LEOSDAN FIGUEREDO NORIS

Técnica de Escaneamento Contínuo com Ruído Magnético de Barkhausen para chapas aços carbono

São Paulo

(2017)

LEOSDAN FIGUEREDO NORIS

Técnica de Escaneamento Contínuo com Ruído Magnético de Barkhausen para chapas aços carbono

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese.

São Paulo

(2017)

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Noris, Leosdan Figueredo
Técnica de Escaneamento Contínuo com Ruído Magnético de Barkhausen para chapas aços carbono / L. F. Noris -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
96 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Ruído Magnético de Barkhausen 2.Ensaio Não Destrutivo 3.Tensão dos materiais 4.Deformação e estresse I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

LEOSDAN FIGUEREDO NORIS

Técnica de Escaneamento Contínuo com Ruído Magnético de Barkhausen para chapas aços carbono

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese.

São Paulo

(2017)

DEDICATÓRIA

A mi familia, en especial a mis padres María (la doña) y Confesor (el loco), que me dieron no solo la vida, sino también mi educación y siempre estuvieron presentes en las buenas y malas. A mi hermana Lisdaimy, aunque siempre me comió mi comida en el pre.

A minha esposa Dania (tata), sem seu amor e compreensão não poderia ter concluído este trabalho.

A meu amigo e irmão Owen Pavel Fernández Piedra quem sempre acreditou em mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me iluminar, guiar, e conceder saúde, paz e força para conseguir culminar este trabalho.

Agradeço ao Professor Linilson Padovese pela oportunidade, pela paciência pela amizade, apoio e pela confiança depositada ao longo destes anos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq - pela concessão da bolsa, o que possibilitou a minha permanência em Brasil, e conseguir realizar meus estudos de Mestrado.

Aos colegas do Laboratório LADIN, Dr. Ignácio Sanches, Éverson Faviano, Richard Remédios, Víctor Romero, Elder Santos, Dr. Julio Capó, Dr. Alexander Alvarez e em especial a Manuel Alberteris, pela alegre convivência, pelas conversas e sugestões.

A meus amigos cubanos, Mercedes, Daniel, Gretel, Henry (el careta) e todos aqueles que de alguma forma colaboraram-me e ajudarem, ademais de fazer minha vida mais amena ao longo destes anos de estádia no Brasil.

E a todas as outras pessoas que direta o indiretamente colaboraram com a realização desta tese, MUITO OBRIGADO.

RESUMO

Este trabalho estuda a aplicação de um Ensaio Não-Destrutivo de Inspeção (ENDI), baseado na técnica Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), na detecção de regiões não homogêneas em chapas de aços carbono. Apresentando os avanços no desenvolvimento de uma nova variante de ensaio não-destrutivo magnético, denominada Escaneamento Contínuo de Ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB).

O RMB é gerado por abruptas mudanças na magnetização de materiais magnéticos quando são submetidos a campos magnéticos variáveis. Essas mudanças são afetadas pela microestrutura e a presença e distribuição de tensões elásticas (compressão e tração), deformação plástica e alteração da microestrutura.

Neste trabalho analisou-se a sensibilidade dos sinais de RMB na detecção de deformações plásticas em parâmetros tais como, freqüência de campo magnético de excitação e a velocidade de movimentação da sonda. O comportamento do parâmetro RMS_{RMB} dos sinais de RMB se correlacionou com a posição das regiões não homogêneas detectadas nas amostras.

Sendo, contudo ainda feita uma avaliação da técnica aplicada para a medição, fazendo uma comparação dos resultados obtidos com a técnica de Ruído Magnético de Barkhausen Estático (RMBE) que é uma técnica já estabelecida na literatura.

Os resultados mostraram, que para cada um dos casos estudados, é possível detectar a posição do dano produzido. Essa nova técnica aumenta o espectro de soluções de ENDI para problemas não contemplados pelas técnicas existentes.

Palavras chaves:

Ensaio Não Destrutivo, Ruído Magnético de Barkhausen, Deformação plástica, Tensão, Barkhausen Contínuo, Mapeamento de superfícies

ABSTRACT

This work the application of a technique of Non-Destructive Inspection Test (NDIT) based on the technical Magnetic Barkhausen Noise (MBN), the detection of non-homogeneous regions in sheets of carbon steels. It presents advances in the development of a new technique of magnetic non-destructive testing. Particularly a variant nominated Scanning Continuous Magnetic Barkhausen Noise (SCRMB).

The MBN are generated by abrupt changes in the magnetization of materials when subjected to varying magnetic fields. These changes are affected by the microstructure and the presence and distribution of elastic stresses (compression and tension).

We analyzed the sensitivity of the signal MBN detection plastic deformation on parameters such as magnetic field excitation frequency and the probe movement speed. The RMS_{MBN} parameter behavior of MBN signals correlated with the position of non-homogeneous regions detected in the samples.

An evaluation of the technique applied to the measurement was performed by making a comparison of the results obtained with MBNE technique, is a technique already established in the literature.

The results showed that for each of the studied cases, it is possible to detect the position of the damage produced. This new technique increases the spectrum of NDIT solutions for problems not covered by existing techniques.

Key words:

Barkhausen noise, Non-destructive testing, hardness, plastic deformation, Stress, Continuous Barkhausen, Surface mapping.

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Campo magnético aplicado
H_c	Campo coercitivo
${}_bH_c$	Coercividade indutiva
${}_iH_c$	Coercividade intrínseca
$H_{\max}$	Amplitude de campo necessário para levar o material ao nível de magnetização máxima.
B	Indução magnética.
B_r	Indução magnética remanente.
B_s	Indução magnética de saturação, relativo à magnetização máxima.
M	Magnetização
M_s	Magnetização de saturação
μ	Permeabilidade magnética.
μ_r	Permeabilidade relativa.
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo.
χ_m	Susceptibilidade magnética.
Φ	Fluxo magnético
E_T	Energia magnética total de um material ferromagnético.
E_{troca}	Energia de troca.
$E_{magnetostática}$	Energia magnetostática

$E_{\text{magnetocristalina}}$	Energia de anisotropia magnetocristalina
$E_{\text{magnetostrição}}$	Energia magnetostrição
T_C	Temperatura de Curie
δ	Profundidade eletromagnética
f	Frequência do sinal
σ	Condutividade do material
RMS_{RMB}	Valor RMS dos sinais Barkhausen
V_i	Valor da voltagem medida em um determinando instante
V_m	Valor médio do sinal
n	Número de pontos do sinal
RMB_{energy}	Valor de energia dos sinais Barkhausen
$S(f)$	Densidade espectral de potência
$R(\tau)$	Função de autocorrelação
ENDI	Ensaios Não-Destrutivos de Inspeção
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
RMBE	Ruído Magnético de Barkhausen Estático
RMBC	Ruído Magnético de Barkhausen Continuo
RMBCR	Ruído Magnético de Barkhausen Continuo Rotacional
ECRMB	Escaneamento Continuo com Ruído Magnético de Barkhausen
DL	Direção de Laminação
DT	Direção Transversal

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Campo magnético gerado por partículas de ferro dispersas numa área afetada por imãs permanentes (CULLITY; GRAHAM, 2009). 5
Figura 2.2 – Linhas de campo magnético. 5
Figura 2.3 – Campo magnético de um solenóide. 6
Figura 2.4 – Curvas $B \times H$ de três materiais, um diamagnético (linha verde), um paramagnético (linha marrom) e um ferromagnético (linha vermelha). A linha azul é a resposta do B no ar (FRANCO, 2010). 9
Figura 2.5 – Momento magnético associado à órbita do elétron (a) e ao giro do mesmo sobre seu próprio eixo (b). 11
Figura 2.6 – Representação da estrutura CCC do ferro com os eixos dados pelos três índices de Miller. 14
Figura 2.7 – Representação da transição dos momentos magnéticos na interface entre dois domínios com polarização oposta (completa inversão de $180°$): a) transição abrupta dos dipolos magnéticos e b) transição suave com um comprimento δ maior (FARIA; LIMA, 2005). 16
Figura 2.8 – Estrutura de parede de domínio de $180°$: a) Parede de Bloch e b) Parede de Néel. 17
Figura 2.9 – Configuração dos domínios durante várias etapas da magnetização. 18
Figura 2.10 – Laço de histerese magnética. 20
Figura 2.11 – Comparação entre os laços de histerese magnética para um material magnético duro e um material magnético mole. 22
Figura 3.1 – Ruído Barkhausen e curva de histerese associada. 23
Figura 3.2 – Equipamento para ensaios RMB a) junto com os sinais de resposta típicos b). 24
Figura 3.3 – Envolvente do sinal RMB registrado durante um ciclo de magnetização. 28
Figura 3.4 – Sinal RMB representado no domínio do tempo a) e da frequência b). 29
Figura 3.5 – Sensor utilizado em medidas de anisotropia direcional (BUTTLE; SHAW; MOORTHY, 2006). 40

Figura 3.6 – Configuração da sonda utilizada na validação do RMBC (CROUCH; BEUKER, 2004)..... 41
Figura 3.7 – Esquema da sonda RMBC confeccionada por (FRANCO, 2010). 42
Figura 3.8 – Esquema da sonda de RMBCR (MORGAN, 2013). 43
Figura 4.1 – Metalografia do aço SAE 1006. 47
Figura 4.2 – Metalografia do aço SAE 1070. 48
Figura 4.3 – Geometria e dimensões das amostras em (mm), nas zonas onde se realizou a medição de RMB. 49
Figura 4.4 – Imagem da peça usada como endentador. 50
Figura 4.5 – Posição das deformações plásticas nas amostras. a) Aço AISI 1006 e b) Aço AISI 1070. 50
Figura 4.6 – Desenho das linhas para as medições (DL é de direita a esquerda). 51
Figura 4.7 – Esquema da configuração usada para ECRMB. 52
Figura 4.8 – BarkTech, módulo utilizado para o ECRMB desenvolvido no Ladin. 53
Figura 4.9 – Janela do programa de aquisição com os sinais de RMB a), e o respetivo espectro b). 54
Figura 4.10 – Imagem do carrinho e da sonda utilizadas para o ECRMB. 55
Figura 4.11 – Sinais de RMB a), e Espectro dos Sinais b). 56
Figura 4.12 – Lâmina de cobre colocada entre os motores e a sonda de medição. 58
Figura 4.13 – Espetro do sinal de RMB a) antes de filtrar b) depois de filtrado. 58
Figura 4.14 – Magnitude da resposta do filtro. 59
Figura 5.1 – Gráficas para as Chapas AISI-1006 e AISI-1070, linha 1, 2 e 3; frequência 5Hz antes e depois de deformada, medição discreta. 61
Figura 5.2 – Gráficas para as Chapas 1006 e 1070, linha 1, 2 e 3; frequência 10Hz antes e depois de deformada, medição discreta. 62
Figura 5.3 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 14 mm/s. 63
Figura 5.4 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 16 mm/s. 63

Figura 5.5 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 19 mm/s. 64
Figura 5.6 – Gráficas das as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 22 mm/s. 64
Figura 5.7 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 25 mm/s. 65
Figura 5.8 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 14 mm/s. 66
Figura 5.9 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 16 mm/s. 66
Figura 5.10 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 19 mm/s. 67
Figura 5.11 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 22 mm/s. 67
Figura 5.12 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 25 mm/s. 68
Figura 5.13 – Comparação das curvas de RMS_{RMB} para as duas frequências, para os aços AISI -1006 e 1070. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Magnitudes magnéticas e suas unidades (JILES, 1994). 7
Tabela 3.1 – Faixa de profundidade de pele relativa à frequência de excitação em materiais ferrosos. 31
Tabela 4.1 – Composição química do conjunto de amostras em %. 47

SUMARIO

1 Introdução 1
1.1 Objetivo 2
1.2 Estrutura do trabalho 3
2 Conceitos básicos sobre magnetismo e teoria de domínios magnéticos 4
2.1 Definição de magnetismo 4
2.2 Campo magnético 4
2.3 Indução magnética 6
2.3.1 Suscetibilidade magnética 7
2.3.2 Permeabilidade magnética 8
2.4 Materiais magnéticos 8
2.5 Estrutura magnética 10
2.5.1 Momentos magnéticos 11
2.5.2 Origem dos domínios magnéticos 12
2.5.3 Paredes de domínio e processo de magnetização 15
2.5.4 Curvas de histerese magnética 20
3 Ruído Magnético de Barkhausen clássico e ensaio não-destrutivos 23
3.1 Configuração experimental para a obtenção do sinal RMB 24
3.2 Análise do sinal de RMB 26
3.2.1 Análise no tempo 26
3.2.2 Análise no domínio da frequência 29
3.3 Fatores que afetam o sinal RMB 30
3.3.1 Frequência de magnetização 30
3.3.2 Efeito da Quantidade de Carbono e partículas de segunda fase 33
3.3.3 Intensidade de magnetização 34
3.3.4 Tamanho de grão 35

3.3.5 Medições de tensão mecânica usando RMB 36
3.3.6 Efeito da deformação plástica no RMB 38
3.4 Anisotropia magnética 40
3.5 RMB Contínuo 41
4 Técnica de Escaneamento Continuo de Ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB) 45
4.1 Introdução 45
4.2 Escaneamento Continuo de Ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB) em amostras com deformações plásticas localizadas. 46
4.3 Materiais e métodos 46
4.3.1 Materiais 46
4.3.2 Preparação das Amostras 49
4.3.3 Equipamento e métodos usados no ECRMB 51
4.3.4 Procedimento de Medição dos sinais magnéticos 55
4.3.5 Método de processamento do sinal utilizado na técnica de ECRMB 56
4.3.6 Filtragem dos sinais adquiridas mediante ECRMB 57
5 Utilização da técnica de ECRMB para monitoramento de deformações plásticas em chapas de aço carbono 60
5.1 Introdução 60
5.2 Estudo Preliminar 1. Detecção de zonas não homogêneas utilizando a técnica de RMBE 60
5.3 Estudo Preliminar 2. Detecção de zonas não homogêneas utilizando a técnica de ECRMB 62
5.4 Resultados e discussão 68
5.4.1 Influência da velocidade e frequência de excitação na detecção das regiões não homogêneas 68
6 Conclusões 71
7 Trabalhos futuros 72

8 Produção científica e técnica 73

Referências Bibliográficas 74

1 Introdução

O projeto dos componentes mecânicos e estruturais na engenharia está limitado pelas propriedades mecânicas dos materiais, assim como pelos métodos usados na sua fabricação. Uma vez em serviço os componentes sofrerão processos termo-químicos-mecânicos que irão alterar as suas características e afetarão a vida útil projetada durante a fabricação. Neste contexto, a utilização de métodos de Ensaios não destrutivos (END) tem um papel importante, na avaliação de degradações que afetam a vida do componente.

Para dar solução a estes problemas vem se desenvolvendo uma ampla gama de técnicas de Ensaios Não-Destrutivo de Inspeção (ENDI). A maioria delas não consegue detectar mudanças na microestrutura, apenas detectam defeitos volumétricos como trincas ou microtrincas. Embora o uso dos ENDI não garanta que uma falha não irá acontecer, eles têm um papel muito importante, que é minimizar as possibilidades de falha e maximizar a disponibilidade do sistema.

A técnica de Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) tem sido amplamente utilizada na área dos ENDI. Há mais de 14 anos que o Laboratório de Dinâmica e Instrumentação (LADIN) da Universidade de São Paulo desenvolve tecnologia própria de ENDI baseados no RMB. Este desenvolvimento abrange a fabricação de equipamentos, software e aplicações tecnológicas.

O RMB é uma alternativa tecnológica com grande potencial, sobretudo pelo seu baixo custo, simplicidade de utilização e pelo fato de abrir possibilidades de caracterização de materiais ferromagnéticos que não são possíveis com outras técnicas de ENDI.

Algumas das aplicações industriais em que a técnica de medição do RMB vem sendo utilizada são:

- Processo e controle de qualidade na produção de engrenagens, válvulas, rolamentos, virabrequim, comando de válvulas, e outras partes importantes de motores e aeronaves.

- Avaliação de danos por fadiga de contato em engrenagens e rolamentos.
- Avaliação de tensões residuais em tubulações soldadas e cilindros de laminação.
- Avaliação do efeito “shot peening” em aço.
- Medição da inversão de tensões residuais em rodas ferroviárias por efeito térmico.
- Avaliação de degradação térmica em dutos de Caldeira.

A presente dissertação se insere no contexto da utilização de técnicas baseados no RMB como método ENDI em peças metálicas.

1.1 Objetivo

Estudar e desenvolver a utilização de uma técnica de escaneamento de superfícies, baseado no escaneamento contínuo do ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB) na detecção de regiões não homogêneas em chapas de aço carbono.

Objetivos específicos:

- Determinar a influência da velocidade de escaneamento no processo de medição, na detecção de regiões não homogêneas.
- Determinar a influência da freqüência de excitação, na detecção de regiões não homogêneas.
- Comparar os diferentes parâmetros de análise da técnica de escaneamento continuo de RMB e quais são as informações que podem ser obtidas de tal procedimento.

1.2 Estrutura do trabalho

A estrutura do presente texto é:

Nos capítulos 2 e 3, são apresentadas, respectivamente, uma revisão bibliográfica e as noções teóricas relacionadas ao magnetismo e o RMB.

Nos capítulos 4 e 5, apresentam-se a técnica experimental, resultados e discussão, relacionados com o cumprimento dos objetivos deste trabalho.

Nos capítulos 6 e 7 são apresentadas respectivamente as conclusões mais relevantes deste trabalho, bem como algumas ideias e sugestões para trabalhos futuros.

O capítulo 8 resume a produção científica e técnica, publicada ou em processo de revisão até o momento como resultado do trabalho desenvolvido neste projeto de mestrado.

2 Conceitos básicos sobre magnetismo e teoria de domínios magnéticos

Neste capítulo introduzem-se alguns conceitos úteis para a interpretação dos resultados apresentados nesta dissertação. Esta discussão pode ser aprofundada na literatura clássica (BOZORTH, 1964; CHIKAZUMI, 1997; CULLITY; GRAHAM, 2009; JILES, 1994).

2.1 Definição de magnetismo

Magnetismo é o fenômeno pelo qual os materiais são capazes de atrair ou repelir outros objetos. Na atualidade os conhecemos como ímãs permanentes, e são feitos geralmente usando substancias que contêm ferro. Eles atraem e repelem outros ímãs, além de ter a capacidade de magnetizar outros objetos que contem ferro na sua composição química.

O ferro, níquel e cobalto, alguns aços e a magnetita (óxido de ferro, Fe_3O_4) são exemplos de materiais que apresentam propriedades magnéticas. Ainda assim todas as substâncias são influenciadas de uma ou de outra forma pela presença de um campo magnético.

O físico Hans Christian Ørsted (em 1819) encontrou uma relação entre a eletricidade e o magnetismo ao demonstrar que a corrente elétrica circulando por um fio desviava a agulha de uma bussola situada nas proximidades, isto devido ao campo magnético produzido. Demostrando assim, que os ímãs não são os únicos elementos capazes de magnetizar.

2.2 Campo magnético

Se sobre uma folha de papel espalhasse-se pequenas partículas de ferro distribuídas ao redor de um ímã estas indicarão a presença de um *campo magnético*. Como se pode ver na *Figura 2.1*, elas se alinham em trajetórias denominadas *linhas de campo*.

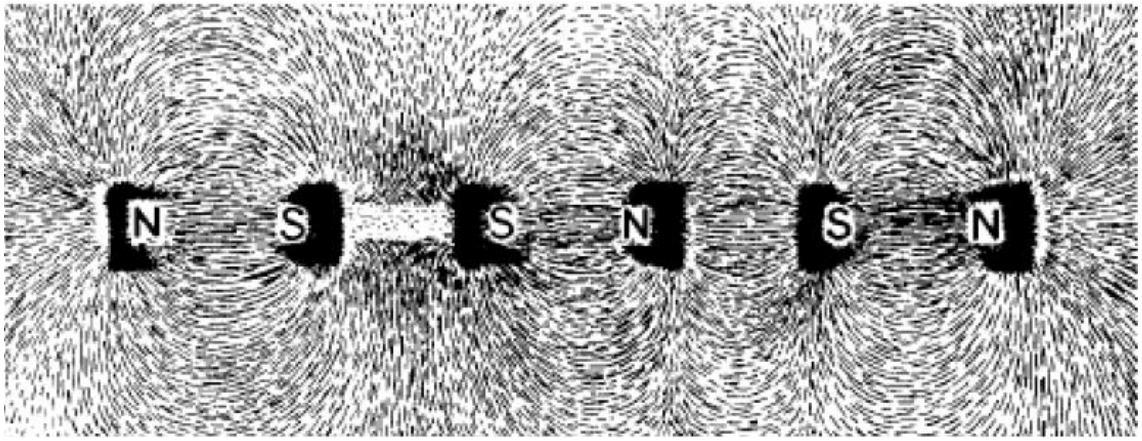

Figura 2.1 – Campo magnético gerado por partículas de ferro dispersas numa área afetada por imãs permanentes (CULLITY; GRAHAM, 2009).

A figura gerada por estas partículas mostra que o imã tem dois pólos magnéticos e as linhas de campo magnético saem do pólo norte e entrar no pólo sul seguindo o convenio estabelecido, como se pode ver na *Figura 2.2*. Em geral, o magnetismo tem uma natureza bipolar, há sempre dois pólos magnéticos ou centros de campo magnético separados por uma distância determinada.

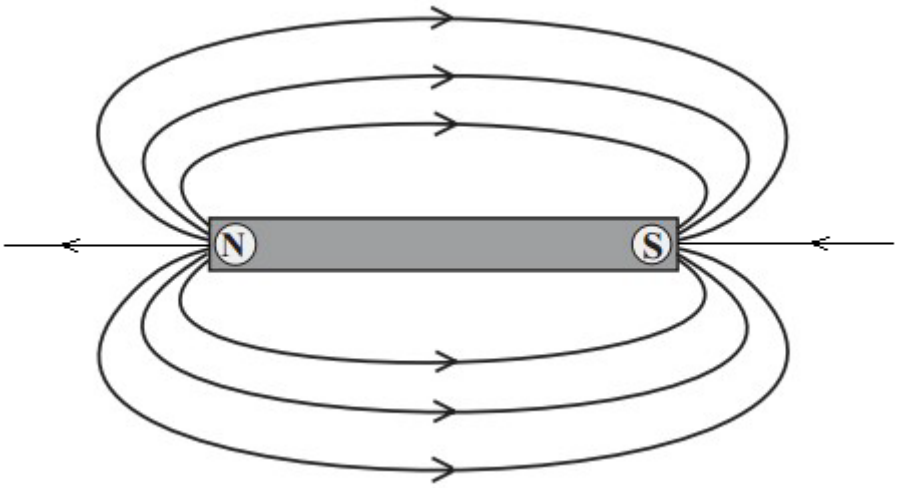

Figura 2.2 – Linhas de campo magnético.

Como foi comentado os campos magnéticos são também produzidos por condutores que transmitem corrente. A *Figura 2.3* mostra a formação de um

campo magnético em torno de uma bobina longa de fio de cobre, chamada de solenóide, cujo comprimento é maior que seu raio.

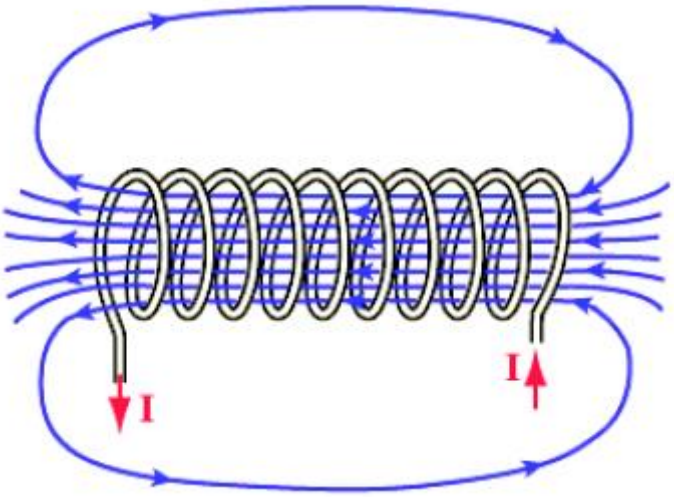

Figura 2.3 – Campo magnético de um solenóide.

Para um solenóide de **n** voltas e comprimento **L**, a intensidade do campo magnético **H** é:

$$H = \frac{ni}{L} \quad [A/m] \tag{1}$$

Onde:

n: Número de voltas.

i: Corrente elétrica $[A]$.

L: Comprimento do enrolamento $[m]$.

2.3 Indução magnética

Se colocarmos uma barra de ferro desmagnetizada dentro de um solenóide, observa-se que o campo magnético fora do solenóide aumenta. O aumento desse campo é devido à soma do campo gerado pelo solenóide e do campo magnético da barra que se magnetizou. O campo magnético resultante é

chamado de indução magnética, densidade de fluxo ou, simplesmente de indução, e é denotado por B.

