados do ensaio.

3.4.1 Determinação do Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica

O valor do nível de excitação da sonda magnetoelástica e, conseqüentemente, o valor da corrente de excitação da sonda e do campo magnético utilizado para a realização dos experimentos foi determinado experimentalmente. O procedimento utilizado consistiu nas etapas descritas a seguir:

a) Registro do valor RMS do ruído magnético Barkhausen para cada nível de excitação – nesta etapa, o ruído magnético Barkhausen produzido nas amostras dos materiais utilizados foi adquirido variando-se, de forma crescente, os níveis de excitação aplicados à sonda magnetoelástica, ou seja, os valores da corrente aplicada à bobina de magnetização. Isto foi possível variando-se o nível de excitação da unidade de excitação do equipamento Stresstest. As aquisições do RMB foram feitas para os níveis de excitação entre 15 e 255,

em incrementos de 15. Para cada nível de excitação selecionado e cada par frequência de excitação/frequência de análise, foram adquiridas quinze amostras do ruído magnético Barkhausen e determinado o valor RMS médio referente a estas quinze amostras. Este procedimento foi realizado três vezes, em dias diversos, mantendo-se constantes fatores como o tempo de aquecimento e de parada dos sistemas utilizados no experimento, o posicionamento da sonda em relação ao material e a temperatura ambiente. Os valores RMS médios do RMB resultantes das três séries de medições, em função do nível de excitação da sonda, para cada par frequência de excitação/frequência de análise, foram utilizados como referência para a obtenção de funções que possibilitassem o melhor ajuste para os dados obtidos. O conjunto de dados gerado nesta etapa foi utilizado para verificar tanto a consistência dos dados obtidos como a estabilidade do sistema de ensaio.

b) Plotagem dos dados – os dados obtidos na etapa anterior, associando o valor RMS do RMB ao nível de excitação da sonda magnetoelástica, foram plotados utilizando-se o software Microcal Origin 6.1. O valor do RMB utilizado correspondeu ao valor médio obtido a partir das três séries de aquisições realizadas. Foram plotados os dados referentes a cada par frequência de excitação/frequência de análise.

c) Determinação de uma função de ajuste para os dados adquiridos – para possibilitar a análise dos resultados obtidos, de forma a determinar o valor mais adequado para o nível de excitação a ser aplicado à sonda magnetoelástica, foi pesquisada uma função que apresentasse o melhor ajuste para os dados obtidos. O critério utilizado para a escolha da função foi a semelhança com o perfil dos dados obtidos e o valor do coeficiente de correlação R dos ajustes.

d) Determinação do nível de excitação da sonda magnetoelástica – o valor do nível de excitação da sonda para cada um dos materiais estudados foi obtido determinando-se o ponto onde a taxa de variação do ruído magnético Barkhausen em função do nível de excitação da sonda apresentou o valor máximo, obtido igualando-se a derivada segunda da função de ajuste a zero.

3.4.2 Campo Magnético de Excitação

Os valores do campo magnético gerado pela sonda magnetoelástica, para os níveis de excitação adotados foram determinados utilizando-se um medidor de campo magnético baseado no Efeito Hall, modelo Gauss/Teslameter 5080, fabricado pela F. W. BELL. O

valor do campo foi determinado nos terminais do núcleo da sonda magnetoelástica. A montagem experimental pode ser observada na FIG. 3.17.



FIGURA 3.17 – Montagem experimental utilizada para determinar o valor do campo magnético produzido nas extremidades do núcleo ferromagnético da sonda magnetoelástica.

3.4.3 Dependência Direcional

Devido à anisotropia induzida na microestrutura dos materiais laminados durante o processo de fabricação (Reed-Hill, 1982), realizou-se uma avaliação da variação dos valores do RMB na superfície dos materiais avaliados em função da direção de aplicação do campo magnético de excitação. Esta avaliação foi realizada utilizando-se a montagem apresentada na FIG. 3.18. Para possibilitar a realização das medições sob condições controladas e reproduzíveis foi desenvolvido um dispositivo de posicionamento para a sonda magnetoelástica, que pode ser observado na FIG. 3.19.

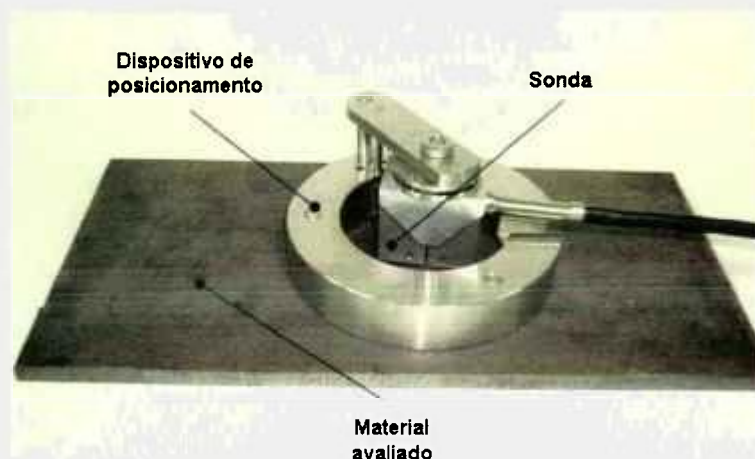


FIGURA 3.18 - Montagem experimental para avaliação da dependência direcional do valor RMS do ruído magnético Barkhausen produzido nos materiais estudados.

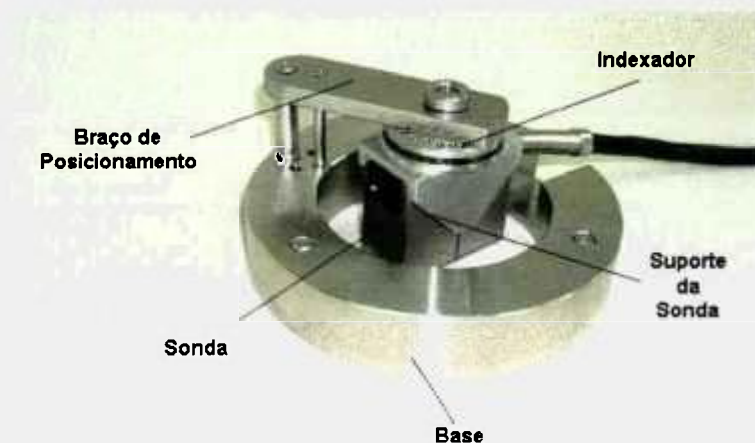


FIGURA 3.19 - Dispositivo de posicionamento da sonda magnetoelástica.

O dispositivo foi projetado para desempenhar as seguintes funções:

- a) Manter constante a pressão da sonda contra a superfície do material – um sistema de molas existente na base do braço de posicionamento e na parte superior do indexador mantém a pressão da sonda sobre a superfície do material praticamente a mesma durante a realização das medidas.
- b) Manter constante a posição relativa da sonda em relação à superfície do material – os sistemas de fixação do braço de posicionamento à base do dispositivo e do suporte da sonda ao braço de posicionamento garantem a manutenção da posição relativa da sonda em relação à superfície do material durante a realização das medidas em diferentes direções, evitando a introdução de um fator de erro nas mesmas.
- c) Permitir a realização das medidas em diferentes direções e em intervalos conhecidos – um indexador montado na parte superior do suporte da sonda possibilita o posicionamento da sonda em diferentes direções, em incrementos de 15° , permitindo a realização de medidas em um arco de 330° na região de interesse.

As medições do ruído magnético Barkhausen foram realizadas em uma faixa de 0° a 180° , tomando-se como referência a direção de laminação dos materiais, em intervalos de 15° , sendo registrado o valor do ruído magnético Barkhausen para cada par frequência de excitação/frequência de análise.

3.4.4 Influência do Acabamento Superficial

Durante a preparação dos corpos de prova e a realização de ensaios preliminares para familiarização com o processo, observou-se que variações no estado da superfície dos materiais utilizados estavam produzindo variações nos resultados das medições realizadas. Para um mesmo material, superfícies com diferentes níveis de oxidação ou de rugosidade apresentavam respostas diferentes com relação ao valor RMS do ruído magnético Barkhausen gerado durante a magnetização. A partir dessa constatação foram preparadas amostras desses materiais para avaliação da influência do acabamento superficial nos resultados do ensaio. O procedimento utilizado foi o seguinte:

- a) Registro do valor RMS do ruído magnético Barkhausen produzido durante a magnetização das amostras com a superfície em seu estado natural (material como recebido) em uma região selecionada da amostra, sendo utilizado apenas um solvente para uma limpeza grosseira da superfície. Foram adquiridas quinze amostras do ruído magnético Barkhausen e determinado o valor RMS médio deste conjunto de amostras. Este processo foi repetido por três vezes. Após cada conjunto de medições o sistema foi desligado e a sonda retirada e recolocada no dispositivo de posicionamento, para que as variações referentes ao equipamento e ao posicionamento da sonda na região de interesse fossem consideradas nos resultados das medições. O valor RMS médio dos três conjuntos de aquisições foi utilizado para as avaliações da influência da condição da superfície nos resultados do ensaio.
- b) Realização do ensaio de rugosidade superficial das amostras, na região de posicionamento da bobina sensora da sonda magnetoelástica no material, para a realização das aquisições do ruído magnético Barkhausen (superfície como recebida).
- c) Lixamento da superfície do material com lixa de carboneto de silício 80 até a retirada das irregularidades superficiais da região de interesse.
- d) Realização do ensaio de rugosidade superficial no material.
- e) Registro do valor RMS do ruído magnético Barkhausen produzido durante a magnetização para esta condição das amostras. O registro foi realizado nas mesmas condições descritas para a superfície na condição como recebida.

d) Repetição do procedimento para as lixas 150, 220 e 320.

Para posicionar a sonda magnetoelástica durante as medições do ruído magnético Barkhausen utilizou-se o mesmo dispositivo de posicionamento desenvolvido para as medidas de textura. A montagem indicando o posicionamento da sonda, as direções de lixamento e de realização das medições de rugosidade e do ruído magnético Barkhausen podem ser observadas na FIG. 3.20. O campo magnético de excitação foi aplicado na direção paralela à direção de varredura para as medidas de rugosidade e a bobina de detecção do RMB posicionada na região onde as medições de rugosidade foram realizadas.



FIGURA 3.20 - Posicionamento da sonda magnetoelástica para a medição do ruído magnético Barkhausen (a), direção de lixamento e de medição da rugosidade superficial da amostra (b).

As medidas de rugosidade foram realizadas utilizando-se um Rugosímetro TAYLOR ROBSON, modelo TALYSURF 10. Em todas as medições os parâmetros utilizados foram: velocidade vertical 2000X, velocidade horizontal 10X, cut-off de 0,8 mm e tempo de aquecimento do sistema de 30 minutos.

3.4.5 Influência do Afastamento da Sonda à Superfície do Material

Um outro fator que exerce influência no valor do RMB detectado é o afastamento da sonda à superfície do material examinado. Pequenos movimentos na sonda produzem variações no espaçamento existente entre as extremidades do núcleo ferromagnético da sonda e a superfície do material, modificando o valor da impedância do sistema sonda/material (Flammini et al, 2001). Para avaliar esta influência a sonda foi posicionada

a diferentes distâncias da superfície das amostras dos materiais avaliados e o valor RMS do RMB detectado registrado para cada par frequência de excitação/frequência de análise. O afastamento da sonda à superfície do material de forma controlada foi conseguido com a utilização de fitas de poliéster com espessuras uniformes, determinada a partir de ensaio dimensional. As medições foram realizadas utilizando-se um micrômetro MITUTOYO N 3087114. As espessuras das fitas utilizadas estão indicadas na TAB. 3.2.

TABELA 3.2. Espessura das fitas de poliéster utilizadas para a avaliação da influência do afastamento da sonda à superfície de teste.

Fita	Espessura (mm)
1	0,20±0,01
2	0,40±0,01
3	0,59±0,01
4	0,78±0,02
5	0,96±0,02
6	1,16±0,02
7	1,35±0,02

As medições foram realizadas na superfície das vigas de isoflexão, fora do dispositivo de carregamento pro flexão, utilizando o procedimento descrito a seguir:

- a) Posicionamento da sonda na superfície da viga na mesma posição utilizada para a verificação do comportamento do ruído magnético Barkhausen em função da tensão mecânica.
- b) Registro do RMB para as frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz, 32 kHz e 120 kHz.
- c) Inserção da fita n° 1 entre a superfície da viga e a sonda.
- d) Registro do RMB nas mesmas condições descritas anteriormente.
- e) Repetição do processo para as fitas de n° 2 a n° 7.

f) Elaboração dos gráficos representando a variação do RMB em função do afastamento da sonda à superfície do material.

A espessura máxima utilizada para as fitas (1,35 mm) foi limitada devido ao baixo valor do RMB detectado e, principalmente, devido ao início de instabilidade apresentada pela sonda (vibração).

3.5 Instrumentação

O sistema básico de ensaio utilizado no desenvolvimento deste trabalho é composto, na verdade, de dois sistemas independentes. O primeiro sistema é destinado à magnetização do material e à detecção do ruído magnético Barkhausen gerado durante a magnetização, sob condições controladas. O segundo é destinado às medições das deformações nos corpos de prova utilizando as técnicas de extensometria, de forma a permitir o estabelecimento das correlações entre as deformações produzidas nos corpos de prova e as alterações produzidas no ruído magnético gerado nos materiais em cada condição de deformação.

3.5.1 Ruído Magnético Barkhausen

Os ensaios para a medição do ruído magnético Barkhausen foram realizados utilizando-se um sistema de ensaio composto por um equipamento Stresstest 20.04/ Sonda Magnetoelástica - Metalelektro e um osciloscópio digital Agilent 54622 A, com dois canais. O controle das variáveis de teste e de aquisição de dados é feito externamente, utilizando-se um microcomputador Pentium III de 650 MHz.

O equipamento Stresstest possui 4 canais, possibilitando a utilização de até 4 sondas para a realização de ensaios. Ele permite a excitação do material com campos magnéticos nas frequências de 10 Hz e 100 Hz, denominadas neste trabalho frequências de excitação (F_{Exc}) e a detecção do ruído magnético Barkhausen utilizando-se filtros com frequências de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz, 32 kHz e 120 kHz, denominadas neste trabalho frequências de análise (F_{An}). Os diversos filtros possibilitam a realização de medidas a diferentes profundidades no material sob teste. Segundo o fabricante do equipamento, para aços de uso geral estas profundidades são 0,8 mm; 0,4 mm; 0,2 mm, 0,1 mm e 0,05 mm respectivamente. A bobina de magnetização da sonda magnetoelástica é alimentada através de uma unidade de excitação com resolução de 8 bits. São disponíveis níveis de excitação graduados de 0 a 255, linearmente divididos. A corrente máxima fornecida pela unidade de

excitação é de 2,55 A. Cada nível de excitação corresponde a aplicação de uma corrente de 10 mA na bobina de magnetização (Metalelektro, 1998).

3.5.2 Extensometria

A monitoração das variações nas resistências dos extensômetros utilizados durante os experimentos foi realizada utilizando-se um multímetro digital de 6 1/2 dígitos AGILENT 34401 e um dispositivo de chaveamento, fabricado no Laboratório de Análise Experimental de Tensões do CDTN, ligado ao multímetro, para possibilitar a leitura seqüencial da resistência de vários extensômetros. O diagrama da instrumentação utilizada pode ser observado na FIG. 3.21.

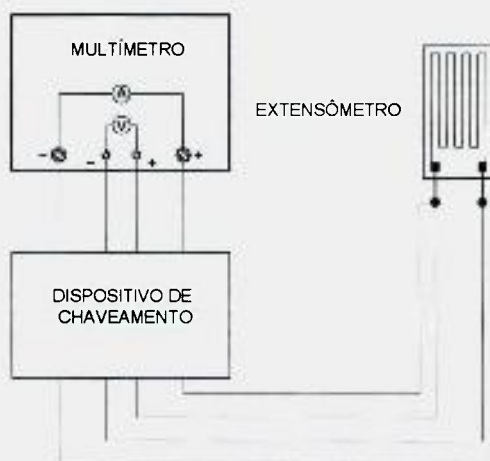


FIGURA 3.21 – Sistema de ensaio para as medições das variações nas resistências dos extensômetros durante os experimentos.

O conjunto formado pelos dois sistemas e a sonda magnetoelástica utilizada nos experimentos podem ser observados na FIG. 3.22.

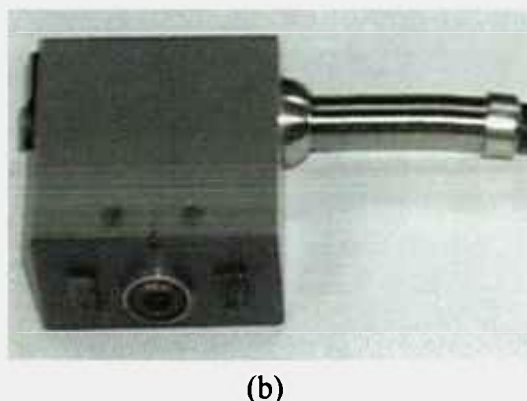
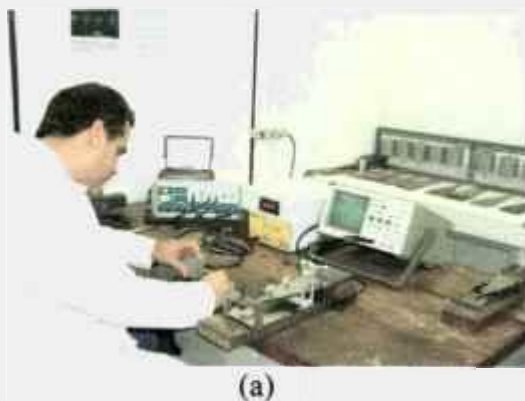


FIGURA 3.22 – Sistema de ensaio para as medições do ruído magnético Barkhausen e de deformações (a) e sonda magnetoelástica (b).

3.6 Calibração do Sistema de Ensaio

A calibração do sistema de ensaio sob condições de carregamento uniaxial foi realizada utilizando-se o dispositivo de carregamento por flexão e as vigas de isoflexão. Os carregamentos foram aplicados utilizando-se o parafuso de carga existente no dispositivo e, para cada carregamento aplicado as variações nas resistências dos elementos sensores das rosetas eram registradas e o valor RMS do ruído magnético Barkhausen para as frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2kHz, 8 kHz e 32 kHz registrados. Após a aplicação de um carregamento e realização das leituras o sistema foi completamente descarregado e, logo após, carregado até o novo patamar de carregamento. Este processo foi realizado aplicando-se carregamentos de forma possibilitar a obtenção de tensões de tração e compressão na superfície das vigas até valores na faixa de 80% do limite de escoamento à tração e à compressão dos materiais estudados. O incremento entre os carregamentos foi de 10% do limite de escoamento destes materiais. O processo foi repetido por quatro vezes. Em cada patamar de carregamento e para cada par frequência de excitação/frequência de análise foram adquiridas 15 amostras do ruído magnético Barkhausen.

As curvas sob condições de carregamento biaxial não apresentaram, inicialmente, os resultados esperados, em virtude dos desalinhamentos apresentados pelo sistema de carregamento na aplicação de carregamentos de compressão. Desta forma só foram feitas aquisições para condições de carregamento uniaxiais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição Química

Os resultados obtidos para a composição química dos materiais estudados podem ser observados na TAB. 4.1.

TABELA 4.1 – Composição química dos materiais estudados.

Composição Química %	Material			
	ASTM A 36	ASTM A 515	USI SAC 50	20 MnMoNi55
C	0,10520	0,16806	0,10354	0,19814
Si	0,02342	0,25665	0,36788	0,25050
Mn	0,44366	0,70360	1,1195	1,41380
P	0,01293	0,02456	0,02262	0,00686
S	0,00676	0,00609	0,01023	0,00059
Ni	0,02288	0,02347	0,20328	0,69324
Cr	0,01980	0,04026	0,44180	0,13702
Mo	0,00892	0,00868	0,00951	0,52591
Cu	-	0,00264	0,28236	0,03818
Co	-	-	-	0,00220
Sn	0,00285	0,00294	0,00340	0,00432
Al	0,04942	0,01968	0,39360	0,02574
Nb	0,00060	0,00067	0,02218	0,00220
Pb	0,00004	-	-	-
Ti	0,00276	0,00258	0,00932	0,00336
V	0,00352	0,00458	0,00809	0,00240
B	0,00058	0,00036	0,00020	0,00058
Fe	99,2960	98,7350	97,3570	96,6950

Os resultados obtidos pela análise química indicam que a composição química dos materiais estudados encontra-se dentro das especificações previstas para os aços ASTM A 36 (ASTM A 36/A36M, 2000), ASTM A 515/A515M, 2000), USI SAC 50 (Usiminas,

2000) e 20 MnMoNi 55 (STAHLSCHLÜSSEL, 1977). O aço USI SAC 50, um aço carbono estrutural de baixa liga, apresentou teores mais elevados dos elementos Mn e Si em relação aos aços ASTM A 36 e A 515. Estes elementos são elementos desoxidantes e, nos teores apresentados para este aço, contribuem para um aumento em sua dureza e resistência mecânica. Outros elementos que apresentaram um teor mais elevado foram o alumínio, que atua como elemento desoxidante e agente controlador do crescimento de grão; o cromo, que aumenta a resistência à corrosão e a endurecibilidade do aço; o níquel, que aumenta a resistência e a tenacidade do aço por solução sólida e o cobre, que forma partículas metálicas dispersas e contribui para o endurecimento do aço (Chiaverini, 2002). Como estes elementos provocam alterações na microestrutura e propriedades mecânicas dos aços, podem também influenciar o padrão do ruído magnético Barkhausen gerado durante o processo de magnetização.

4.2 Ensaios Mecânicos

Os valores médios determinados para o limite de escoamento, limite de resistência, limite de ruptura e os valores de dureza são apresentados na TAB. 4.2.

TABELA 4.2. Propriedades mecânicas dos materiais estudados.

Material	Direção	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	σ_{rup} (MPa)	Dureza (HV)
ASTM A 36	// Laminação	291 ±15	396±8	253±6	
	⊥ Laminação	304±5	399±5	273±2	116±5
	45° Laminação	303±3	403±7	253±6	
ASTM A 515	// Laminação	350±8	480±	328±7	
	⊥ Laminação	350±10	477±	362±7	132±6
	45° Laminação	355±15	478±	330±4	
USI SAC 50	// Laminação	380±9	550±11	-	177±2
20 MnMoNi 55	// Laminação	429	569	-	235±3

Os valores apresentados pelas propriedades mecânicas dos materiais estudados indicam que as suas propriedades mecânicas se encontram dentro das especificações previstas para os aços ASTM A 36 (ASTM A 36/A36M, 2000), ASTM A 515/A515M, 1997), USI SAC 50 (Usiminas, 2000).

Não houve, praticamente, variação das propriedades mecânicas em função da direção de retirada dos corpos de prova para os aços ASTM A 36 e A 515.

4.3 Microestrutura

As micrografias dos materiais estudados, referentes às superfícies D (paralela à direção de laminação) e F (seção transversal do material, perpendicular à direção de laminação), com um aumento de 200X e 500X, são apresentadas na FIG. 4.1 a FIG. 4.7.

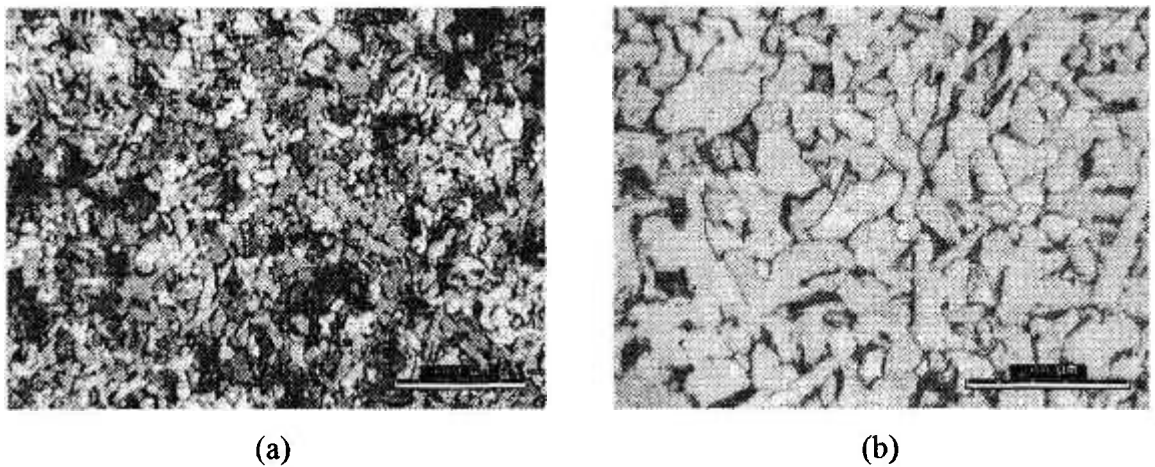


FIGURA 4.1. Microestrutura do aço ASTM A 36 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (superfície D). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).

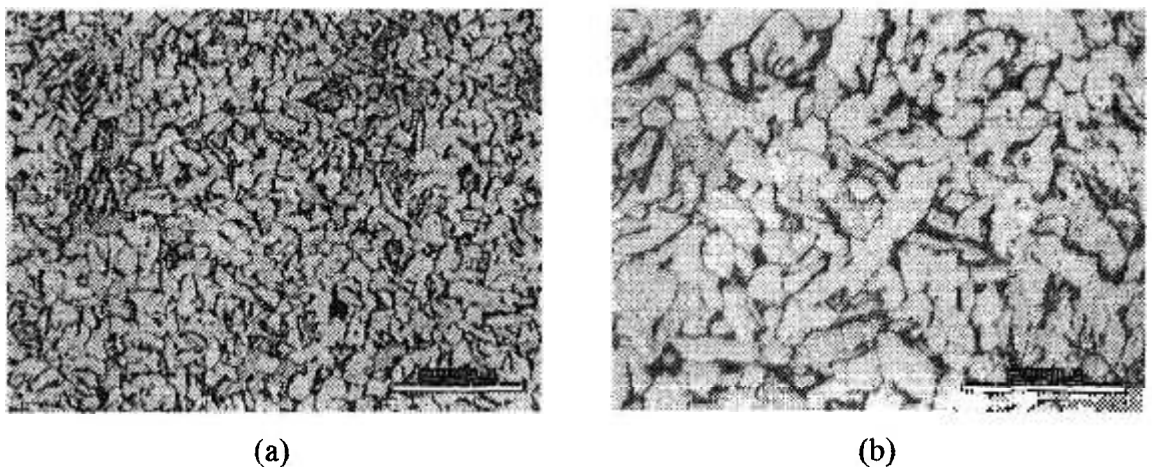
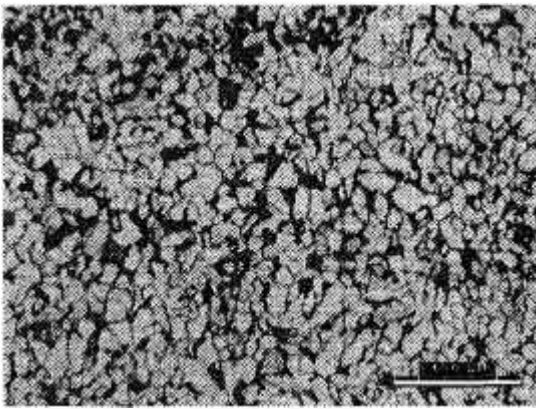
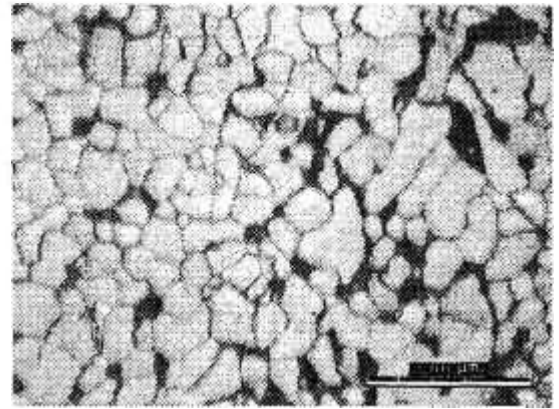


FIGURA 4.2. Microestrutura do aço ASTM A 36 na seção transversal do material (superfície F). (b). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).

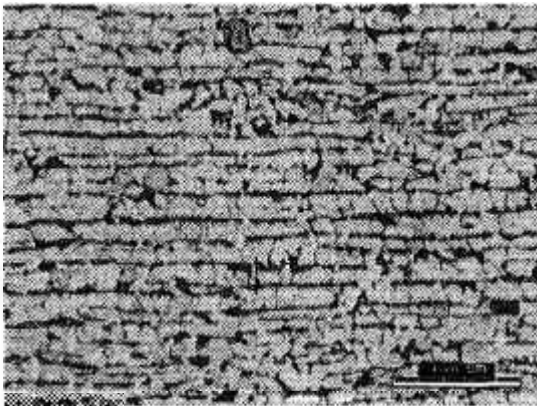


(a)

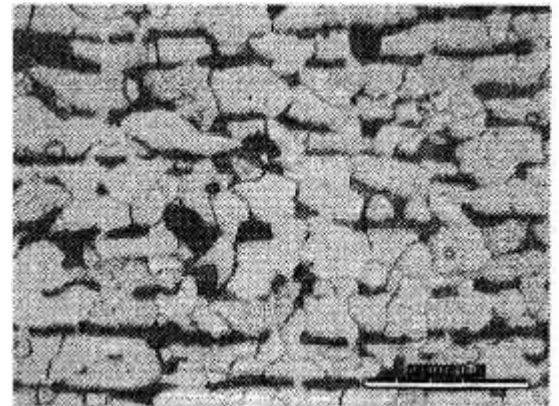


(b)

FIGURA 4.3. Microestrutura do aço ASTM A 515 na seção transversal do material (superfície F). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).

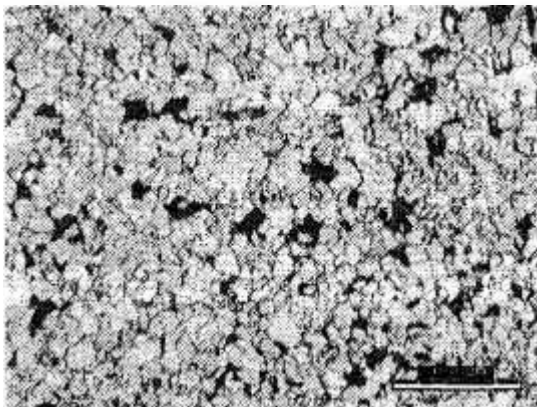


(a)

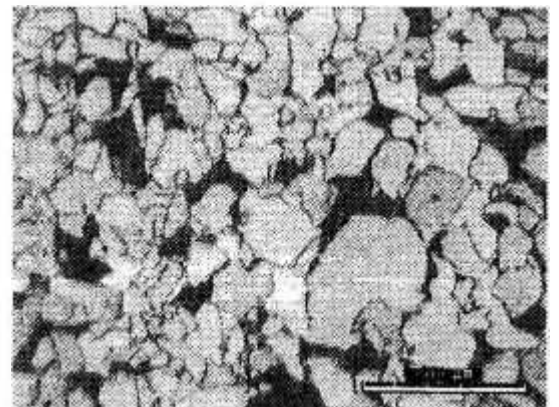


(b)

FIGURA 4.4. Microestrutura do aço ASTM A 515 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (superfície D). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).



(a)



(b)

FIGURA 4.5. Microestrutura do aço USI SAC 50 na seção transversal do material (superfície F). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).

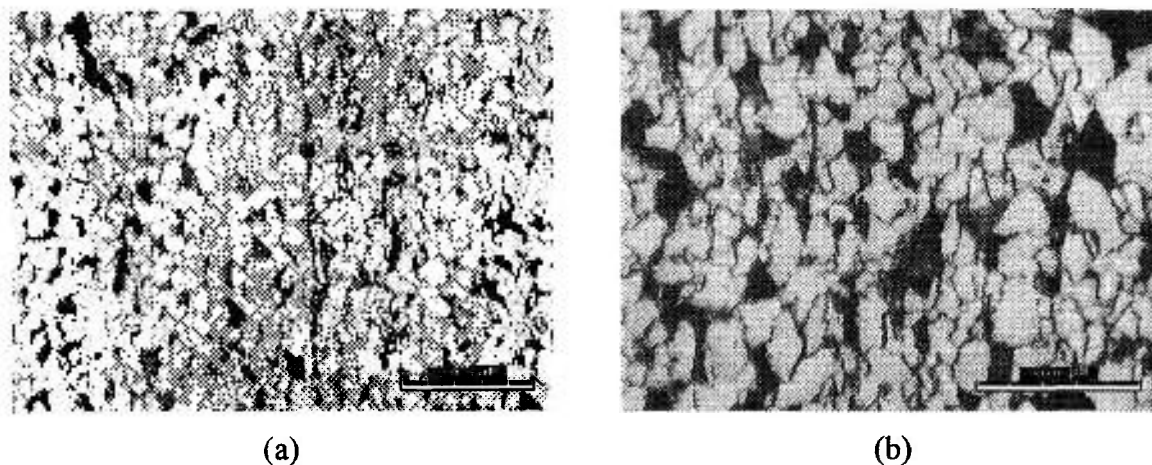


FIGURA 4.6. Microestrutura do aço USI SAC 50 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (superfície D). (b). Aumento de 200X (a) e de 500X (b).

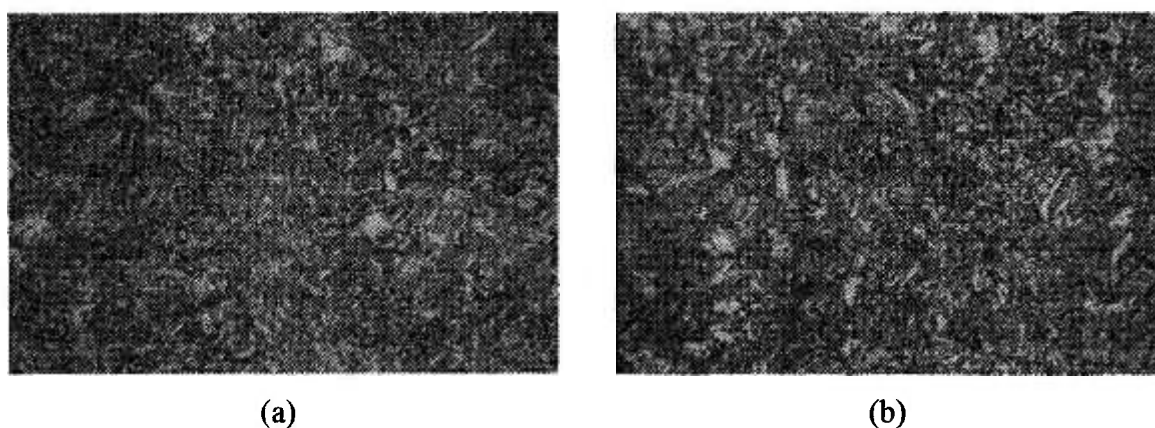


FIGURA 4.7. Microestrutura do aço 20MnMoNi55 na superfície da amostra paralela à direção de laminação (a) e da seção transversal do material (superfície F). Aumento 200X.

Os aços ASTM A 36, ASTM A 515 e USI SAC 50 apresentaram uma estrutura composta de ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras). A direção de laminação é claramente visível para o aço ASTM A 515 (FIG. 4.4), um pouco mais discreta para o aço USI SAC 50 (FIG. 4.6) e, praticamente, não identificável através da micrografia para o aço ASTM A 36. A estrutura apresentada pelo aço 20 MnMoNi 5 5 é uma estrutura de martensita revenida, compatível com as informações contidas no certificado de fornecimento do material.

4.4 Tamanho Médio de Grão

Os resultados obtidos para o tamanho médio de grão (diâmetro e largura) dos materiais examinados podem ser observados na TAB. 4.3.

TABELA 4.3. Tamanho médio dos grãos das amostras dos aços ASTM A 36, ASTM A 515 e USI SAC 50.

Material	Amostra	Diâmetro Médio do Grão (micra)	Largura Média do Grão (micra)
ASTM A 36	ASTM A 36 D	9,9	14,3
	ASTM A 36 F	9,7	11,2
ASTM A 515 G 60	ASTM A 515 D	9,5	12,6
	ASTM A 515 F	10	14,4
USI SAC 50	USI SAC 50 D	7,2	9,7
	USI SAC 50 F	8	11,3

Os aços ASTM A 515 e A 36 apresentaram tamanhos médios de grão similares. Os menores valores para o tamanho médio de grão foram observados no aço USI SAC 50. O tamanho dos domínios magnéticos é proporcional à raiz quadrada do diâmetro do grão. Para materiais com grãos pequenos, o número de paredes e de domínios que podem se mover é mais elevado do que em materiais que apresentam grãos com maiores tamanhos. Portanto, com a diminuição do tamanho de grão a amplitude do ruído magnético Barkhausen, para um dado material, aumenta (Padovese, 2001).

4.5 Rugosidade Superficial das Vigas de Isoflexão

Os resultados obtidos para a rugosidade superficial das vigas de isoflexão podem ser observados na TAB. 4.4. As medições foram realizadas nas direções paralela e perpendicular ao eixo das vigas, não tendo sido detectadas variações significativas na rugosidade em função da direção.

TABELA 4.4. Rugosidade da superfície das vigas de isoflexão.

Viga	Direção do Eixo da Viga	Ra (micra)
ASTM A 36	// Laminação	0,15
	⊥ Laminação	0,14
ASTM A 515	// Laminação	0,14
	⊥ Laminação	0,15
USI SAC 50	// Laminação	0,20
	⊥ Laminação	0,18

4.6 Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica

Os valores RMS médios do ruído magnético Barkhausen (RMB) para diferentes níveis de excitação da sonda magnetoelástica, para cada material e cada par frequência de excitação (F_{Exc})/frequência de análise (F_{An}) estão apresentados a seguir (FIG. 4.8 a 4.34). As barras de erro correspondem à estimativa por intervalo dos valores médios verdadeiros com coeficiente de confiança de 95%.

