



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

TÉCNICA NÃO DESTRUTIVA PARA ANÁLISE DA INTERAÇÃO DE LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO E MATERIAL

Por

João Pereira Leite

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Paraíba para obtenção do
grau de Doutor.*

João Pessoa - Paraíba

Dezembro, 2014

JOÃO PEREIRA LEITE

**TÉCNICA NÃO DESTRUTIVA PARA ANÁLISE DA INTERAÇÃO
DE LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO E MATERIAL**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obter o Grau de Doutor.

Orientador: Josinaldo Pereira Leite, Prof. Dr, UFPB

João Pessoa - Paraíba

Dezembro, 2014

L533t Leite, João Pereira.

Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material / João Pereira Leite.-- João Pessoa, 2014.

149f. : il.

Orientador: Josinaldo Pereira Leite

Tese (Doutorado) - UFPB/CT

1. Engenharia mecânica. 2. Campo magnético. 3. Ensaios Não Destrutivos (END). 4. Sensores de efeito Hall.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

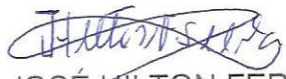
TÉCNICA NÃO DESTRUTIVA PARA ANÁLISE DA INTERAÇÃO DE LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO E MATERIAL

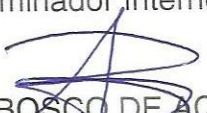
Por

JOÃO PEREIRA LEITE

Tese aprovada em 04 de dezembro de 2014


Prof. Dr. JOSINADO PEREIRA LEITE
Orientador


Prof. Dr. JOSÉ HILTON FERREIRA DA SILVA
Examinador Interno


Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Examinador Interno


Prof. Dr. EDGARD DE MACÊDO SILVA
Examinador Externo


Prof. Dr. SÉRGIO SOUTO MAIOR TAVARES
Examinador Externo

Dedico essa conquista à minha esposa Ana Maria, meus filhos Emanuel Lucas e João Pedro, meus pais João Ribeiro e Edith Pereira e a todos os meus irmãos, que sempre me estenderam a mão nos momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria inicialmente de agradecer a DEUS que sempre me iluminou e guiou meus passos, colocando na minha vida pessoas especiais e desafios grandiosos.

Aos meus orientadores, Prof. Edgard de Macêdo Silva e Prof. Josinaldo Pereira Leite, pela oportunidade, amizade, apoio, dedicação, profissionalismo e conhecimento importantíssimo que possibilitou chegarmos à reta final deste trabalho.

Aos participantes da minha banca de qualificação e de defesa de tese, Prof. José Hilton Ferreira da Silva, Prof. João Bosco de Aquino Silva e Prof. Sérgio Souto Maior Tavares, que dentre tantas atividades acadêmicas, se dispuseram a contribuir com esse trabalho, sempre com sugestões valiosas que engrandeceram essa pesquisa.

Ao meu colega Prof. Walter Macêdo Fialho que iniciou comigo essa caminhada, sempre um motivando o outro nos momentos de dificuldade, contribuindo com as tarefas, compartilhando dúvidas, conhecimento e muito trabalho.

Ao Prof. Neilor César dos Santos, pela amizade, apoio e colaboração em algumas fases deste trabalho.

A toda a equipe do GSCMAT do IFPB bem representada na pessoa da minha amiga e colega Ana Lucia Silva Souza Andrade que me acolheu em seu laboratório, cedeu seus equipamentos e me ajudou na execução dos ensaios.

A toda equipe do PPGEM da UFPB representada nas pessoas do Prof. Paulo Henrique de Miranda Montenegro, Mônica Rodrigues da Silva e Noaldo Sales dos Santos pela seriedade, comprometimento e dedicação em receber bem e executar bem suas missões.

TÉCNICA NÃO DESTRUTIVA PARA ANÁLISE DA INTERAÇÃO DE LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO E MATERIAL

RESUMO

O uso de materiais ferromagnéticos como o aço tem sido abundante na fabricação de produtos e equipamentos devido às suas propriedades magnéticas, que gera uma interação entre eles e os campos magnéticos aplicados. Essa interação tem sido estudada para o desenvolvimento de Ensaios Não Destrutivos (END) utilizados na detecção de trincas, heterogeneidades, grau de deformação e acompanhamento da precipitação de fases desejáveis e/ou indesejáveis em materiais. Neste trabalho foi desenvolvida uma técnica END baseada na aplicação de campos magnéticos na região de reversibilidade magnética dos materiais. Foram comparados um aço SAE 1045 e uma liga de alumínio ASTM 6261, sendo eles classificados como ferromagnético e paramagnético, respectivamente. Buscou-se o conhecimento de como as variáveis geometria e textura metalográfica poderiam interferir nas respostas de campo magnético induzido (B) nestes materiais. Determinaram-se os valores de H e espessuras ideais, as equações que relacionam geometria, espessura e formato das amostras e se havia anisotropia magnética rotacionando as amostras. A técnica se mostrou promissora, tendo ambos os materiais interagido com o campo magnético aplicado por se trabalhar em uma região de magnetização comum aos dois materiais, a região de reversibilidade magnética. O método se mostrou sensível à textura metalográfica, sendo promissora para a determinação da direção de melhor magnetização em materiais para fins elétricos. A geometria das amostras influenciou no valor de campo magnético induzido, sendo necessária a realização de correções matemáticas para a comparação de materiais de diferentes formatos, espessuras e tamanhos. Para o aço SAE 1045 ocorreu anisotropia magnética em virtude da existência de textura metalográfica proveniente do processo de fabricação por laminação do aço. Para o alumínio ASTM 6261 não ocorreu anisotropia magnética em virtude da inexistência de textura metalográfica.

Palavras-Chave: Campo magnético; Ensaios Não Destrutivos (END); Sensores de efeito Hall.

NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUE FOR ANALYSIS OF INTERACTION OF MAGNETIC FLUX AND MATERIALS

ABSTRACT

The use of ferromagnetic materials such as steel have been abundant in products and manufacturing equipment due to their magnetic properties, which generates an interaction between them and the applied magnetic fields. This interaction has been studied for the development of Non-Destructive Testing (NDT) used to detect cracks, heterogeneity, degree of deformation and accompanying precipitation of desirable and / or undesirable phases in materials. In this work a NDT technique based on the application of magnetic fields in the region of reversal of the magnetic materials has been developed. There were compared an SAE 1045 steel and an ASTM 6261 aluminum alloy, being then classified as paramagnetic and ferromagnetic, respectively. It was tried to knowledge of how the variables metallographic geometry and texture could interfere with magnetic induction (B) in these materials. It was determined the values of H and optimum thickness, the equations relating the geometry, thickness, and shape of the samples had magnetic anisotropy and rotating the samples. The technique proved promising with both materials interacted with the magnetic field applied by working in a common region for the two materials magnetization, the magnetic region of reversibility. The method was sensitive to metallographic texture, being promising for determining the best direction of magnetization in materials for electrical purposes. The geometry of the samples influenced the amount of magnetic induction, carrying out mathematical corrections for the comparison of different shapes, sizes, thicknesses and materials is required. For the SAE 1045 steel was magnetic anisotropy due to the existence of metallographic texture from the manufacturing process by rolling steel. For aluminum ASTM 6261 did not occur in magnetic anisotropy due to the lack of metallographic texture.

Keywords: Magnetic field; Nondestructive Testing (NDT); Hall effect sensors.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVO GERAL	25
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	MAGNETIZAÇÃO DOS MATERIAIS	26
2.1.1	Comportamento dos materiais ferromagnéticos	28
2.1.2	Micromagnetismo dos materiais ferromagnéticos	31
2.2	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	34
2.2.1	Fluxo magnético, Força magnética e tensão Hall	34
2.2.2	Permeabilidade magnética	35
2.3	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	37
2.3.1	Correntes parasitas	39
2.3.2	Efeito Barkhausen	43
2.4	EFEITO DA MICROESTRUTURA NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	46
2.5	EFEITO HALL	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	MATERIAL	58
3.2	EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE	60
3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	61
3.4	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	63
3.4.1	Determinação do campo magnético aplicado ideal (H)	63
3.4.2	Estudo da influência da seção longitudinal	66
3.4.3	Estudo do efeito da anisotropia do material	67

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
4.1	ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DO MATERIAL.....	69
4.1.1	Estudo do efeito da espessura do aço SAE 1045.....	69
4.1.2	Estudo do efeito da espessura do alumínio ASTM 6261.....	76
4.1.3	Comparativo do efeito da espessura no aço e alumínio estudados.....	81
4.2	ESTUDO DO EFEITO DE BORDA.....	82
4.2.1	Estudo do efeito de borda do aço SAE 1045.....	83
4.2.2	Estudo do efeito de borda do alumínio ASTM 6261.....	90
4.2.3	Comparação do efeito da espessura no aço e alumínio estudados.....	97
4.3	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE DIÂMETRO DAS AMOSTRAS ($\varnothing$).....	98
4.3.1	Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra ($\varnothing$) para o aço SAE 1045.....	98
4.3.2	Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra ($\varnothing$) para o alumínio ASTM 6261.....	102
4.3.3	Comparativo da influência da variação de diâmetro da amostra ($\varnothing$) para o aço e o alumínio.....	104
4.4	ESTUDO DO FORMATO DA SEÇÃO LONGITUDINAL DA AMOSTRA.....	105
4.4.1	Estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o aço SAE 1045.....	105
4.4.2	Estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o alumínio ASTM 6261.....	109
4.4.3	Comparativo do estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o aço e o alumínio.....	113
4.5	DEPENDÊNCIA ANGULAR DE B EM FUNÇÃO DE H COM A ROTAÇÃO DA AMOSTRA.....	114
4.5.1	Estudo da dependência angular de B em função de H com a rotação da amostra para o aço SAE 1045.....	115

4.5.2	Estudo da dependência angular de B em função de H com a rotação da amostra para o alumínio ASTM 6261.....	122
4.5.3	Comparativo da dependência angular de B em função de H com a rotação da amostra entre o aço e o alumínio.....	127
4.6	ANÁLISE METALOGRÁFICA DO MATERIAL.....	128
4.6.1	Análise microestrutural do aço SAE 1045.....	128
4.6.2	Análise microestrutural do alumínio ASTM 6261.....	133
4.6.3	Comparativo da análise microestrutural do aço e alumínio.....	139
5	CONCLUSÃO.....	141
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
	REFERÊNCIAS.....	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Comparativo do comportamento magnético de materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Figura 2.1(a) Comportamento de $B \times H$ para os três materiais; 2.2(b) Comportamento de $M \times H$ para os três materiais (adaptado de CALLISTER, 2002; e BERTOTTI, 1998).....	27
Figura 2.2 -	Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos (adaptado de SERNA-GIRARDO, 2007; McCURRIE, 1994).....	29
Figura 2.3 -	Curva de magnetização característica para aços (NASCIMENTO, 2011).....	30
Figura 2.4 -	Região de interface dos domínios magnéticos – paredes de domínio a 180° (adaptado de Cullity, 1972).....	32
Figura 2.5 -	Dependência da energia total com a espessura das paredes de domínio (adaptado de Cullity, 1972).....	33
Figura 2.6 -	Forma como as linhas de campo magnético atravessam os materiais.....	34
Figura 2.7 -	Perturbação nas linhas de fluxo magnéticos causadas por materiais de diferentes permeabilidades (Fonte: próprio autor)	36
Figura 2.8 -	Princípio de funcionamento do ensaio de correntes parasitas (a) material ensaiado onde há a inexistência de trincas (b) material ensaiado com a presença de trinca superficial (CARNEVAL, 2007).....	40
Figura 2.9 -	Variação da impedância da bobina de ensaio por correntes parasitas com o tempo de envelhecimento do aço UNS S31803 (adaptado de NORMANDO, 2010).....	41
Figura 2.10 -	Profundidade de penetração das correntes parasitas em função da frequência e das características dos materiais (RADTKE, 2001)	42
Figura 2.11 -	Equipamento clássico de ensaio Barkhausen (a) e amostra utilizada para análise do eixo de fácil magnetização do material (b) (adaptado de CALDAS-MORGAN et al, 2012).....	45

Figura 2.12 -	Perdas magnéticas totais e suas componentes histerética (Ph), parasita (Pp) e anômala (Pa) em aços para fins elétricos: 1006SR (aço ABNT 1006 sem recozimento); 1006CR (aço ABNT 1006 com recozimento); GO (aços de grão orientados com 3% Si) (LANDGRAF, 2001).....	47
Figura 2.13 -	Curvas de magnetização para cristais cúbicos de Fe e Ni (adaptado de Cullity, 1972).....	49
Figura 2.14 -	Efeito Hall em condutores energizados (adaptado de LUZ, 2007)	51
Figura 2.15 -	Esquema elétrico interno de montagem de um sensor Hall típico (adaptado de Honeywell, 2004).....	53
Figura 2.16 -	Funções de transferências típicas do sensor SS495A (adaptado de HONEYWELL, 2004).....	54
Figura 2.17 -	Curva típica de saturação de sensores hall (adaptado de ALLEGRO, 2012).....	56
Figura 2.18 -	Variação da tensão hall com o deslocamento entre sensor e a fonte produtora do campo magnético.....	56
Figura 3.1 -	Geometria das amostras dos tipos 1, 2 e 3.....	59
Figura 3.2 -	Representação esquemática do equipamento de teste: (1) Sistema de alimentação; (2) solenoide; (3) sensor Hall; (4) amostra; (5) placa de aquisição de dados; (6) computador; (7) bancada; (8) potenciômetro.....	60
Figura 3.3 -	Princípio de funcionamento da técnica de ensaio proposta: (1) Alimentação do solenoide; (2) solenoide; (3) núcleo do solenoide; (4) sensor Hall; (5) amostra.....	62
Figura 3.4 -	Equipamento de ensaio (GSCMat, IFPB, PB) : (1) Fonte de alimentação; (2) bancada; (3) placa de aquisição de dados; (4) computador; (5) Multímetro.....	63
Figura 3.5 -	Esquema de posicionamento do solenoide, sensor Hall e amostra para estudo do efeito da espessura do material.....	64
Figura 3.6 -	Posição da medição de B versus H no centro e na proximidade da borda das amostras Tipo1.....	65
Figura 3.7 -	Preparação e direção de rotação das amostras para estudo da variação de B com o ângulo de rotação das amostras.....	67
Figura 4.1 -	Curva de magnetização para as amostras Tipo1 do aço SAE 1045	70
Figura 4.2 -	Curva B x Espessura para as amostras Tipo1 do aço SAE 1045 – (a) Ajuste logarítmico da curva; (b) Comparativo das Curvas B x Espessura (experimental e simulada).....	72
Figura 4.3 -	Utilização de concentrador de fluxo magnético para maximização dos valores de B. (a) esquema de posicionamento; (b) curva B x Espessura do concentrador (adaptado de ALLEGRO, 2014).....	75

Figura 4.4 -	Curva de magnetização para as amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261.....	77
Figura 4.5 -	Curva B x Espessura para as amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261 – (a) Ajuste exponencial da curva; (b) Comparativo das Curvas B x Espessura experimental e simulada.....	80
Figura 4.6 -	Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do aço SAE 1045 para H de 7.43 Oe (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro).....	83
Figura 4.7 -	Representação do efeito de borda a partir da variação do ângulo de incidência α . (a) trajeto das linhas de campo magnético e ângulo de incidência sem a presença do efeito de borda. (b) trajeto das linhas de campo e variação do ângulo de incidência com a presença do efeito de borda (Adaptado de CARUSO et al, 2014).....	86
Figura 4.8 -	Curvas de magnetização e amplitude do aço SAE 1045, sendo: (a) espessura de 2 mm; (b) espessura de 4 mm; (c) espessura de 6 mm; (d) espessura de 8 mm; (e) espessura de 11 mm.....	87
Figura 4.9 -	Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261 para H de 14.9 Oe (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro).....	91
Figura 4.10 -	Curvas de magnetização do ASTM 6261(a) e do Ar (b) e valores de permeabilidade magnética dos materiais.....	92
Figura 4.11 -	Curvas de magnetização e amplitude do alumínio ASTM 6261, sendo: (a) espessura de 2 mm; (b) espessura de 4 mm; (c) espessura de 6 mm; (d) espessura de 8 mm; (e) espessura de 11 mm.....	94
Figura 4.12 -	Valores de B para diferentes valores de $\varnothing$ das amostras Tipo2 do aço SAE 1045.....	99
Figura 4.13 -	Montagem de concentrador de fluxo magnético para amplificação dos valores de B. (a) esquema de posicionamento; (b) Curva B x Diâmetro do concentrador (adaptado de Gillet et al, 2014).....	101
Figura 4.14 -	Valores de B para diferentes valores de $\varnothing$ de amostras Tipo2 do alumínio ASTM 6261.....	103
Figura 4.15 -	Valores B x $\varnothing$ para amostras Tipo2 e B x L para amostras Tipo3 do aço SAE 1045.....	106
Figura 4.16 -	Valores de B para diferentes valores de áreas da seção longitudinal de amostras do Tipo2 e Tipo3 do aço SAE 1045.....	107

Figura 4.17 -	Valores B x ϕ para amostras Tipo2 e B x L para amostras Tipo3 do alumínio ASTM 6261.....	110
Figura 4.18 -	Valores de B para diferentes valores de áreas da seção longitudinal de amostras do Tipo2 e Tipo3 do alumínio ASTM 6261.....	111
Figura 4.19 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 2mm).....	115
Figura 4.20 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 4mm).....	116
Figura 4.21 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 6mm)	116
Figura 4.22 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 8mm)	117
Figura 4.23 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE1045, 11mm)	117
Figura 4.24 -	Representação da região longitudinal das amostras de aço SAE 1045 onde ocorreram os valores de B _{máx.} e B _{min.} (a) região de B _{máx.} e B _{min.} no centro das amostras/ (b) região de B _{máx.} e B _{min.} na borda das amostras.....	119
Figura 4.25 -	Campo magnético induzido com rotação para todas as amostras Tipo1 para o aço SAE1045 (a) H aplicado no centro das amostras e (b) H aplicado na borda das amostras.....	120
Figura 4.26 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 2mm)	122
Figura 4.27 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 4mm)	123
Figura 4.28 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 6mm)	123
Figura 4.29 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 8mm)	124
Figura 4.30 -	Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 11mm)	124
Figura 4.31 -	Campo magnético induzido com rotação para todas as amostras Tipo1 para o alumínio ASTM 6261 (a) H aplicado no centro das amostras e (b) H aplicado na borda das amostras.....	125
Figura 4.32 -	Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, SAE 1045 (face de acoplamento do sensor) na posição 0°.....	129
Figura 4.33 -	Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, SAE 1045 (face de acoplamento do sensor) na posição 90°.....	129
Figura 4.34 -	Micrografia ótica da seção transversal da amostra Tipo1, SAE 1045 (corte a 0 °).....	129

Figura 4.35 -	Representação dos esforços compressivos causadores da deformação plástica na seção longitudinal das amostras de aço SAE 1045. (a) e (b) – rolos laminadores; (c) tarugo de aço SAE 1045.....	131
Figura 4.36 -	Representação dos esforços compressivos e trativos causadores da deformação plástica na seção transversal das amostras de aço SAE 1045. (a) e (b) – rolos laminadores; (c) vergalhão de aço SAE 1045.....	132
Figura 4.37 -	Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, alumínio ASTM 6261 (face de acoplamento do sensor) na posição 0°.....	134
Figura 4.38 -	Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, alumínio ASTM 6261 (face de acoplamento do sensor) na posição 90°.....	134
Figura 4.39 -	Micrografia ótica da seção transversal da amostra Tipo1, alumínio ASTM 6261 (corte a 0°).....	135
Figura 4.40 -	Representação dos esforços compressivos causadores da deformação plástica na seção longitudinal das amostras de alumínio ASTM 6261. (a) vergalhão de alumínio ASTM 6261; (b) Matriz de extrusão.....	136
Figura 4.41 -	Representação dos esforços compressivos causadores da deformação plástica na seção transversal das amostras de alumínio ASTM 6261. (a) vergalhão de alumínio ASTM 6261 (b) – matriz de extrusão; (c) câmara de extrusão; (d) êmbolo de compressão.....	137
Figura 4.42 -	MEV com EDS para as amostras de alumínio ASTM 6261. (a) aumento de 600 x; (b) aumento de 1000x; e (c) aumento de 1800x.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Classificação das ligas metálicas de aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 (Espectrômetro PDA 7000 <i>Shimadzu</i> – CTGÁS/RN).	58
Tabela 3.2 -	Especificações do solenoide.....	61
Tabela 4.1 -	Valores de permeabilidade magnética obtidos experimentalmente para o aço SAE 1045, a liga de alumínio ASTM 6261 e o Ar.....	93
Tabela 4.2 -	Intervalo de ângulos de ocorrência de Bmin. e Bmáx. para amostras Tipo1 de aço SAE 1045.....	118

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Associação Americana para Teste de Materiais)
CGS	Sistema Cegesimal de Unidades
ECT	Eddy Current Testing (Ensaio de Correntes Parasitas)
END	Ensaios não Destrutivos
GSCMAT	Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)
MO	Microscopia Ótica
NBR	Norma Brasileira
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
SI	Sistema Internacional de Unidades
WSA	World Steel Association (Associação Mundial do Aço)
A	Área
B	Campo magnético induzido / Indução magnética / Densidade de fluxo
Bb	Campo magnético aplicado
Br	Remanescência magnética
D	Tamanho dos grãos
E	Espessura das amostras
Eh	Campo elétrico gerado
f	Frequência do sinal aplicado
F _L	Força eletromagnética de Lorentz

GO	Grãos orientados
GNO	Grãos não orientados
H	Campo magnético aplicado
Hc	Campo magnético coercitivo / Força coercitiva
I	Corrente elétrica
K	Constante de Boltzmann
K1	Constante de anisotropia magnetocristalina
L	Comprimento do solenoide
l	Constante de rede
M	Magnetização do material
Ms	Magnetização de saturação
Mx	Maxwell
N	Número de espiras
n	Densidade de carga
N/L	Relação de espiras e comprimento do solenoide
Pa	Perda anômala
Ph	Perda histerética
Pp	Perda parasita
q	Carga elétrica
R	Resistência elétrica
Ss	Sensibilidade de saída Hall
Tc	Temperatura Curie
V	Velocidade de deriva do elétron
Vh	Tensão Hall
Vn	Tensão de polo norte Hall
Voff	Tensão de offset Hall
Vs	Tensão de polo sul Hall
WB	Weber
X_m	Susceptibilidade volumétrica
β	Ângulo entre B e um vetor perpendicular à superfície do material
μ	Permeabilidade magnética do material
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa

φ	Fluxo magnético / linhas de indução magnética
$\varnothing$	Diâmetro
δ	Profundidade de penetração
σ	Condutividade elétrica do material

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END) são considerados técnicas de análises preditivas cada vez mais utilizadas por possibilitar a medição de propriedades específicas em materiais de fabricação sem causar qualquer dano permanente aos mesmos. Ser capaz de verificar a existência de anomalias sem inutilizar os produtos gera a possibilidade de implementação de inspeção cem por cento nos lotes produzidos, garantindo confiabilidade, desempenho e durabilidade desses componentes, o que está em consonância com os objetivos de qualidade e custo buscados pelos mais modernos sistemas de gestão da produção.