A indução B, é a soma do campo aplicado H, e o campo externo da magnetização da barra no interior do solenóide. O momento magnético induzido por unidade de volume gerado pela barra é chamado de intensidade da magnetização ou simplesmente magnetização, e é conhecido por M. Em unidades SI:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \tag{2}$$

Onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}[Tm/A]$, permeabilidade magnética no vácuo.

As propriedades magnéticas não dependem unicamente desses três parâmetros, mas também da maneira como a proporção entre eles varia.

Tabela 2.1 – Magnitudes magnéticas e suas unidades (JILES, 1994).

Magnitude magnética	**Unidades (SI)**	**Unidades (cgs)**
B, indução magnética	$Weber/metro^2$ (Wb/m^2) ou Tesla (T)	Gauss (G)
H, campo aplicado	$Ampere/metro$ (A/m)	Øersted (Oe)
M, magnetização	$Ampere/metro$ (A/m)	Øersted (Oe)
Fatores de conversão: $1Oe = 79.58\,A/m$ $1Wb/m^2 = 1T = 10000G$		

2.3.1 Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética é a constante de proporcionalidade entre a magnetização M de um material e o campo magnetizante aplicado e é definida como:

$$\chi_m = M/H \tag{3}$$

A suscetibilidade magnética tem um limite estabelecido pela máxima magnetização possível, a *magnetização de saturação* (M_S), a qual representa o ponto no qual todos os momentos magnéticos do material encontram-se alinhados com o campo magnetizante aplicado.

2.3.2 Permeabilidade magnética

A constante de proporcionalidade entre a indução total B no material e o campo utilizado para produzi-la é denominada permeabilidade magnética e está definida como:

$$\mu = B/H \tag{4}$$

Habitualmente é usada a permeabilidade magnética do material em relação à permeabilidade magnética do vácuo. A proporção é denominada *permeabilidade relativa* é está dada por:

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \tag{5}$$

Pode se pensar na permeabilidade magnética como uma medida da facilidade com a qual um campo *B* pode ser induzido na presença de um campo magnético externo H. Quer dizer, materiais magnéticos que são facilmente magnetizados têm alta permeabilidade magnética.

2.4 Materiais magnéticos

Os diferentes materiais magnéticos são caracterizados, pela sua permeabilidade magnética (μ), que é a relação entre o campo de indução magnética e o campo magnético dentro do material:

$$\mu = B/H = \mu_r \mu_0 = \mu_0 (1 + \chi_m) \tag{6}$$

De acordo com sua permeabilidade, pode-se distinguir três tipos de materiais: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos. Na Figura 2.4 é mostrada a curva $B \times H$ de cada um desses materiais.

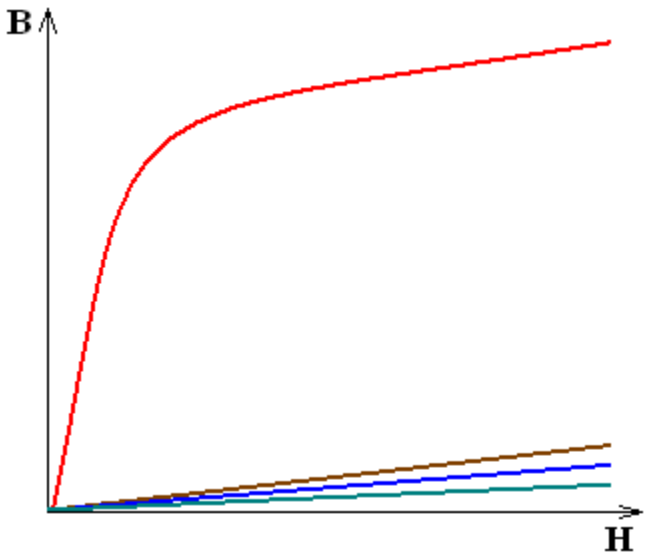

Figura 2.4 – Curvas $B \times H$ de três materiais, um diamagnético (linha verde), um paramagnético (linha marrom) e um ferromagnético (linha vermelha). A linha azul é a resposta do B no ar (FRANCO, 2010).

Materiais **diamagnéticos**: Tipo de magnetismo caracterizado por uma suscetibilidade magnética é pequena e negativa, independente da temperatura. Magnetizam-se debilmente no sentido oposto do campo magnético aplicado. Em todas as substâncias, a suscetibilidade apresenta uma componente diamagnética; sua origem está no efeito de blindagem devido ao movimento dos elétrons atômicos. Nos materiais diamagnéticos, essa componente é dominante. Nos metais, as correntes devidas aos elétrons de condução são os responsáveis pelo diamagnetismo de Landau, um efeito de maior intensidade. São exemplos de substâncias diamagnéticas o composto $NaCL$ (cloreto de sódio) e óxido de cobre (CuO).

Materiais **paramagnéticos**: Magnetismo caracterizado por uma suscetibilidade magnética positiva e pequena, o que gera uma permeabilidade ligeiramente maior que 1. Caracterizam-se por ter uma distribuição de momentos

magnéticos atômicos nulos (A soma de todos os momentos magnéticos é zero), que tendem alinhasse no sentido do campo aplicado. A queda de suscetibilidade com a temperatura é devida ao aumento da razão energia térmica sobre energia dos momentos magnéticos atômicos em presença do campo magnético externo.

Materiais **ferromagnéticos**: A susceptibilidade magnética é positiva e grande, e a permeabilidade relativa é então muito maior que 1. É um magnetismo caraterizado por um alinhamento paralelo espontâneo dos momentos magnéticos atômicos com ordem de longo alcance, quer dizer, grandes grupos de átomos ou moléculas são mantidos alinhados devido a um acoplamento forte, mesmo na ausência do campo externo. Esses grupos são chamados de domínios magnéticos, e agem como um pequeno ímã permanente. Na ausência de campo aplicado, os domínios têm seus momentos magnéticos distribuídos aleatoriamente.

Além disso, a intensidade da resposta é relativamente alta, e permite que os efeitos sejam detectáveis. É por e essa razão que só este tipo de materiais é considerado nos diferentes estudos do presente trabalho.

São exemplos de ferromagnetos os elementos ferro, níquel e cobalto. Essa ordem desaparece acima de certa temperatura, chamada *temperatura de Curie* (T_C).

2.5 Estrutura magnética

Materiais ferromagnéticos podem existir, tanto no estado magnetizado, quanto no desmagnetizado, e isto se deve ao arranjo (alinhamento) dos momentos magnéticos atômicos do material. Cada átomo se comporta como um minúsculo ímã permanente e, espontaneamente, se alinha paralelamente aos

seus vizinhos em regiões do material. Estas regiões, nas quais predomina um só alinhamento magnético, são chamadas *domínios magnéticos*.

Estas regiões com alinhamento paralelo ocupam um volume que pode variar entre 10^{-18} e $10^{-9} m^3$, o seja, com dimensões da ordem de 10^{-6} e$10^{-3} m$. Embora estas regiões estejam espontaneamente magnetizadas numa direção, os domínios no material estão dispostos aleatoriamente uns em relação aos outros, de maneira de minimizar a energia global do sistema.

Paramagnetismo e ferromagnetismo dependem de elétrons desemparelhados, mas, somente os materiais ferromagnéticos, apresentam a formação de domínios.

2.5.1 Momentos magnéticos

Os átomos contêm muitos elétrons em movimento de rotação y de translação e o momento magnético associado com cada um de estes movimentos é uma quantidade vetorial.

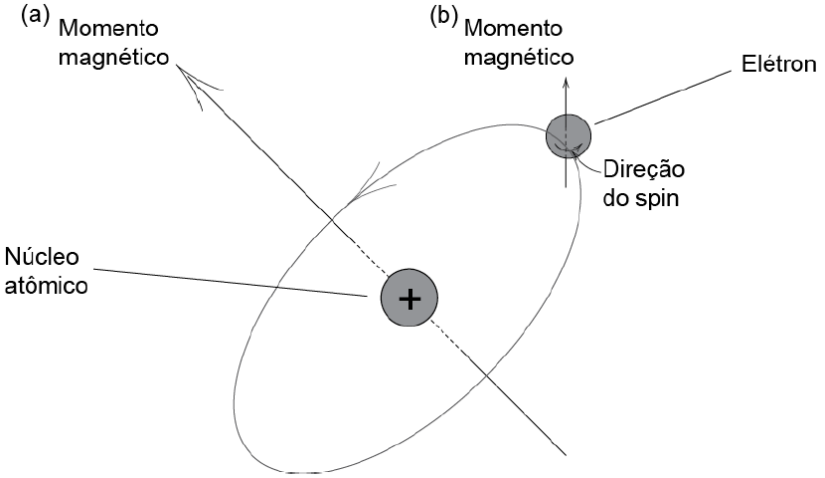

Figura 2.5 – Momento magnético associado à órbita do elétron (a) e ao giro do mesmo sobre seu próprio eixo (b).

No primeiro caso, o momento é normal ao plano da orbita do elétron e, no segundo, paralelo ao eixo de rotação. O memento de dipolo magnético total pode ser calculado como:

$$M_{total} = M_{órbita} + M_{spin} \quad (7)$$

O momento magnético do átomo é a soma vetorial de todos os momentos eletrônicos e isto abre duas possibilidades. A primeira, própria dos materiais diamagnéticos, ocorre quando os momentos magnéticos de todos os elétrons estão orientados de tal forma que eles se cancelam mutuamente e o, átomo, como um todo, não apresenta nenhum momento magnético.

A segunda possibilidade acontece quando o cancelamento dos momentos magnéticos é somente parcial e o átomo permanece com certo momento magnético. Substâncias constituídas por este tipo de átomos são denominadas paramagnéticas e ferromagnéticas.

2.5.2 Origem dos domínios magnéticos

Um material ferromagnético, após ser aquecido acima da temperatura de Curie e resfriado, se divide, espontaneamente, em domínios magnéticos nos quais os momentos magnéticos estão alinhados paralelamente. O material não apresenta um campo magnético externo, uma vez que, os domínios magnéticos estão dispostos aleatoriamente de maneira que a resultante é nula. A razão para que isto ocorra é encontrada no balanço das energias envolvidas neste processo.

Quatro energias básicas estão envolvidas no ferromagnetismo e a energia total e dada por (FARIA; LIMA, 2005):

$$E_T = E_{troca} + E_{magnetostática} + E_{magnetocristalina} + E_{magnetostrição} \quad (8)$$

Onde:

E_{troca}: Forças eletrostáticas são, geralmente, muito mais intensas que forças magnéticas de interação. A força eletrostática de repulsão entre dois elétrons, separados $1\,\mathring{A}$, é muitas vezes maior que a força magnética proveniente do momento magnético intrínseco. A mecânica quântica fornece a explicação para estas interações eletrostáticas pela interação de troca.

De acordo com o princípio de exclusão de Pauli, dois elétrons não podem existir em um mesmo estado quântico, portanto devem ter momentos magnéticos intrínsecos contrários (spin antiparalelos). De maneira oposta, a repulsão eletrostática entre dois elétrons tende a manter os momentos magnéticos intrínsecos alinhados paralelamente.

Para os materiais ferromagnéticos, o equilíbrio destas forças, faz com que haja um momento magnético intrínseco resultante. Assim nos metais de transição, a relação entre a distância entre átomos vizinhos na rede cristalina e o raio da órbita dos elétrons na camada $3d$, favorece uma interação de troca com alinhamento paralelo dos momentos magnéticos intrínsecos.

$E_{magnetostática}$: É a energia associada ao campo magnético produzido por um ímã permanente é reduzida com a formação de domínios magnéticos. A redução de energia contida no campo magnético externo se dá na razão inversa do número de domínios magnéticos. Com um maior número de domínios magnéticos, o campo magnético fica mais confinado às vicindades dos ímãs, ou seja, ocupa uma menor região no espaço e, portanto, tem uma menor energia magnética. Assim, a formação de domínios magnéticos orientados aleatoriamente, leva um ímã permanente a um estado preferencial de menor energia.

$E_{magnetocristalina}$: Anisotropia significa ter diferentes propriedades em diferentes direções. Anisotropia magnetocristalina é a preferência dos imãs atômicos se orientarem segundo certos eixos cristalinos do material. O ferro se cristaliza no sistema cúbico e tem, por tanto, três eixos cristalográficos, como mostra a *Figura 2.6*.

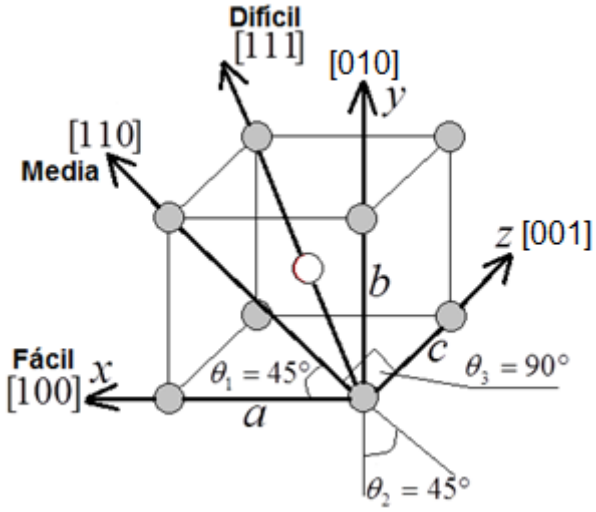

Figura 2.6 – Representação da estrutura CCC do ferro com os eixos dados pelos três índices de Miller.

Para movimentar os ímãs atômicos da direção preferencial (o eixo fácil) para o eixo menos favorável (difícil) é necessária uma considerável quantidade de energia. A diferencia de energia para a magnetização do cristal nestas duas direções é a energia anisotrópica magnetocristalina. Esta dificuldade de rotação dos momentos atômicos devido à anisotropia cristalina é a que possibilita a retenção da magnetização em certos materiais. A anisotropia é também a razão pela qual domínios em um material ferromagnético tornam-se magnetizados em certas direções quando este é resfriado abaixo de sua temperatura de Curie.

$E_{magnetostrição}$: Alguns materiais cristalinos sofrem uma tensão em sua rede cristalina quando submetidos a um campo magnético e mudam de dimensões para aliviar as tensões. Por outro lado, um material ferromagnético sob tensões tem sua magnetização afetada, assim como outras propriedades magnéticas. Este fenômeno é denominado magnetostrição. O material pode sofrer um aumento ou uma contração de seu comprimento se a magnetostrição for positiva ou negativa, respectivamente. O ferro tem magnetostrição positiva enquanto que a do níquel é negativa. As energias de magnetostrição e anisotrópica estão inter-relacionadas uma vez que, a anisotropia cristalina depende do estado de deformação da rede cristalina. Assim, um cristal se

deforma espontaneamente caso isto diminua sua energia anisotrópica. A energia de magnetostrição é definida como sendo zero para uma rede cristalina não tensionada.

Um sistema sempre tende para o estado de menor energia e, para que a energia de um material ferromagnético seja mínima, deve haver formação de domínios magnéticos em seu interior. Assim, a energia de troca será minimizada quando todos os momentos de dipolo atômicos estiverem alinhados paralelamente. Por outro lado, a energia de um campo magnético produzido pelo material, ou energia magnetostática, será mínima quanto menor for este campo externo. A energia anisotrópica será minimizada quando a magnetização for feita em certas direções cristalográficas, chamadas de fácil magnetização. Finalmente, a energia associada à deformação de um corpo, provocada pela ação de um campo magnético (magnetostrição), será minimizada quando o material estiver orientado de tal maneira que ocorrerão mudanças em suas dimensões ao longo do eixo de magnetização.

2.5.3 Paredes de domínio e processo de magnetização

Entre dois domínios adjacentes com direções de magnetização que diferem de um ângulo θ, existe uma região intermediaria, de largura finita, conhecida como *parede de domínio*. A transição entre dois domínios magnéticos com orientações opostas não se dá abruptamente como mostra a *Figura 2.7*.a.

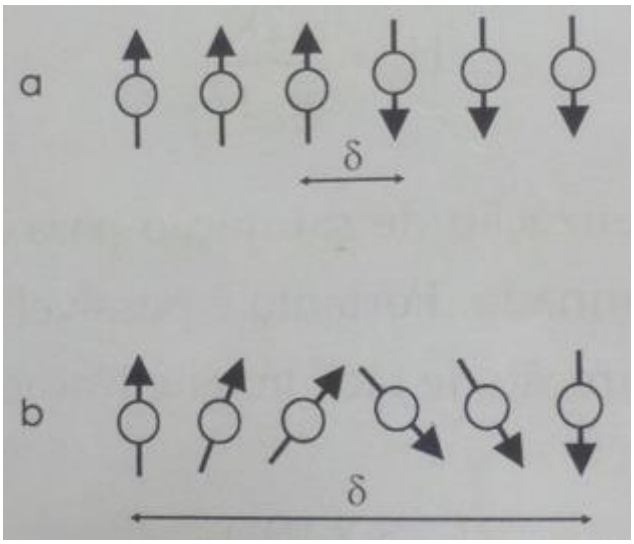

Figura 2.7 – Representação da transição dos momentos magnéticos na interface entre dois domínios com polarização oposta (completa inversão de $180°$): a) transição abrupta dos dipolos magnéticos e b) transição suave com um comprimento δ maior (FARIA; LIMA, 2005).

A subdivisão em domínios não prossegue indefinidamente, mais uma vez por considerações energéticas. A formação de interfaces (paredes) entre os domínios conduz a um aumento de energia, devido à anisotropia magnética e à interação de troca. Isto ocorre porque a energia de anisotropia é mínima para uma direção paralela à direção original de magnetização dos domínios, enquanto a energia de troca é mínima para um alinhamento paralelo dos momentos.

A largura da parede de domínio é definida pela competição entre a energia de anisotropia e a energia de troca; a primeira é reduzida para paredes estreitas, e a segunda, para paredes largas. Como exemplo de larguras de paredes, temos $50nm$ para paredes de domínio de $90°$ em ferro, e $15nm$ para paredes de $180°$ em cobalto.

As paredes de domínio são também chamadas paredes de Bloch, embora essa denominação seja usada mais especificamente para um tipo de parede na qual a magnetização gira fora do plano das magnetizações dos domínios vizinhos *Figura 2.8*.a. A parede na qual os momentos giram no mesmo plano é chamada parede de Néel *Figura 2.8*.b.

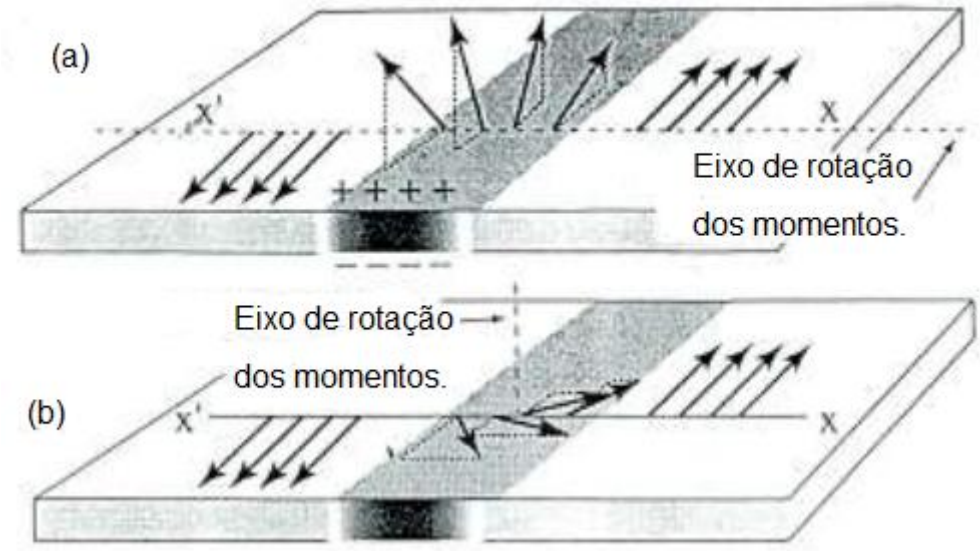

Figura 2.8 – Estrutura de parede de domínio de $180°$: a) Parede de Bloch e b) Parede de Néel.

Um material ferromagnético que foi aquecido acima de T_C e resfriado, apresentará a formação de domínios magnéticos e, se submetido a um campo magnético, os domínios que estiverem na mesma direção do campo aplicado crescerão à custa dos que não estiverem assim orientados. Para que isto ocorra deverá haver uma movimentação das paredes de Bloch dentro do material magnético. Esta movimentação depende da intensidade do campo aplicado e, também, das caraterísticas do material.

Precipitados no material ferromagnético tendem a dificultar a movimentação das paredes de Bloch. Isto, combinado com a anisotropia magnetocristalina do material, leva a um fenômeno denominado histerese magnética.

A magnetização (M) ocorre quando um campo magnético é aplicado ao material e, conseqüentemente, ocorre um alinhamento dos momentos magnéticos, que também gera um campo magnético. No caso dos materiais diamagnéticos este campo é pequeno e tende a reduzir o campo aplicado. Para os paramagnéticos este campo também é pequeno, mas vem se somar ao campo externo. Nestes dois casos, se o campo aplicado não for muito elevado, o comportamento magnético será linear e dado por:

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \tag{9}$$

Já para os materiais ferromagnéticos, que possuem um momento de dipolo substancial, o campo gerado com o alinhamento de todos os domínios magnéticos na direção do campo aplicado produz um campo externo muito elevado. Neste caso o comportamento não é linear nem mesmo para valores bastante pequenos de H e a susceptibilidade depende do campo aplicado.

Ao se aplicar um campo magnético a um material, o campo resultante (B) é a soma do campo aplicado (H) com o campo do material magnetizado (M). A contribuição dada pelos materiais paramagnéticos é muito pequena, mas para os ferromagnéticos, esta contribuição é até mais importante que a do próprio campo magnetizante (H).

A *Figura 2.9* mostra uma curva de magnetização típica para um material ferromagnético. Esta curva é conhecida como *curva de magnetização inicial*.

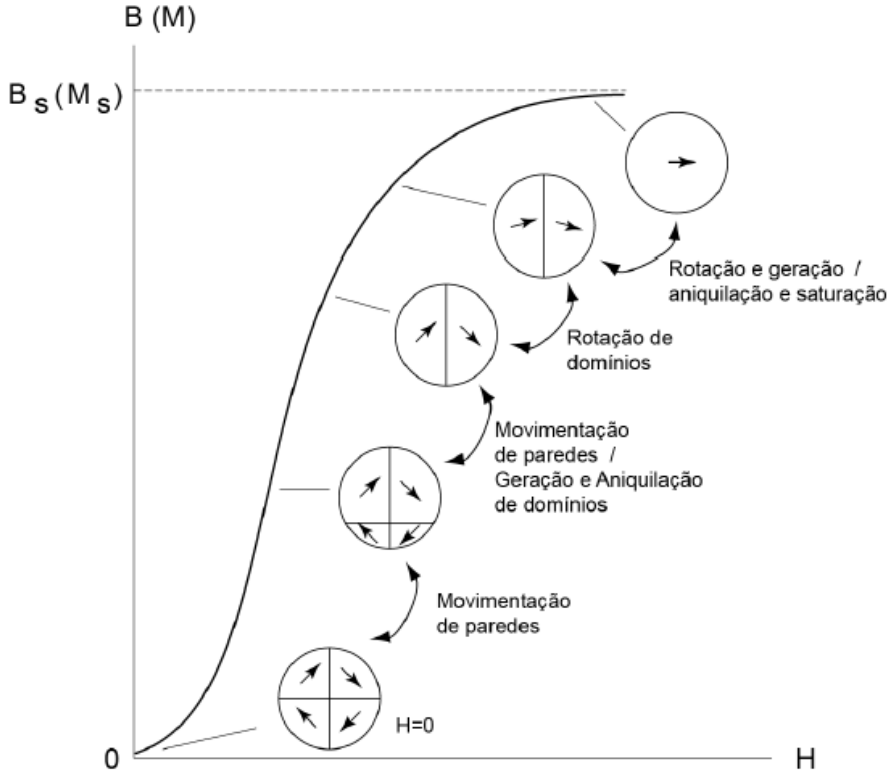

Figura 2.9 – Configuração dos domínios durante várias etapas da magnetização.

A indução não tem um comportamento linear em relação ao campo aplicado. As paredes de domínio orientadas aleatoriamente se deslocam como consequência do crescimento dos domínios orientados de forma favorável ao campo aplicado. Sendo assim, novos domínios são originados em quanto outros com direções de magnetização não favoráveis, são aniquilados. Posteriormente os domínios giram para se alinhar com a direção do campo aplicado e quando chegam à parte final da curva os poucos domínios restantes são aniquilados e o material se converte em um único domínio, que gira até alcançar um alinhamento total com a direção do campo aplicado.

A *Figura 2.9* descreve o processo desde a magnetização zero até a magnetização de saturação, a qual tem uma *indução de saturação* (B_S) associada.

Verifica-se que para valores maiores que $5000 A \cdot m^{-1}$ ocorre a saturação magnética do material. Para determinar-se a permeabilidade relativa num ponto qualquer da curva de magnetização divida-se o valor de B pelo valor correspondente de campo magnetizante multiplicado por μ_0. Repetindo-se este processo para vários pontos, verifica-se que a permeabilidade relativa cresce, passa por um máximo e decresce lentamente.