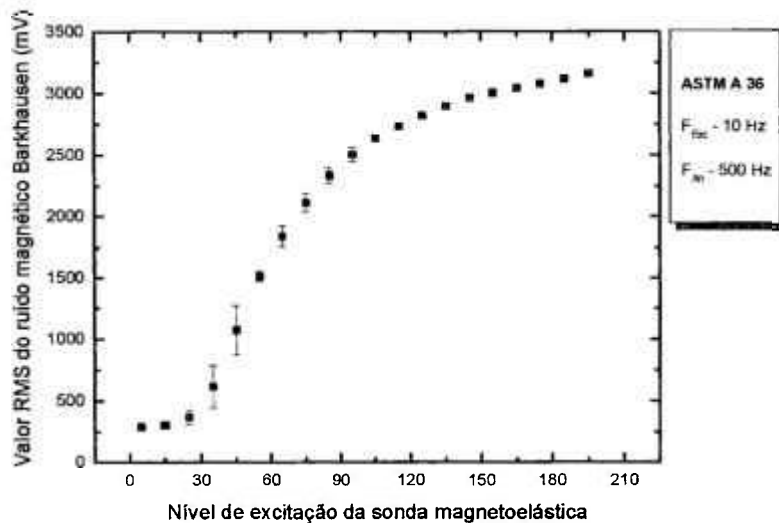


FIGURA 4.8. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

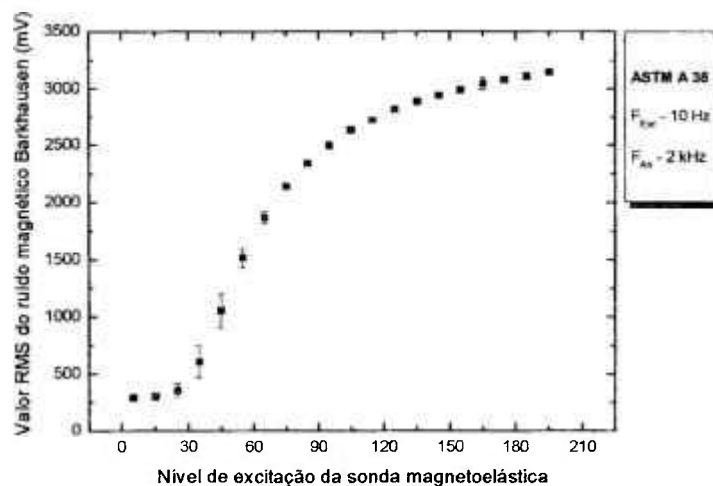


FIGURA 4.9. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

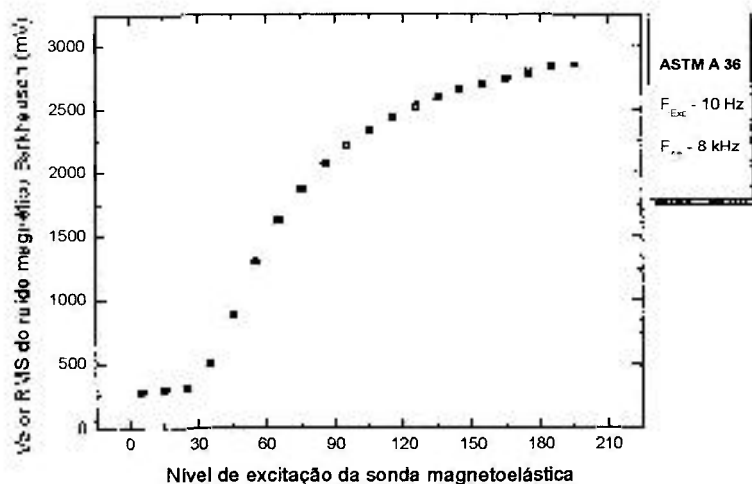


FIGURA 4.10. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

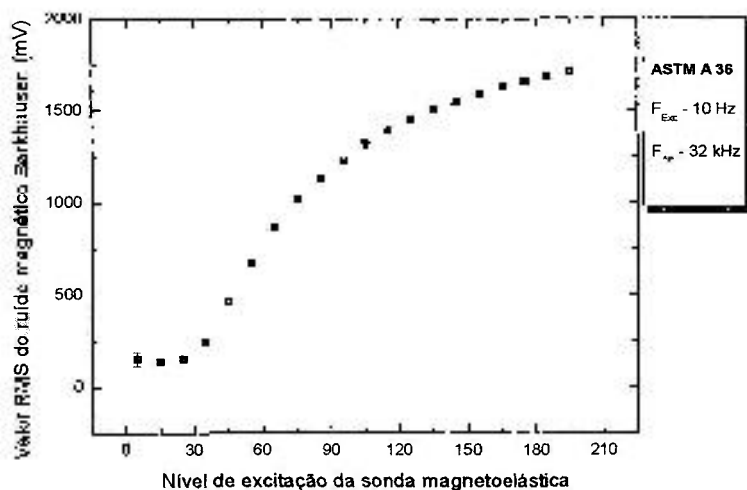


FIGURA 4.11. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

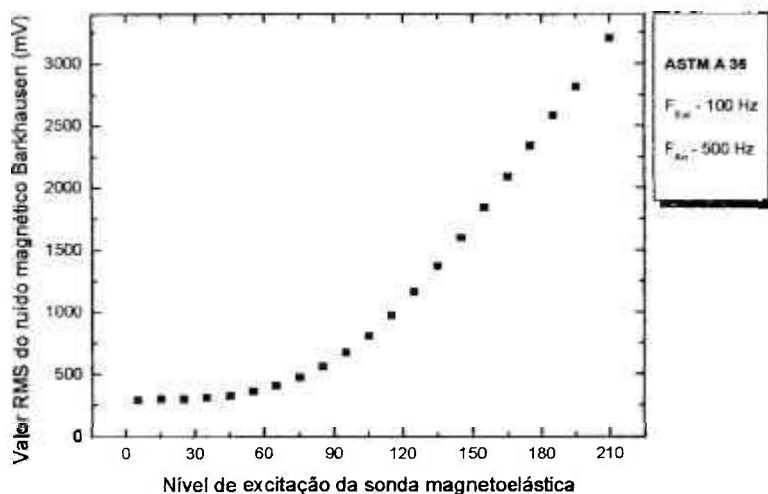


FIGURA 4.12. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

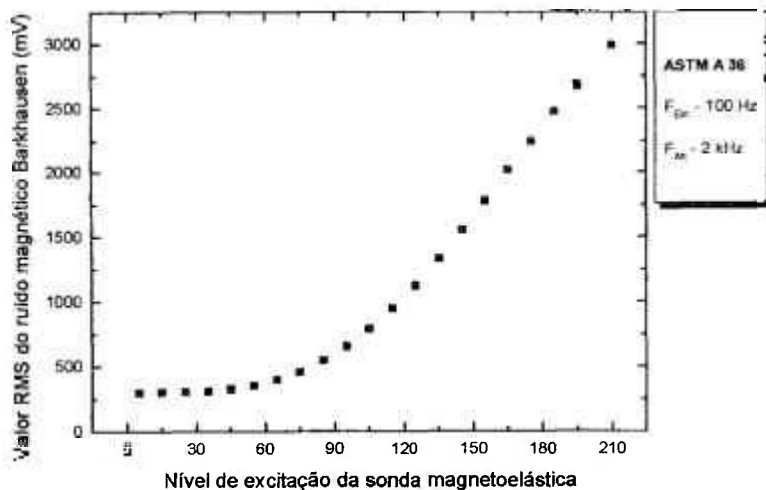


FIGURA 4.13. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

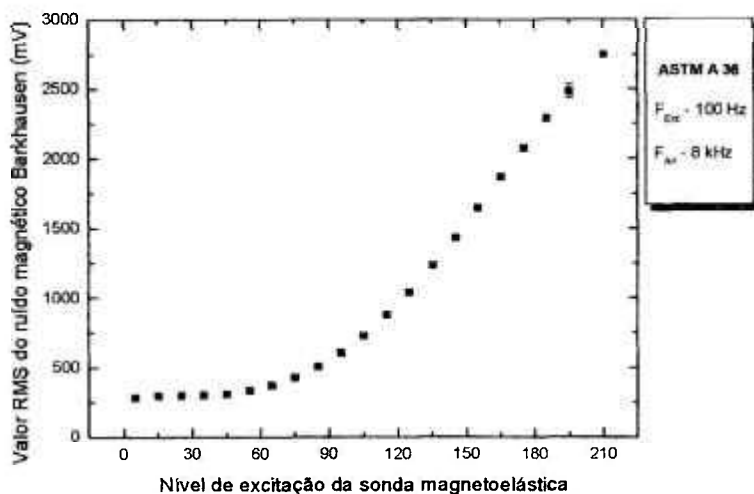


FIGURA 4.14. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

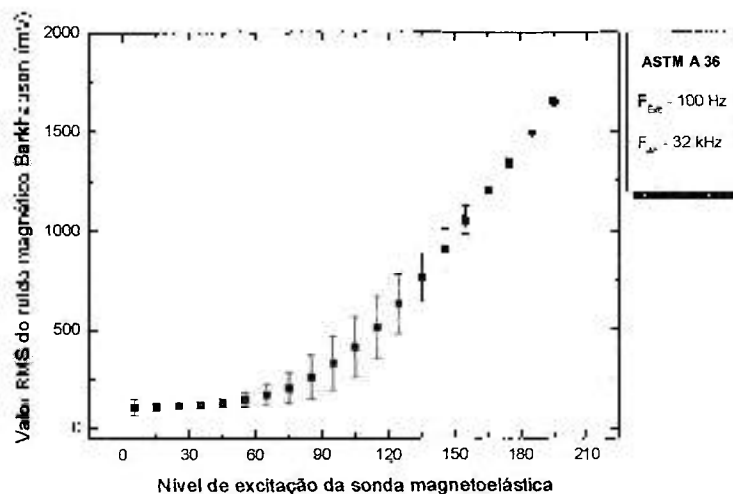


FIGURA 4.15. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

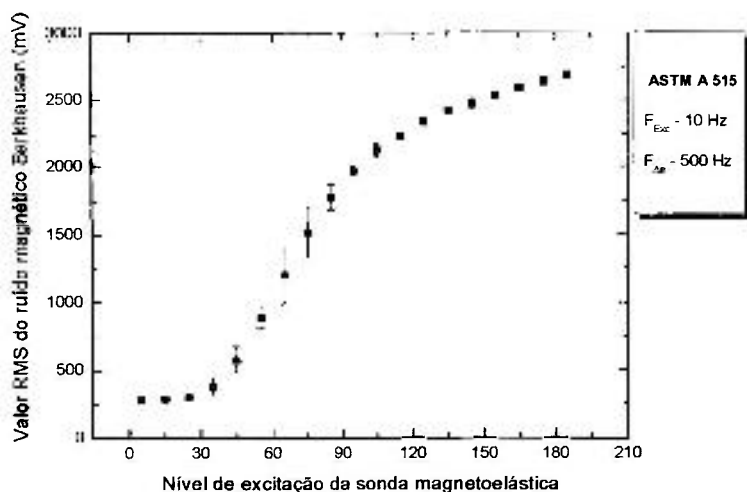


FIGURA 4.16. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

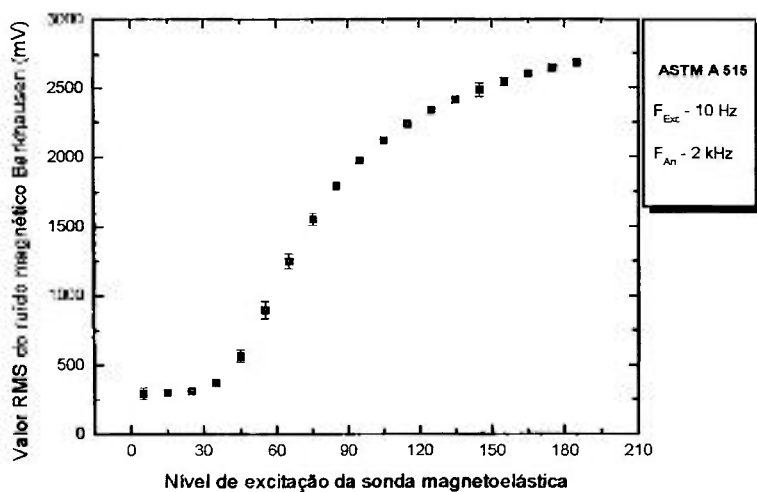


FIGURA 4.17. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

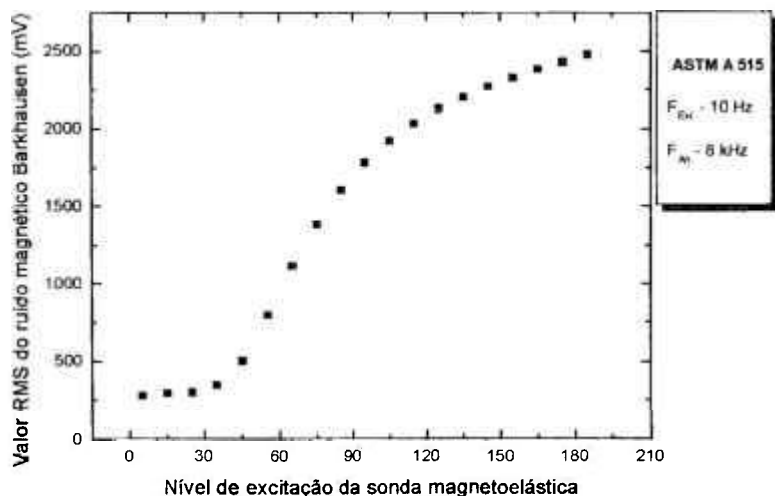


FIGURA 4.18. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

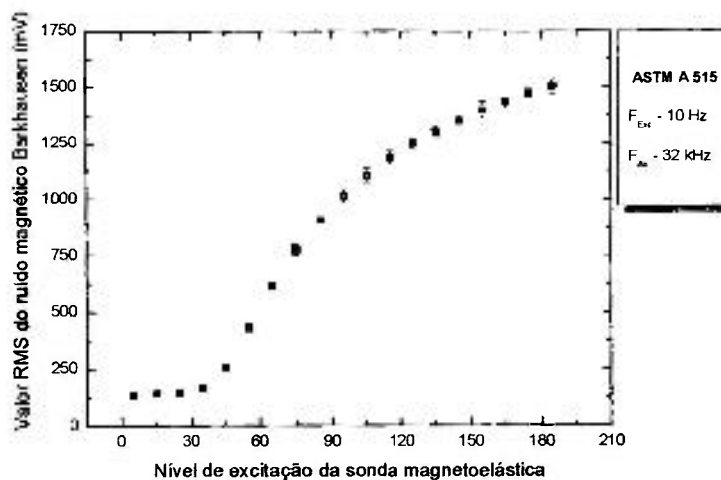


FIGURA 4.19. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

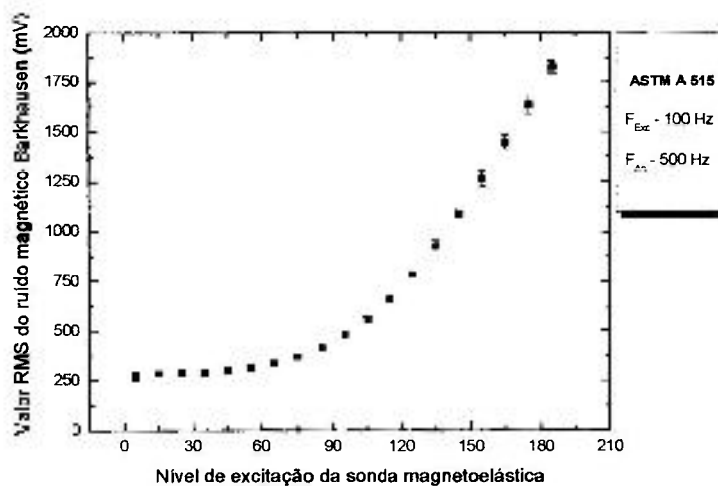


FIGURA 4.20. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

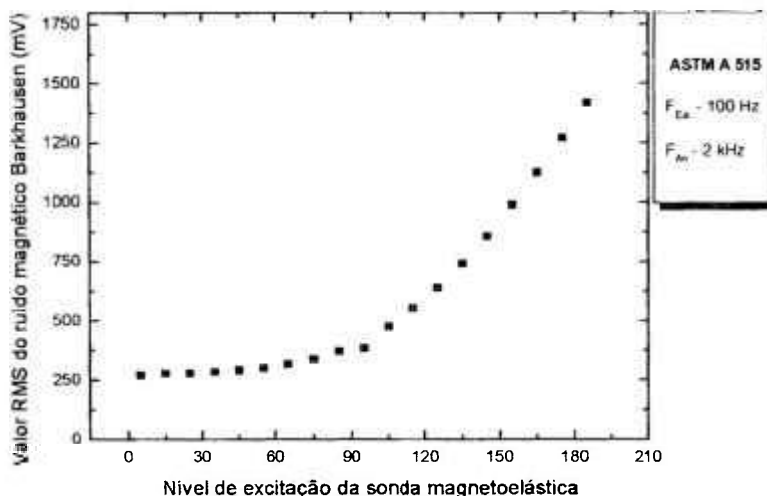


FIGURA 4.21. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

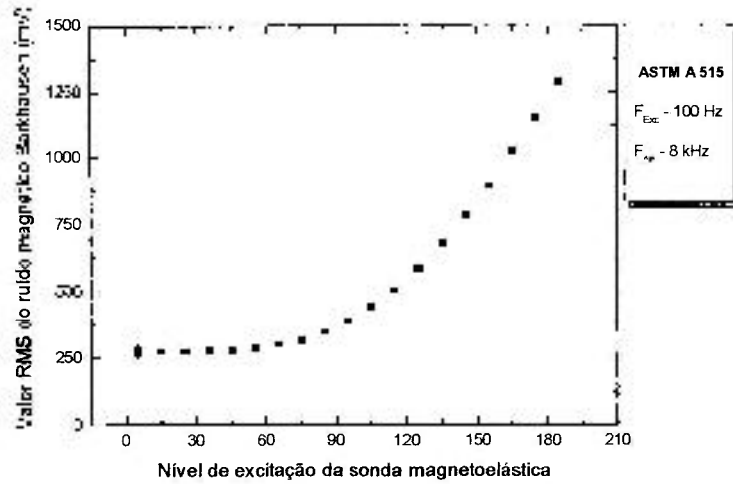


FIGURA 4.22. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

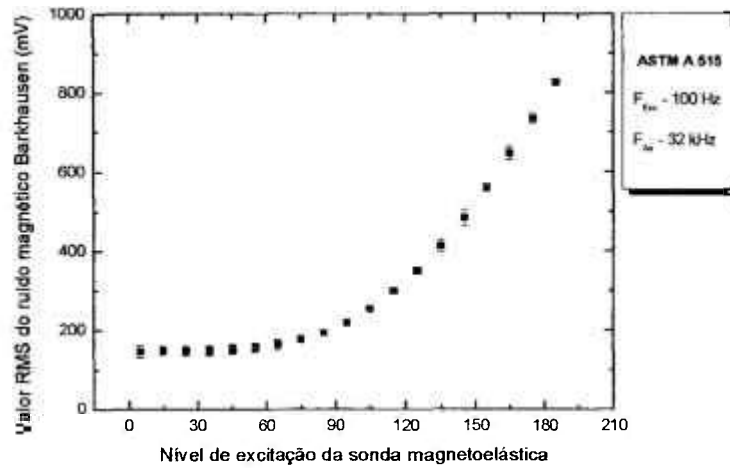


FIGURA 4.23. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

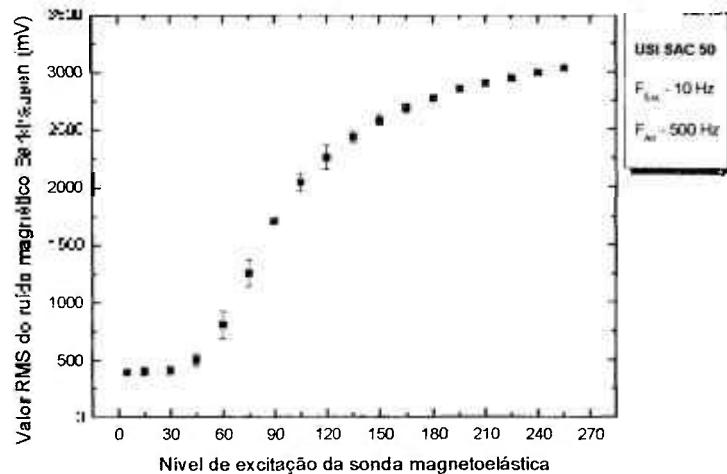


FIGURA 4.24. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

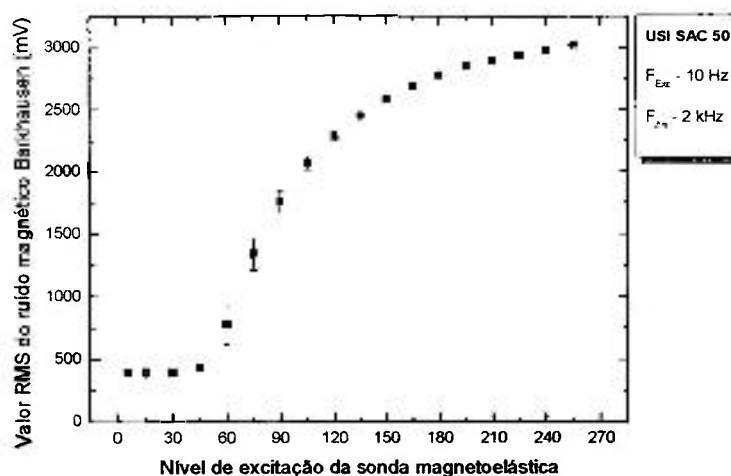


FIGURA 4.25. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

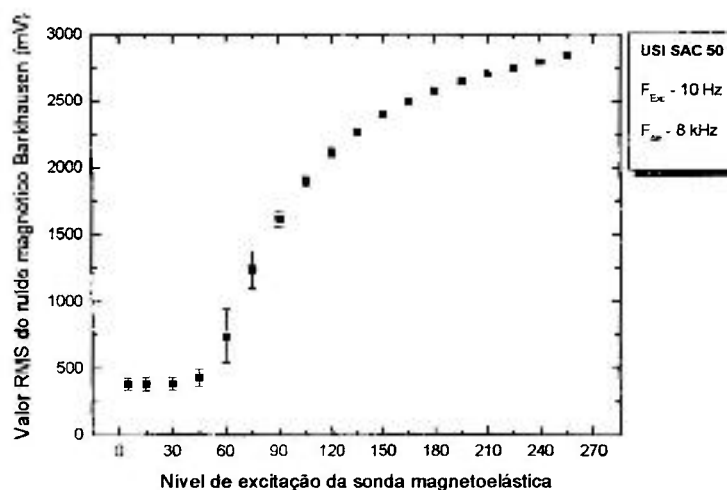


FIGURA 4.26. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

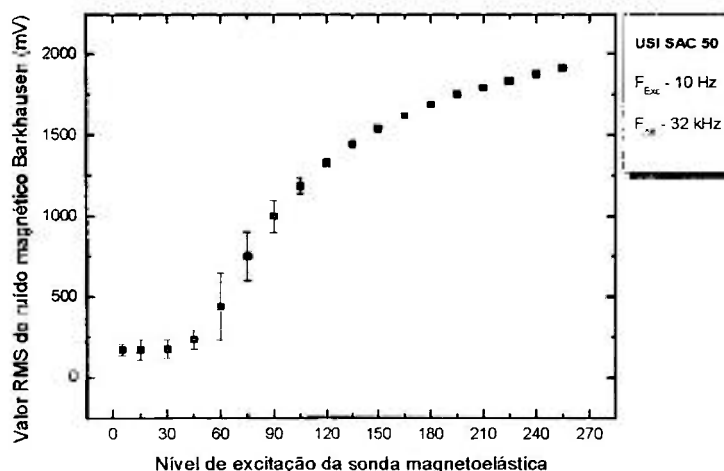


FIGURA 4.27. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

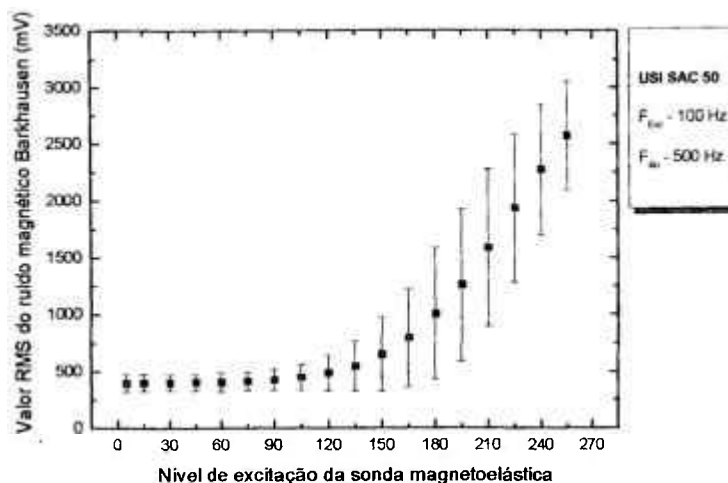


FIGURA 4.28. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

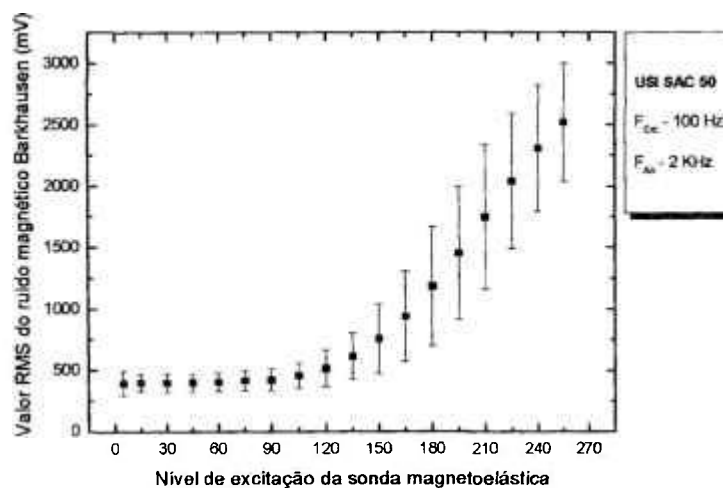


FIGURA 4.29. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

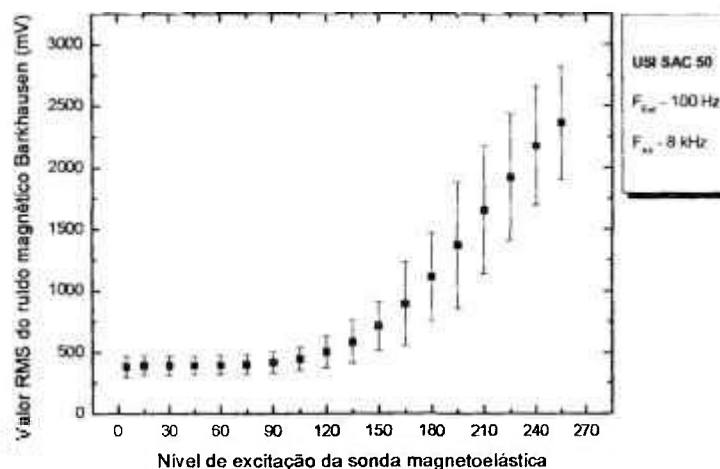


FIGURA 4.30. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

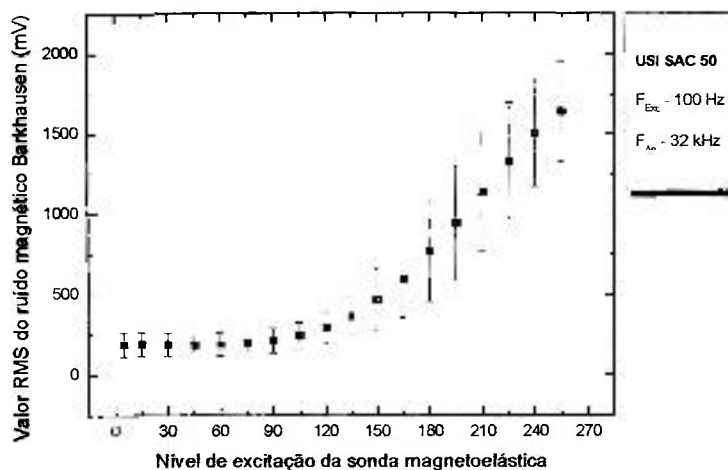


FIGURA 4.31. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

Para todos os materiais estudados, os dados representando o valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda magnetoelástica apresentaram perfis característicos para as frequências de 10 Hz e de 100 Hz.

Para a frequência de 10 Hz, podem-se identificar três regiões distintas, para os níveis de excitação aplicados. Na primeira região, caracterizada por baixos níveis de excitação da sonda, o valor RMS do ruído magnético Barkhausen aumenta muito pouco com o aumento do nível de excitação. Na segunda região há um aumento expressivo na taxa de variação do valor RMS do ruído com o nível de excitação da sonda, ou seja, pequenas variações no nível de excitação produzem grandes variações no valor RMS do ruído. Para valores mais elevados do nível de excitação, caracterizando a terceira região, a taxa de variação do valor RMS do RMB com o nível de excitação volta a diminuir.

Para a frequência de 100 Hz, identificam-se, claramente, duas regiões distintas para os níveis de excitação aplicados. Na primeira região, o aumento do valor RMS do ruído magnético Barkhausen com o nível de excitação da sonda é muito pequeno. Esta região é bem maior do que a observada para a frequência de 10 Hz. Para valores mais elevados do nível de excitação, observa-se o mesmo comportamento apresentado na frequência de 10 Hz, ou seja, um aumento expressivo na taxa de variação do ruído magnético Barkhausen com o nível de excitação. O perfil dos dados obtidos para as frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz e 2 kHz, podem ser observados nas FIG. 4.32 a FIG. 4.34.

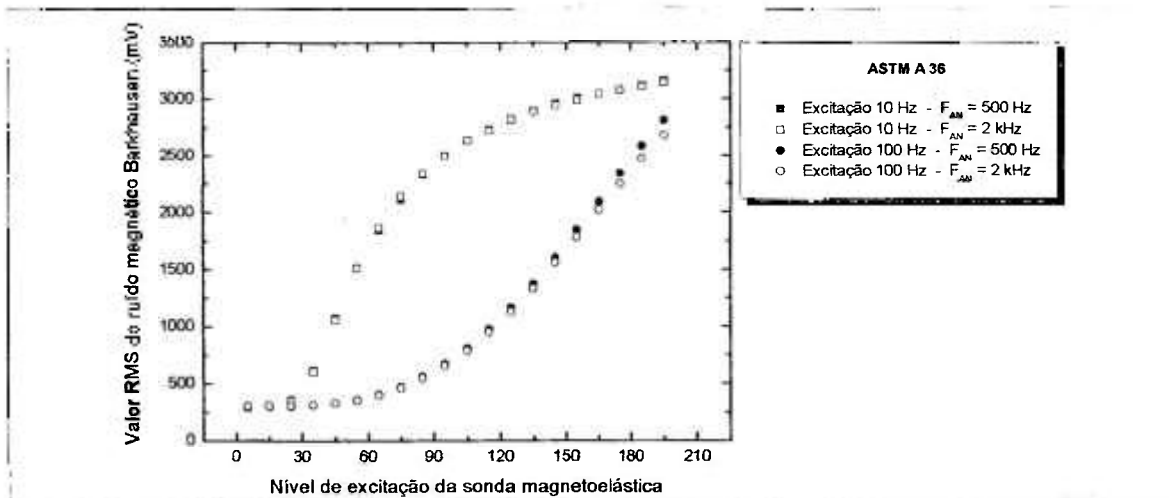


FIGURA 4.32. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequências de excitação 10 Hz e 100 Hz e de análise de 500 Hz e 2 kHz.

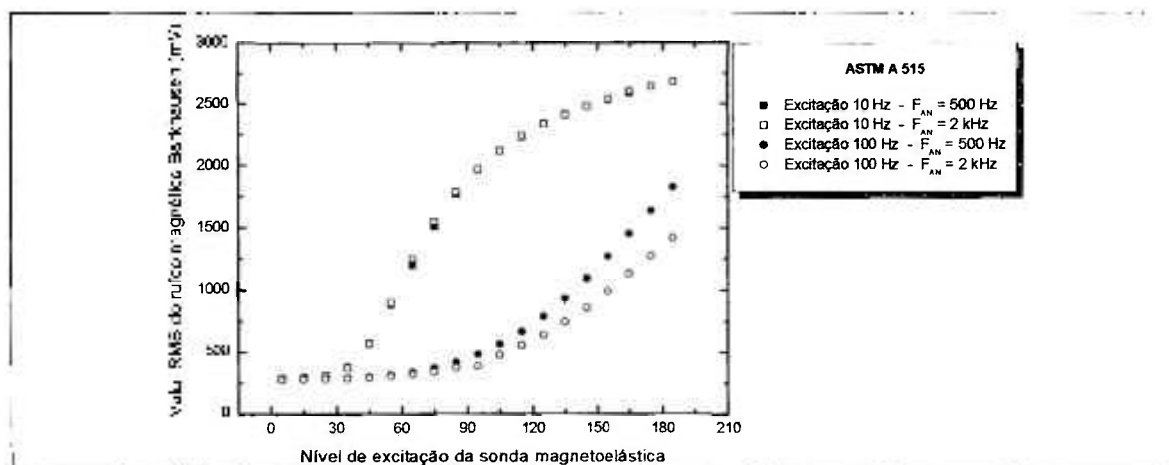


FIGURA 4.33. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 515, frequências de excitação 10 Hz e 100 Hz e de análise de 500 Hz e 2 kHz.

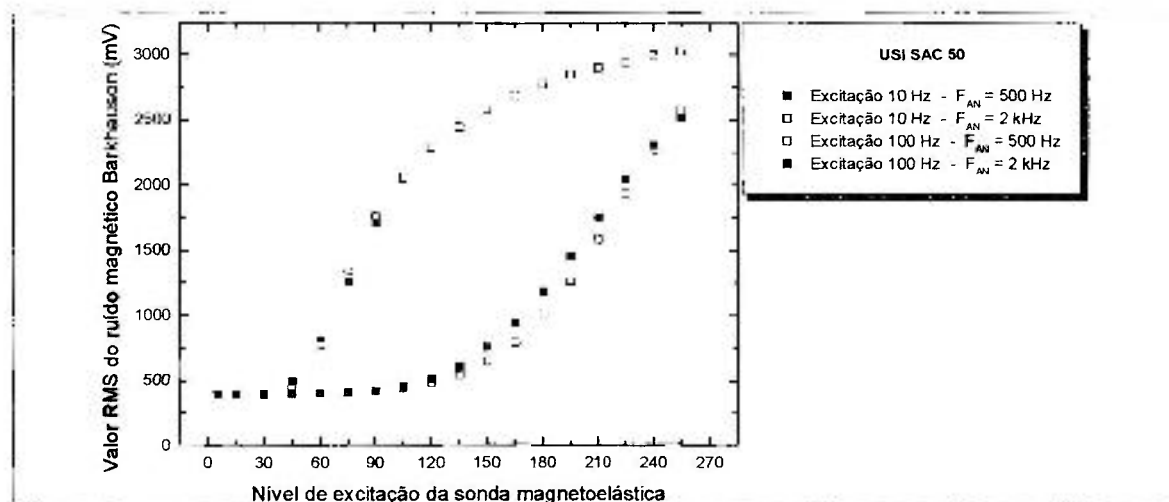


FIGURA 4.34. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço USI SAC 50, frequências de excitação 10 Hz e 100 Hz e de análise de 500 Hz e 2 kHz.

Pela análise das FIG. 4.32 a 4.34 pode-se observar que, para a mesma frequência de excitação, principalmente 10 Hz, o valor RMS do RMB é praticamente o mesmo para as frequências de análise de 500 Hz e 2 kHz. Isto significa que, embora cada uma das frequências de análise utilizadas correspondam a sinais vindos a partir de profundidades diferentes do material, o sistema de ensaio não consegue perceber estas diferenças. Para a frequência de excitação de 100 Hz este efeito pode ser observado para os aços ASTM A 36 e USI SAC 50. Para o aço ASTM A 515 o sistema já conseguiu perceber diferenças, tendo o RMB apresentado valores RMS mais elevados para a frequência de análise de 500 Hz, que corresponde à maior profundidade da qual o ruído pode ser detectado.

De acordo com a definição para a profundidade de penetração δ , considerando-se o mesmo material (mesma condutividade elétrica, permeabilidade magnética) e mantendo-se a geometria de ensaio, a única variável a interferir na profundidade de penetração é a frequência de excitação. Nestas condições, a relação entre as profundidades de penetração para as frequências de excitação de 10 Hz e de 100 Hz é dada por:

$$\frac{\delta(F_{Exc1})}{\delta(F_{Exc2})} = \frac{\sqrt{1/\pi * F_{Exc1} * \sigma_{Eletrica} * \mu_0 * \mu}}{\sqrt{1/\pi * F_{Exc2} * \sigma_{Eletrica} * \mu_0 * \mu}} \quad 4.1$$

ou seja:

$$\frac{\delta(F_{Exc1})}{\delta(F_{Exc2})} = \sqrt{\frac{F_{Exc2}}{F_{Exc1}}} \quad 4.2$$

Sendo,

F_{Exc1} a frequência de excitação 1

F_{Exc2} a frequência de excitação 2

Para a frequência 1 igual a 100 Hz e a frequência 2 igual a 10 Hz tem-se:

$$\frac{\delta_{100Hz}}{\delta_{10Hz}} = \sqrt{\frac{10}{100}} = 0,316$$

Isto significa que, para um dado material, a profundidade de penetração δ de um campo magnético com frequência de 100 Hz é de apenas 31,6% da profundidade de penetração para um campo com frequência de 10 Hz. Pode-se observar que para a

freqüência de excitação de 100 Hz, a profundidade de penetração δ é bem menor do que a obtida com a freqüência de excitação de 10 Hz. Consequentemente, a profundidade do material que pode ser avaliada também é menor. Isto implica que para a avaliação de propriedades do material nas regiões superficiais, a freqüência de ensaio mais adequada, com a instrumentação disponível é a de 100 Hz. Esta freqüência restringe a penetração do campo magnético de excitação no material, fazendo com que variações que possam ocorrer a maiores profundidades não interfiram com as que ocorrem nas camadas mais superficiais do material. Como consequência, variações de propriedades ou características do material junto à superfície serão as maiores responsáveis pelas alterações no valor do RMS do RMB detectado.

Com relação às freqüências de análise, desde que o ruído magnético Barkhausen é gerado pela perturbação nas mudanças do fluxo magnético, a mesma relação de profundidade de penetração é considerada para avaliar a profundidade de origem do ruído magnético Barkhausen (Moorthy et al., 2003). Desta forma, utilizando o mesmo procedimento adotado para as freqüências de excitação, pode-se determinar a relação existente entre as penetrações para as freqüências de análise utilizadas. Os resultados obtidos são apresentados na TAB. 4.5. A referência para as comparações é a menor freqüência de análise utilizada (500 Hz), correspondente à maior profundidade de penetração obtida.

TABELA 4.5 – Profundidade de penetração (%) em função da freqüência de análise para um dado material.

Freqüência de Análise (kHz)	Profundidade de Penetração (%)
0,5	100
2	50
8	25
32	12,5

A mesma análise feita para as freqüências de excitação pode ser estendida para as freqüências de análise, ou seja, à medida que as freqüências de análise se tornam maiores,

as profundidades das quais as informações são obtidas são cada vez menores, sendo o conteúdo de alta frequência do RMB atribuído principalmente à magnetização próxima à superfície (Moorthy et al., 2003).

A dispersão apresentada pelos três aços carbono estudados foi pequena, fato que pode ser comprovado pela observação da FIG. 4.8 a FIG. 4.31. A exceção ocorreu para o aço USI SAC 50 que, para a frequência de excitação de 100 Hz, apresentou uma dispersão bem maior dos resultados. Esta dispersão não foi observada, para este material, na frequência de 10 Hz e as medições, para as duas frequências, foram realizadas nas mesmas condições, inclusive sem a alteração da geometria de medição. A partir dos resultados obtidos ao longo dos demais experimentos realizados, podem-se identificar alguns fatores que podem ter contribuído para este resultado. O primeiro deles pode estar ligado às características do elemento sensor, que para a frequência de excitação de 100 Hz podem não ser tão adequadas para este material. Entretanto, para a comprovação deste fato é necessária a utilização de sensores com outras características (como indutância, resistência e geometria). Devido à não disponibilidade de outros sensores para a realização do ensaio este estudo, juntamente com o desenvolvimento de pesquisas envolvendo o projeto de elementos sensores, serão algumas das recomendações sugeridas para trabalhos futuros.

Após a aquisição dos dados apresentados no item 4.6 foi pesquisada uma função que possibilitasse a melhor representação deste conjunto de dados, utilizando-se como critérios de escolha a semelhança apresentada pela função com o perfil dos dados obtidos e o valor do coeficiente de correlação obtido com o ajuste. Foi selecionada uma função sigmoideal (Boltzmann), com a forma:

$$RMB = \frac{R_1 - R_2}{1 + e^{\frac{(N_{Ex} - N_0)}{dN}}} + R_2 \quad 4.3$$

sendo,

R_1 , R_2 , N_0 e dN parâmetros de ajuste

RMB o valor RMS ruído magnético Barkhausen medido no material

N_{Ex} o nível de excitação da sonda magnetoelástica

Conforme descrito no item 3.4.1 (a), para cada nível de excitação selecionado e cada par frequência de excitação/frequência de análise, foram adquiridas quinze amostras do ruído magnético Barkhausen e determinado o valor RMS médio referente a estas quinze amostras. Este procedimento foi realizado três vezes, em dias diversos, mantendo-se constantes fatores como o tempo de aquecimento e de parada dos sistemas utilizados no experimento, o posicionamento da sonda em relação ao material e a temperatura ambiente. Após as aquisições foi realizada uma análise da variância dos dados obtidos, de forma a verificar a se as repetições feitas em cada dia são causa de variações nos resultados. A análise foi realizada no conjunto de dados gerado para o aço USI SAC 50, para frequências de excitação e de análise selecionadas aleatoriamente. Os resultados obtidos indicaram que as repetições realizadas em um mesmo dia não são causa de variações nos resultados. Este fato fornece uma indicação de que a instrumentação utilizada para a aquisição do ruído magnético Barkhausen apresenta uma alta estabilidade. Já as repetições realizadas em dias diferentes provocam variações nos resultados das medidas. Os resultados da análise da variância realizada podem ser observados no APÊNDICE F.

A partir das equações das funções determinadas para cada par frequência de excitação/frequência de análise e cada material, foi determinado o valor mais adequado para o nível de excitação da sonda magnetoelástica durante os estudos realizados neste trabalho. O critério utilizado foi a determinação do ponto de inflexão de cada uma das curvas geradas. Este ponto representa o local da curva onde a taxa de variação do RMB em relação ao nível de excitação é máxima, ou seja, neste ponto a sensibilidade do sistema de ensaio apresenta um valor máximo. O nível de excitação da sonda (consequentemente a corrente de excitação da sonda e o campo magnético de excitação resultante) correspondente a este ponto foi a referência para realização dos ensaios envolvendo a determinação de tensões. Para justificar esta escolha será utilizada a curva obtida para o ajuste dos dados referentes ao aço ASTM A 36, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz, que pode ser observada na FIG. 4.35. A curva apresenta as três regiões descritas anteriormente, com diferentes comportamentos do ruído magnético Barkhausen em função do nível de excitação. A região da curva ao redor do ponto de inflexão é a região que apresenta a maior sensibilidade de teste. A utilização de valores mais baixos ou mais elevados do nível de excitação provoca uma diminuição nesta sensibilidade. A tensão aplicada a um material ferromagnético produz o mesmo efeito de um campo magnético aplicado ao material.

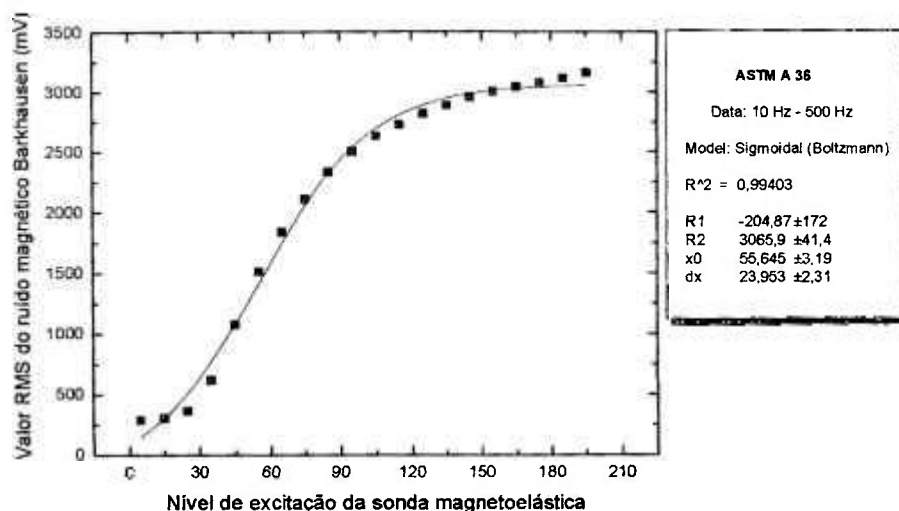


FIGURA 4.35. Valor RMS do RMB em função do nível de excitação da sonda. Aço ASTM A 36, frequência de excitação 10 Hz frequência de análise de 500 Hz.

Assim, a presença de tensões de tração atua no sentido de reforçar o valor do campo aplicado ao material e tensões de compressão atuam em sentido contrário. Dependendo do valor do campo magnético aplicado ao material, as tensões presentes podem fazer com que o ensaio seja realizado em regiões de baixa sensibilidade, ou seja, regiões em que pequenas variações de campo (e conseqüentemente, de tensão) produzem variações muito pequenas no RMB gerado. Adotando-se o ponto de inflexão da curva como referência, pequenas alterações no campo produzem maiores alterações nos valores do RMB gerado, pois a referência é o ponto central da região de maior sensibilidade do ensaio.

As curvas de ajuste para os dados obtidos para as frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz podem ser observadas no APÊNDICE G.

Os valores para o nível de excitação da sonda magnetoelástica e das correntes de excitação correspondentes, determinados a partir deste procedimento, podem ser observados na TAB 4.6. O ponto de inflexão das curvas foi determinado igualando-se a derivada segunda das funções obtidas a zero.

Para permitir comparações entre os resultados obtidos com diferentes frequências de análise e como os valores dos níveis de excitação determinados estão próximos para cada uma das frequências de análise utilizadas, o valor para o nível de excitação utilizado nos experimentos foi o valor médio dos níveis obtidos para cada material e para as frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz. Estes valores foram 57 e 157 para o aço

ASTM A 36, 73 e 165 para o aço ASTM A 515 e 88 e 205 para o aço USI SAC 50, respectivamente. O valor do campo magnético de excitação, medido na extremidade do núcleo da bobina de excitação da sonda, com estes valores de excitação, atingiram um valor de 29 kAm^{-1} . Valores de campo medidos na extremidade do núcleo da bobina de excitação de cerca de 28 kAm^{-1} são suficientes para produzir a saturação de aços endurecidos (Moorthy et al., 2004).

TABELA 4.6. Valores do nível e da corrente de excitação aplicados à sonda magnetoelástica em função do material e das frequências de excitação e análise.

Material	Frequência do Campo Magnético de Excitação (Hz)	Frequências de Análise do RMB (kHz)	Nível de Excitação (UA)	Corrente de Excitação (mA)
ASTM A 36	10	0,5	55	550
		2	55	550
		8	58	580
		32	62	620
	100	0,5	159	1590
		2	156	1560
		8	156	1560
		32	157	1570
ASTM A 515	10	0,5	72	720
		2	71	710
		8	73	730
		32	76	760
	100	0,5	162	1620
		2	164	1640
		8	165	1650
		32	165	1650
USI SAC 50	10	0,5	88	880
		2	87	870
		8	88	880
		32	89	890
	100	0,5	210	2100
		2	205	2050
		8	205	2050
		32	202	2020

O valor do campo magnético medido na superfície dos materiais utilizados nos experimentos, medido com o sensor do medidor de campo magnético posicionado entre uma das extremidades do núcleo ferromagnético e a bobina de detecção do ruído magnético Barkhausen, paralelo à superfície podem ser observados na TAB. 4.7.

TABELA 4.7. Valores do nível e da corrente de excitação aplicados à sonda magnetoelástica em função do material e das frequências de excitação e análise.

Material	Frequência do Campo Magnético de Excitação (Hz)	Nível de Excitação (UA)	Corrente de Excitação (mA)	Campo Magnético (A/m)
ASTM A 36	10	57	570	350
	100	160	1600	220
ASTM A 515	10	73	730	730
	100	165	1650	420
USI SAC 50	10	88	880	310
	100	205	2050	180

4.7 Dependência Direcional

A variação do valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da direção de aplicação do campo magnético de excitação, para as frequências de excitação de 10 e 100 Hz, frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz, para os aços ASTM A 36, ASTM A 515 e USI SAC 50 pode ser observada nas FIG. 4.36 a FIG 4.59. As barras de erro correspondem à estimativa por intervalo dos valores médios verdadeiros com coeficiente de confiança de 95%. O eixo das abcissas representa o ângulo que a direção de aplicação do campo magnético de excitação forma com o eixo longitudinal das chapas, informado pelo fornecedor como sendo o eixo paralelo à direção de laminação.

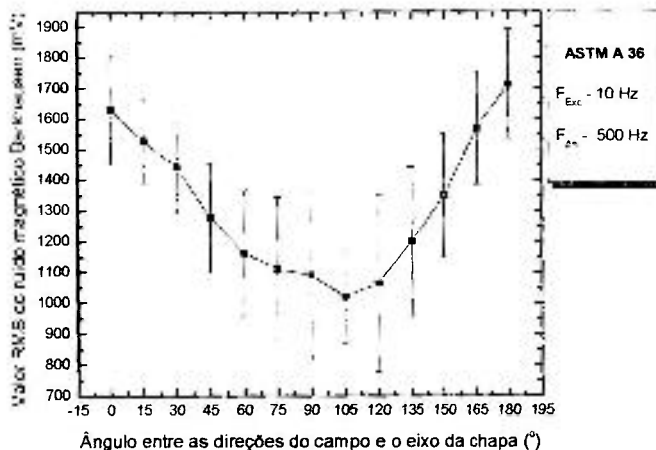


FIGURA 4.36. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 500 Hz.

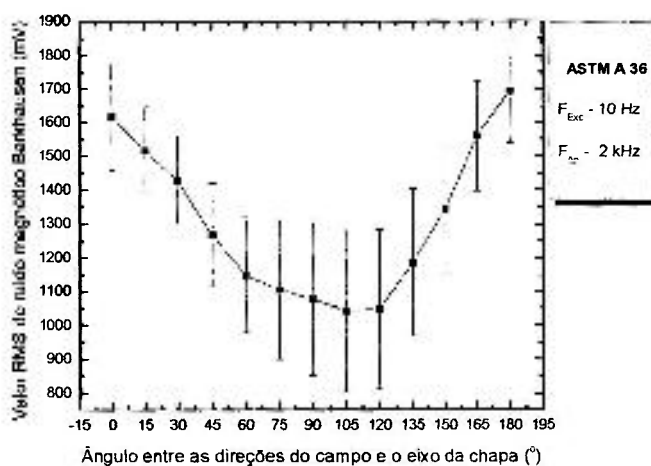


FIGURA 4.37. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 2 kHz.

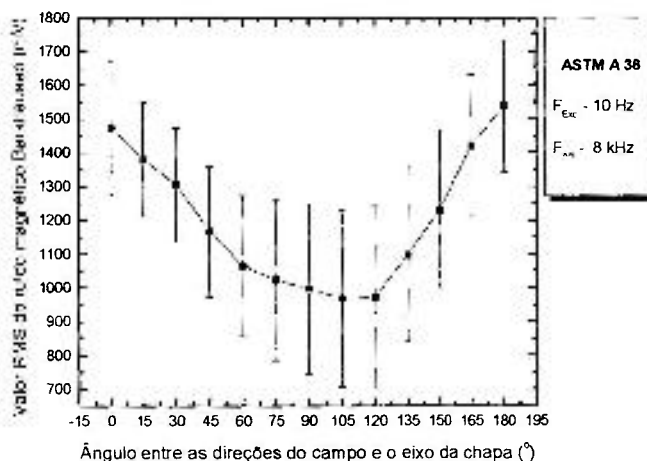


FIGURA 4.38. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 8 kHz.

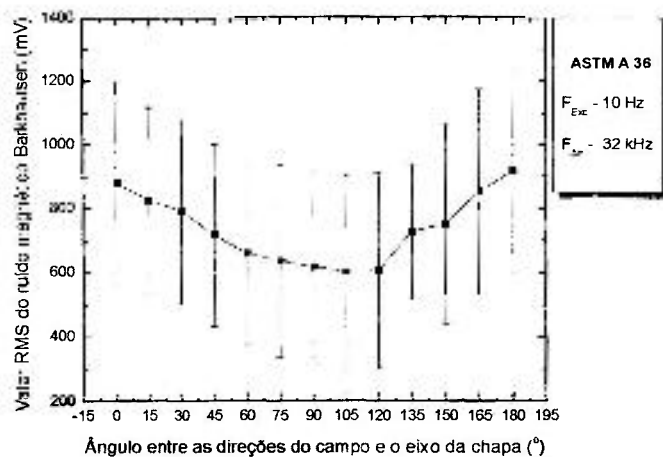


FIGURA 4.39. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 32 kHz.

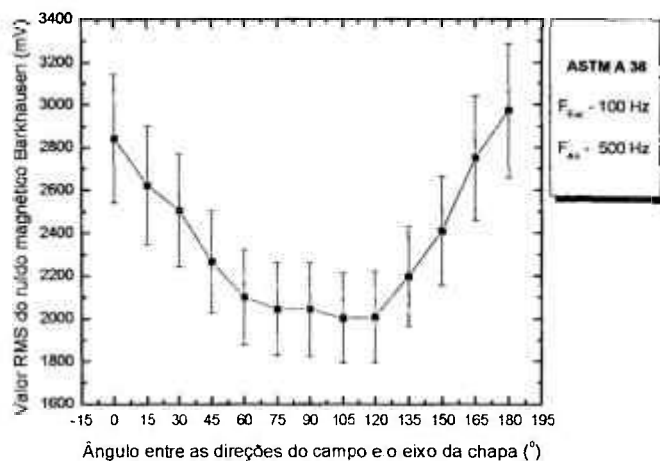


FIGURA 4.40. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 500 Hz.

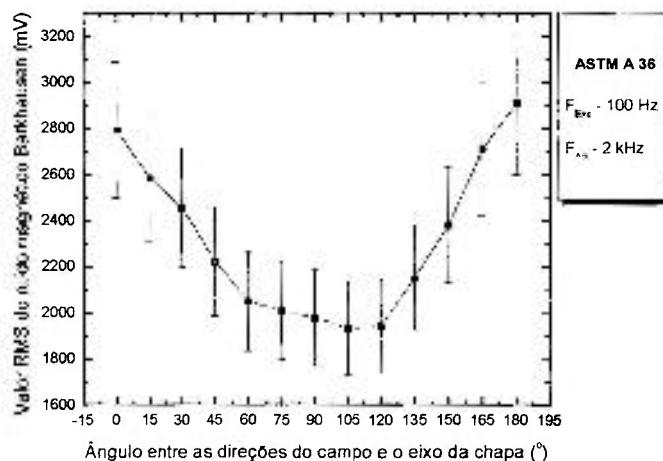


FIGURA 4.41. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 2 kHz.

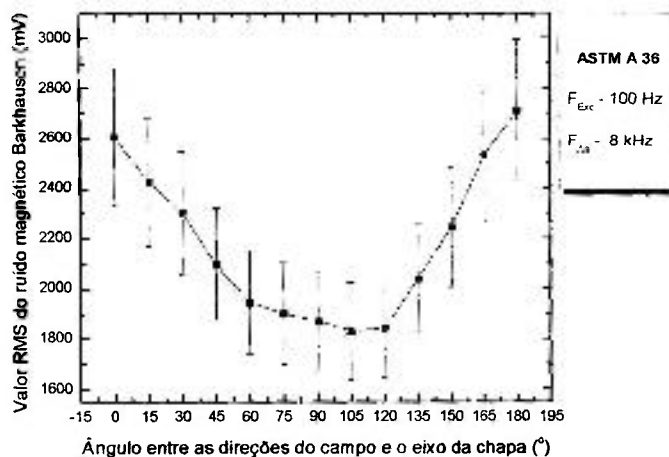


FIGURA 4.42. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 8 kHz.

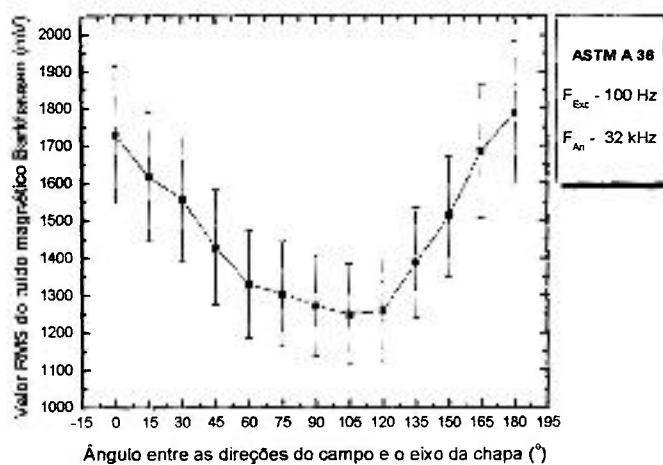


FIGURA 4.43. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 32 kHz.

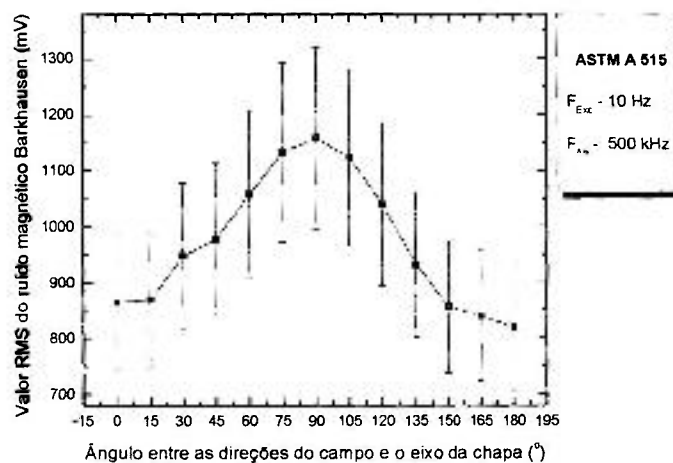


FIGURA 4.44. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 500 Hz.

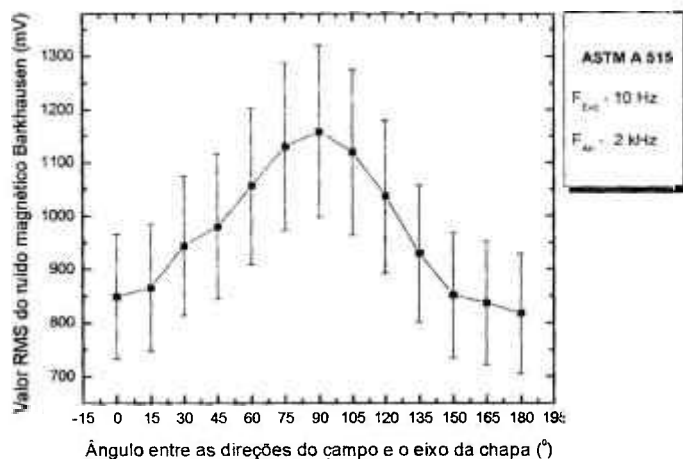


FIGURA 4.45. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 2 kHz.

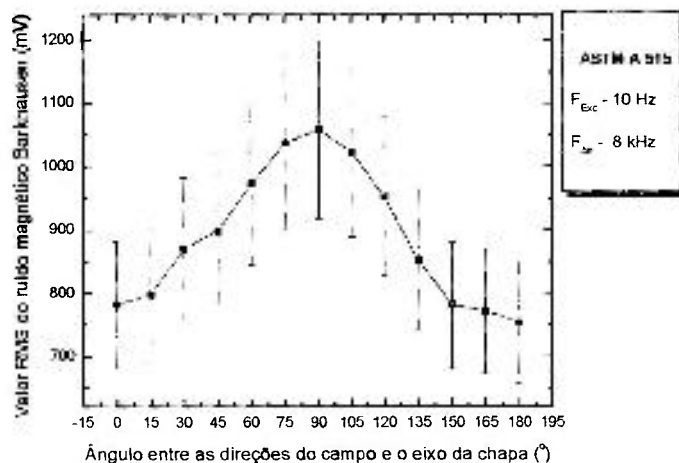


FIGURA 4.46. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 8 kHz.

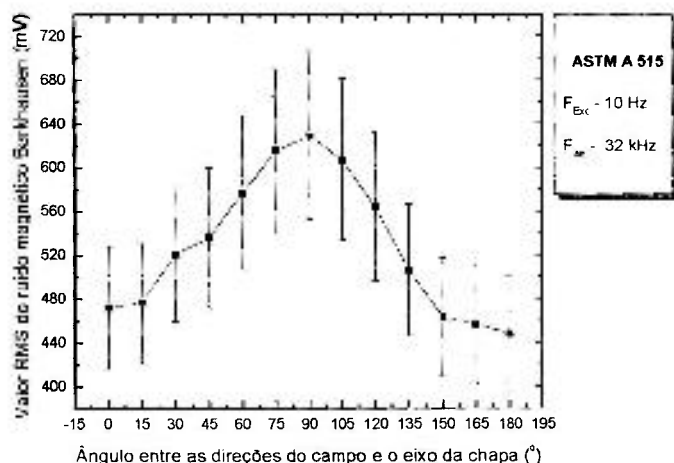


FIGURA 4.47. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 32 kHz.

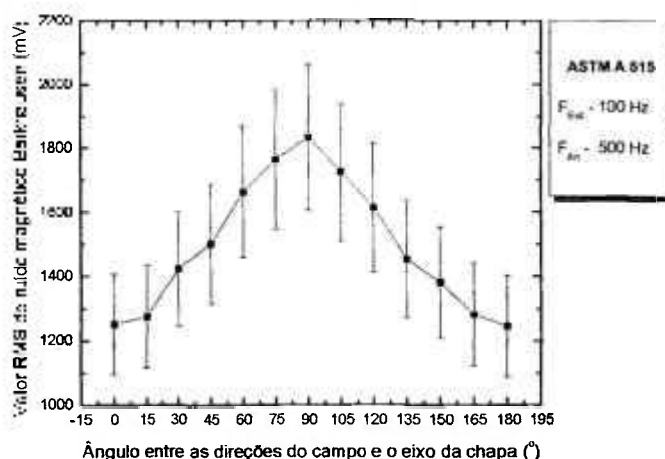


FIGURA 4.48. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 500 Hz.

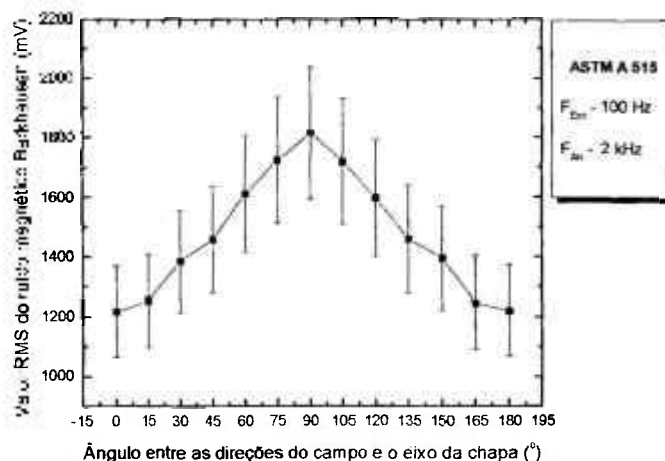


FIGURA 4.49. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 2 kHz.

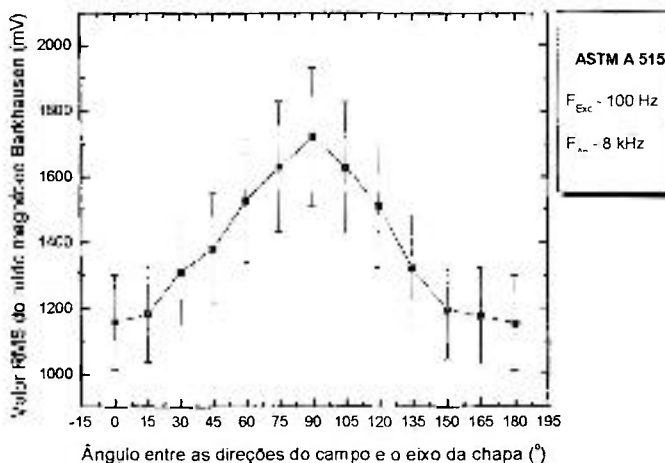


FIGURA 4.50. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 8 kHz.

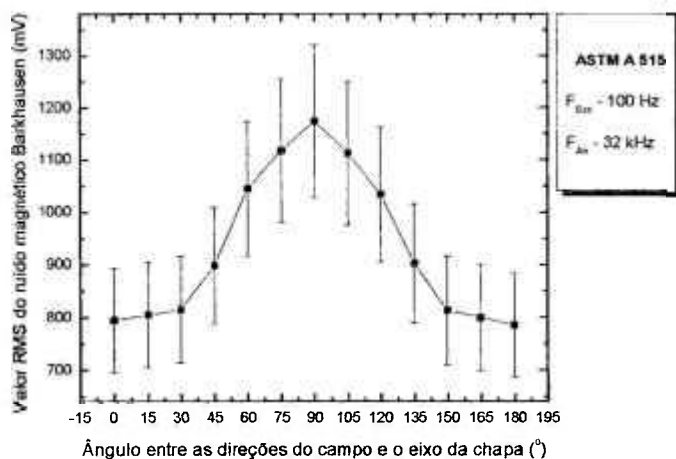


FIGURA 4.51. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 32 kHz.

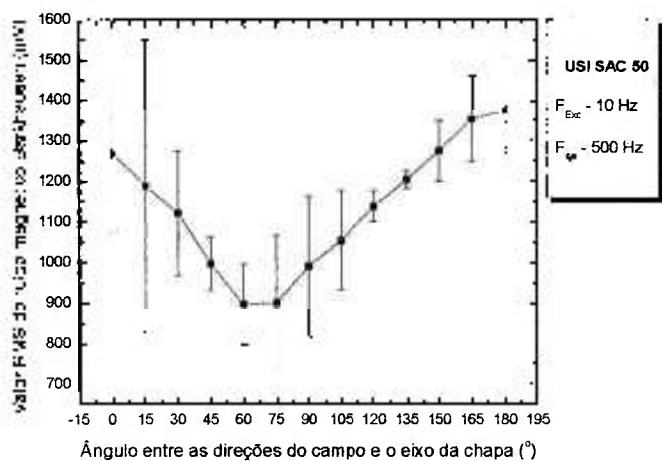


FIGURA 4.52. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 500 Hz.

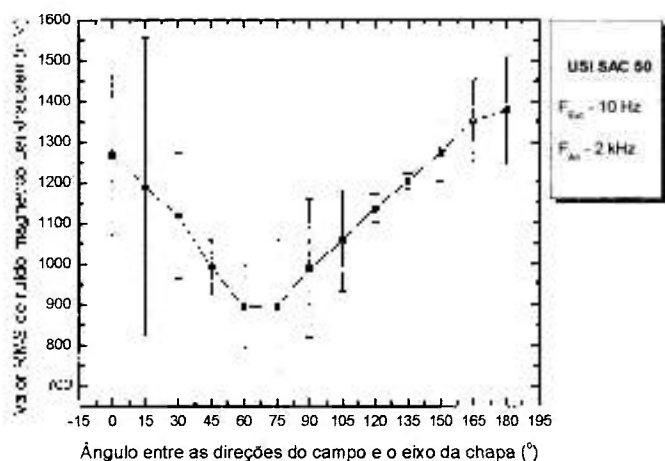


FIGURA 4.53. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 2 kHz.