As técnicas END também podem ser utilizadas na detecção de anomalias e no acompanhamento de sua progressão em equipamentos e componentes estruturais, predizendo e evitando quebras ou falhas catastróficas que possam levar desde a perda de horas produtivas a danos de valor imensurável, como mortes e catástrofes ambientais, principalmente em indústrias do ramo naval, de petróleo e gás, energia nuclear e aeronáutica, cuja ocorrência de falhas geralmente é onerosa e dramática. Nestes casos, essas técnicas podem ser viabilizadas a partir do desenvolvimento de sensores de monitoramento contínuo de propriedades críticas, o que possibilita um acompanhamento integral e progressivo de sua condição, o que está em consonância com os objetivos dos sistemas de gestão da manutenção atuais, especificamente atrelados ao pilar da manutenção preditiva (TAVARES, 1996; PINTO *et al.*, 1999).

Dentre os materiais de engenharia mais consumidos mundialmente pode-se destacar o concreto e o aço. A WSA (*World Steel Association*) revelou que o consumo de aço no ano de 2012 foi de 1.412.600 toneladas e que o crescimento previsto para 2013 é de 4,3%. Dessa forma, desenvolver END específicos ao estudo desses materiais significa uma grande contribuição para a engenharia. Neste sentido, é relevante frisar que os aços carbono são materiais ferromagnéticos, portanto, susceptíveis a respostas magnéticas quando submetidos a campos magnéticos. O uso de materiais ferromagnéticos na fabricação de produtos e equipamentos é abundante, motivo pelo

qual o acompanhamento de suas propriedades magnéticas tem sido utilizado, com frequência, como uma técnica END para verificar a ocorrência e progressão de falhas em materiais (PEREDA, 2010). O estudo do comportamento do fluxo magnético tem sido realizado com resultados promissores na detecção da existência de descontinuidades tanto na superfície como de defeitos internos em materiais.

Os END mais conhecidos são a corrente parasita, o líquido penetrante, as partículas magnéticas, o ultrassom, a termografia, a radiografia e a análise visual (DNV, 2012; ABENDI, 2012). A maioria destes visa à detecção de anomalias e variações na microestrutura do material causadas durante a fabricação ou provenientes do uso.

Apesar dos incontestáveis benefícios dos END mais conhecidos sua aquisição é geralmente onerosa, muitos utilizam materiais consumíveis e geralmente só são manuseados por profissionais especializados. Exemplo disso são os ensaios radiográfico e ultrassônico, cujo preço de aquisição dos equipamentos é alto e sua manutenção e manuseio complexos. Já os de partículas magnéticas e líquido penetrante têm menores custos relacionados à aquisição de equipamentos e necessidade de treinamento, porém, utilizam materiais consumíveis, que precisam ser comprados, estocados e controlados. Esses fatores abrem no campo da pesquisa oportunidades para o desenvolvimento de novas técnicas capazes de detectar alterações no campo magnético induzido nos materiais ferromagnéticos e relacionar com suas possíveis anomalias.

Desenvolver técnicas não destrutivas de mais fácil aquisição, utilização e com boa precisão representa um desafio, mas pode gerar uma contribuição na ampliação da utilização de END preditivos nas indústrias do ramo naval, de petróleo e gás, energia nuclear e aeronáutica, aumentando a utilização dos equipamentos, reduzindo os custos de manutenção e evitando as falhas catastróficas e perdas humanas e viabilizar sua utilização em processos onde os custos as tornam proibitivas, como nas indústrias têxteis, de alimento e calçadistas, dentre outras, que utilizam equipamentos e utilidades susceptíveis a desgaste por corrosão, fadiga e envelhecimento.

Uma alternativa de END consiste na utilização de sensores capazes de monitorar a intensidade de fluxo magnético que interage com materiais ferromagnéticos. Sensores que usam como princípio o efeito magnético Hall custam apenas algumas unidades de dólares e são de simples utilização. Estudos sobre o efeito magnético Hall se deram a mais de cem anos, porém só foram colocados em prática com o advento da microeletrônica, a cerca de quatro décadas. Esses sensores são utilizados na indústria,

atualmente, nas mais variadas aplicações de sensoriamento, como tacômetros, chaves sem contatos, medidores de posição, espessura, corrente, tensão e campo magnético (ALLEGRO, 2012; NICHOLSON *et al.*, 1996).

Além das aplicações convencionais, os sensores Hall têm sido utilizados para detecção de tamanho e posição de trincas superficiais ou internas em materiais metálicos magnéticos (BI e JILES, 1998). Esse sensor é bastante sensível a variações no fluxo magnético e seu sinal de saída é potencializado com a aproximação da superfície magnética e com seu perfeito paralelismo a esta superfície, principalmente para captação da componente vertical do fluxo magnético (NETO *et al.*, 2008).

Mesmo sendo promissora a utilização de sensores que funcionam a partir do princípio do efeito Hall, há algumas limitações e variáveis a serem entendidas e controladas. Uma das dificuldades na sua utilização tem sido a sua faixa de trabalho permissível. Sensores com boa sensibilidade, da ordem de mVolts/Gauss, saturam quando submetidos a campos magnéticos inferiores a 1/10 de Tesla (ALLEGRO, 2012). Nessa faixa de operação os materiais ferromagnéticos mais comuns como o aço carbono e os aços liga operam na região de reversibilidade da movimentação das paredes de domínio magnético (CULLITY, 1972). Nessa região a maioria dos autores acredita não haver um comportamento magnético capaz de prever situações de anomalia e as técnicas convencionais existentes não operam nessa região.

Na região de reversibilidade da magnetização, os campos magnéticos produzidos são baixos, motivo pelo qual, variáveis como o próprio campo magnético terrestre, a qualidade do sinal de alimentação, o formato do transdutor a ser produzido, do equipamento de aquisição de dados, bem como as próprias condições do material que se pretende estudar (geometria, espessura) e o posicionamento do transdutor podem gerar variações no campo magnético de magnitude semelhante à relacionada às variações que se busca monitorar.

Dessa forma, sendo o sensor Hall sensível às variações de campo magnético, e sendo o campo magnético sensível à variações microestruturais e detecção de imperfeições dos materiais, sendo ainda este sensor de baixo custo e fácil manuseio, entende-se que sua aplicação pode auxiliar no desenvolvimento de uma promissora técnica END baseada na interação entre material e campo magnético, desde que se consiga responder às questões que podem representar limitações a sua utilização.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma técnica não destrutiva, baseada na interação entre densidade de linhas de campo e material, para o acompanhamento de variações de permeabilidade magnética em materiais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Verificar como ocorre a interação entre o sensor Hall, a densidade de linhas de campo magnético e os materiais estudados na região de reversibilidade dos domínios magnéticos;
- ii. Entender como a geometria e a textura metalográfica interferem nas respostas de campo magnético induzido em materiais de diferentes permeabilidades como o aço e o alumínio;
- iii. Estabelecer equações que relacionem campo magnético com tamanho, espessura e geometria das peças fora do intervalo estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MAGNETIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A história do magnetismo iniciou com a observação de Thales de Mileto de que uma rocha, a magnetita, era atraída por seu cajado, por volta do século VI a.C, mas seu estudo só foi aprofundado a partir do século XVII, com a descoberta do físico francês Arago, de que o ferro também poderia ser magnetizado (NASCIMENTO, 2011). Essa descoberta impulsionou os estudos sobre a capacidade de magnetização dos materiais, de forma que hoje eles podem ser classificados em três categorias: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

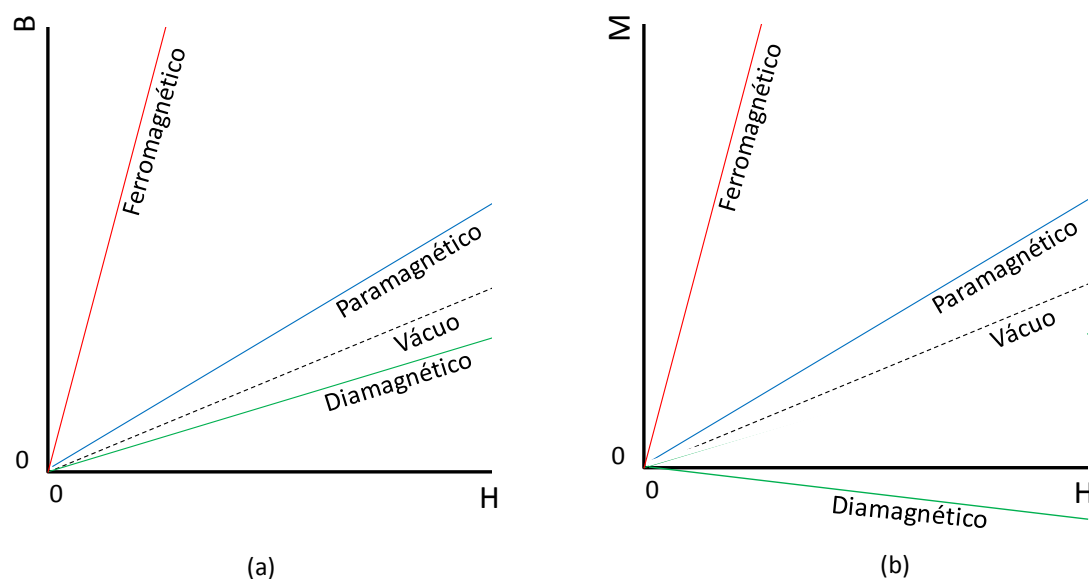
Callister (2002) considera o diamagnetismo a forma mais fraca de magnetismo induzido em um material, caracterizada por uma pequena magnitude do momento magnético induzido, e em sentido oposto ao campo aplicado.

Um material diamagnético pode ser caracterizado por sua pequena permeabilidade relativa (μ_r) ligeiramente menor que a unidade, susceptibilidade volumétrica (X_m) negativa e amplitude do campo magnético induzido (B) menor que a do vácuo (CALISTER, 2002; CULLITY, 1972; NASCIMENTO, 2011; CHIAVERINI, 1984).

Cullity (1972) define o paramagnetismo como a capacidade de alinhamento dos momentos magnéticos quando submetidos à aplicação de um campo magnético externo. Porém, esses momentos, originalmente orientados randomicamente, tendem a retornar a essa condição de orientação aleatória quando cessa o campo sobre os mesmos aplicados. Esses materiais podem ser caracterizados por suas pequenas permeabilidades relativas (μ_r) ligeiramente maiores que a unidade, susceptibilidades volumétricas (X_m) positivas e amplitudes do campo magnético induzido (B) maiores que a do vácuo (CALISTER, 2002; CULLITY, 1972; NASCIMENTO, 2011; CHIAVERINI, 1984).

Na figura 2.1 são comparados os comportamentos magnéticos de materiais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos. Na figura 2.1(a) é apresentado o gráfico $B \times H$. Na figura 2.1(b) é apresentado o gráfico $M \times H$. No eixo das abscissas encontra-se a variável (H). No eixo das ordenadas encontram-se as variáveis dependentes (B ou M). H representa o campo magnético aplicado, B o campo magnético induzido e M a magnetização do material.

Figura 2.1 - Comparativo do comportamento magnético de materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos para baixos campos magnéticos. Figura 2.1(a) Comportamento de $B \times H$ para os três materiais; 2.2(b) Comportamento de $M \times H$ para os três materiais (adaptado de CALLISTER, 2002; e BERTOTTI, 1998)



Da análise da figura 2.1(a) pode-se verificar que para um mesmo campo aplicado (H) os materiais apresentam diferentes capacidades de indução magnética (B), porém, para todos os casos B aumentou com o aumento de H , sendo os materiais ferromagnéticos os que têm a maior capacidade de amplificar H . Já da análise da figura 2.1(b) pode-se verificar que esse comportamento se repete, exceto para o material diamagnético, onde M diminui com o aumento de H . Essa diferença de comportamento entre B e M se dá devido o valor de B representar o somatório da contribuição da fonte que gerou o campo externo H e da contribuição do material, conforme apresentado na equação 2.1.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.1)$$

Onde:

B = densidade de fluxo magnético / campo magnético induzido (Gauss);

μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo (adimensional);

H = campo magnético aplicado (Oersted);

M = magnetização do material (Maxwell/cm²).

Pela equação 2.1 pode-se ver que a densidade de fluxo magnético induzido é calculada pela soma da contribuição da intensidade de campo magnético aplicado (H) e da magnetização do material (M). M representa a parcela de amplificação de H em virtude do alinhamento dos momentos magnéticos no material, sendo portanto, uma característica de cada material. Nos materiais diamagnéticos esse alinhamento se dá em sentido oposto ao de H , o que justifica o seu comportamento diferente dos demais materiais apresentados na figura 2.1(b). Já o fato dos valores de B e M serem maiores para os materiais ferromagnéticos, figuras 2.1(a) e 2.1(b), ocorre devido as diferentes permeabilidades magnéticas desses materiais (μ). A permeabilidade é representada pela inclinação das curvas de magnetização, cujo maior valor representa o material mais permeável, sendo os materiais ferromagnéticos os que têm uma maior permeabilidade magnética.

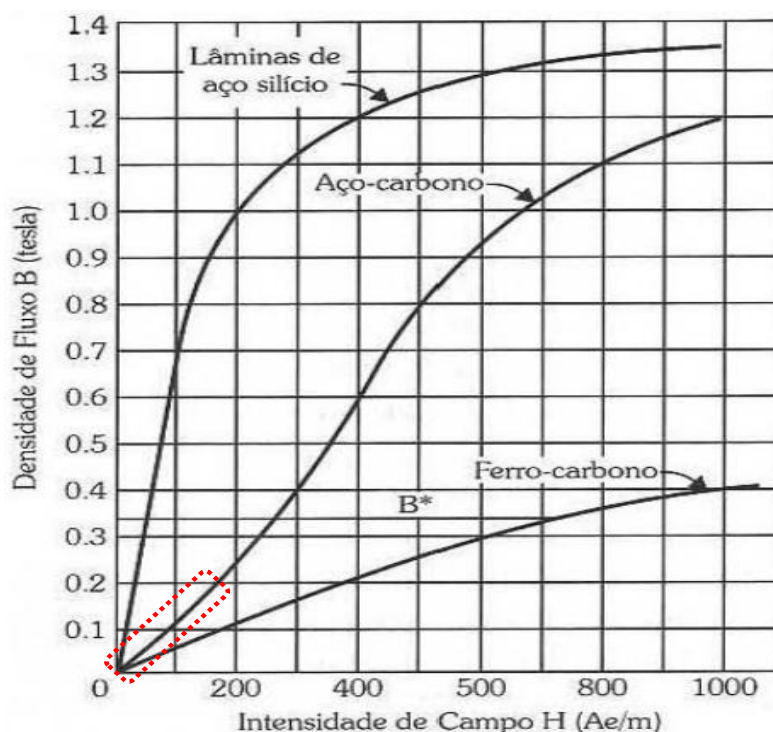
2.1.1 Comportamento dos materiais ferromagnéticos

A curva de magnetização apresentada na figura 2.1 representa apenas a região inicial da curva de magnetização dos materiais ferromagnéticos, única região de resposta para magnetização de materiais paramagnéticos e diamagnéticos, que só respondem com baixos valores de B e M para qualquer H aplicado. Os materiais ferromagnéticos apresentam valores de B e M mais altos para H maiores. Seu comportamento é representado por sua curva de magnetização completa, que relaciona H com B e M e pode ser visualizado na figura 2.2 No eixo das abscissas são apresentados os valores de H e no eixo das ordenadas os valores de B e M .

desse processo de magnetização irreversível, que só pode ser removido a partir da aplicação de um campo suficiente para causar a desmagnetização do material (H_c) (WLODARSKI, 2006). Um material que tenha sido magnetizado até o ponto D da curva não retornará pelo mesmo caminho ao ponto O, efeito conhecido como histerese magnética. Com o aumento de H a partir do ponto D o valor de M não mais aumentará pois todos os domínios magnéticos já estarão alinhados na direção e sentido do campo aplicado. B continuará aumentando pois representa a parcela $\mu_0 H$ da equação 2.1.

As curvas de magnetização de alguns aços comumente usados para fins magnéticos são apresentadas e comparadas com a curva de um ferro fundido (ferro-carbono) na figura 2.3. A inclinação desta curva representa a permeabilidade magnética do material (μ) e se mantém fixa na região de linearidade da curva. No eixo das abscissas são apresentados os valores de H e no eixo das ordenadas os valores de B .

Figura 2.3 - Curva de magnetização característica para aços (NASCIMENTO, 2011)



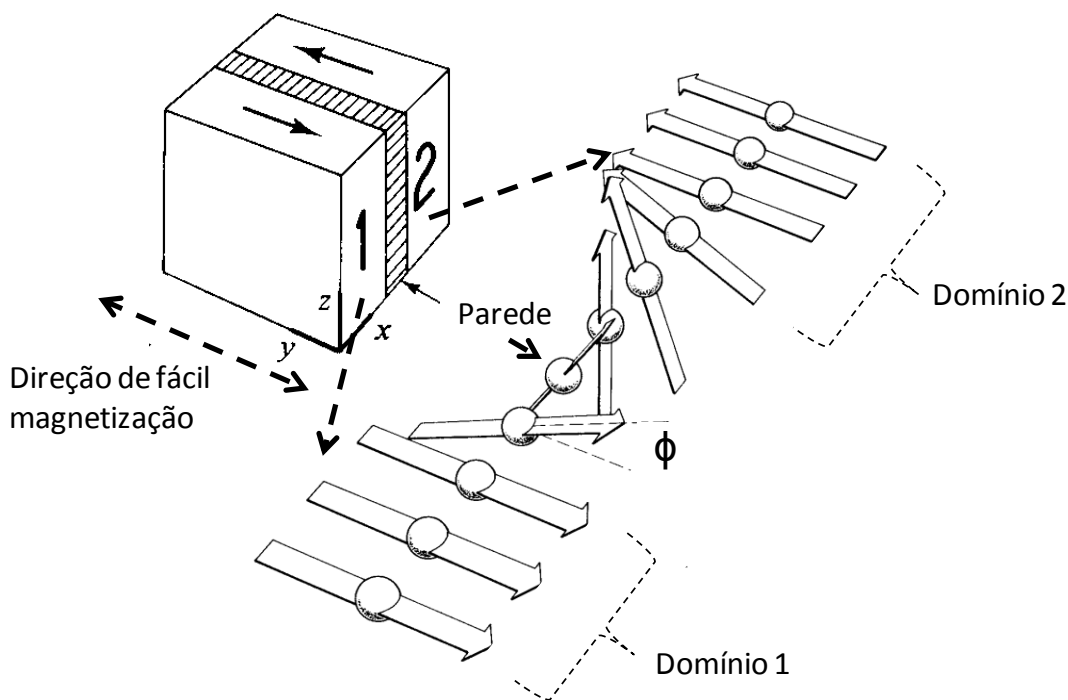
Da análise da figura 2.3 pode-se verificar que para aços carbono, a permeabilidade magnética tem valores intermediários e pode ser considerada constante para campos induzidos da ordem de até 2000 Gauss (região tracejada na curva de magnetização do aço carbono). Já as ligas de ferro com altos teores de carbono, como o

ferro fundido (ferro carbono), tem uma menor capacidade de amplificar os valores de H . Por outro lado os aços ao silício são os que apresentam a maior capacidade de amplificação de H . Silva Jr. (2007) ressalta a importância desses materiais nas ligas de ferro utilizadas com fins magnéticos e classifica os aços para esses fins a partir de características como a fração volumétrica de silício e carbono, considerando que a quantidade desses materiais influencia na condução eficiente do fluxo magnético, maximizando ou minimizando a permeabilidade magnética e as perdas magnéticas relacionadas. O silício aumenta a resistividade elétrica do material, reduzindo as perdas por corrente de Foucault, maximizando a resposta magnética do material. Pinho (2009) cita que 3% de silício pode aumentar em 4 vezes a resistividade do ferro puro. Já Yensen e Ziegler apud Pinho (2009) estudaram a deterioração das propriedades magnéticas com a adição de carbono. A permeabilidade máxima de uma amostra estudada contendo 0,001% de C e 0,002% de O era de $220\,000\,\mu_0$. Sem a presença do oxigênio o valor máximo aumentava para $500\,000\,\mu_0$. Com 0,01% de C atingia apenas os $20\,000\,\mu_0$.