Tanto o processo de magnetização quanto a movimentação de paredes associada são afetados pela presença de tensões e defeitos na estrutura cristalina do material, tais como vacâncias, inclusões, partículas de segunda fase, discordâncias, defeitos pontuais e contornos de grão. Os defeitos, que atuam como barreiras na movimentação das paredes de domínio, são conhecidos como *pontos de ancoragem*.

Quando uma parede de domínio encontra um ponto de ancoragem no processo de magnetização, a energia requerida para se movimentar e ultrapassá-lo cresce. O processo continua até a parede encontrar um novo ponto de ancoragem na sua trajetória. Uma vez que a magnetização é retirada, inevitavelmente, os domínios não conseguem retornar a sua configuração original, fazendo com que a movimentação das paredes seja irreversível.

Conseqüentemente, o processo de magnetização é descontínuo e irreversível. Este processo está composto por pequenos saltos produzidos quando as paredes de domínio superam os pontos de ancoragem. Estes saltos de magnetização são conhecidos como o efeito Barkhausen.

2.5.4 Curvas de histerese magnética

Reduzindo-se a zero o campo magnetizante (H), após atingir a saturação magnética de um material ferromagnético, verifica-se que a densidade de fluxo (B) não se reduz a zero. O material permanece magnetizado com um campo magnético chamado remanência (B_r), como mostra a curva da *Figura 2.10*.

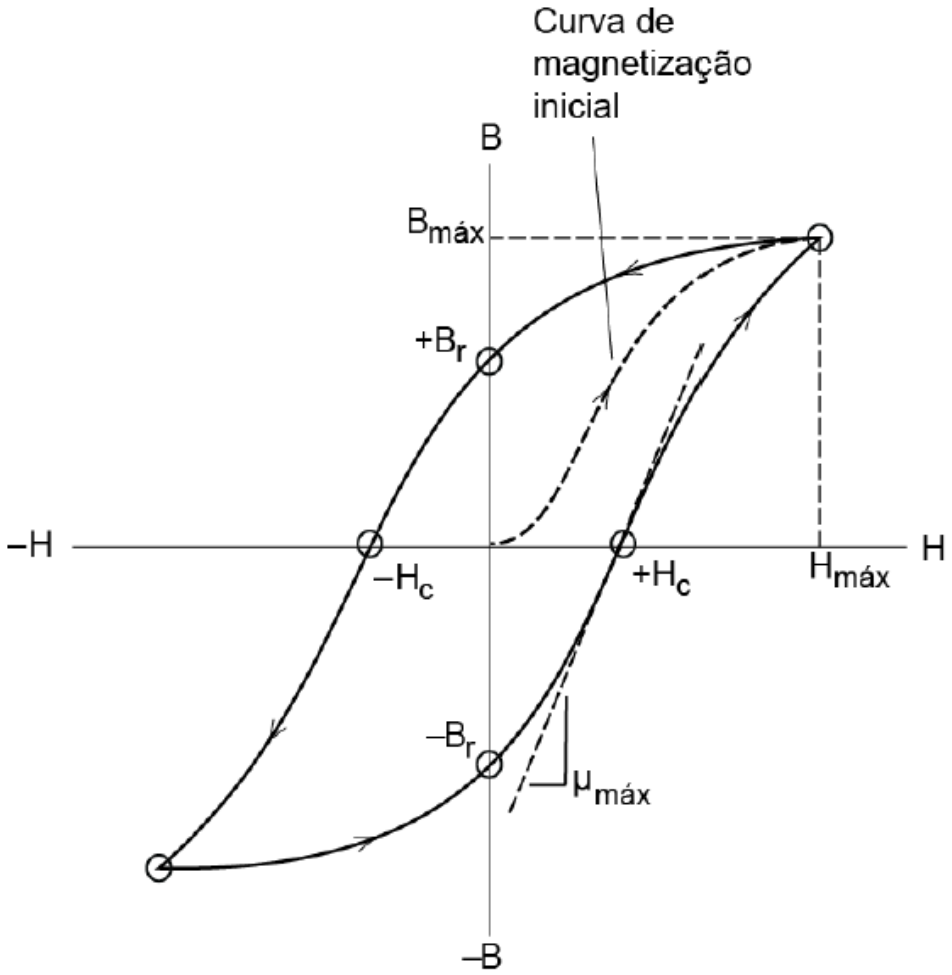

Figura 2.10 – Laço de histerese magnética.

A forma da curva é sensível a parâmetros como a intensidade do campo magnetizante, a frequência de magnetização, a temperatura, a microestrutura do material e a tensão, seja aplicada ou residual. A área dentro do laço de histerese magnética representa uma perda de energia.

Caso o material não esteja completamente saturado, este campo é chamado magnetização remanente ou densidade residual de fluxo magnético, ou ainda, retentividade. Assim, remanência é o máximo valor de campo que um material pode gerar. Para reduzir a remanência a zero é necessário aplicar ao material um campo contrário ou desmagnetizante $(-H)$.

O campo coercitivo ou desmagnetizante, necessário para reduzir a remanência a zero, é chamado coercividade indutiva $({}_bH_c)$. A curva no segundo quadrante é chamada *curva de desmagnetização* do material. Aumentando-se o campo desmagnetizante ainda mais, obtém-se uma magnetização com polaridade oposta e o processo todo se repete dando origem a uma curva fechada denominada ciclo de histerese do material. Para um ímã de qualquer volume, a energia que ele possui para magnetizar é proporcional ao produto $B \cdot H$, conhecido como produto de energia. O valor do produto de energia também é representativo da energia necessária para desmagnetizar o ímã permanente, então, quanto mais alto o produto de energia, mais duro o ímã.

Para alguns materiais de alta coercividade, aplica-se um campo magnético de alta intensidade, mas na forma de um pulso de curta duração, para realização do processo inicial de magnetização. Neste caso só é feito o ensaio magnético no segundo quadrante. Pode-se, também, ao invés do campo de indução magnética B, utilizar a magnetização M em função do campo H, dando origem à curva intrínseca do material. Isto é possível, pois, esses três campos estão relacionados pela equação fundamental do magnetismo (2). Neste caso a coercividade é chamada intrínseca e é representada pelo símbolo $({}_iH_c)$.

Materiais que possuem uma coercividade alta são denominados materiais *magnéticos duros* e dão origem aos ímãs permanentes. O nome advém do fato de que os primeiros ímãs permanentes foram os aços que também são mecanicamente duros. Materiais *magneticamente moles*, como o ferro, também

são mecanicamente mais moles que o aço e têm uma coercividade baixa. Na *Figura 2.11* pode-se ver o laço de histerese para cada um de estes casos.

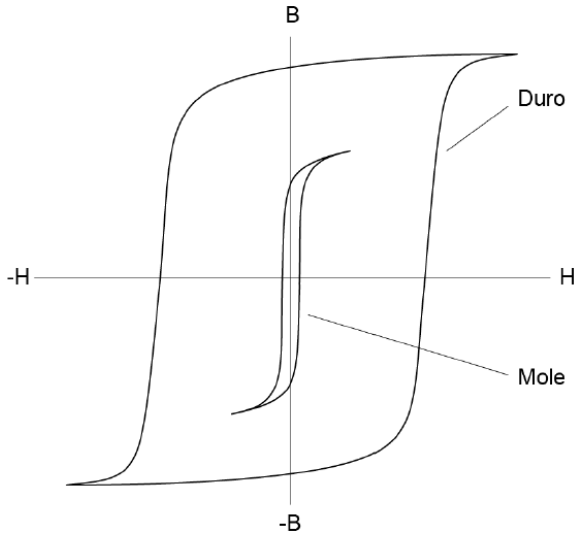

Figura 2.11 – Comparação entre os laços de histerese magnética para um material magnético duro e um material magnético mole.

Assim, para os ímãs permanentes uma melhoria em suas propriedades significa um aumento da remanência e, também, da coercividade, enquanto que, para os materiais magneticamente moles significa uma diminuição na coercividade.

Estas duas classes de materiais magnéticos encontram aplicações industriais importantes. Transformadores, motores e geradores de corrente alterna exigem de materiais com alta magnetização de saturação e a menor coercividade possível, enquanto que, alto-falantes, motores e geradores de corrente contínua, requerem ímãs permanentes com altos valores de remanência e coercividade.

3 Ruído Magnético de Barkhausen clássico e ensaio não-destrutivos

O Efeito Barkhausen é um fenômeno de mudanças descontínuas na densidade de fluxo B dentro de um material ferromagnético quando submetido a um campo magnético variável. Este foi descoberto inicialmente pelo cientista alemão Heinrich Barkhausen (BARKHAUSEN, 1919). Ele descobriu que, durante a magnetização de uma barra de ferro, pulsos de tensão elétrica de curta duração são induzidos em uma bobina enrolada em torno da barra. Esses pulsos foram detectados como cliques audíveis em um alto-falante.

A maioria dos eventos Barkhausen é produzida pelo movimento irreversível de paredes de domínio de 180°, e acontecem na região de maior inclinação da curva de magnetização (BECKER; W, 1939; CHIKAZUMI, 1997). No avanço do processo de magnetização, outros fatores começam a contribuir, movimento de paredes de 90°, rotação de domínios, e aniquilação de paredes. Assim que o processo se aproxima da saturação magnética, o movimento de paredes desaparece (JILES, 1988b). A localização do máximo de pulsos que compõem o RMB encontrasse pouco antes do campo coercitivo (JILES, 1989). A *Figura 3.1* mostra a evolução do Ruído Barkhausen durante um ciclo de histerese.

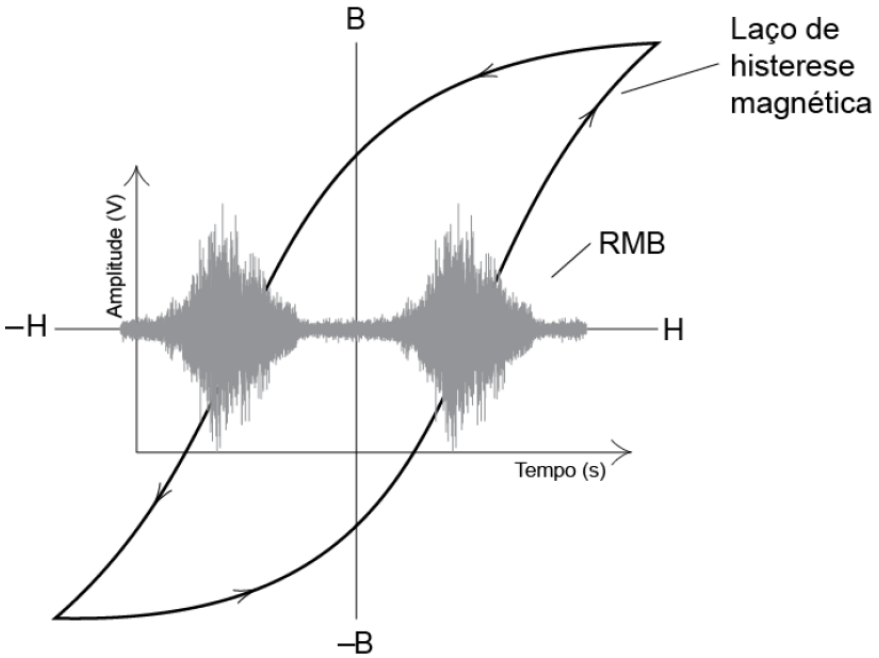

Figura 3.1 – Ruído Barkhausen e curva de histerese associada.

A análise estatística do sinal RMB pode fornecer informações sobre a interação entre as paredes de domínios e a configuração de tensões, deformações ou sobre a microestrutura do material.

Nos seguintes itens são apresentados resultados relevantes encontrados na literatura, sobre o comportamento do RMB na medição de diferentes efeitos produzidos no material, e relacionados com os temas estudados neste trabalho.

3.1 Configuração experimental para a obtenção do sinal RMB

A base de um sistema da medida de RMB é uma sonda que se compõe de um yoke eletromagnético, o qual produz o campo magnético alternado sobre a amostra, e uma bobina leitora que serve para detectar a sinal de RMB. A Figura 3.2 mostra um esquema do setup experimental de RMB.

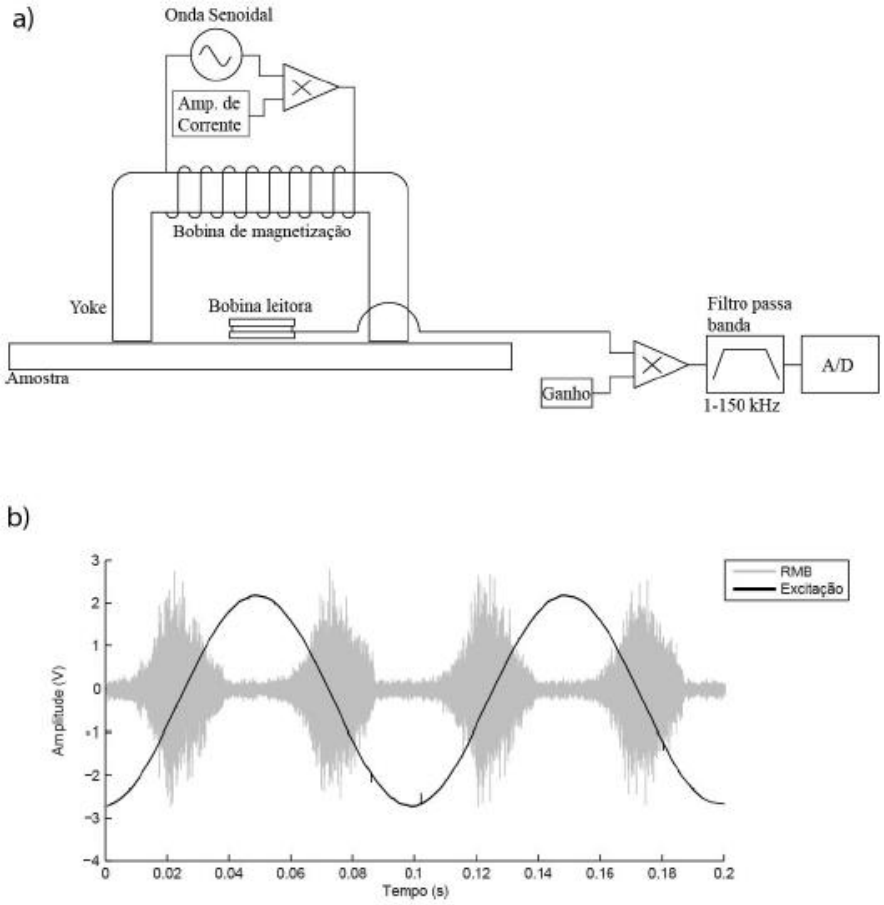

Figura 3.2 – Equipamento para ensaios RMB a) junto com os sinais de resposta típicos b).

Comumente, para captar essas descontinuidades de B, são utilizadas bobinas leitoras de indução como elementos sensores. Estas bobinas são constituídas por um enrolamento com grande número de voltas de fio condutor elétrico, usualmente de cobre. A sua voltagem lida é função de e está dada pela lei de indução de Faraday (TUMANSKI, 2007):

$$V = -n\frac{d\Phi}{dt} = -nA\frac{dB}{dt} = -\mu_0 nA\frac{dH}{dt} \tag{10}$$

Onde:

Φ: Fluxo magnético.

n: Número de voltas.

A: Área transversal.

Dado que a resposta da bobina é proporcional a dB/dt, elas não respondem a campos magnéticos DC. No caso de as bobinas serem utilizadas para obter a resposta magnética de um material, como no caso do RMB, o campo de excitação deve apresentar uma variação temporal, que pode ser produzida ao usar um campo alternante H_a com uma frequência f de variação do campo da forma:

$$H_a = H\sin(2\pi ft) \tag{11}$$

Assim, a bobina leitora é colocada perto da amostra durante o movimento das paredes do domínio, e então a mudança gerada na magnetização induz pulsos elétricos na bobina. Depois este sinal pode ser processado e analisado. A magnetização alternante, tipicamente com frequências entre $1Hz$ e $50Hz$, gera mudanças na estrutura magnética do material que acontecem na escala atômica, gerando transientes magnéticos em frequências superiores a $1kHz$, os quais são captados na superfície por uma bobina leitora, localizada entre os pólos do yoke. Devido às diferenças entre as frequências de excitação e resposta magnética é possível isolar o RMB mediante a amplificação e o uso de filtros passa-banda.

3.2 Análise do sinal de RMB

Diferentes métodos de análise de sinais podem ser utilizados para analisar os sinais de RMB. Por ser um sinal aleatório, não estacionário, deve ser tratado por cálculos estatísticos. O sinal geralmente é caracterizado mediante a obtenção de parâmetros seja no domínio do tempo ou da frequência.

3.2.1 Análise no tempo

Embora os sinais periódicos sejam melhor analisados no domínio da frequência, a análise no tempo provê parâmetros importantes para caracterizar o RMB. Mesmo uma análise visual do sinal no tempo é de muita utilidade no processo de medição.

3.2.1.1 RMS

O valor RMS (Root Mean Square) representa a raiz quadrada do valor quadrático médio em volts dos sinais Barkhausen ao longo do tempo. É um parâmetro estatístico usado para caracterizar a potência de um sinal AC, definido por:

$$RMS_{RMB} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(V_i - V_m\right)^2}{n-1}} \qquad (12)$$

Onde:

V_i : Valor da voltagem medida para a i-ésima observação.

V_m : Valor médio do sinal.

n : Número de observações ou pontos (tempo) do sinal.

Como o sinal de RMB é centrado em amplitude, o seja, tem média nula, o valor RMS é equivalente ao desvio padrão, e, portanto, representa uma medida do tamanho médio das flutuações ao redor da média.

3.2.1.2 Energia

A energia do RMB é outro parâmetro comumente usado para caracterizar o sinal de Barkhausen no tempo. Está definida como a integral do quadrado do sinal (V_{RMB}) relativa ao tempo (CLAPHAM et al., 1995; KRAUSE; CLAPHAM; ATHERTON, 1994):

$$RMB_{energy} = \int (V_{RMB})^2 \cdot dt \tag{13}$$

Outra forma mais representativa de escrever a equação anterior é (14), na forma discretizada é:

$$RMB_{energy} = \sum_{i=1}^{n} V_i^2 \cdot \Delta t \tag{14}$$

Onde:

V_i : Valor da voltagem medida para a i-ésima observação.

Δt : Intervalo de tempo entre os pontos do sinal, neste caso o inverso da frequência de amostragem.

n : Número de pontos do sinal.

Geralmente é feita uma normalização do valor de RMB_{energy} em relação ao número de pontos do sinal. Isto permite comparar parâmetros de sinais gerados com diferentes frequências de excitação ou diferentes tamanhos de janela.

3.2.1.3 Envolvente

O sinal RMB consiste de componentes de alta frequência cuja variação dinâmica em amplitude acontece com uma frequência muito menor. A curva que modula a amplitude é conhecida como a envolvente do sinal. A forma de descrever a envolvente do RMB é mediante a curva obtida ao unir seqüencialmente todos os pontos, entre picos consecutivos, na parte positiva do sinal. O processo da obtenção da envolvente começa com o cálculo do quadrado do RMB para deixar toda a informação na parte positiva do gráfico. Após calcular o envelope é necessário utilizar um filtro passa baixa (utilizando certa taxa de decimação), para eliminar as frequências altas do envelope e, assim, recuperar um envelope mais liso. Para manter o sinal na escala certa, é aplicado um ganho e posteriormente é calculada a raiz quadrada.

A Figura 18 ilustra o sinal resultante, o qual constitui a envolvente do RMB.

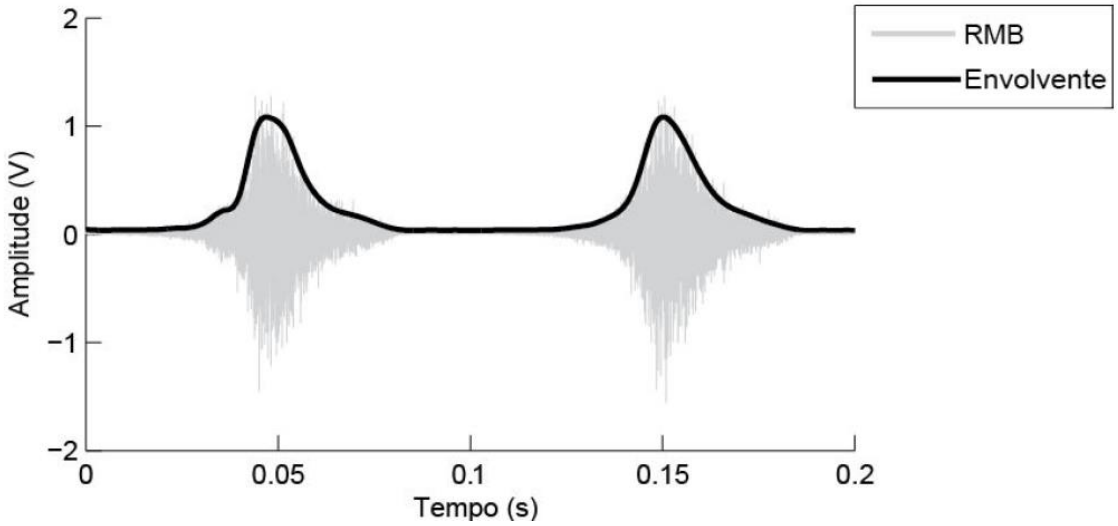

Figura 3.3 – Envolvente do sinal RMB registrado durante um ciclo de magnetização.

Do gráfico do envelope são calculados principalmente dois parâmetros: Amplitude pico: relativo ao valor máximo do envelope, e Posição pico: localização do valor máximo em relação à corrente, ou campo aplicado (MOORTHY; SHAW; HOPKINS, 2006; STUPAKOV et al., 2007).

A metodologia descrita para o cálculo da envolvente é a maiormente escolhida pela facilidade de processamento para a obtenção do resultado em tempo real, já que o sinal RMB, que consta de um número de pontos na ordem de 10^4 com componentes de frequência entre $2kHz$ e $200kHz$. No entanto existem outras abordagens mais tradicionais, tais como o uso de operações matemáticas como a transformada de Fourier ou a transformada de Hilbert (FANG; XIE, 1995). Ambos os métodos são amplamente usados, porém devido a seu requerimento computacional, seu uso se ajusta melhor a uma análise off-line.

3.2.2 Análise no domínio da frequência

Os componentes de frequência do RMB podem ser descritos em termos da densidade espectral de potência $S(f)$, dada pela transformada de Fourier da sua função de autocorrelação $R(\tau)$, como indicado pela expressão:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \tag{15}$$

Uma visualização simultânea do RMB e a sua densidade espectral de potência, são ilustradas na *Figura 3.4*.

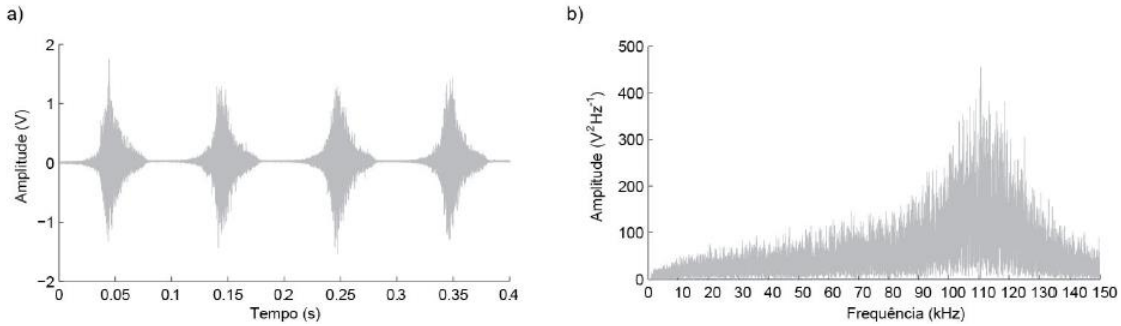

Figura 3.4 – Sinal RMB representado no domínio do tempo a) e da frequência b).

A análise do RMB no domínio da frequência é uma ferramenta bastante útil tanto para a escolha da faixa de frequência de aquisição de dados, como para a detecção de possíveis interferências eletromagnéticas durante a execução das medições, ás vezes difíceis de apreciar no domínio do tempo.

3.3 Fatores que afetam o sinal RMB

O objetivo desta seção é apresentar brevemente alguns dos principais fatores que afetam o sinal RMB, utilizando referências selecionadas.

O sinal RMB depende de vários fatores, amplitude máxima do campo magnetizante, a distância entre os pólos do yoke, a sensibilidade da bobina leitora usada, o estado de tensões mecânicas da amostra assim como uma variedade de características microestruturais, que muitas vezes podem mudar simultaneamente.