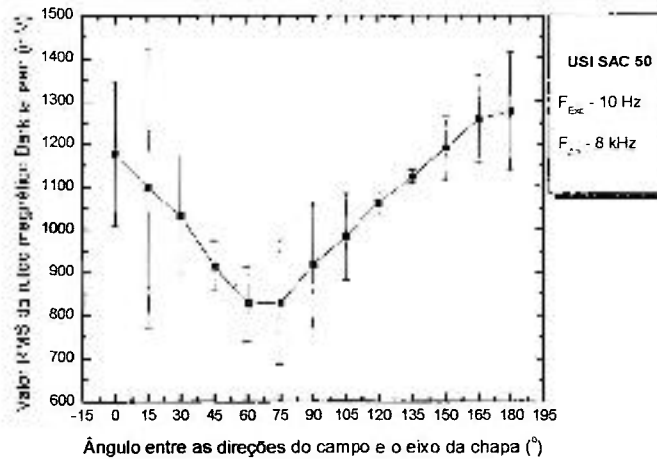


FIGURA 4.54. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 8 kHz.

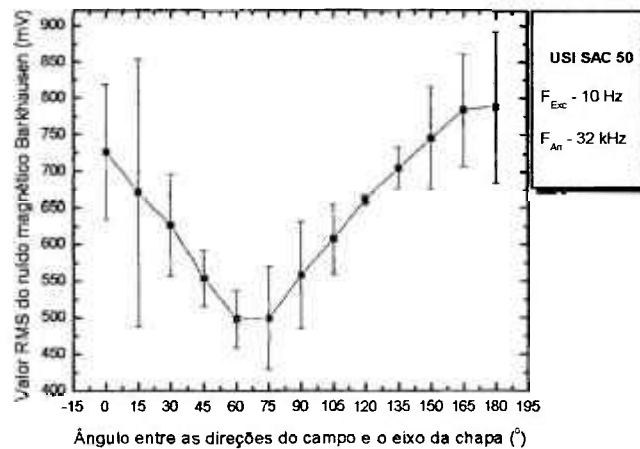


FIGURA 4.55. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e de análise 32 kHz.

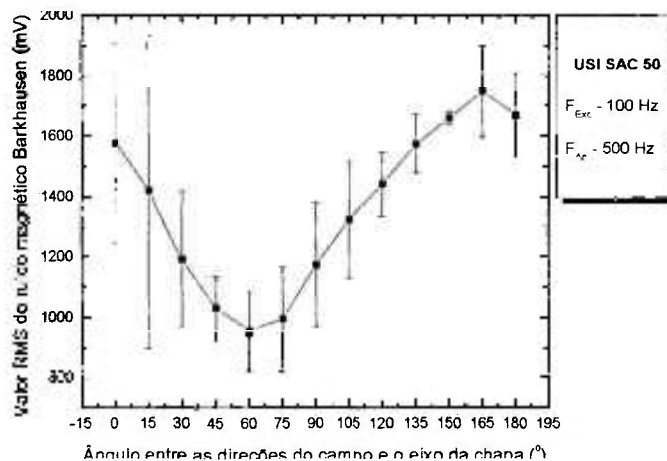


FIGURA 4.56. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 500 Hz.

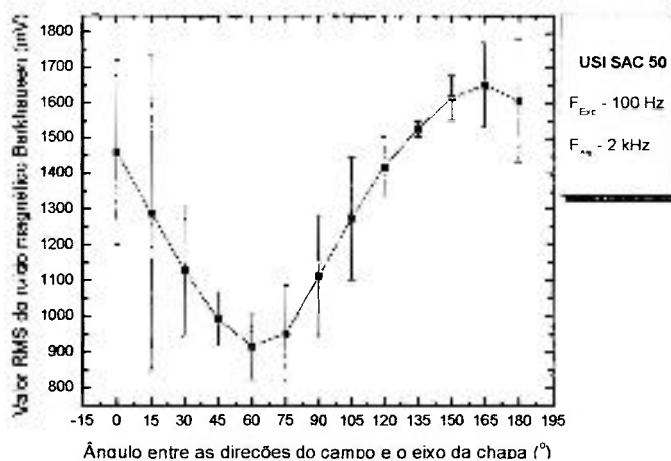


FIGURA 4.57. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 2 kHz.

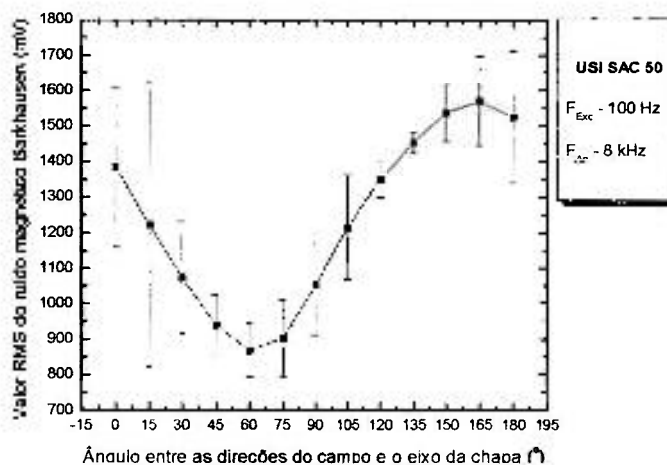


FIGURA 4.58. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 8 kHz.

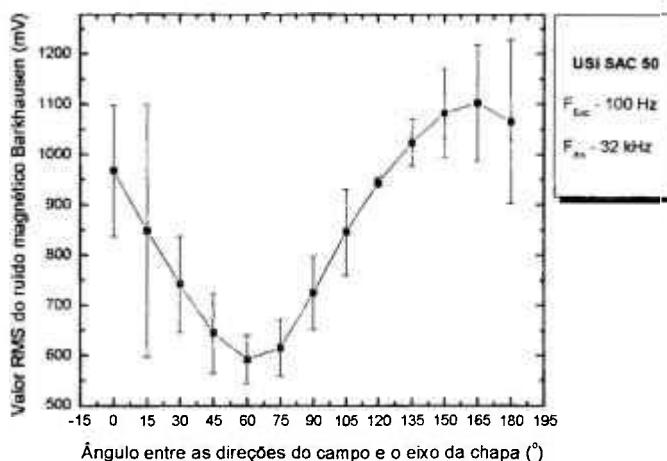


FIGURA 4.59. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e de análise 32 kHz.

Os resultados obtidos pelas medições realizadas em diferentes direções apresentaram uma dispersão elevada. Para aumentar a precisão dos resultados obtidos um número maior de medições deve ser realizado. Entretanto, para as finalidades desta etapa do trabalho, a de verificar o comportamento do RMB gerado no material em função da direção de realização das medidas, os resultados alcançados foram satisfatórios. Observando-se a FIG. 4.60 e FIG. 4.61, referentes ao aço ASTM A 36, verifica-se que os maiores valores RMS apresentados pelo RMB gerado ocorrem a um ângulo de 180° com o eixo longitudinal das chapas, ou seja, na direção paralela ao eixo.

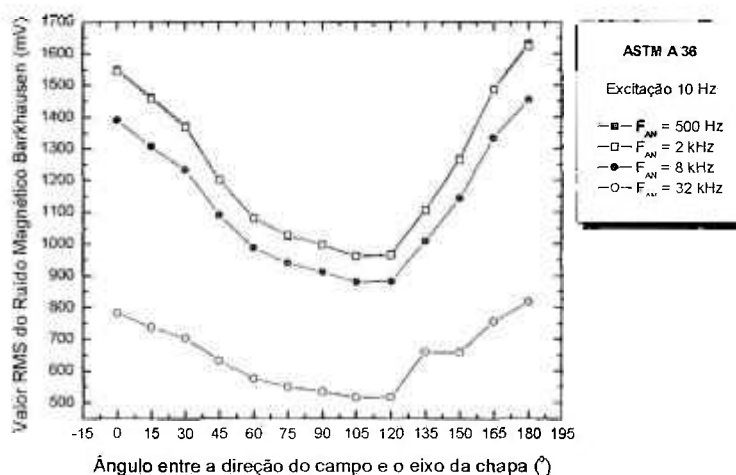


FIGURA 4.60. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

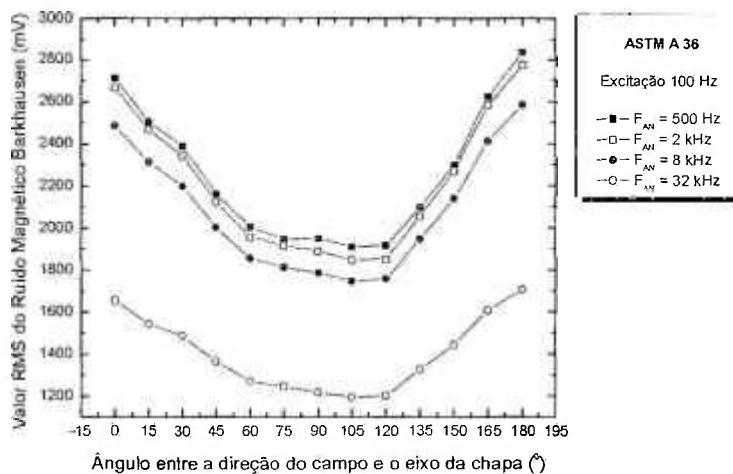


FIGURA 4.61. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

Esta direção corresponde à direção paralela à direção de laminação da chapa examinada, informada pelo fornecedor. O mesmo ocorre para o aço USI SAC 50, conforme pode ser observado na FIG. 4.64 e FIG. 4.65.

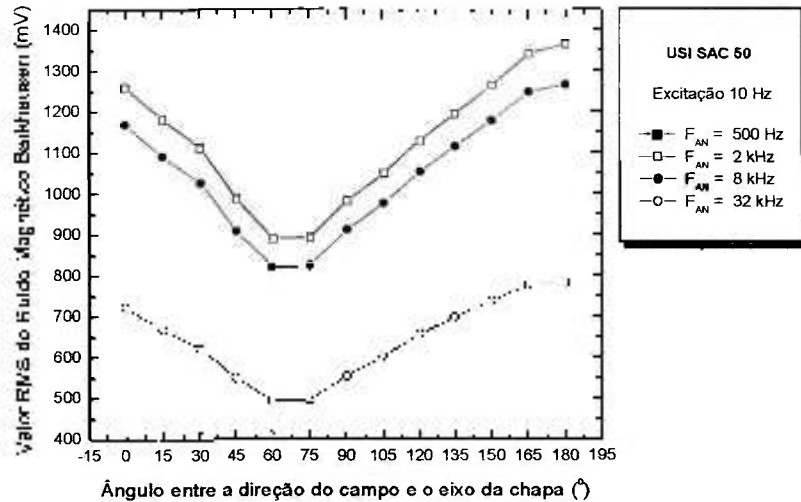


FIGURA 4.62. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

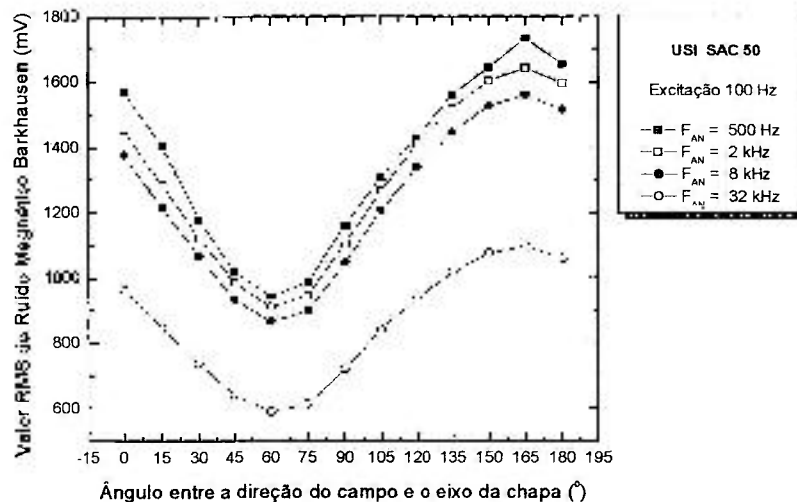


FIGURA 4.63. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

Para o aço ASTM A 515 (FIG. 4.62 E 4.63) o valor RMS mais elevado do RMB ocorreu em um ângulo de 90° com o eixo da chapa.

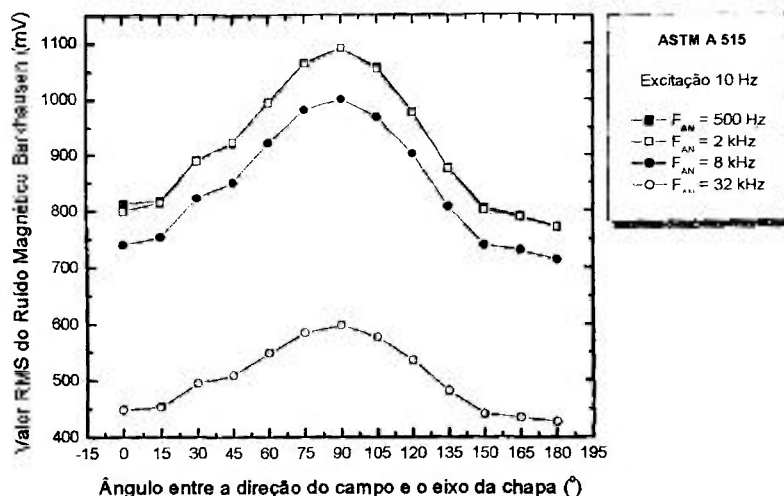


FIGURA 4.64. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

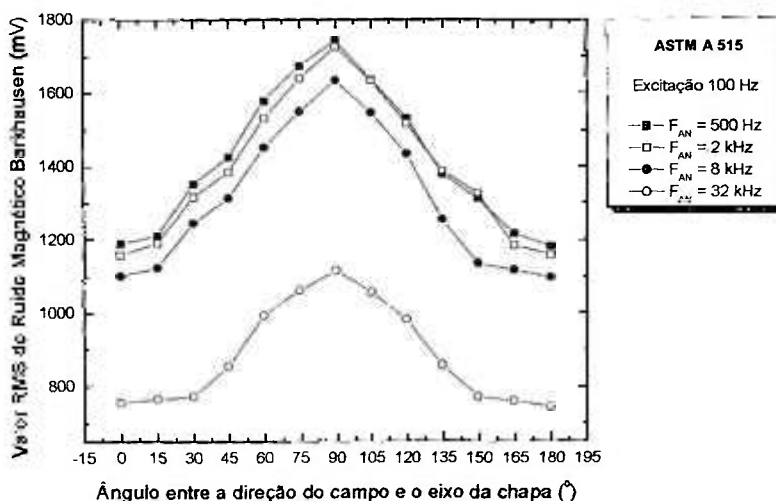


FIGURA 4.65. Valor RMS do RMB em função do ângulo formado entre a direção de aplicação do campo magnético de excitação e a direção considerada como sendo o eixo longitudinal da chapa. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

Entretanto, o exame micrográfico de uma amostra deste aço, que pode ser observado na FIG. 4.4, revelou que a direção de laminação da chapa fazia um ângulo de 90° com o eixo tomado como referência. Desta forma, para todos os materiais avaliados, o valor RMS máximo do RMB ocorreu na direção de laminação das chapas. Este fato pode ser explicado pela textura desenvolvida nestes materiais pelo processo de fabricação. No processo de laminação de chapas, os grãos tendem a se alinhar em determinadas direções, dando origem a uma textura ou orientação preferencial. O grau de anisotropia produzido no

material depende do grau de alinhamento dos cristais. Para o aço, no estado desmagnetizado e sem a presença de tensões, os vetores de magnetização dos domínios tendem a se alinhar ao longo dos eixos cúbicos do cristal, sendo as direções $\langle 100 \rangle$ as direções de fácil magnetização. Entretanto, a produção de planos de escorregamento durante a laminação pode induzir o aparecimento de uma anisotropia magnética no material de forma a contribuir para o alinhamento de um eixo de fácil magnetização com a direção de laminação do material.

Os resultados obtidos nesta etapa apresentam algumas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho e para suas aplicações práticas. De imediato, verifica-se a existência da dependência das características do RMB gerado com a direção de aplicação do campo magnético de excitação. Assim, na calibração do sistema de ensaio para a medição de deformações e tensões, as direções de realização das medições devem ser claramente determinadas e, estas direções, devem ser as mesmas no componente ou material testado. A dispersão observada nos resultados é devida praticamente ao posicionamento da sonda na região de interesse. Este foi o único parâmetro alterado durante as medições, pois a cada conjunto de medições realizadas a sonda foi retirada de sua montagem inicial e posicionada novamente.

Uma possível aplicação deste método é a determinação das características de anisotropia de materiais utilizados em processos de estampagem. A avaliação das características de deformação destes materiais, atualmente, é realizada através da determinação do coeficiente de anisotropia R do material (Caddell, 1983). Outra possível aplicação é a determinação da direção de laminação em situações específicas. O conhecimento desta direção é importante para a retirada de corpos de prova para ensaios de impacto (ASME III D1, 2001) e para ensaios de tenacidade à fratura (ASME III D3, 2001).

O conhecimento desta direção também é importante em análises para a determinação da condição de fim de vida de componentes. A resistência ao crescimento de trinca pode variar consideravelmente para um dado material dependendo da localização e orientação da trinca. A orientação é importante porque os processos de fabricação normalmente produzem microestruturas orientadas. As fases primárias se concentram em planos paralelos à direção de laminação de placas e chapas, sendo responsáveis pela baixa tenacidade à fratura para trincas nestes planos (Zerbst et al., 2003).

Na TAB. 4.8 podem ser observados os valores máximos e mínimos determinados para o RMB, os ângulos em que eles ocorreram e a diferença entre os valores máximo e mínimo, com a precisão correspondente à estimativa por intervalo dos valores médios

verdadeiros com coeficiente de confiança de 95%. Os resultados são apresentados para cada material e cada par frequência de excitação/frequência de análise.

TABELA 4.8 – Valores RMS máximo e mínimo do RMB gerado nos materiais, ângulos em que estes valores foram medidos e diferença entre os valores máximo e mínimo.

Material	Frequência de Excitação (Hz)	Frequência de Análise (Hz)	Valor RMS do Ruído Magnético Barkhausen V_{RMS}				
			V_{RMS} máximo (mV)	Ângulo (°)	V_{RMS} mínimo (mV)	Ângulo (°)	Diferença (mV)
ASTM A 36	10 Hz	500	1715±178	180	1022±150	105	692±150
		2	1694±154		1042±239		652±183
		8	1538±196		967±263		571±212
		32	916±320		602±302		314±284
	100 Hz	500	2974±314	180	2002±212	105	973±245
		2	2908±307		1933±205		975±238
		8	2710±286		1828±194		882±223
		32	1789±190		1250±134		539±150
ASTM A 515	10 Hz	500	1158±163	180	819±113	90	339±128
		2	1158±162		817±112		340±127
		8	1058±140		753±97		304±110
		32	629±77		448±52		181±60
	100 Hz	500	1833±228	180	1245±157	90	588±178
		2	1815±224		1218±152		596±175
		8	1719±211		1154±144		565±165
		32	1174±146		785±99		389±114
USI SAC 50	10 Hz	500	1376±134	180	896±99	60	480±108
		2	1377±132		894±102		483±108
		8	1276±139		827±87		449±106
		32	788±103		498±39		290±71
	100 Hz	500	1745±154	180	950±130	60	796±130
		2	1653±119		917±94		737±98
		8	1570±126		869±77		701±95
		32	1103±115		592±49		511±81

Pela análise da TAB. 4.8, pode-se observar que as diferenças entre os valores RMS máximo e mínimo do ruído magnético Barkhausen são maiores quando as medições são realizadas utilizando-se a frequência de excitação de 100 Hz. Nesta frequência, a

profundidade de penetração δ é de cerca de 31,6% da obtida com uma frequência de excitação de 10 Hz (ver item 4.6), ou seja, a região do material investigada se encontra mais próxima à superfície do material, não sendo afetada por variações que possam ocorrer em regiões mais profundas. Este fato indica que a frequência de excitação de 100 Hz evidencia mais as diferenças no valor RMS do RMB em função da direção de medição.

4.8 Influência do Acabamento Superficial

Os resultados obtidos para a variação do valor do ruído magnético Barkhausen em função do acabamento superficial podem ser observados nas FIG. 4.66 a FIG. 4.95. As barras de erro correspondem à estimativa por intervalo dos valores médios verdadeiros com coeficiente de confiança de 95%.

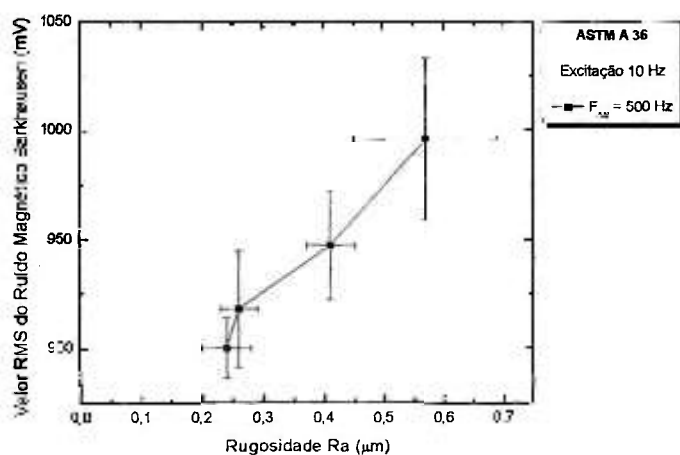


FIGURA 4.66 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 500 Hz.

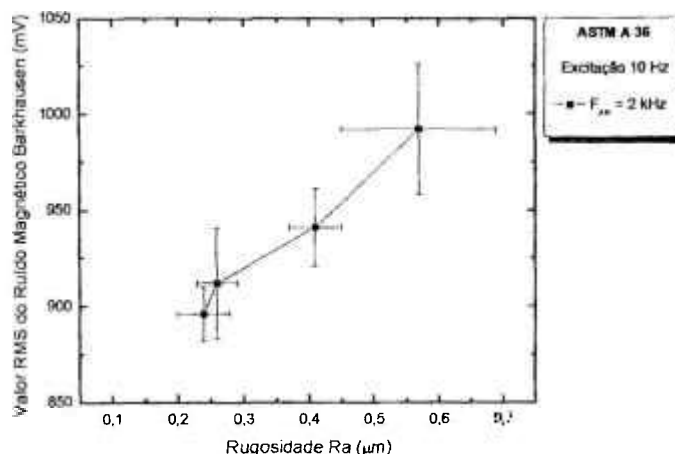


FIGURA 4.67 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 2 kHz.

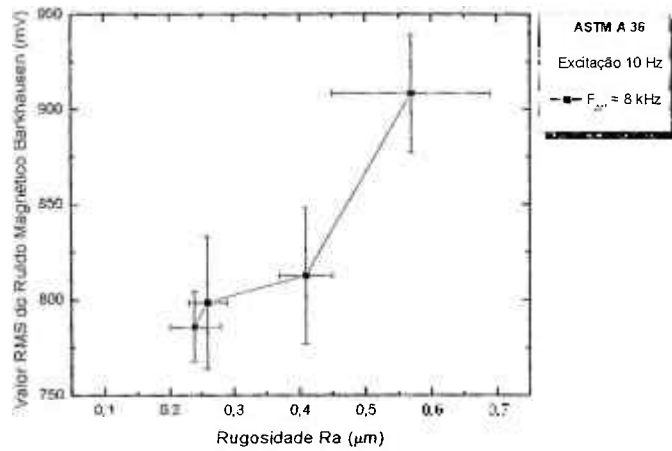


FIGURA 4.68 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 8 kHz.

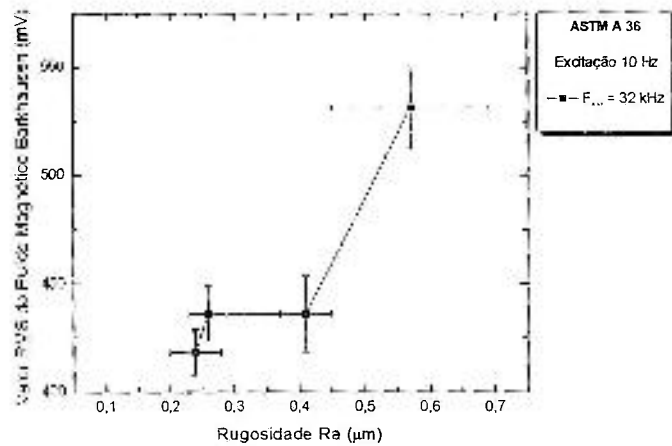


FIGURA 4.69 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 32 kHz.

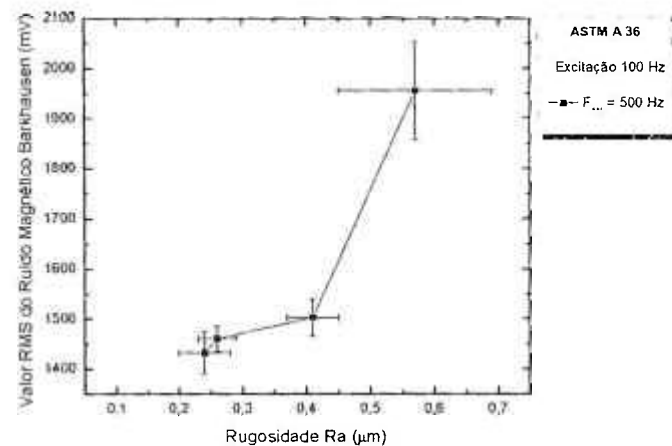


FIGURA 4.70 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 500 Hz.

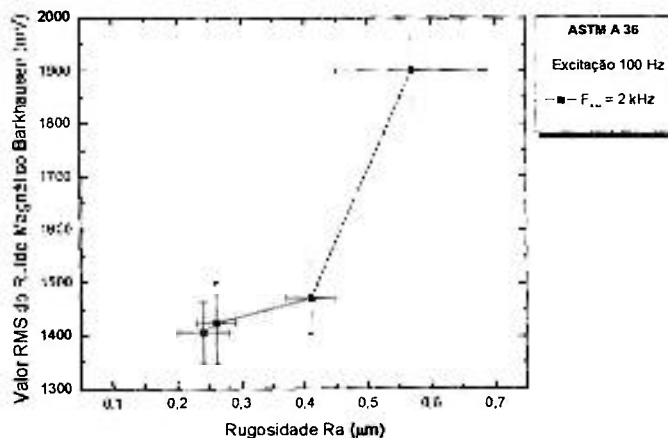


FIGURA 4.71 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 2 kHz.

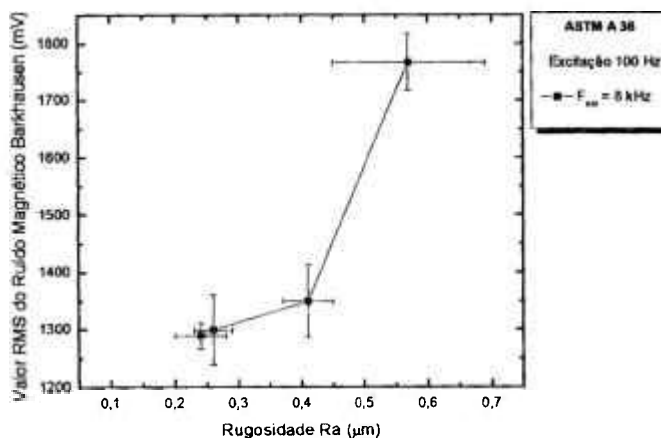


FIGURA 4.72 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 8 kHz.

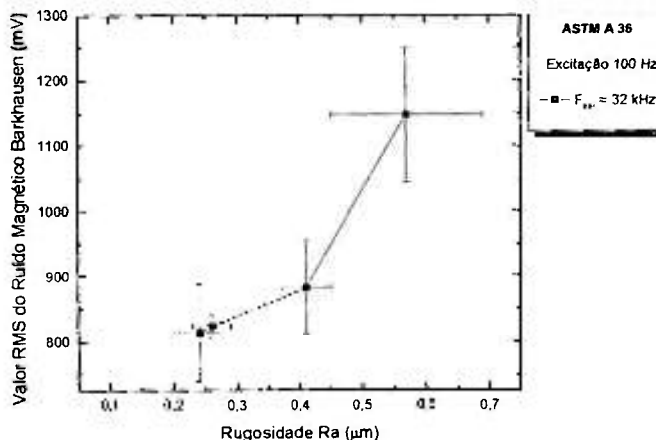


FIGURA 4.73 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 32 kHz.

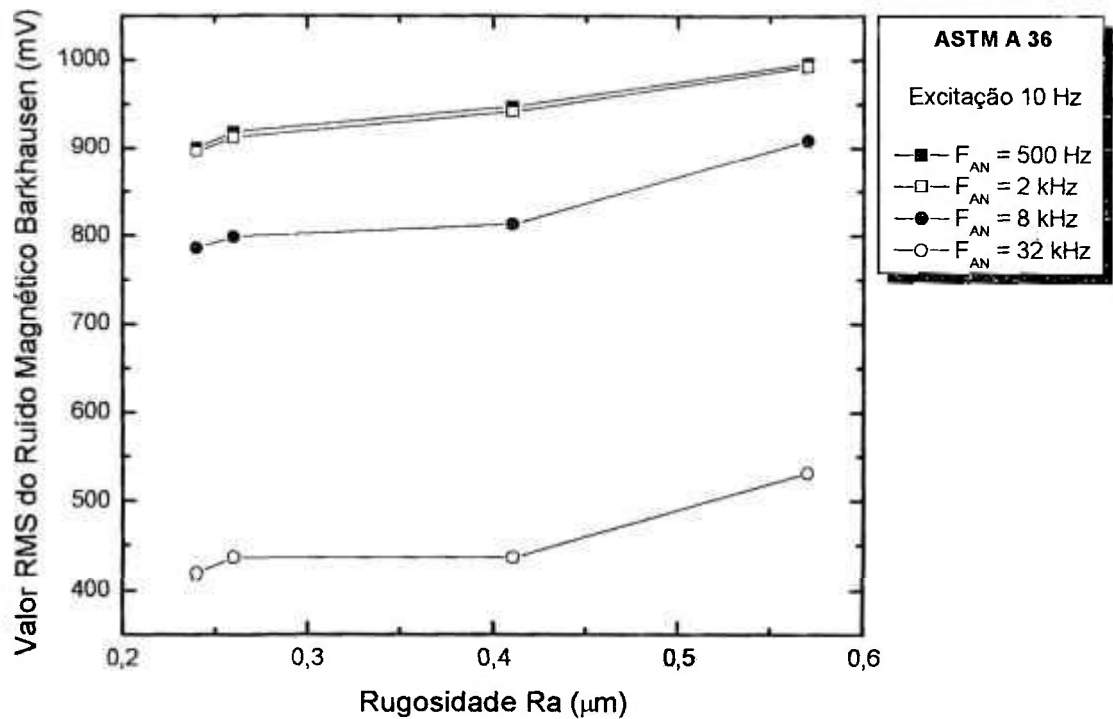


FIGURA 4.74 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

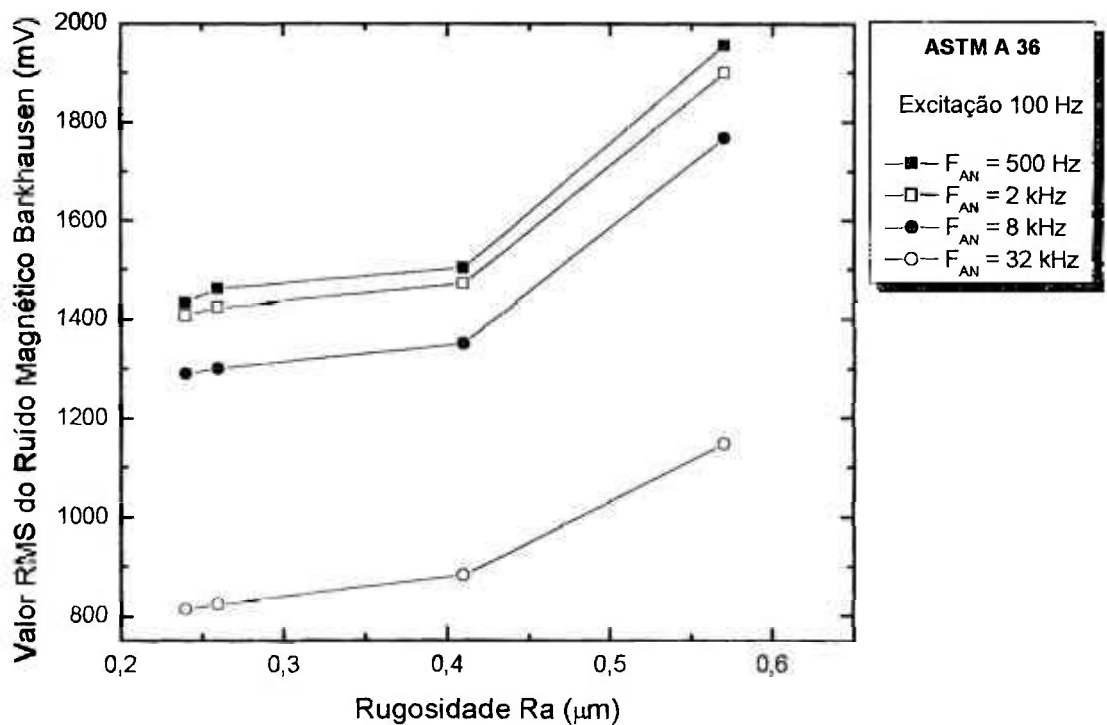


FIGURA 4.75 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

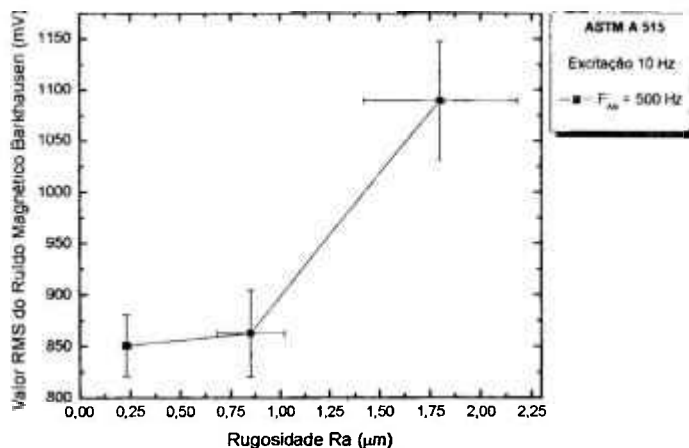


FIGURA 4.76 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 500 Hz.

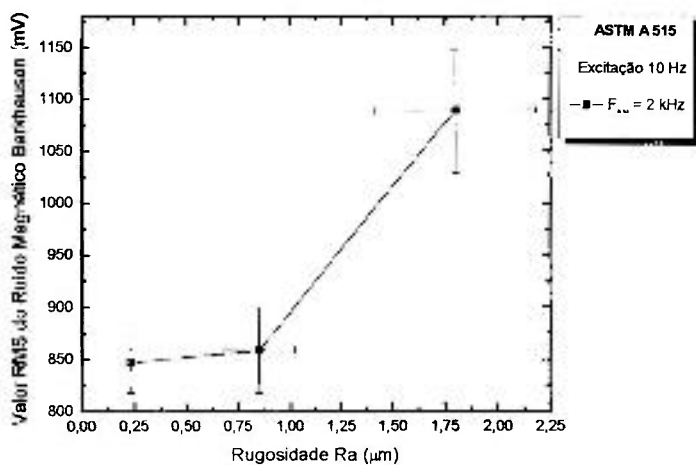


FIGURA 4.77 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 2 kHz.

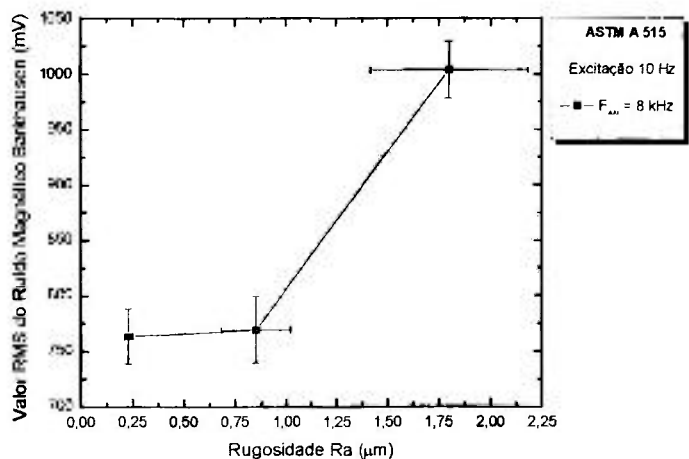


FIGURA 4.78 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 8 kHz.

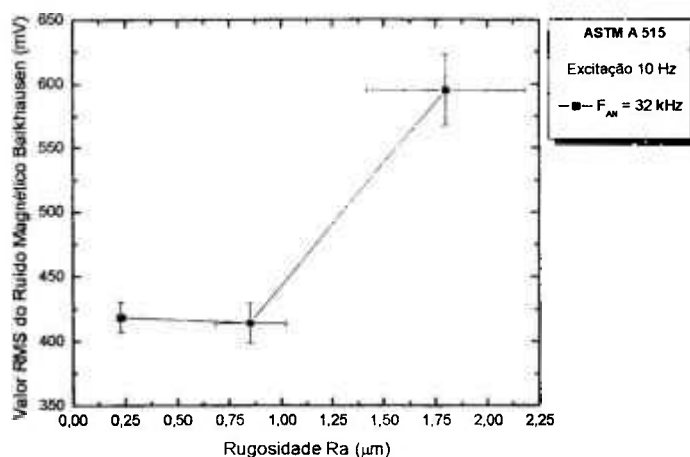


FIGURA 4.79 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 32 kHz.

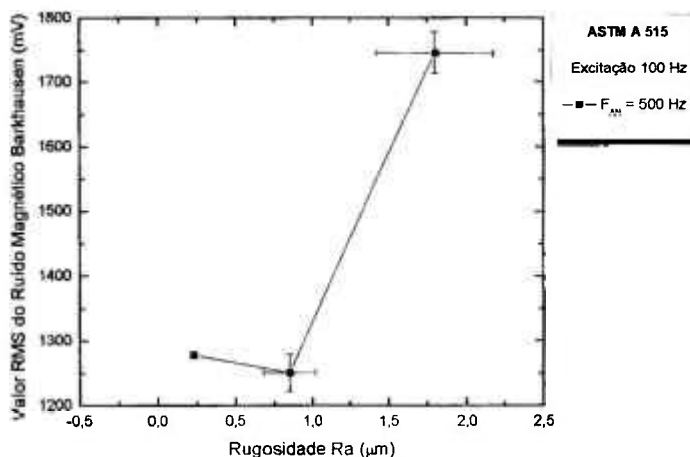


FIGURA 4.80 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 500 Hz.

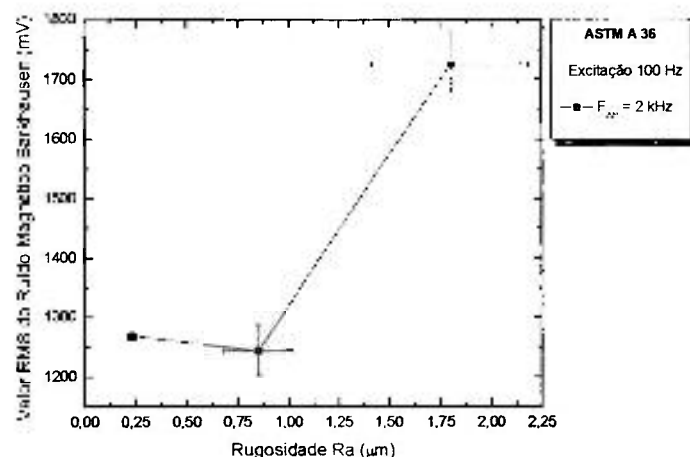


FIGURA 4.81 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 2 kHz.

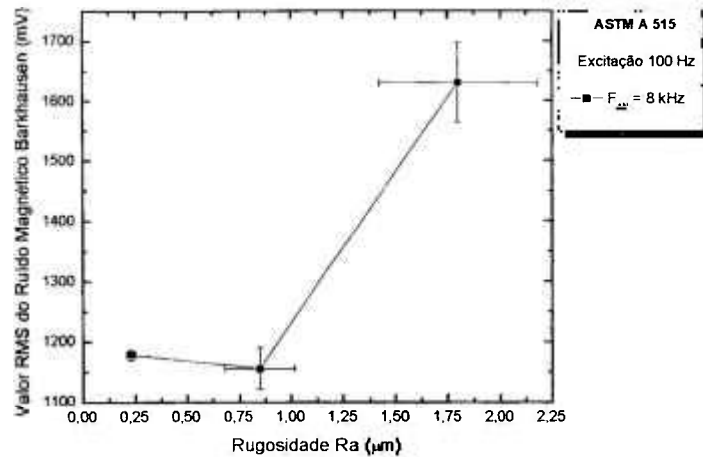


FIGURA 4.82 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 8 kHz.

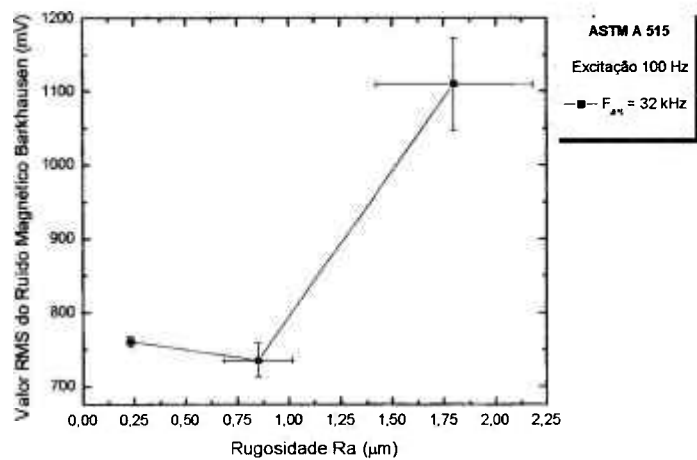


FIGURA 4.83 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 32 kHz.

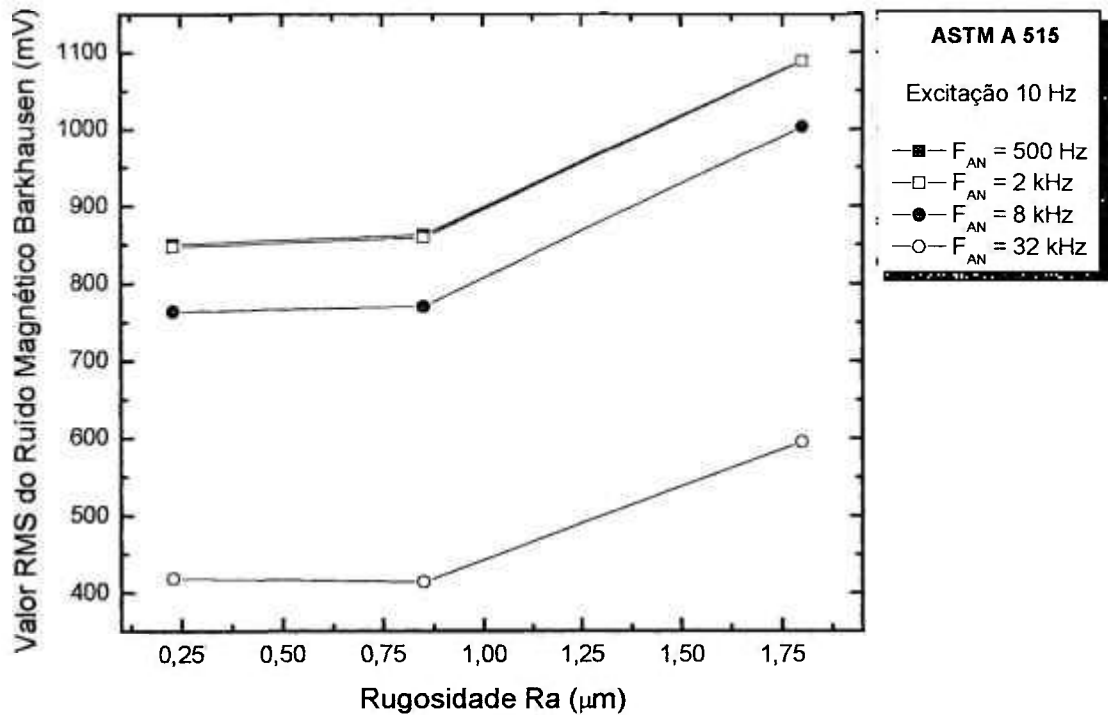


FIGURA 4.84 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

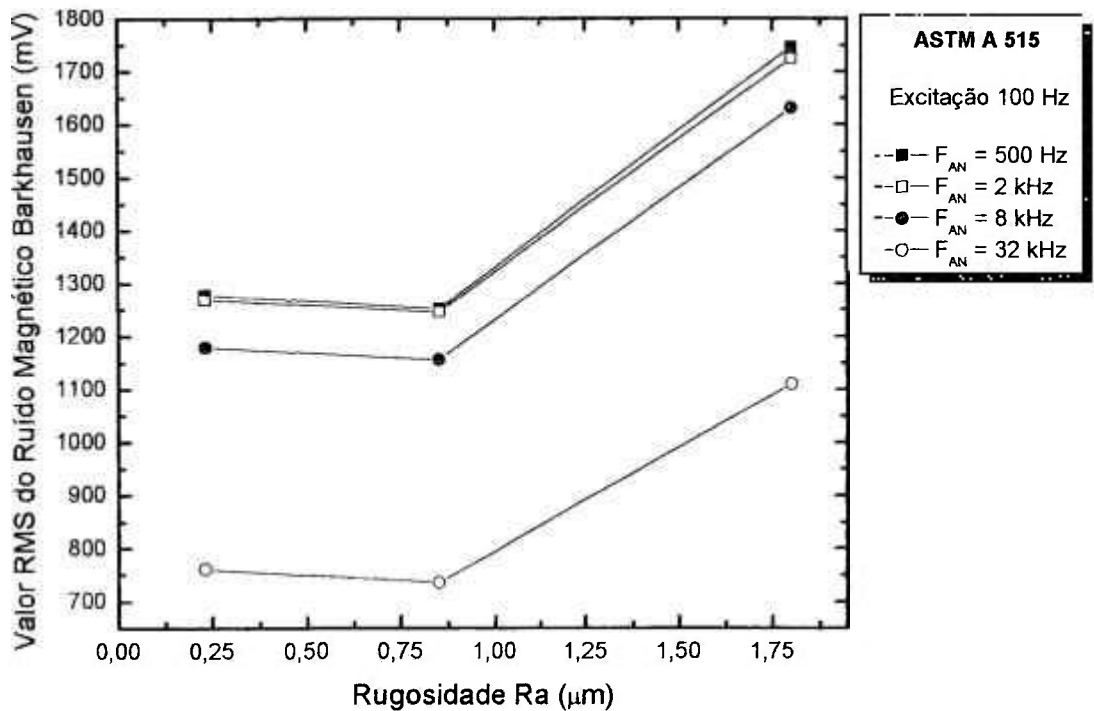


FIGURA 4.85 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

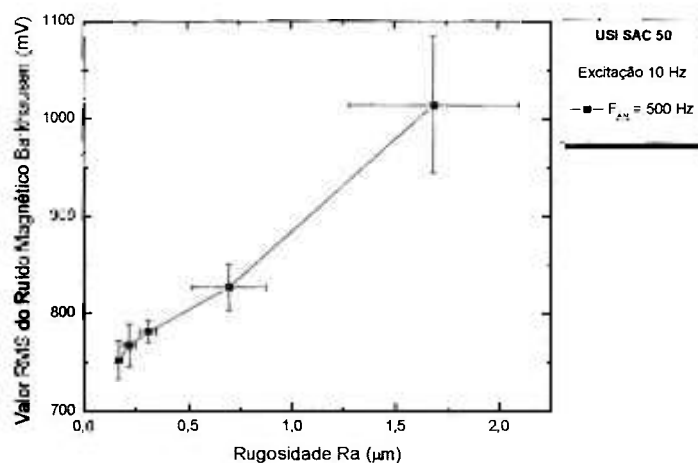


FIGURA 4.86 Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 500 Hz.

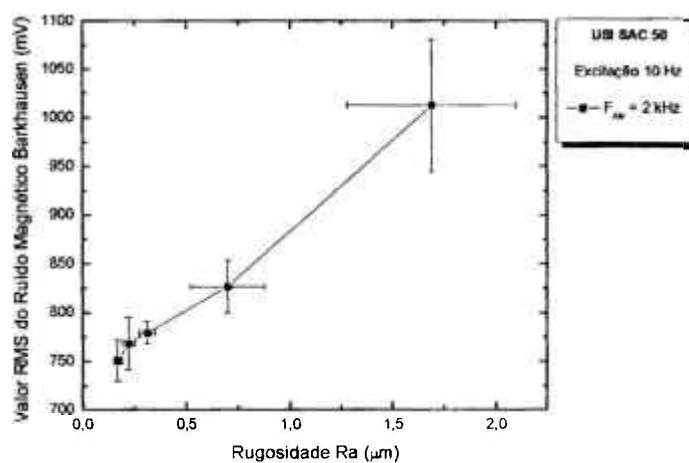


FIGURA 4.87 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 2 kHz.

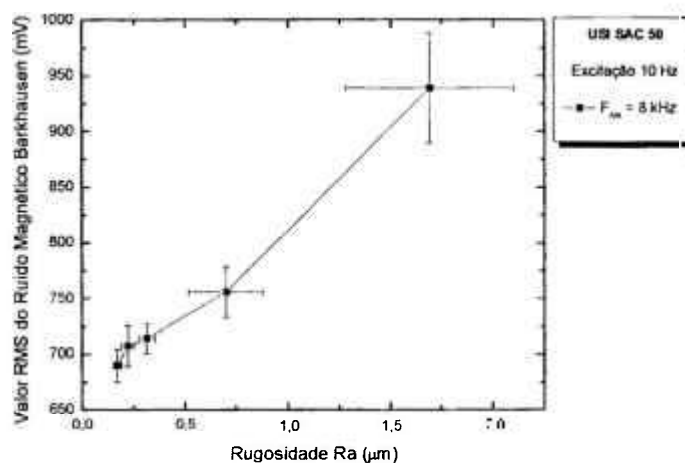


FIGURA 4.88 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 8 kHz.

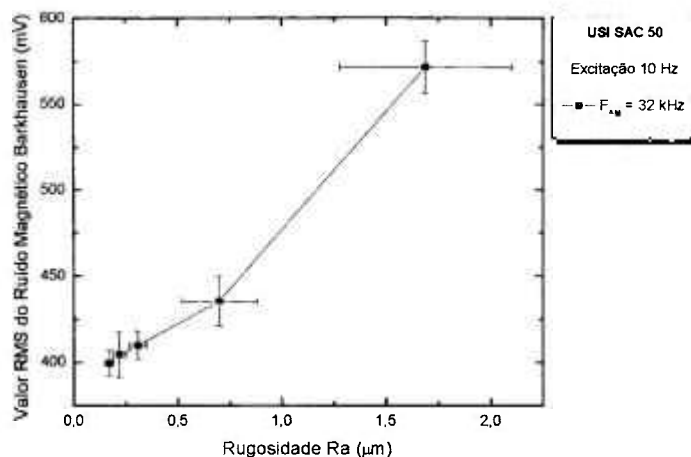


FIGURA 4.89 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequência de análise 32 kHz.

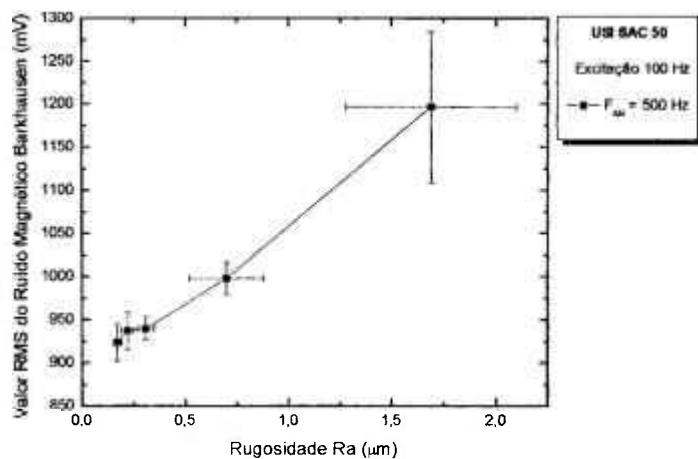


FIGURA 4.90 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 500 Hz.