2.1.2 Micromagnetismo dos materiais ferromagnéticos

A magnetização dos materiais ferromagnéticos só é possível devido suas propriedades micromagnéticas. Esses materiais possuem pequenas regiões chamadas de domínios magnéticos que apresentam magnetização espontânea não nula e são separadas por interfaces chamadas de paredes de domínio ou paredes de Bloch como apresentado na figura 2.4. Na figura 2.4 tem-se uma ampliação da região de interface entre dois domínios magnéticos (1 e 2). A direção de fácil magnetização está representada pelo eixo y e corresponde a direção de orientação dos spins dos átomos nas direções dos domínios 1 e 2. O ângulo ϕ corresponde ao ângulo entre dois spins vizinhos.

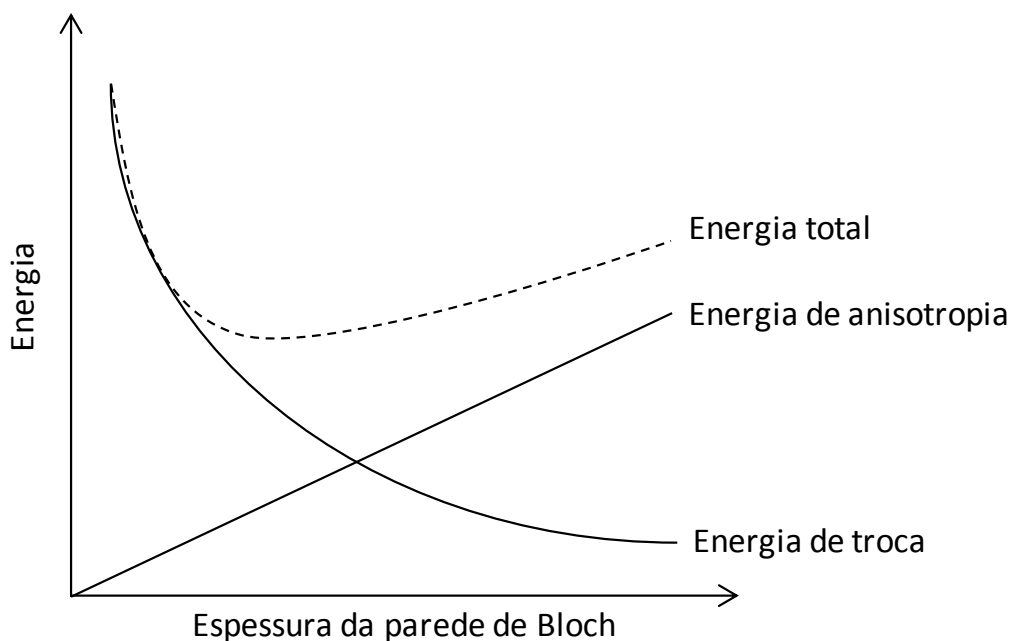
Figura 2.4 - Região de interface dos domínios magnéticos – paredes de domínio a 180° (adaptado de Cullity, 1972)



Pela figura 2.4 pode-se verificar que na região de interface entre os domínios 1 e 2 a direção de orientação dos spins muda suavemente com a variação de ϕ . Duas energias estão presentes, a energia de troca e a energia de anisotropia (Cullity, 1972). A energia de troca corresponde à energia necessária para que dois domínios vizinhos possam mudar a direção suavemente, variando o ângulo ϕ entre eles e aumenta com o quadrado de ϕ , tendendo a também aumentar o valor da espessura da parede de Bloch. Já a energia de anisotropia está relacionada com a constante de anisotropia (K) do material e varia proporcionalmente com o volume da parede de Bloch.

A região de interface entre dois domínios, assim como ocorre nos contornos de grãos e fases corresponde à região de mais alta energia do material e sua energia total é influenciada pela espessura das paredes de domínio, conforme apresentado na figura 2.5.

Figura 2.5 - Dependência da energia total com a espessura das paredes de domínio (adaptado de Cullity, 1972)



Pela análise da figura 2.5 pode-se verificar que a energia de troca diminui com o aumento da espessura das paredes de Bloch, o que ocorre devido à transição mais suave entre as direções de dois domínios adjacentes, reduzindo o valor ϕ . Já a energia de anisotropia aumenta com o aumento da espessura das paredes de Bloch já que ela aumenta proporcionalmente ao aumento do volume da parede. Ainda de sua análise (figura 2.5) pode-se verificar que existe uma espessura com energia total mínima, onde as energias de troca e anisotropia se igualam.

A região de transição entre dois domínios magnéticos adjacentes forma um campo magnético H não nulo que na presença de um líquido coloidal é capaz de atrair as finas partículas em suspensão, tornando visíveis as paredes de Bloch quando observadas em um microscópio.

A aplicação de um campo magnético H suficientemente grande pode superar a energia de magnetização total de um determinado domínio (M_s), fazendo com que a direção de M_s mude (Cullity, 1972). A rotação do vetor M_s ocorrerá abruptamente em cada um dos pequenos domínios que constituem o material, gerando um ruído chamado de ruído Barkhausen, a ser detalhado na seção 2.3.2.

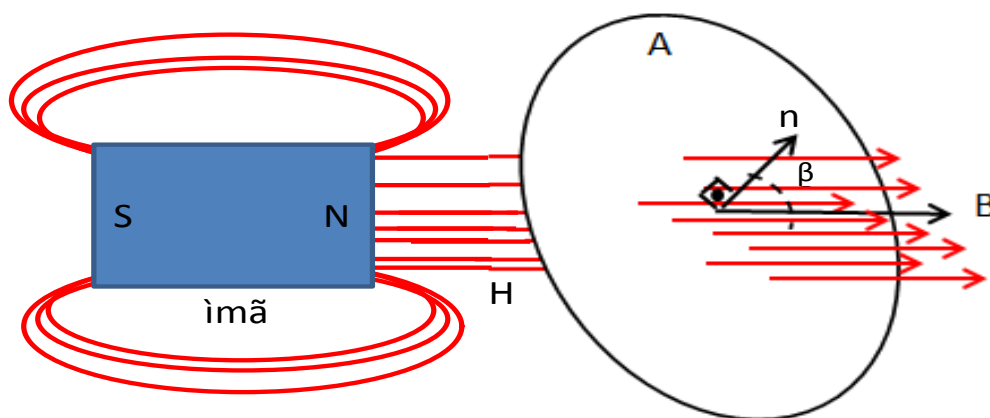
2.2 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

2.2.1 Fluxo magnético, Força magnética e tensão Hall

O fluxo magnético (ϕ) representa a quantidade de linhas de indução magnéticas utilizada para representar um campo magnético que atravessa uma determinada área (CULLITY, 1972; CALLISTER, 2002; NASCIMENTO, 2011). Quanto maior a quantidade de linhas de indução magnéticas que atravessa um material, maior será a intensidade deste campo.

Quando uma fonte externa produz um campo magnético H e algum material com área A é aproximado desta, parte das linhas de campo magnético tenderão a cruzar esse material, desde que o mesmo apresente alguma capacidade de ser magnetizado. A representação desse fenômeno é apresentada na figura 2.6. O ímã representa a fonte geradora do campo magnético H . O material é representado pela área A . β representa o ângulo formado entre o vetor n normal à área A e a direção de B .

Figura 2.6 - Forma como as linhas de campo magnético atravessam os materiais



As variáveis apresentadas na figura 2.6 são o fluxo magnético, a área da superfície magnética, ângulo de incidência das linhas de campo no material e outra propriedade, a indução magnética, e elas podem ser inter-relacionadas a partir da equação 2.2.

$$\phi = B.A.\cos(\beta) \quad (2.2)$$

Onde:

ϕ = fluxo magnético ($Mx = \text{Gauss} \cdot \text{cm}^2$);

B = campo magnético induzido (Gauss);

A = área da superfície do material (cm^2);

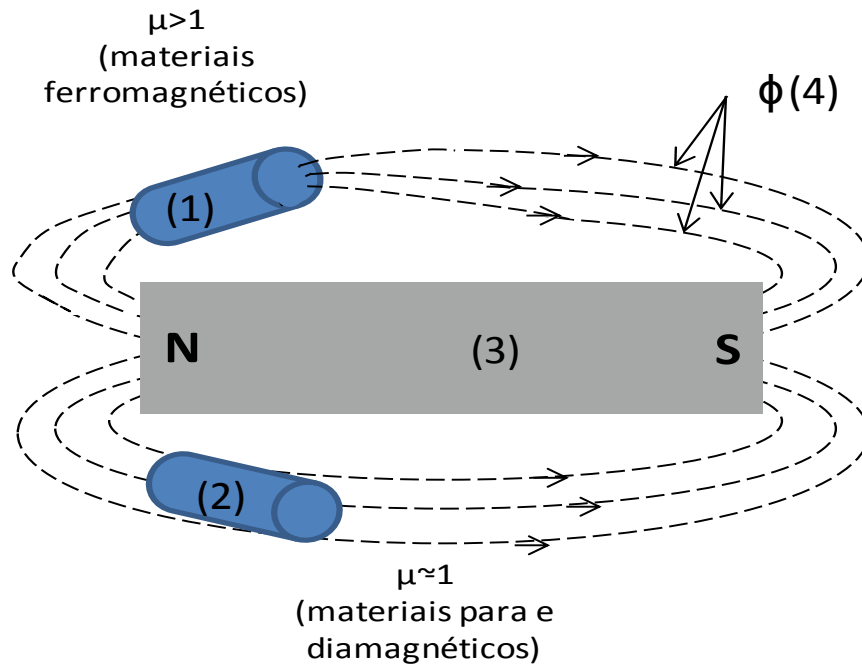
β = ângulo entre B e um vetor n qualquer perpendicular à superfície do material.

Pela análise da equação 2.2 pode-se ver que o fluxo magnético depende de B , A e β e que ele atingirá o valor máximo quando as linhas de campo incidirem perpendicularmente a superfície do material submetido ao campo. Pode-se ver também que reduzindo-se a área da superfície do material, ϕ só permanecerá constante se B aumentar, do que conclui-se que materiais de menor área superficial tendem a concentrar as linhas de fluxo magnético e reduzir a quantidade destas capazes de penetrar no material.

2.2.2 Permeabilidade magnética

Os materiais apresentam uma maior ou menor resistência à indução magnética. A permeabilidade magnética (μ) representa a facilidade de passagem de um fluxo magnético através de um material e é maior em materiais ferromagnéticos (NASCIMENTO, 2011). O efeito produzido pela colocação de um material mais ou menos permeável na direção das linhas de fluxo magnético é apresentado na figura 2.7. As amostras de materiais de diferente comportamento magnético estão representadas por (1) e (2). Um ímã representa a fonte geradora do campo magnético (3). As linhas de fluxo magnético produzidas estão representadas por (4).

Figura 2.7 - Perturbação nas linhas de fluxo magnéticos causadas por materiais de diferentes permeabilidades (Fonte: próprio autor)



Da análise da figura 2.7 pode-se verificar as perturbações causadas na direção das linhas de fluxo magnético em função de materiais com diferentes valores de μ . Amostras de materiais com valores de μ maiores que a unidade, como os ferromagnéticos, causam interferência significativa na direção das linhas de campo devido às linhas de campo darem preferência a passagem pelo meio mais permeável.

A permeabilidade magnética é uma propriedade específica de cada material. Essa propriedade também é comumente descrita em função da permeabilidade relativa (μ_r), que representa a razão entre a permeabilidade do material e a permeabilidade do vácuo μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$) e relaciona duas outras propriedades magnéticas, conforme equação 2.3.

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad (2.3)$$

Onde:

μ = permeabilidade do material (adimensional);

μ_r = permeabilidade relativa do material (adimensional);

μ_0 = permeabilidade do vácuo (adimensional);

B = campo magnético induzido (Gauss);

H = campo magnético aplicado (Oersted).

B representa o campo magnético induzido no material e tem como unidades o Tesla (T) e o Gauss (G), no SI e CGS, respectivamente, onde $1T = 10^4$ Gauss. Já o H representa o campo magnético aplicado no material, capaz de gerar a indução magnética. H tem como unidades o A/m e o Oersted (Oe) no SI e CGS, respectivamente.

É importante salientar que, apesar de se encontrar valores de μ tabelados, esta propriedade não é constante para um material específico e se encontra tabelada para valores específicos de H. Os valores de μ variam ao longo das curvas de magnetização dos materiais, o que pode ser comprovado por mudanças em sua inclinação (figura 2.3). Wlodarski (2006) refere-se à região de linearidade da curva de magnetização como sendo aquela onde há reversibilidade no processo de orientação dos domínios magnéticos. Para esta região os valores de μ são constantes e comumente se encontram tabelados. Essas tabelas servem como referência, porém, vários fatores podem alterar os valores, como: composição química, tamanho e orientação dos grãos (DENMA, 2000; CAMPOS, 2006; LANDGRAF, 2001).

2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os END são técnicas de inspeção de materiais e equipamentos que preservam suas características originais, sem gerar nenhum dano aos mesmos, motivo pelo qual têm se tornado um componente fundamental nos processos de prevenção de falhas ligados a programas de manutenção industrial (BRAY, 2000). Neste contexto Ringlee (1999), discorrendo sobre as perspectivas de mercado dos END frisa a importância de desenvolvimento de sistemas amigáveis, ou seja, de baixo custo e fácil manuseio e que possam ser vendidos, não como uma solução distinta, mas como uma coleção de

soluções que contribuirão, junto com as já existentes, para melhorar os resultados dos sistemas de prevenção e predição de falhas das empresas.

O impacto de falhas inesperadas pode significar grandes prejuízos financeiros, humanos e ambientais, motivos pelo quais vários estudos têm sido realizados em várias empresas como as aeroespaciais (MATIKAS, FRANTZISKONIS e KRAMB apud FORSYTH, 2007) e as indústrias de extração de petróleo (MARTINS, 2011).

Para minimizar a ocorrência de falhas e garantir a segurança no funcionamento de estruturas e componentes ferromagnéticos, tecnologias de END envolvendo respostas às variações de propriedades magnéticas têm sido amplamente adotadas (WANG *et al.*, 2012). De acordo com a Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI, 2012) as principais técnicas de END são:

- Correntes Parasitas;
- Emissão Acústica;
- Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia;
- Ensaio Visual;
- Estanqueidade;
- Líquido Penetrante;
- Partículas Magnéticas;
- Ultrassom;
- Termografia.

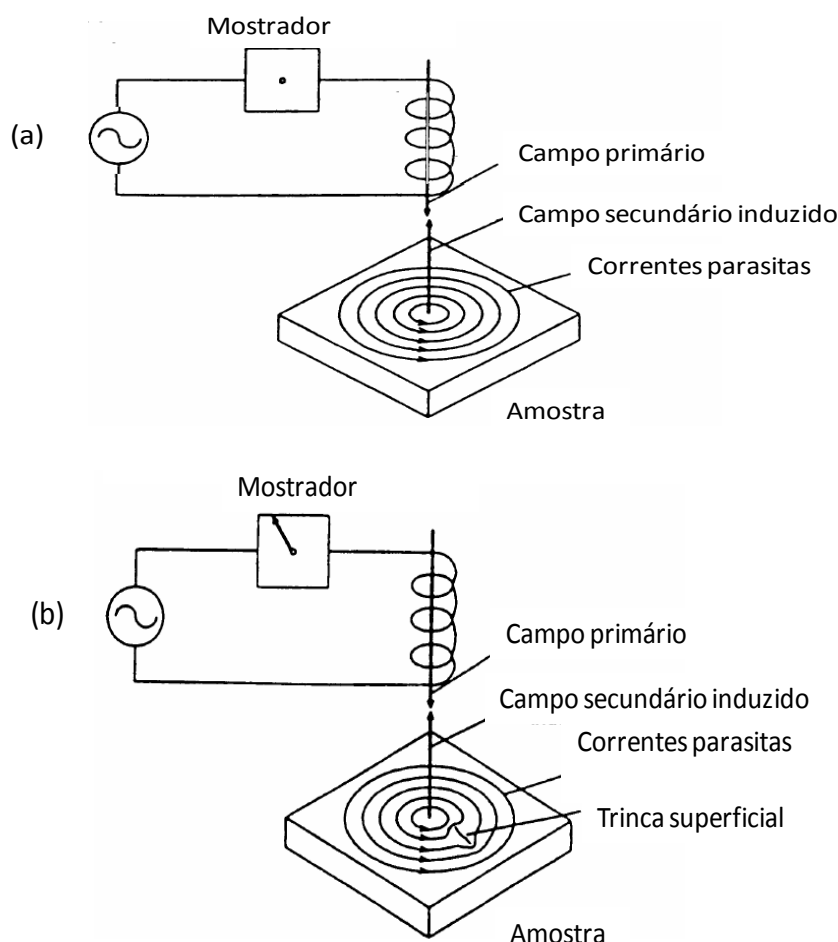
Forsyth (2007) cita praticamente todas as técnicas listadas pela Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos (ABENDI) como capazes de detectar problemas de fadiga em estruturas de equipamentos aeroespaciais. Destas, algumas também têm se destacado no acompanhamento de transformações microestruturais de materiais ferromagnéticos, como as que utilizam como princípio as correntes parasitas e o efeito Barkhausen. Ambas relacionam material, microestrutura e processos de fabricação com resposta magnética e serão detalhadas nas próximas seções devido sua proximidade com a técnica proposta neste trabalho.

2.3.1 Correntes parasitas

O ensaio de correntes parasitas ou de Foucault (*Eddy-Current Testing* - ECT) se baseia no princípio da indução magnética. Segundo este princípio, quando um campo magnético é aplicado sobre um material ferromagnético ocorre sua magnetização e linhas de campo passam a penetrar neste material, gerando a chamada indução magnética (B), sendo esta matematicamente descrita como a quantidade de linhas de campo por unidade de área que atravessam o material (CULLITY, 1972).

Formigoni (2012) define o ensaio de correntes parasitas como um fenômeno gerado pela excitação de uma bobina com uma corrente alternada de baixa frequência capaz de produzir um campo magnético primário, que em contato com a superfície do material que se quer analisar, induz um fluxo de correntes elétricas chamadas parasitas. Essas correntes por sua vez, induzem um campo magnético no material, chamado campo secundário, de menor intensidade. Anomalias e anisotropias no material podem gerar alterações no campo magnético resultante. Essas alterações podem ser medidas diretamente através de sensores ou através da medição da impedância da bobina, que sofre variação em função da variação do campo magnético resultante. Seu funcionamento pode ser melhor compreendido a partir da figura 2.8. Nas figuras 2.8(a) e 2.8(b) são apresentadas as configurações básicas de um equipamento de corrente parasita. Na figura 2.8(a) uma amostra sem trincas superficiais é submetida à análise. Na figura 2.8(b) uma amostra com trincas superficiais é submetida à análise.

Figura 2.8 - Princípio de funcionamento do ensaio de correntes parasitas (a) material ensaiado onde há a inexistência de trincas (b) material ensaiado com a presença de trinca superficial (CARNEVAL, 2007)

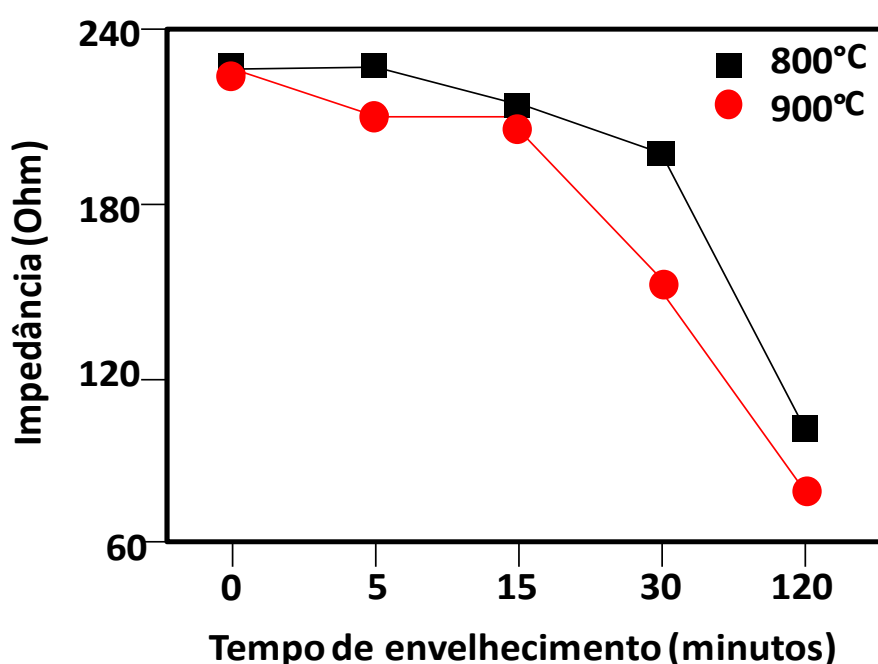


Pela análise da figura 2.8 pode-se ver que a presença de uma trinca superficial causa perturbações na direção percorrida pelas correntes parasitas induzidas, alterando o valor do campo secundário induzido. Os equipamentos de ensaio de correntes parasitas são sensíveis à presença de trincas, porosidades e variações de composição e permeabilidade magnética (FORSYTH, 2007). Quando se inicia uma varredura no material com o equipamento de correntes parasitas, o campo resultante total da interação do campo primário com o campo secundário sofre variações causadas na presença desses problemas. A variação do campo magnético resultante gera uma alteração na impedância da bobina, que pode ser captada.