3.3.1 Frequência de magnetização

A equação (1) estabelece a relação entre a corrente que circula através de um solenóide e o campo magnético produzido no seu interior. Quando a corrente muda de polaridade no tempo, o campo magnético obtido no interior é alternante (dB/dt). Sendo assim, quando um campo magnético alternante entra em um material condutor, como no caso da técnica RMB, um fluxo circular de elétrons é gerado ao redor das linhas de campo entrantes, denominado como *correntes parasitas*. As correntes parasitas, por sua vez geram um campo magnético dentro do material oposto ao campo inicial. Desse modo, o campo dB/dt é amortecido dentro do material, atenuando as emissões de RMB. Quanto maior a frequência de excitação magnética, maior a atenuação.

A profundidade desde a qual os valores dos sinais decaem a uma fração de $1/e$ (onde e é o número neperiano) até a superfície está dada pela seguinte equação (CHIKAZUMI, 1997; JILES, 2000).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \tag{16}$$

Onde:

δ : Profundidade eletromagnética (m).

f : Frequência do sinal.

σ : Condutividade do material.

μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo.

μ_r : Permeabilidade relativa do material.

A profundidade é denominada *profundidade de pele*. Para um aço com $\mu_r \approx 50-5000$ e $\sigma = (5-10)\times 10^6 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, a profundidades de pele, obtidas em função de várias frequências de magnetização podem ser vista na *Tabela 3.1* (Adaptada de (JILES, 2000)).

Tabela 3.1 – Faixa de profundidade de pele relativa à frequência de excitação em materiais ferrosos.

Frequência de emissão (kHz)	**Faixa de profundidade δ (mm)**
0.01	0.71-10
0.05	0.31-4.5
0.1	0.22-3.2
0.5	0.1-1.4
1	0.07-1
5	0.03-0.45
10	0.022-0.32
50	0,010-0.14
100	0.007-0.10
500	0.003-0.045

De qualquer jeito, sempre que se aplique um campo magnético suficientemente intenso, na superfície da amostra com uma frequência de excitação relativamente baixa, os sinais obtidos somente conterão informação das camadas mais próximas da superfície (MOORTHY; SHAW; HOPKINS, 2006).

Estudos conduzidos em amostras de aço EN36 (cementado para obter uma porcentagem em peso de Carbono de 0.85% com profundidade de camada de

$1mm$ e posteriormente temperado em óleo desde os $900C°$), avaliou o uso de diferentes frequências de magnetização para a detecção de tensões residuais. Foi reportado que o uso de frequências de excitação altas pode ser empregado para avaliar mudanças nas tensões residuais em camadas próximas da superfície do material (profundidade $< 300\mu m$). Entretanto as frequências baixas podem ser usadas para obter informações da distribuição das tensões residuais em camadas mais profundas (profundidade $> 300\mu m$) (MOORTHY; SHAW; HOPKINS, 2006).

Em um estudo diferente, utilizando o mesmo material, quantificou-se tanto a grandeza da frequência magnetização como a profundidade da emissão RMB associada. Neste último trabalho, uma frequência de excitação de $125Hz$ é definida como alta e uma frequência de excitação de $4Hz$ como baixa. Usando essas frequências de excitação, foi possível obter informação dos efeitos da têmpera em camadas localizadas a profundidades aproximadas de $100\mu m$ e $425\mu m$ respectivamente. Adicionalmente foi comprovado que a frequência de magnetização tem impacto no nível do RMB obtido. A $4Hz$, a faixa de frequência de resposta do RMB esteve entre $10kHz$ e $2000kHz$, no entanto para a magnetização a $125Hz$, a frequência de resposta esteve entre $1kHz$ e $20kHz$ (MOORTHY; SHAW; EVANS, 2003).

Em outros estudos, relacionados com tensões aplicadas e residuais produzidas por flexão no mesmo tipo de aço, os resultados amostram que, sinais de RMB produzidos com campos de excitação de baixa frequência $0.2Hz$, podem revelar comportamentos da tensão em regiões superficiais e sub-superficiais do material. Neste caso, não foram analisadas as bandas de frequência do sinal, e sim, a evolução dos diferentes picos que aparecem no envelope. Foi relacionado à aparição de um segundo pico com informação proveniente de profundidades maiores no material (MOORTHY; SHAW; DAY, 2004).

3.3.2 Efeito da Quantidade de Carbono e partículas de segunda fase

As variações de composição também influenciam o sinal RMB. Observou-se variações no sinal RMB devido a transformações de fases, como precipitação de carbetos ou segregação de impurezas intergranulares após tratamento térmico em aços carbono (KAMEDA; RANJAN, 1987).

Investigações com aços carbono da série AISI 10xx, mostraram como o sinal RMB varia com o teor de carbono devido ao aumento do número de pontos de ancoragem provocado pelos carbetos. As lamelas de carbetos provocam maior ancoragem das paredes, quando comparadas aos carbetos esferoidizados. Também se observou que após dos tratamentos térmicos, a perlita, bainita e martensita provenientes de um aço AISI 4340 apresentam diferenças nos sinais RMB obtidos (JILES, 1988a, 1988b).

Em outro estudo Moorthy comparou a resposta do valor pico do RMB em relação à microdureza resultante em três corpos de prova, o primeiro nas condições do cementado, os outros dois, revenidos utilizando diferentes condições, a 192°C por 2h e a 250°C por 4h. O resultado foi uma tendência linear da diminuição do valor pico do RMB com o aumento da dureza (MOORTHY; SHAW; EVANS, 2003). A cementação certamente favorece o endurecimento na superfície das amostras mediante o aumento do teor de carbono.

Esta característica, foi estudada, utilizando amostras de quatro tipos de aço comercial (1005, 1020, 1045, 1070) reportou que o RMS_{RMB}, em relação ao teor de carbono, não tem um comportamento linear (CAPÓ-SÁNCHEZ et al., 2004). Este parâmetro aumenta com o teor de carbono, atingindo um máximo para posteriormente sofrer uma queda.

O comportamento inicial, para os aços 1005 e 1020, foi atribuído ao teor de ferrita, que facilita a movimentação dos domínios devido a uma menor densidade de pontos de ancoragem, dessa maneira obtendo um sinal RMB baixo. Na medida em que o teor de carbono aumenta, como no caso do aço 1045, também aumenta a quantidade de perlita no material, acrescentando

assim a densidade de pontos de ancoragem. Dessa maneira, o deslocamento das paredes de domínio produz saltos de RMB de maior amplitude. No caso do aço 1070, com o alto teor de perlita a densidade de pontos de ancoragem é maior, porém a energia potencial dos pontos de ancoragem também aumenta, de maneira tal que não podem ser facilmente ultrapassados pelos domínios em deslocamento, produzindo uma queda no sinal RMB.

A interação entre o sinal RMB e defeitos internos do material, bem como o teor de carbono em aços e mostrado em (PÉREZ-BENITEZ et al., 2005; PEREZ-BENITEZ; PADOVESE, 2010). A técnica do RMB também foi utilizada em conjunto com outras técnicas como ultrassom e correntes parasitas para a detecção de fases deletérias em aços inoxidáveis duplex (NORMANDO et al., 2010).

3.3.3 Intensidade de magnetização

O comportamento do parâmetro RMB_{energy} na medição de tensão, foi estudado comprovando-se um aumento da amplitude do sinal com o aumento da frequência de magnetização. Com o aumento da frequência de magnetização o número de saltos das paredes de domínio por unidade de tempo aumenta (HALLER; KRAMER, 1970; HIGUCHI, 1974). Portanto a amplitude do sinal e consequentemente do parâmetro RMB_{energy} aumenta.

Em estudos realizados em aços carbono, demonstrou-se que conforme a intensidade do campo magnético aplicado é aumentada, a voltagem também aumenta, porém atinge um máximo e começa a decrescer e até chegar à saturação magnética (DHAR; ATHERTON, 1992). Este comportamento foi explicado pelo mecanismo de movimentação de domínios sob a influência de campos magnéticos de baixa intensidade, no qual, na medida em que o campo aumenta, as paredes de domínio atingem a energia suficiente para ultrapassar os pontos de ancoragem. A movimentação de paredes desaparece sob a influência de campos maiores e o mecanismo de magnetização predominante nesse ponto é a rotação de domínios.

3.3.4 Tamanho de grão

O RMB foi utilizado para analisar tamanho de grão (ANGLADA-RIVERA; PADOVESE; CAPÓ-SÁNCHEZ, 2001). As paredes de domínio estão sempre confinadas dentro de um mesmo grão com mesma orientação cristalográfica. Sendo assim, os contornos de grão acabam sendo uma barreira intransponível para a movimentação das paredes de domínio (CAPÓ SÁNCHEZ; DE CAMPOS; PADOVESE, 2012; DELGADO JÚNIOR, 2010; FRANCO, 2010).

Também se investigou o efeito do tamanho de grão no RMB, observando-se que os contornos de grão atuam como pontos de ancoragem das paredes de domínio (BERTOTTI; FIORILLO; MONTORSI, 1990). Materiais com tamanho de grão maior a emissão de RMB diminui. Tal diminuição se deve ao fato de que ao aumentar o tamanho do grão, ocorre uma redução do número de lugares para nucleação das paredes de domínio, também há uma redução do número de pontos de ancoragem que servem parar o movimento das paredes de domínio, o que reduz a emissão de RMB (DELGADO JÚNIOR, 2010; FRANCO et al., 2013). Ou seja, o número de paredes de domínio ativas diminui quando o tamanho de grão aumenta, gerando assim menos sinal (ruído).

Em outro estudo confirmou-se que um grande número de contornos de grão resulta em emissões RMB mais intensas. Amostras com pequeno tamanho de grão apresentam sinais RMB de maior amplitude devido à atuação dos contornos como pontos de ancoragem (NG et al., 2003).

Em outro trabalho sugeriu-se que o número de paredes de 180° aumenta na presença de tensões trativas, e analisou-se matematicamente a energia magnetoelástica nessas condições. Deduziu-se uma tensão limite que depende do tamanho do grão e que aumenta com o número de paredes de domínio existentes. Concluiu-se então que a intensidade do RMB e fortemente relacionada com o tamanho do grão e com os contornos de grão (KRAUSE et al., 1996).

Novos avanços na idéia de que a interação entre paredes de domínio e os emaranhados de discordância tem uma influência maior no perfil do sinal RMB do que a interação entre as paredes de domínio e os contornos de grão (NG et

al., 2003). Os pesquisadores concluíram essa afirmação devido ao aparecimento de picos secundários nos sinais RMB.

O tamanho do grão influencia o número de defeitos na amostra e também as propriedades magnéticas (SAKAMOTO; OKADA; HOMMA, 1987). Em outro estudo mostrou-se que o número de pulsos RMB e inversamente proporcional ao tamanho do grão no Ni recozido (RANJAN et al., 1987).

Também se reportou uma diminuição no sinal RMB quando o tamanho de grão aumentou em amostras ferrosa se aço com diferentes tamanhos de grão (GATELIER-ROTHEA et al., 1998; TIITO; OTALA; S¨AYN¨AJ¨AKANGAS, 1976).

No caso de presença de perlita, a emissão de RMB apresente diferença em relação a ferrita. Na ferrita o tamanho de grão tem grande influência devido ao fato de que os contornos de grão atuam como barreiras na movimentação das paredes de domínio, já na perlita o formato de lamelas no qual ela se apresenta na microestrutura dos materiais agem como pontos de ancoragem, fazendo com que as paredes de domínio necessitem de maior energia para se movimentarem o que consequentemente aumenta a amplitude da emissão de RMB em relação à ferrita (APAZA HUALLPA, 2011; DELGADO JÚNIOR, 2010; FRANCO, 2010).

3.3.5 Medições de tensão mecânica usando RMB

Devido à alta sensibilidade a tensões, o RMB pode ser usado como técnica não-destrutiva para a avaliação de tensões e deformações elásticas.

Os obstáculos também são influenciados pela tensão (STEFANITA; CLAPHAM; ATHERTON, 2000). Efeitos de deformação elástica influenciam mais o RMB do que efeitos de deformação plástica (STEFANITA; ATHERTON; CLAPHAM, 2000). De forma que, o sinal RMB associado com a movimentação das paredes de domínio e mais intenso na direção da tensão trativa do que na direção da tensão compressiva (KRAUSE et al., 1996).

A aplicação de tensões de tração alinha os domínios magnéticos no sentido da tensão, e favorecem o aumento dos sinais do RMB; enquanto que tensões de compressão alinham os domínios magnéticos em direção perpendicular a tensão aplicada, gerando níveis de RMB menores. Isto é devido ao efeito magnetomecânico, e o RMB e sensível a mudança na anisotropia magnética resultante do efeito de tensões (ANGLADA-RIVERA; PADOVESE; CAPÓ-SÁNCHEZ, 2001; CAPÓ-SÁNCHEZ; PÉREZ-BENITEZ; PADOVESE, 2007; JILES, 1989; PÉREZ-BENITEZ; CAPÓ-SÁNCHEZ; PADOVESE, 2007).

Essa tendência geral pode ser invertida em algumas situações. Estudos do efeito da flexão em aços de baixa liga (BLAOW; EVANS; SHAW, 2004, 2005b), encontraram comportamentos diferentes do RMB. Os picos altos do envelope do RMB aumentaram com a tensão de tração até o início da deformação plástica. Enquanto em compressão o comportamento foi mais complexo; inicialmente foi observado um decréscimo dos picos altos, e com tensões maiores, os valores de RMB começam a aumentar com a geração de um segundo pico. A explicação da aparição dos picos duplos, foi dada em relação ao favorecimento do movimento das paredes de domínios de 90° por tensões de compressão. Ainda assim, não é sempre que surgem picos duplos em tensões de compressão. Portanto, a ocorrência ou não desse fenômeno depende da composição e do tratamento térmico do material.

Também, em trabalhos mais recentes (BLAOW; EVANS; SHAW, 2005a), foram feitas análises do RMB em materiais com 4 microestruturas diferentes. Nesses resultados, em algumas das amostras, aparecem três picos no envelope do sinal quando são aplicadas tensões de compressão. Nenhuma explicação foi dada para o fato que o perfil multi-pico fosse gerado somente em algumas das microestruturas estudadas. Sustenta-se, que a causa dos outros dois picos no sinal de RMB, pode ser devida à nucleação e aniquilação de domínios.

Em outros estudos (MOORTHY; SHAW; DAY, 2004; MOORTHY; SHAW; HOPKINS, 2006), é apresentado uma análise da resposta do RMB em duas amostras endurecidas superficialmente, e submetidas a tensões de flexão. Os resultados mostram a evolução de dois picos no envelope do sinal, sendo mais notado o primeiro pico na amostra que foi menos afetada pelo processo de endurecimento. Assim a explicação da diferencia entre os comportamentos dos

dois picos em cada uma das amostras, é justificado pela variação das características mecânicas do material que, neste caso, seria a geração de um perfil de dureza.

3.3.6 Efeito da deformação plástica no RMB

O efeito que as discordâncias têm na configuração dos domínios magnéticos pode ser confirmado pelas abruptas e complexas variações nos parâmetros do sinal RMB, bem como na distribuição de altura de pulso, características do estágio primário da deformação plástica, chamado *microescoamento*, que ocorre com o início da formação de discordâncias em alguns grãos (MOORTHY et al., 1999; STEFANITA; CLAPHAM; ATHERTON, 2000).

A maioria dos trabalhos encontrados (ALBERTERIS CAMPOS et al., 2008; BALDEV et al., 2001; DHAR; CLAPHAM; ATHERTON, 2001; HWANG; KIM, 1988; KRAUSE et al., 1996; MANDAL; CRAMER; ATHERTON, 2000; MOORTHY et al., 1999; SABET-SHARGHI et al., 2000; STEFANITA; ATHERTON; CLAPHAM, 2000) mostram o seguinte comportamento nos resultados: as amplitudes do RMB aumentam conforme aumenta a deformação plástica, atingindo um valor máximo em certo nível de deformação. Depois, ainda aumentando os níveis de deformação, as amplitudes de RMB começam a diminuir e finalmente saturam em valores baixos.

O fenômeno é justificado da seguinte forma: apesar do aumento das discordâncias em níveis baixos de deformação, as quais atuam como pontos de ancoragem para o movimento de paredes de domínio, estas conseguem ultrapassá-las, produzindo RMB. Com o progresso da deformação, atingindo o regime plástico, as discordâncias se arranjam em “emaranhados” criando pontos de ancoragem muito fortes que as paredes de domínio não conseguem vencer, e o RMB diminui (STEFANITA, 2008).

Geralmente são as tensões locais as que geram as discordâncias e o mecanismo de interação destas com as paredes de domínios (SABLIK et al.,

2008; SONG. Y. Y, 2000). Esta interação depende do tipo de parede de domínio (SEEGER et al., 1964).

As paredes de domínio de tipo II (180º) separam domínios cujas magnetizações são antiparalelas uma com relação à outra. Para este caso como a tensão por magnetoestricção é independente do sentido da magnetização, não existe diferença na tensão num domínio com relação a outro. Para outros ângulos entre os domínios o movimento das paredes provoca uma mudança no valor da energia local devido às tensões. Estas paredes são chamadas de Tipo-I e é por isso que este tipo de parede interatua mais com os campos das tensões no material que as paredes de Tipo-II. O estado de tensões locais determinará tanto a posição quanto a energia associada às paredes de domínio de Tipo-I, mas a parede de Tipo-II continuará estática (KERSTEN, 1943).

As interações de longo alcance das paredes de Tipo-I com o campo das tensões fazem com que se movimentem menos e, portanto, se requer um campo magnético maior para seu movimento. Como resultado, as variações na magnetização para baixos campos magnéticos se devem, sobre tudo, ao deslocamento das paredes de Tipo-II.

Num estudo sobre RMB e campo de tensões ao redor de um defeito, demostrou-se que os campos de deformação criados na amostra promovem um aumento nos domínios magnéticos localizados em regiões de contorno de grão. Os sinais RMB nessas regiões têm maior probabilidade de serem mais intensos do que os provenientes de domínios magnéticos de menor tamanho, dentro dos grãos (PEREZ-BENITEZ et al., 2008).

As tensões residuais, sejam compressivas devido ao processo de laminação, ou nos contornos de grão ou entre os planos cristalográficos, também influi na anisotropia magnética das amostras e conseqüentemente no sinal RMB (CHIKAZUMI; SUZUKI; IWATA, 1960). Parâmetros como a energia do sinal RMB apresentam boa correlação com o nível de tensões residuais (CAPÓ SÁNCHEZ; DE CAMPOS; PADOVESE, 2012).

3.4 Anisotropia magnética

As propriedades magnéticas de um material dependem da direção onde e feita a medição, fenômeno conhecido como ***anisotropia magnética,*** caracterizada pela presença de eixos de fácil magnetização (CHIKAZUMI, 1997).

As variações na anisotropia magnética não se devem apenas as tensões residuais, ou a influência das discordâncias, que alteram a configuração dos domínios magnéticos, mas também devido à textura cristalográfica e heterogeneidades microestruturais (SIX; SNOEK; BURGERS, 1934; STEFANITA et al., 2001).

Os ensaios que analisam a distribuição de densidade de fluxo em relação à direção na amostra, com o intuito de avaliar a anisotropia magnética, em geral utilizam um sensor como o da *Figura 3.5*, onde uma bobina de magnetização enrolada em um núcleo ferromagnético é utilizada para aplicar um campo magnético no material e bobinas leitoras enroladas no yoke fornecem valores de voltagem induzida, utilizados para calcular os parâmetros densidade de fluxo e permeabilidade magnética.

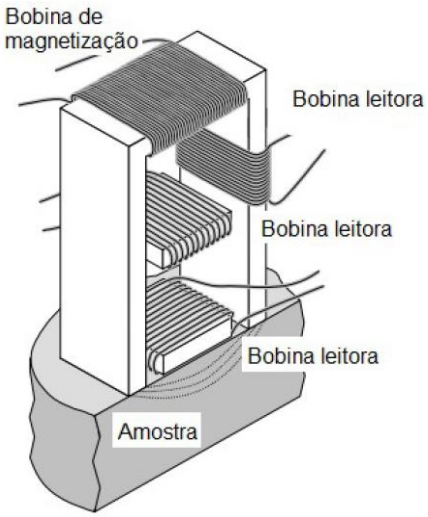

Figura 3.5 – Sensor utilizado em medidas de anisotropia direcional (BUTTLE; SHAW; MOORTHY, 2006).

3.5 RMB Contínuo

Em quase todas as aplicações do efeito RMB utilizam-se um campo magnético externo variável no tempo que excita os domínios magnéticos do material, dando como resultado a produção do RMB. Nesta metodologia clássica um eletroímã produz uma magnetização alternante entre os seus pólos enquanto uma bobina leitora é fixada sobre a superfície do material para captar a resposta magnética do mesmo. Portanto é considerado como uma Medição de Ruído Magnético de Barkhausen Estático (RMBE).

Por outro lado, foi criada uma nova técnica de medição do “Barkhausen contínuo” (RMBC) na qual a sonda é movimentada a velocidade constante sobre a amostra, e o Ruído de Barkhausen é monitorado de forma contínuo (CROUCH; BEUKER, 2004). Esta nova técnica foi utilizada, na inspeção de defeitos mecânicos em tubulações.

Imãs permanentes geram nas suas vizinhanças zonas de transição magnética. Quando são movimentados sobre materiais ferromagnéticos, fazem com que aquelas zonas que se aproximam do imã experimentem fluxos magnéticos que mudam de direção e amplitude. Estas mudanças do fluxo no material geram o movimento das paredes de domínios magnéticos, e conseqüentemente, sinais contínuos de RMB. A localização da bobina leitora foi escolhida baseada em uma análise por elementos finitos (CROUCH; BEUKER, 2004).

Um esquema da sonda que foi utilizada é mostrado na Figura *3.6*.

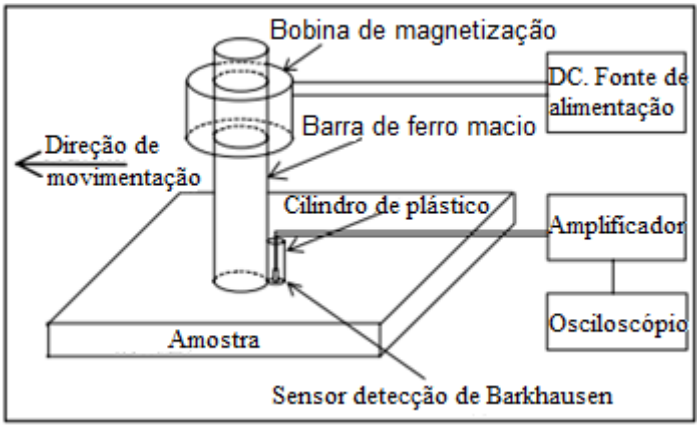

Figura 3.6 – Configuração da sonda utilizada na validação do RMBC (CROUCH; BEUKER, 2004).

Também em Desvaux et al., projetou-se uma instrumentação em tempo real para estimar o grau de tensões residuais na zona de contato entre as esferas e a pista de rolamento. Este método tem a vantagem de ser fiável e aplicável à geometria de anéis circulares (DESVAUX et al., 2004).

O método do RMBC foi posteriormente utilizado por Franco (2010) na sua tese de doutorado, corroborando algumas das observações de Crouch (2004), tais como o efeito da velocidade e a intensidade do campo na qualidade do RMB obtido. No trabalho, foi projetada uma sonda composta por um par de ímãs permanentes em conjunto com uma bobina, cuja localização foi escolhida com base em simulações por elementos finitos *Figura 3.7*.

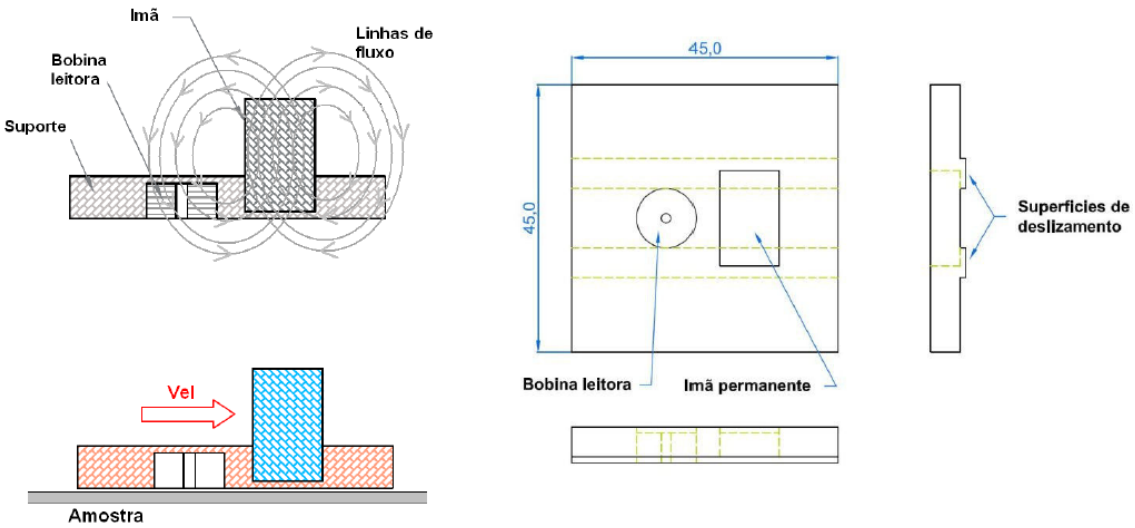

Figura 3.7 – Esquema da sonda RMBC confeccionada por (FRANCO, 2010).