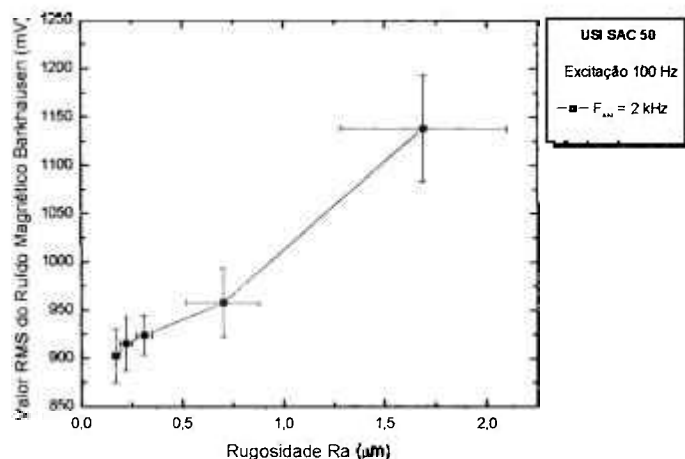


FIGURA 4.91 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 2 kHz.

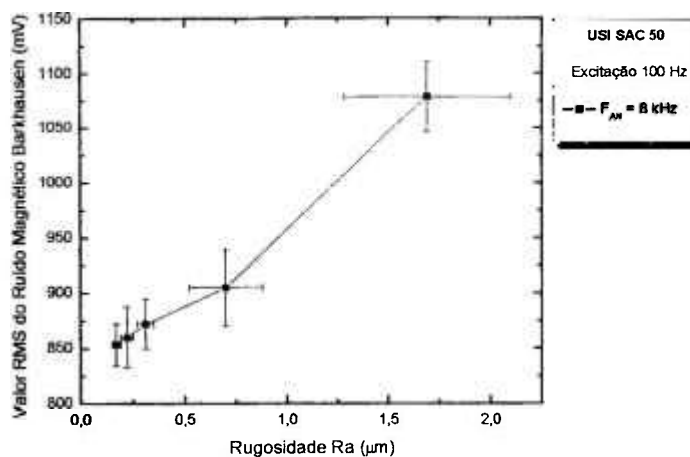


FIGURA 4.92 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 8 kHz.

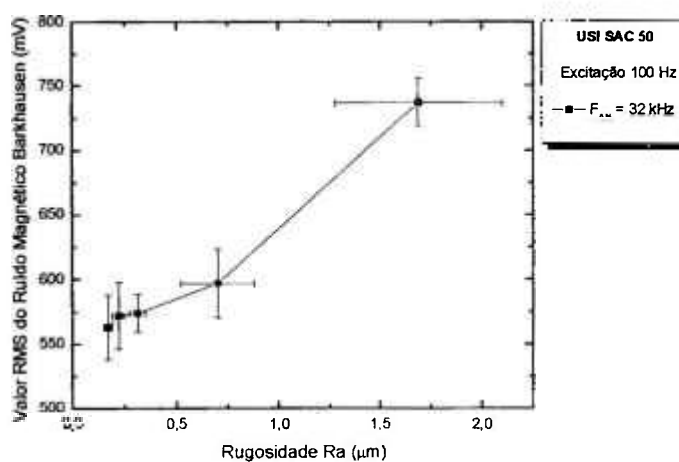


FIGURA 4.93 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequência de análise 32 kHz.

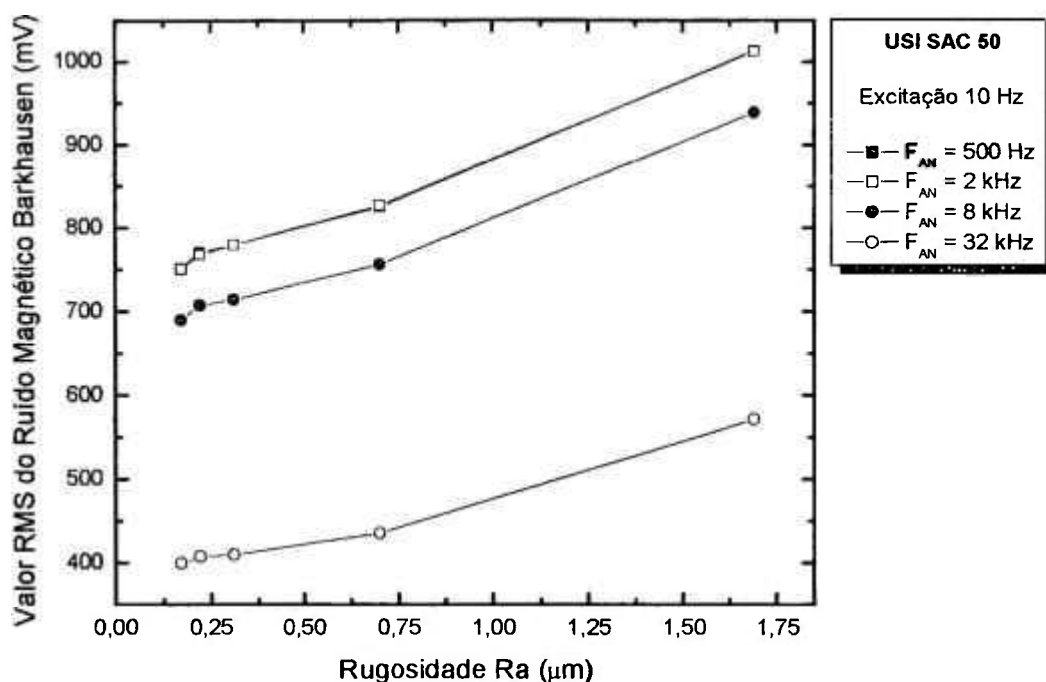


FIGURA 4.94 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 100 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

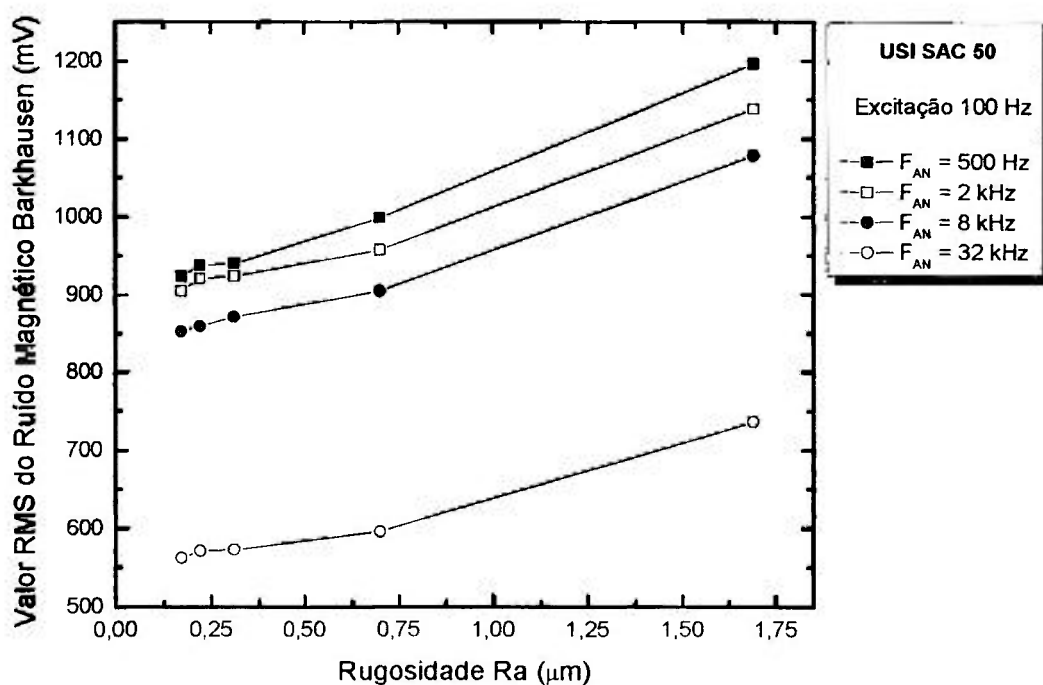


FIGURA 4.95 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da rugosidade superficial do material. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação 10 Hz e frequências de análise 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

O perfil das superfícies dos três materiais na condição como recebido e após a última operação de lixamento pode ser observado nas FIG. 4.96 a FIG. 4.98.

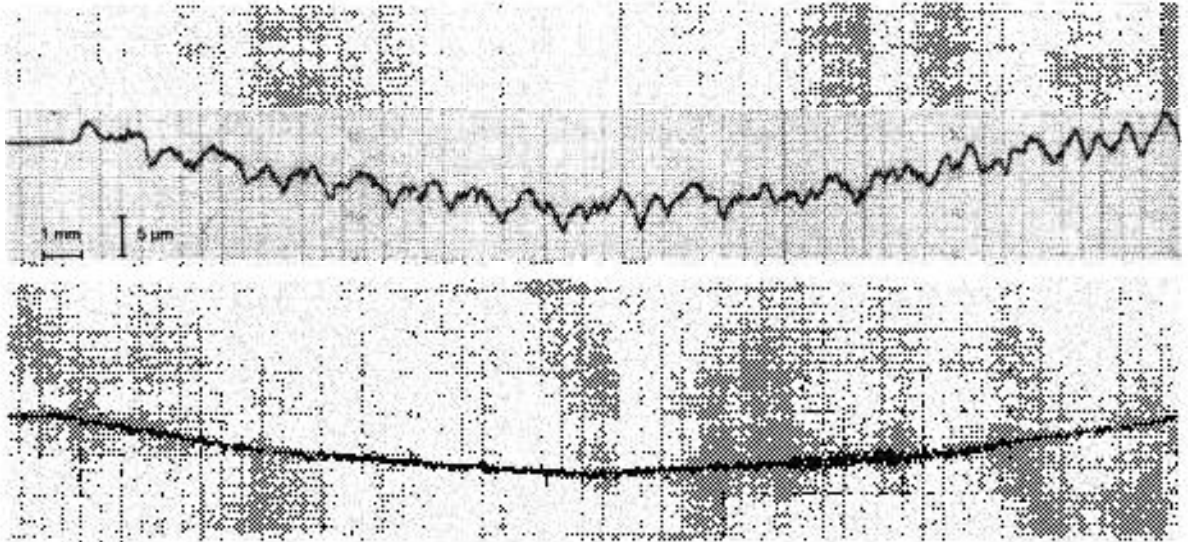


FIGURA 4.96 – Perfil da superfície obtido por ensaio de rugosidade superficial para o aço ASTM A 36 com o material na condição como recebido e após a última fase de lixamento.

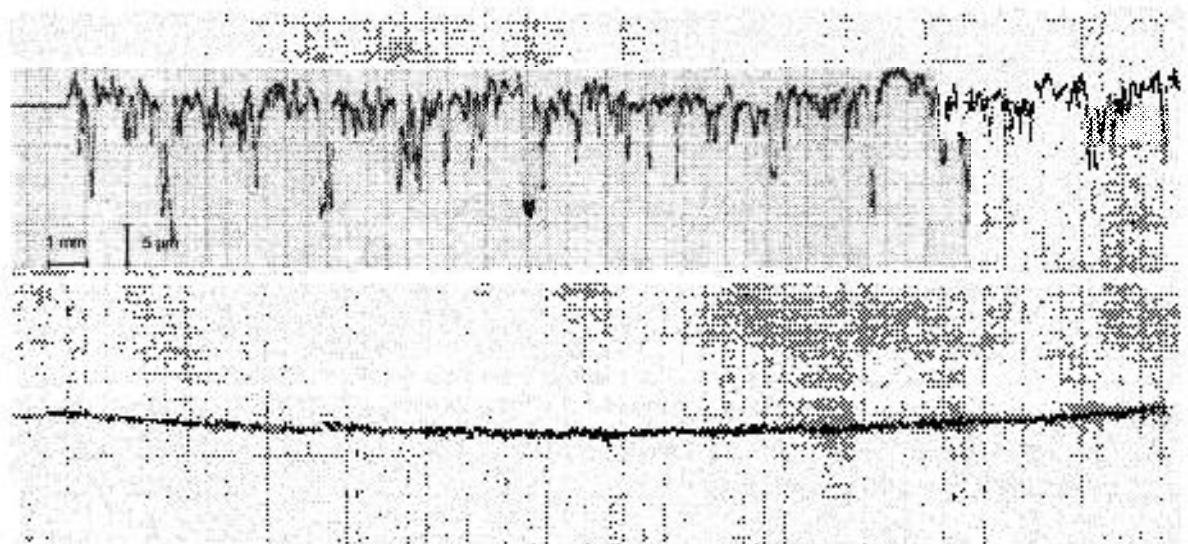


FIGURA 4.97 – Perfil da superfície obtido por ensaio de rugosidade superficial para o aço ASTM A 515 com o material na condição como recebido e após a última fase de lixamento.

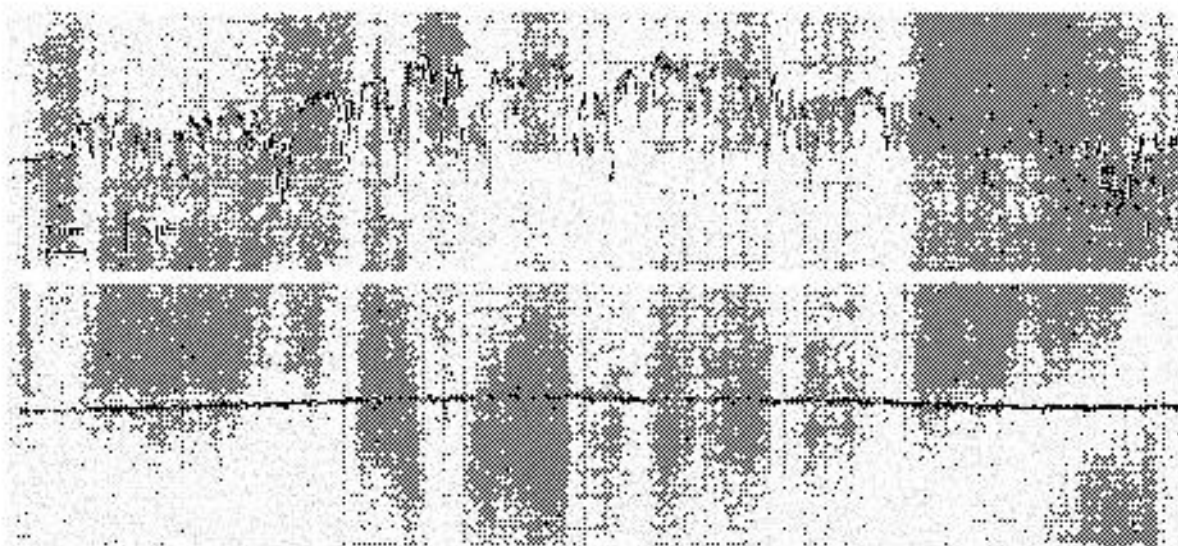


FIGURA 4.98 – Perfil da superfície obtido por ensaio de rugosidade superficial para o aço USI SAC 50 com o material na condição como recebido e após a última fase de lixamento.

Durante a preparação das amostras para a realização dos ensaios verificou-se que as operações de lixamento devem ser realizadas de maneira extremamente padronizadas. O sentido de lixamento e o estado de uso das lixas alteram os valores de rugosidade superficial. Conforme pode ser observado pelos resultados apresentados nas FIG. 4.66 a 4.95, o valor RMS do ruído magnético Barkhausen gerado sofre uma redução com a diminuição da rugosidade superficial do material. Desta forma, a preparação da superfície dos corpos de prova de calibração deve ser a mesma utilizada nos materiais e componentes examinados. Neste trabalho as superfícies foram preparadas com desbaste até lixa 320, a mesma utilizada na preparação das superfícies para instalação dos extensômetros. É necessária a realização de um estudo adicional para a verificação de outros fatores, além da rugosidade superficial, que possam promover alterações no valor RMS do ruído magnético Barkhausen, como mudanças de fase ou deformação plástica devidos à operação de lixamento que, embora realizada segundo técnicas recomendadas para não introduzir tensões no material, possa provocar alterações no valor RMS do RMB medido.

Uma observação feita nesta fase é que, em uma varredura inicial realizada na superfície dos materiais no estado como recebido, constatou-se uma variação muito grande nos valores RMS do ruído magnético Barkhausen gerados. Após uma limpeza para a retirada da camada de óxido existente na superfície dos materiais e ainda de regiões apresentando processos iniciais de corrosão localizada, estas diferenças foram reduzidas. Conseqüentemente, para a realização do ensaio, é necessária a retirada destes produtos de oxidação das superfícies, de forma a não introduzir fatores indutores de erro

completamente aleatórios nos resultados dos testes. Uma outra observação com relação à preparação das superfícies é que as operações de lixamento devem ser realizadas utilizando-se máquinas de alta rotação, com as mesmas técnicas usadas para a preparação da superfície para o ensaio de tensões residuais pelo Método do Furo Central. Este cuidado é necessário para evitar a introdução de tensões residuais no material, o que seria outro fator de erro introduzido no processo. Para todos os materiais houve uma redução significativa do valor RMS do ruído magnético Barkhausen com a diminuição da rugosidade superficial.

4.9 Influência do Afastamento da Sonda à Superfície do Material

Os resultados obtidos para o valor RMS do RMB em função da distância da sonda à superfície do material podem ser observados nas FIG. 4.99 a FIG. 4.128.

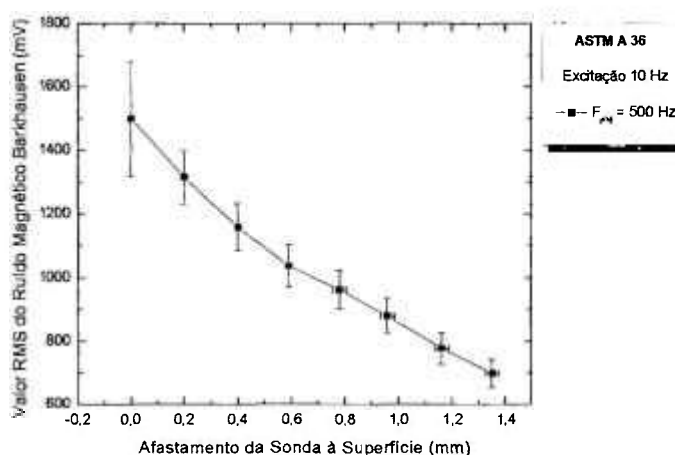


FIGURA 4.99 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

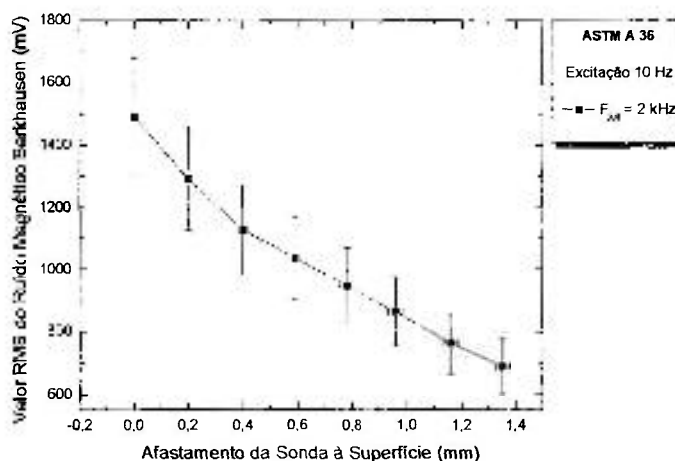


FIGURA 4.100 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

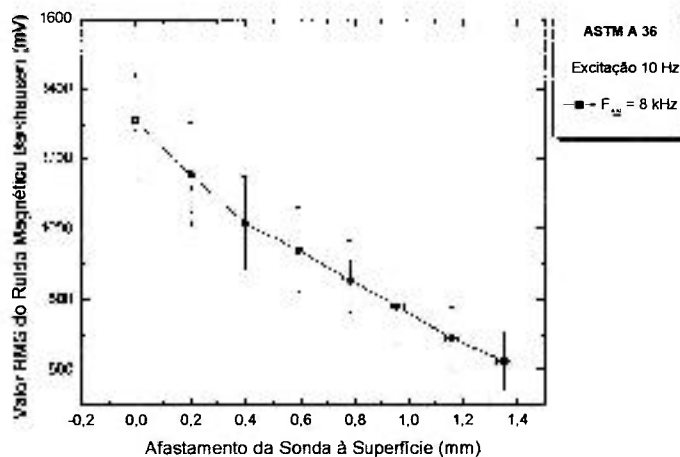


FIGURA 4.101 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

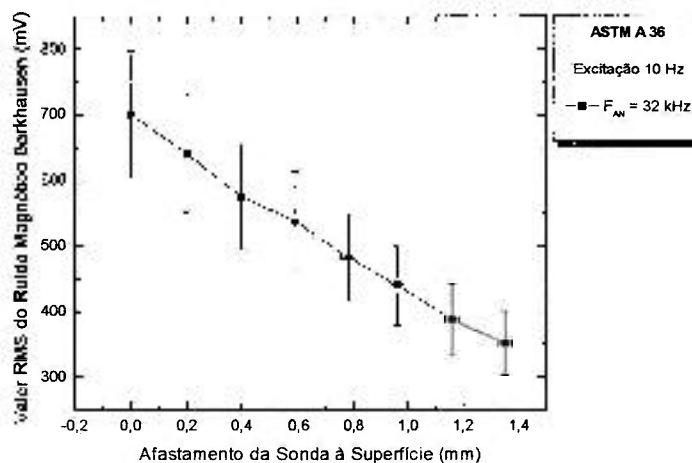


FIGURA 4.102 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

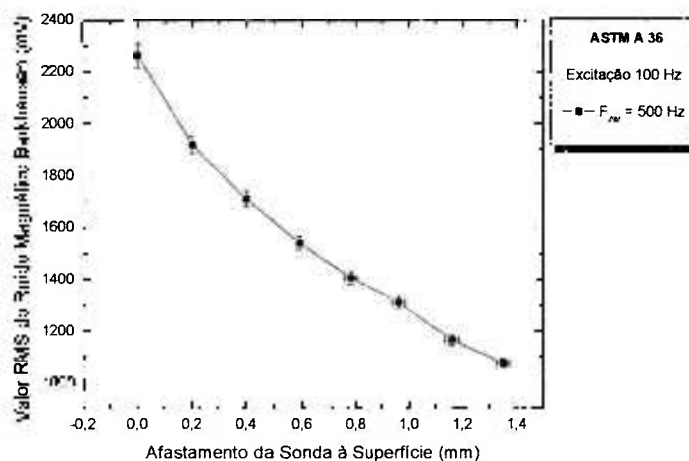


FIGURA 4.103 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

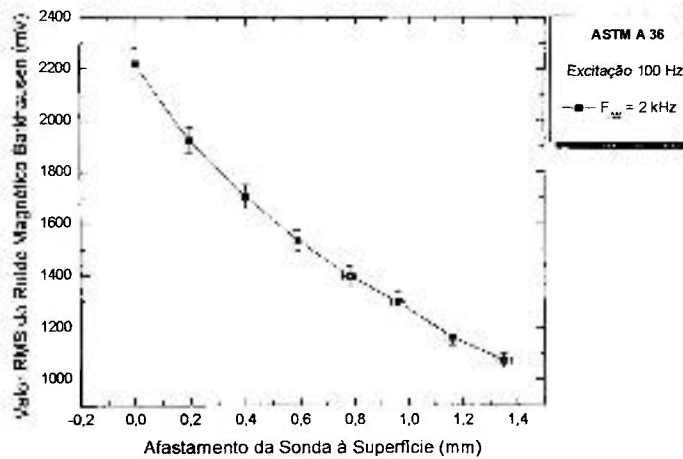


FIGURA 4.104 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

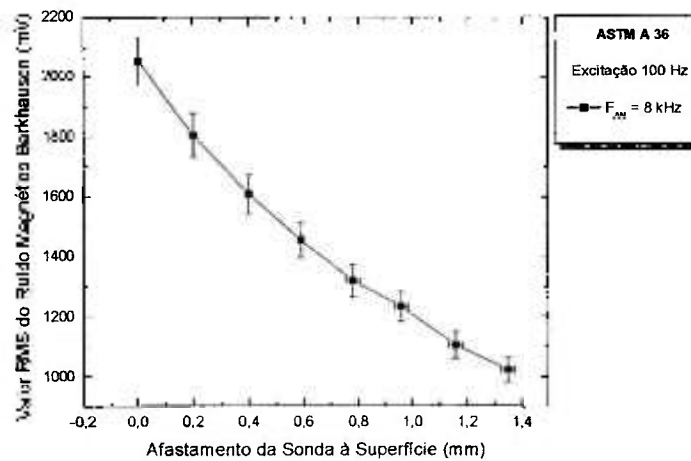


FIGURA 4.105 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

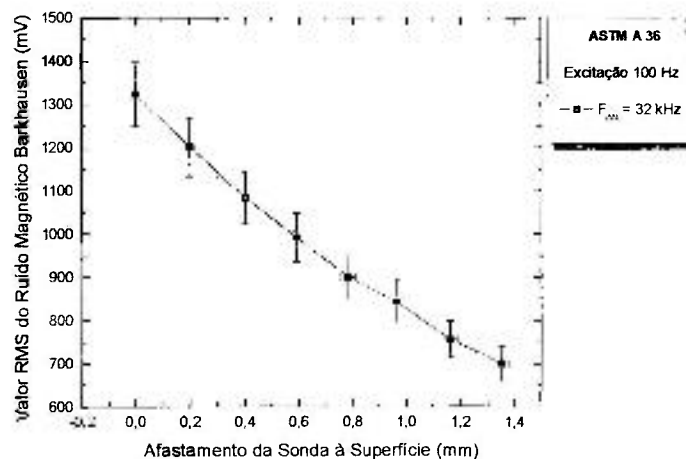


FIGURA 4.106 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 36. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

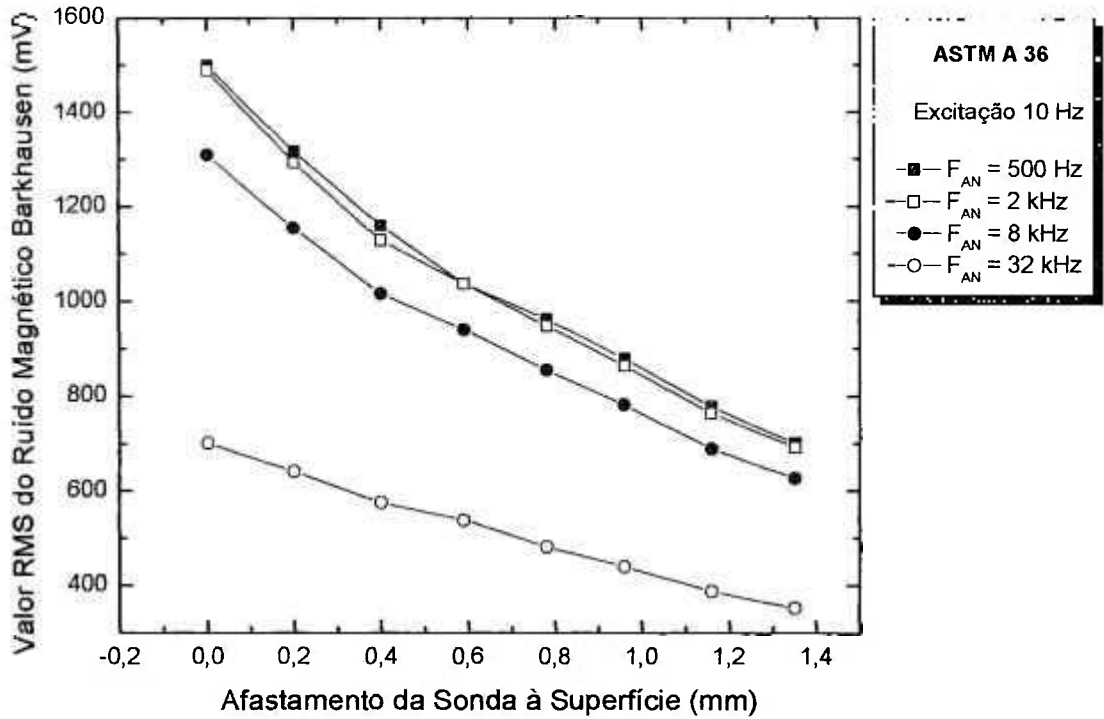


FIGURA 4.107 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 36. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz.

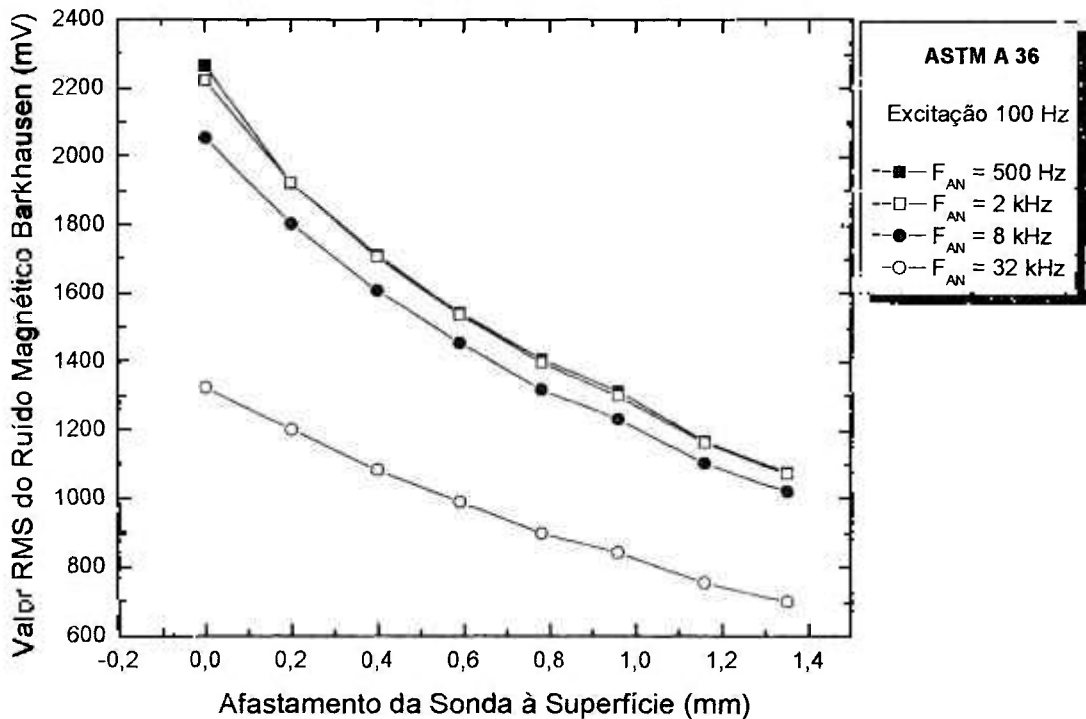


FIGURA 4.108 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 36. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz.

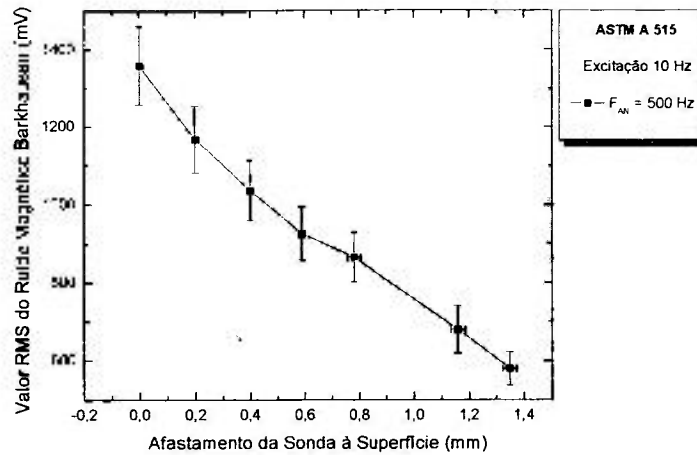


FIGURA 4.109 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

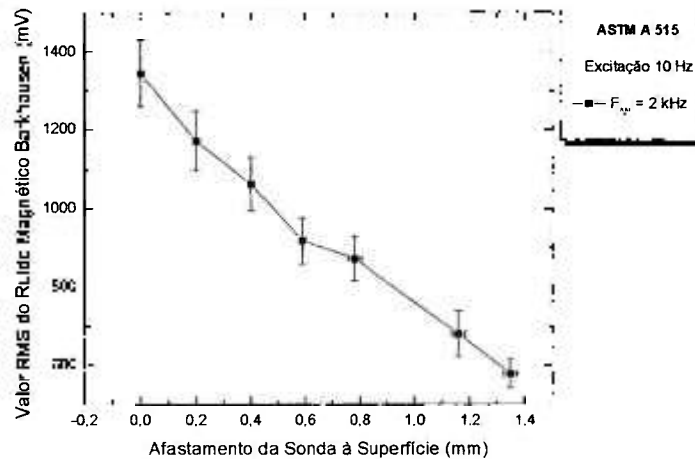


FIGURA 4.110 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

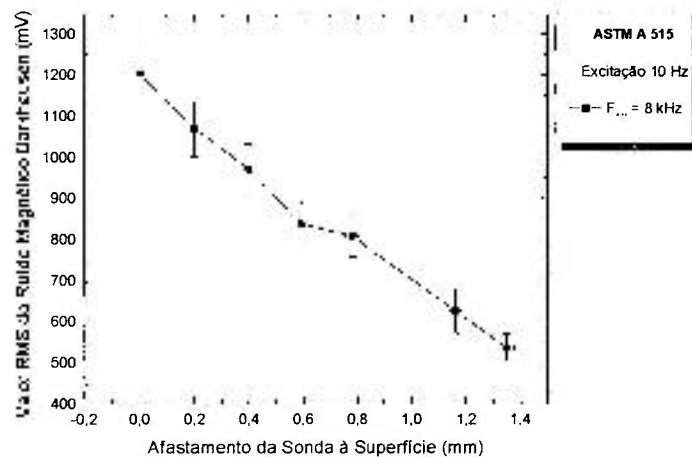


FIGURA 4.111 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

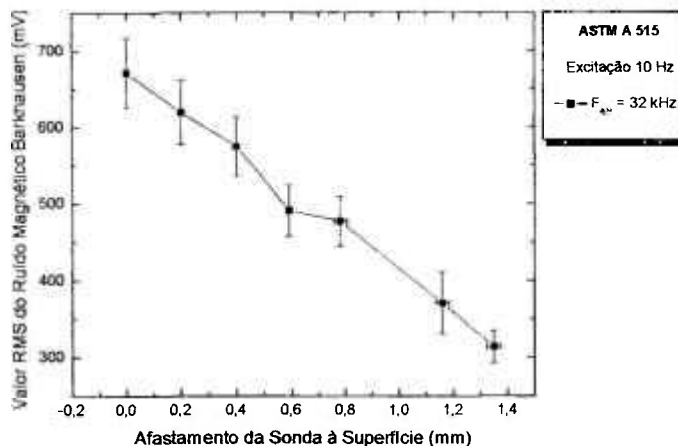


FIGURA 4.112 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

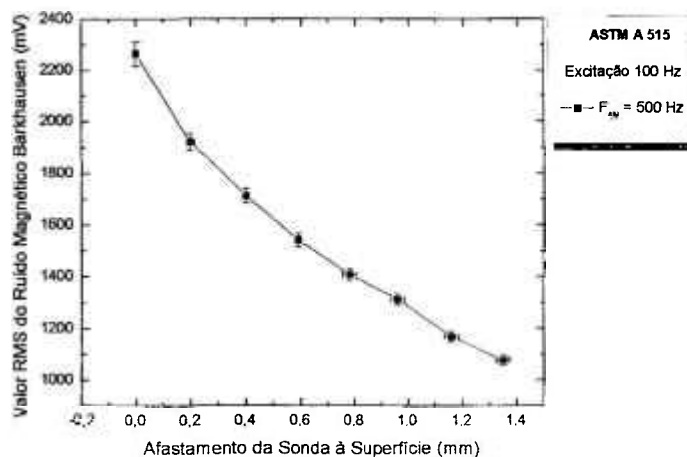


FIGURA 4.113 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

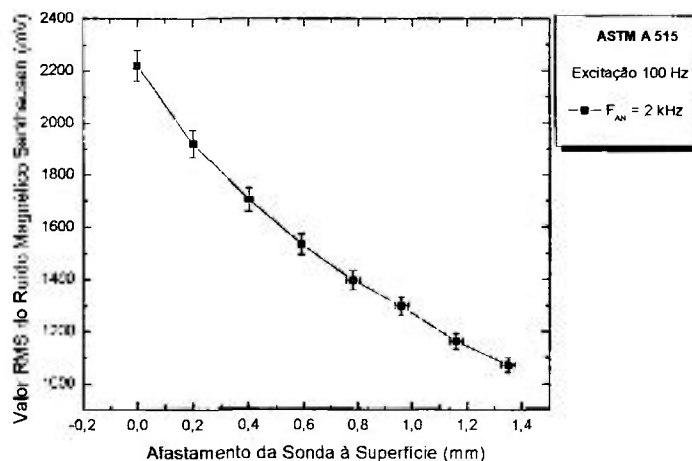


FIGURA 4.114 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

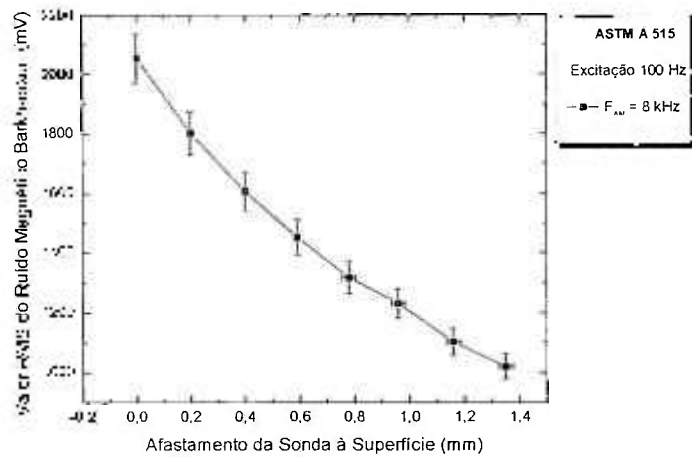


FIGURA 4.115 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

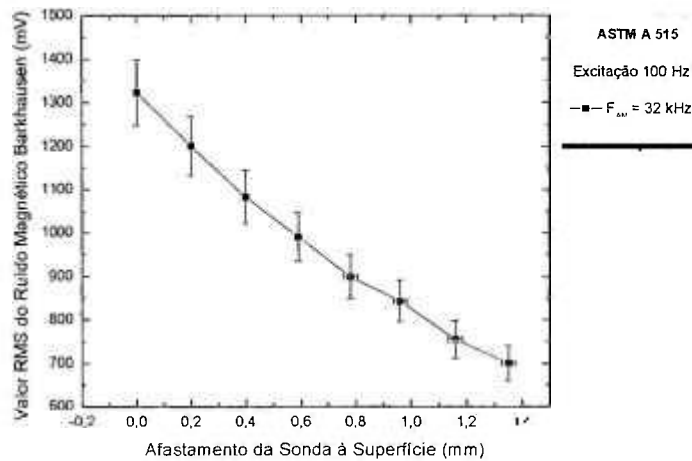


FIGURA 4.116 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço ASTM A 515. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

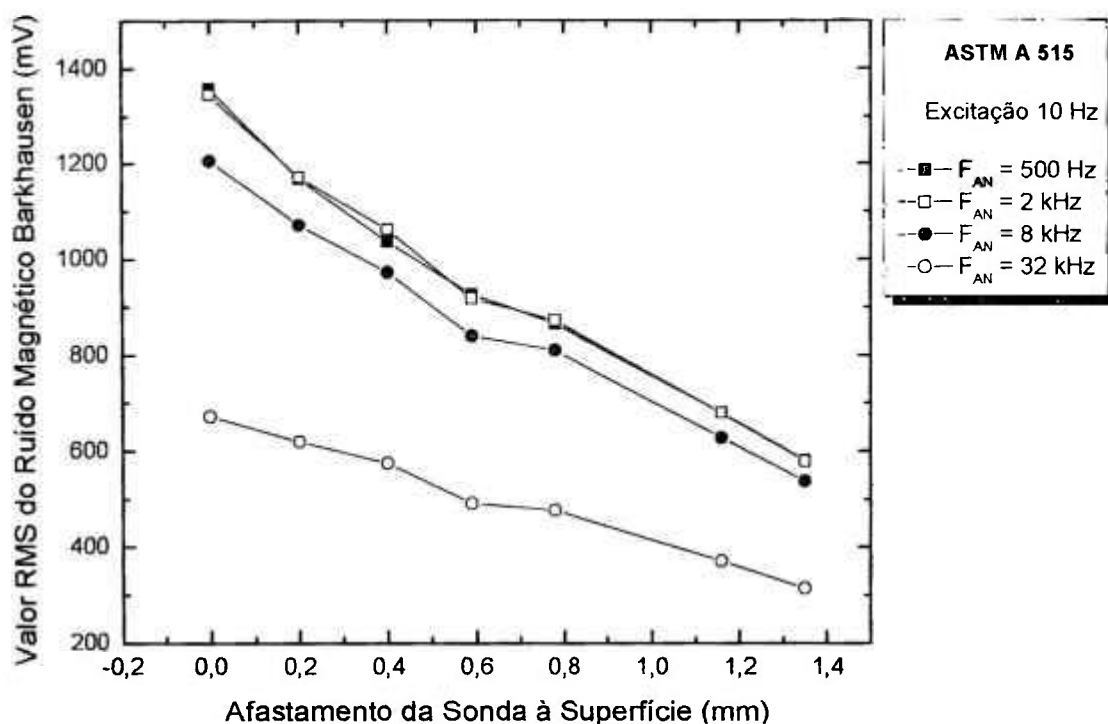


FIGURA 4.117 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 515. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz.

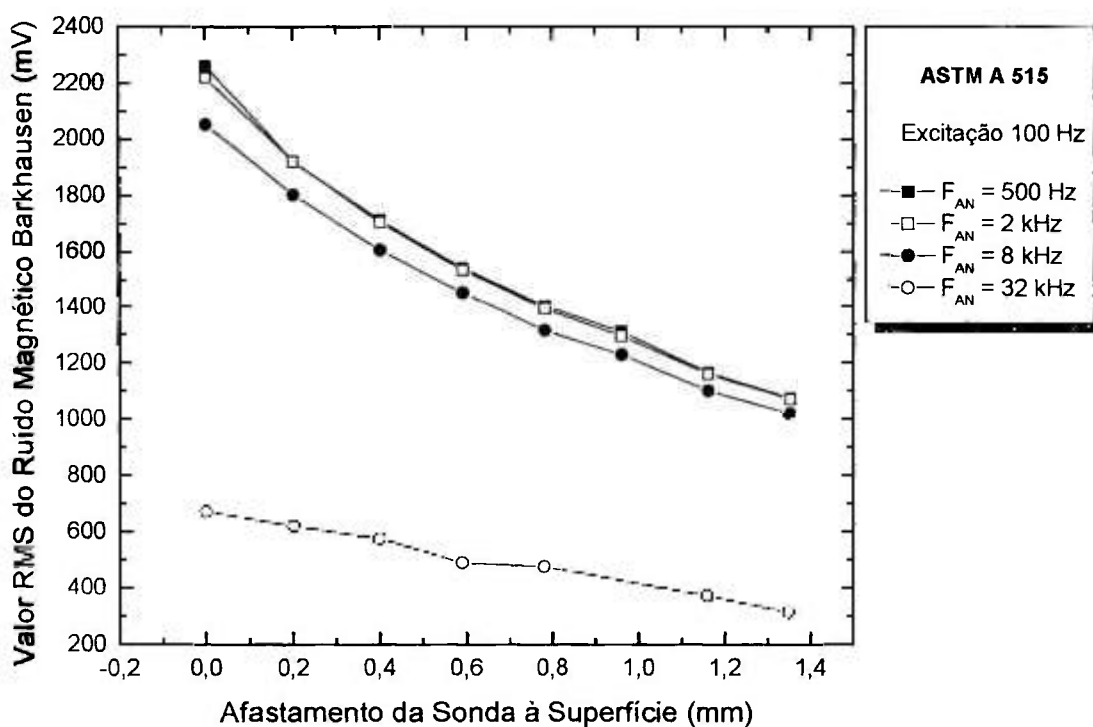


FIGURA 4.118 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço ASTM A 515. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz.

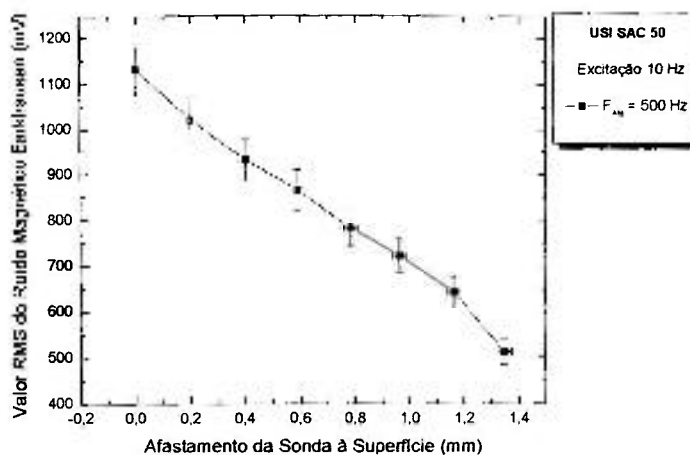


FIGURA 4.119 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

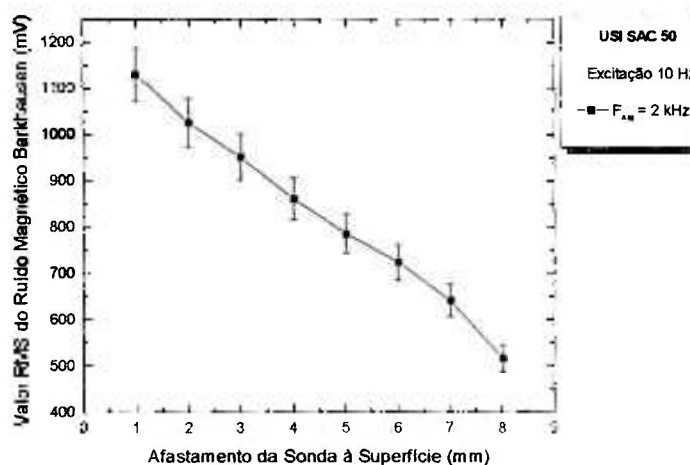


FIGURA 4.120 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

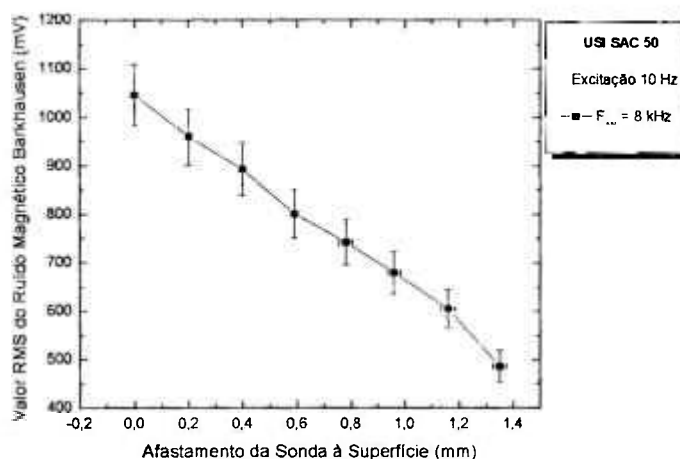


FIGURA 4.121 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

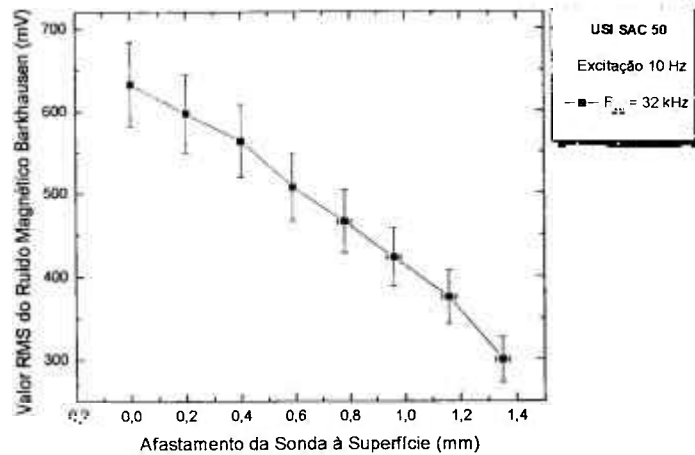


FIGURA 4.122 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

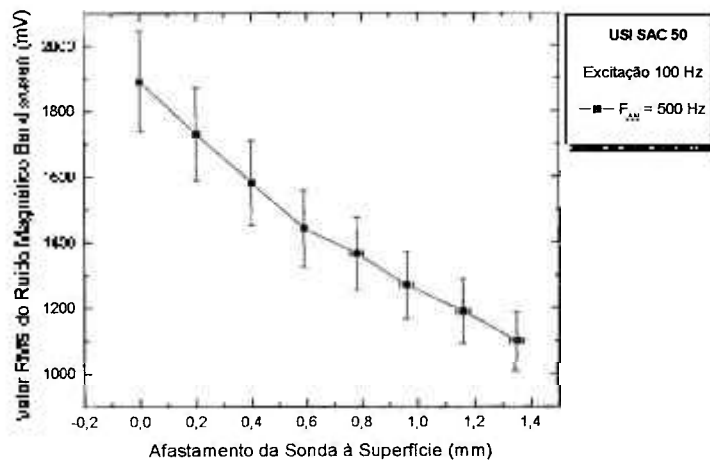


FIGURA 4.123 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

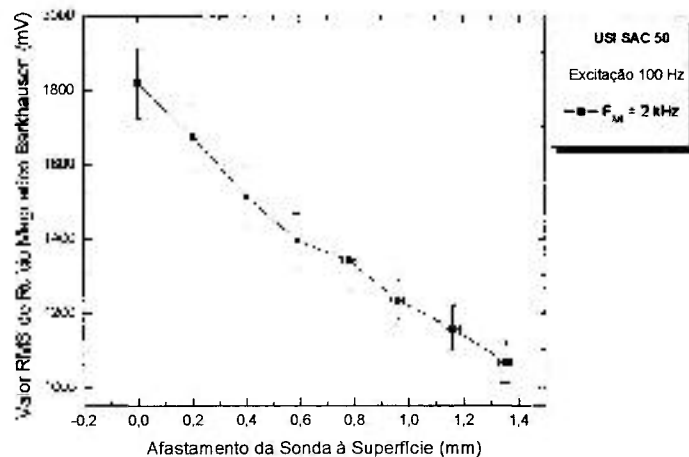


FIGURA 4.124 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

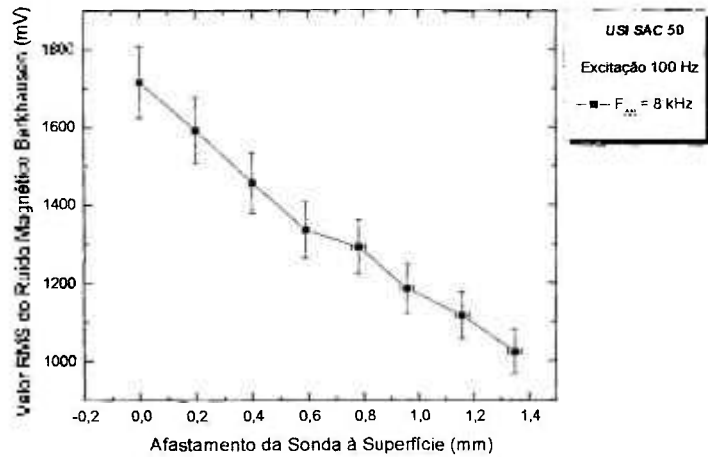


FIGURA 4.125 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

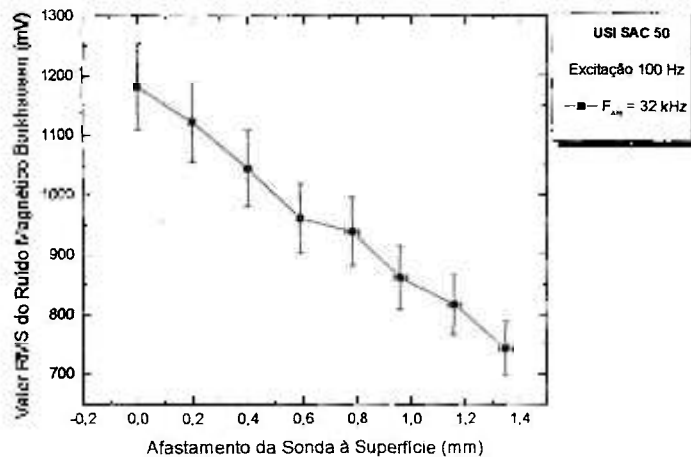


FIGURA 4.126 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície. Aço USI SAC 50. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

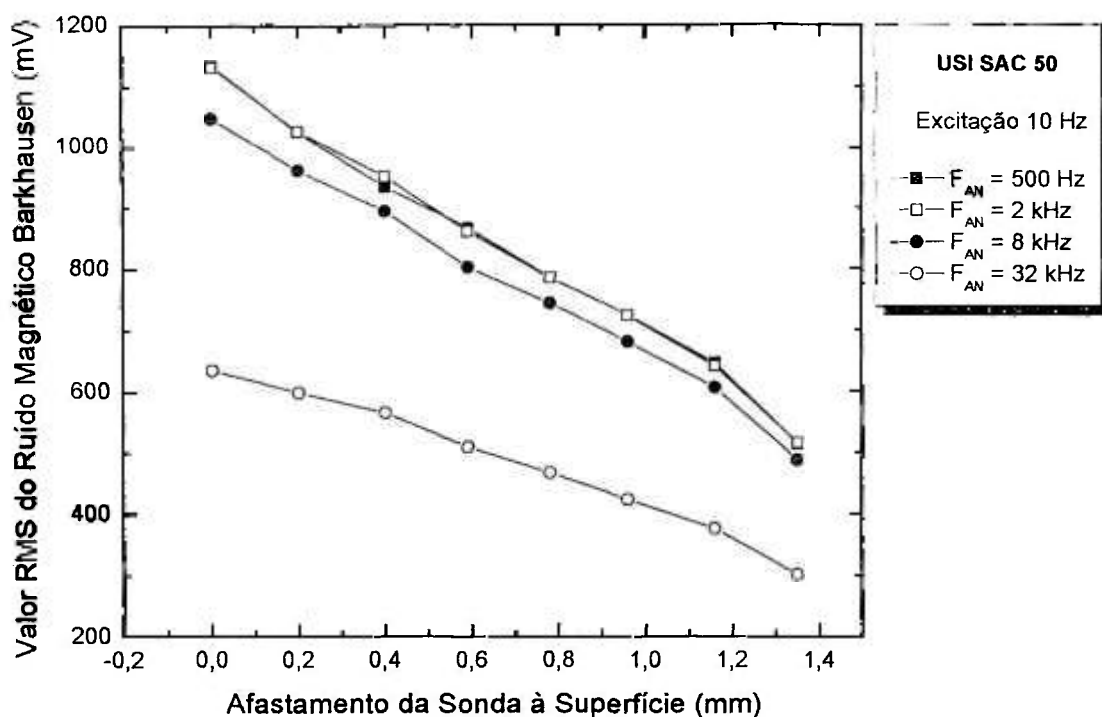


FIGURA 4.127 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço USI SAC 50. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 10 Hz.