Normando *et. al.* (2010) mediram a variação da impedância de uma bobina utilizada para o ensaio de correntes parasitas durante a análise de um aço inoxidável duplex UNS S31803, comprovando a sensibilidade do equipamento às variações

microestruturais. O comportamento da variação da impedância com o tempo de envelhecimento do aço UNS S31803 nas temperaturas de 800 °C e 900 °C pode ser visto na figura 2.9. No eixo das abscissas são apresentados os tempos de envelhecimento e no eixo das ordenadas as impedâncias obtidas para as temperaturas de 800 °C e 900 °C.

Figura 2.9 - Variação da impedância da bobina de ensaio por correntes parasitas com o tempo de envelhecimento do aço UNS S31803 (adaptado de NORMANDO, 2010)

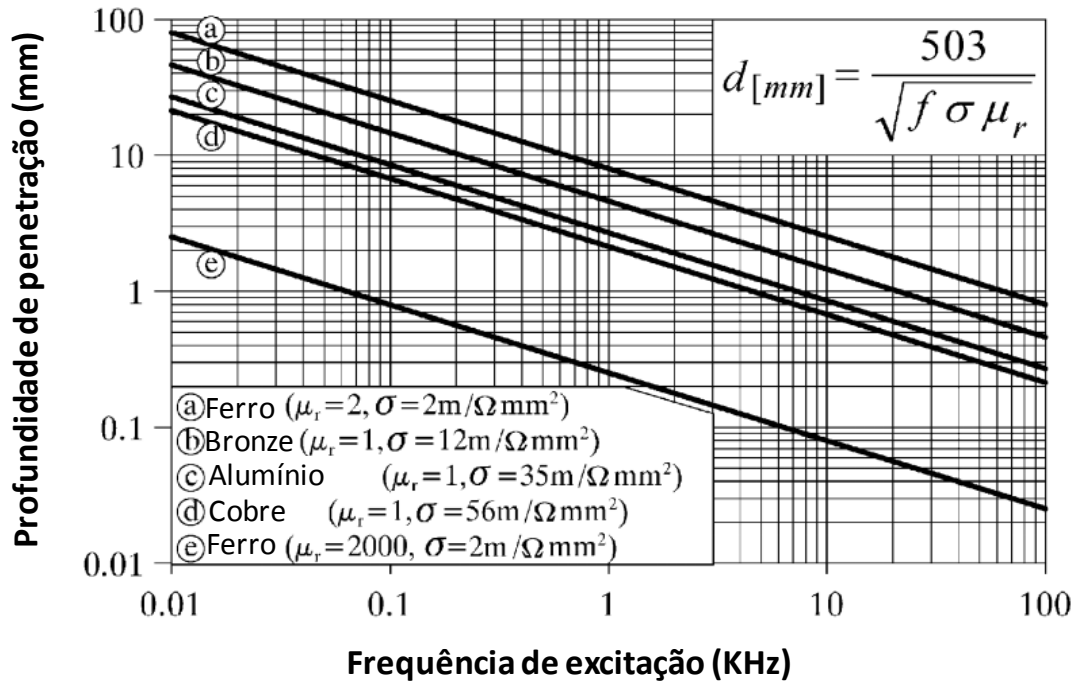


Pela análise da figura 2.9 pode-se verificar que para todos os tempos de envelhecimento, a impedância da bobina caiu com o aumento do tempo de envelhecimento para as duas temperaturas analisadas devido à variação do campo magnético resultante. Com esses resultados pode-se concluir que a técnica de correntes parasitas foi capaz de acompanhar o envelhecimento do aço UNS S31803.

A penetração das correntes parasitas para o acompanhamento de quaisquer tipos de alteração que causem variação na permeabilidade magnética do material ou em sua condutividade elétrica depende dos valores dessas propriedades e da frequência de excitação da bobina que produz o campo magnético primário (figura 2.8). A profundidade de penetração para alguns materiais é apresentada na figura 2.10. No eixo das abscissas são apresentados os valores de frequência de excitação aplicados (f). No

eixo das ordenadas a profundidade de penetração alcançada (d). σ representa a condutividade elétrica de cada um dos materiais e μ_r as suas respectivas permeabilidades relativas.

Figura 2.10 - Profundidade de penetração das correntes parasitas em função da frequência e das características dos materiais (RADTKE, 2001)



Da análise da figura 2.10 pode-se concluir que a profundidade de penetração das correntes parasitas (d) diminui com a permeabilidade relativa (μ_r), com a condutividade do material (σ) e com a frequência de excitação (f), sendo os materiais que apresentam uma maior permeabilidade magnética e condutividade elétrica, os que apresentam menores capacidades de penetração das correntes parasitas. Konoplyuk (2005) e Kahrobaee (2011) apud Ghanei (2013) relacionaram essas variáveis substituindo a permeabilidade relativa (μ_r) pela permeabilidade do material (μ) como apresentado na equação 2.4.

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.4)$$

Onde:

- δ = profundidade de penetração (m);
 f = frequência do sinal aplicado (Hz);
 μ = permeabilidade magnética do material (H/m);
 σ = condutividade elétrica (m/Ω x m²).

Ghanei (2013) realizou ensaio de correntes parasitas para a análise da microestrutura de aços martensítico-ferríticos, tendo considerado satisfatória sua aplicação devido à sensibilidade e facilidade de utilização da técnica. Em seu estudo foi detectada que altos teores de martensita reduzem a permeabilidade do material, e por consequência, os valores de saída medidos pelos equipamentos de correntes parasitas.

Kashefi (2012), por sua vez, estudou essa técnica para analisar as propriedades microestruturais de aços AISI 4340, temperados. Neste estudo o autor concluiu que esse método pode detectar o grau de fragilização causado pela têmpera com uma precisão comparável ao teste de impacto Charpy, que é um ensaio destrutivo.

He (2011) utilizou a técnica de correntes parasitas com imagem para detectar defeitos ocultos em peças. Os resultados mostraram que os defeitos internos puderam ser identificados satisfatoriamente.

2.3.2 Efeito Barkhausen

Alguns materiais têm a capacidade de se manter magnetizados mesmo com a ausência de um campo magnético externo atuando sobre eles e por isso são chamados de materiais ferromagnéticos (CALLISTER, 2002). Isso se dá devido ao momento magnético resultante não nulo gerado pelos movimentos de spin dos elétrons. Esse momento magnético não nulo interage com os átomos adjacentes, fazendo com que haja o alinhamento de vários momentos magnéticos em uma única direção, formando as regiões conhecidas como domínios magnéticos. Quando submetidos a campos externos esses materiais apresentam uma indução magnética muito forte, a qual acontece de maneira discreta em forma de saltos abruptos. Esses saltos abruptos ocorrem em função da movimentação das paredes dos domínios magnéticos ao vencerem a resistência ao seu deslocamento criada por algum obstáculo como uma discordância, um contorno de grão ou heterogeneidade e produzem uma série de pulsos elétricos que podem ser

captados por transdutores para isto construídos, formando o que se chama de ruído Barkhausen (SERNA-GIRARDO, 2007).

A técnica baseada no ruído Barkhausen é utilizada na análise de materiais que têm comportamento ferromagnético. Quando um campo magnético é aplicado em materiais que apresentam esse comportamento as paredes dos domínios magnéticos movem-se descontinuamente a depender das características microestruturais do mesmo, tais como contornos de grão, trincas, presença de partículas não magnéticas e até mesmo do seu grau de deformação (CALDAS-MORGAN et al, 2012; PEREZ-BENITEZ et al, 2013).

O comportamento do ruído Barkhausen e sua velocidade de propagação são diferentes para materiais ferromagnéticos duros e macios. Os materiais ferromagnéticos duros tem um maior valor de H_c (figura 2.2). Quanto maior o valor de H_c , maior será o valor de H necessário para causar mudanças na orientação dos domínios, o que caracteriza os materiais ferromagnéticos duros, tendo o valor de H_c relação com o tamanho de grão (KIM et al, 2003). Essa relação é estabelecida pela equação 2.5.

$$H_c = 3\sqrt{\frac{kT_c K_1 / l}{M_s}} \frac{1}{D} \quad (2.5)$$

Onde:

H_c = força coercitiva (A/m);

K = constante de Boltzmann ($m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$);

K_1 = anisotropia magnetocristalina (J/m^3);

T_c = temperatura Curie (K);

l = constante de rede (m);

M_s = magnetização de saturação (A/m);

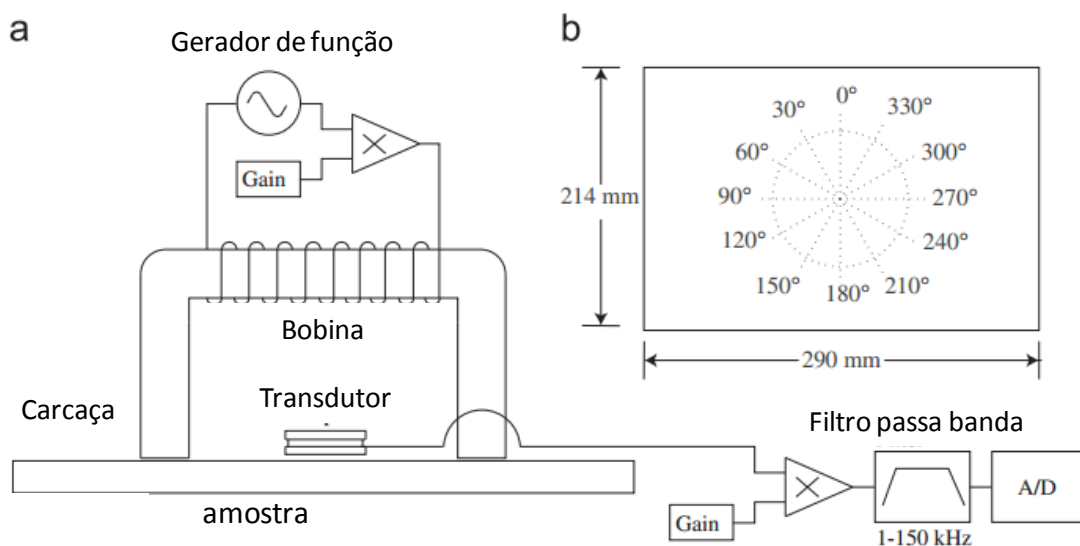
D = diâmetro médio dos grãos (m).

A partir da equação 2.5 pode-se ver que o valor de H_c é inversamente proporcional ao valor de D , ou seja, menores tamanhos de grão tendem a dificultar o alinhamento dos domínios magnéticos e consequentemente dificultar o surgimento do ruído Barkhausen (CALLISTER, 2002). Kim et al (2003) citam que efeito similar ao

gerado pelos contornos de grão, que tendem a retardar a movimentação das paredes de domínio magnético tem ocorrido com o aumento do teor de precipitados não magnéticos de cementita (Fe_3C) nos aços.

Não há um equipamento padrão normalizado para END utilizando o princípio de ruído Barkhausen, pois seus parâmetros de confecção dependem do formato e do tipo do material que se quer analisar. Um equipamento clássico de ensaio Barkhausen pode ser visualizado na figura 2.11. Na figura 2.11(a) é apresentada a configuração de montagem do ensaio. Na figura 2.11(b) são apresentados os ângulos nos quais o equipamento foi rotacionado a partir de um ponto fixo da amostra.

Figura 2.11 - Equipamento clássico de ensaio Barkhausen (a) e amostra utilizada para análise do eixo de fácil magnetização do material (b) (adaptado de CALDAS-MORGAN et al, 2012)



Pela análise da figura 2.11(a) pode-se ver que um gerador de função produz um sinal alternado, que ao percorrer uma bobina enrolada em um núcleo de material ferromagnético em formato de U, induz neste um campo magnético. Esse campo magnético sai de uma das extremidades do núcleo, percorre o material e retorna por sua extremidade oposta. Ao se girar o núcleo a partir de um determinado ponto fixado na amostra, conforme proposto pela figura 2.11(b) um transdutor posicionado na região central do núcleo e em contato com a amostra é capaz de detectar variações no campo magnético que cruza o material.

Caldas-Morgan *et al* (2012) utilizaram a configuração apresentada na figura 2.11 para uma nova aplicação, a detecção do eixo de fácil magnetização de chapas de aço, utilizando o método de rotação do material e a análise por ruído Barkhausen. Os materiais utilizados foram os aços AISI 430, 439 e 444, que foram preparados e rotacionados de 30° em 30° até completar um ciclo de 360°, conforme apresentado na figura 2.11(b). De sua análise, Caldas-Morgan *et al* (2012) concluíram que os aços estudados apresentaram anisotropia magnéticas capazes de serem detectadas pela técnica de ruído Barkhausen e que o eixo de fácil magnetização é fácil e rapidamente detectável.

Franco *et al* (2009) estudaram o uso da técnica de efeito Barkhausen para investigar o tamanho e espessura de defeitos volumétricos em um aço SAE 1070. Os resultados mostraram que é possível a detecção de defeitos e que essa detecção independe da velocidade de varredura da amostra pelo equipamento.

Perez-Benitez *et al* (2013) estudaram a influência de alguns parâmetros de magnetização dos materiais na resposta do ruído Barkhausen usando um modelo de simulação por elementos finitos. A comparação das curvas de magnetização e do sinal de ruído Barkhausen obtidos experimentalmente e simulados mostra que a técnica foi capaz de representar o fenômeno com boa aproximação. Os resultados também mostraram que em ambos os casos, os picos de ruído que ficam a esquerda e a direita do pico principal tem uma menor amplitude que o principal. Esses picos também são assimétricos, quando comparados o perfil da curva característica do ruído Barkhausen à esquerda e à direita do pico principal. A existência de diversos picos foi atribuída à interação do campo magnético com diferentes tipos de defeitos, que geram essa assimetria. Também foi notado que o pico principal de ruído Barkhausen ocorre para $H = 0$, ou seja, quando ocorre a inversão na direção de aplicação do campo magnético devido a característica do sinal de excitação (onda senoidal) e portanto, a rotação das paredes de domínio magnético em 180°.

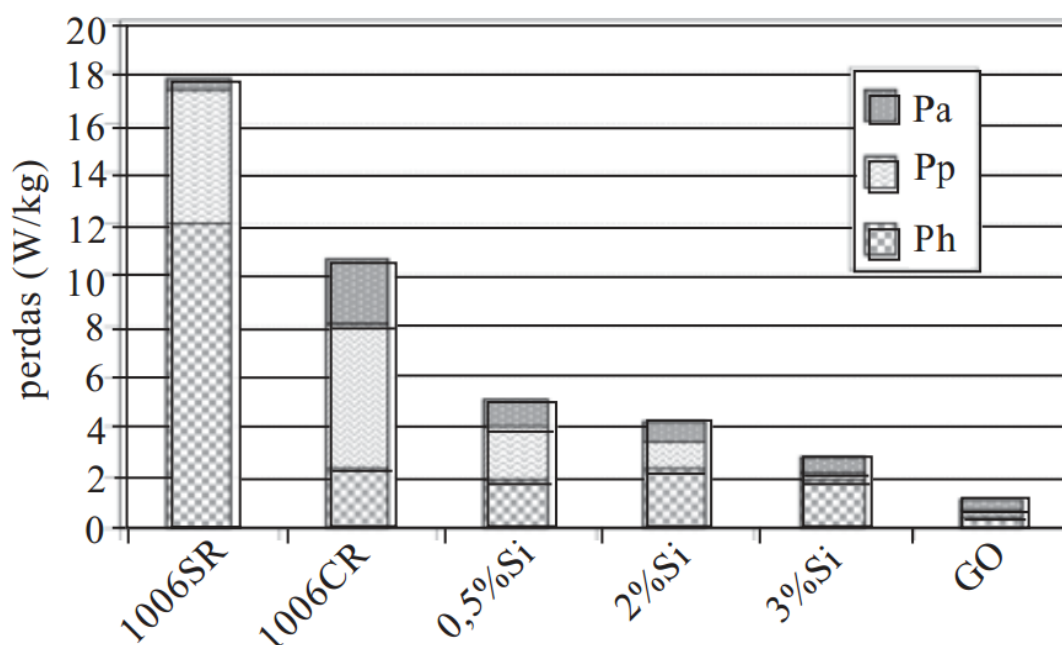
2.4 EFEITO DA MICROESTRUTURA NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

As propriedades magnéticas de aços para fins eletromagnéticos são influenciadas por cinco variáveis: a composição química, a distribuição de precipitados, o tamanho de grãos, a densidade das discordâncias e a orientação cristalográfica (GIROTO, 2010;

LANDGRAF, 2001; FUKUHARA, 2010). Cada uma dessas variáveis pode influenciar nas perdas magnéticas que são de origem histeréticas, parasitas e anômalas.

As perdas magnéticas têm sido estudadas devido à baixa eficiência energética de alguns equipamentos elétricos, o que leva a necessidade de equipamentos maiores, mais caros e que consomem mais energia. Landgraf (2001) visando entender a influência dessas perdas na baixa eficiência dos equipamentos realizou um estudo comparativo dos valores de perda magnética para materiais de diferentes composições químicas e obtidos por processos de fabricação diversos, conforme apresentados na figura 2.12. No eixo das abscissas são apresentados os 6 materiais estudados. No eixo das ordenadas os valores de perda magnéticas totais para cada um desses materiais. Ph corresponde à perda por histerese. Pp à perda parasita e Pa à perda anômala.

Figura 2.12 - Perdas magnéticas totais e suas componentes histerética (Ph), parasita (Pp) e anômala (Pa) em aços para fins elétricos: 1006SR (aço ABNT 1006 sem recozimento); 1006CR (aço ABNT 1006 com recozimento); GO (aços de grão orientados com 3% Si) (LANDGRAF, 2001)



Da análise da figura 2.12 pode-se ver que aços sem recozimento tem uma maior perda total quando comparados com os recozidos em virtude de sua componente histerética (Ph). Já a adição do silício reduz cada vez mais a componente de perda

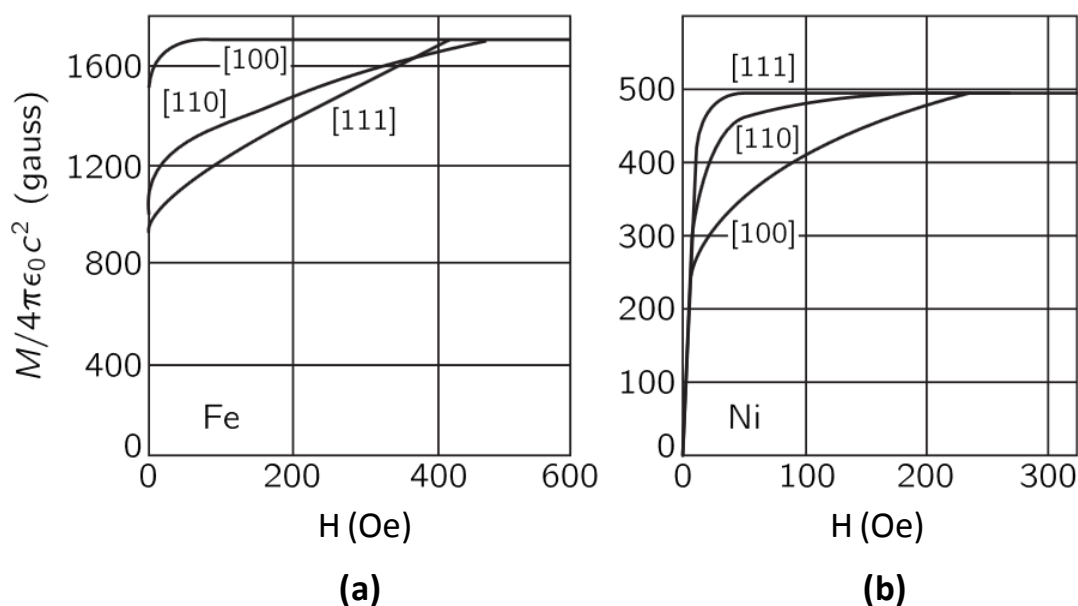
parasita (Pp). Por fim, aços GO (grãos orientados) que tenham silício em sua composição apresentam perdas significativamente menores, cerca de 1/18 das perdas totais, comprados com aços de grão não orientados e sem silício.

Landgraf (2001) relaciona as perdas histeréticas e anômalas à microestrutura, enquanto que as perdas parasitas às correntes parasitas. Essas últimas tendem a ser menores com o aumento da resistividade elétrica, que dificulta a condução da corrente elétrica e facilita a passagem do fluxo magnético, possível de ser conseguida com a adição de elementos de liga como o silício e o alumínio e a redução da espessura do material, o que justifica lâminas de transformadores cada vez mais finas.