A sonda foi utilizada em um conjunto de experimentos, considerados como preliminares devido às lacunas conceituais ao redor da técnica, que envolviam a identificação de aços com diferentes composições químicas, diferentes níveis de descarbonetação, a detecção de deformações plásticas, a detecção de falhas volumétricas e o mapeamento de tensões mecânicas. Neste trabalho obtiveram-se resultados de mapeamento de defeitos volumétricos, os quais foram posteriormente publicados (FRANCO; PADOVESE, 2009).

Posteriormente Ilker et al., usou-se uma sonda em movimento contínuo, com uma excitação altamente cíclica (em torno das centenas de Hz), que permite

inspecionar tensões residuais inseridas no processo de solda (ILKER YELBAY; CAM; HAKAN GÜR, 2010).

Em outro trabalho mais recente foi desenvolvida uma técnica de END magnéticos baseada no efeito Barkhausen, denominada de Ruído Magnético de Barkhausen Contínuo Rotacional (RMBCR). Esta técnica foi utilizada de maneira satisfatória para realizar medições de anisotropia magnética de alta resolução angular, em tempo real, ultrapassando as limitações técnicas do RMB clássico (MORGAN, 2013). O esquema do dispositivo experimental é ilustrado na *Figura 3.8*.

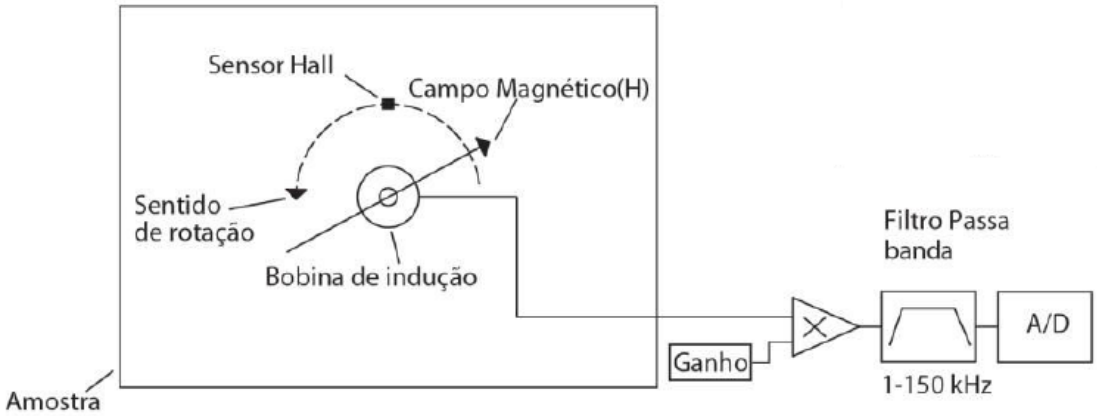

Figura 3.8 – Esquema da sonda de RMBCR (MORGAN, 2013).

Neste trabalho foi possível obter parâmetros, tais como, a orientação do eixo de fácil magnetização, utilizando um processamento de sinais que requer somente alguns décimos de segundo (MORGAN, 2013). O método RMBCR utiliza uma magnetização rotacional de valor fixo, fornecida por um par de ímãs permanentes. Não é necessário o uso de amplificadores de corrente na configuração experimental, fazendo com que o consumo energético do equipamento RMB seja consideravelmente baixo. A configuração experimental do método RMBCR é muito simples quando comparada com outros métodos utilizados para gerar magnetização rotacional, tais como arranjos de eletroímãs ortogonais.

Neste trabalho conclui-se que os sinais de RMBCR são afetados pelo ângulo de atraso – associado a processos de magnetização rotacional. No entanto, a

sonda RMBCR oferece a possibilidade mudar tanto a frequência de excitação, quanto a intensidade da mesma, para compensar este atraso. Foi determinado experimentalmente, que a faixa de frequências de magnetização mais adequada para obter os sinais RMBCR, está entre os $5Hz$ e os $20Hz$ (MORGAN, 2013).

Também se demostrou que o comportamento dos parâmetros RMBCR, em relação à tensão, foi coerente com resultados de medições angulares de RMB clássico, reportados na literatura para versões discretas do mesmo tipo de carregamento. Outra conclusão importante foi que os parâmetros de proporção, de energia e de forma, indicaram que as mudanças de anisotropia magnética que ocorrem durante o processo podem ser utilizadas para identificar diferentes estados de tensão mecânica (MORGAN, 2013).

Os trabalhos de Franco e Morgan mencionados, desenvolvidos no LADIN, é um importante avanço nesta técnica, até o momento, pouco estudada. Em ambos trabalhos se explorou novas aplicações, superando no processo muitos problemas de estabilidade. As técnicas, ainda que continue em um estágio de desenvolvimento, oferecem alternativas promissórias para aplicações na indústria.

4 Técnica de Escaneamento Continuo de Ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB)

4.1 Introdução

Como foi exposto no capítulo anterior, o RMB é uma técnica bastante versátil, sensível, porém, unicamente a alterações originadas nas camadas mais superficiais do material. Os métodos baseados no RMB têm um diferencial importante em relação aos métodos clássicos de inspeção (não magnéticos), já que são sensíveis à variação microestruturais, tensões mecânicas e deformações plásticas.

O presente trabalho apresenta uma nova forma de escaneamento de superfícies chamado de Escaneamento Continuo de Ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB). É definido como se segue: utiliza-se um campo magnético externo variável no tempo, gerado por uma sonda que se compõe de um yoke eletromagnético com duas bobinas enroladas nele, o qual produz o campo magnético alternado na amostra que excita os domínios magnéticos do material, dando como resultado a produção do RMB, medido por um sensor apropriado. Nesse procedimento, a sonda de RMB movimenta-se a velocidade constante sobre a mostra enquanto os sinais são adquiridos.

Os resultados das medições feitas por meio de ECRMB foram comparados com as medições de RMBE. A técnica foi testada para detectar zonas não homogêneas nas amostras, neste caso deformação plástica e tensões residuais.

Para poder estabelecer uma comparação entre ambas as técnicas, foi necessário formular um novo procedimento para a obtenção e processamento do sinal RMB. Devido ao fato da técnica ser inédita, as condições experimentais ótimas foram encontradas de maneira empírica.

Como foi exposto na revisão bibliográfica (item 3.5), foram encontrados só cinco trabalhos técnicos em relação à utilização da técnica de medição do Ruído Magnético de Barkhausen Contínuo (CROUCH; BEUKER, 2004;

DESVAUX et al., 2004; FRANCO, 2010; ILKER YELBAY; CAM; HAKAN GÜR, 2010; MORGAN, 2013).

Neste capítulo são apresentados resultados inovadores da aplicação da técnica de ECRMB, na detecção zonas não homogêneas em materiais ferromagnéticos.

No desenvolvimento da técnica, estudaram-se diferentes aspectos:

- Análise de métodos apropriados de processamento de sinais.
- Efeito da influência da frequência de excitação aplicada e velocidade da sonda, na capacidade de detecção de zonas não homogêneas.

São apresentados resultados experimentais para o seguinte caso:

- Deformação plástica
- Detecção de tensões residuais.

4.2 Escaneamento Continuo de Ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB) em amostras com deformações plásticas localizadas.

4.3 Materiais e métodos

4.3.1 Materiais

Foram usadas duas chapas de aço Carbono[1]. As amostras estão compostas por dois tipos de aço segundo composição química e metalografias mostradas na Tabela 4.1 e nas Figura 4.1 e Figura 4.2.

Este conjunto de amostras foi laminado a frio e recozidas. A espessura das mesmas é de 2 mm.

[1]As amostras utilizadas são as mesmas que se utilizou na tese de Manuel Alberteris (2012), que foram doadas pela BRASMETAL WAELZHOLZ.

Tabela 4.1 – Composição química do conjunto de amostras em %.

Tipo AISI-SAE	**SAE 1006 Aço Baixo C**	**SAE 1070 Aço Alto C**
C	0.04	0.712
Mn	0.261	0.61
P	0.015	0.018
S	0.0066	0.001
Si	-	0.24
Condição como recebido	Laminado a frio e recozido	Laminado a frio e recozido

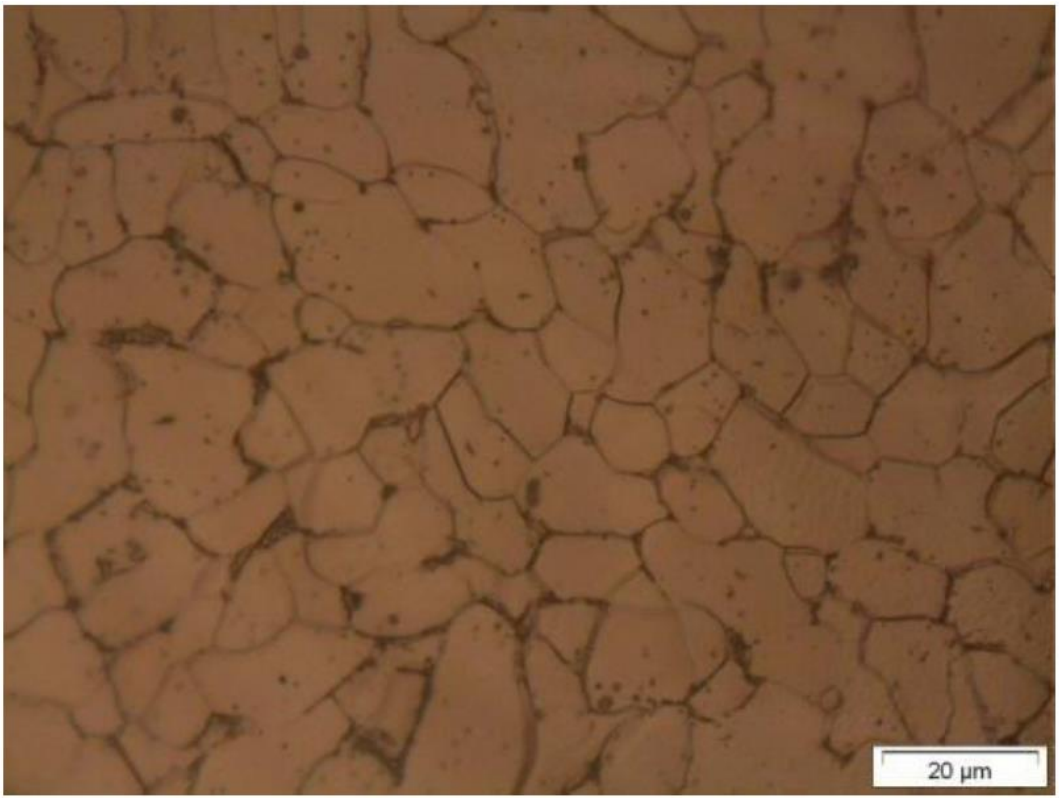

Figura 4.1 – Metalografia do aço SAE 1006.

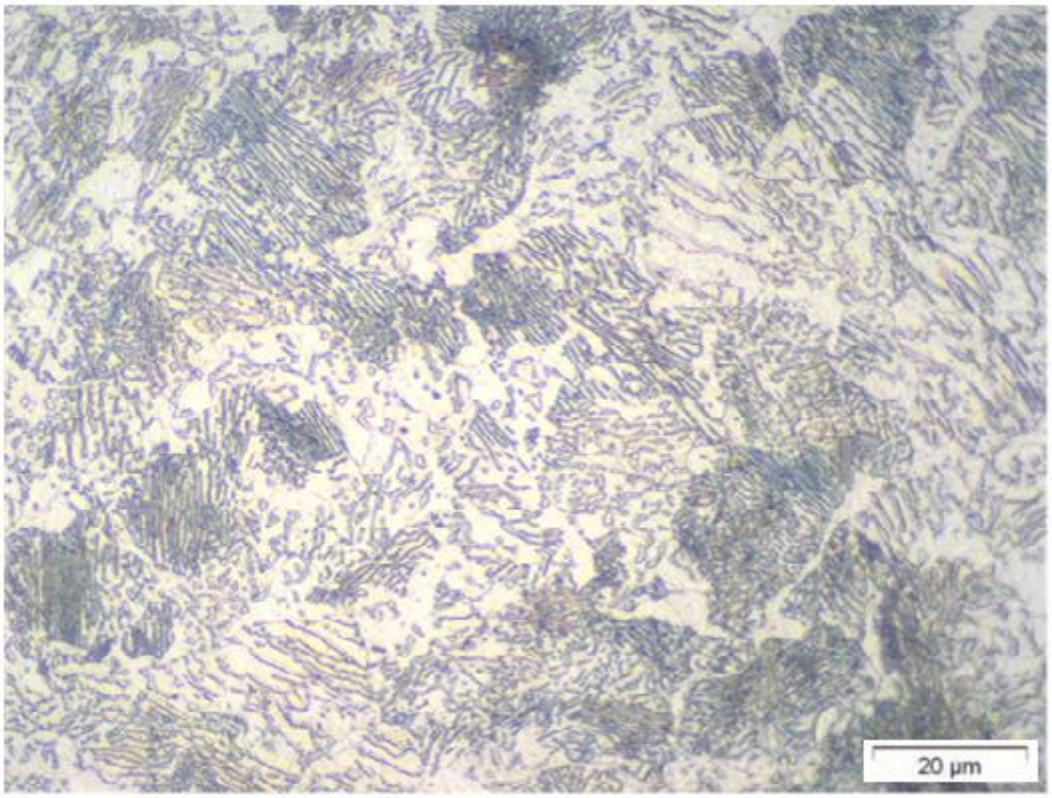

Figura 4.2 – Metalografia do aço SAE 1070.

Estas amostras não receberam passe de encruamento. Como pode se ver nas figuras 4.1 e 4.2 elas apresentam características diferentes nas fases, principalmente para o 1070 onde a cementita não está esferoidizada e sim formando lâminas com a ferrita.

As amostras para metalografia foram cortadas no Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica (LFS-PMEUSP) em maquina ISOMET 4000 com disco diamantado. No mesmo lugar foram embutidas e polidas. As amostras com cementita esferoidizada receberam ataque eletrolítico com Nital 2% e ato seguido Vilella. Já as amostras que apresentavam estrutura perlítica foram atacados com Nital 3% durante um tempo de 10s. O ataque e a observação metalográfica foram realizados no Laboratório de Metalografias do Departamento de Metalurgia (PMT-USP).

4.3.2 Preparação das Amostras

Foram efetuadas medições de RMBE, no conjunto de amostras, com o objetivo de encontrar zonas não homogêneas e utilizá-las como padrão de comparação para as medições feitas com ECRMB.

Devido ao fato que as amostras são reutilizadas estas não foram cortadas segundo normas da ABNT ("Norma NBR 6152.", 2002). Motivo pelo qual a geometria escolhida, no estado como recebidas, foi em forma de tiras retangulares, com as dimensões apresentadas na *Figura 4.3*.

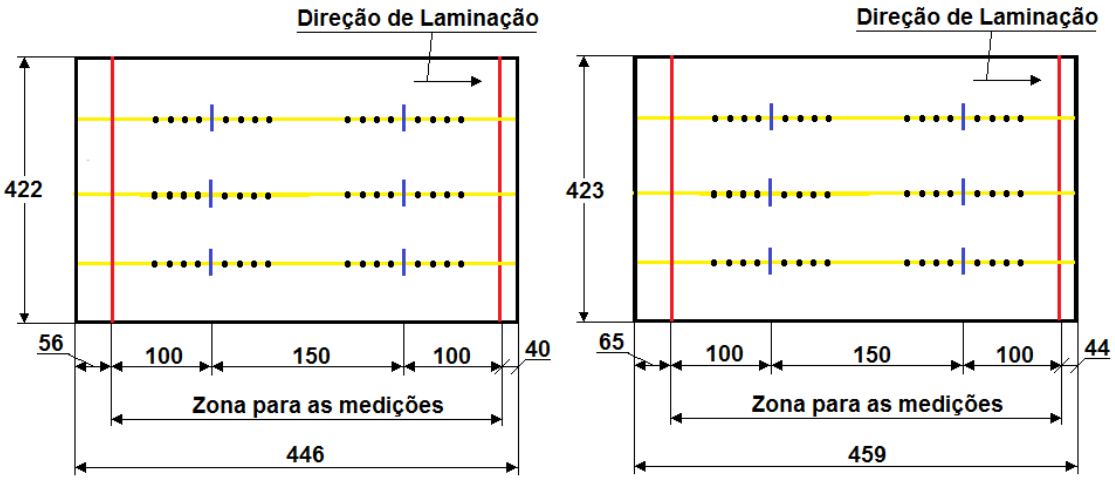

Figura 4.3 – Geometria e dimensões das amostras em (mm), nas zonas onde se realizou a medição de RMB.

As amostras são um aço AISI-1006, com geometria 446 x 422 mm e um aço AISI-1070, com geometria 459 x 423 mm ambas com uma espessura de 2 mm. As linhas vermelhas são onde começam e terminam as medições, respectivamente.

Foram induzidas deformações plásticas localizadas aplicando cargas de compressão, como descrito na sequência. O comprimento das zonas esmagadas é de 45 x 4 mm (linhas azuis).

Os esmagamentos produzidos geraram uma variação na espessura. Dita variação é muito pequena, da ordem de 0,1 mm. Eventualmente esta perda de

espessura faz que, no processo de medição, surja um aumento na densidade de fluxo magnético nessas regiões ao passar a sonda de ECRMB.

Em estudos realizados no laboratório Ladin mostrou-se que para essas pequenas variações de espessura, os erros introduzidos nas medições são praticamente desprezíveis. Sendo assim, decidiu-se não fazer retifica. Foi utilizada uma prensa hidráulica na qual se aplicou uma pressão controlada de 110 kPa. A peça usada como endentador para produzir as deformações pode-se ver na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Imagem da peça usada como endentador.

Na Figura 4.5 são indicadas as posições nas amostras onde foram efetuadas as deformações plásticas.

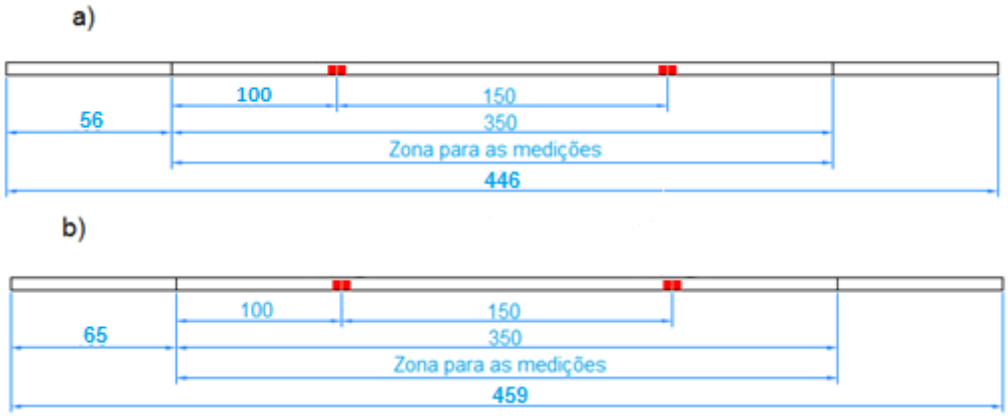

Figura 4.5 – Posição das deformações plásticas nas amostras. a) Aço AISI 1006 e b) Aço AISI 1070.

Nestas amostras, a anisotropia magnética tinha sido previamente medida utilizando a técnica RMBE (CAMPOS, 2012). Sendo assim as amostras foram nomeadas de DL (Direção de Laminação), cujo comprimento coincidira com a direção de fácil magnetização; e DT (Direção Transversal) formando 90° com a direção de fácil magnetização.

Nas amostras foram desenhadas três linhas na direção de laminação pelas quais passará a sonda de medição (linhas amarelas Figura 4.3). No caso da medição discreta (ponto a ponto) se fez medições a cada um centímetro em ambas as superfícies (4 medições em cada caso) da linha onde ficam as deformações plásticas, como pode-se ver na Figura 4.3 e 4.6.

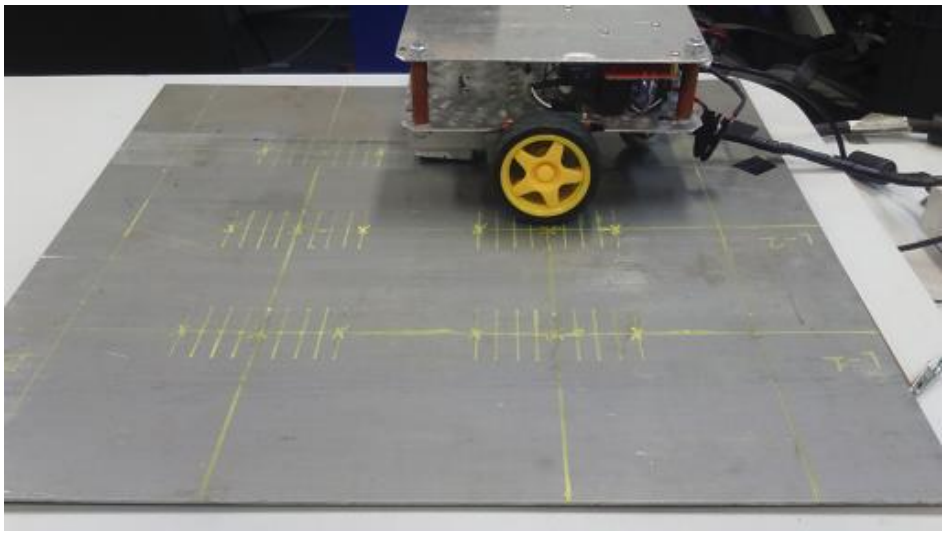

Figura 4.6 – Desenho das linhas para as medições (DL é de direita a esquerda).

4.3.3 Equipamento e métodos usados no ECRMB

O arranjo padrão para o ECRMB é apresentado na Figura 4.7. Na mesma se apresenta um yoke em forma de ‘U’ como núcleo de duas bobinas de excitação magnética. O sensor de RMB é posicionado no centro dos pólos do yoke e na superfície da amostra.

Assim quando no material é induzido o campo magnético variável, os pulsos magnéticos produzidos pela movimentação discreta das paredes de domínio geram pulsos de voltagem na bobina leitora posicionada na superfície.

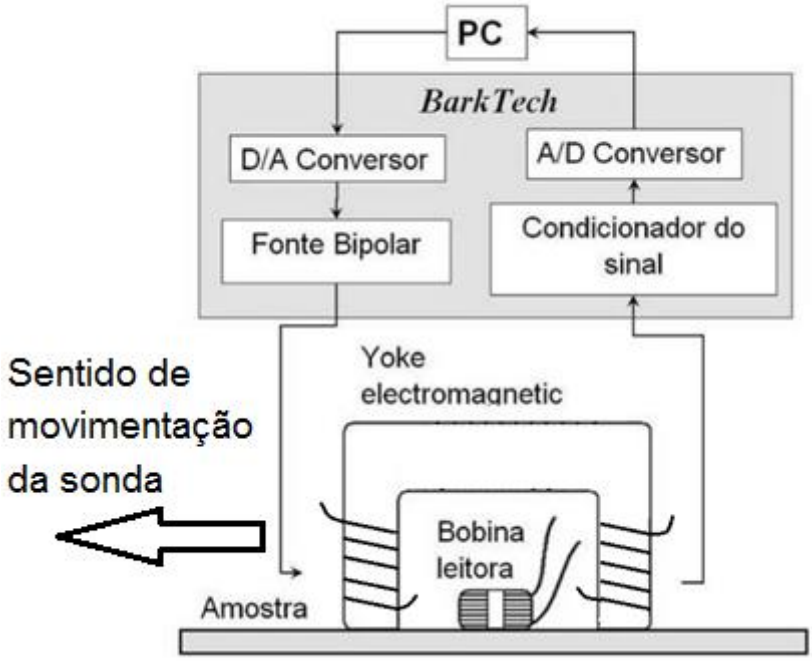

Figura 4.7 – Esquema da configuração usada para ECRMB.

As dimensões gerais da sonda são 12 mm de diâmetro e 4 mm de espessura. O material utilizado no yoke para as medições das amostras, foi fabricado a partir de chapas de 0.3 mm de FeSi de grão orientado. A onda de corrente fornecida nos eletroímãs foi sempre senoidal com uma frequência de 5 e 10 Hz. Todos os sinais foram adquiridos a uma frequência de amostragem de 450kHz.

O controle das variáveis de excitação e de processamento e aquisição dos sinais de RMB foram realizados pelo módulo BarkTech, desenvolvido integralmente no Laboratório de Dinâmica e Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica da POLIUSP (Ladin-PME-EPUSP). A *Figura 4.8* apresenta uma fotografia deste equipamento junto com a sonda utilizada para ECRMB.