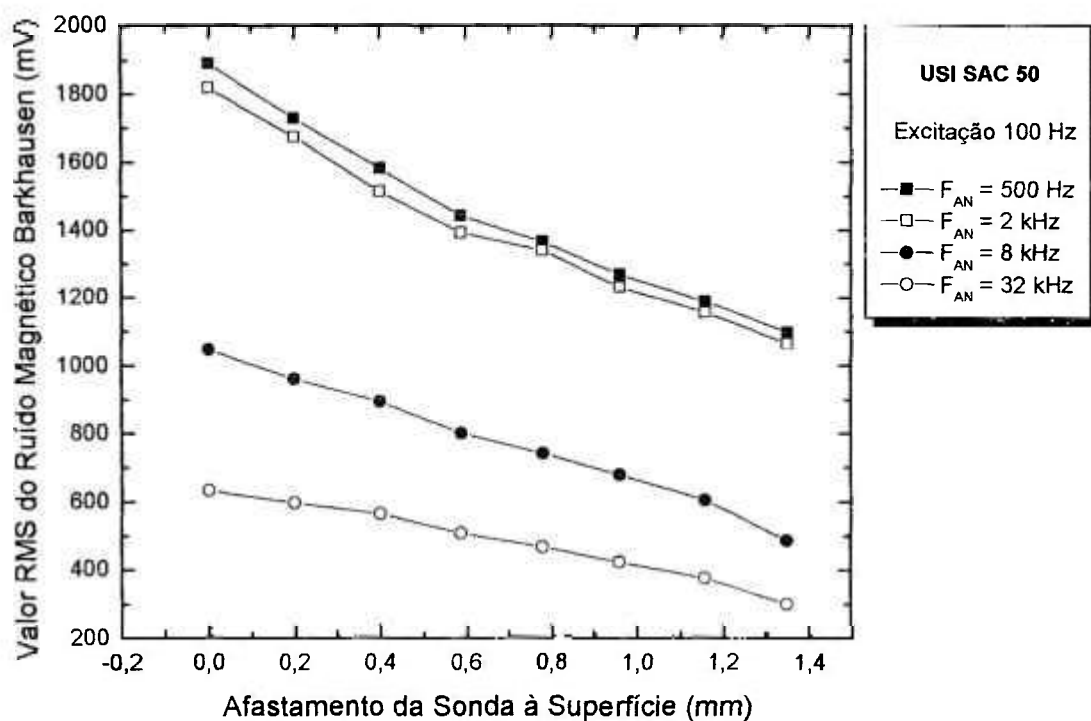


FIGURA 4.128 - Valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função da distância da sonda à superfície do material. Aço USI SAC 50. Frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. Frequência do campo magnético de excitação de 100 Hz.

Como esperado, o afastamento da sonda à superfície do material ocasiona uma diminuição no valor RMS do ruído magnético Barkhausen detectado nas amostras durante a magnetização. À medida que a sonda se afasta da superfície, a influência do campo magnético produzido na sonda diminui, indicando que quanto maior a proximidade da sonda do material, maior a relação sinal/ruído obtida durante os ensaios. Pela observação da FIG. 4.99 a FIG. 4.128, pode-se verificar que pequenos afastamentos podem produzir variações significativas no valor RMS do ruído. Este efeito indica que o sistema utilizado para posicionar a sonda na superfície de teste deve ser capaz de mantê-la constante a posição relativa sonda/material testado, de forma a evitar a introdução de erros de natureza completamente aleatória durante a realização de ensaios em um determinado material.

4.10 Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais para o Aço ASTM A 36

Os ensaios realizados nas vigas de isoflexão de aço ASTM A 36, com os eixos das vigas paralelos e perpendiculares à direção de laminação, campo magnético paralelo ao eixo das vigas e com a aplicação de carregamentos para gerar tensões de tração e compressão na superfície da viga entre os limites de escoamento à tração e à compressão apresentaram os resultados indicados na FIG. 4.129 a FIG. 4.144. Os dados correspondem às frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. As barras de erro correspondem à estimativa por intervalo dos valores médios verdadeiros com coeficiente de confiança de 95%. São apresentados os valores RMS do ruído magnético Barkhausen em função das deformações na superfície das vigas.

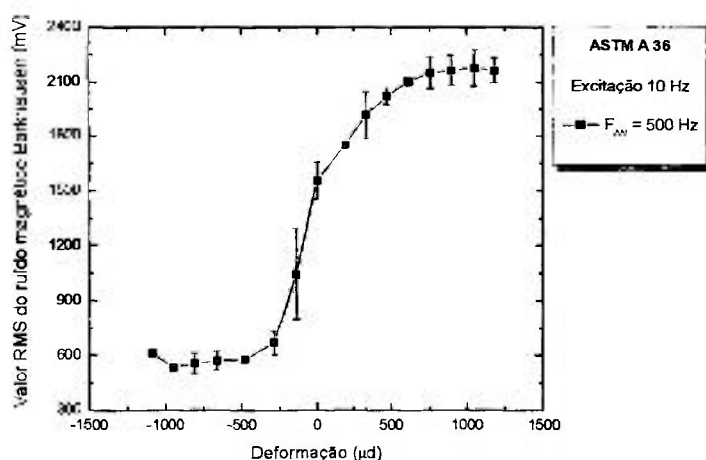


FIGURA 4.129 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

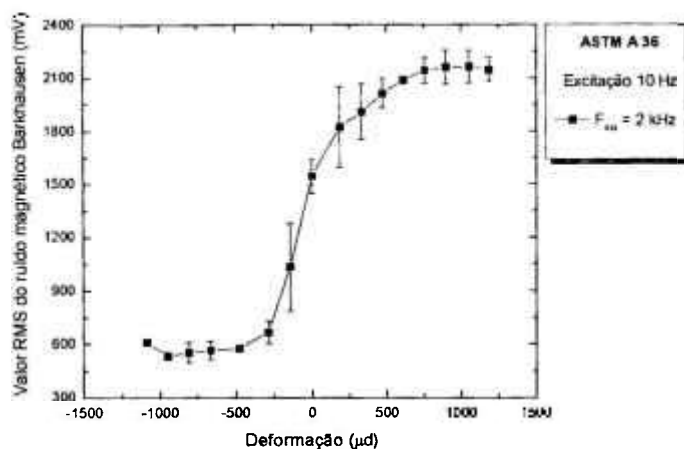


FIGURA 4.130 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

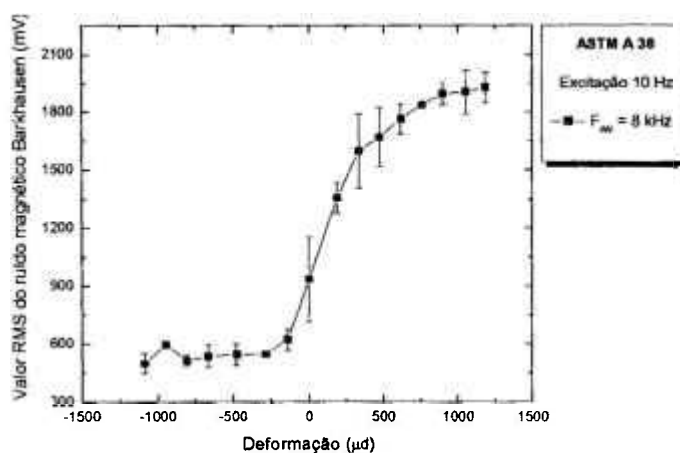


FIGURA 4.131 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

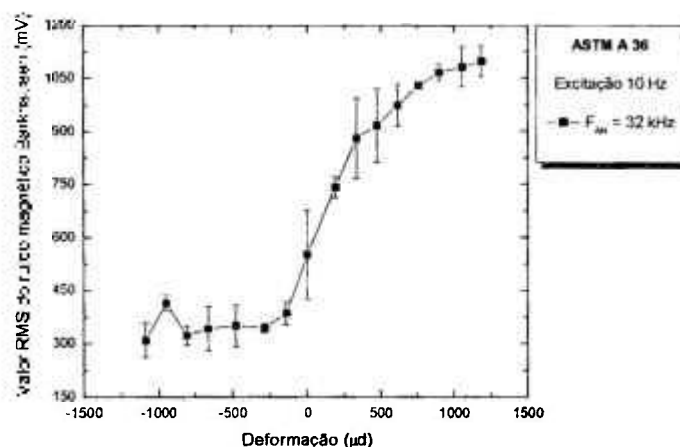


FIGURA 4.132 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

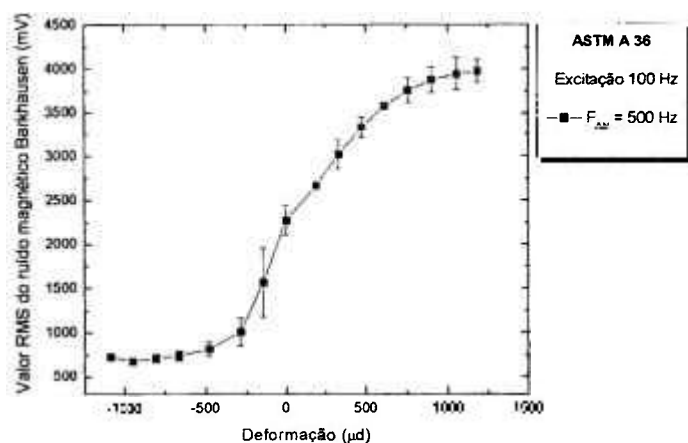


FIGURA 4.133 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

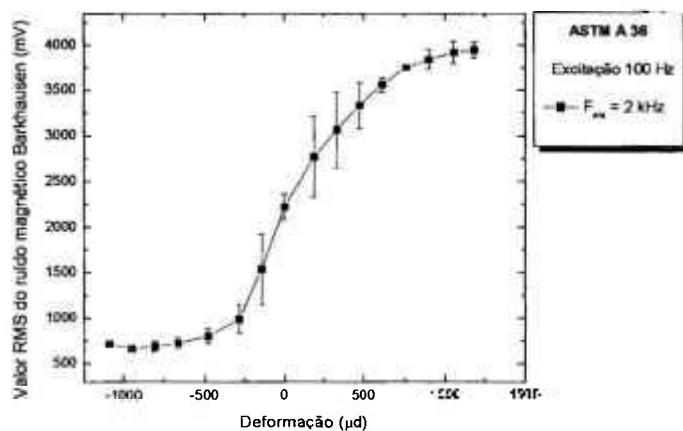


FIGURA 4.134 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

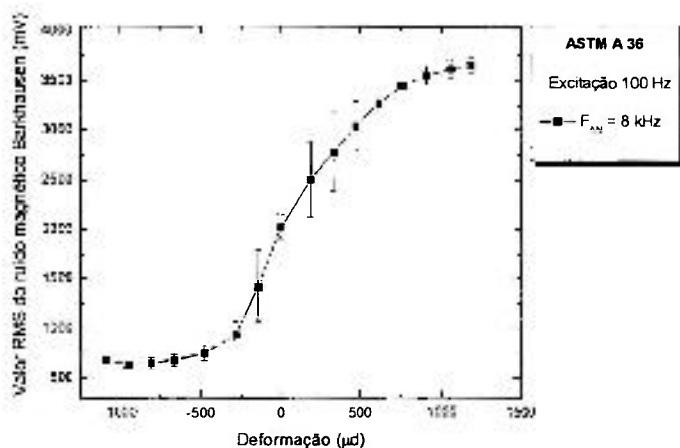


FIGURA 4.135 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

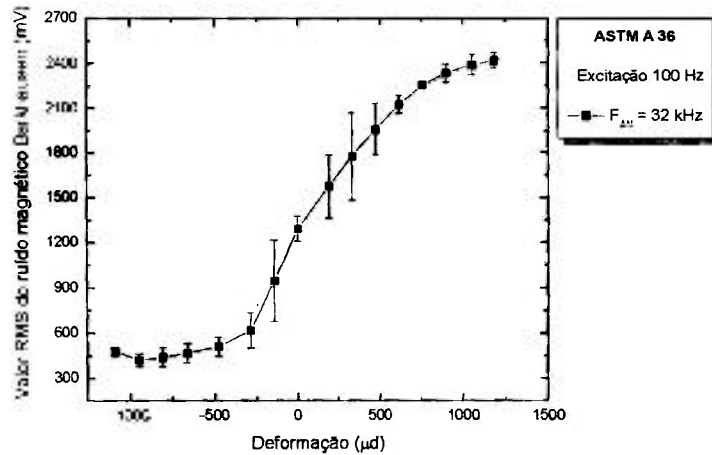


FIGURA 4.136 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

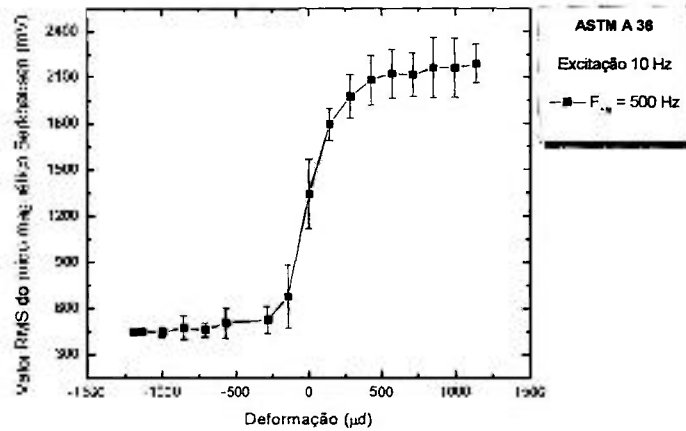


FIGURA 4.137 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

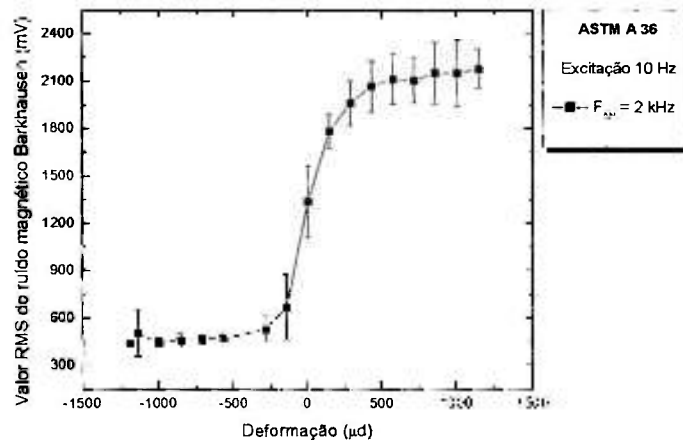


FIGURA 4.138 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

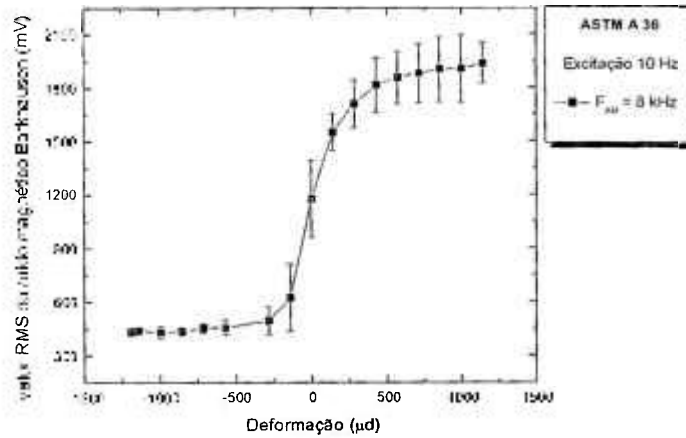


FIGURA 4.139 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

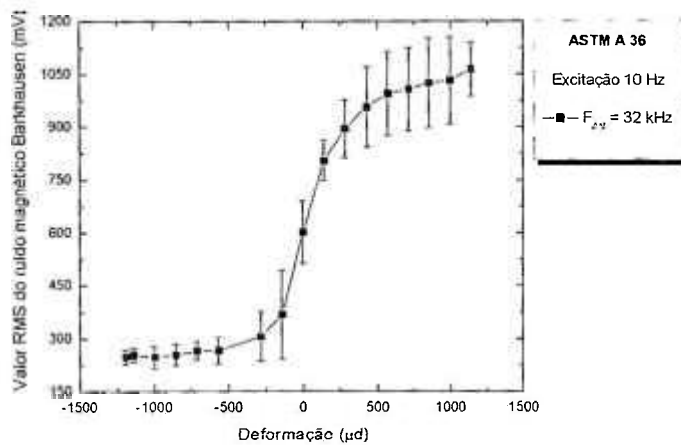


FIGURA 4.140 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

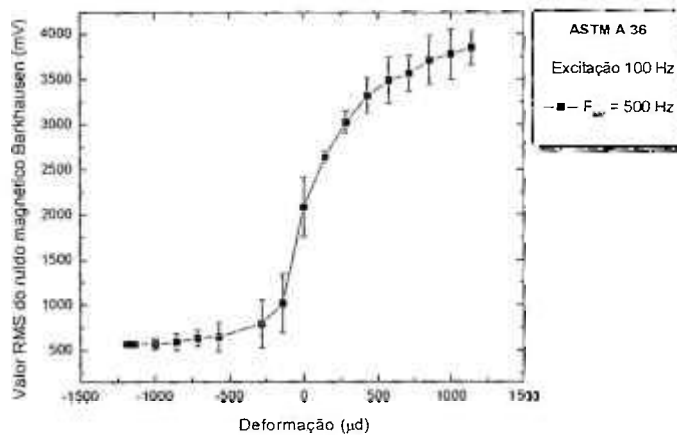


FIGURA 4.141 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

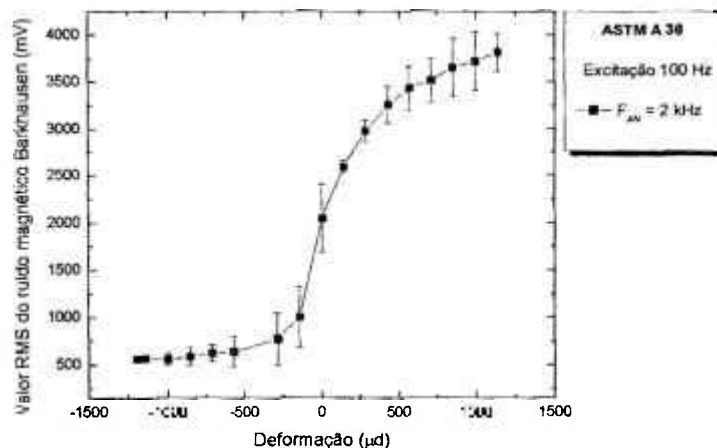


FIGURA 4.142 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

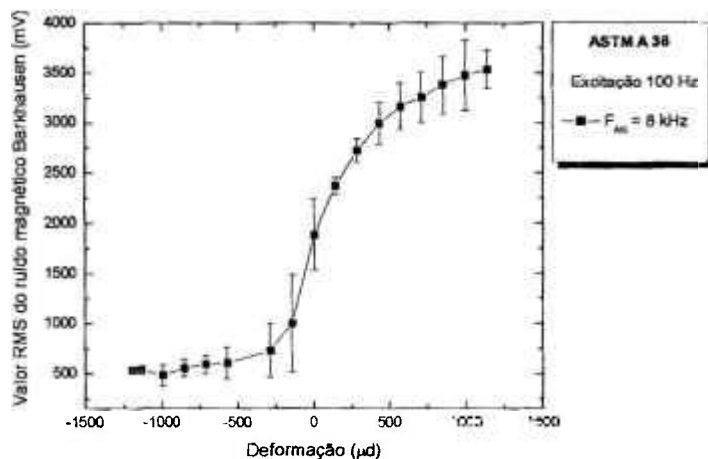


FIGURA 4.143 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

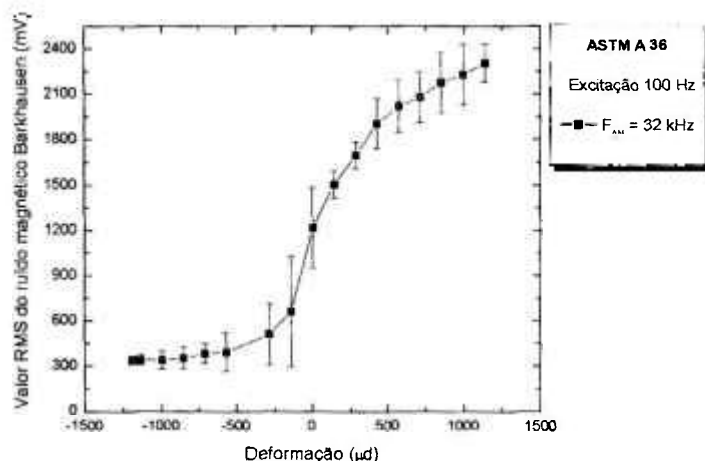


FIGURA 4.144 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

As curvas obtidas para as vigas de isoflexão do aço ASTM A 36 apresentam alguns aspectos característicos. Todas as curvas apresentam uma região onde a resposta do ruído magnético Barkhausen é aproximadamente linear. Esta região é limitada a baixos carregamentos, ou seja, pequenos valores de deformação. Para carregamentos maiores, tanto de tração como de compressão, as variações do ruído magnético Barkhausen com o carregamento aplicado são cada vez menores, tanto na região de tração quanto na região de compressão, até um ponto de saturação, o que limita a aplicação deste método à medição de deformações abaixo dos níveis de saturação.

Na FIG. 4.145 a FIG. 4.148 podem ser observados os gráficos referentes à variação do ruído magnético Barkhausen com as mudanças nos valores das tensões atuantes, para as frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz, para as vigas com eixo paralelo e perpendicular à direção de laminação do material.

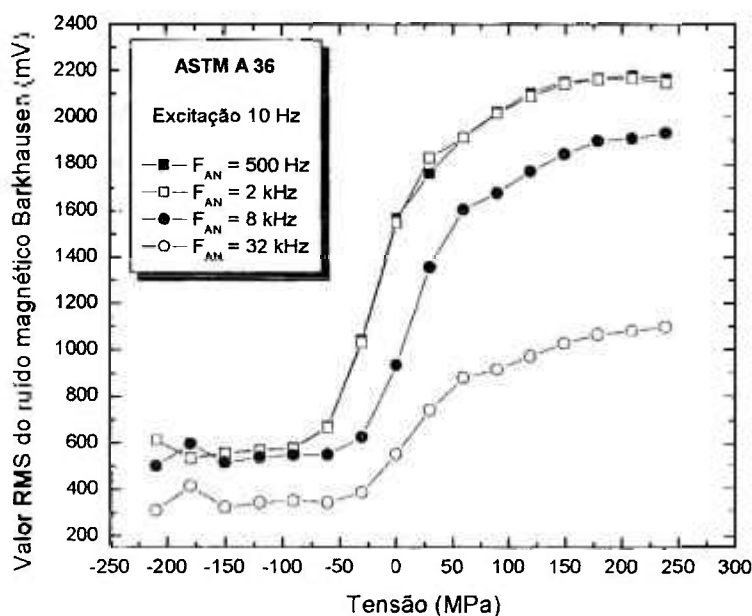


FIGURA 4.145 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa. Frequência de excitação de 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

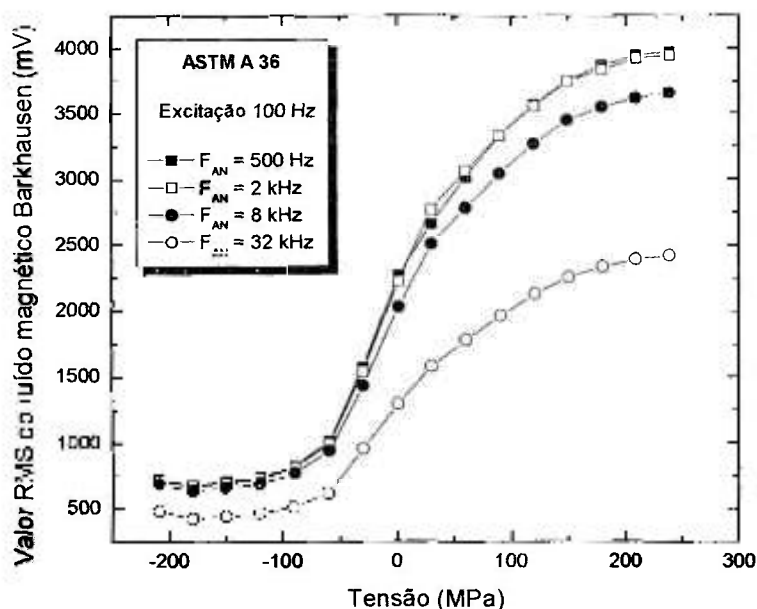


FIGURA 4.146 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa. Frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

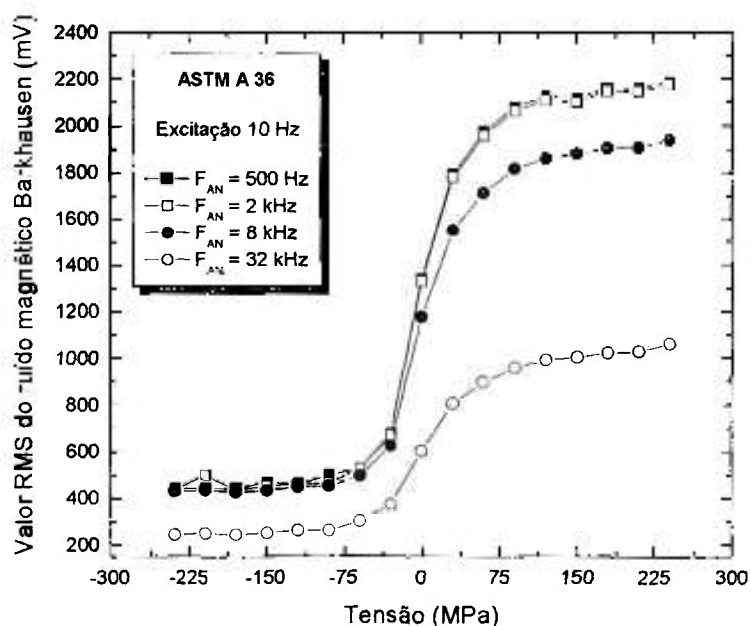


FIGURA 4.147 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequência de excitação de 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

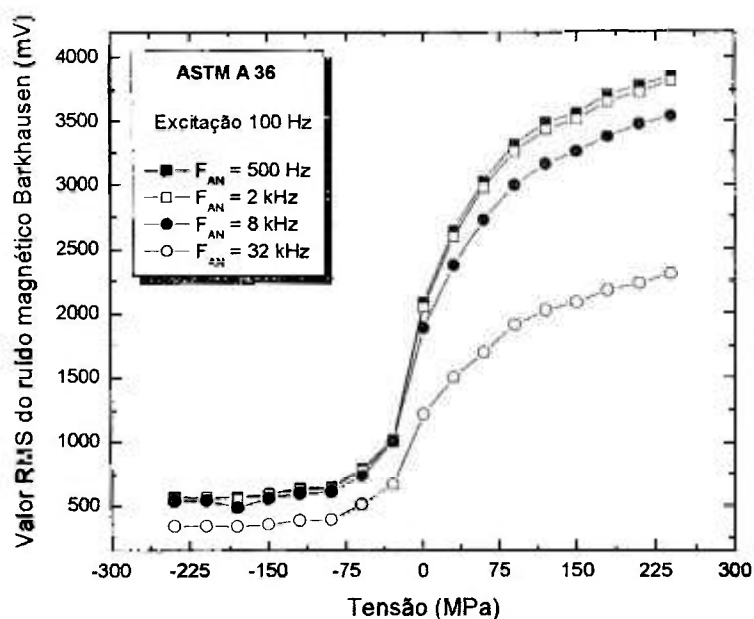


FIGURA 4.148 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

Estes gráficos foram obtidos calculando-se os valores das tensões atuantes na superfície das vigas em função das deformações determinadas através das rosetas instaladas nas mesmas. As tensões foram determinadas a partir da EQ. 2.22. Podem-se observar alguns aspectos importantes nos gráficos obtidos:

a) As variações que ocorrem no valor RMS do ruído magnético Barkhausen gerado são maiores para a frequência do campo magnético de excitação igual a 100 Hz do que para a frequência de 10 Hz, ou seja, pequenas variações de tensão produzem maiores variações do valor do ruído magnético na frequência de 100 Hz. O segundo aspecto está ligado à saturação que ocorre no valor do ruído. Na frequência de 100 Hz a saturação do ruído na região de tração é menos acentuada para a frequência de 100 Hz do que para a frequência de 10 Hz. Este efeito ocorre para todas as frequências de análise utilizadas, como pode ser observado nas FIG.4.149 a FIG. 4.151. Na FIG. 4.149, referente às frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz, a saturação do ruído inicia para valor da tensão atuante de cerca de 120 MPa para a frequência de excitação de 10 Hz. Para a frequência de excitação de 100 Hz este valor se situa ao redor de 225 MPa. Para as outras frequências de análise o comportamento é similar. A profundidade de penetração do campo magnético de excitação com frequência de 100 Hz é cerca de 32% da profundidade de penetração com a frequência de 10 Hz. Desta forma, com a frequência de 10 Hz para o

campo de excitação, um volume maior do material é afetado pelo campo, podendo, portanto, introduzir a influência de outras características do material nos resultados do ensaio e podendo, portanto, contribuir para a saturação do ruído. Na frequência de 100 Hz esta contribuição seria menor. Entretanto, além da frequência de excitação um outro ponto que deve ser estudado se relaciona com as características do elemento sensor (indutância, impedância).

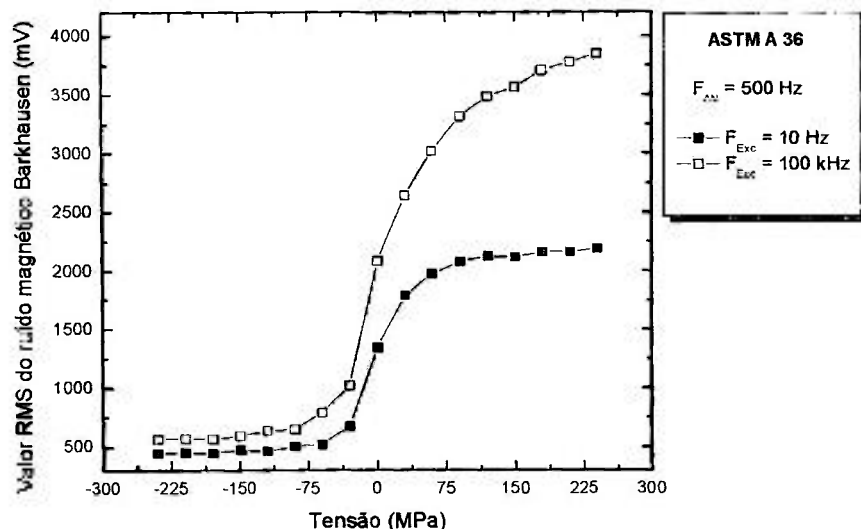


FIGURA 4.149 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

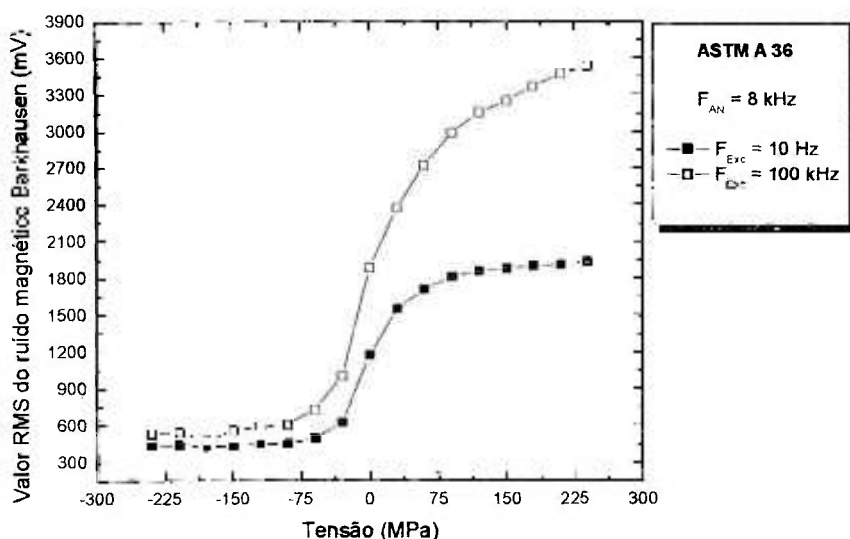


FIGURA 4.150 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

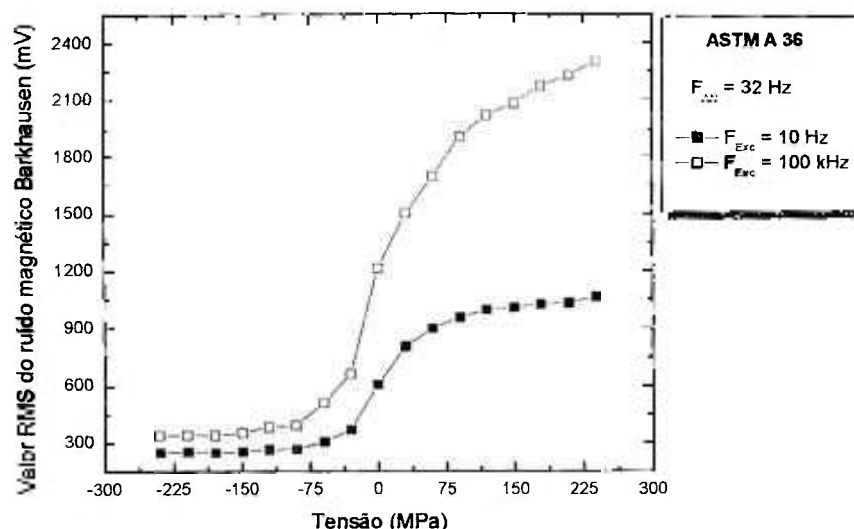


FIGURA 4.151 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

b) A saturação na região de compressão ocorre para níveis mais baixos de tensão do que para a região de tração, indicando um comportamento diferente do ruído magnético gerado nas regiões de tração e compressão.

c) Os resultados obtidos com a frequência de excitação de 100 Hz possibilitam uma maior resolução na realização das medições.

d) Para a frequência de 10 Hz, as curvas associando o ruído magnético Barkhausen com o valor das tensões aplicadas praticamente se superpõe, indicando que o sistema de ensaio não percebe diferenças entre estas duas frequências de análise para a medição de tensões. Para a frequência de 100 Hz (menor penetração) uma pequena diferença pode ser notada, para níveis mais elevados das tensões de tração, conforme pode ser observado na FIG. 4.152. Este mesmo efeito foi observado no item 4.6, na determinação do nível de excitação da sonda magnetoelástica.

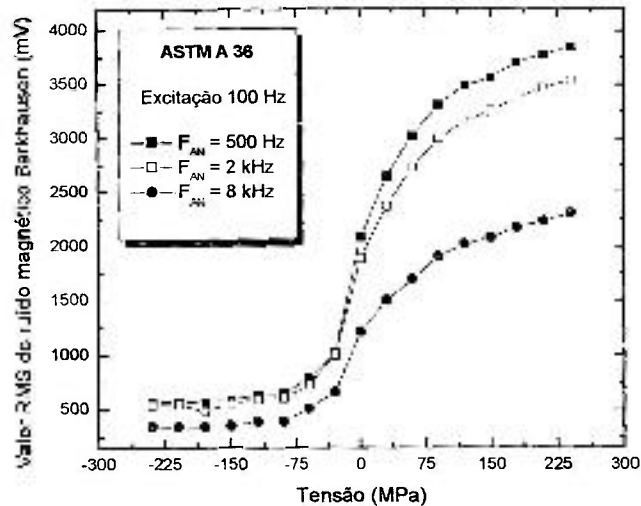


FIGURA 4.152 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 36, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz e 8 kHz.

4.11 Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais para o Aço ASTM A 515

Os ensaios realizados na viga de isoflexão do aço ASTM A 515, com eixo longitudinal perpendicular à direção de laminação, campo magnético paralelo à direção de carregamento e com a aplicação de carregamentos para gerar tensões de tração e compressão na superfície da viga entre os limites de escoamento à tração e à compressão deste material apresentaram os resultados indicados na FIG. 4.153 a FIG. 4.160. Os dados correspondem às frequências de excitação de 10 Hz e 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz. As barras de erro correspondem à estimativa por intervalo dos valores médios verdadeiros com coeficiente de confiança de 95%.

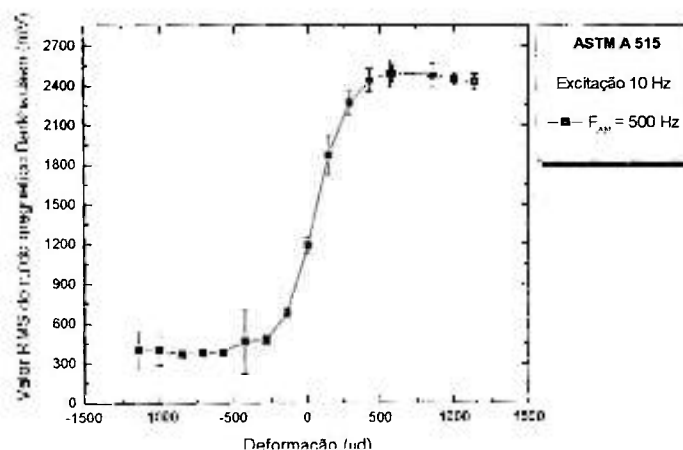


FIGURA 4.153 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

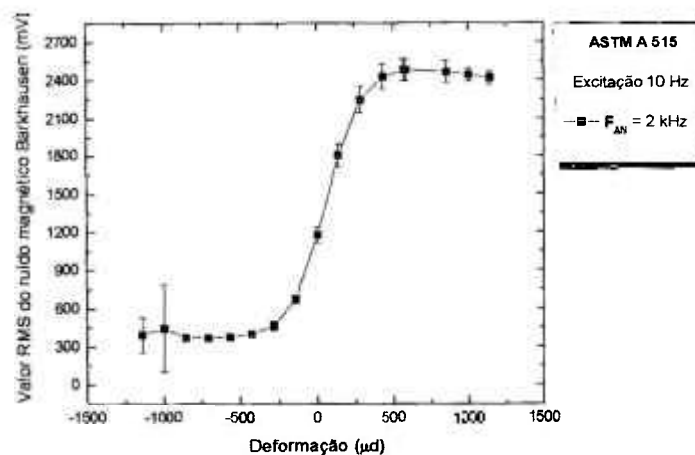


FIGURA 4.154 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

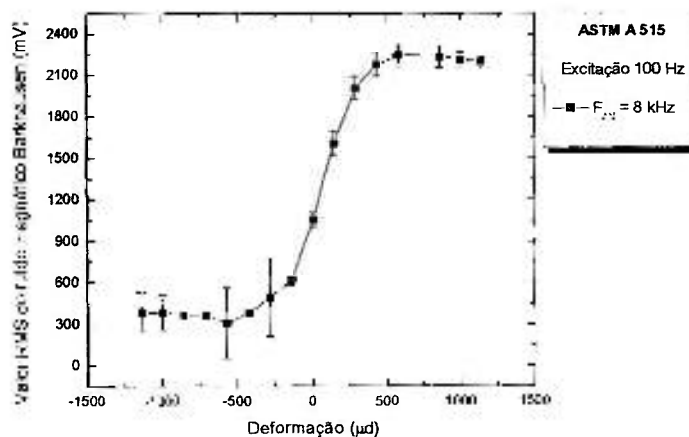


FIGURA 4.155 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

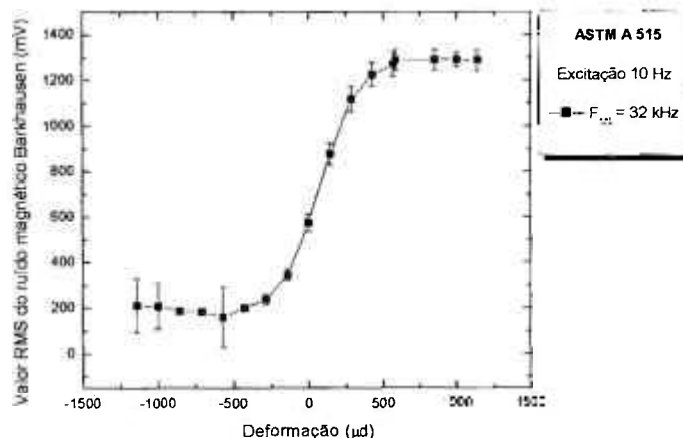


FIGURA 4.156 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 10 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

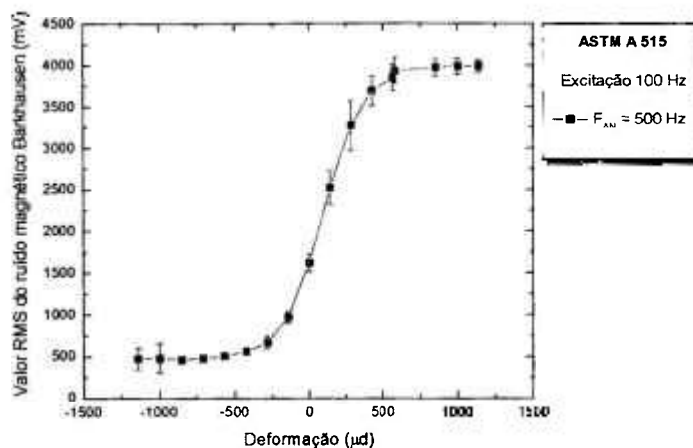


FIGURA 4.157 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

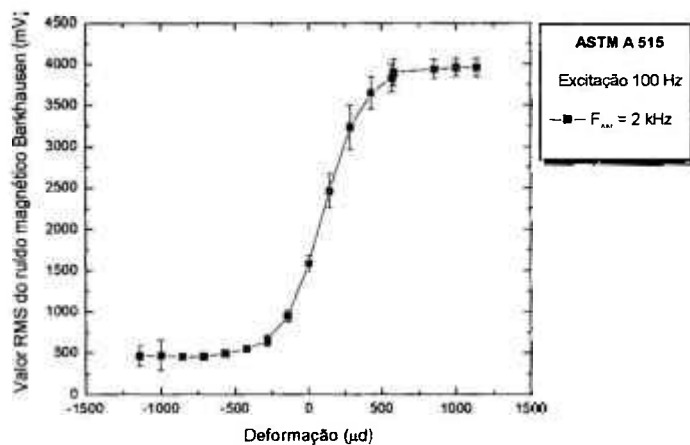


FIGURA 4.158 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

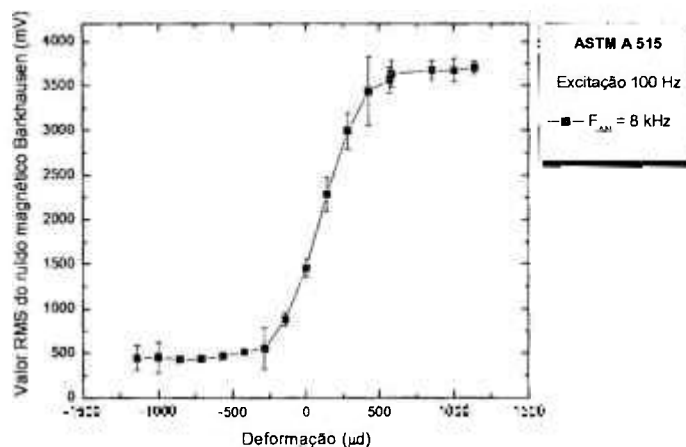


FIGURA 4.159 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

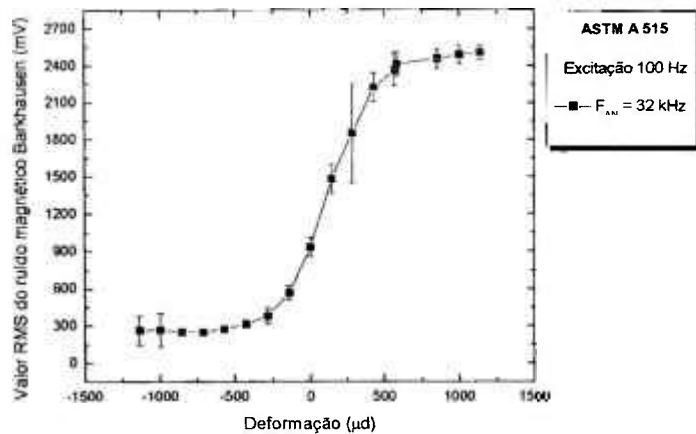


FIGURA 4.160 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

O comportamento apresentado para o aço ASTM A 515 é bem similar ao do aço ASTM A 36, tanto nas características gerais da curva como com relação à sensibilidade e resolução, indicando a frequência de excitação de 100 Hz como a mais adequada para a medição de tensões mecânicas. Por este motivo, para a viga com eixo longitudinal paralelo à direção de laminação, são apresentados apenas os resultados obtidos com a frequência de excitação de 100 Hz, que podem ser observados na FIG. 4.161 a FIG. 4.164.

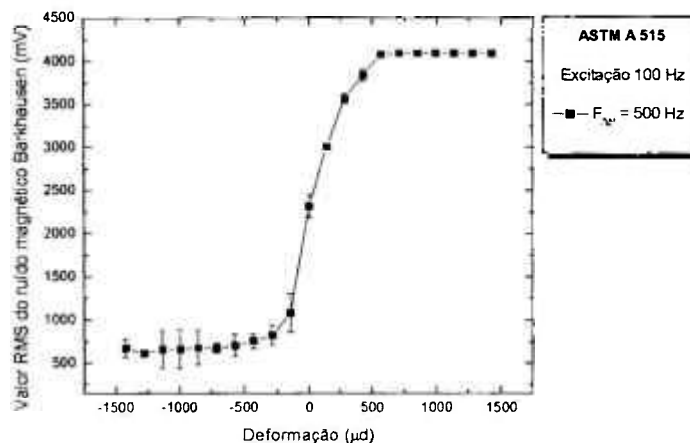


FIGURA 4.161 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

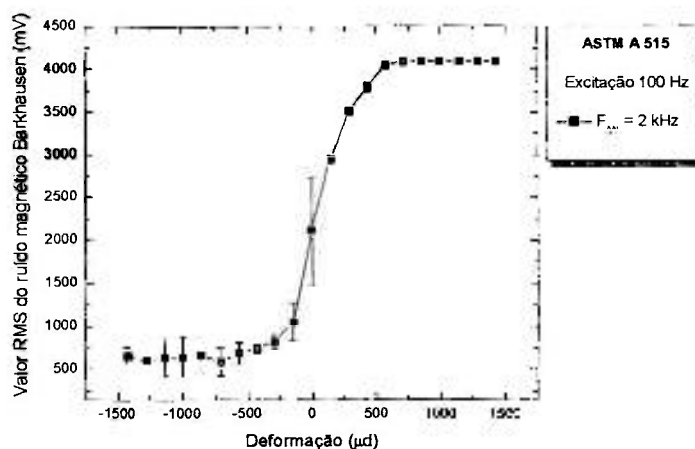


FIGURA 4.162 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

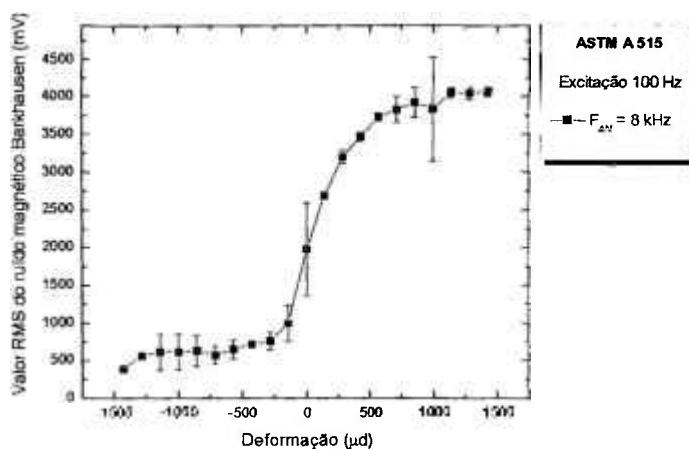


FIGURA 4.163 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

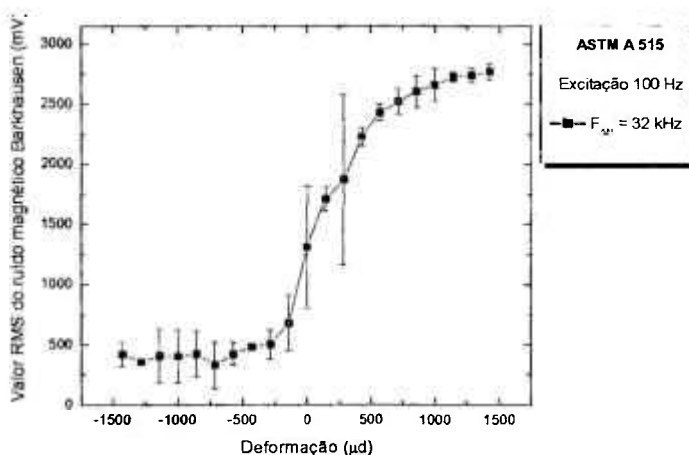


FIGURA 4.164 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço ASTM A 515, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

4.12 Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais para o Aço USI SAC 50

O comportamento apresentado pelo aço USI SAC 50 foi similar ao dos aços ASTM A 36 e ASTM A 515, tanto nas características gerais da curva como com relação à sensibilidade e resolução, indicando a frequência de excitação de 100 Hz como a mais adequada para a medição de tensões mecânicas. Por este motivo, para a viga com eixo longitudinal perpendicular à direção de laminação, são apresentados apenas os resultados obtidos com a frequência de excitação de 100 Hz, que podem ser observados na FIG. 4.165 a FIG. 4.169. Para a viga com eixo longitudinal paralelo à direção de laminação, os resultados obtidos para a frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz podem ser observados na FIG. 4.170 a FIG. 4.173.

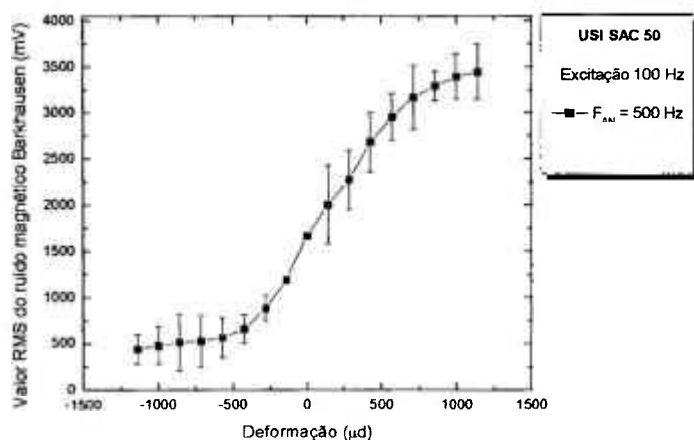


FIGURA 4.165 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz.