A composição química é uma variável utilizada principalmente na alteração da resistividade elétrica dos materiais, mas sua alteração pode influenciar a anisotropia magnetocristalina, em menor proporção. Landgraf (2001) relaciona a redução da constante de anisotropia magnetocristalina à adição de silício em aços ABNT 1006. Já Giroto (2010) verificou que aços de grãos não orientados (GNO), vendidos na forma semiprocessados, também sofriam influência da composição química durante o tratamento final de recozimento, a partir da formação de óxidos, como o Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 . Landgraf (2001) também cita a preocupação com o teor de carbono acima de 0,003%, o que contribui para a formação de carboneto, contribuindo para a degradação das propriedades magnéticas do material. Esses carbonetos ancoram as paredes de domínio, dificultando sua movimentação.

Cullity (1972) apresenta a anisotropia magnética como um dos fatores que afetam fortemente a forma das curvas B versus H, tornando a magnetização dos materiais dependentes da direção na qual são medidas conforme apresentado na figura 2.13. Na figura 2.13(a) são apresentadas as curvas de magnetização $M \times H$ para o Fe. Na figura 2.13(b) são apresentadas as curvas de magnetização $M \times H$ para o Ni. As direções cristalográficas sob as quais foram realizadas as medições foram as direções [100], [110] e [111] para ambos os materiais. No eixo das abscissas são apresentados os valores de H e no eixo das ordenadas os valores de M.

Figura 2.13 - Curvas de magnetização para cristais cúbicos de Fe e Ni (adaptado de Cullity, 1972)



Da análise da figura 2.13(a) vê-se que a mais fácil magnetização do Fe ocorre na direção [100], onde valores de H da ordem de dezenas de Oe são suficientes para levar o material à saturação magnética, enquanto que na direção de difícil magnetização [111] campos muito maiores são necessários. Na figura 2.13(b) pode-se ver que essas direções são diferentes para um cristal de Ni, evidenciando que estas variam de um material para outro e que a orientação cristalográfica é importante nas propriedades magnéticas de qualquer material ferromagnético.

Ainda da análise das curvas da figura 2.13 pode-se ver que os valores dos campos de saturação magnética são os mesmos e independem da direção de magnetização para um mesmo material. Na literatura, esses valores de saturação se mostram inalterados, mesmo que haja variações no formato da curva causadas por diferentes fatores, como defeitos, deformações ou tratamento térmico, daí se poder considera-los como uma propriedade intrínseca do material e que só variarão se houver alteração na composição química do material, produzindo-se assim um novo material com características específicas.

Autores como Emura (2001), Praxedes (2012) e Fukuhara (2010) estudaram a anisotropia magnética. Seus estudos levaram em consideração materiais conformados por laminação, tendo eles relacionado as melhores propriedades magnéticas encontradas

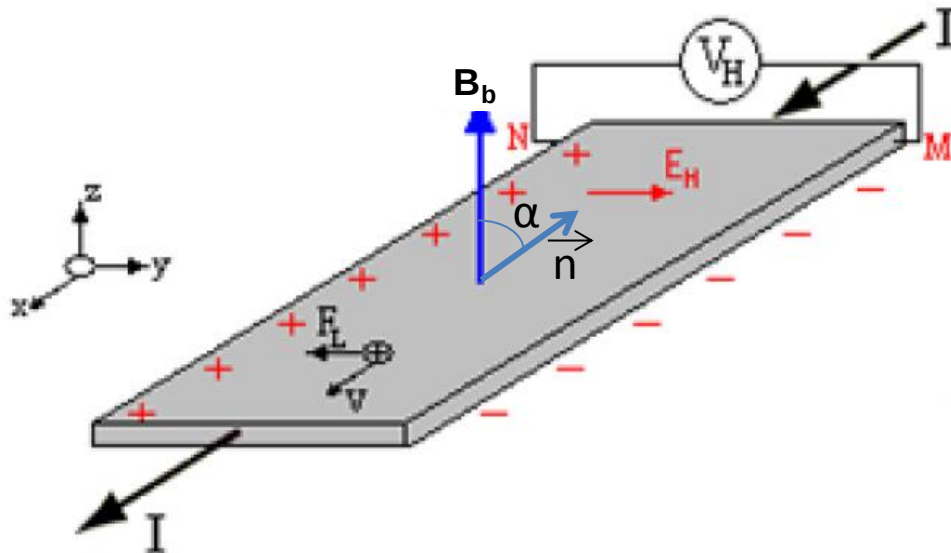
à direção de laminação. Landgraf (2001) atribuiu a maior capacidade de indução magnética na direção de laminação ao maior distanciamento entre inclusões e carbonetos, causados pelo alongamento nesta direção. Esses precipitados se comportaram como pontos de ancoragem das paredes de domínio e seu maior distanciamento diminui os obstáculos à movimentação das paredes.

Denma (2000), Campos (2006) e Landgraf (2001) estudaram o efeito do tamanho de grão nas propriedades magnéticas. Demna (2000) verificou que o campo coercivo H_c diminui com o aumento do tamanho de grão, resultado da diminuição da parcela de P_h (ver figura 2.10). Campos (2006) verificou que tamanhos de grão menores reduzem as perdas magnéticas totais, e que frequências de operação mais baixas, junto com grãos menores, tendem a reduzir os valores de perdas magnéticas totais. Landgraf (2001) verificou que grãos maiores reduzem as perdas histeréticas, mas que as perdas anômalas tendem a crescer a partir de determinados tamanhos de grão, sugerindo que há um tamanho ótimo para eles. Fukuhara (2010) também estudou a influência da deformação de laminação nas propriedades magnética e alerta que durante o processo de laminação ocorrem mudanças no formato dos grãos, gerando um aumento da área total do seu contorno e o aparecimento de estruturas internas, como bandas de deformação e transição que deterioram as propriedades magnéticas, recomendando que um tratamento de recozimento posterior seja realizado em aços deformados. A densidade de discordâncias, portanto, também aumenta as perdas magnéticas.

2.5 EFEITO HALL

O efeito Hall consiste na produção de um diferencial de potencial gerado em um condutor elétrico por onde circula uma corrente elétrica quando submetido a um campo magnético, conforme apresentado na figura 2.14. V_h representa a tensão Hall induzida, I a corrente elétrica que circula pelo condutor, H o campo magnético aplicado, F_L a força eletromagnética e E_h o campo elétrico gerado pela separação dos portadores de carga, também chamado de campo elétrico Hall.

Figura 2.14 - Efeito Hall em condutores energizados (adaptado de LUZ, 2007)



A figura 2.14 mostra que fazendo-se circular cargas elétricas por um condutor sob a influência de um campo magnético B_b , se produz uma força eletromagnética chamada força de Lorentz (F_L) que desloca os portadores de carga para uma das extremidades do condutor (posição N ou M), a depender do sentido da corrente elétrica aplicada. Essa força é proporcional ao valor da carga elétrica, sua velocidade e o campo magnético aplicado, conforme apresentado na equação de Lorentz (equação 2.6).

$$F_m = F_L = q \cdot V \times B_b \quad (2.6)$$

Onde:

$F_m = F_L$ = Força magnética de Lorentz (N);

q = Carga do elétron (C);

V = Velocidade de deriva do elétron (m/s);

B_b = Campo magnético aplicado (T).

A força magnética de Lorentz tende a entrar em equilíbrio com uma força eletrostática gerada pelo deslocamento das cargas elétricas e comumente chamada de campo elétrico Hall (E_h). O deslocamento das cargas para uma das extremidades do

condutor (posição N ou M) produz um diferencial de potencial chamado tensão Hall (V_h). A força magnética de Lorentz se contrapõe ao campo elétrico de Hall, tendo ambas a mesma intensidade (CARUSO et al, 2014). A partir dessa igualdade pode-se chegar a uma equação que relaciona a dimensão do elemento Hall existente no sensor com a corrente aplicada e o ângulo de incidência das linhas de campo magnético sobre esse elemento, conforme equação 2.7.

$$V_h = I \cdot H \cdot \sin\alpha / (n \cdot q \cdot L) \quad (2.7)$$

Onde:

V_h = tensão Hall (V);

I = corrente elétrica (A);

H = campo magnético aplicado (T);

α = ângulo de incidência ($^\circ$);

n = densidade de carga (C/m);

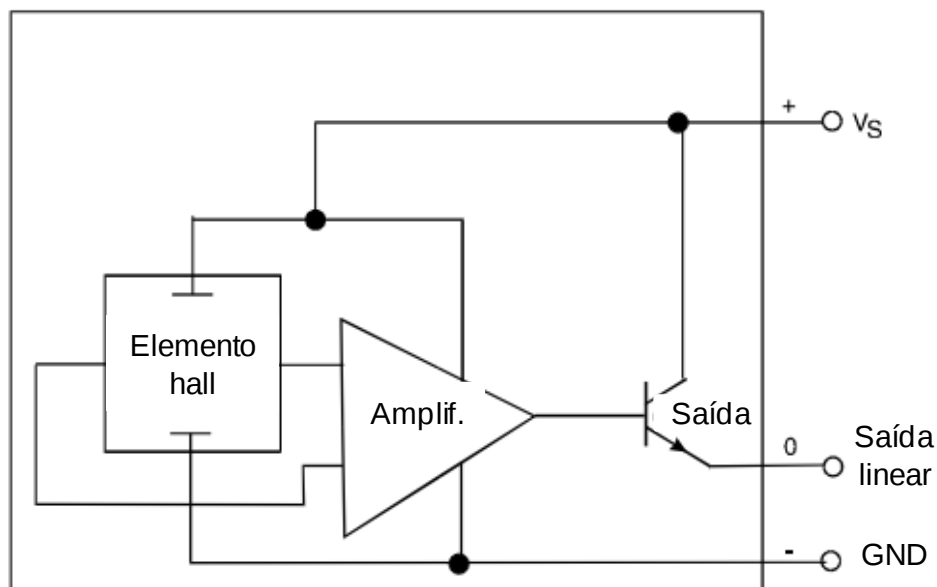
q = carga do elétron (C);

L = espessura do elemento Hall (m).

Da análise equação 2.7 pode-se verificar que não apenas a dimensão do elemento Hall do sensor e a corrente elétrica e o campo magnético aplicado influenciam nos valores de tensão Hall. O ângulo de incidência do campo magnético (α) também influenciará nos valores de V_h produzidos.

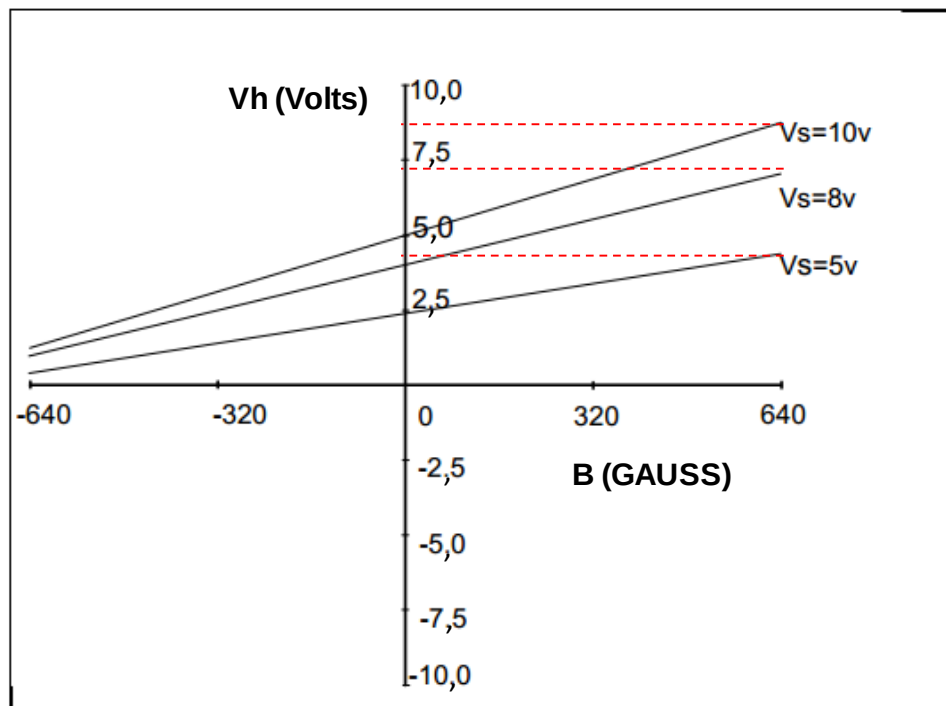
Os valores de V_h gerados são pequenos, da ordem de μV , motivo pelo qual nos sensores Hall comerciais são encapsulados junto com o elemento Hall um amplificador diferencial que tem a finalidade de amplificar seus valores (ALLEGRO, 2012; HONEYWELL, 2004). Um esquema elétrico interno básico de um sensor Hall pode ser observado na figura 2.15.

Figura 2.15 - Esquema elétrico interno de montagem de um sensor Hall típico (adaptado de Honeywell, 2004)



A configuração proposta na figura 2.15 torna possível que valores pequenos de campos magnéticos possam ser medidos com sensores Hall lineares e de baixo custo, como os da série SS49, da *Allegro Microsystems*. Esses sensores têm uma boa sensibilidade, da ordem de 3,125 mVolts/Gauss, podem ser alimentados com tensões elétricas variando entre 0 e 10V e tem seu sinal de saída (V_h) proporcional à tensão de alimentação. A curva de transferência característica do sensor modelo SS495A pode ser vista na figura 2.16. No eixo das abscissas são apresentados os valores de campos magnéticos ao qual o sensor foi submetido e no eixo das ordenadas os valores de V_h que os representam. V_s representa os valores de tensão de alimentação sugeridos no *datasheet* do sensor.

Figura 2.16 - Funções de transferências típicas do sensor SS495A (adaptado de HONEYWELL, 2004)



As tensões de alimentação do sensor (V_s) apresentadas nos gráficos da figura 2.16 representam a tensão de polo sul. Essa tensão se relaciona com a tensão de polo norte (V_n). Desta forma, supondo-se um caso onde a tensão de alimentação do sensor tenha sido de 5V, pode-se encontrar uma equação que relaciona a tensão de offset do sensor com as tensões de polo sul e polo norte, conforme apresentada na equação 2.8.

$$V_s - 2,5 = 2,5 - V_n \quad (2.8)$$

Onde:

V_s = tensão de polo sul (V);

V_{off} = tensão de offset (2,5 V);

V_n = tensão de polo norte (V).

Para o sensor em questão, conforme apresentado em seu *Datasheet* (ALLEGRO, 2011), a relação entre o campo induzido e os valores V_s e V_n , podem ser dados pela seguinte relação apresentada na equação 2.9.

$$B = (V_S - V_N)/S_s \quad (2.9)$$

Onde:

B = Campo magnético induzido (Gauss);

V_s = tensão de polo sul (V);

V_n = tensão de polo norte (V);

S_s = sensibilidade de saída do sensor (mVolts/Gauss).

Relacionando as equações 2.3, 2.8 e 2.9, se encontra uma equação que permite relacionar a permeabilidade magnética com as características do sensor (equação 2.10).

$$\mu = \frac{2(V_s - 2,5).10^3}{S_s \cdot H} \quad (2.10)$$

Onde:

μ = permeabilidade magnética (adimensional);

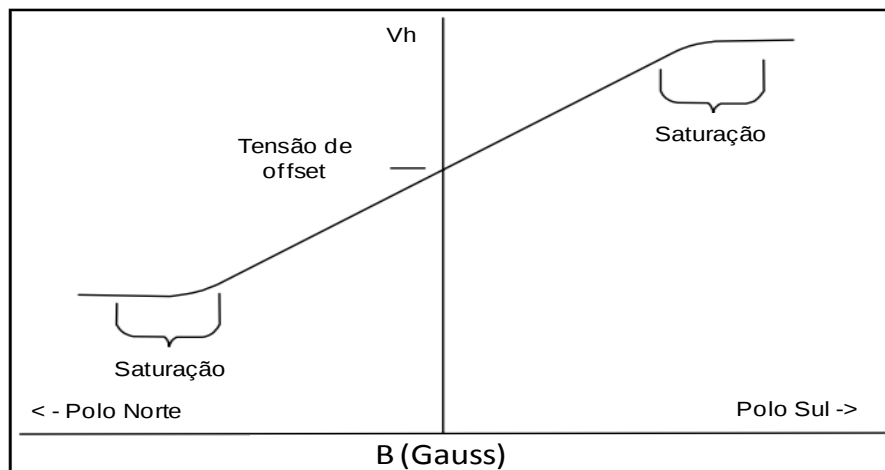
V_s = tensão de saída (Volts);

S_s = sensibilidade de saída do sensor (mVolts/Gauss);

H = campo magnético aplicado (Oe).

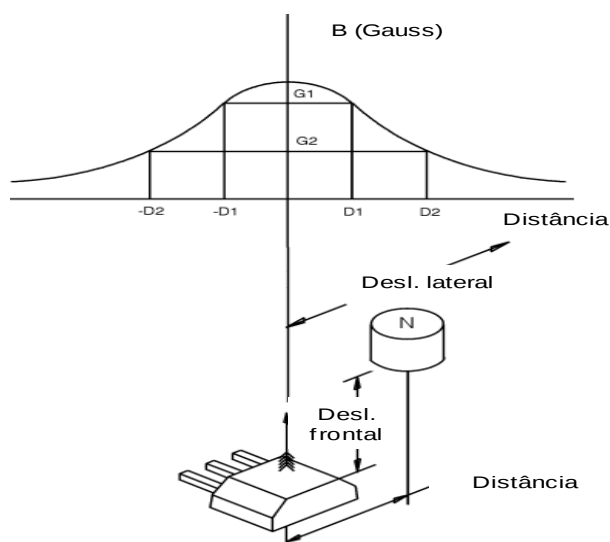
Apesar de se poder relacionar B , H e μ através das equações 2.9 e 2.10 e se verificar o comportamento linear das curvas de $V_h \times B$, deve-se observar esses sensores trabalham em uma faixa limitada de detecção de campos magnéticos. Uma curva de saturação típica de sensores de efeito Hall pode ser vista na figura 2.17. No eixo das abscissas são representados os valores de B e no eixo das ordenadas os valores de V_h gerados.

Figura 2.17 - Curva típica de saturação de sensores hall (adaptado de ALLEGRO, 2012)



Da análise da figura 2.17 pode-se verificar que a partir de determinado valor de B o sensor chegará à saturação, não havendo mais variações de V_h . Esses sensores também são sensíveis à posição de aplicação do campo magnético e alterações nessa posição, seja pelo deslocamento lateral ou frontal, causará alterações no valor de V_h . A figura 2.18 mostra esses efeitos. No eixo das abscissas são representadas as distâncias (D) de deslocamento entre o centro do sensor e o centro da fonte de excitação magnética. No eixo das ordenadas são representados os valores de B induzidos a partir de cada distância D .

Figura 2.18 - Variação da tensão hall com o deslocamento entre sensor e a fonte produtora do campo magnético



Vacher (2007) estudou a substituição dos transdutores tradicionais utilizados nos ensaios de correntes parasitas por sensores magnéticos com o objetivo de melhorar a sensibilidade desses END. Ele detectou defeitos internos em um aço inoxidável 304 L e concluiu que esses sensores apresentaram excelente capacidade de detecção.

Forsyth (2007) usou sensores Hall como transdutor de correntes parasitas, ensaios ultrassônicos e radiográficos para detectar problemas de fadiga em chapas de alumínio para uso aeroespacial e comparou os resultados com uma técnica proposta de END usando imagens térmicas. Apenas as imagens termográficas foram capazes de detectar as anomalias.

Kreutzbruck (2002) também propôs o uso de sondas utilizando sensores de efeito Hall e sensores magnetômetros na captação da variação do campo magnético produzida pela existência de defeitos. Ele justificou que a técnica se mostrou promissora, pois minimizou os ruídos e possibilitou a detecção de defeitos a maiores profundidades do material ensaiado quando comparado a transdutores convencionais de correntes parasitas, tendo esses sensores sido capazes de encontrar defeitos a profundidades de 0,6 mm em folhas de alumínio de 2 mm de espessura e defeitos a 5 mm de profundidade em chapas de alumínio de 10 mm de espessura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo anterior foi feita uma revisão bibliográfica sobre ensaios não destrutivos, magnetismo, propriedades magnéticas dos materiais e efeito Hall. As pesquisas anteriormente realizadas, sobre as quais se discorreu, serviram para o aprofundamento do conhecimento das variáveis envolvidas no estudo pretendido, ajudaram na escolha dos materiais e ainda, nos métodos a serem seguidos. Por fim, foram de fundamental importância na fase de discussão dos resultados. Neste capítulo fez-se uma descrição dos materiais, métodos e equipamentos que foram utilizados.

3.1 MATERIAL

Foram utilizados dois materiais distintos: aço SAE 1045 e uma liga de alumínio ASTM 6261. Foi realizada análise química quantitativa para classificação das ligas metálicas por Espectrômetro de Emissão Óptica. Os resultados estão apresentados na tabela 3.1.