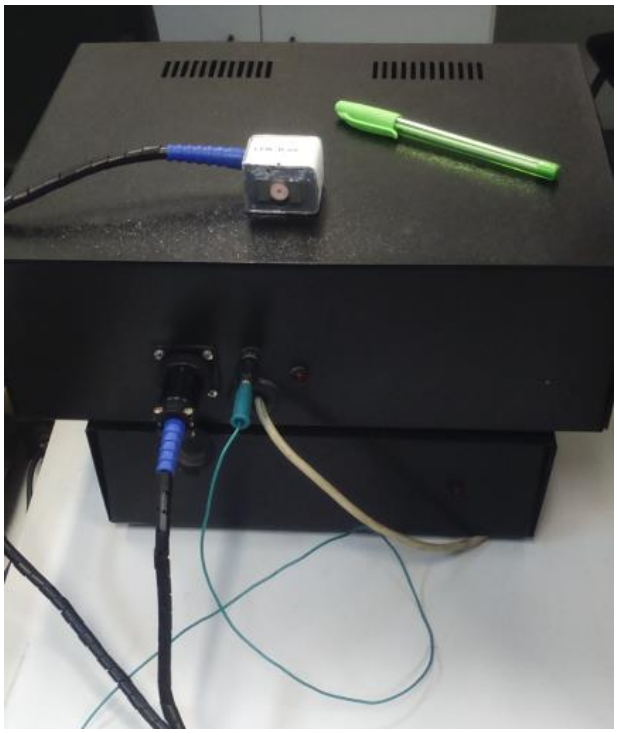

Figura 4.8 – BarkTech, módulo utilizado para o ECRMB desenvolvido no Ladin.

O controle total do sistema realizou-se através de um software desenvolvido no Ladin cujo nome é BarkView, cuja janela com os sinais que comumente são observados durante as medições é mostrada na *Figura 4.9*. O equipamento é responsável tanto pela geração e controle da corrente de excitação, como pela aquisição e filtragem dos sinais de voltagem gerados pelo sensor de RMB. Assim, o “BarkTech” permite gerar, utilizando uma fonte bipolar, correntes de excitação em forma senoidal com frequências de 0,4 a 100 Hz, e amplitudes de excitação 0 a 5A. Os sinais de RMB podem ser adquiridos em diferentes faixas de frequência e amplificados com diferentes valores de ganhos. Todas estas funções são controladas desde o computador.

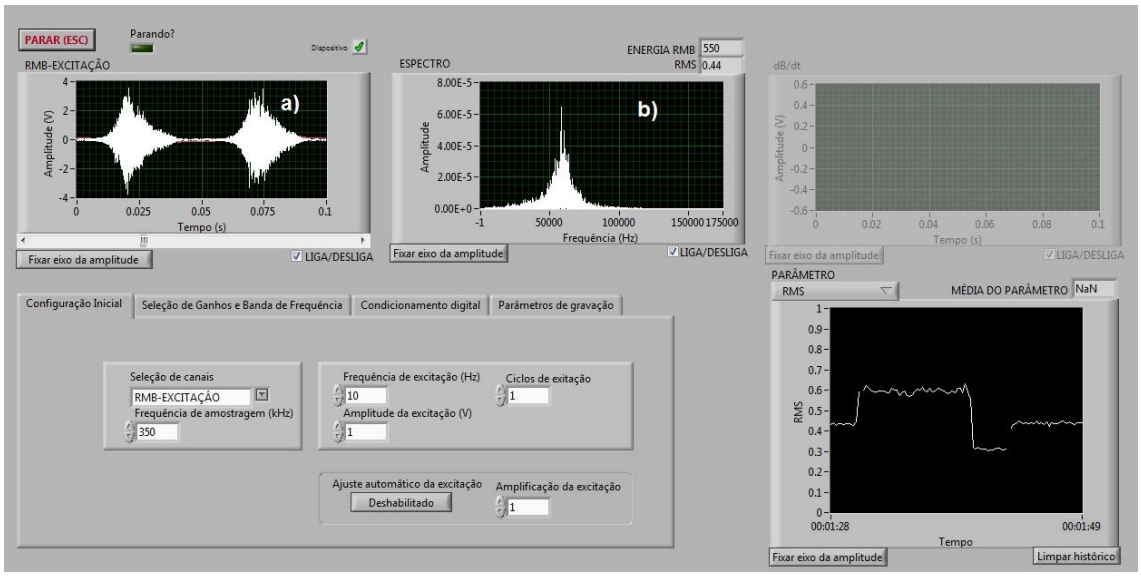

Figura 4.9 – Janela do programa de aquisição com os sinais de RMB a), e o respetivo espectro b).

O escaneamento linear das superfícies das amostras foi realizado com um carrinho no qual foi montada a sonda como é mostrado na *Figura 4.10*.

Durante o processo de medição, a amostra sempre se manteve estática, e a sonda se movimentou com diferentes velocidades na direção horizontal.

Para o controle da movimentação foi desenvolvido um carrinho, no qual a sonda é posicionada. Portanto, a movimentação da sonda é realizada por este carrinho, que se move sobre as amostras. O controle é realizado através de um microcontrolador Arduino UNO, que permite variar a velocidade e determinar a posição do carrinho em cada instante de tempo. O equipamento é composto de uma estrutura de alumínio sobre a qual estão posicionadas a sonda e todo o dispositivo eletrônico e é movimentada por dois motores elétricos CA. Também foi utilizada uma chave ótica (encoder) para a medição da distância percorrida. Todo este dispositivo foi desenvolvido no Ladin.

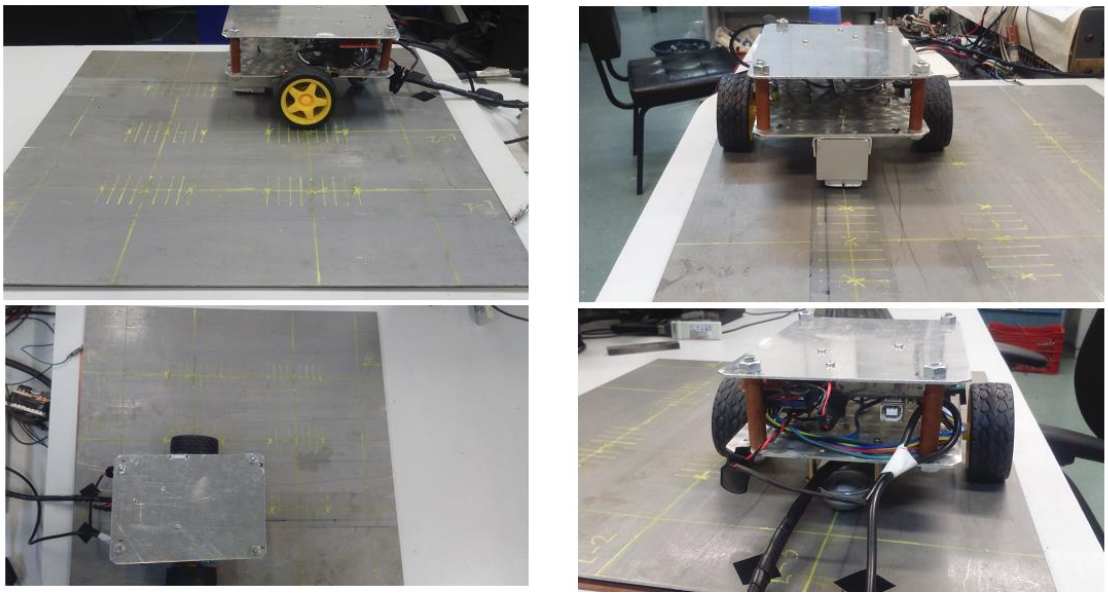

Figura 4.10 – Imagem do carrinho e da sonda utilizadas para o ECRMB.

4.3.4 Procedimento de Medição dos sinais magnéticos

Os sinais foram adquiridos, para dois períodos completos de corrente (duas sinais). Os sinais de RMB foram adquiridos com diferentes parâmetros de medida:

- **Freqüências de excitação:** 5 e 10 Hz.
- **Correntes de excitação:** 3 A.
- **Aquisição do sinal:** Cada medida é composta por sinais de RMB gerados em dois ciclos completos de magnetização. A taxa de amostragem foi mantida em 450 kHz. E foram gravadas 10 repetições de cada condição de medida.
- **Orientação da sonda:** A orientação da sonda controla a direção do campo magnético. Assim, foram feitas medidas de RMB magnetizando a amostra em direção da direção de laminação (DL) que coincide com a direção de fácil magnetização.
- **Velocidade de varredura:** São utilizadas cinco velocidades para a realização da pesquisa (14, 16, 19, 22 e 25 mm/s).

4.3.5 Método de processamento do sinal utilizado na técnica de ECRMB

Na análise dos sinais de ECRMB foi usado o método de processamento de sinais desenvolvido por Padovese e colaboradores (PADOVESE; MARTIN; MILLIOZ, 2009). Neste é elaborada uma metodologia para o cálculo dos valores de RMS_{RMB}.

Na Figura *4.11* se mostram sinais típicos de Barkhausen (a), e Espectro dos Sinais (b).

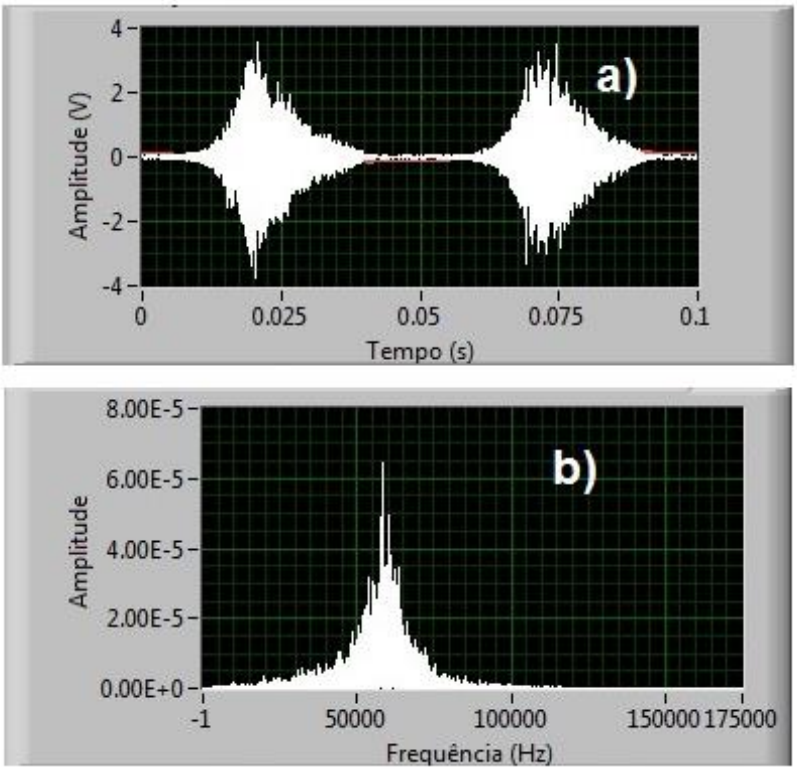

Figura 4.11 – Sinais de RMB a), e Espectro dos Sinais b).

Na maioria dos sistemas de medição baseadas no princípio eletromagnético sobre materiais ferromagnéticos apresentam-se três tipos de ruídos (BITTEL, 1969):

- Ruído de Nyquist.

- Ruído Térmico.

- Ruído Barkhausen.

Se for assumido que qualquer tipo de perturbação térmica ou por vibrações seja eliminada no experimento, pode-se dizer que para o caso mais comum, em que a temperatura permanece quase constante (aproximadamente $\pm 1°C$), os dois primeiros ruídos são significativamente menores que o Barkhausen (BITTEL, 1969; STEFANITA; ATHERTON; CLAPHAM, 2000). Como método de controle da qualidade dos sinais de RMB se usou a avaliação da relação sinal-ruído nos dois gráficos da figura anterior. Como determinado por Capo e Padovese (2009) cada sensor de RMB utilizado tem uma banda de ressonância (aproximadamente 65kHz na *Figura 4.11 b*)), que é função de suas características elétricas e geométricas (CAPÓ-SÁNCHEZ; PADOVESE, 2009). Sob condições em que não há outros ruídos significativos (outros ruídos com amplitude menor ou igual ao 10% do sinal de RMB) na banda de ressonância, a sensibilidade dos sensores de RMB depende unicamente dos processos que estão acontecendo no material (PFUTZNER; SCHONHUBER, 1991).

4.3.6 Filtragem dos sinais adquiridas mediante ECRMB

Produto da utilização dos motores elétricos CA, gera-se um campo magnético ao redor da sonda de medição que afeta o sinal adquirido. Para minimizá-lo se tomaram duas medidas. A primeira foi blindar os motores elétricos, envolvendo-os numa folha de alumínio, a segunda foi colocar uma lâmina de cobre entre os motorzinhos e a sonda. Isto se pode ver na Figura *4.12*.

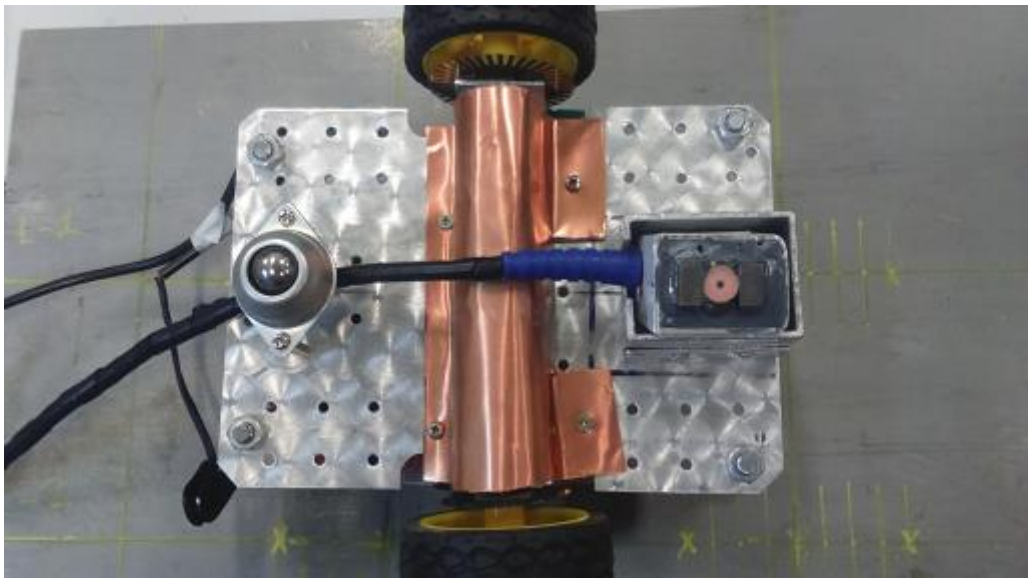

Figura 4.12 – Lâmina de cobre colocada entre os motores e a sonda de medição.

Ainda assim, os sinais obtidos tiveram que ser filtrados. Para isto se programou um filtro passa alta em Matlab. Na Figura *4.13* pode-se ver como fica o sinal antes a), e depois b) de filtrado.

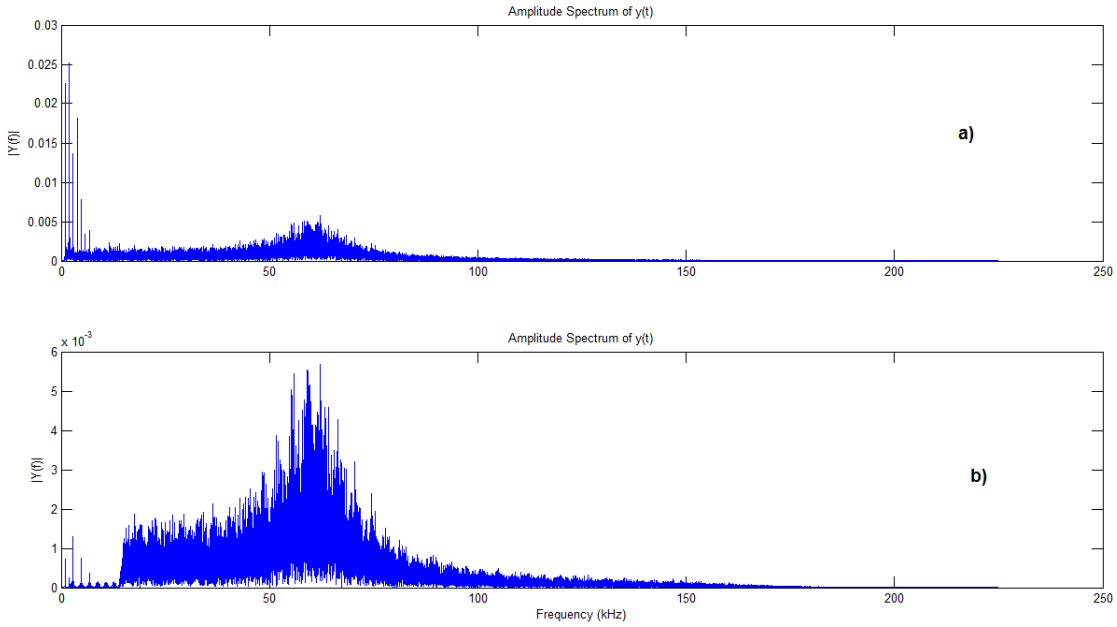

Figura 4.13 – Espetro do sinal de RMB a) antes de filtrar b) depois de filtrado.

As propriedades e gráfico de resposta em frequência do filtro utilizado no processo de filtragem podem-se ver a continuação (Figura 4.14):

Banda de rejeito (Fstop): 0 ao 14 kHz

Banda de transição (Fpass): 14 ao 15 kHz

Atenuação na banda de rejeito (Astop): 10 dB

Oscilação na banda de passo (Apass): 1 dB

Freqüência de amostragem (fs): 450 kHz

Banda de passo $(15kHz \rightarrow f_s/2)$

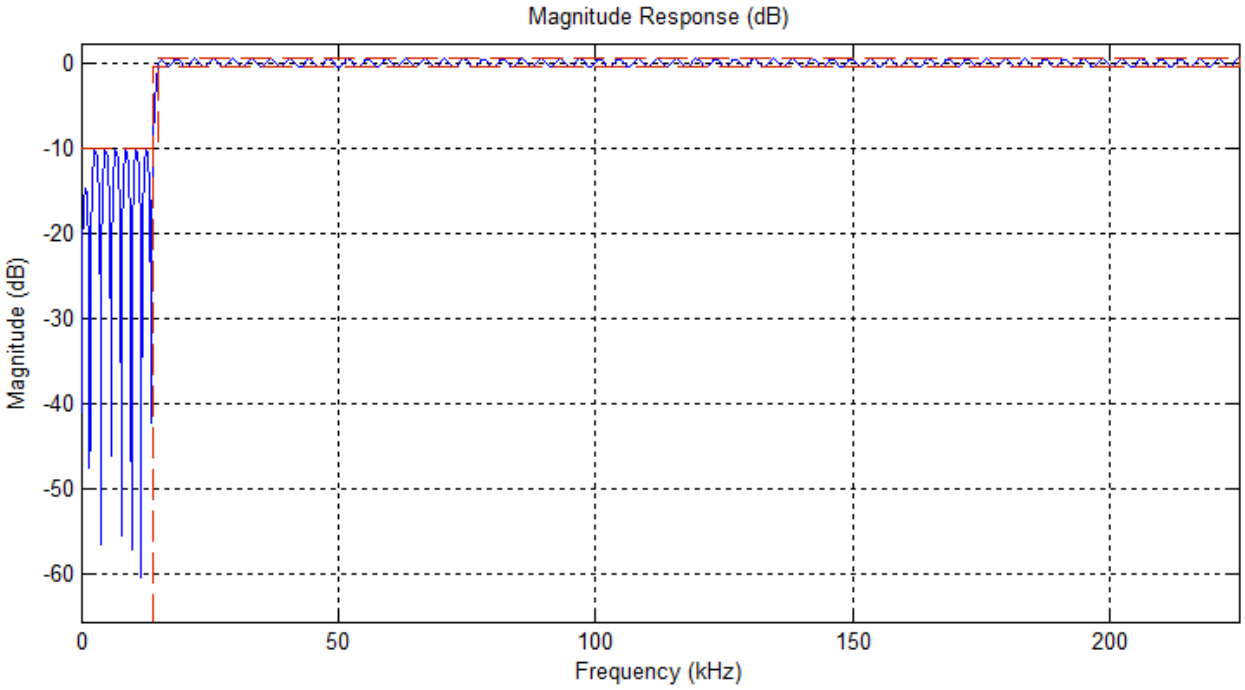

Figura 4.14 – Magnitude da resposta do filtro.

5 Utilização da técnica de ECRMB para monitoramento de deformações plásticas em chapas de aço carbono

5.1 Introdução

O capítulo 4 introduziu a técnica de ECRMB. Neste capítulo é mostrada a capacidade da técnica ECRMB para detectar zonas não homogêneas em chapas de aço carbono, neste caso deformações plásticas e tensões residuais inseridas produto da deformação mesma. Os experimentos foram realizados em chapas de aço carbono com caraterísticas descritas no capitulo 4.

Os resultados sugerem que a evolução do parâmetro RMS_{RMB} obtido com a técnica de RMBE, pode ser utilizada para obter curvas de comparação com parâmetro de RMS_{RMB} obtidos por ECRMB. Consegue-se em ambos casos identificar a posição das duas deformações inseridas nas amostras. Como é esperado, os valores RMS_{RMB} e, portanto, o sinal de Barkhausen, devem diminuir com o aumento da deformação plástica. Isto explica-se devido à alta densidade de discordâncias presentes nessas zonas do material dificultando o movimento das paredes de domínio.

5.2 Estudo Preliminar 1. Detecção de zonas não homogêneas utilizando a técnica de RMBE

Como as lacunas conceituais da aplicação da técnica são grandes, devido à complexidade, foi realizada uma primeira fase de ensaios preliminares. O objetivo foi avaliar propostas de procedimentos de medida, configurações de sonda, métodos de análises de sinais, e demais fatores que pudessem determinar a viabilidade da aplicação da nova técnica na detecção de danos do material.

Baseados na experiência adquirida em medições clássicas de RMB (medições estáticas) foram projetadas amostras com deformações plásticas facilmente detectáveis. Assim, são apresentados os parâmetros de medida e resultados preliminares de RMBE em 2 amostras diferentes, do tipo chapa.

Os resultados obtidos para o caso da medição discreta nas chapas AISI-1006 e AISI-1070 são mostrados na Figura *5.1*. Para 5Hz observa-se uma queda nos valores de RMS_{RMB} nas posições das deformações plásticas, posições 5 e 14.

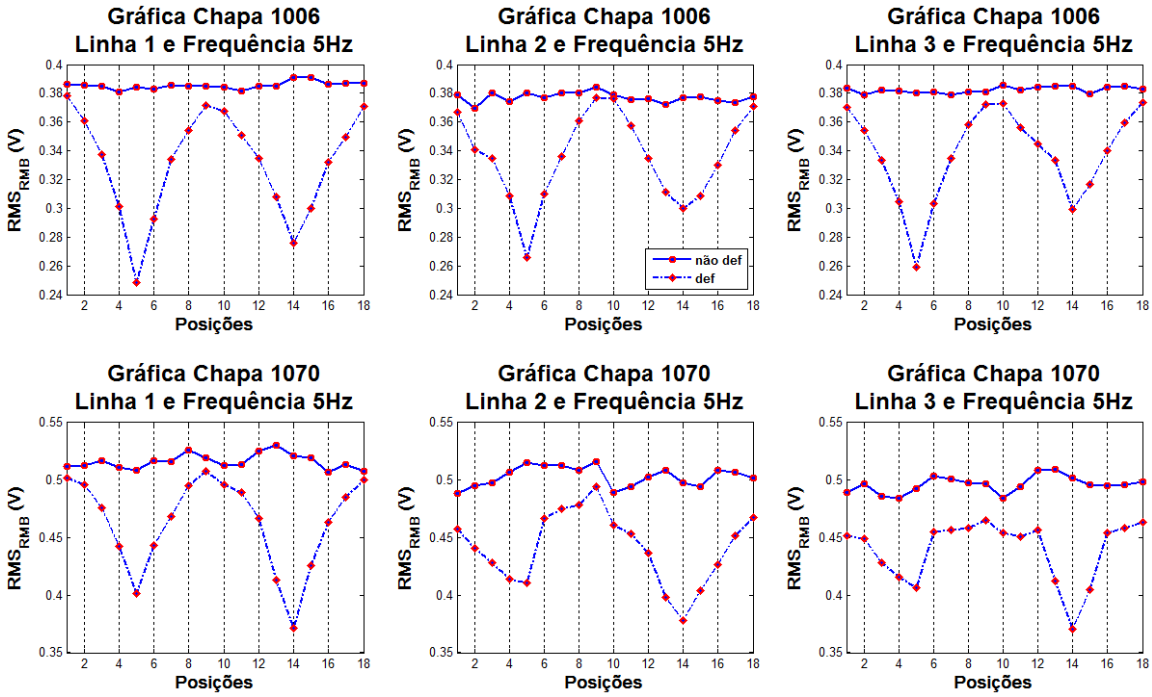

Figura 5.1 – Gráficas para as Chapas AISI-1006 e AISI-1070, linha 1, 2 e 3; frequência 5Hz antes e depois de deformada, medição discreta.