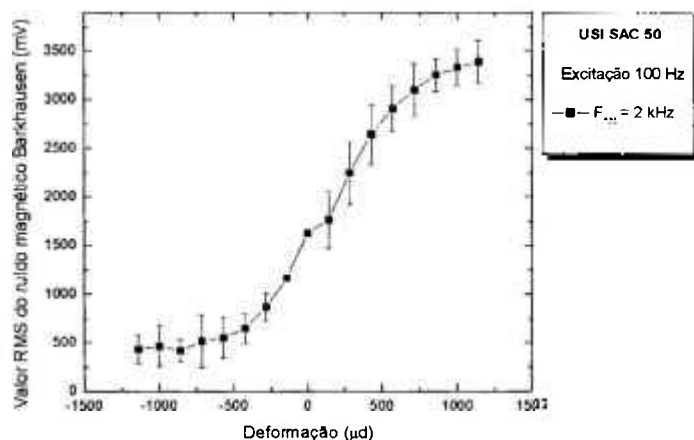


FIGURA 4.166 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

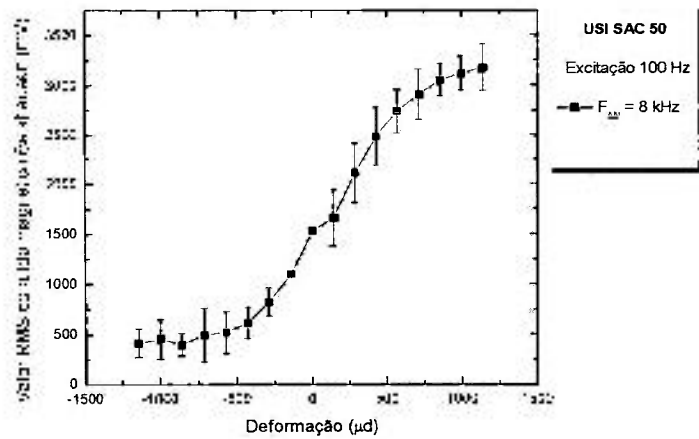


FIGURA 4.167 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

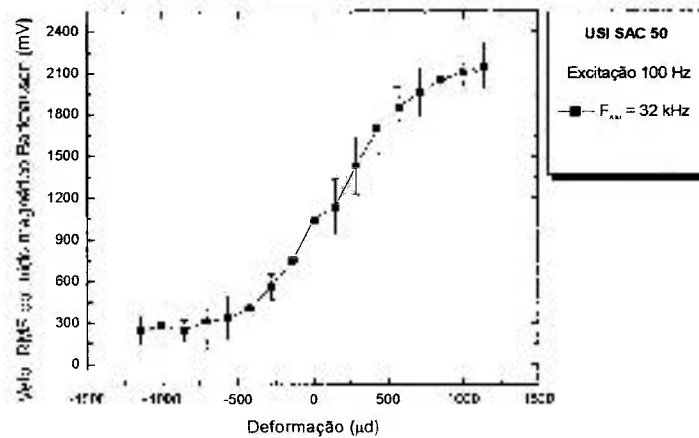


FIGURA 4.168 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

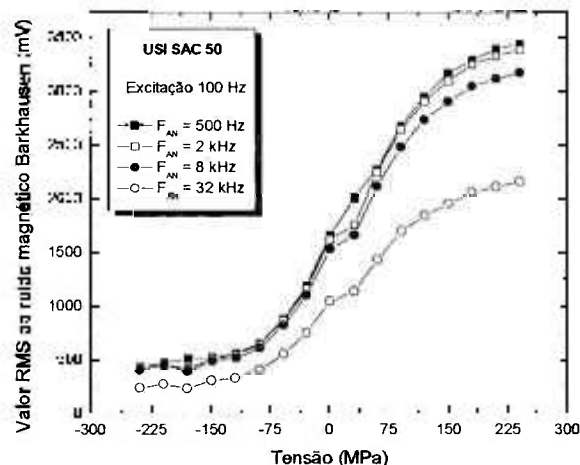


FIGURA 4.169 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa, frequência de excitação de 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

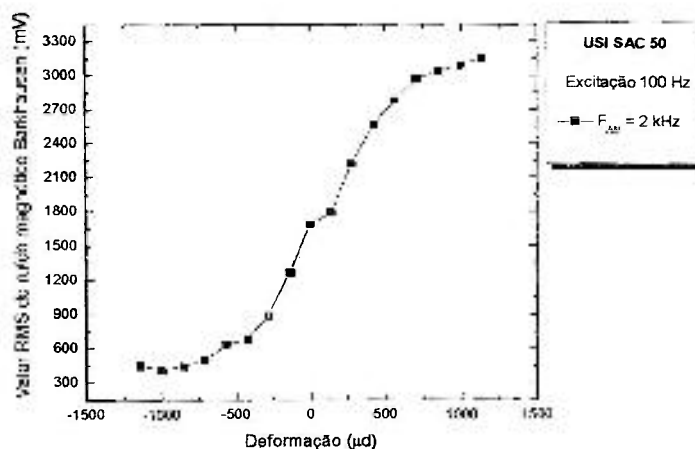


FIGURA 4.170 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 2 kHz.

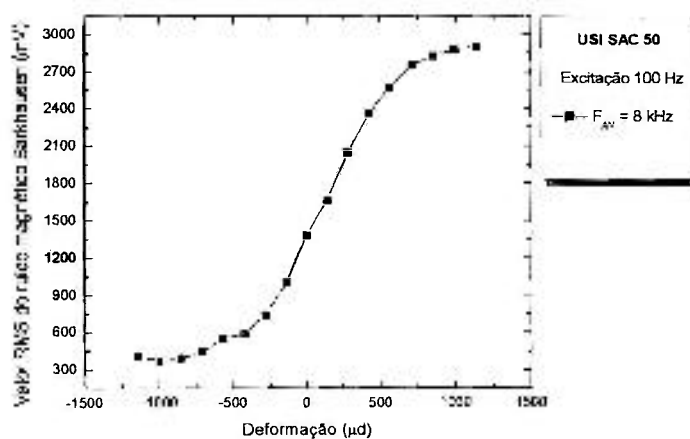


FIGURA 4.171 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 8 kHz.

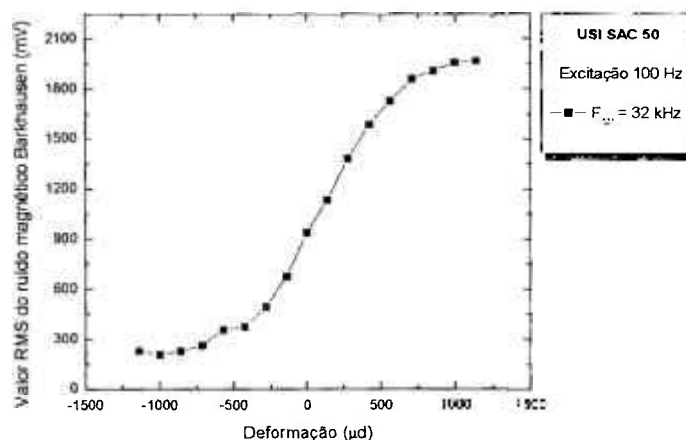


FIGURA 4.172 - Resultados obtidos para os testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo paralelo à direção de laminação da chapa, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 32 kHz.

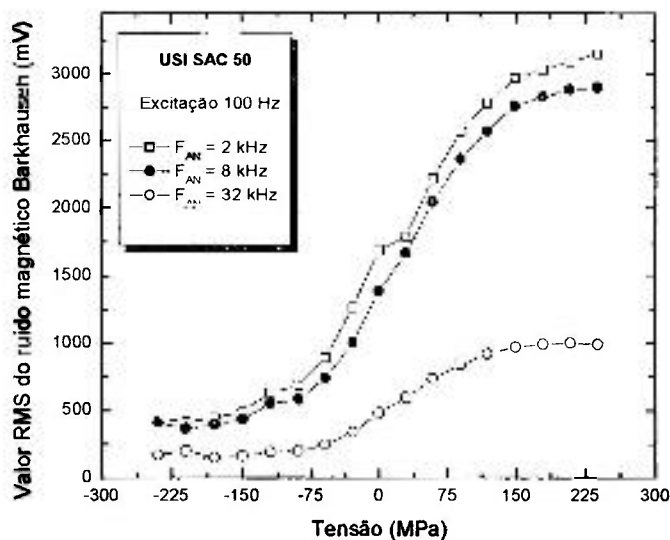


FIGURA 4.173 - Resultados obtidos nos testes de carregamento com a viga de isoflexão de aço USI SAC 50, com eixo perpendicular à direção de laminação da chapa. Frequência de excitação de 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

4.13 Função para Ajuste dos Dados

Após a aquisição e o tratamento dos dados apresentados nos itens 4.10, 4.11 e 4.12, foi pesquisada uma função que possibilitasse a melhor representação deste conjunto de dados. Os critérios adotados para a escolha foram a semelhança apresentada pela função com o perfil dos dados adquiridos e mostrados nas FIG. 4.129 a 4.173 e o valor do coeficiente de correlação obtido com o ajuste. Foi selecionada uma função sigmoideal (Boltzmann) para ser utilizada nos trabalhos. A função apresenta a forma:

$$RMB = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{(x - \epsilon_0)}{\epsilon}}} + A_2 \quad 4.4$$

sendo,

A_1 , A_2 , ϵ_0 e ϵ parâmetros de ajuste

RMB o valor RMS ruído magnético Barkhausen medido no material

ϵ a deformação determinada a partir do valor do RMB

Para cada par frequência de excitação/frequência de análise e cada material foi determinada uma função. As funções obtidas podem ser observadas no APÊNDICE H. A

determinação das tensões mecânicas presentes nos materiais avaliados pode ser realizada a partir do valor RMS do RMB medido nos materiais sob teste e das funções de ajuste.

As tensões mecânicas presentes nos materiais testados são determinadas a partir das deformações presentes em sua superfície. As deformações, para cada par frequência de excitação/frequência de análise, são determinadas a partir do valor RMS do ruído magnético Barkhausen detectado pela sonda magnetoelástica e da EQ. 4.4. Para o uso da EQ. 4.4 devem ser utilizados os parâmetros de ajuste para cada frequência de excitação/frequência de análise apresentados no APÊNDICE H. As tensões, então, podem ser determinadas utilizando-se a EQ. 2.22 (estado uniaxial de tensões) ou a EQ. 2.23 e EQ. 2.24 (estado biaxial de tensões).

4.14 Resposta do Sistema a Carregamentos Uniaxiais nas Regiões Elástica e Plástica

A resposta do material ao carregamento, nas regiões elástica e plástica, obtida pela aplicação de carregamentos axiais, pode ser observada na FIG. 4.174, FIG. 4.175 e FIG. 4.176 para o aço ASTM A 36.

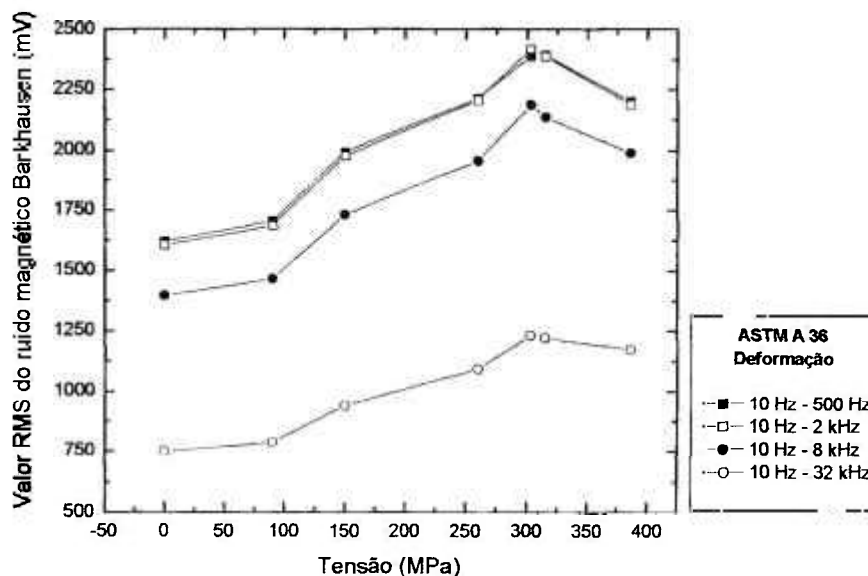


FIGURA 4.174 – Comportamento do ruído magnético Barkhausen emitido pelo material em resposta a carregamentos nas regiões elástica e plástica. Aço ASTM A 36 com frequência de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz, 32 kHz.

Como pode ser observado pela análise da FIG. 4.174, o valor RMS do ruído magnético Barkhausen cresce com a tensão aplicada até atingir o limite de escoamento do material. Neste ponto, a amplitude do ruído começa a diminuir com o aumento da tensão, até atingir o limite de resistência do material, quando a aplicação do carregamento foi interrompida.

Em materiais ferromagnéticos com constante de magnetoestricção positiva, a aplicação de uma tensão de tração na região elástica tende a orientar os domínios na direção de aplicação da tensão, ocasionando um aumento na amplitude do ruído magnético gerado. A deformação plástica, entretanto, introduz distorções permanentes na rede cristalina, que produzem efeitos diferentes em cada configuração de domínios existente. Com a deformação plástica, a introdução de discordâncias na rede aumenta o número de barreiras de energia ao deslocamento das paredes dos domínios, resultando em uma diminuição da amplitude do ruído gerado.

Depois de descarregado e apresentando uma deformação plástica permanente, o corpo de prova foi novamente solicitado com carregamentos de tração. Os resultados obtidos podem ser observados na FIG. 4.175 para a frequência de excitação de 10 Hz.

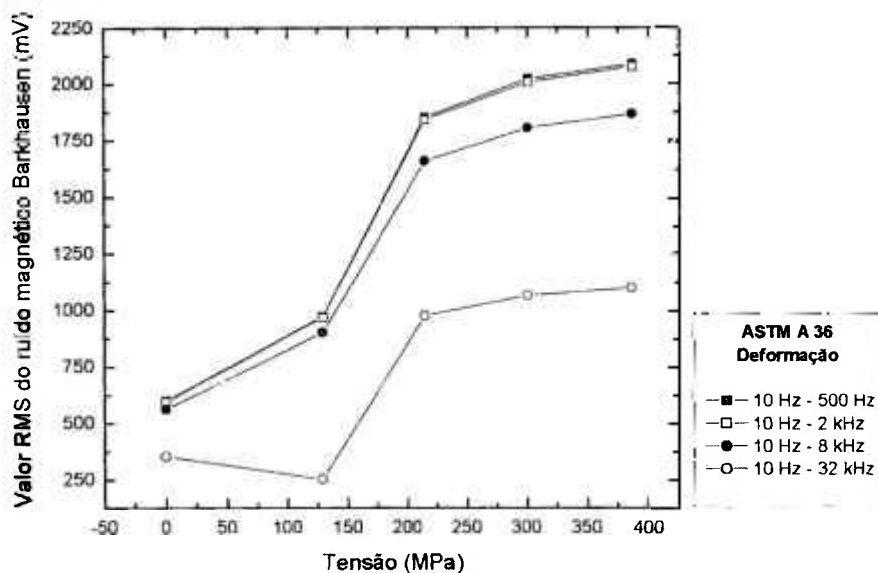


FIGURA 4.175 – Comportamento do ruído magnético Barkhausen emitido pelo material em resposta a carregamentos aplicados após a deformação plástica sofrida pelo material apresentada na FIG. 4.174. Aço ASTM A 36 com frequência de excitação 10 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2kHz, 8 kHz e 32 kHz.

Pode-se observar, comparando-se os resultados da FIG. 4.174 e FIG. 4.175, ambos referentes à frequência de excitação de 10 Hz, uma redução acentuada no valor do ruído magnético Barkhausen nos corpos de prova descarregados, consequência da deformação plástica sofrida pelo material. A seguir nota-se que, com o aumento do carregamento aplicado, ou seja, das tensões atuantes, o valor RMS cresce continuamente até atingir o valor máximo da tensão a que o material foi submetido anteriormente. Este aumento contínuo se deve à mudança do valor do limite de escoamento do material devido ao

encruamento sofrido pelo mesmo. Após uma deformação plástica prévia, o material só voltará a escoar após atingir a tensão que provocou a sua deformação plástica anterior. Como o material foi solicitado até atingir a tensão limite de resistência no primeiro ensaio, ele não experimentou um novo escoamento durante o segundo carregamento.

Os resultados obtidos para a frequência de excitação de 100 Hz podem ser observados na FIG. 4.176.

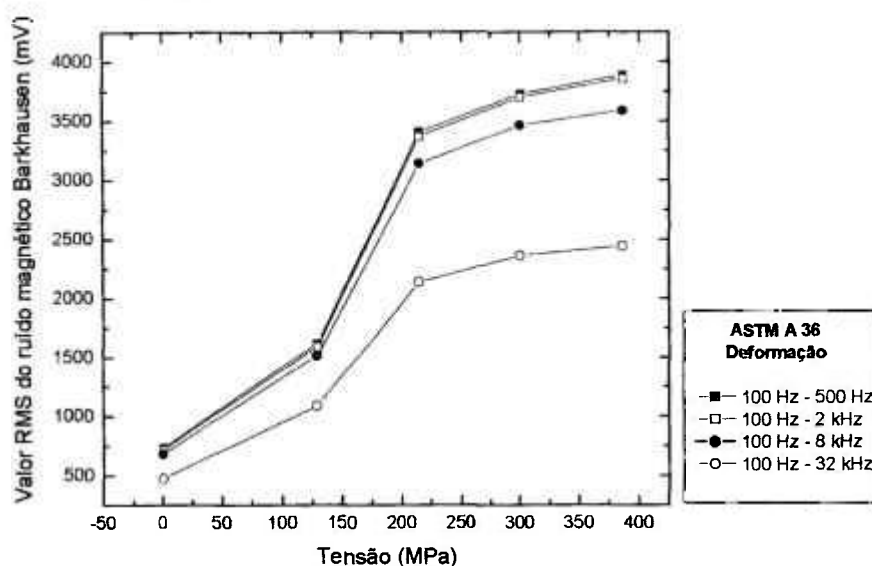


FIGURA 4.176 – Comportamento do ruído magnético Barkhausen emitido pelo material em resposta a carregamentos aplicados após a deformação plástica sofrida pelo material apresentada na FIG. 4.144, para o aço ASTM A 36 com frequência de excitação de 100 Hz e frequências de análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

Estes resultados indicam que materiais que foram submetidos a algum tipo de processo de conformação mecânica, sem um tratamento térmico associado ao processo ou um tratamento térmico posterior, apresentam um padrão para o ruído magnético Barkhausen diferente, quando comparado a um material não deformado. Isto sugere a necessidade da realização de um tratamento térmico de alívio de tensões, sem produzir alterações microestruturais, nos corpos de prova a serem utilizados para a obtenção de curvas de calibração ou de referência associando o valor RMS do ruído magnético Barkhausen com o nível de tensões presente no material. Esta recomendação também deve ser seguida para a determinação do nível de excitação da sonda magnetoelástica.

O nível de excitação deve ser determinado somente após a realização do tratamento térmico de alívio de tensões nas vigas utilizadas. Desta forma, as variações no padrão do ruído magnético Barkhausen, obtidas sob diferentes condições de carregamento, serão devidas, praticamente, às variações nas tensões presentes no material para cada

carregamento aplicado, aumentando relação sinal/ruído obtida durante a etapa de calibração.

4.15 Resultados dos Testes de Carregamento

Os testes de carregamento realizados na estrutura de aço ASTM A 36 foram realizados aplicando-se carregamentos crescentes à estrutura, utilizando-se uma prensa hidráulica, medindo-se as deformações provocadas através das rosetas fixadas à mesma e determinando-se as tensões atuantes através das deformações lidas.

Os carregamentos foram aplicados de forma controlada de maneira que a tensão principal máxima permanecesse orientada na direção do eixo longitudinal da chapa da base e das chapas laterais. Paralelamente, a sonda magnetoelástica foi posicionada junto a cada uma das rosetas e, para cada condição de carregamento, foi registrado o valor do ruído magnético Barkhausen gerado, para cada par frequência de excitação/frequência de análise utilizados. Os resultados obtidos, para a chapa da base, onde foi instalada a roseta 1, destinada a medir as tensões de tração originadas dos carregamentos aplicados, podem ser observados na TAB. 4.9.

TABELA 4.9 – Valores das tensões determinados através do ensaio magnetoelástico (em função das frequências de excitação e de análise utilizadas) e de extensometria convencional.

Carga	Ruído Magnético Barkhausen					Roseta 1
	F_{Exc}	F_{An}	Valor RMS (mV)	Deformação	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
0	10 Hz	500 Hz	-	-	-	
		2 kHz	-	-	-	
		8 kHz	-	-	-	
		32 kHz	-	-	-	
	100 Hz	500 Hz	-	-	-	
		2 kHz	-	-	-	
		8 kHz	-	-	-	
		32 kHz	-	-	-	

TABELA 4.9 (continuação) – Valores das tensões determinados através do ensaio magnetoelástico (em função das frequências de excitação e de análise utilizadas) e de extensometria convencional.

Carga	Ruído Magnético Barkhausen					Roseta 1
	F _{Exc}	F _{An}	Valor RMS (mV)	Deformação	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
1	10 Hz	500 Hz	1394	29	6	14,69
		2 kHz	1383	29	6	
		8 kHz	1187	24	5	
		32 kHz	575	-3	-1	
	100 Hz	500 Hz	2185	66	14	
		2 kHz	2151	68	14	
		8 kHz	1954	63	13	
		32 kHz	1262	74	15	
2	10 Hz	500 Hz	1558	68	14	34,32
		2 kHz	1535	66	14	
		8 kHz	1275	50	10	
		32 kHz	629	34	7	
	100 Hz	500 Hz	2552	141	30	
		2 kHz	2536	149	31	
		8 kHz	2325	153	32	
		32 kHz	1485	167	35	
3	10 Hz	500 Hz	1702	108	23	48,33
		2 kHz	1693	110	23	
		8 kHz	1440	102	21	
		32 kHz	703	84	18	
	100 Hz	500 Hz	3026	258	54	
		2 kHz	2952	253	53	
		8 kHz	2698	258	54	
		32 kHz	1719	277	58	
4	10 Hz	500 Hz	1767	129	27	59,91
		2 kHz	1765	133	28	
		8 kHz	1496	122	26	
		32 kHz	723	99	21	
	100 Hz	500 Hz	3102	282	59	
		2 kHz	3062	287	60	
		8 kHz	2804	295	62	
		32 kHz	1784	314	66	

TABELA 4.9 (continuação) – Valores das tensões determinados através do ensaio magnetoelástico (em função das frequências de excitação e de análise utilizadas) e de extensometria convencional.

Ruído Magnético Barkhausen						Roseta 1
Carga	F _{Exc}	F _{An}	Valor RMS (mV)	Deformação	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
5	10 Hz	500 Hz	1783	134	28	64,54
		2 kHz	1781	139	29	
		8 kHz	1507	126	26	
		32 kHz	726	101	21	
	100 Hz	500 Hz	3104	283	59	
		2 kHz	3068	289	61	
		8 kHz	2807	296	62	
		32 kHz	1789	316	66	
6	10 Hz	500 Hz	1945	205	43	101,92
		2 kHz	1946	215	45	
		8 kHz	1631	180	38	
		32 kHz	791	150	32	
	100 Hz	500 Hz	3428	425	89	
		2 kHz	3366	420	88	
		8 kHz	3104	435	91	
		32 kHz	1963	440	92	

O ensaio neste corpo de prova foi feito sob condições controladas, estando os resultados obtidos com a frequência de excitação de 100 Hz próximos dos valores determinados pela roseta. Com os níveis de carregamento aplicados, a região da curva utilizada (ruído magnético Barkhausen em função das deformações) correspondeu à parte linear da curva, tendo este fato contribuído para uma aproximação do valor real. Entretanto, para a frequência de excitação de 10 Hz, os valores encontrados ficaram bem abaixo dos valores determinados pela roseta utilizada. Como a diferença básica entre as duas frequências utilizadas é a profundidade de penetração do campo magnético, os resultados obtidos sugerem que variações ao longo da espessura do material podem ter contribuído para esta diferença. Causas possíveis destas variações pode ser o perfil de distribuição de tensões ao longo da espessura devido ao carregamento aplicado. Distorções na aplicação do carregamento, com a introdução de esforços de flexão, também podem produzir perfis de distribuição de tensões ao longo da espessura que modificam a estrutura de domínios, produzindo variações acentuadas nos resultados. Para frequências mais altas,

como as medições se restringem às regiões superficiais, este efeito tem uma menor influência nos resultados.

Os resultados obtidos para a roseta destinada a medir esforços de compressão, roseta 2, posicionada em uma das chapas laterais da estrutura, podem ser observados na TAB. 4.10.

TABELA 4.10 – Valores das tensões determinados através do ensaio magnetoelástico (em função das frequências de excitação e de análise utilizadas) e de extensometria convencional.

Ruído Magnético Barkhausen						Roseta 2
Carga	F _{Exc}	F _{An}	Valor RMS (mV)	Deformação	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
0	10 Hz	500 Hz	1205	-15	-3	0
		2 kHz	1198	-14	-3	
		8 kHz	1163	17	4	
		32 kHz	719	96	20	
	100 Hz	500 Hz	1557	-65	-14	
		2 kHz	1540	-62	-13	
		8 kHz	1460	-59	-12	
		32 kHz	987	-43	-9	
1	10 Hz	500 Hz	1027	-58	-12	-25,7
		2 kHz	1055	-48	-10	
		8 kHz	1026	-23	-5	
		32 kHz	677	67	14	
	100 Hz	500 Hz	1195	-160	-34	
		2 kHz	1190	-156	-33	
		8 kHz	1155	-151	-32	
		32 kHz	772	-150	-32	
2	10 Hz	500 Hz	723	-155	-32	-57,9
		2 kHz	703	-161	-34	
		8 kHz	712	-135	-28	
		32 kHz	516	-45	-10	
	100 Hz	500 Hz	817	-323	-68	
		2 kHz	803	-326	-68	
		8 kHz	792	-320	-67	
		32 kHz	579	-284	-60	

TABELA 4.10 (continuação) – Valores das tensões determinados através do ensaio magnetoelástico (em função das frequências de excitação e de análise utilizadas) e de extensometria convencional.

Carga	F _{Exc}	Ruído Magnético Barkhausen				Roseta 2
		F _{An}	Valor RMS (mV)	Deformação	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
3	10 Hz	500 Hz	577	-240	-50	-80,2
		2 kHz	572	-242	-51	
		8 kHz	562	-229	-48	
		32 kHz	370	-184	-39	
	100 Hz	500 Hz	742	-381	-80	
		2 kHz	735	-380	-80	
		8 kHz	705	-389	-82	
		32 kHz	475	-398	-84	
4	10 Hz	500 Hz	568	-241	-51	-90,5
		2 kHz	563	-244	-51	
		8 kHz	555	-225	-47	
		32 kHz	359	-169	-36	
	100 Hz	500 Hz	715	-464	-97	
		2 kHz	704	-472	-99	
		8 kHz	679	-464	-97	
		32 kHz	459	-449	-94	
5	10 Hz	500 Hz	586	-233	-49	-102,7
		2 kHz	580	-235	-49	
		8 kHz	577	-216	-45	
		32 kHz	388	-161	-34	
	100 Hz	500 Hz	676	-455	-95	
		2 kHz	662	-464	-98	
		8 kHz	645	-457	-96	
		32 kHz	434	-464	-98	
6	10 Hz	500 Hz	575	-241	-51	-118,9
		2 kHz	570	-244	-51	
		8 kHz	566	-225	-47	
		32 kHz	381	-169	-36	
	100 Hz	500 Hz	669	-464	-97	
		2 kHz	657	-472	-99	
		8 kHz	640	-464	-97	
		32 kHz	443	-449	-94	

O mesmo comportamento apresentado na chapa da base da estrutura, submetida a esforços de tração foi verificado para a chapa lateral, submetida a esforços de compressão. Os valores obtidos para as tensões atuantes com uma frequência de excitação de 10 Hz foram bem inferiores aos obtidos com a frequência de excitação de 100 Hz. Para a frequência de excitação de 100 Hz, os valores determinados para as tensões atuantes permaneceram próximos aos valores obtidos a partir da roseta. Entretanto, as leituras iniciais sem carregamento, indicaram a presença de tensões de compressão, que podem ter sido induzidas durante o processo de soldagem e não foram completamente aliviadas pelo tratamento térmico. Para valores mais elevados das tensões de compressão, os valores das tensões determinados pela medida do ruído magnético Barkhausen foram menores do que os determinados pela roseta. Este fato comprova a ocorrência da saturação do ruído magnético Barkhausen para esforços de compressão, no caso, a partir de cerca de 90 MPa, ou seja, 30% do limite de escoamento do material.

4.16 Resultados dos Ensaio de Tensões Residuais

Os ensaios de tensões residuais foram realizados em chapas dos materiais estudados, tendo as medições sido feitas em duas direções ortogonais, a direção de laminação e a direção perpendicular à mesma. As avaliações para cada material, portanto, foram feitas utilizando-se as curvas de ajuste de deformação x ruído magnético Barkhausen obtidas para as vigas com eixo longitudinal paralelo e perpendicular à direção de laminação destes materiais. O local, as direções de posicionamento da sonda magnetoelástica para as medições e de instalação da roseta estão indicados na FIG. 4.177.



FIGURA 4.177 – Local e posicionamento da sonda e roseta para medições de tensões residuais.

Os resultados obtidos através do Método do Furo Central podem ser observados na TAB. 4.11.

TABELA 4.11 – Resultados obtidos para a determinação de tensões residuais pelo Método do Furo Central.

Material	Profundidade (mm)	Direção β (°)	Tensão Equivalente (MPa)		Tensão Aparente (Mpa)	
			σ_{\min}	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_{\max}
ASTM A 36	0,000					
	0,254	45	-74	-47	-74	-47
	0,508	-22	-36	-19	2	8
	0,762	-9	-22	-10	5	9
	1,016	-5	-22	-6	-20	7
	1,270	0	-18	-2	-6	14
	1,524	-4	-17	2	-7	19
	1,778	-4	-16	1	-14	-1
	2,032	-18	22	43	288	335
	2,286	-17	34	52	127	122
2,540	-18	29	50	-14	39	
ASTM A 515	0,000					
	0,254	-23	-80	-60	-80	-60
	0,508	36	-51	-32	-21	-4
	0,762	29	-41	-18	-20	11
	1,016	29	-34	-15	-13	-9
	1,270	27	-35	-11	-39	8
	1,524	32	-26	-3	15	35
	1,778	35	-30	5	-50	54
	2,032	35	-30	5	-29	1
	2,286	35	-33	2	-59	-16
2,540	35	-33	2	-33	2	
USI SAC 50	0,000					
	0,254	23	-59	-1	-59	-1
	0,508	9	-37	0	-15	2
	0,762	8	-32	13	-22	38
	1,016	13	-27	16	-10	25
	1,270	11	-22	17	-3	21
	1,524	5	-25	20	-39	35
	1,778	7	-21	20	6	24
	2,032	9	-17	22	9	31
	2,286	5	-19	25	-33	48
2,540	7	-15	27	22	45	

A tabela apresenta os valores das tensões (uniforme e equivalente) máxima, mínima e o ângulo β que as tensões máxima ou mínima determinadas fazem com o extensômetro nº1 da roseta, em função da profundidade do furo introduzido no material. Em todos os materiais testados o eixo do extensômetro 1 é paralelo à direção 1 indicada na FIG. 4.177. Para os aços ASTM A 36 e ASTM A 515, as tensões determinadas até a profundidade de 1,524 mm foram de compressão. Para o aço USI SAC 50, até a profundidade de 0,254 mm

as tensões máxima e mínima foram de compressão. A partir desta profundidade as tensões mínimas determinadas foram de compressão e as máximas de tração. O ângulo formado pelas direções das tensões principais com o extensômetro nº 1 da roseta também sofreu variações apreciáveis nos primeiros patamares de profundidade. Estes resultados indicaram a existência de um campo de tensões residuais não uniforme com a profundidade nestes materiais, ou seja, em cada patamar onde foram realizadas as medições, o valor e a orientação das tensões residuais sofreram alterações apreciáveis. Este efeito ocorreu praticamente em todas as profundidades onde foram realizadas medições para o aço ASTM A 36 e Assim, os ensaios de tensões residuais por este método não puderam ser realizados utilizando-se apenas a norma ASTM E 837 e sim o procedimento adotado pela Micro Measurements (MM TN-503, 2000), para campos de tensões não uniformes. Este método apresenta os valores das tensões equivalentes e não uniformes em função da profundidade do furo usinado no material. Os resultados das medições realizadas através do ruído magnético Barkhausen estão apresentados na TAB. 4.12.

TABELA 4.12 – Resultados dos ensaios de tensões residuais pelo ruído Barkhausen.

Material	Direção	F _{An}	Valor RMS do RMB (mV)	Deformação	Tensão (MPa)
ASTM A 36	1	500 Hz	1049	-375	-84
		2 kHz	972	-403	-93
		8 kHz	901	-420	-97
		32 kHz	579	-460	-107
	2	500 Hz	1897	8	-21
		2 kHz	1710	-24	-30
		8 kHz	1561	-33	-33
		32 kHz	980	-46	-39
ASTM A 515	1	500 Hz	1744	-54	-16
		2 kHz	1447	-91	-25
		8 kHz	1337	-108	-28
		32 kHz	861	-129	-34
	2	500 Hz	1311	-58	-17
		2 kHz	1221	-72	-22
		8 kHz	1139	-65	-21
		32 kHz	743	-69	-23
USI SAC 50	1	500 Hz	839	-343	-78
		2 kHz	802	-343	-87
		8 kHz	753	-349	-85
		32 kHz	494	-360	-88
	2	500 Hz	1290		-21
		2 kHz	1176	-158	-57
		8 kHz	1105	-94	-43
		32 kHz	741	-99	-44

A TAB. 4.12 apresenta, para cada material, o valor RMS do ruído magnético Barkhausen medido nas direções 1 e 2 descritas na FIG. 4.177, os valores das deformações correspondentes determinadas a partir das curvas obtidas pela calibração do sistema de ensaio utilizando as vigas de isoflexão e os valores das tensões correspondentes, determinados com o auxílio da EQ. 2.23 e EQ. 2.24. Para todas as frequências de análise utilizadas as tensões determinadas através do ruído magnético Barkhausen foram de compressão, atingindo valores mais elevados nos aços ASTM A 36 e USI SAC 50.

Analisando-se os resultados obtidos para a frequência de análise de 32 kHz, que segundo o fabricante do sistema de ensaio utilizado nos experimentos corresponde ao ruído gerado nas regiões mais próximas à superfície, e os resultados encontrados pelo método do furo central para a profundidade de 0,254 mm, verifica-se que para o aço ASTM A 36, à profundidade de 0,254 mm, a tensão principal máxima, -47 MPa, ocorreu a 45° da direção do extensômetro 1 da roseta, ou seja, a 45° da direção 1 indicada na FIG. 4.177, contados no sentido horário. A tensão mínima, -74 MPa, ocorreu defasada de 90° em relação à tensão máxima. A tensão determinada na direção 1, através da medição do ruído magnético Barkhausen, para a frequência de 32 kHz, foi de -107 MPa e na direção 2 de -39 MPa.

Para o aço ASTM A 515, à profundidade de 0,254 mm, a tensão principal máxima, -60 MPa, ocorreu a -23° da direção do extensômetro 1 da roseta, ou seja, a -23° da direção 1 indicada na FIG. 4.177. A tensão mínima, -80 MPa, ocorreu defasada de 90° em relação à tensão máxima. A tensão determinada na direção 1, através da medição do ruído magnético Barkhausen, para a frequência de 8 kHz, foi de -34 MPa e na direção 2 de -23 MPa.

Para o aço USI SAC 50, à profundidade de 0,254 mm, a tensão principal máxima, -1 MPa, ocorreu a 23° da direção do extensômetro 1 da roseta, ou seja, a 23° da direção 1 indicada na FIG. 4.177. A tensão mínima, -59 MPa, ocorreu defasada de 90° em relação à tensão máxima. A tensão determinada na direção 1, através da medição do ruído magnético Barkhausen, para a frequência de 8 kHz, foi de -88 MPa e na direção 2 de -44 MPa.

Para a realização de comparações entre os dois métodos de ensaio, seria necessária a obtenção de corpos de prova que apresentassem campos de tensões residuais uniformes, ou seja, que não apresentassem variações de tensões em módulo e direção com a profundidade. Corpos de prova que apresentem campos de tensões residuais uniformes possibilitarão uma melhor compreensão do comportamento dos dois métodos de teste, facilitando a realização de comparações entre os dois métodos, devendo ser objeto de estudos como continuação deste trabalho.

4.17 Aço 20 MnMoNi 5 5

Os experimentos para avaliação do aço 20 MnMoNi 5 5 foram realizados em uma via de isoflexão fabricada a partir de uma amostra deste material, com a superfície preparada com lixa 320. Os resultados obtidos para o valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função do nível de excitação da sonda magnetoelástica, para o aço 20 MnMoNi 5 5, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz podem ser observados na FIG. 4.178. As barras de erro correspondem à estimativa por intervalo dos valores médios verdadeiros com coeficiente de confiança de 95%.

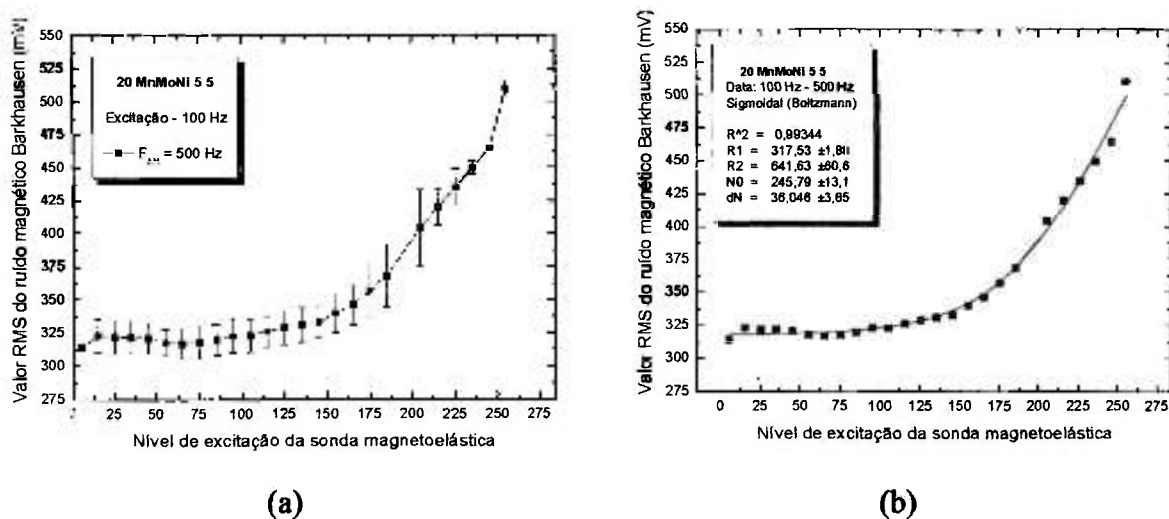


FIGURA 4.178 – Resultados obtidos para o valor RMS do ruído magnético Barkhausen em função do nível de excitação da sonda magnetoelástica para o aço 20 MnMoNi 5 5, para a frequência de excitação de 100 Hz e frequência de análise de 500 Hz (a). Curva e parâmetros de ajuste para o conjunto de dados obtidos (b).

O valor do nível de excitação determinado para este material, de acordo com o procedimento descrito em 3.4.3 – Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica e com a utilização da EQ. 4.3, foi de 245, quase no limite de operação do equipamento (255). Testes iniciais de carregamento demonstraram baixa sensibilidade à variações de tensões.

O baixo valor RMS obtido para este material pode ser relacionado com a sua microestrutura, resultante de um processo de têmpera e revenimento, que apresenta uma quantidade maior de barreiras de energia para o movimento dos domínios. A sua composição química também pode contribuir para este efeito. O níquel, presente no material, apresenta uma constante de magnetostricção negativa, ao contrário do ferro. Seu comportamento quando submetido a tensões de tração e de compressão é, portanto, contrário ao do ferro. Este efeito pode, entretanto, ser pequeno devido ao baixo teor de

níquel. Os outros materiais presentes, como o molibdênio, o manganês, o cromo e o carbono, os três primeiros em teores bem mais elevados que para os outros materiais estudados, favorecem a formação de precipitados que também atuam como barreiras de energia à movimentação dos domínios.

Uma avaliação que deve ser feita é a adequação do sensor magnetoelástico para este material. O desenvolvimento de sensores deverá ser uma das etapas a serem desenvolvidas como continuação deste trabalho, envolvendo as variações das características elétricas do sensor em função do material avaliado, como indutância e impedância nas condições de teste.

4.18 Metodologia Básica para Determinação de Tensões em Estruturas

- a) Selecionar amostras do material da estrutura a ser avaliada para a preparação de vigas de isoflexão para a calibração do sistema de ensaio.
- b) Identificar nestas amostras, por meio de ensaio metalográfico, as direções paralela e perpendicular à direção de laminação do material. Esta identificação também pode ser realizada determinando-se o valor RMS do ruído magnético Barkhausen em diferentes direções, conforme o descrito no item 3.4.3 – Dependência Direcional.
- c) Usinar duas vigas de isoflexão, uma com eixo longitudinal paralelo à direção de laminação do material e a outra com o eixo longitudinal perpendicular à mesma, conforme projeto apresentado no APÊNDICE D.
- d) Após a usinagem, preparar a superfície da viga, no local de posicionamento do extensômetro e da sonda magnetoelástica, utilizando uma ferramenta de alta rotação. A superfície deve ser lixada até lixa 320.
- e) Realizar um tratamento térmico nas vigas, após a preparação das superfícies, de forma a eliminar a presença de tensões residuais nas mesmas. O tratamento deverá ser realizado em forno a vácuo, de forma a evitar a necessidade de lixamento posterior da superfície para a retirada de camadas de óxido. Os parâmetros de tratamento térmico devem ser determinados a partir de literatura disponível ou informações do fabricante do aço avaliado.

- f) Instrumentar as vigas com extensômetros simples ou rosetas de três elementos, segundo as técnicas de extensometria convencional.
- g) Determinar o nível de excitação da sonda magnetoelástica a ser utilizado, para cada par frequência de excitação/frequência de análise, de acordo com o procedimento descrito em 3.4.3 – Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica e com a utilização da EQ. 4.3, antes de sua montagem no dispositivo de carregamento descrito no item 3.3.2 – Dispositivo de Carregamento.
- h) Medir o valor do ruído magnético Barkhausen, na direção paralela ao eixo das vigas, para cada par frequência de excitação/frequência de análise utilizado, sem carregamento e antes da montagem das vigas no dispositivo de carregamento. O procedimento para realização das medidas deve ser o mesmo utilizado para as vigas após a sua montagem no dispositivo de carregamento, descrito no item 3.6 – Calibração do Sistema de Ensaio. Os valores obtidos serão utilizados como referência (deformação 0) para a elaboração das curvas Valor RMS do ruído magnético Barkhausen x Deformação no Material.
- i) Montar as vigas instrumentadas no dispositivo de carregamento.
- j) Aplicar carregamentos na extremidade das vigas, de forma a gerar tensões em suas superfícies de cerca de 10% do limite de escoamento do material e adquirir os dados referentes às deformações medidas pelos extensômetros/rosetas e o ruído magnético Barkhausen, para cada par frequência de excitação/frequência de análise, conforme procedimento descrito no item 3.6 – Calibração do Sistema de Ensaio.
- k) Obter as curvas Deformação x Valor RMS do ruído magnético Barkhausen, e avaliar a precisão obtida com o número de repetições das medições utilizados.
- l) Obter as funções de ajuste para cada par frequência de excitação/frequência de análise utilizado, de acordo com o procedimento descrito no item 4.13.
- m) Preparar a superfície do componente a ser avaliado, utilizando-se o mesmo procedimento adotado para a preparação da superfície das vigas.

- n) Identificar as direções de laminação e perpendicular à mesma determinando-se o valor RMS do ruído magnético Barkhausen em diferentes direções, conforme o descrito no item 3.4.3 – Dependência Direcional ou, caso seja necessário, por meio de ensaio metalográfico (réplica metalográfica para trabalhos de campo).
- o) Realizar a aquisição do ruído magnético Barkhausen nestas duas direções, para cada par frequência de excitação/frequência de análise utilizado.
- p) Determinar as deformações resultantes através da EQ. 4.4.
- q) Determinar o valor das tensões atuantes através da EQ. 2.22 ou EQ. 2.23 e EQ. 2.24.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

- a) Os ensaios realizados sob condições de carregamento uniaxial apresentaram resultados compatíveis com os obtidos por outros pesquisadores. Entretanto verificou-se, para todos os materiais estudados, a ocorrência de uma saturação no valor RMS do ruído gerado no material para baixos valores de tensões de compressão, em torno de 25% do limite de escoamento. Este efeito foi bem acentuado ao se utilizar a frequência de excitação de 10 Hz. Ao se utilizar a frequência de excitação de 100 Hz, a saturação na região de compressão passou a ocorrer a níveis mais altos de tensões de compressão e, ao se utilizar frequências de análise mais altas, ou seja, ao se restringir as informações às regiões mais superficiais dos materiais este valor aumentou. Isto indica que para a medição de tensões em materiais ferromagnéticos, maiores frequências de excitação e frequências de análise que limitem o registro do ruído às regiões superficiais são mais indicados. Embora o sistema atualmente disponível não tenha flexibilidade para a utilização de diversas frequências de excitação e de análise do ruído gerado, estes são dois fatores que devem ser considerados e pesquisados ao se desenvolver um procedimento para a avaliação de um determinado material. Na região de tração, a saturação ocorreu em níveis mais elevados de tensões, de cerca de 50% do limite de escoamento dos materiais. Estes resultados restringem os limites de aplicação deste método de teste, com os parâmetros utilizados, a tensões de compressão de até 25% do valor do limite de escoamento e de tensões de tração de até cerca de 50% do limite de escoamento, nos materiais avaliados.
- b) O dispositivo de carregamento com vigas de isoflexão, utilizado para avaliar a resposta dos materiais estudados em função do estado de tensões atuante, possibilitou a realização dos experimentos de forma simples e eficaz. Os resultados obtidos para as curvas de deformação x valor RMS do ruído magnético Barkhausen gerado apresentaram as mesmas características encontradas nas referências, ou seja, todas elas apresentaram uma região aproximadamente linear e, para valores mais elevados das tensões de tração e de compressão uma região de saturação. As principais vantagens apresentadas pelo sistema desenvolvido são a possibilidade da

realização de experimentos sem a necessidade de uma máquina de ensaios universal que, devido às suas características, pode inclusive provocar a introdução de ruídos indesejáveis no sistema de testes; o pequeno espaço ocupado pela instalação e, principalmente, a maior precisão obtida nos testes de carregamento, devido ao formato da viga proposta para os testes. Não foi encontrada em nenhuma referência quanto à utilização de vigas do tipo isoflexão para esta finalidade. Nos trabalhos consultados os autores se limitam a citar a utilização de vigas engastadas.

- c) Os acessórios desenvolvidos para possibilitar o posicionamento da sonda no dispositivo de carregamento para a calibração do sistema de teste e para a avaliação dos parâmetros que exercem influência nos resultados do ensaio (dependência direcional, rugosidade superficial, afastamento da sonda à superfície) apresentaram um resultado satisfatório e possibilitaram a realização das medições em condições reprodutíveis. Em particular, cita-se o dispositivo utilizado na avaliação dos efeitos da textura, que possibilitou a verificação da dependência direcional de forma controlada.
- d) Os estudos sobre a dependência direcional podem ser utilizados para a avaliação das características de anisotropia da estrutura do material, sendo um dos trabalhos a serem desenvolvidos a seguir a verificação da utilização desta dependência para substituir o parâmetro de anisotropia R na avaliação de materiais para estampagem.
- e) Os resultados obtidos para os testes de carregamento indicam a possibilidade de aplicação deste método de ensaio para testes de carregamento em estruturas com predominância de esforços normais em seus componentes, como treliças. Os valores das tensões determinados através da medição do ruído magnético Barkhausen foram próximos dos obtidos pelas rosetas utilizadas nos testes. Para refinar os resultados obtidos será necessário, entretanto, projetar estruturas mais estáveis, que possibilitem a aplicação de esforços mais elevados e, logo após, realizar medições, sob condições controladas, em estruturas reais.
- f) Um dos principais problemas para a aplicação este método de teste é a manutenção da sonda magnetoelástica em uma mesma posição em relação ao objeto de teste durante os ensaios e, caso seja retirada do local de teste e novamente posicionada ali, produzir um mínimo de erro referente a este posicionamento. Uma das

observações realizadas durante os ensaios foi que a forma geométrica das extremidades do núcleo ferromagnético (forma plana) dificultava o seu posicionamento de forma repetitiva, efeito que foi reduzido com a utilização dos dispositivos de posicionamento utilizados. Uma sugestão, feita a partir deste trabalho, é a utilização de núcleos com forma arredondada, de forma a reduzir a área de contato com a superfície e facilitar o posicionamento.

- g) Os ensaios de tensões residuais realizados com o ensaio magnetoelástico indicaram a presença de tensões de compressão nos materiais de teste. Os ensaios realizados com o método do furo central também indicaram a presença de tensões de compressão. Entretanto, os ensaios por este método demonstraram a existência de campos não uniformes de tensões residuais, onde as tensões máxima e mínima para cada profundidade variaram em valor, orientação e sinal. Estas variações tornaram difíceis as comparações entre os dois métodos de teste, pois o ruído magnético Barkhausen sofre a influência do que ocorre no material a profundidades diferentes, sendo o ruído detectado afetado pelos efeitos que ocorrem da profundidade em que são medidos até a superfície do material. Para uma melhor compreensão destes efeitos será necessária a obtenção de corpos de prova que apresentem ou simulem campos de tensões residuais uniformes, para que as comparações pretendidas neste trabalho possam ser realizadas.

5.2 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, a partir dos resultados obtidos neste trabalho, tem-se:

- a) Desenvolver corpos de prova que apresentem campos de tensões residuais uniformes, de forma a permitir o estabelecimento de uma correlação consistente entre os resultados obtidos através do ensaio magnetoelástico e pelo método do furo central ou difração de raios-X, por exemplo. Um ponto de partida seria a obtenção de corpos de prova com geometria a ser definida, submetidos a tratamentos térmicos para alívio de tensões. Estes corpos de prova devem apresentar uma geometria tal que possibilite, a partir da aplicação de carregamentos externos, a simulação de tensões residuais. A partir dos resultados obtidos os estudos devem evoluir para componentes ou estruturais reais.

- b) Avaliar a aplicabilidade deste método de ensaio para a avaliação das características de anisotropia de aços utilizados em processos de estampagem, com aplicações na indústria automobilística, por exemplo, como alternativa ao parâmetro de anisotropia r .
- c) Transferir os conhecimentos e técnicas adquiridos neste trabalho para a avaliação de estruturas submetidas a carregamentos normais.
- d) Desenvolver um sistema de carregamento em direções ortogonais que apresente estabilidade suficiente para a aplicação de carregamentos de tração e compressão de forma estável.
- e) Estudar as principais características dos sensores utilizados neste método de teste. Verificar a influência que a composição química, tratamento térmico, processamento mecânico, acabamento superficial e propriedades mecânicas exercem nas características elétricas do sensor e no comportamento do conjunto sensor/equipamento de testes.
- f) Verificar as diferenças obtidas nos parâmetros e nos resultados de testes realizados com materiais com a mesma especificação mas provenientes de corridas e lotes diferentes.
- g) Iniciar um processo que possibilite a realização de experimentos planejados, em diferentes instituições, que possibilitem a intercomparação de resultados, de forma a aumentar o conhecimento disponível sobre este método de ensaio.

A.2 Certificado com as Propriedades Mecânicas dos Aços ASTM A 36, ASTM A 515 e USI SAC 50.