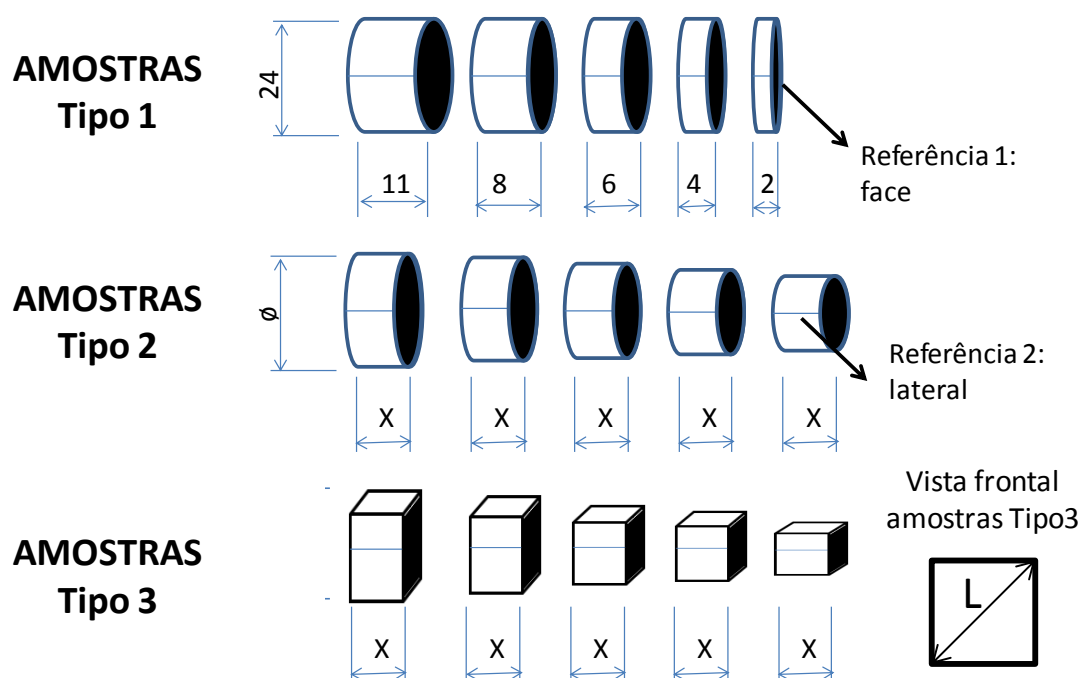
Tabela 3.1 - Classificação das ligas metálicas de aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 (Espectrômetro PDA 7000 *Shimadzu* – CTGÁS/RN)

AMOSTRA	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe	Classificação
Aço Comum	0,46	0,26	0,66	0,03	0,01	0,01	0,03	0,00	0,02	Balance	SAE AISI 1045
Liga de Alumínio	0,35	0,59	0,80	0,001	0,22	0,19	0,01	0,01	0,02	Balance	ASTM 6261

Um aço e uma liga de alumínio foram escolhidos por terem permeabilidades magnéticas bastante distintas. Os materiais foram recebidos na forma de vergalhões com diâmetros de 30 mm para o aço SAE 1045 e 50 mm para o alumínio ASTM 6261. Para cada um deles, foram preparadas amostras identificadas como: Tipo1, Tipo2 e Tipo3, a depender de sua geometria. As diferenças entre esses tipos de amostras podem ser

melhor compreendidas a partir da figura 3.1. As amostras Tipo1 e Tipo2 foram confeccionadas com um formato circular na face e as amostras Tipo3 um formato quadrado. As amostras do Tipo1, Tipo2 e Tipo3 tiveram suas laterais e faces marcadas para garantir pontos de referência que permitiram correlaciona-las durante e após a realização dos ensaios.

Figura 3.1 - Geometria das amostras dos tipos 1, 2 e 3

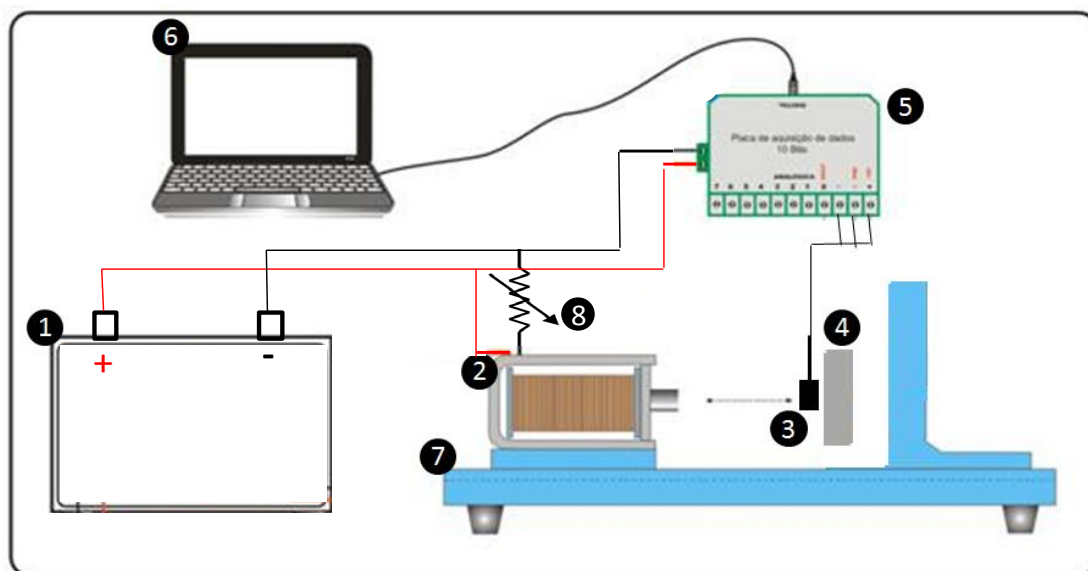


Da observação da figura 3.1, vê-se que a variação da geometria das amostras consistiu em mudanças de espessura, diâmetro e formato da seção longitudinal (face). Para as amostras do Tipo1 variaram-se apenas as espessuras (X) mantendo-se um diâmetro ($\varnothing$) prefixado de 24 mm. Para as amostras do Tipo2, variaram-se apenas os diâmetros ($\varnothing$), utilizando-se os valores de 24 mm, 20 mm, 16 mm, 12 mm e 8 mm, mantendo-se um valor fixo de espessura ótima (X) definido na seção 4.2 (Estudo do efeito da espessura do material). Já para as amostras do Tipo3, alterou-se o formato da seção longitudinal (face) de circular para quadrado e se variou apenas os valores das diagonais do quadrado (L) de maneira que os valores das diagonais (L) fossem iguais aos valores de ($\varnothing$) de 24 mm, 20 mm, 16 mm, 12 mm e 8 mm mantendo-se fixo o valor de X.

3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE

O equipamento de teste foi desenvolvido no laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). Sua configuração experimental pode ser melhor compreendida através da figura 3.2. Na figura 3.2 é apresentada uma representação esquemática do equipamento de teste onde (1) representa o sistema de alimentação, (2) o solenoide, (3) o sensor Hall, (4) a amostra, (5) a placa de aquisição de dados, (6) o computador, (7) a bancada e (8) o potenciômetro.

Figura 3.2 - Representação esquemática do equipamento de teste: (1) Sistema de alimentação; (2) solenoide; (3) sensor Hall; (4) amostra; (5) placa de aquisição de dados; (6) computador; (7) bancada; (8) potenciômetro



O equipamento de teste representado na figura 3.1 foi alimentado por uma bateria automotiva capaz de fornecer uma tensão contínua de 12 V e uma corrente de até 55 A. O solenoide teve as especificações apresentadas na tabela 3.2. Foi utilizado um sensor de efeito Hall linear modelo SS495A, da *Allegro Microsystems*, com sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss, dimensões de 3,00 mm x 4,00 mm x 1,57 mm e tensão de alimentação podendo variar entre 0 e 10V, tendo sido escolhido opera-lo com uma tensão contínua de alimentação de 5 V. Foi utilizada uma placa de aquisição de dados multicanal com um conversor analógico-digital de 10 bits, uma entrada USB e uma saída regulada de tensão de 5 V, alimentada por uma tensão estabilizada de 12 V.

A saída regulada foi utilizada na alimentação do sensor Hall. A bancada serviu como base para fixação do solenoide, do sensor e das amostras e foi confeccionada em Poliacetal, material com baixo coeficiente de atrito e baixo coeficiente de dilatação térmica.

Tabela 3.2 - Especificações do solenoide

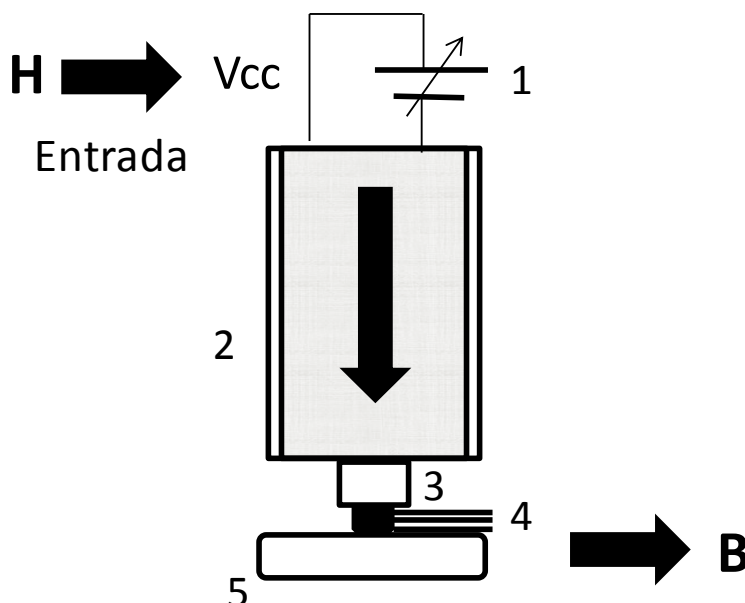
Permeabilidade magnética (μ)	133,8
Resistência elétrica (R)	72 Ω
Relação N/L (N = Núm. de espiras; L = Comp. Solenoide)	21,2567

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Com a metodologia experimental buscou-se o conhecimento de como as variáveis geometria e textura metalográfica podem interferir nas respostas de campo magnético induzido (B) em materiais de diferentes permeabilidades, em função de um campo magnético aplicado (H) de maneira a se construir um melhor entendimento a respeito da interação do campo magnético com o material. Todos os dados medidos foram analisados estatisticamente. Foi utilizada a tabela *T-Student* e as margens de erro foram calculadas utilizando-se um coeficiente de confiança de 95% e um erro de 5%. Como resposta pôde-se saber qual o valor do campo magnético ideal a ser aplicado em materiais de diferentes permeabilidades, como relacionar B com as variáveis de geometria e como realizar correções entre B e as variáveis geométricas de diâmetro, espessura e formato da seção longitudinal. Para isso foram ajustadas as equações matemáticas que representam as referidas relações.

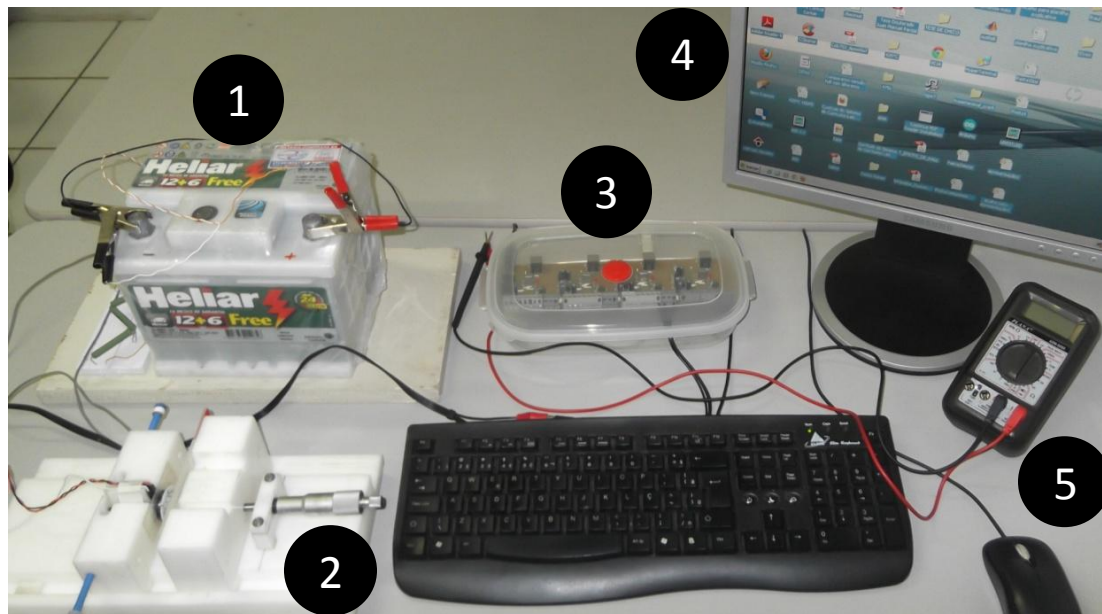
O princípio de funcionamento da técnica consistiu em se aplicar um determinado valor de H e se obter um valor de B para os diversos tipos de amostra, conforme apresentado na figura 3.3. O item (1) representa o sistema de alimentação, (2) o solenoide, (3) o núcleo do solenoide, (4) o sensor Hall e (5) a amostra.

Figura 3.3 - Princípio de funcionamento da técnica de ensaio proposta: (1) Alimentação do solenoide; (2) solenoide; (3) núcleo do solenoide; (4) sensor Hall; (5) amostra



Pela análise da figura 3.3 pode-se entender o princípio de funcionamento da técnica END proposta. Um solenoide (2) foi responsável por produzir um valor de H quando alimentado por uma tensão elétrica. A tensão elétrica foi produzida utilizando-se uma fonte de alimentação contínua ajustável (1). A variação nos valores de tensão de entrada possibilitou se variar o valor de H . Um sensor Hall (4) foi fixado na extremidade do núcleo do solenoide (3). As amostras a serem analisadas (5) foram posicionadas após o sensor Hall, fazendo-se com que o sensor ficasse posicionado exatamente entre a extremidade do núcleo do solenoide e o material. Esse posicionamento tornou possível que o sensor captasse quaisquer variações produzidas nessa interface. Ao se aproximar uma amostra da face do sensor, a permeabilidade magnética do material passou a interferir nos valores de tensão Hall de saída do sensor. Essa variação foi relacionada aos valores de campo magnético induzido (B). A variação de B com as variações da geometria e textura metalográfica foi analisada e entendida. Seu entendimento possibilitou a correção dos valores de B produzidos para materiais com diferentes geometrias e texturas metalográficas. Uma fotografia do equipamento desenvolvido é apresentada na figura 3.4. Na figura 3.4 (1) representa a fonte de alimentação, (2) a bancada, (3) a placa de aquisição de dados, (4) o computador e (5) o Multímetro.

Figura 3.4 - Equipamento de ensaio (GSCMat, IFPB, PB) : (1) Fonte de alimentação; (2) bancada; (3) placa de aquisição de dados; (4) computador; (5) Multímetro



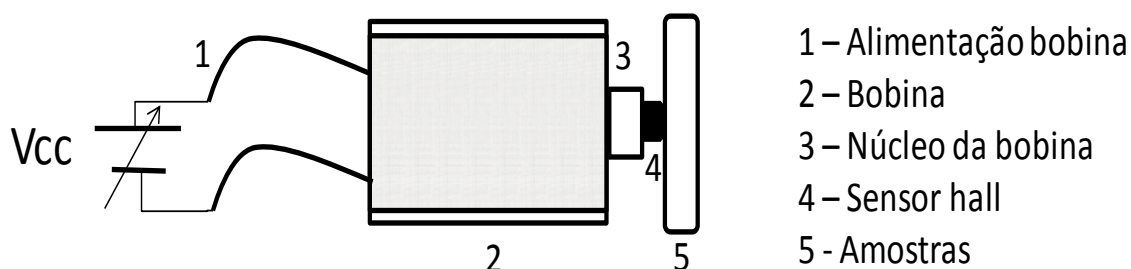
3.4 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

3.4.1 Determinação do campo magnético aplicado ideal (H)

3.4.1.1 Estudo do efeito da espessura do material

Amostras de aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 do Tipo1 ($\varnothing 24$ mm e espessuras de 2 mm, 4mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) foram submetidas à aplicação de valores de H até a saturação do equipamento para se verificar o comportamento das curvas de magnetização B x H. As medições foram realizadas no centro de cada amostra. Esse procedimento pode ser melhor entendido a partir do esquema apresentado na figura 3.5. Na figura 3.5 (1) representa a fonte de alimentação, (2) a bobina, (3) o núcleo da bobina, (4) o sensor Hall e (5) a amostra.

Figura 3.5 - Esquema de posicionamento do solenoide, sensor Hall e amostra para estudo do efeito da espessura do material

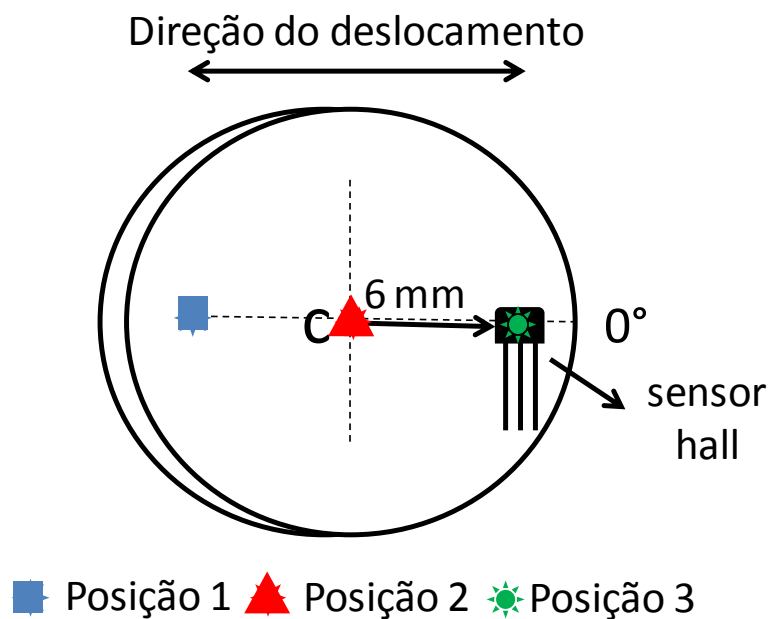


Uma vez traçadas as curvas $B \times H$ para o aço SAE 1045 e para o alumínio ASTM 6261, os valores de B equivalentes ao valor médio de H , para cada espessura, foram utilizados na construção dos gráficos de $B \times$ Espessura. A partir desses gráficos foi determinada a equação característica da variação de B com a espessura do material. Como resposta foi determinada a influência da espessura do material nos valores de B para que se pudesse encontrar a profundidade máxima de uma amostra que pode ser estudada e se fazer a correção dos valores de B para outros valores de espessura não ensaiados.

3.4.1.2 Estudo do efeito de borda

Amostras do aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6262 do Tipo1 ($\varnothing 24$ mm e espessuras de 2 mm, 4mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) foram submetidas à aplicação de diferentes valores de H até a saturação do sistema em três posições diferentes e se mediu os valores de B . As posições onde H foi aplicado e B medido estão apresentadas na figura 3.6. As posições 1 e 3 estão na proximidade da borda do material, a 6 cm do centro das amostras. A posição 2 equivale ao centro das amostras.

Figura 3.6 - Posição da medição de B versus H no centro e na proximidade da borda das amostras Tipo1



Com a proximidade da borda das amostras a permeabilidade magnética do ar passou a interferir na forma como as linhas de campo magnético incidiam no sensor Hall, alterando seu ângulo de incidência e consequentemente os valores de tensão de saída do sensor. Essa variação foi chamada de amplitude. Inicialmente foi verificada a existência do efeito de borda utilizando-se como valor de H o ponto central das curvas de magnetização construídas na seção 3.4.1.1. Confirmada a existência do efeito de borda, o procedimento foi repetido para valores de H variando de zero até a saturação do equipamento.

Com o resultado foi verificada a influência do efeito de borda nos valores de B e como ele se relaciona com H e com a espessura das amostras, de maneira a se poder determinar os valores de H e espessuras ótimas (valores de X da figura 3.1).

3.4.2 Estudo da influência da seção longitudinal

3.4.2.1 Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra ($\varnothing$)

Amostras do aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 do Tipo2 ($\varnothing$ 24 mm, $\varnothing$ 20 mm, $\varnothing$ 16 mm, $\varnothing$ 12 mm e $\varnothing$ 8 mm e espessura X) foram submetidas ao valor de H ótimo determinado utilizando a metodologia proposta na seção 3.4.1 e os valores de B foram medidos para se verificar o comportamento das curvas de magnetização B x $\varnothing$. Uma vez traçadas as curvas B x $\varnothing$ para o aço SAE 1045 e para o alumínio ASTM 6261, as curvas foram utilizadas para determinação da equação característica da variação de B com o diâmetro do material. Como resposta foi determinado o diâmetro mínimo a partir do qual seu valor passa a não mais interferir nos valores de B e como se pode realizar estudos comparativos utilizando materiais de diferentes diâmetros.