A seguir são mostrados resultados dos dados processados para o caso da medição discreta nas chapas AISI-1006 e AISI-1070. Como pode-se ver na Figura *5.2* para 10 Hz acontece uma queda nos valores de RMS_{RMB} nas regiões próximas das posições 5 e 14 que é onde se encontram as regiões com as deformações plásticas inseridas.

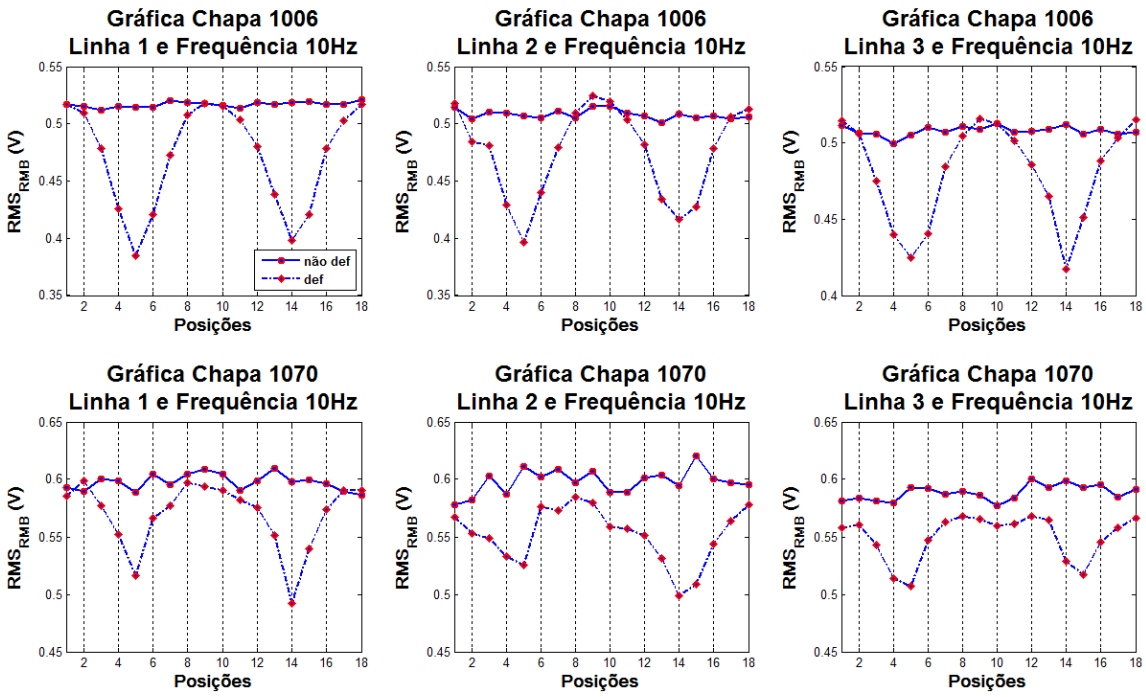

Figura 5.2 – Gráficas para as Chapas 1006 e 1070, linha 1, 2 e 3; frequência 10Hz antes e depois de deformada, medição discreta.

5.3 Estudo Preliminar 2. Detecção de zonas não homogêneas utilizando a técnica de ECRMB

A seguir são mostrados resultados de ensaios realizados com 5 velocidades de varredura (14, 16, 19, 22 e 25 mm/s). As Figuras de 5.3 ao 5.7 mostram a variação do parâmetro RMS_{RMB} do sinal, para cada velocidade de varredura. A freqüência de excitação utilizada é 5Hz.

Nestas figuras é observado que com as 5 velocidades utilizadas, a técnica consegue detectar e localizar as deformações plásticas.

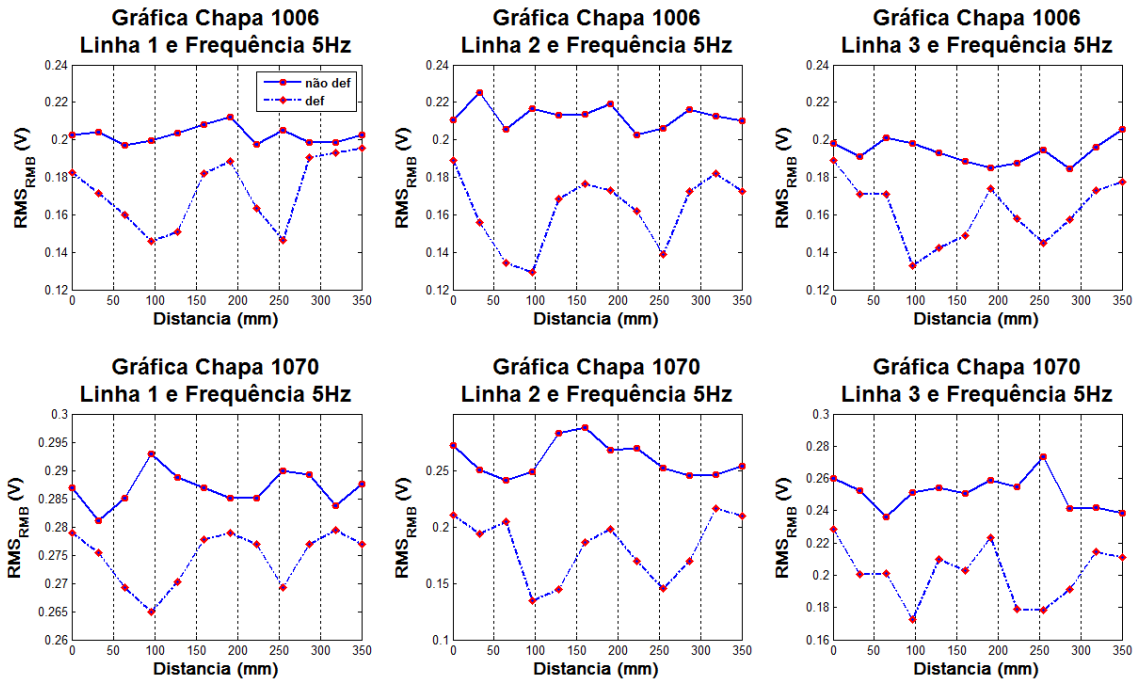

Figura 5.3 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 14 mm/s.

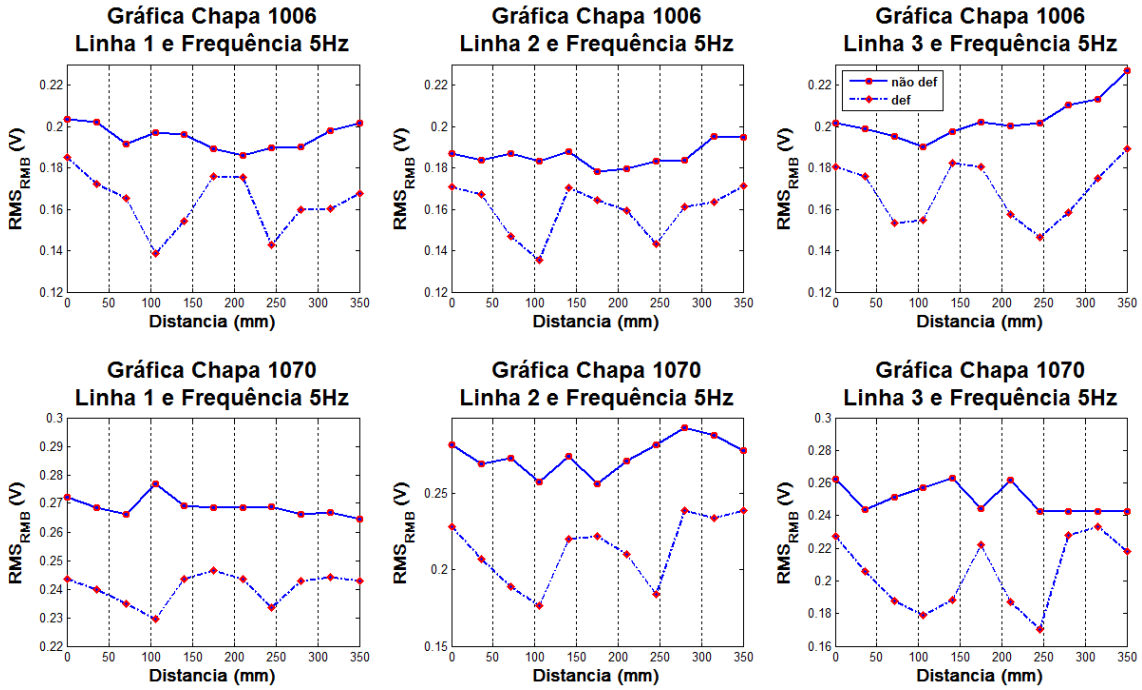

Figura 5.4 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 16 mm/s.

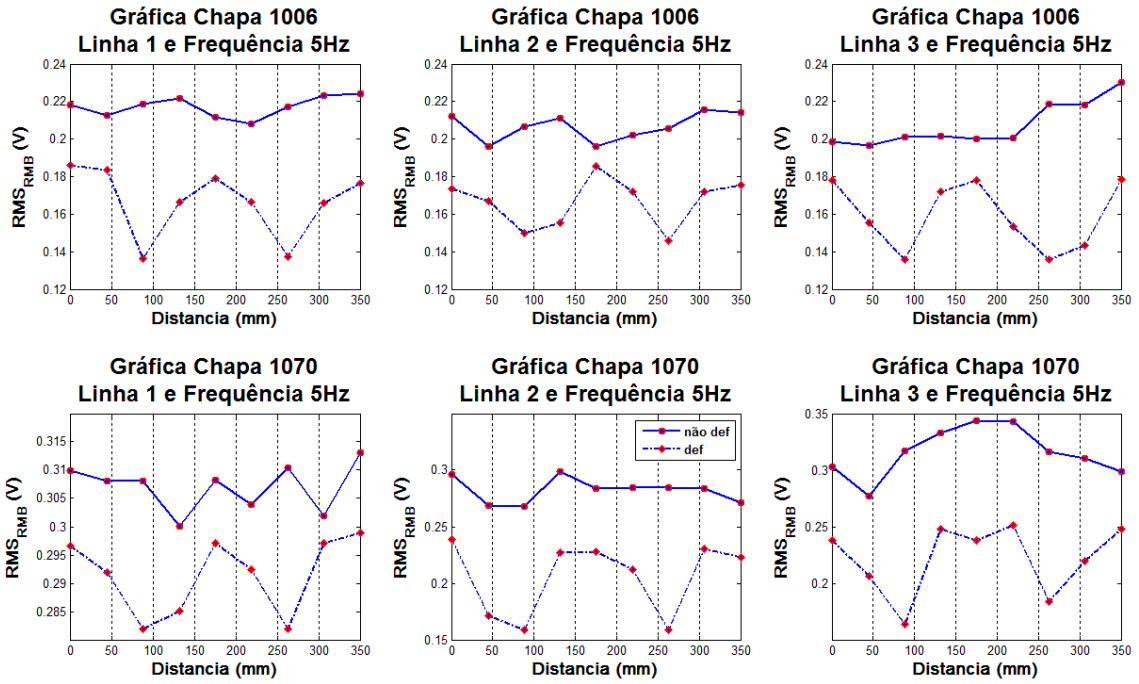

Figura 5.5 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 19 mm/s.

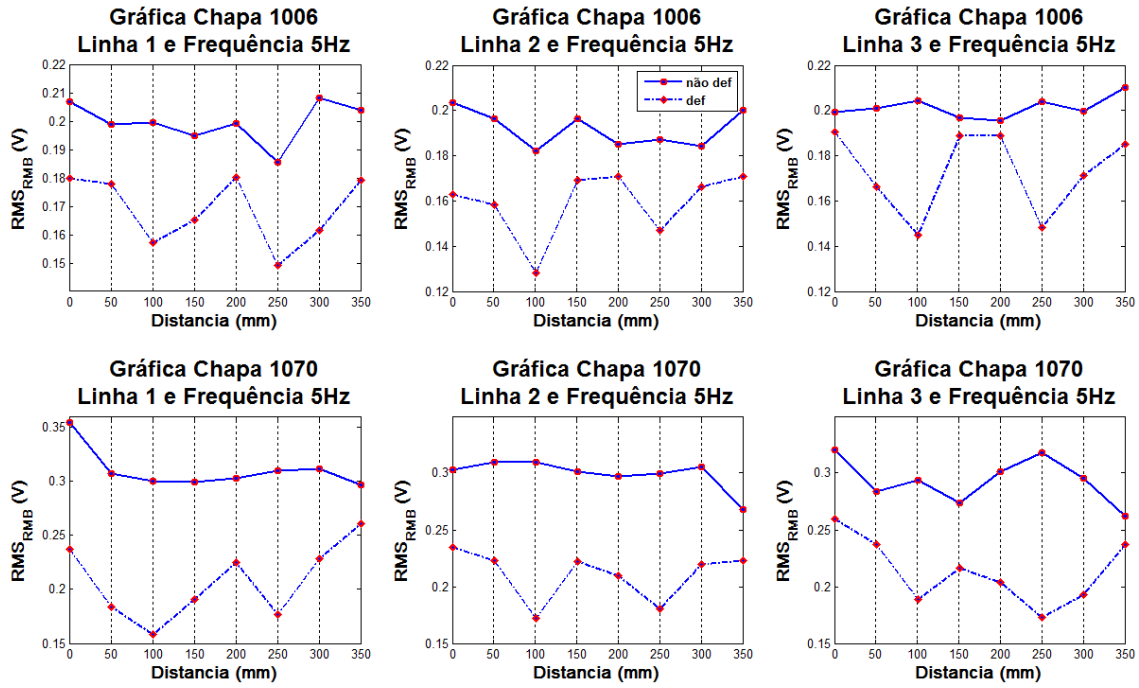

Figura 5.6 – Gráficas das as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 22 mm/s.

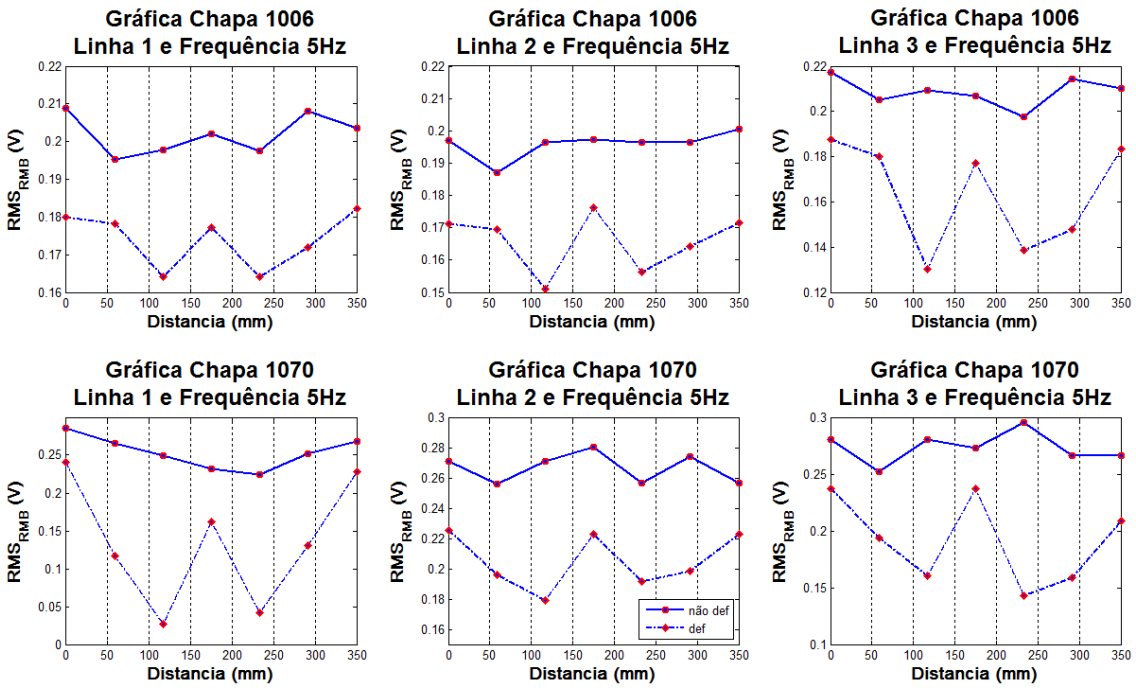

Figura 5.7 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 5Hz; velocidade 25 mm/s.

A seguir são mostrados resultados de ensaios realizados com 5 velocidades de varredura (14, 16, 19, 22 e 25 mm/s). As Figuras da 5.8 ao 5.12 mostram a variação do parâmetro RMS_{RMB} do sinal, usando as cinco velocidades de varredura. A freqüência de excitação utilizada é 10Hz.

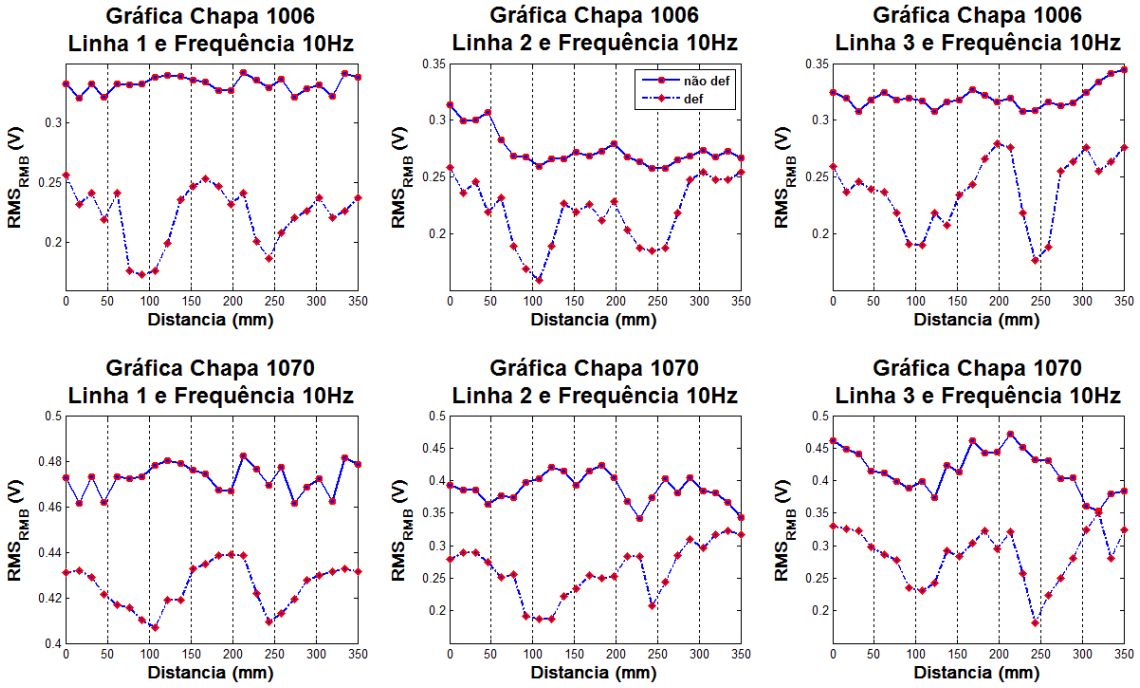

Figura 5.8 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 14 mm/s.

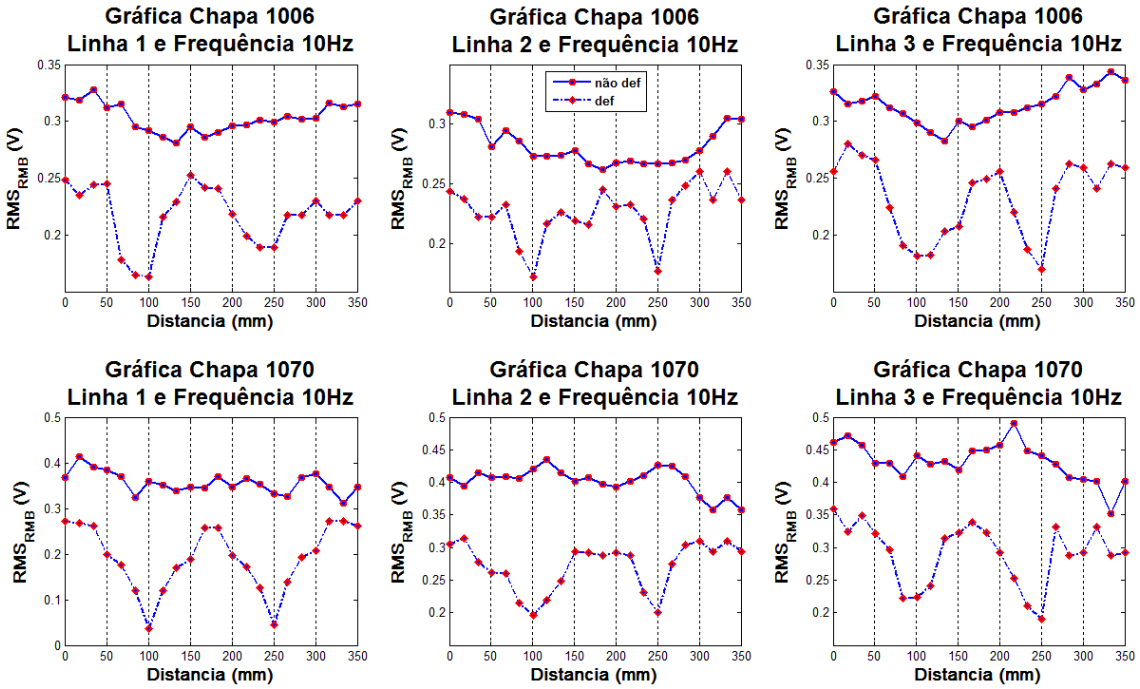

Figura 5.9 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 16 mm/s.

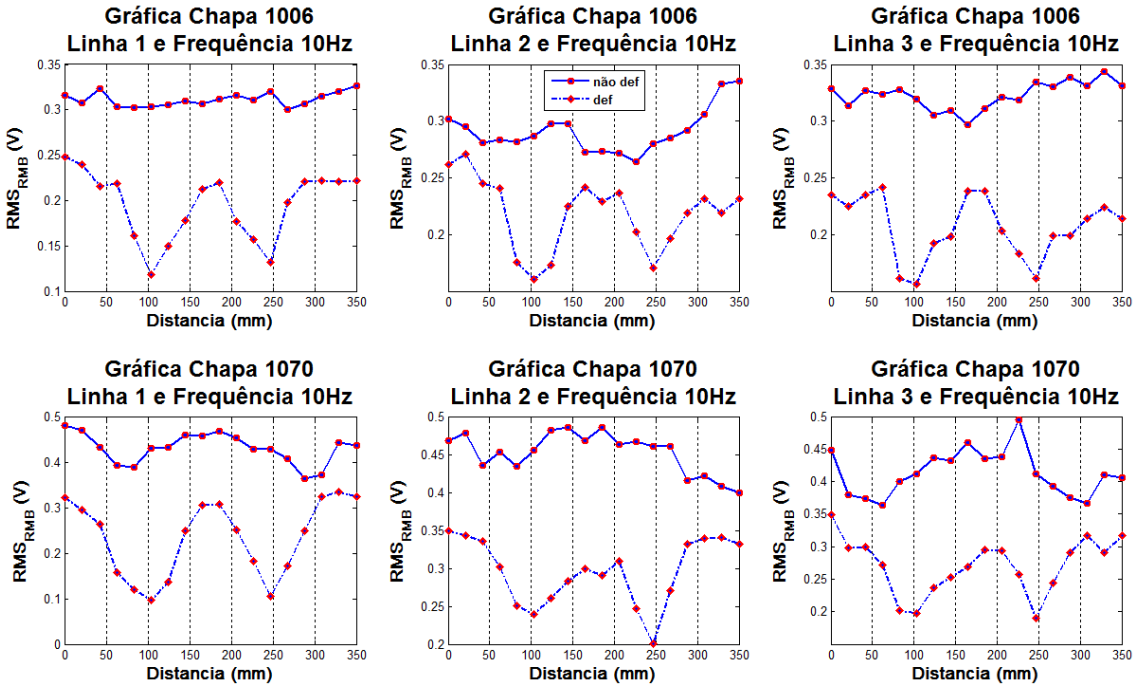

Figura 5.10 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 19 mm/s.