CTC - Comissão de Controle Técnico
 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
 CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTECN

RELATÓRIO TÉCNICO

NÚMERO: 812/0182005
 OBJETO: TENTE DE TRACÇÃO PARA AVALIAR PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
 UM TIPO DE AÇO EM UM APLICATIVO DE ENGENHARIA
 CLIENTE: Engenharia de Materiais - UFRJ - Rua Marquês de São Carlos,
 22258-900
 DATA: 24/04/2005
 REFERÊNCIA:

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
COTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

2

OBJETIVO:

Teste de tração para avaliar propriedades mecânicas de aço, ASTM A515, ASTM A50 e USF S-4C

METODOLOGIA:**NORMA:**

ASTM E 8

MATERIAL RECEBIDO:

ASTM A515, ASTM A50 e USF S-4C

QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA:

25

TEMPERATURA DO ENSAIO:

ambiente

EQUIPAMENTO:

Máquina ETD-40

CAPACIDADE DA MÁQUINA:

700 kN

VELOCIDADE DA MÁQUINA:

0,1 mm/min

VELOCIDADE DO PAPER:

1 mm/min

FUNDO DE ESCALA:

0,01 N

APÊNDICE B – Parâmetros Utilizados na Preparação das Amostras Metalográficas

B.1 Parâmetros utilizados no lixamento/desbaste

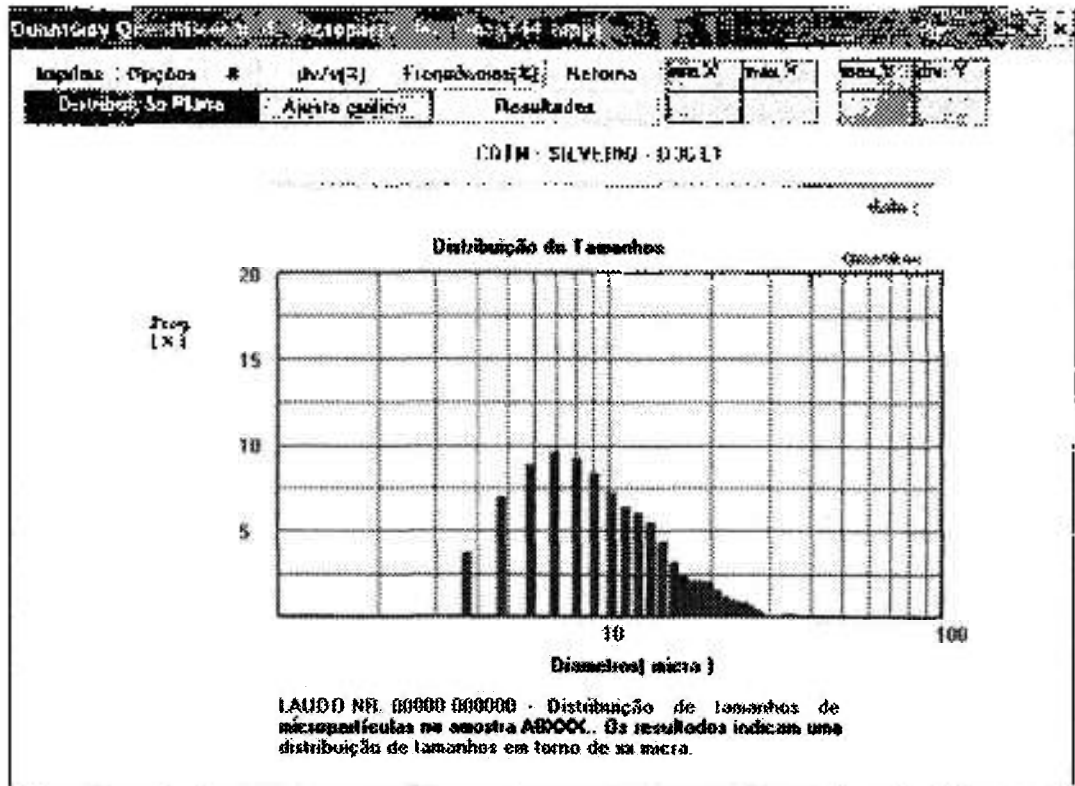
Parâmetros	Material	Lixas								
		80	120	180	220	320	400	600	1200	2000
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 36	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	D	3	3	3	3	3	3	3	6	3
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 36	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	E	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 36	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	F	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 515	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	D	6	6	3	3	3	3	3	3	6
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 515	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	E	6	6	6	3	3	3	3	3	6
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 515	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	F	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Carga (kgf)	USI	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	SAC 50	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	D	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Carga (kgf)	USI	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	SAC 50	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	E	6	6	3	3	3	3	3	3	6
Carga (kgf)	USI	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	SAC 50	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	F	6		3	3	3	3	3	6	6
Carga (kgf)		2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	20MnMoNi55	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	D	6	6	6	3	3	3	3	3	3
Carga (kgf)		2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	20MnMoNi55	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	E	6	6	6	3	3	3	3	3	3
Carga (kgf)		2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Rotação (rpm)	20MnMoNi55	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Tempo (min)	F	6	6	6	3	3	3	3	3	3

B.2 Parâmetros utilizados no polimento

Parâmetros	Material	Pasta de Diamante	
		3 μm	0,25 μm
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 36	300	300
Tempo (min)	D	6	6
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 36	300	300
Tempo (min)	E	6	6
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 36	300	300
Tempo (min)	F	6	6
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 515	300	300
Tempo (min)	D	6	6
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 515	300	300
Tempo (min)	E	6	6
Carga (kgf)	ASTM	2,50	2,50
Rotação (rpm)	A 515	300	300
Tempo (min)	F	6	6
Carga (kgf)	USI	2,50	2,50
Rotação (rpm)	SAC 50	300	300
Tempo (min)	D	6	6
Carga (kgf)	USI	2,50	2,50
Rotação (rpm)	SAC 50	300	300
Tempo (min)	E	6	6
Carga (kgf)	USI	2,50	2,50
Rotação (rpm)	SAC 50	300	300
Tempo (min)	F	6	6
Carga (kgf)	20MnMo	2,50	2,50
Rotação (rpm)	Ni55	300	300
Tempo (min)	D	6	6
Carga (kgf)	20MnMo	2,50	2,50
Rotação (rpm)	Ni55	300	300
Tempo (min)	E	6	6
Carga (kgf)	20MnMo	2,50	2,50
Rotação (rpm)	Ni55	300	300
Tempo (min)	F	6	6

APÊNDICE C – Resultados Obtidos para o Tamanho de Grão

C.1 Amostra de aço ASTM A 36 D

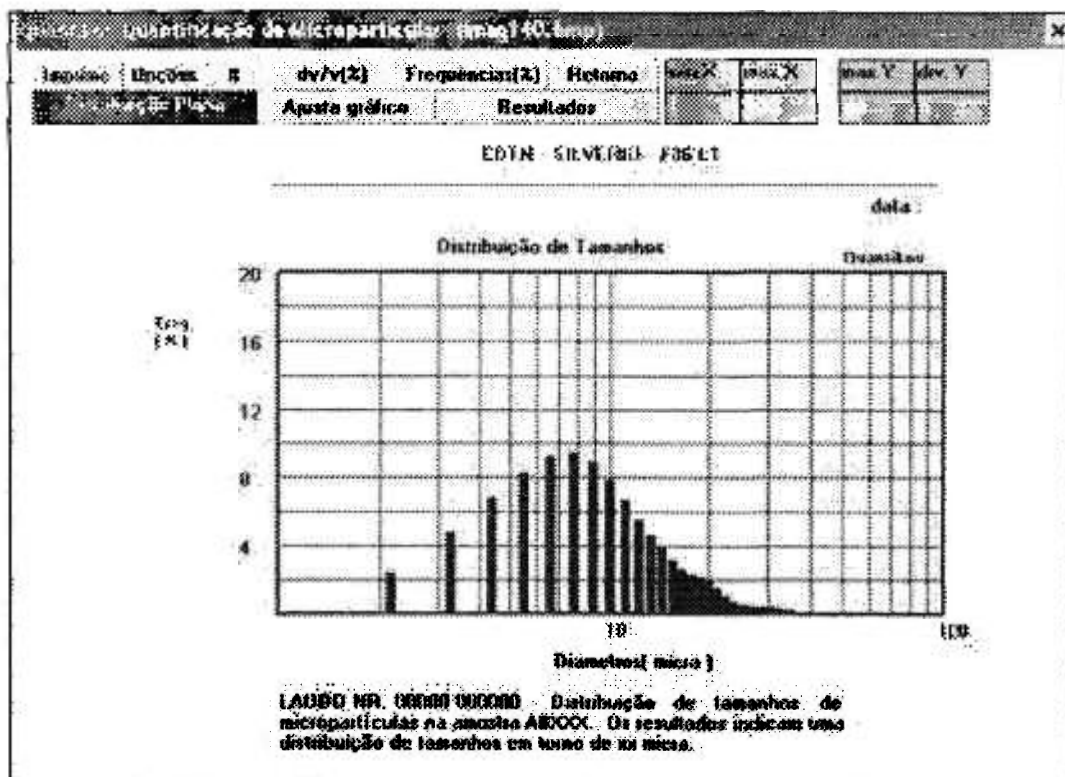


Quantikov Image Analyzer

RESULTADO DA QUANTIFICAÇÃO DE MICROPARTÍCULAS 12/11/04 - 13h52min

Medidas efetuadas	(mm)	(micra)
diâmetro medio	0,009927	9,927491
largura media	0,014367	14,366986
area media	0,000102	102,011129
maior diâmetro	0,034965	34,964513
maior largura	0,064830	64,830109
maior area	0,000960	960,164961
menor area	0,000005	5,429408
Desvio padrão		
	(mm)	(micra)
SDV da largura	0,00910	9,10116
SDV do diâmetro	0,00562	5,61695
SDV da area	0,00013	127,52369

C.2 Amostra de aço ASTM A 36 F

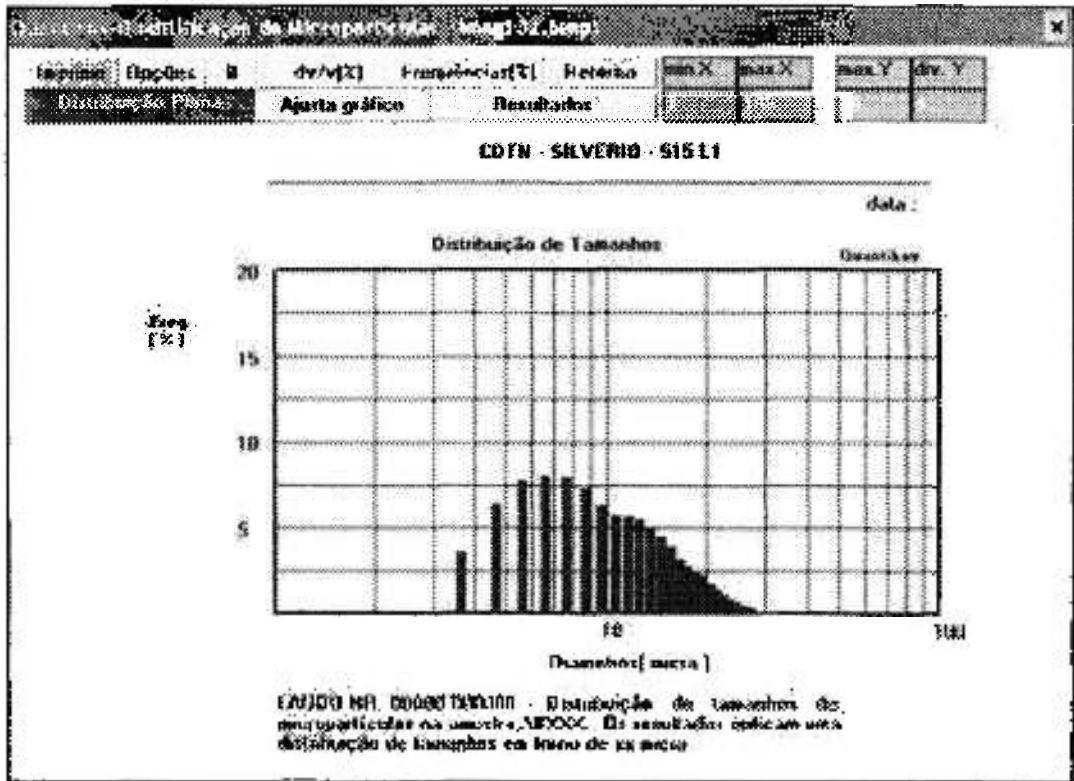


Quantikov Image Analyzer

RESULTADO DA QUANTIFICAÇÃO DE MICROPARTÍCULAS
12/11/04 - 13h41min

Medidas efetuadas	(mm)	(micra)
diametro medio	0,009753	9,752934
largura media	0,011192	11,192728
area media	0,000103	103,300455
maior diametro	0,034690	34,690407
maior largura	0,7627072	76,270723
maior area	0,000945	945,169453
menor area	0,000001	0,840266
Desvio padrão	(mm)	(micra)
SDV da largura	0,00859	8,592358
SDV do diametro	0,00605	6,05321
SDV da area	0,00014	141,67369

C.4 Amostra de aço ASTM A 515 F

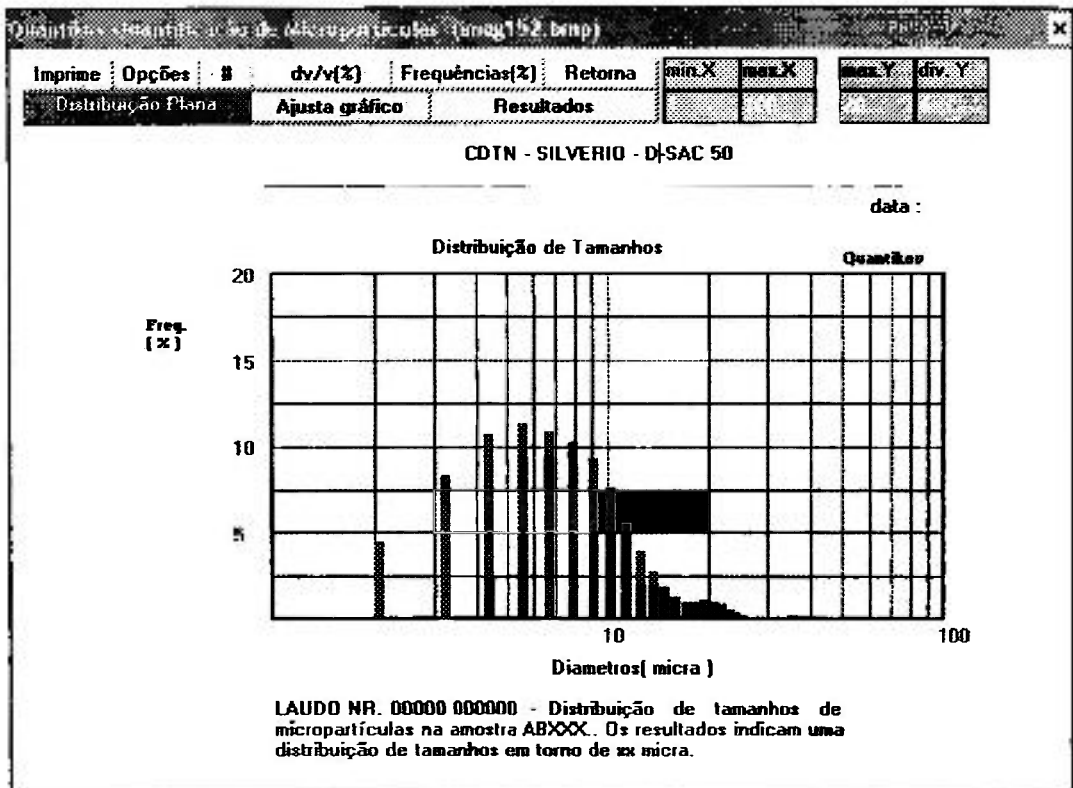


Quantikov Image Analyzer

RESULTADO DA QUANTIFICAÇÃO DE MICROPARTÍCULAS
12/11/04 - 10h15min

Medidas efetuadas	(mm)	(micra)
diametro medio	0,010099	10,099424
largura media	0,014418	14,418439
area media	0,000104	103,683839
maior diametro	0,032561	32,561144
maior largura	0,054915	54,914918
maior area	0,000833	832,703143
menor area	0,000006	5,558680
Desvio padrão	(mm)	(micra)
SDV da largura	0,00866	8,66281
SDV do diametro	0,00549	5,49230
SDV da area	0,00011	113,34168

C.5 Amostra de aço USI SAC 50 D

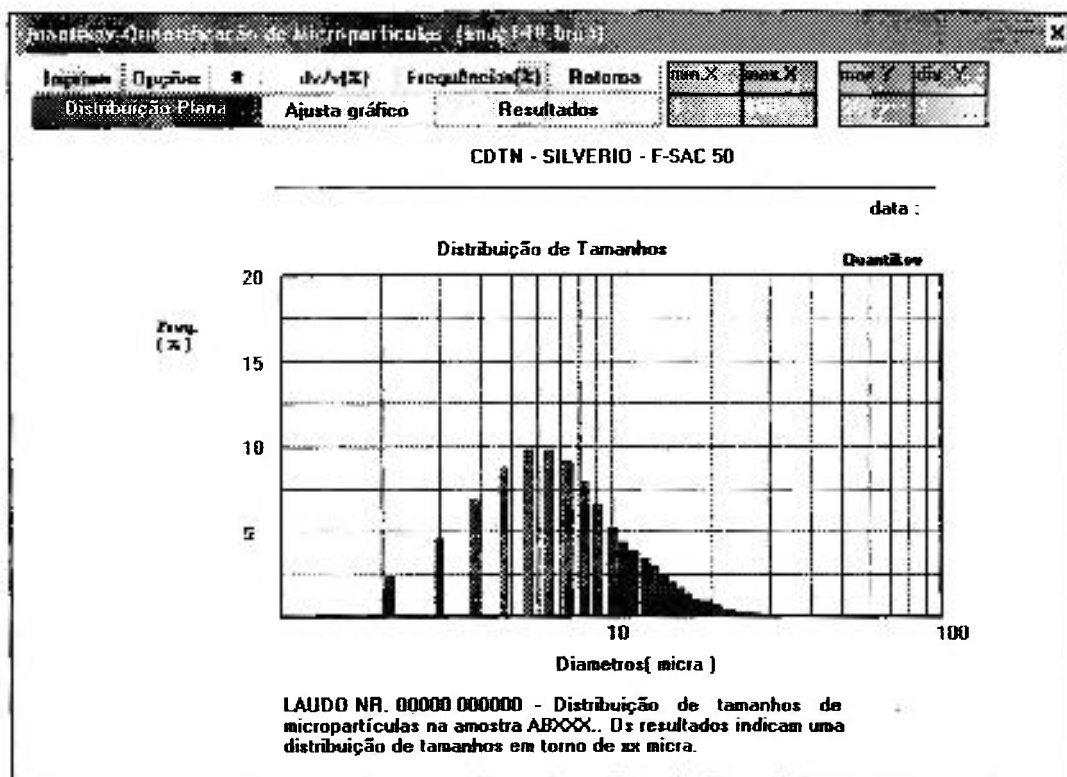


Quantikov Image Analyzer

RESULTADO DA QUANTIFICAÇÃO DE MICROPARTÍCULAS
12/11/04 - 14h14min

Medidas efetuadas	(mm)	(micra)
diametro medio	0,007201	7,200967
largura media	0,009658	9,658101
area media	0,000058	58,349796
maior diametro	0,035765	35,765028
maior largura	0,040423	40,423483
maior area	0,001005	1004,634399
menor area	0,000001	0,646358
Desvio padrão	(mm)	(micra)
SDV da largura	0,00618	6,17879
SDV do diametro	0,00475	4,75038
SDV da area	0,00010	98,22346

C.6 Amostra de aço USI SAC 50 F



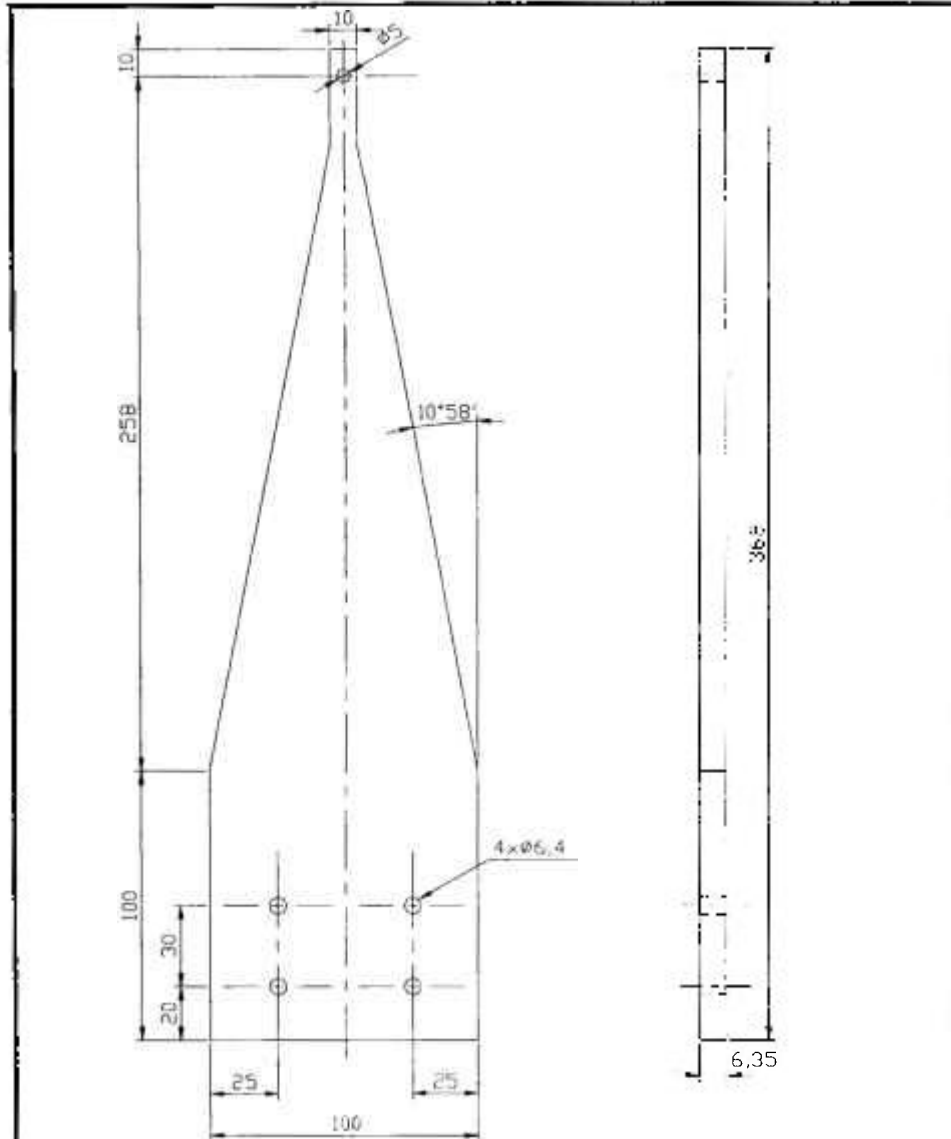
Quantikov Image Analyzer

RESULTADO DA QUANTIFICAÇÃO DE MICROPARTÍCULAS
12/11/04 - 14h01min

Medidas efetuadas	(mm)	(micra)
diametro medio	0,007991	7,991057
largura media	0,011369	11,368599
area media	0,000066	66,071248
maior diametro	0,027357	27,357010
maior largura	0,047542	47,542084
maior area	0,000588	587,798058
menor area	0,000001	1,228080
Desvio padrão	(mm)	(micra)
SDV da largura	0,00722	7,22370
SDV do diametro	0,00452	4,51502
SDV da area	0,00008	82,74427

APÊNDICE D – Viga de Isoflexão e Corpo de Prova Biaxial

D.1 Viga de Isoflexão

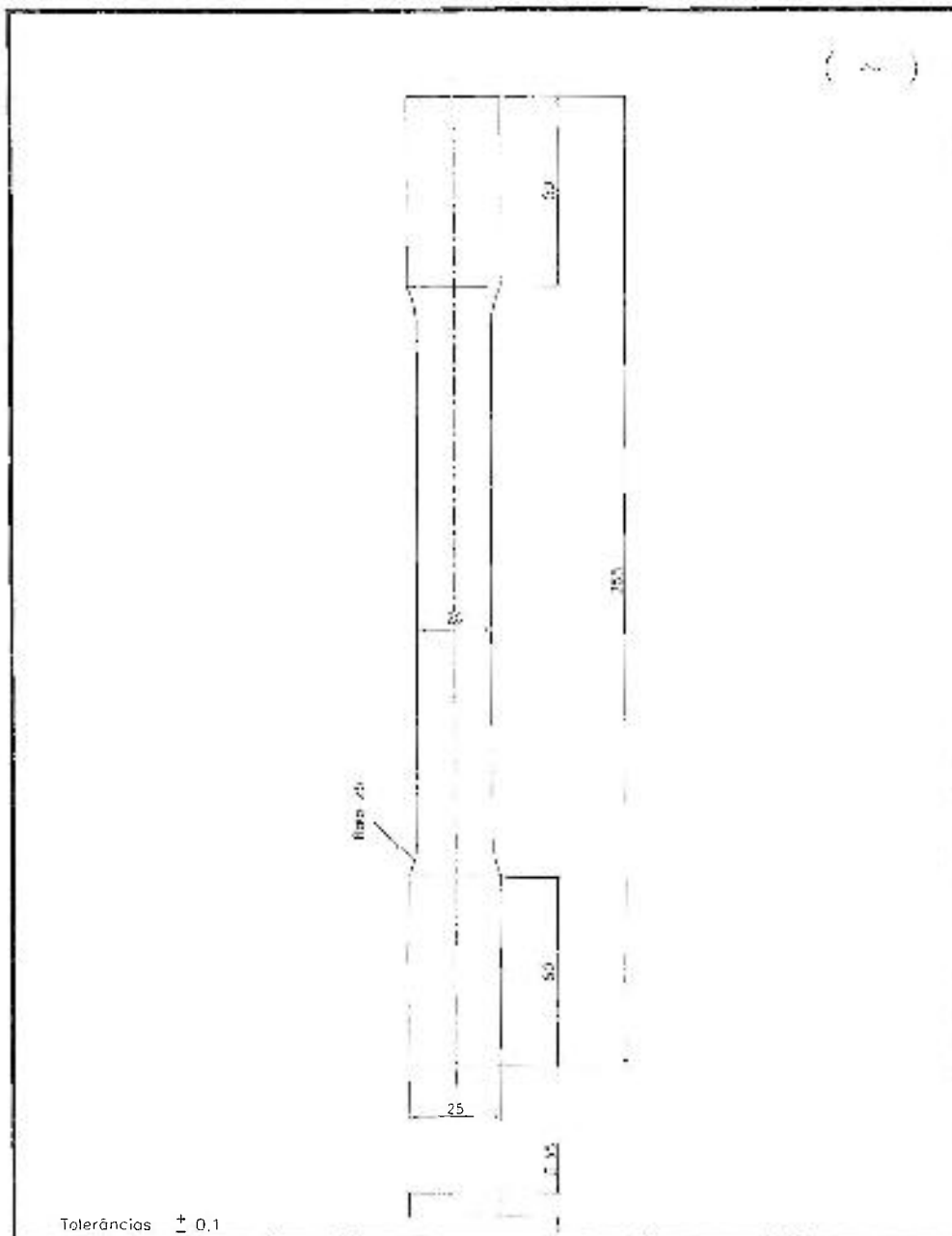


* Tolerância ± 0,1

** Deverão ser retirados dois corpos de prova da chapa fornecida, sendo um deles retirado no sentido longitudinal e o outro no sentido transversal da chapa.

QUANT.		ASTM A 36 - 1/4" x 100 x 368		*	
POSICAO		DESCRICAO		QUANT. MATERIAL/DIMENSÕES OBS.	
DES.	NOME	DATA	VISTO	VERIF.	NOME
COPIA.				ACEIT.	DATA
REVIS.				PROJ.	VISTO
ACEIT.					
ESCALA: 1:2		FORMATO:		FOLHA:	
Nº DES. END-BK-VIF 003		CLIENTE: SILVERID - AT1		TITULO:	
				CDTA - CENEN CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR SERVIÇO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL EC2 VIGA DE ISOFLEXÃO	

APÊNDICE E – Corpos de Prova para Ensaios de Deformação Elástica/Plástica



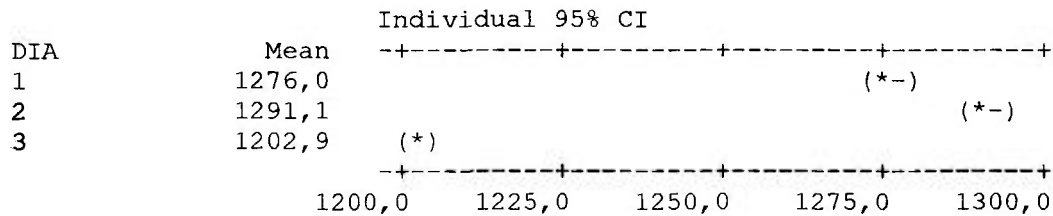
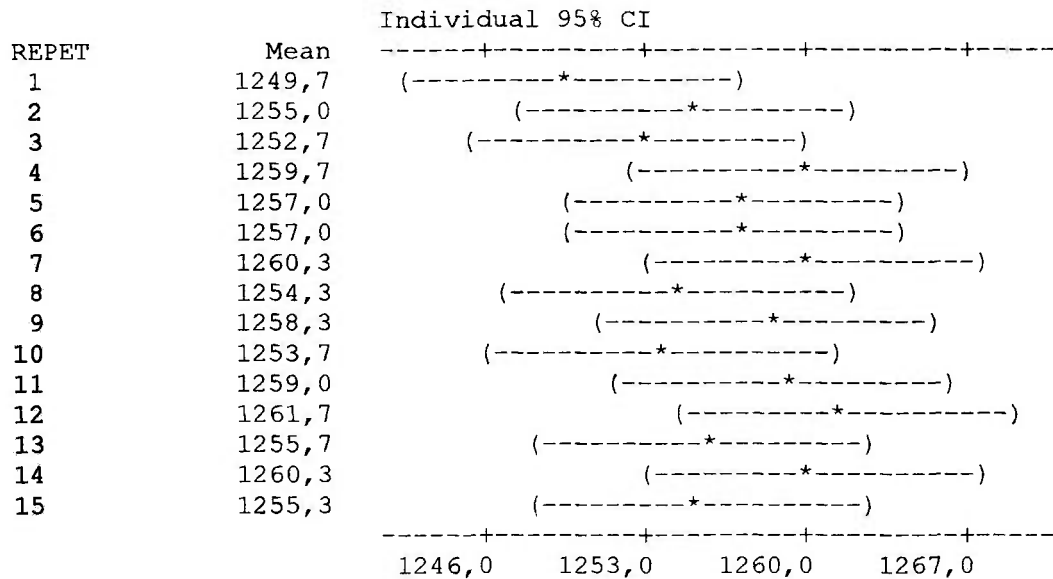
2	Corpo de Prova para Ensaio de Deformação	03	ASTM A 36	
1	Corpo de Prova para Ensaio de Deformação	03	ASTM A 515	
POSICAO	DESCRICAO	QUANT.	MATERIAL/DIMENSÕES	OBS.
DES.	NOME	DATA	VISTO	VERIF.
COPIA.				ACEIT.
REVIS.				PROJ.
ACEIT.				
ESCALA:	FORMATO:	FOLHA:		
Nº DES.		CLIENTE:		
		CDTA - CENEN CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR SUPERVISÃO DE ENSAIOS E METROLOGIA - AT1		
		TÍTULO: Corpo de Prova Ensaio de Deformação Elástica/Plástica		

APÊNDICE F – Análise da Variância - Valores do Ruído Magnético Barkhausen em Função do Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica USI SAC 50.

USI SAC 50 - Frequência de excitação 10 Hz - Frequência de Análise 500 Hz - Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica 75

Analysis of Variance for RES(50,1

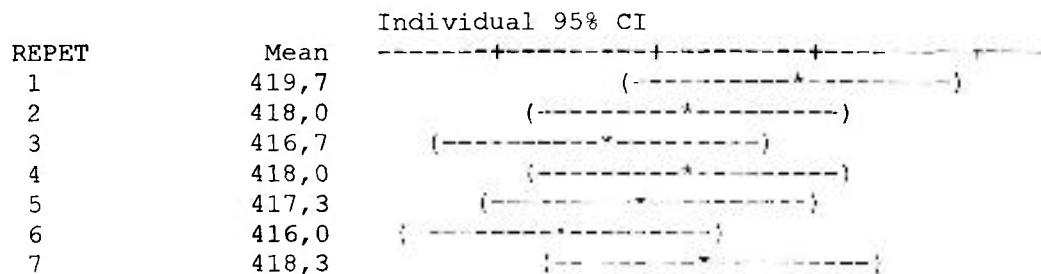
Source	DF	SS	MS	F	P
REPET	14	463,0	33,1	0,84	0,624
DIA	2	66773,6	33386,8	848,54	0,000
Error	28	1101,7	39,3		
Total	44	68338,3			

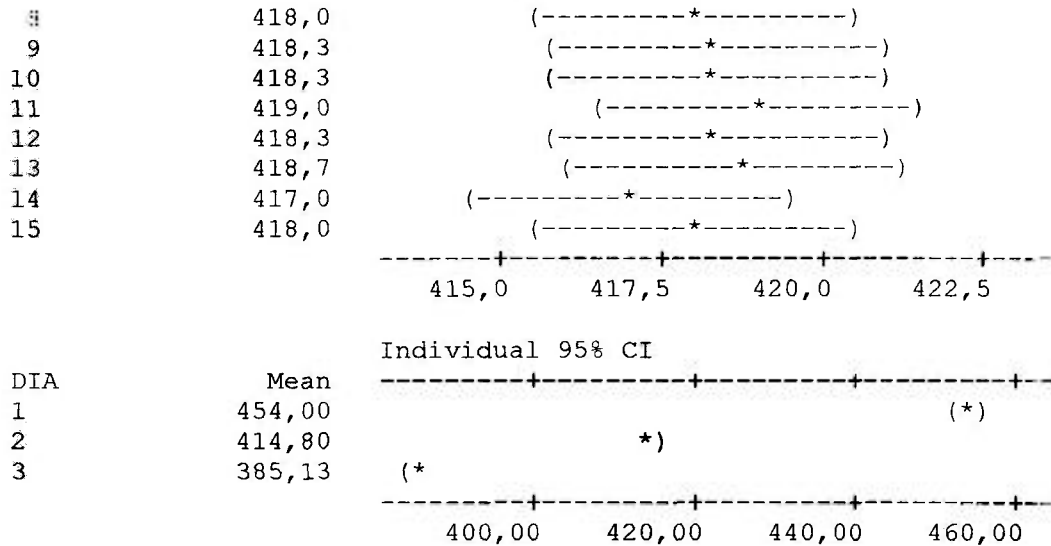


USI SAC 50 - Frequência de excitação 100 Hz - Frequência de Análise 8 kHz - Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica 90

Analysis of Variance for RES(90,1

Source	DF	SS	MS	F	P
REPET	14	35,64	2,55	0,52	0,899
DIA	2	35796,84	17898,42	3671,77	0,000
Error	28	136,49	4,87		
Total	44	35968,98			

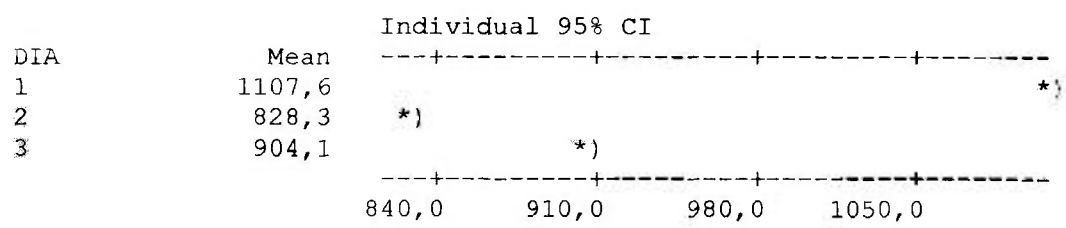
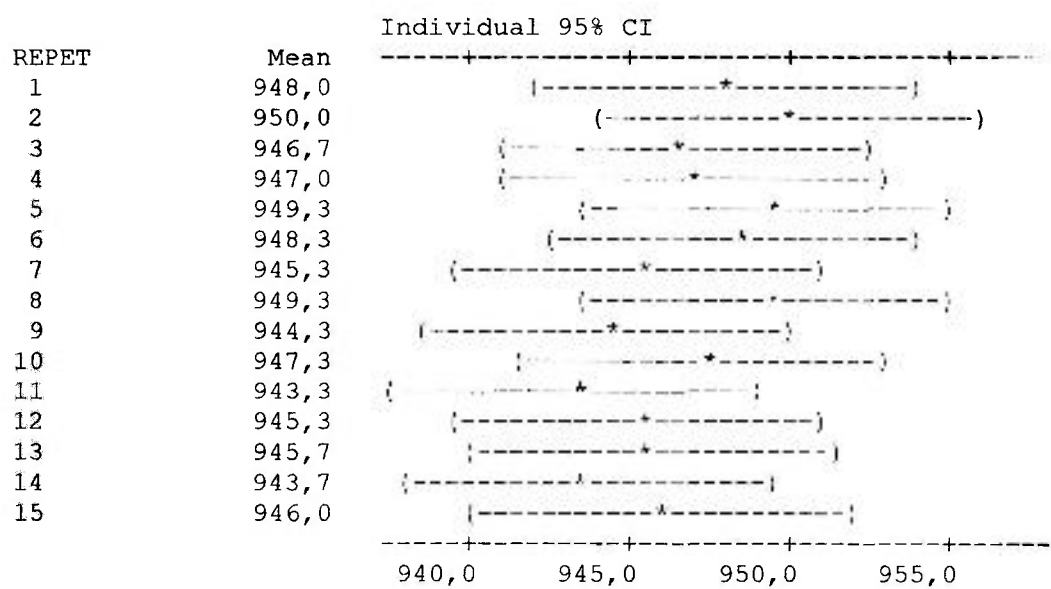




USI SAC 50 - Frequência de excitação 100 Hz - Frequência de Análise 32 kHz - Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica 195

Analysis of Variance for RES(195,

Source	DF	SS	MS	F	P
REPET	14	183,0	13,1	0,54	0,888
DIA	2	625992,8	312996,4	1,3E+04	0,000
Error	28	678,5	24,2		
Total	44	626854,3			

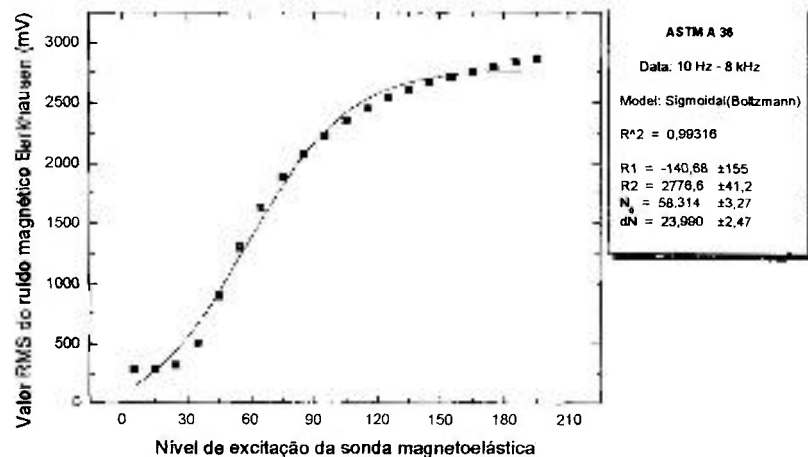
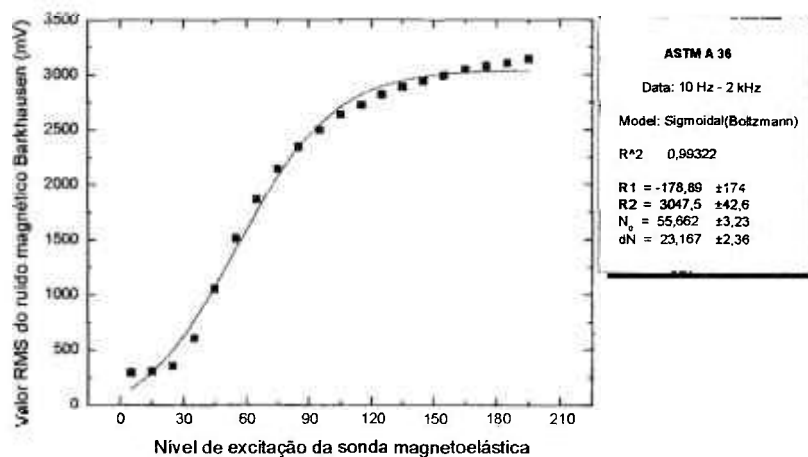
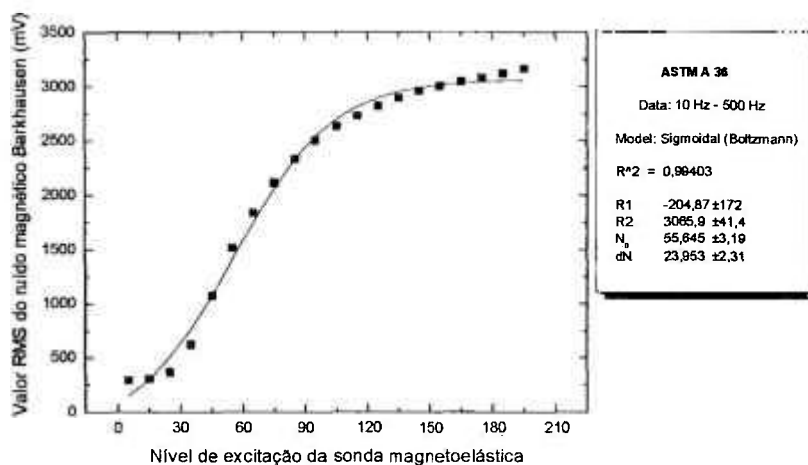


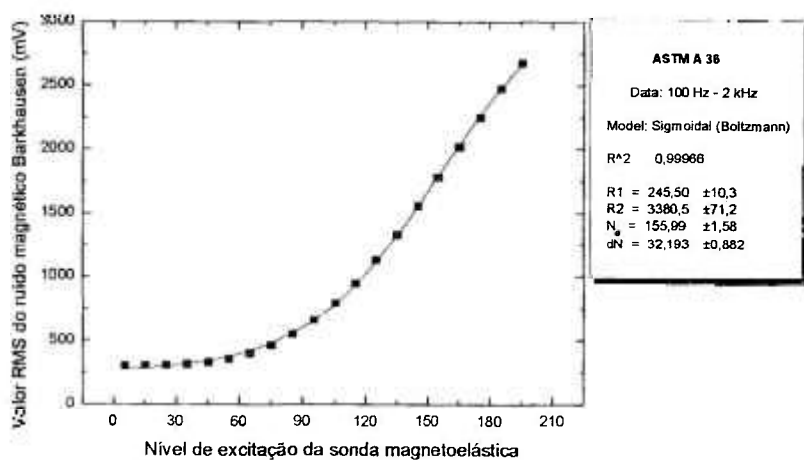
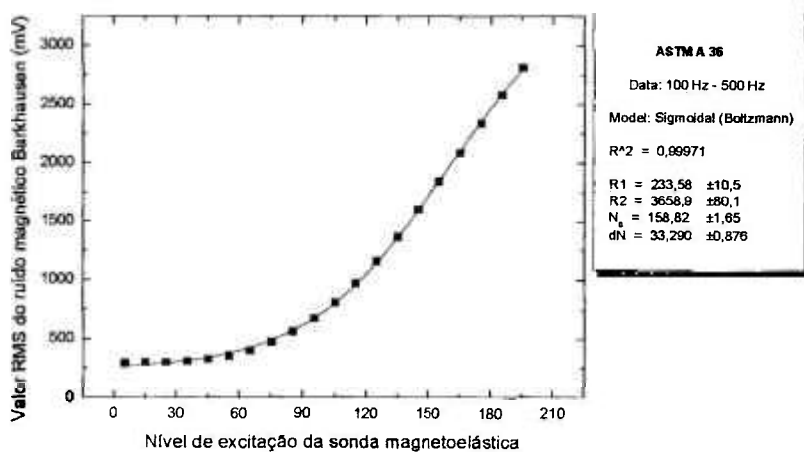
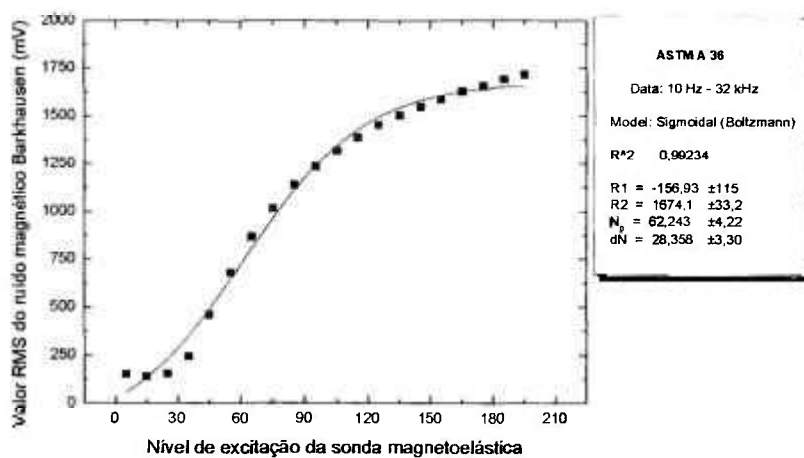
Saving file as: C:\TRABALHOS FINAIS\CAMPO MAGNÉTICO\VerInfRep.MPJ

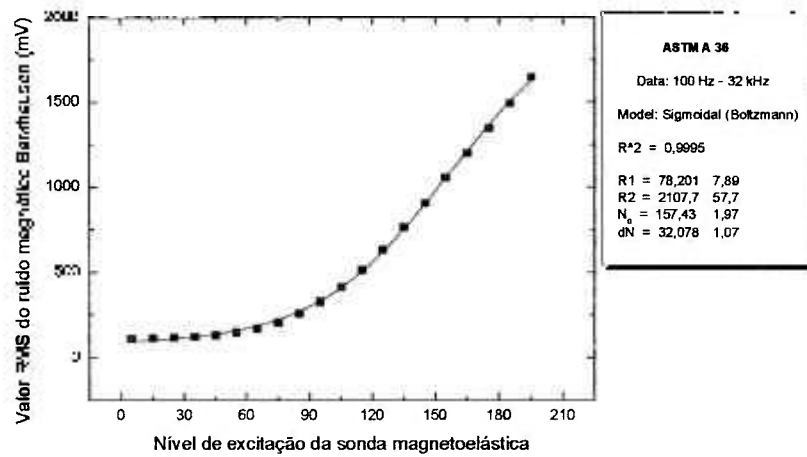
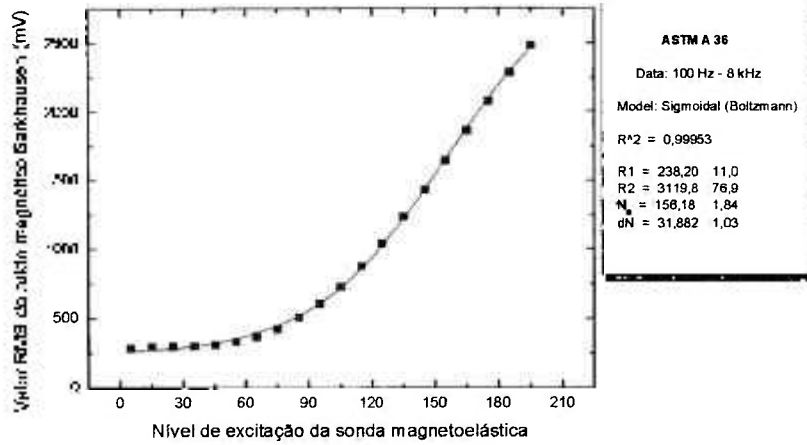
Worksheet size: 100000 cells
Retrieving project from file: C:\TRABAL~1\CAMPOM~1\VERINF~1.MPJ

APÊNDICE G – Funções de Ajuste para os Dados Adquiridos para a Determinação do Valor do Nível de Excitação da Sonda Magnetoelástica para Frequências de Excitação de 10 e 100 Hz e Frequências de Análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

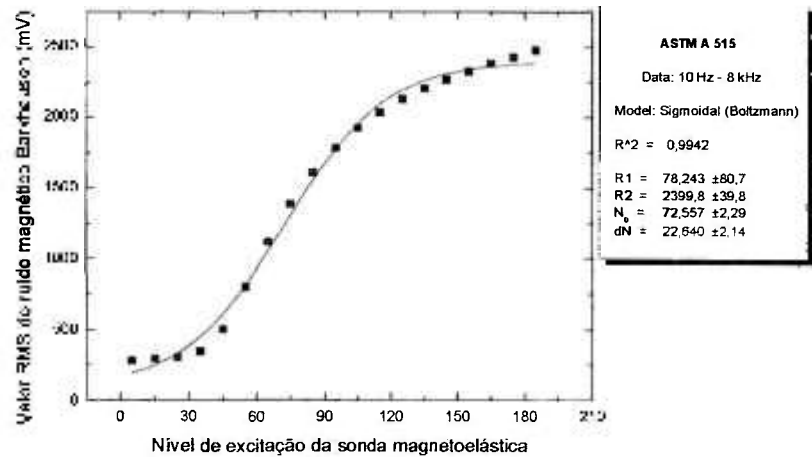
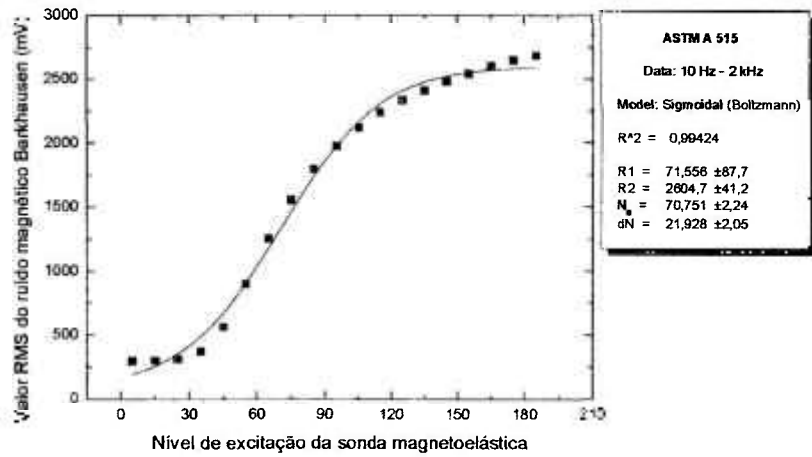
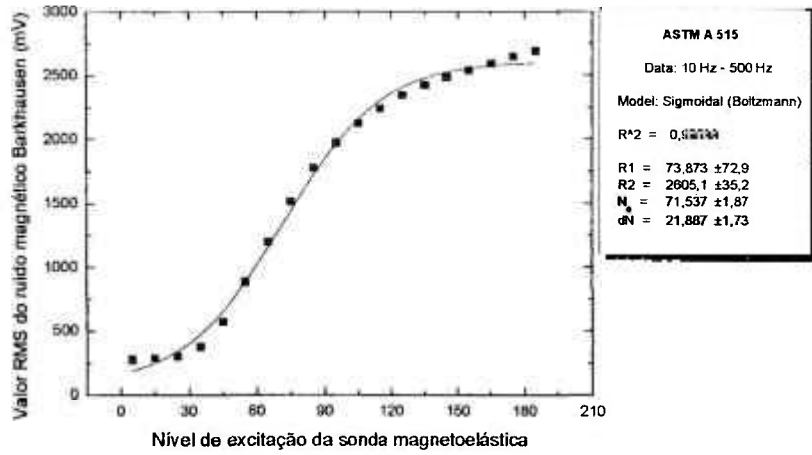
G.1 Aço ASTM A 36

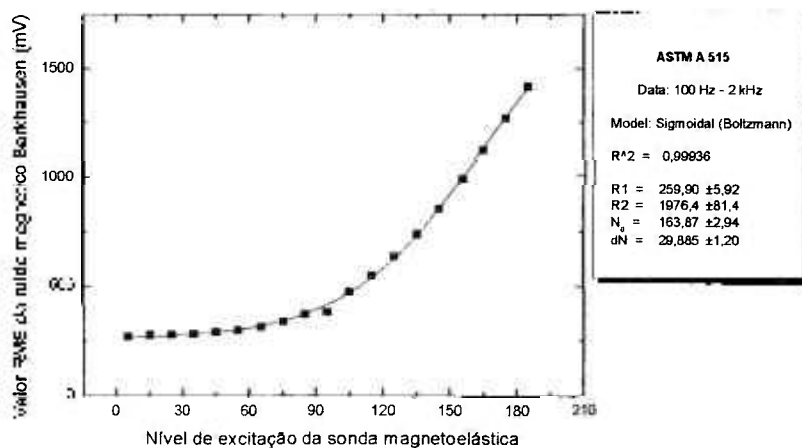
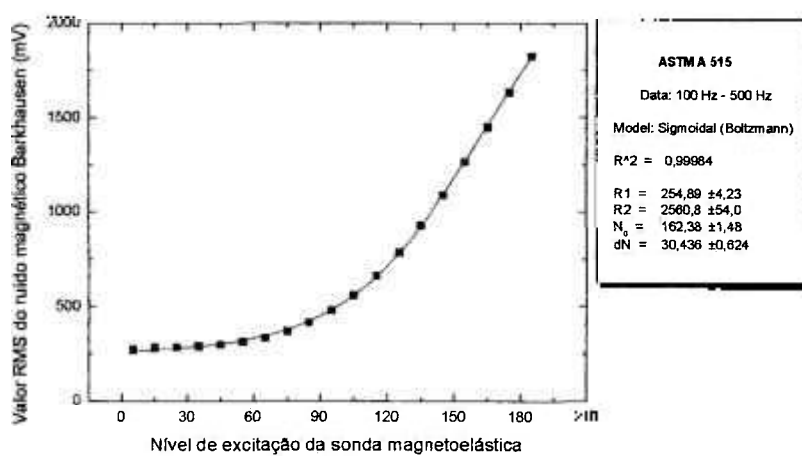
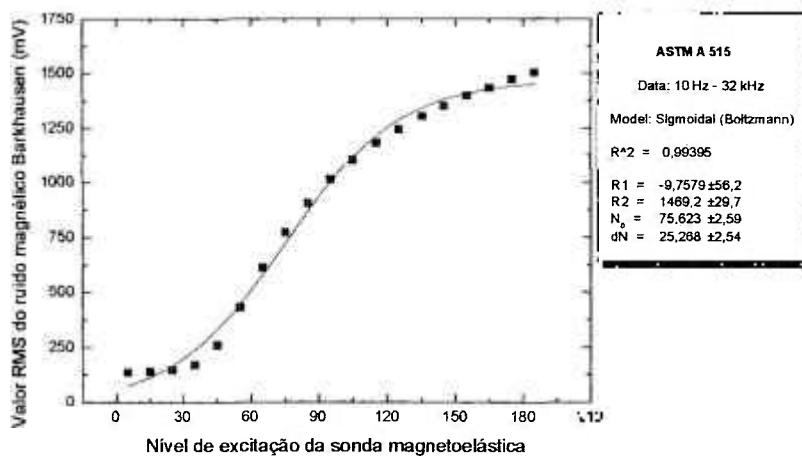