3.4.2.2 Estudo do formato da seção longitudinal da amostra

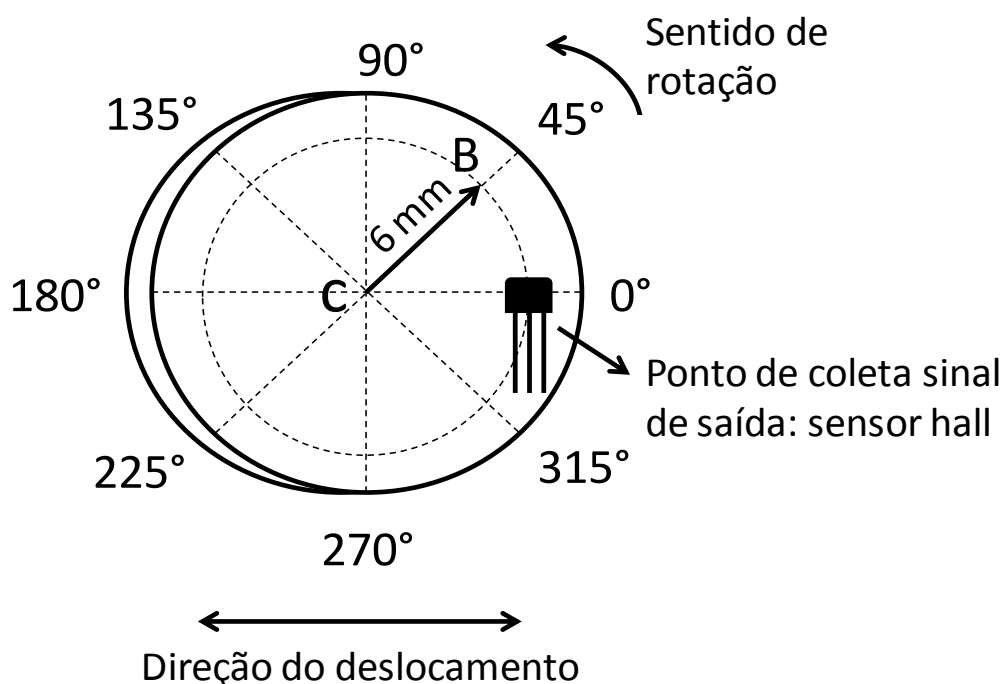
Amostras do aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 do Tipo3 (L 24 mm, L 20 mm, L 16 mm, L 12 mm e L 8 mm e espessura X a ser determinada) foram submetidas ao valor de H ótimo determinado utilizando a metodologia proposta na seção 3.4.1 e os valores de B foram medidos para se verificar o comportamento das curvas de magnetização B x L. Uma vez traçadas as curvas B x L para o aço SAE 1045 e para o alumínio ASTM 6261, elas foram comparadas com as curvas B x $\varnothing$. Essa comparação indicou que B variou com a mudança no formato da seção longitudinal das amostras serão construídas curvas B x Área da seção longitudinal da amostra. Como resposta buscou-se saber a influência do formato da seção longitudinal das amostras, a partir de que dimensão a seção não mais influenciou nos valores de B, como corrigir os valores de B para dimensões menores que essa e como correlacionar materiais com diferentes formatos da seção longitudinal.

3.4.3 Estudo do efeito da anisotropia do material

3.4.3.1 Estudo da variação de $B \times$ Ângulo de rotação das amostras

Amostras do aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 do Tipo1 ($\varnothing 24$ mm e espessuras de 2 mm, 4mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) foram submetidas à aplicação do valor de H médio calculado utilizando-se a metodologia proposta na seção 3.4.1 e os valores de B foram medidos com a rotação das peças. A posição de cada medição foi determinada traçando-se um círculo de raio de 6 mm, com origem no centro de cada amostra, dividindo-a em 8 partes iguais, defasadas de 45° . As medições foram realizadas exatamente a 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° e 360° . O processo de preparação das amostras e a direção de rotação podem ser melhor entendidos a partir da figura 3.7. Na figura 3.7 os pontos onde foram realizadas as medições são os pontos C (centro) e B (proximidade da borda, a 6 mm do centro). A amostra foi rotacionada no sentido anti-horário (sentido de rotação) e o valor de B foi medido sempre no mesmo ponto onde o sensor Hall permaneceu fixo (ponto de coleta do sinal de saída).

Figura 3.7 - Preparação e direção de rotação das amostras para estudo da variação de B com o ângulo de rotação das amostras



Determinado o comportamento de B com o ângulo de rotação nas posições e ângulos propostos na figura 3.7 foram construídas curvas de B x Ângulo de rotação. Tendo sido constatada a variação de B com o ângulo de rotação o efeito de anisotropia magnética presente foi estudado através do procedimento proposto na seção 3.4.3.2.

3.4.3.2 *Análise metalográfica do material*

As amostras do aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 foram submetidas à análise metalográfica tanto no sentido longitudinal como transversal, em busca de respostas que pudessem explicar o comportamento de anisotropia magnética presente nos materiais.

A microscopia ótica foi realizada utilizando-se um microscópio óptico NIKON FX 35XD com câmera acoplada do GSCMAT/IFPB. As imagens obtidas foram capturadas por um *software* de aquisição de imagem acoplado a um computador. As amostras de aço foram atacadas com Nital e as de alumínio com lixívia de soda (10g de hidróxido de sódio e 90 ml de água destilada).

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada utilizando-se um microscópio de varredura com EDS acoplado do CTGÁS/RN. As imagens obtidas foram capturadas por um *software* de aquisição de imagem acoplado a um computador. As amostras de aço foram atacadas com Nital e as de alumínio com lixívia de soda (10g de hidróxido de sódio e 90 ml de água destilada).

As imagens obtidas foram utilizadas para justificar a presença ou ausência de anisotropia magnética. Os pontos de referência criados durante o corte e preparação das amostras (figura 3.1) foram utilizados para comparar os valores de B com a direção de uma possível textura metalográfica. A textura metalográfica existente tornou possível relacionar os valores de B com os processos de fabricação, a partir da direção de deformação dos grãos que a gerou.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No capítulo 3 foi apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, bem como discutidas as possíveis razões que levaram a obtenção de tais resultados.

4.1 ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DO MATERIAL

O Estudo do efeito da espessura foi realizado utilizando-se amostras do Tipo1 ($\varnothing 24$ mm e espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) para ambos os materiais (aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261). A finalidade do estudo foi determinar o comportamento das curvas B x H para cada uma das espessuras na região de operação do equipamento e analisar como a espessura influenciou nas respostas de B. Os valores de H foram variados entre 0 Oe e 33,5 Oe em virtude da limitação do solenoide e os valores de B puderam ser medidos até 768,75 Gauss em virtude da saturação do sensor Hall.

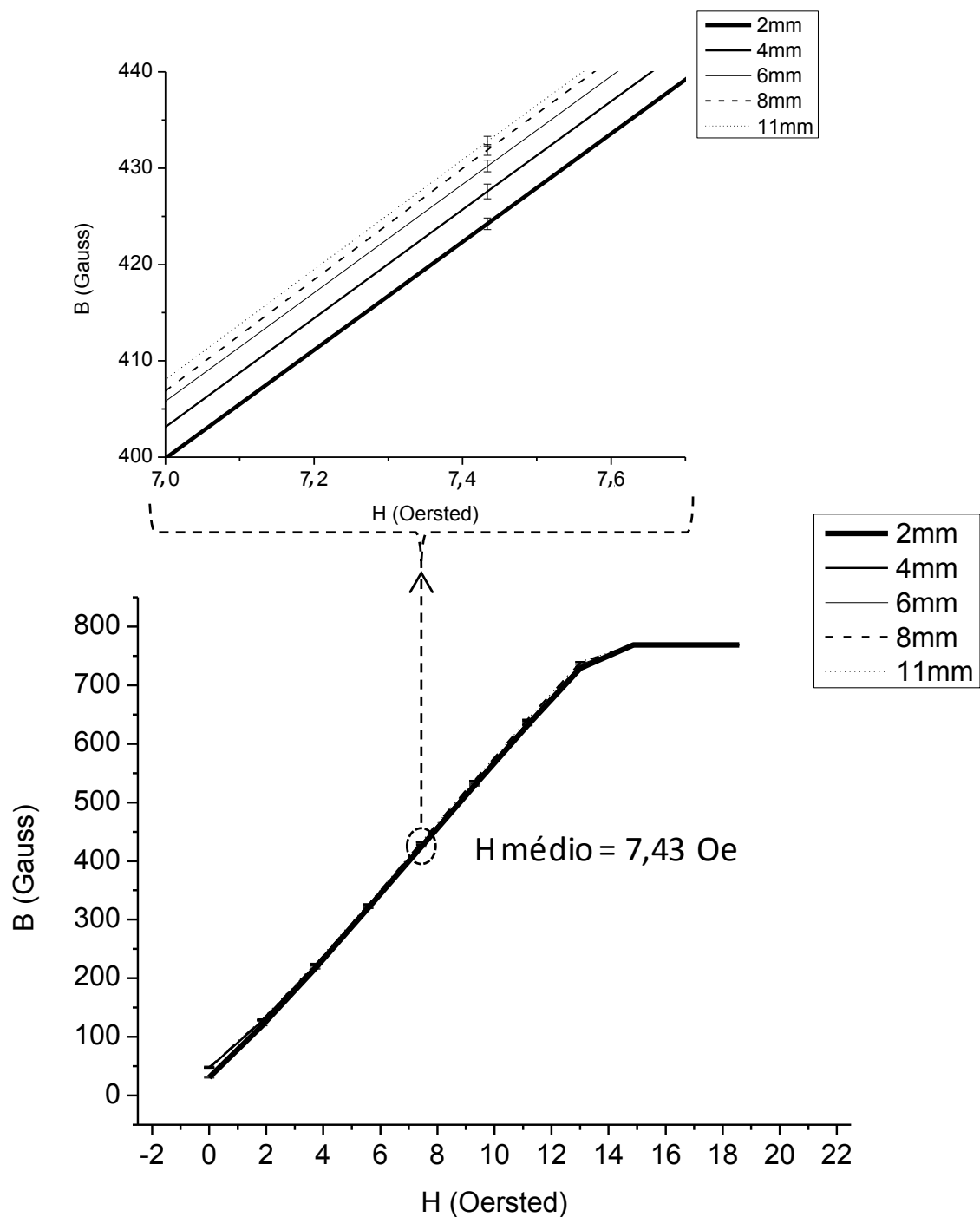
As curvas B x H construídas foram relacionadas às cinco espessuras estudadas, comparando-se o formato e os valores de B para cada valor de H aplicado. Como resposta foi determinada a influência da espessura do material nos valores de B para que se pudesse determinar a profundidade máxima de uma amostra que pode ser estudada por essa técnica. A equação característica da curva B x Espessura foi determinada podendo-se então relacionar os valores de B com outros valores de espessuras.

4.1.1 Estudo do efeito da espessura do aço SAE 1045

O comportamento das curvas B x H para as amostras Tipo1 do aço SAE 1045 em função da espessura pode ser visto na figura 4.1. No eixo das abscissas são apresentados os valores de H, os quais foram variados no intervalo de 0 Oe até 14,86 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos, os quais variaram

no intervalo de 0 Gauss até 768,75 Gauss. Uma ampliação da região central das curvas de magnetização também foi realizada.

Figura 4.1 - Curva de magnetização para as amostras Tipo1 do aço SAE 1045



A curva de magnetização do aço SAE 1045 pode ser dividida em três regiões, só apresentando um comportamento linear em sua primeira região, onde os valores de B

são baixos, da ordem de centenas de Gauss, para o aço (ver figura 2.2). Essa região corresponde à região de reversibilidade na movimentação das paredes dos domínios (SERNA-GIRALDO, 2007). Na região estudada, onde H foi variado entre 0 Oe e 14,86 Oe, conforme resultados apresentados na figura 4.1, a curva característica de B em função de H foi linear para todas as espessuras de amostras utilizadas (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm), de onde se pode concluir estar operando na região de reversibilidade de sua curva de magnetização.

Ainda da observação da figura 4.1 vê-se que para valores de H superiores a 14,8 Oe ocorreu a estabilização no valor de B em torno de 770 Gauss. Nessa região B ainda varia linearmente com o aumento no valor de H , mas essa variação não conseguiu ser captada pelo equipamento, em virtude de uma restrição do sensor utilizado, que satura para valores de B dessa ordem. Para o sensor utilizado o valor de saturação especificado em seu *datasheet* é de 670 Gauss (HONEYWELL, 2013), aproximadamente 100 Gauss a menos do que o que fora alcançado pelo sensor comercial utilizado.

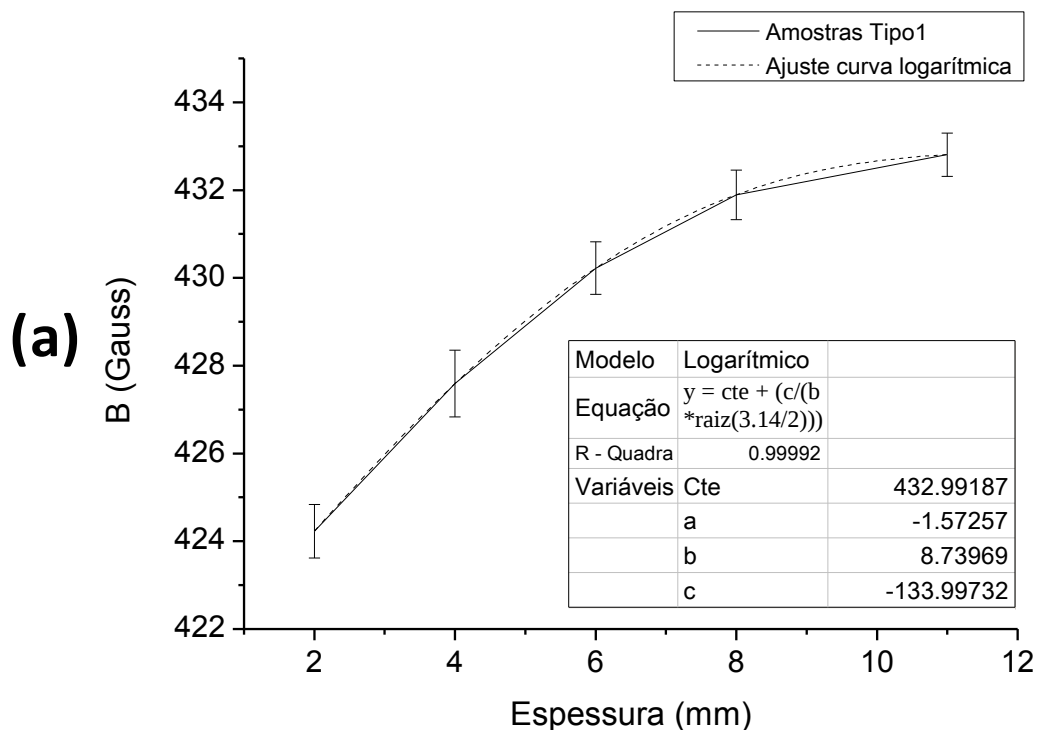
Também foi possível observar analisando-se a região ampliada no centro das curvas $B \times H$ apresentadas na figura 4.1, especificamente no ponto correspondente ao valor de H de 7,43 Oe, que os valores de B variaram com a espessura, aumentado com ela, porém em taxas cada vez menores, até que a partir da espessura de 8 mm o acréscimo do valor de B com o aumento da espessura já foi insignificante.

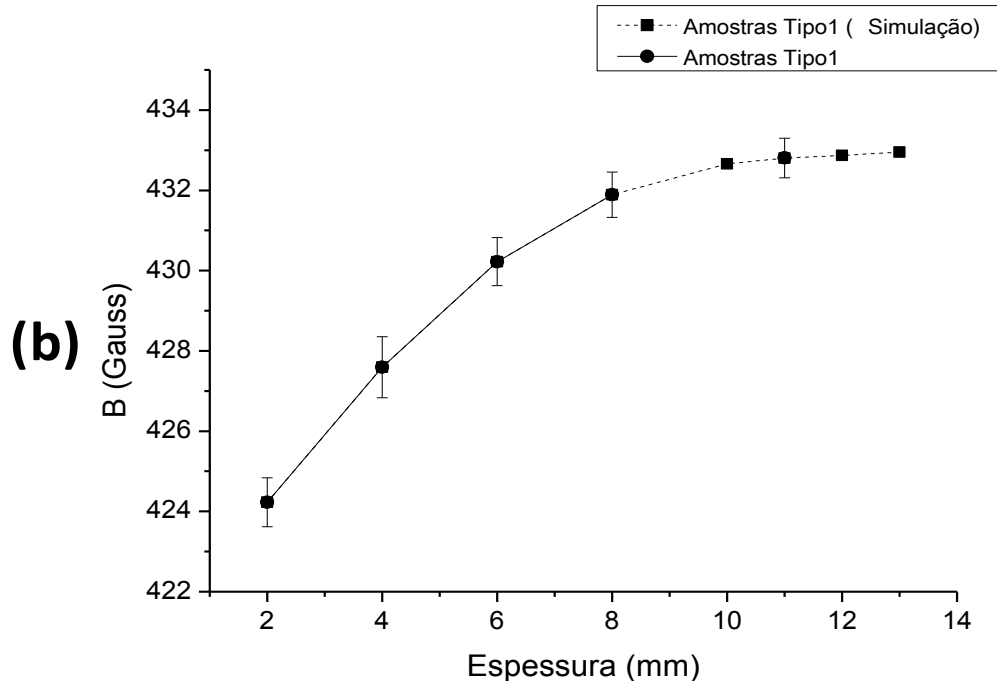
Com os resultados obtidos para o aço foi possível verificar que a espessura não influenciou no formato da curva, pois a tangente da reta na região de reversibilidade corresponde à permeabilidade magnética do material. Nesta região de operação os campos magnéticos induzidos não foram suficientemente altos para que fosse atingida a região de irreversibilidade da movimentação das paredes de domínios magnéticos. Por outro lado, as espessuras influenciaram nos valores de B para um mesmo valor de H aplicado, mostrando que a análise de materiais de diferentes espessuras deve considerar a espessura destes, até ser atingido um valor onde a mesma passa a não mais influenciar nos valores de B .

Para se extrapolar os valores de B para qualquer valor de espessura foi realizado o ajuste da curva de $B \times$ Espessura pelo método dos mínimos quadrados utilizando-se os valores de B e espessuras para o H de 7,43 Oe conforme apresentado na figura 4.2. Na figura 4.2(a) é apresentado o ajuste realizado e a equação representativa deste ajuste. Na figura 4.2(b) são comparados os resultados obtidos experimentalmente e os resultados

simulados extrapolando-se os valores de espessura até 13 mm. No eixo das abscissas são apresentados os valores das espessuras, os quais foram variados no intervalo de 2 mm até 11 mm na figura 4.2(a) e de 2 mm até 13 mm na figura 4.2(b). No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos, os quais variaram no intervalo de 424,22 Gauss até 432,80 Gauss na figura 4.2(a) e de 424,22 Gauss até 432,95 Gauss na figura 4.2(b).

Figura 4.2 - Curva B x Espessura para as amostras Tipo1 do aço SAE 1045 – (a) Ajuste logarítmico da curva; (b) Comparativo das Curvas B x Espessura (experimental e simulada)





Pelos resultados obtidos na figura 4.2(a) pode-se verificar que é possível se determinar uma equação que relaciona B x Espessura com boa aproximação. Os valores de B simulados para as espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm variaram dentro da margem de erro estatístico dos valores obtidos experimentalmente. A extrapolação desses valores para as espessuras de 12 e 13 mm mostraram que os valores de B simulados ainda encontram-se dentro da margem de erro estatística obtida para a amostra de 8 mm, o que indica haver estabilização destes a partir de determinada espessura. Para o aço estudado ocorreu estabilização dos valores de B a partir da espessura de 8 mm, o que indica que amostras com espessuras maiores que essa podem ser comparadas sem se preocupar em padronizar suas espessuras, já amostras com espessuras abaixo desse valor, onde a espessura influencia nos valores de B se faz necessária a realização da correção da espessura utilizando a equação 4.1 para o aço SAE 1045.

$$B = 432,99187 + \left(\frac{-133,99732}{8,73969 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{(-2 \times \left(\frac{E+1,57257}{8,73969} \right)^2)} \quad (4.1)$$

Onde:

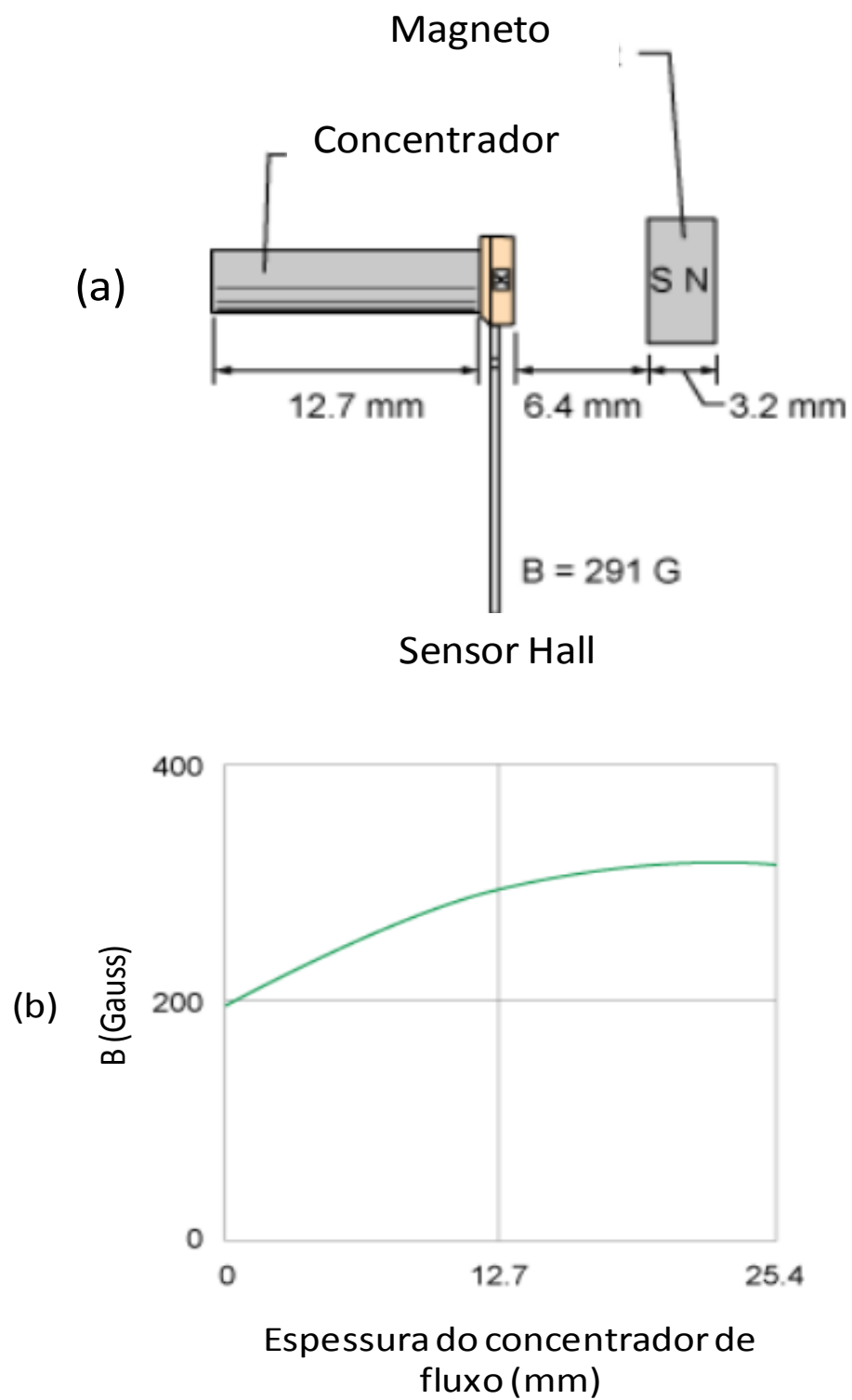
B = Campo magnético induzido (Gauss);

E = Espessura da amostra (mm).