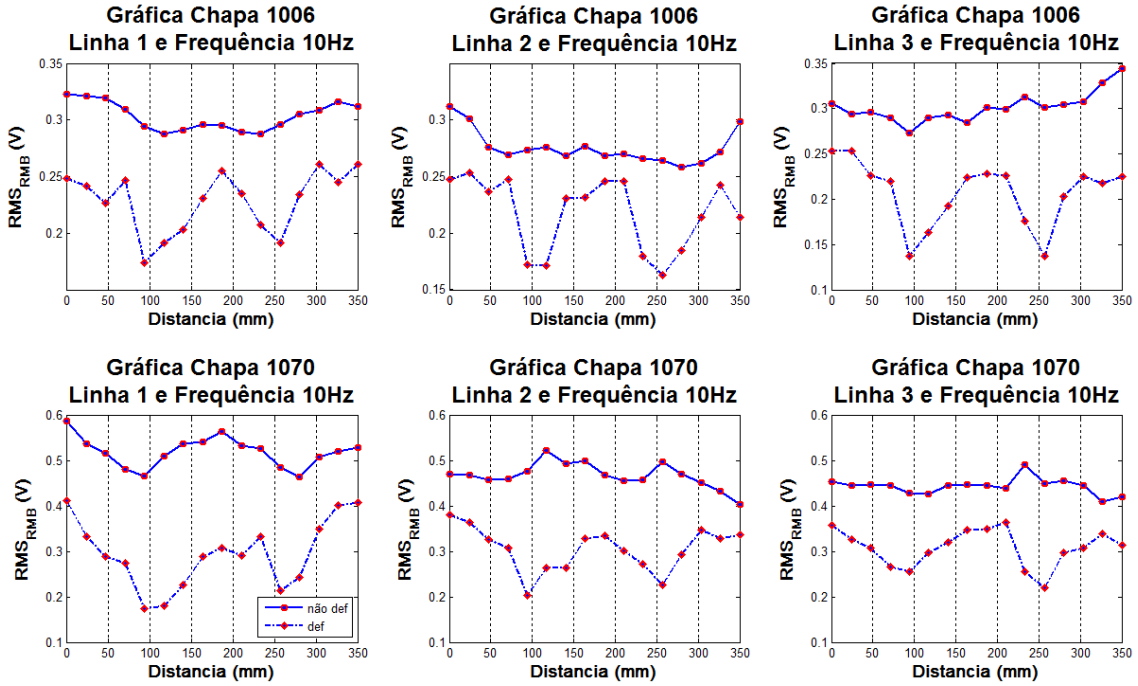

Figura 5.11 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 22 mm/s.

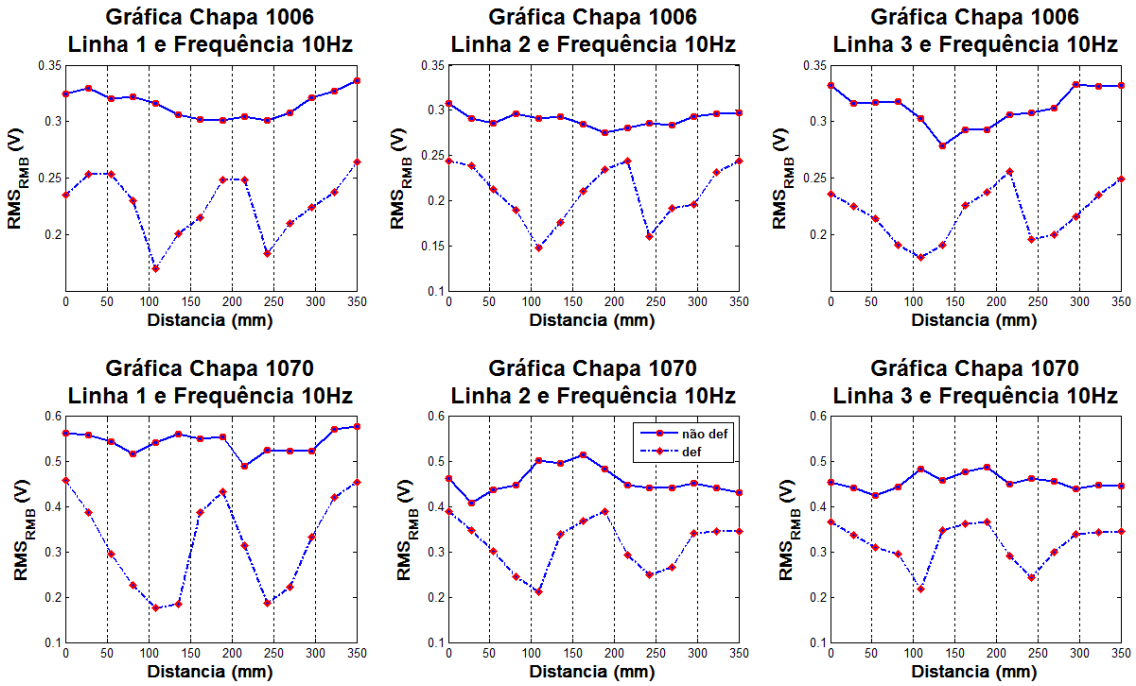

Figura 5.12 – Gráficas para as chapas 1006 e 1070; linhas 1, 2 e 3; frequência 10Hz; velocidade 25 mm/s.

5.4 Resultados e discussão

Pode-se comprovar que o perfil do parâmetro RMS_{RMB} mostra como o sinal de Barkhausen diminui com a aparição da deformação plástica, o qual é uma resposta típica em medições de RMBE. A alta densidade de discordâncias presentes nessas zonas do material dificulta o movimento das paredes de domínio.

5.4.1 Influência da velocidade e frequência de excitação na detecção das regiões não homogêneas

Velocidade

Foram mostrados resultados de ensaios realizados com as seguintes condições: 5 velocidades de varredura (14, 16, 19, 22 e 25 mm/s). As Figuras da 5.3 ao 5.12 mostram a variação do parâmetro RMS_{RMB} do sinal, usando as

cinco velocidades de varredura. As freqüência de excitação utilizadas para o análise foram, 5 e 10Hz. Nessas Figuras é observado que com as 5 velocidades utilizadas, a técnica consegue detectar a localização da deformação plástica. Também pode-se observar que a variação da velocidade não tem uma influência significativa na detecção. Portanto, velocidades maiores podem ser utilizadas, o que resulta numa vantagem da técnica, quando se considerar a sua aplicação na área industrial.

Frequência de Excitação

Na Figura 5.13 o seguinte aspecto pode ser observado: Com o aumento da freqüência de magnetização o número de saltos das paredes de domínio por unidade de tempo aumenta (HALLER; KRAMER, 1970; HIGUCHI, 1974). Portanto a amplitude do sinal e, consequentemente, do parâmetro RMS_{RMB} também aumenta.

Com maiores variações de fluxo magnético no material, as avalanchas de movimento de paredes são cada vez mais frequentes, e a superposição de pulsos no sistema de medida é aumentada. Ainda assim, em todos os casos, o parâmetro RMS_{RMB} acompanhou de forma aceitável a localização das zonas deformadas nas amostras.

Na Figura 5.13 pode-se observar também que, em todos os casos, para maiores valores da frequência de excitação maior serão os valores de RMS_{RMB}.

Notar que quando a frequência de excitação é maior o número de pontos obtidos na medição é maior, embora com uma frequência de excitação menor tenha-se o mesmo comportamento.

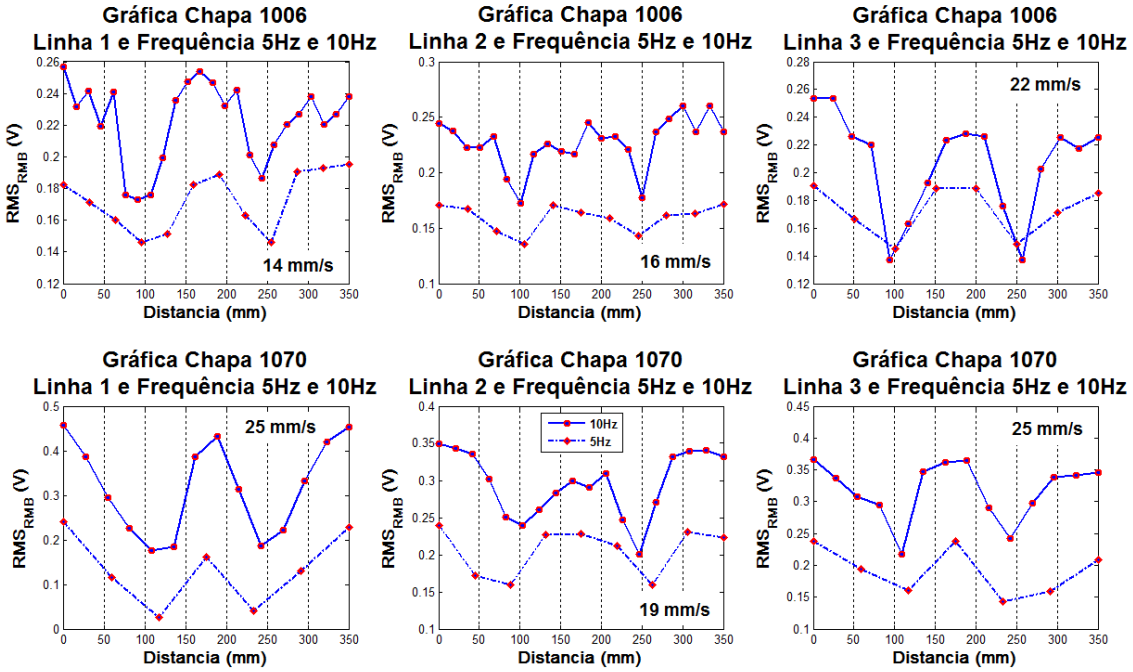

Figura 5.13 – Comparação das curvas de RMS_{RMB} para as duas frequências, para os aços AISI -1006 e 1070.

6 Conclusões

Nesta dissertação descreve-se uma nova abordagem para END de inspeção de superfície, com base na técnica de Escaneamento Continuo de Ruído Magnético de Barkhausen (ECRMB).

A técnica de ECRMB foi utilizado na avaliação para a detecção de zonas não homogêneas de diferentes amostras:

- Detecção de deformações plásticas produzidas por esmagamento, geradas em duas placas de aço AISI-1006 e AISI-1070 laminadas a frio e recozidas.

Foram apresentados resultados inovadores e discutidos referente à aplicação da técnica de medição do Ruído Magnético de Barkhausen na inspeção de falhas. Das análises feitas em cada um dos casos estudados, foram extraídas as seguintes conclusões.

- É mostrado que a qualidade do diagnóstico, nos casos estudados, não depende da velocidade de varredura.
- O aumento das frequências de excitação que foram aplicadas faz com que aconteça um aumento dos valores do parâmetro RMS_{RMB}. Porém, isto não afeta de nenhuma maneira que as regiões não homogêneas sejam detectadas.
- Em quanto ao tempo utilizado na aquisição dos dados o aproveitamento e capacidade da técnica ECRMB é muito melhor que a técnica de RMBE. O que faz que a nova técnica diminua os tempos consideravelmente. Neste trabalho em específico o tempo total utilizado para fazer as medições com RMBE foi de aproximadamente 6 horas. No caso das medições feitas com ECRMB o tempo foi de só 2 horas.

7 Trabalhos futuros

Ainda há inúmeras aplicações que aguardam maiores desenvolvimentos, envolvendo o Ruído Magnético de Barkhausen, tanto na sua configuração estática e, sobretudo, na configuração contínua.

- Examinar a possibilidade de realizar mapeamento de tensões na profundidade do material.
- Analisar o efeito de deformações plásticas, na medição de tensões elásticas via RMB.
- Mesmo que os resultados apresentados neste trabalho indicam a viabilidade do uso do ECRMB, a fim de inspecionar diferentes tipos de falhas, há muitas questões que permanecem abertas. Entre elas, estudar a influência de diversos fatores na qualidade de detecção, como: distância entre a sonda e a superfície inspecionada, posição relativa entre a sonda e a superfície inspecionada.

8 Produção científica e técnica

As seguintes produções foram realizadas ao longo do presente trabalho.

- Artigo em preparação para publicação em **Materials Research.**

Continuous Scanning technique with Barkhausen Magnetic Noise for carbon steel sheets.

- Artigo em anais de congresso

NORIS, L. F.; PADOVESE, L. Mapeamento Contínuo com Ruído Magnético de Barkhausen em Chapas Aços Carbono. **14ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (Coteq – 2017)** Rio de Janeiro, Brasil, ISSN1980-1599, 2017.

Referências Bibliográficas

ALBERTERIS CAMPOS, M. et al. Characterization of the elastic–plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic barkhausen noise. **NDT & E International**, v. 41, n. 8, p. 656–659, dez. 2008.

ANGLADA-RIVERA, J.; PADOVESE, L. .; CAPÓ-SÁNCHEZ, 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, n. 2–3, p. 299–306, jun. 2001.

APAZA HUALLPA, E. **Caracterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 29 mar. 2011.

BALDEV, R. et al. No Title. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 37, n. 11, p. 789–798, 2001.

BARKHAUSEN, H. Two with help of new repeating rediscovered appearances by H Barkhausen - The silence during unmagnetising of iron. **Physikalische Zeitschrift**, v. 20, p. 401–403, 1919.

BECKER, R.; W, D. Ferromagnetismus. **Springer-Verlag, Berlin**, 1939.

BERTOTTI, G.; FIORILLO, F.; MONTORSI, A. The role of grain size in the magnetization process of soft magnetic materials. **Journal of Applied Physics**, v. 67, n. 9, p. 5574–5576, maio 1990.

BITTEL, H. Noise of ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 5, n. 3, p. 359–365, set. 1969.

BLAOW, M.; EVANS, J. .; SHAW, B. A. Effect of deformation in bending on magnetic Barkhausen noise in low alloy steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 386, n. 1–2, p. 74–80, nov. 2004.

BLAOW, M.; EVANS, J. T.; SHAW, B. A. Magnetic Barkhausen noise: the influence of microstructure and deformation in bending. **Acta Materialia**, v. 53, n. 2, p. 279–287, jan. 2005a.

BLAOW, M.; EVANS, J. T.; SHAW, B. A. Surface decarburisation of steel detected by magnetic barkhausen emission. **Journal of Materials Science**, v. 40, n. 20, p. 5517–5520, out. 2005b.

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. Second edi ed. New York: D. van Nostrand Company Inc., 1964.

BUTTLE, D. J.; SHAW, B.; MOORTHY, V. Determination of residual stresses by magnetic methods. **Measurement good practice guide - National Physical Laboratory**, v. 88, 2006.

CAMPOS, M. A. **Métodos Magnéticos Não-Destrutivos para Caracterização Elasto-Plástica em Chapas de Aços Carbono.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

CAPÓ-SÁNCHEZ, J. et al. Dependence of the magnetic Barkhausen emission

with carbon content in commercial steels. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 4, p. 1367–1370, fev. 2004.

CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; PADOVESE, L. Magnetic Barkhausen noise measurement by resonant coil method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 321, n. 18, p. L57–L62, set. 2009.

CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; PÉREZ-BENITEZ, J.; PADOVESE, L. R. Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise. **NDT & E International**, v. 40, n. 2, p. 168–172, mar. 2007.

CAPÓ SÁNCHEZ, J.; DE CAMPOS, M. F.; PADOVESE, L. R. Magnetic Barkhausen emission in lightly deformed AISI 1070 steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, n. 1, p. 11–14, jan. 2012.

CHIKAZUMI, S. **Physics of Ferromagnetism**. Second edi ed. New York: Oxford University Press Inc., 1997.

CHIKAZUMI, S.; SUZUKI, K.; IWATA, H. Studies on the Magnetic Anisotropy Induced by Cold Rolling of Ferromagnetic Crystal (II). Iron-Aluminum Alloys. **Journal of the Phisical Society of Japan.**, v. 15, n. 2, p. 250–260, 1960.

CLAPHAM, L. et al. Characterization of texture and residual stress in a section of 610 mm pipeline steel. **NDT & E International**, v. 28, n. 2, p. 73–82, abr. 1995.

CROUCH, A. E.; BEUKER, T. **In-Line Stress Measurement by the Continuous Barkhausen Method**2004 International Pipeline Conference, Volumes 1, 2, and 3. **Anais**...Calgary, Alberta, Canada: ASME, 2004

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. 2nd. ed. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., 2009.

DELGADO JÚNIOR, H. G. **Modelamento Matemático e Investigação Experimental da Evolução das Tensões de Soldagem de Aços.** [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2010.

DESVAUX, S. et al. The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect. **NDT & E International**, v. 37, n. 1, p. 9–17, jan. 2004.

DHAR, A.; ATHERTON, D. L. Influence of magnetizing parameters on the magnetic Barkhausen noise. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 28, n. 6, p. 3363–3366, 1992.

DHAR, A.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, D. L. Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel. **NDT & E International**, v. 34, n. 8, p. 507–514, dez. 2001.

FANG, Z.; XIE, N. An analysis of various methods for computing the envelope of a random signal. **Applied Ocean Research**, v. 17, n. 1, p. 9–19, jan. 1995.

FARIA, R. .; LIMA, L. F. C. . **Introdução ao Magnetismo dos Materiais.** First edi ed. São Paulo: Editora Livraria da Física., 2005.

FRANCO, F. A. **DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO BASEADO NO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN PARA**

CARACTERIZAÇÃO DE TENSÕES ELÁSTICAS E DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS EM AÇOS. [s.l.] University of São Paulo, 2010.

FRANCO, F. A. et al. Relation Between Magnetic Barkhausen Noise and Hardness for Jominy Quench Tests in SAE 4140 and 6150 Steels. **Journal of Nondestructive Evaluation**, 2013.

FRANCO, F. A.; PADOVESE, L. R. NDT flaw mapping of steel surfaces by continuous magnetic Barkhausen noise: Volumetric flaw detection case. **NDT & E International**, v. 42, n. 8, p. 721–728, dez. 2009.

GATELIER-ROTHEA, C. et al. Characterization of pure iron and (130 ppm) carbon-iron binary alloy by Barkhausen noise measurements: study of the influence of stress and microstructure. **Acta Materialia**, v. 46, n. 14, p. 4873–4882, 1998.

HALLER, T. R.; KRAMER, J. J. Observation of Dynamic Domain Size Variation in a Silicon-Iron Alloy. **Journal of Applied Physics**, v. 41, n. 3, p. 1034–1035, mar. 1970.

HIGUCHI, T. Magnetizing frequency dependence of magnetic domain size in 50 % nickel-iron alloy deduced from a statistical analysis of core noise. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 7, n. 17, p. 2379–2385, 1974.

HWANG, D. G.; KIM, H. C. The influence of plastic deformation on Barkhausen effects and magnetic properties in mild steel. **Journal of Physics D-Applied Physics**, v. 21, n. 12, p. 1807–1813, 1988.

ILKER YELBAY, H.; CAM, I.; HAKAN GÜR, C. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. **NDT & E International**, v. 43, n. 1, p. 29–33, jan. 2010.

JILES, D. . Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. **Czechoslovak Journal of Physics.**, v. 50, n. 8, p. 893–988, 2000.

JILES, D. C. Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 21, n. 7, p. 1186–1195, 14 jul. 1988a.

JILES, D. C. Review of magnetic methods for nondestructive evaluation. **NDT International**, v. 21, n. 5, p. 311–319, out. 1988b.

JILES, D. C. The effect of stress on magnetic Barkhausen activity in ferromagnetic steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 25, n. 5, p. 3455–3457, 1989.

JILES, D. C. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. New York: Chapman and Hall., 1994.

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.

KERSTEN, M. **Underlying theory of ferromagnetic hysteresis and coercivity**. Leipzig: Hirzel, 1943.

KRAUSE, T. W. et al. Investigation of the stress-dependent magnetic easy axis

in steel using magnetic Barkhausen noise. **Journal of Applied Physics**, v. 79, n. 8, p. 4242, 1996.

KRAUSE, T. W.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, D. L. Characterization of the magnetic easy axis in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise. **Journal of Applied Physics**, v. 75, n. 12, p. 7983–7988, 15 jun. 1994.

MANDAL, K.; CRAMER, T.; ATHERTON, D. . The study of a racetrack-shaped defect in ferromagnetic steel by magnetic Barkhausen noise and flux leakage measurements. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 212, n. 1–2, p. 231–239, mar. 2000.

MOORTHY, V. et al. Effect of Tensile Deformation on Micromagnetic Parameters in 0 . 2 % Carbon. **Acta Metallurgica**, v. 47, n. 6, p. 1869–1878, 1999.

MOORTHY, V.; SHAW, B. A.; DAY, S. Evaluation of applied and residual stresses in case-carburised En36 steel subjected to bending using the magnetic Barkhausen emission technique. **Acta Materialia**, v. 52, n. 7, p. 1927–1936, abr. 2004.

MOORTHY, V.; SHAW, B. A.; EVANS, J. T. **Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis**. [s.l: s.n.]. v. 36

MOORTHY, V.; SHAW, B. A.; HOPKINS, P. Surface and subsurface stress evaluation in case-carburised steel using high and low frequency magnetic barkhausen emission measurements. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 299, n. 2, p. 362–375, abr. 2006.

MORGAN, M. A. C. **Ruído Magnético de Barkhausen Contínuo Rotacional.** [s.l.] University of São Paulo., 2013.

NG, D. H. . et al. Study of microstructure, mechanical properties, and magnetization process in low carbon steel bars by Barkhausen emission. **Materials Science and Engineering: A**, v. 358, n. 1–2, p. 186–198, out. 2003.

Norma NBR 6152. ABNT, , 2002.

NORMANDO, P. G. et al. Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 12, p. 2886–2891, maio 2010.

PADOVESE, L. R.; MARTIN, N.; MILLIOZ, F. Time–frequency and time-scale analysis of Barkhausen noise signals. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 223, n. 5, p. 577–588, 1 ago. 2009.

PEREZ-BENITEZ, J. A. et al. A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel. **NDT & E International**, v. 41, n. 1, p. 53–58, jan. 2008.

PÉREZ-BENITEZ, J. A. et al. A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 288, p. 433–442, mar. 2005.

PÉREZ-BENITEZ, J. A.; CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; PADOVESE, L. R. **Characterization of angular dependence of macroscopic magnetic properties in ASTM 36 steel using magnetic Barkhausen noise**. [s.l: s.n.]. v. 40

PEREZ-BENITEZ, J. A.; PADOVESE, L. R. Study of the influence of simultaneous variation of magnetic material microstructural features on domain wall dynamics. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 322, n. 20, p. 3101–3105, out. 2010.

PFUTZNER, H.; SCHONHUBER, P. On the problem of the field detection for single sheet testers. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 27, n. 2, p. 778–785, mar. 1991.

RANJAN, R. et al. Grain size measurement using magnetic and acoustic Barkhausen noise. **Journal of Applied Physics**, v. 61, n. 8, p. 3199–3201, 15 abr. 1987.

SABET-SHARGHI, R. et al. The effect of defect introduction vs. load application sequencing on defect-induced stress distributions in steel samples. **NDT & E International**, v. 33, n. 4, p. 201–212, jun. 2000.

SABLIK, M. J. et al. Modeling of Effect of Plastic Deformation on Barkhausen Noise and Magnetoacoustic Emission in Iron With 2% Silicon. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 44, n. 11, p. 3221–3224, nov. 2008.

SAKAMOTO, H.; OKADA, M.; HOMMA, M. Theoretical analysis of Barkhausen noise in carbon steels. **IEEE Transactions on MagneticsMagnetics**, v. 23, n. 5, p. 2236–2238, 1987.

SEEGER, A. et al. Effect of Lattice Defects on the Magnetization Curve of Ferromagnets. **Journal of Applied Physics**, v. 35, n. 3, p. 740–748, mar. 1964.

SIX, W.; SNOEK, J. I.; BURGERS, W. G. No Title. **De Ingenier 49E, 195**, 1934.

SONG. Y. Y, D. G. P. AND J. H. H. Y. S. A. AND G. M. K. The effect of microstructural changes on magnetic Barkhausen noise and magnetomechanical acoustic emission in Mn–Mo–Ni pressure vessel steel. **JAP**, v. 87, n. 9, 2000.

STEFANITA, C.-G. et al. Analysis of cold rolled steels of different reduction ratio using the magnetic Barkhausen noise technique. **Journal of Materials Science**, v. 36, n. 11, p. 2795–2799, 2001.

STEFANITA, C.-G.; ATHERTON, D. .; CLAPHAM, L. Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel. **Acta Materialia**, v. 48, n. 13, p. 3545–3551, ago. 2000.

STEFANITA, C. G. **From bulk to nano: the many sides of magnetism.** First edi ed. Heidelberg, Berlin.: Springer Series in Materials Science., 2008.

STEFANITA, C. G.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, D. L. Subtle changes in magnetic Barkhausen noise before the macroscopic elastic limit. **Journal of Materials Science**, v. 35, n. 11, p. 2675–2681, 2000.

STUPAKOV, O. et al. Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 462, n. 1–2, p. 351–354, jul. 2007.

TIITO, S.; OTALA, M.; S¨AYN¨AJ¨AKANGAS, S. Non-destructive measurement of steel grain size. **NDT**, v. 9, p. 117, 1976.

TUMANSKI, S. Induction coil sensors—a review. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 3, p. R31–R46, 1 mar. 2007.