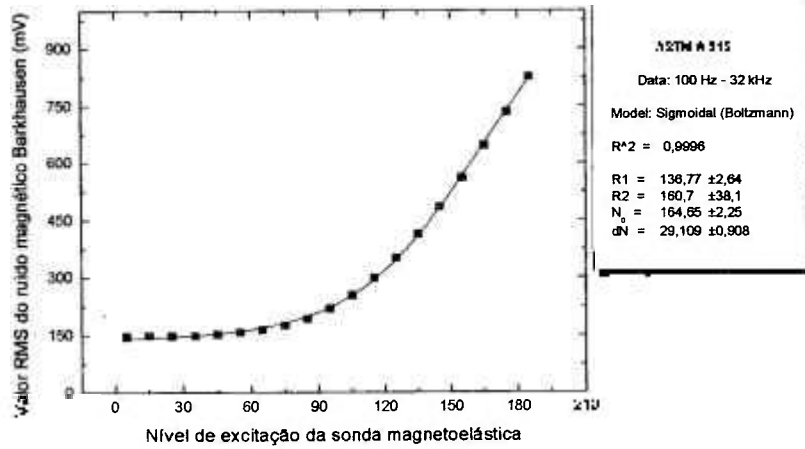
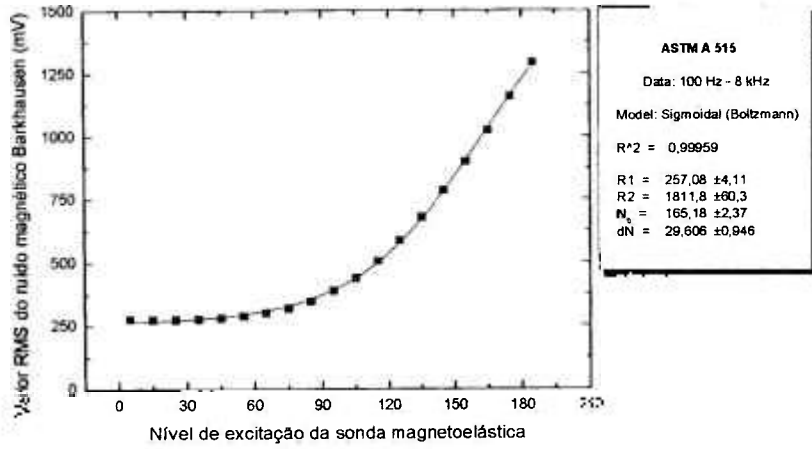




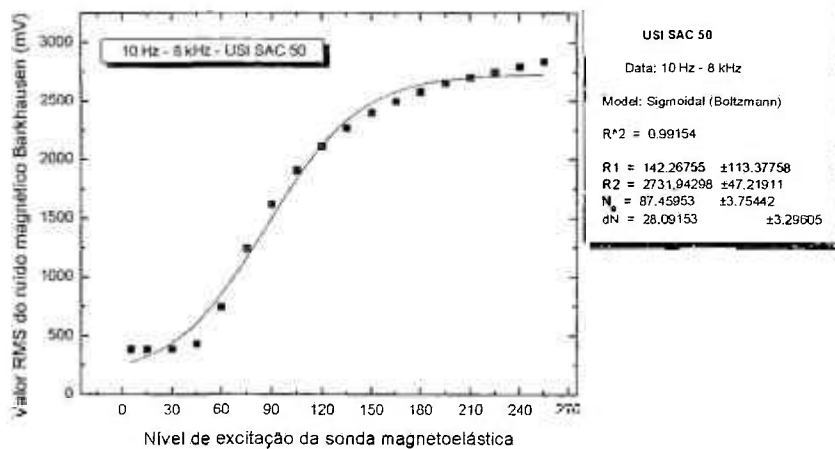
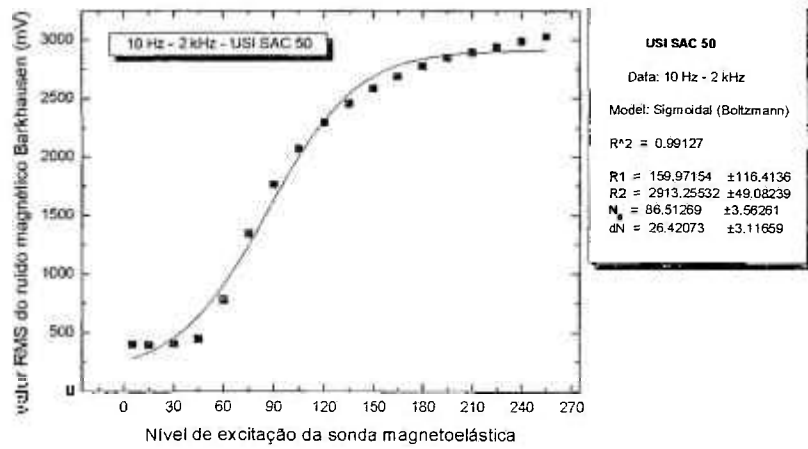
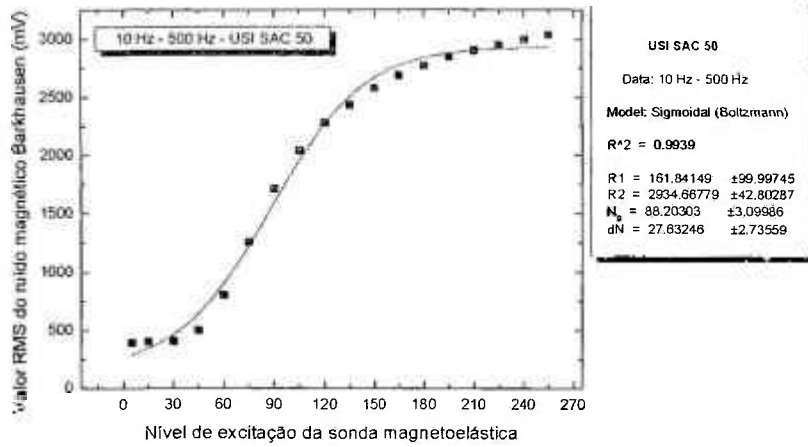
G.2 Aço ASTM A 515

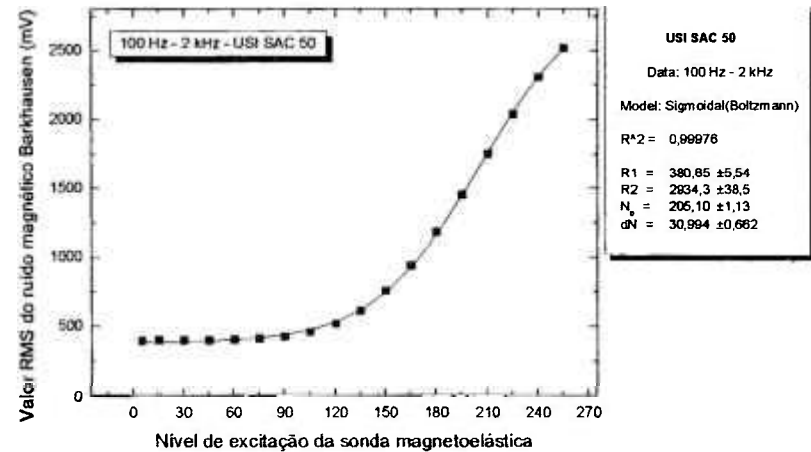
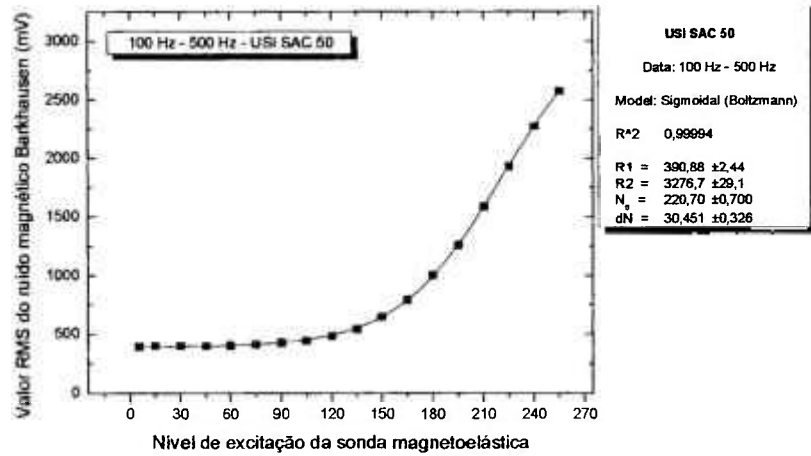
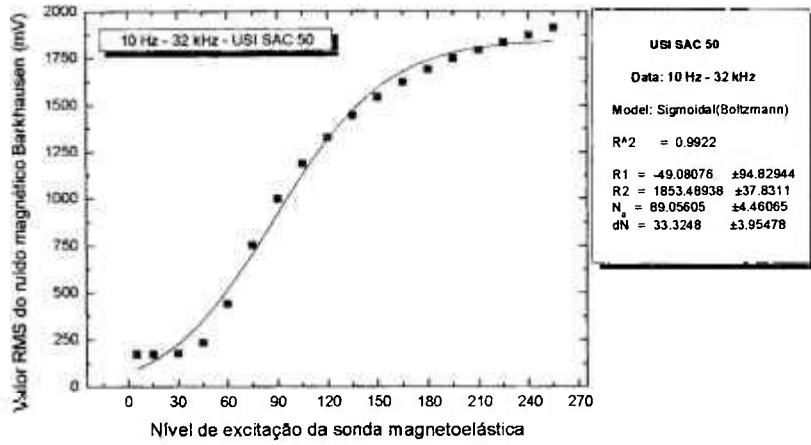


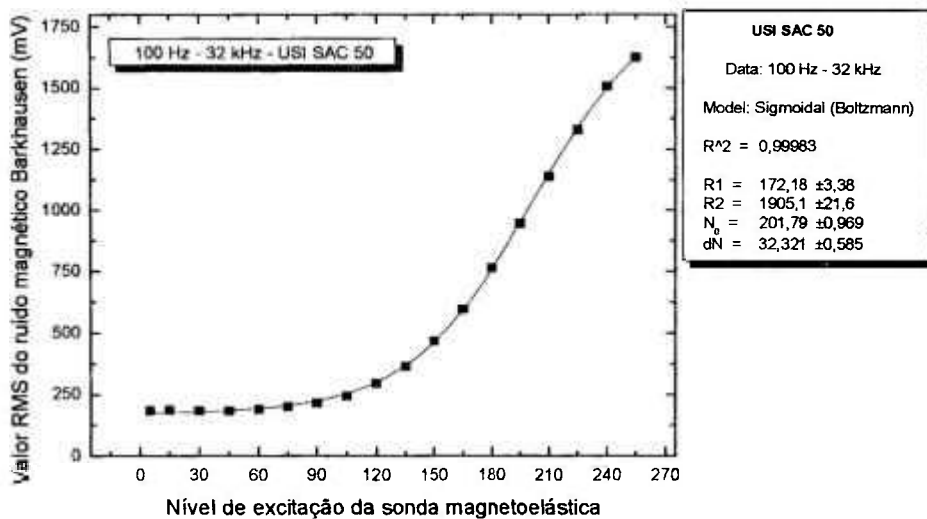
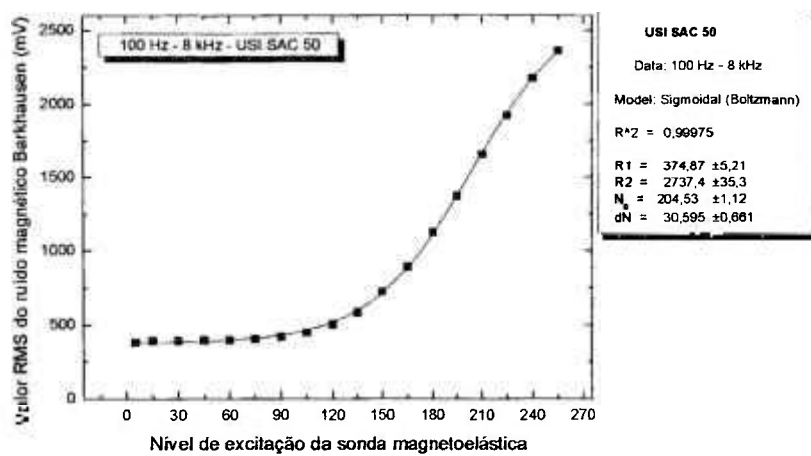




G.3 Aço USI SAC 50

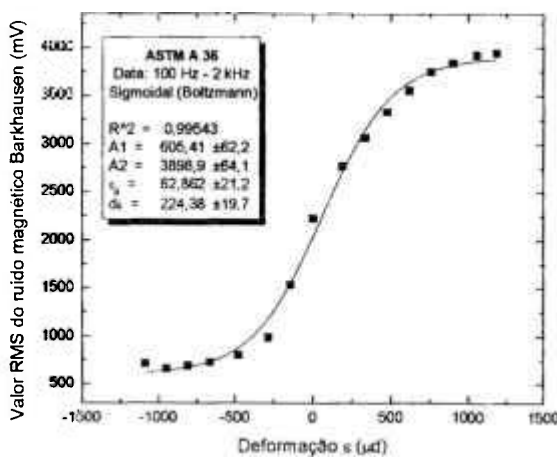
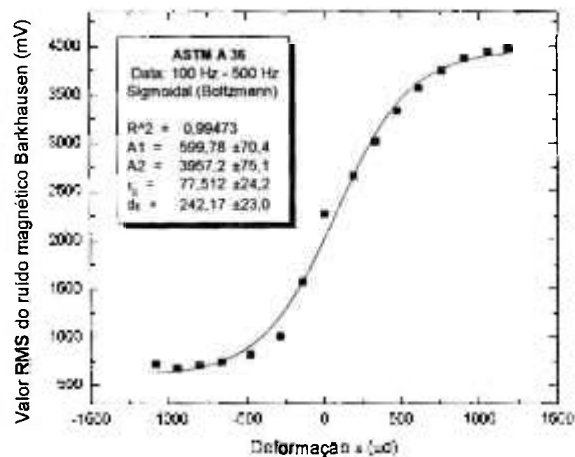
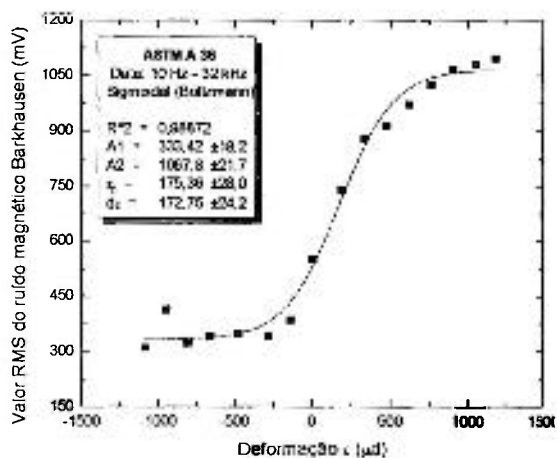
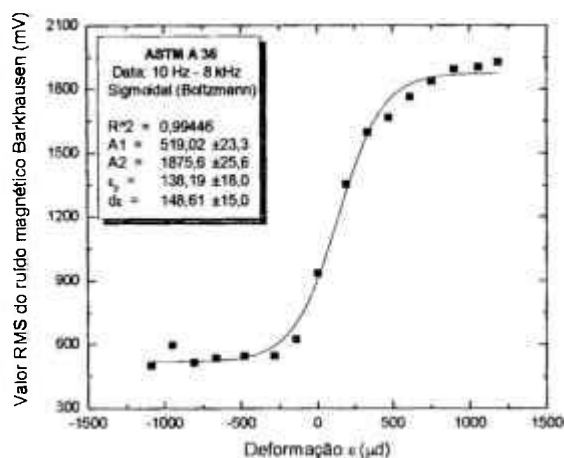
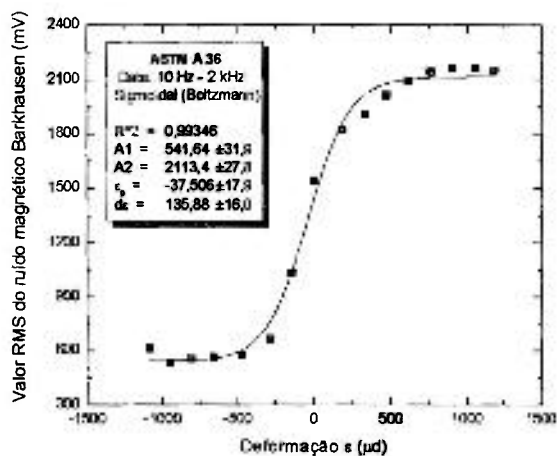
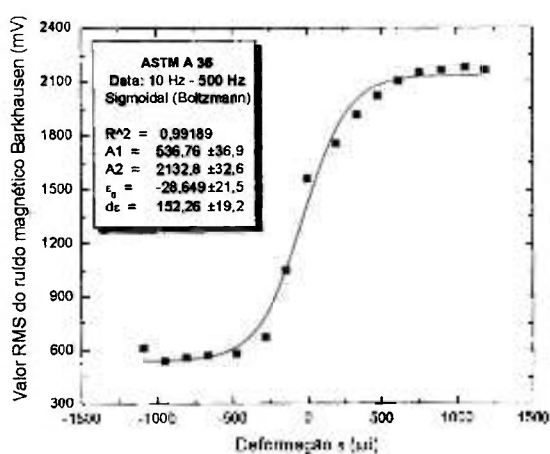


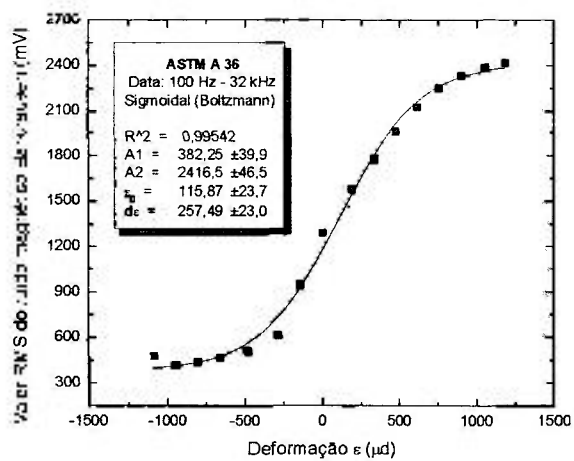
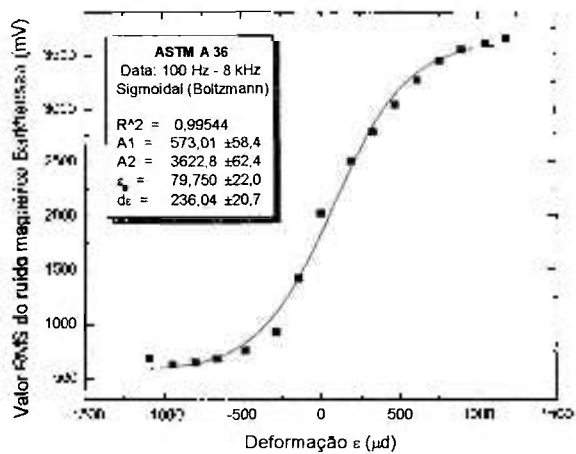




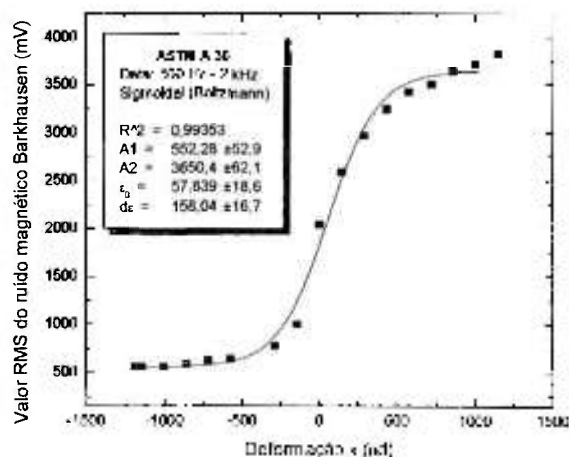
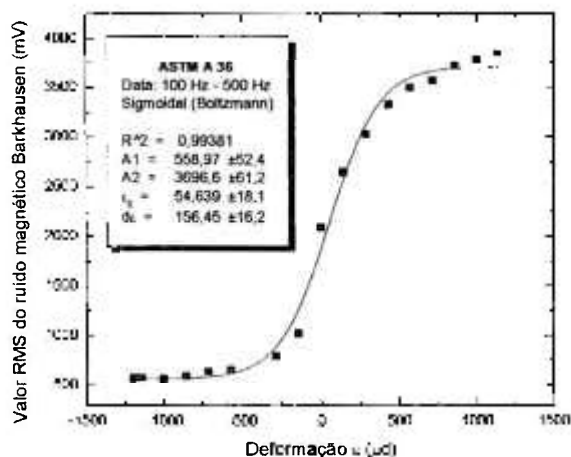
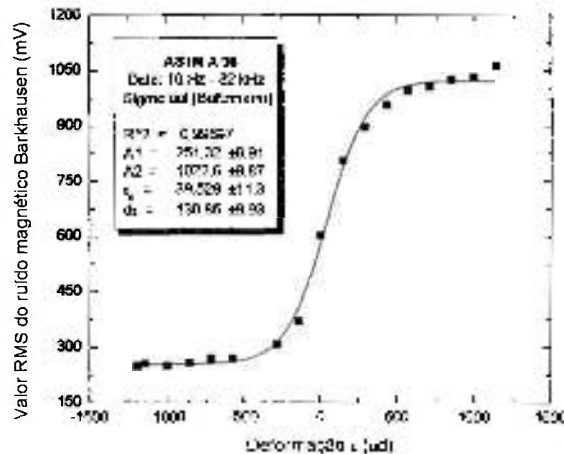
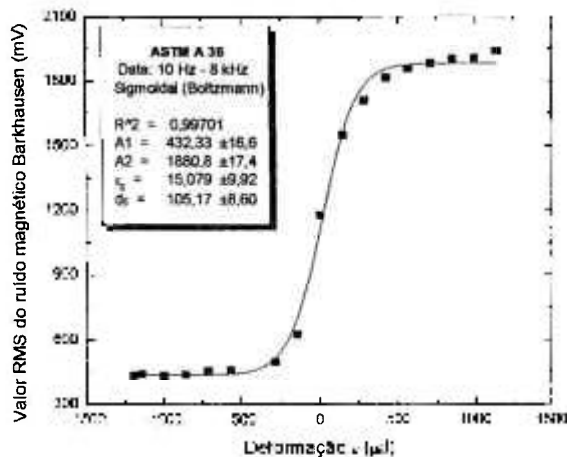
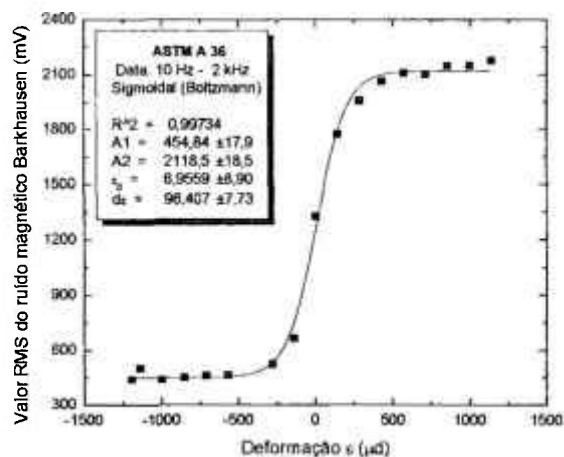
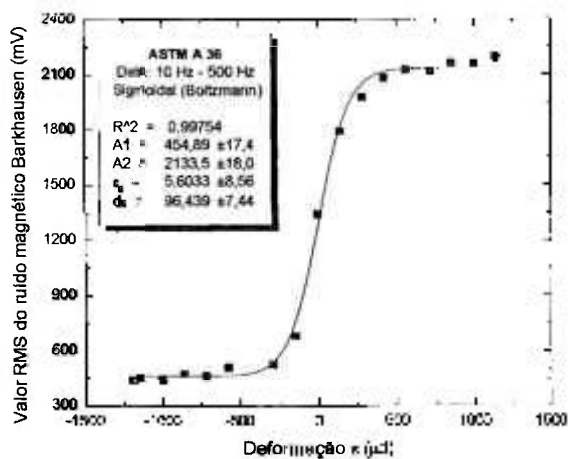
APENDICE H – Funções de Ajuste – Valor do ruído Magnético Barkhausen em Função da Deformação no Material para Freqüências de Excitação de 10 e 100 Hz e Freqüências de Análise de 500 Hz, 2 kHz, 8 kHz e 32 kHz.

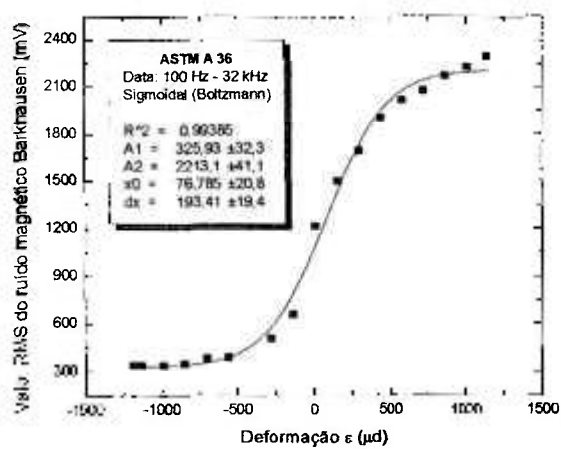
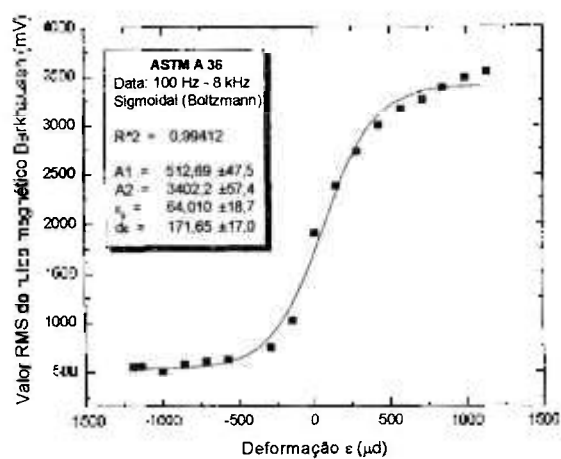
H.1 Aço ASTM A 36 – Viga com eixo longitudinal paralelo à direção de laminação.



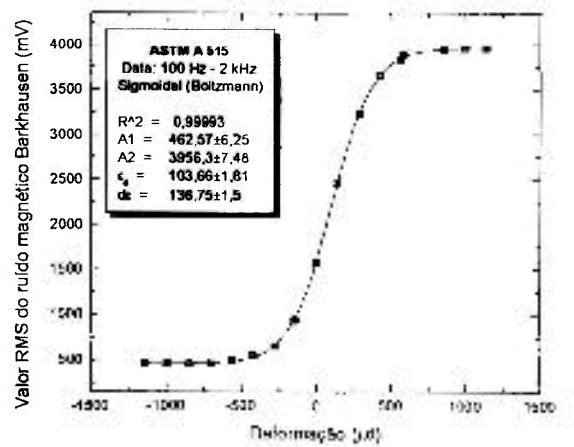
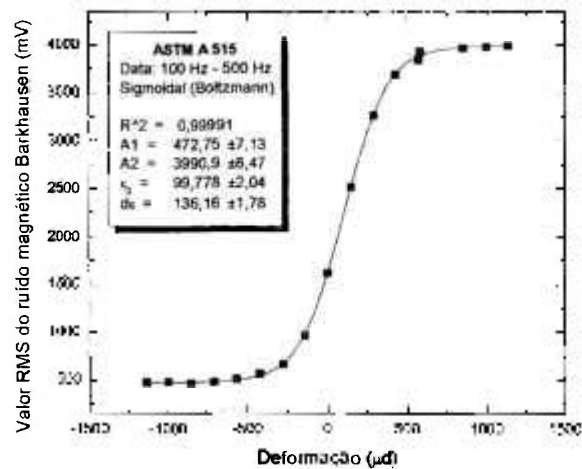
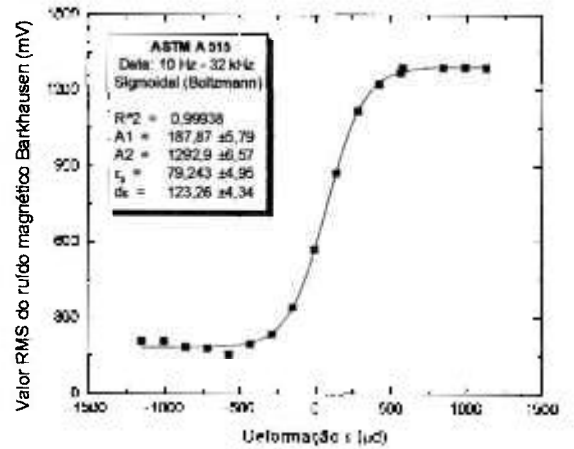
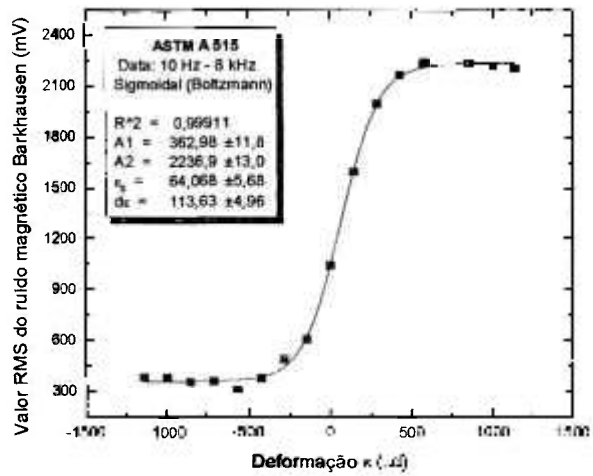
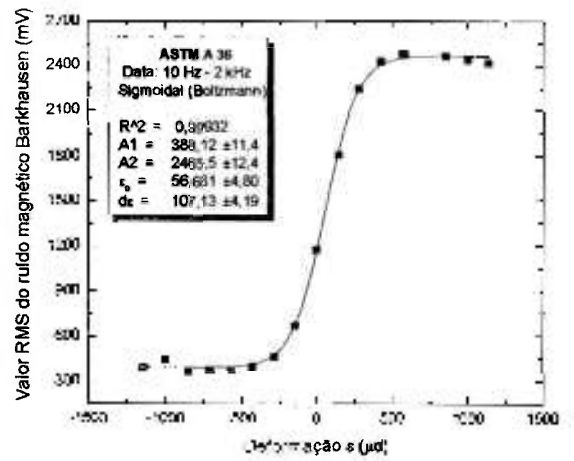
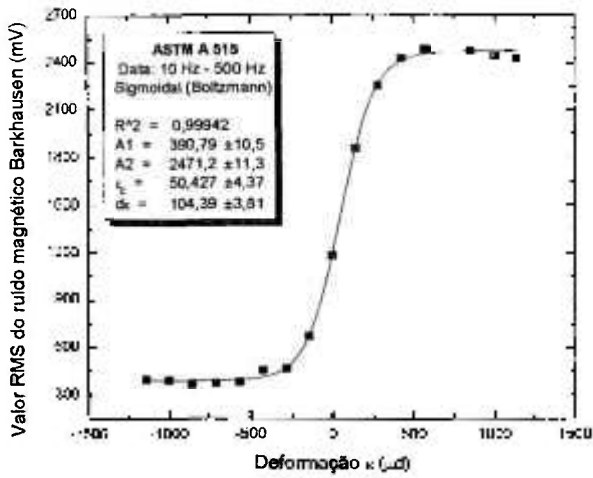


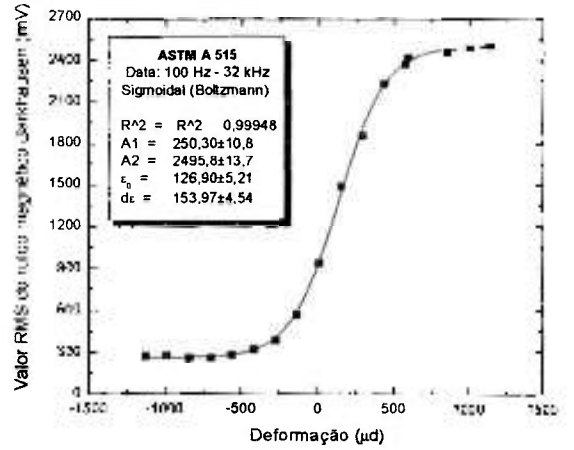
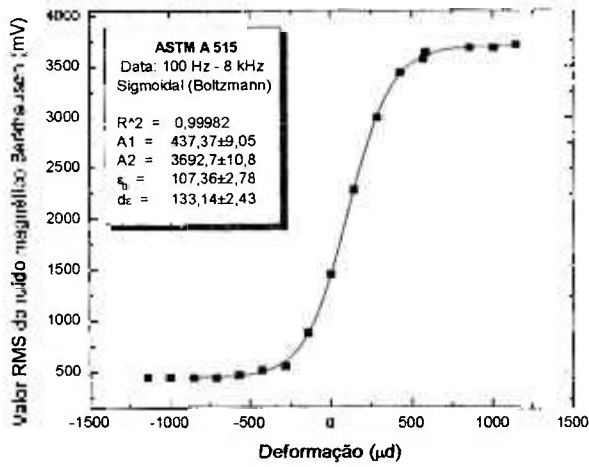
H.2 Aço ASTM A 36 – Viga com eixo longitudinal laminado à direção de laminação.



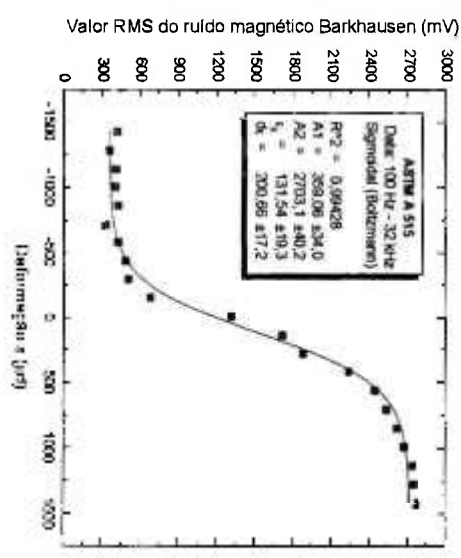
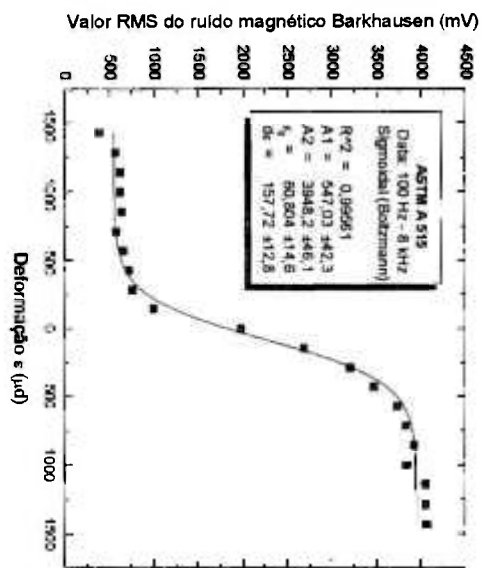
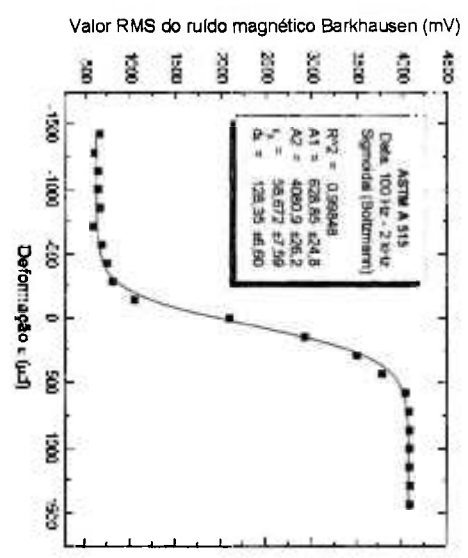
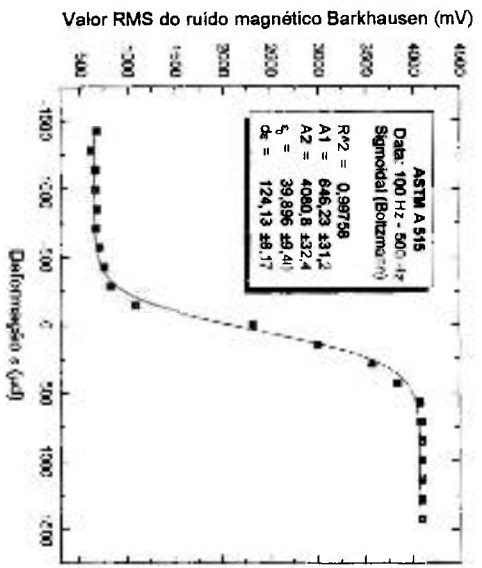


Amplificação.

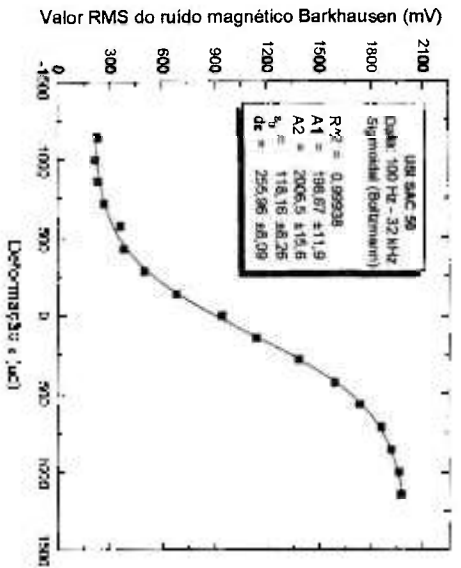
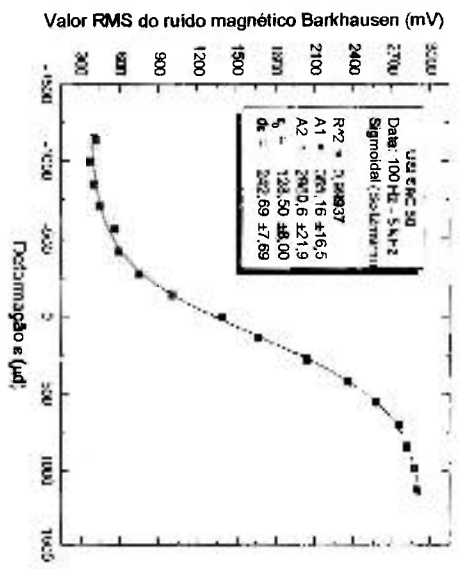
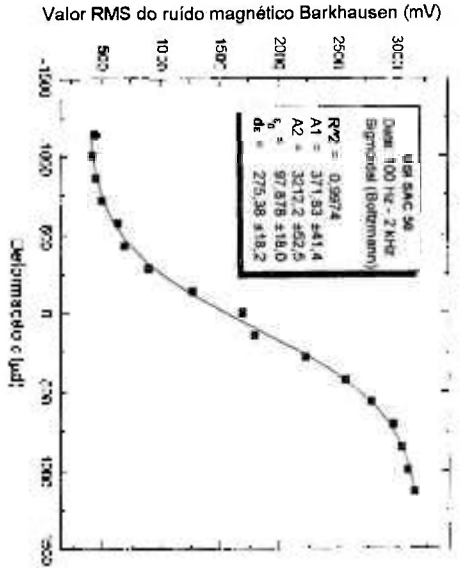




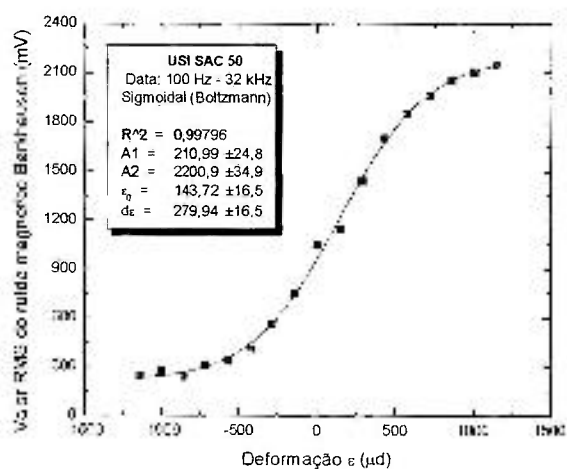
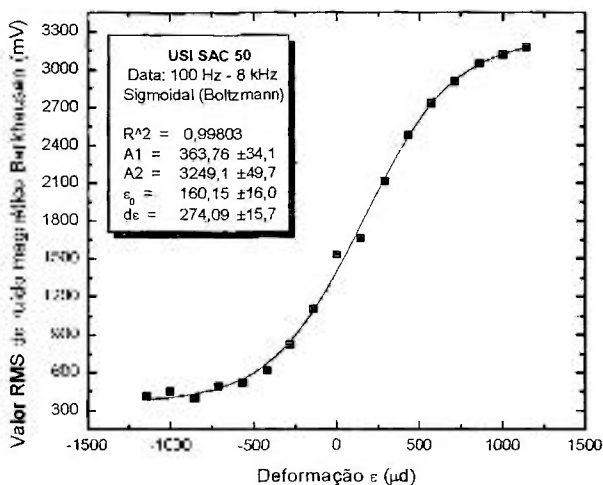
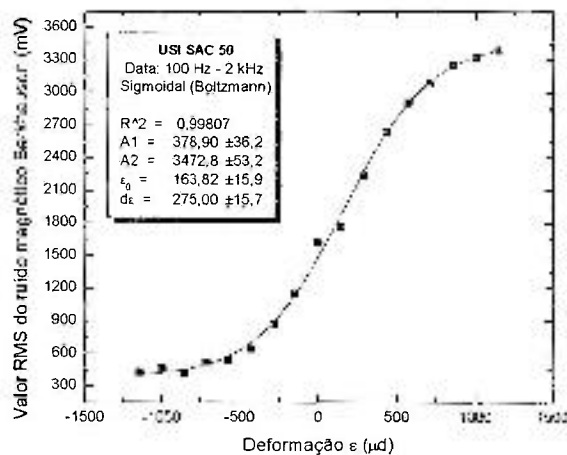
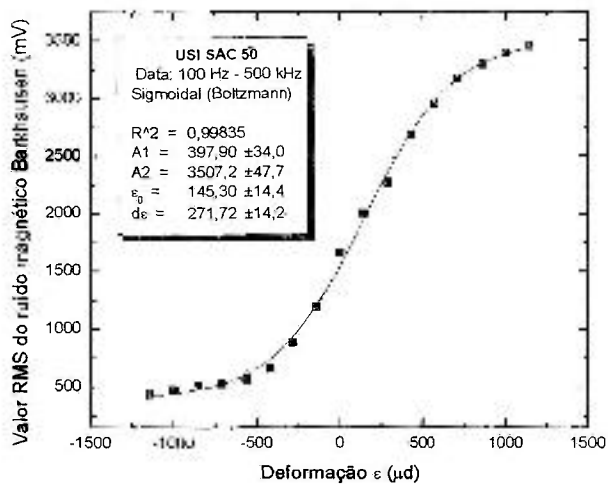
H.4 Aço ASTM A515 – Viga com eixo longitudinal paralelo à direcção de laminação.



11.5 Aço USI SAC 50 – Viga com eixo longitudinal paralelo à direção de laminação.



H.6 Aço USI SAC 50 – Viga com eixo longitudinal perpendicular à direção de laminação.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME V – A 8. *Eddy Current Examination of Tubular Products*, AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERS, p. 145-162, 2001.

ASTM A 36/A 36M. *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2000.

ASTM A 515/A 515M. *Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Intermediate and Higher-Temperature Service*. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2000.

ASTM E 3. *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book. Section Three. 2001.

ASTM E 8M. *Standard Testing Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book. Section Three. V 03.01. p 77-98, 2001.

ASTM E 92. *Standard Testing Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book. Section Three. V 03.01. p 221-229, 2001.

ASTM E 251. *Standard Testing Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages*. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. V 03.01. p 335-353, 2001.

ASTM E 837. *Standard Testing Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book. Section Three. V 03.01. p 675-684, 2001.

BHATTACHARYA, D. K., JAYAKUMAR, T., VAIDYANATHAN, S., MOORTHY, V., RAJ, B. Characterization of Microstructures in 17-4-PH Stainless Steel by Magnetic Barkhausen Noise Analysis. *NDT & E International*, v.26, n. 3, p.141-148, 1993.

BEER, F. P., JOHNSTON JR., E. R. *Resistência dos Materiais*, 2. ed. São Paulo: Makron, 1995.

BOZORTH, R. M. *Ferromagnetism*. 2. ed. New York: D. Van Nostrand Company Inc., 1951.

BUSSIÉRE, J. F., On-line Measurement of Microstructure and Mechanical Properties of Steel. *Materials Evaluation*, n.44, p.560-567, 1986.

CHIAVERINI, V. *Aços e Ferros Fundidos*. 7. ed. São Paulo: Editora da ABM, 2002.

CHIKAZUMI, S. *Physics of Magnetism*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1966.

CULLITY, B.D. *Introduction to Magnetic Materials*. Londres: Addison-Wesley Publishing Company, 1972.

DESWAUX, S., OURAK, M. The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect. *NDT&International*, v 37, p.9-17, 2004.

DEVINE, M. K., The magnetic Detection of Material Properties. *JOM*, P. 24-29, October 1992.

DOBMANN, G., MEYENDORF, N., SCHNEIDER, E. Non-destructive characterization of materials: a growing demand for describing damage and service-life-relevant aging process in plant components. *Nuclear Engineering and Design*, v. 171, p.95-112, 1997.

FLAMMINI, A., MARIOLI, D., SARDINI, E.; TARONI, A., Robust Estimation of Magnetic Barkhausen Noise Based on a Numerical Approach. *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, p.1214-1219. Budapest, 2001.

HOFFMANN, K., *An Introduction to Measurements Using Strain Gages*. Alsbach: Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989. 292p.

JILES, D. C. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. 2.ed. Londres: Chapman & Hall, 1998.

JILES, D. C., Effects of Surface Stress on Barkhausen Effect Emissions: Model Predictions and Comparison with X-Ray Diffraction Studies. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 30, n.6, p.4924-4926, November 1994.

KANKOLENSKI, K. P., HUA, S. Z., YANG, D. X., HICHO, G. E., SWARTZENDRUBER, L. J., ZANG, Z. Non-destructive Evaluation of Mechanical Properties of Magnetic Materials. In: MRS SYMPOSIUM, v.591, n. 3, p.157-162, 2000.

KAMEDA, J., RANJAN, R. Nondestructive Evaluation of Steels Using Acoustic and Magnetic Barkhausen Signals - I. Effect of Carbide Precipitation and Hardness. *Acta Metallurgica*, v.35, n.7, p.1515-1526, 1987.

KARPUSCHEWSKI, B., Introduction to micromagnetic techniques. In. 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON BARKHAUSEN NOISE AND MICROMAGNETIC TESTING, Hannover, 1998.

KIM, H. C. et al. Nondestructive Evaluation of Isothermally Annealed 12% CrMoV Steel by Magnetic BN Measurement. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v.130, p.81-91, 1994.

KRAUSE, T. W., ATHERTON, D. L., High resolution magnetic Barkhausen noise measurements. *NDT & E International*, v.27, n.4, p.201-207, 1994.

KUZNETSOV, N. et al, Estimation of Stresses in Pipelines by Magnetic Noise. In. 15TH WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING, Rome, 2000.

KYOWA, General-Purpose Foil Strain Gages – KFG, Product Catalog, 2004.

LINDGREN, M., LEPISTO, T. Effect of cyclic deformation on Barkhausen noise in a mild steel. *NDT&International*, v 36, p.401-409, 2003.

LINDGREN, M., LEPISTO, T. On the stress vs. Barkhausen noise relation in a duplex stainless steel. *NDT&International*, v 37, p.403-410, 2004.

LISOWYJ, B., MERTZ, T. and TIITTO, K., Evaluation of Stress in X52, X56, X60 and X70 Natural Gas Pipes with Barkhausen Noise Method. *Proceedings of the Petroleum Industry Inspection Topical*, ASNT, Houston, Texas (1989).

LU, J. *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. 1.ed. The Fairmont Press, 1996.

MM TN-503, Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method, TECH NOTE 503, Micro-Measurements Division, 1996.

MM, Precision Strain Gages – Micro-Measurements Division, Catalog 500, 2000.

MAASS, P., TESCHKE, G., WILLMANN, W., and WOLLMANN, G., Detection and Classification of Material Attributes – A Practical Application of Wavelet Analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 48, n.8, p.2432-2438, August 2000.

MOORTHY, V., SHAW, B.A., EVANS, J. T. Evaluation of tempering induced changes in hardness profile of case-carburised EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis. *NDT&International*, v. 36, pp43-49, 2003.

MOORTHY, V., SHAW, B.A., HOPKINS, P. Magnetic Barkhausen emission technique for detecting the overstressing during bending fatigue in case-carburized En36 steel. *NDT&International*, 2004.

METALELEKTRO LTD. *Stresstest Manual*. Budapest. 13p. 1995.

MESZARÓS, I., O SULLIVAN, D., Characterization of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques. *NDT&International*, v 37, p.489-496, 2004.

PADOVESE, L. R., ANGLADA-RIVERA, J., CAPÓ-SANCHEZ, J., Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v 231, p.299-306, 2001.

PINTO, L.C.M., *Quantikov - Um Analisador Microestrutural para o Ambiente Windows*. 1996. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

POSGAY, G., IMRE, L., Stress Examination of Bridges Using Barkhausen Noise Measurement. In: 6TH EUROPEAN CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING, 1994, Nice.

POSGAY, G., IMRE, L., TOTH, F. I., Investigation of a Steel Element by Measuring Barkhausen Noise, 12th World Conference on Nondestructive Testing. *Conference Proceedings*. 1983. Edited by J. Boogaard and G. M. van Dijk. p.1273-1275.

POSGAY, G., MOLNAR, P., GILLEMOT, F., Barkhausen Testing of Steam Generators at NPP Paks. In: NDT methods for monitoring degradation, *Proceedings of EC-IAEA Specialists Meeting*, Petten, 1999.

REED-HILL, R. E., ABBASCHIAN, R. *Physical Metallurgy Principles*. 3 ed. PWS Publishing, 1991.

RODRIGUEZ, P., RAJ, B., Development of In-service Inspection techniques for nuclear power plants in India. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, v. 73, p 59-68, 1997.

SILVA JR., S.F., PALMA, E. S., MANSUR, T. R., Utilização do Efeito Barkhausen para a Determinação da Direção de Laminação em Materiais Ferromagnéticos. In: COTEQ 99 – CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 1999, Rio de Janeiro.

SIPAHI, L. B., JILES, D. C., CHANDLER, D. Comprehensive analysis of Barkhausen emission spectra using pulse height analysis, frequency spectrum, and pulse wave form analysis. *Journal of Applied Physics*, v.73, n.10, p.5623-5625, may 1993.

STAHLSCHLÜSSEL, P 373, 1977.

SWARTZENDRUBER, L. J., HICHO, G. E. Effect of Sensor Configuration on Magnetic Barkhausen Observations. *Nondestructive Evaluation*, n 5, p.41-50, 1993.

THEINER, W. A., GOEBBELS, K., BACH, G. Characterization of Hardening Depth by Barkhausen Noise Measurement. *Materials Evaluation*, n.46, p.1576-1580, Nov. 1988.

TIITTO, S., *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. 1.ed. The Fairmont Press, 1996. cap. 8, magnetic methods. p. 179-201.

TML, Strain Gages Series List – F Series, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd Product Catalogue, 2005.

TML Pam E-1010, Precision & Flexible Strain Gauges, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd, 2000.

USIMINAS. Hot Rolled Products, 2000

WILLEMS, E. R., *Resistência dos Materiais*. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981.

YUEHUANG X. et al. Magnetoacoustic Emission of Ferromagnetic Materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v.133, p.402-404, 1994.

ZERBST, U., SCHALBE, K. H., AINSWORTH, R. A. An Overview of Failure Assessment Methods in Codes and Standards. *Comprehensive Structural Integrity - Practical Failure Assessment Methods*, Vol. 7, 2003.

1