A equação 4.1 deve ser utilizada para se fazer a correção da espessura no intervalo onde B é dependente de seu valor. Durante a realização de END o material deve ter sua espessura medida e o valor de B calculado utilizando a equação. O valor de B deve então ser medido experimentalmente e comparado com o valor teórico calculado. Caso esses valores apresentem resultados diferentes a existência da anomalia que se busca acompanhar deve ser considerada.

A estabilização de B com a espessura se encontra em consonância com o que tem sido observado na literatura (ALLEGRO, 2014). Uma configuração similar à adotada nessa pesquisa tem sido proposta pelos fabricantes de sensores Hall. Essa configuração consiste em se colocar após o sensor um concentrador de fluxo magnético, geralmente de aço carbono, como forma de concentrar o campo magnético aplicado, reduzindo as dimensões e o consumo elétrico dos equipamentos eletroeletrônicos que utilizam essa tecnologia (ALLEGRO, 2014). Essa configuração e a curva de B x Espessura são apresentadas na figura 4.3. Na figura 4.3(a) é apresentada a configuração proposta pelo fabricante. O concentrador de fluxo pode ser comparado às amostras de aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261 que são posicionadas da mesma forma na técnica proposta neste trabalho. O magneto é um ímã permanente responsável pela produção do H necessário e tem a mesma função do solenoide utilizado neste trabalho. Já a figura 4.3(b) apresenta os valores de B com a variação do comprimento do concentrador.

Figura 4.3 - Utilização de concentrador de fluxo magnético para maximização dos valores de B. (a) esquema de posicionamento; (b) curva B x Espessura do concentrador (adaptado de ALLEGRO, 2014)

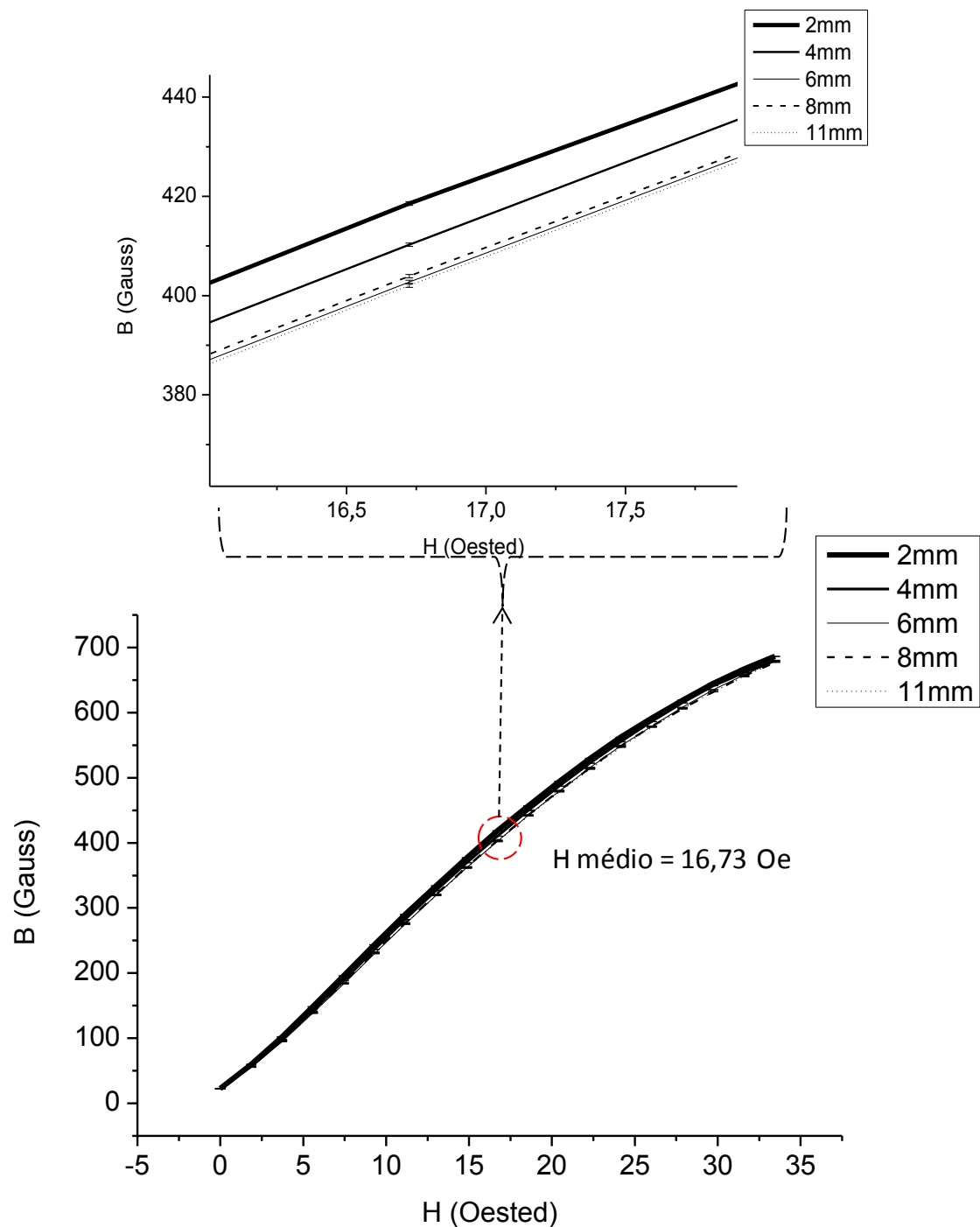


Da análise da figura 4.3(a) pode-se verificar que o esquema de posicionamento do concentrador de fluxo magnético obedece à mesma configuração proposta na metodologia desta pesquisa, que é a de se colocar o sensor Hall entre a amostra e o solenoide, correspondendo à amostra ao concentrador de fluxo magnético e o solenoide ao magneto. A estabilização de B mostrada na figura 4.3(b) se deu porque a colocação de concentradores de fluxo magnético mais espessos após o sensor Hall reduziu a resistência provocada pelo ar, facilitando a propagação das ondas magnéticas e o seu retorno até a fonte magnética que as produziu (ALLEGRO, 2014). Essa resistência à propagação das ondas magnéticas é chamada relutância magnética e é inversamente proporcional à espessura do concentrador. Na figura 4.3(b) pode-se ver ainda que o aumento da espessura do concentrador amplificou o valor de B até um determinado valor, a partir do qual o mesmo passou a ser independente do comprimento, como o ocorrido com o aumento da espessura das amostras (figura 4.2).

4.1.2 Estudo do efeito da espessura do alumínio ASTM 6261

O comportamento das curvas $B \times H$ para amostras Tipo1 ($\varnothing 24$ mm e espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) do alumínio ASTM 6261 em função das espessuras pode ser visto na figura 4.4. No eixo das abscissas são apresentados os valores de H , os quais foram variados no intervalo de 0 Oe até 33,45 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos, os quais variaram no intervalo de 0 Gauss até 686,38 Gauss. Uma ampliação da região central das curvas de magnetização também foi realizada.

Figura 4.4 - Curva de magnetização para as amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261



A curva de magnetização do alumínio é constituída por uma região onde sempre há reversibilidade do alinhamento dos domínios magnéticos. Os materiais paramagnéticos obedecem a lei de Curie, segundo a qual o valor de M é diretamente proporcional ao valor de H aplicado e inversamente proporcional à temperatura do material, ou seja, segundo a lei de Curie, os domínios magnéticos, antes distribuídos em

direções aleatórias, se alinham na direção de um campo magnético aplicado, porém, a energia cinética produzida a partir da agitação térmica do material faz com que esse alinhamento não seja permanente (Cullity, 1972). Complementando a lei de Curie, a teoria de Langevin prevê que aumentando-se o valor de H , o valor de M também aumentará, porém, em patamares cada vez menores, já que a temperatura interna do material também se elevará, de forma que a partir de determinado valor de H , M não mais aumentará em virtude da grande energia cinética produzida (Cullity, 1972). Na região de trabalho escolhida, conforme resultados apresentados na figura 4.4, os valores de B aumentaram em função do aumento do valor de H , porém, não houve um comportamento linear para nenhuma das espessuras, podendo-se concluir que a partir do valor de H de aproximadamente 10 Oe o fenômeno proposto pela teoria de Langevin já começou a influenciar nos valores de B , ou seja, a agitação térmica diminuiu a capacidade de B aumentar a partir do aumento de H , o que pôde ser observado pela mudança na inclinação das curvas de magnetização.

Ainda da observação da figura 4.4 vê-se que mesmo com a aplicação do valor máximo de H possível devido a limitações do solenoide ($H = 33,5$ Oe) o valor de B alcançado foi de apenas 687,4 Gauss, valor este insuficiente para levar à saturação do sensor Hall, como ocorreu com as amostras de aço SAE 1045 (figura 4.1). Isso se deu devido a permeabilidade magnética do alumínio ser menor que a do aço e portanto, ser necessária a aplicação de valores de H mais altos para levar a saturação do sensor Hall.

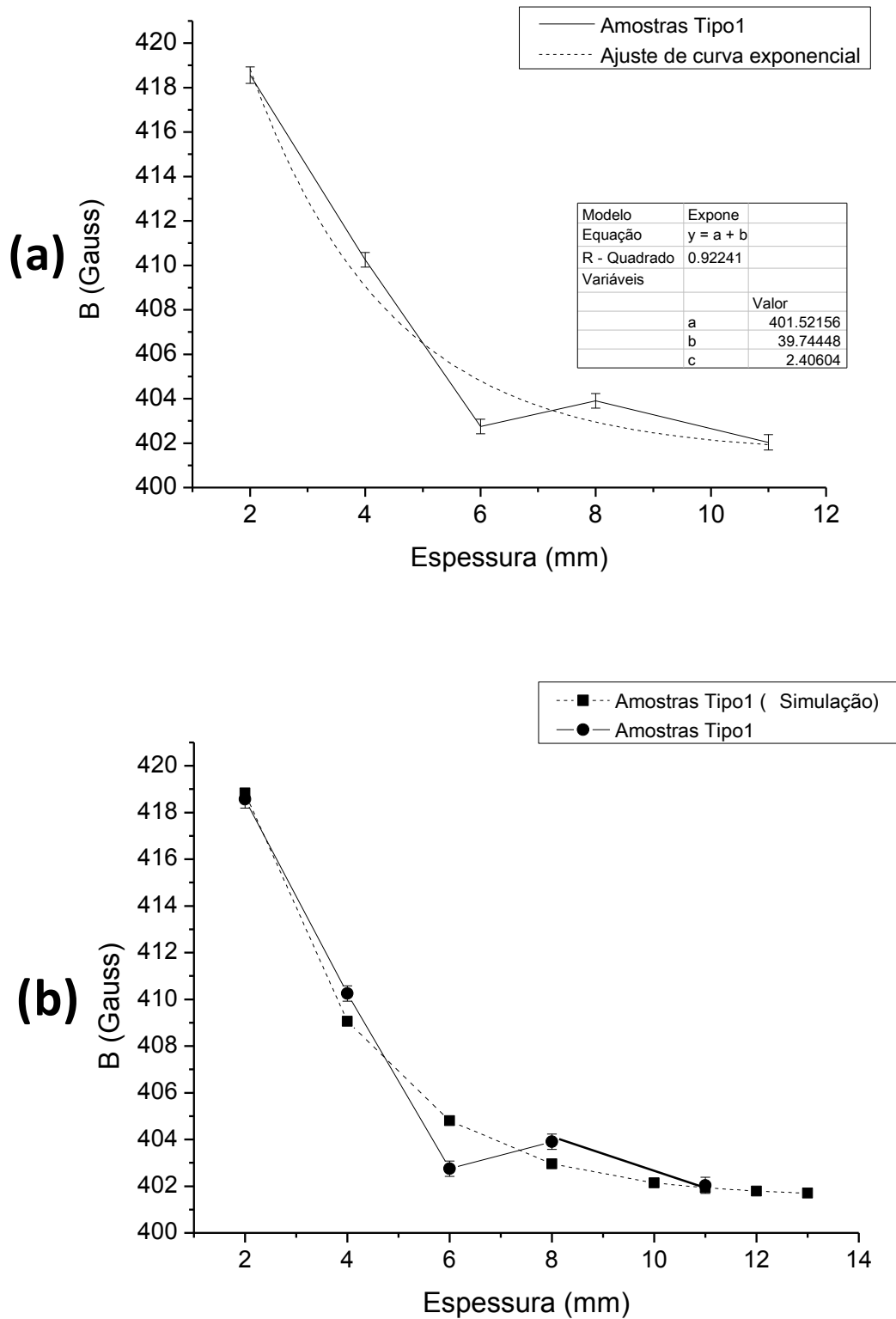
A permeabilidade magnética teórica do alumínio é de 1,0000207 (Callister, 2002). Já a permeabilidade magnética do aço varia bastante com a composição química, os tratamentos térmicos e os processos de fabricação. McCurrie (1994), realizando estudos de permeabilidade, determinou que a permeabilidade teórica de um lingote de aço-carbono comercial varia entre 10 e 1000, a depender do valor de H aplicado. Para o aço SAE 1045 e o alumínio ASTM 6261 utilizados, os valores de permeabilidade magnética foram obtidos experimentalmente substituindo-se o núcleo de um solenoide com a relação N/L conhecida por estes materiais, tendo sido obtidos os valores de 4,55885 e 1,01238 para o aço e alumínio, respectivamente.

Com os resultados obtidos para o alumínio foi possível se verificar que a espessura não influenciou no formato das curvas de magnetização, uma vez que para o alumínio só há uma região de movimentação das paredes de domínio magnético, região esta de reversibilidade. Por outro lado, a partir da observação da região de ampliação da

figura 4.4, especificamente para o valor de H de 16,73 Oe, pode ser visto que a espessura influenciou nos valores de B obtidos, mostrando que na análise de materiais de diferentes espessuras devem-se considerar suas espessuras até o valor onde as mesmas passam a não mais influenciar os valores de B .

Para se extrapolar os valores de B para qualquer valor de espessura foi realizado o ajuste da curva de $B \times$ Espessura pelo método dos mínimos quadrados utilizando-se os valores de B obtidos para cada espessura para o valor de H de 16,73 Oe conforme apresentado na figura 4.5. Na figura 4.5(a) é apresentado o ajuste realizado e a equação representativa deste ajuste. Na figura 4.5(b) são comparados os resultados obtidos experimentalmente e os resultados simulados extrapolando-se os valores de espessura até 13 mm. No eixo das abscissas são apresentados os valores das espessuras, os quais foram variados no intervalo de 2 mm até 11 mm na figura 4.5(a) e de 2 mm até 13 mm na figura 4.5(b). No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos, os quais variaram no intervalo de 402,03 Gauss até 418,56 Gauss na figura 4.5(a) e de 401,70 Gauss até 418,83 Gauss na figura 4.5(b).

Figura 4.5 - Curva B x Espessura para as amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261 –
 (a) Ajuste exponencial da curva; (b) Comparativo das Curvas B x Espessura experimental e simulada



Pelos resultados obtidos na figura 4.5(a) pode-se verificar que também foi possível se determinar uma equação que relaciona B x Espessura com boa aproximação para o alumínio. A partir da espessura de 6 mm o valor B passou a oscilar próximo da margem de erro estatístico. A extrapolação desses valores para as espessuras de 12 e 13 mm mostraram que os valores de B simulados se encontram dentro da margem de erro estatística obtida para a amostra de 6 mm, o que indica haver estabilização dos valores de B a partir de determinada espessura. Para o alumínio estudado há uma tendência de estabilização dos valores de B para espessuras a partir de 6 mm, o que indica que amostras com espessuras maiores que essa podem ser comparadas sem se preocupar em padronizar suas espessuras, já amostras com espessuras abaixo desse valor, onde a espessura influencia nos valores de B se faz necessária a realização da correção da espessura utilizando a equação 4.2 para o alumínio ASTM 6261.

$$B = 401,52156 + 39,74448 \times e^{-\frac{E}{2,40604}} \quad (4.2)$$

Onde:

B = Campo magnético induzido (Gauss);

E = Espessura da amostra (mm).

A equação 4.2 deve ser utilizada para se fazer a correção da espessura no intervalo onde B é dependente de seu valor. Durante a realização de END o material deve ter sua espessura medida e o valor de B calculado utilizando a equação. O valor de B deve então ser medido experimentalmente e comparado com o valor teórico calculado. Caso esses valores apresentem resultados diferentes a existência da anomalia que se busca acompanhar deve ser considerada.

4.1.3 Comparativo do efeito da espessura no aço e alumínio estudados

Comparando-se as curvas B x H para o aço SAE 1045 e o alumínio ASTM 6261, figuras 4.1 e 4.4, respectivamente, pode-se observar que em ambos os casos B aumentou com o aumento de H, porém, a inclinação da curva, que corresponde ao valor da permeabilidade magnética do material se manteve inalterada para o aço e variou para o alumínio, mostrando haver variações de permeabilidade para o alumínio mesmo em

uma região em que a mesma é considerada constante para materiais ferromagnéticos como o aço. Isso se deu devido ao comportamento paramagnético do alumínio e está em consonância com a Lei de Curie e a Teoria de Langevin. Também foi possível verificar que os comportamentos de B com as espessuras foram opostos no comparativo dos dois materiais, ou seja, enquanto nas amostras de aço SAE 1045 o valor de B aumentou com o aumento da espessura, nas amostras de alumínio o aumento da espessura gerou redução nos valores de B. Também foi possível observar que o aumento de B nas amostras de aço SAE 1045 e a redução de B nas amostras de alumínio ASTM 6261 ocorreram em taxas cada vez menores, de maneira que para as amostras com espessuras a partir de 8 mm, o acréscimo de B já pode ser considerado insignificante, variando dentro da margem de erro estatístico, para o aço. Efeito similar ocorreu para as amostras de alumínio já a partir da espessura de 6 mm. Essa ocorrência prematura de estabilização de B com a espessura, comparada ao aço, se deu devido a menor permeabilidade magnética do alumínio, o que limitou a capacidade de penetração das linhas de fluxo magnético com a espessura, antecipando esse efeito.

4.2 ESTUDO DO EFEITO DE BORDA

O Estudo do efeito de borda foi realizado utilizando-se amostras do Tipo1 ($\varnothing 24$ mm e espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) para ambos os materiais. Inicialmente foi aplicado no centro e posteriormente a 6 mm do centro das amostras o valor de H referente ao ponto médio das curvas de magnetização apresentadas nas figuras 4.1 e 4.4, ou seja, um valor de H de 7,43 Oe e 16,73 Oe para o aço e alumínio, respectivamente, e mediu-se os valores de B. Em seguida, repetiu-se o procedimento para outros valores de H, fazendo seu valor variar de 0 Oe até a saturação do sensor Hall para o aço e até a limitação do solenoide, para o alumínio. Como resposta foi calculada a amplitude da medição, dada pela diferença entre os valores de B obtidos no centro e a 6 mm do centro para um mesmo valor de H.

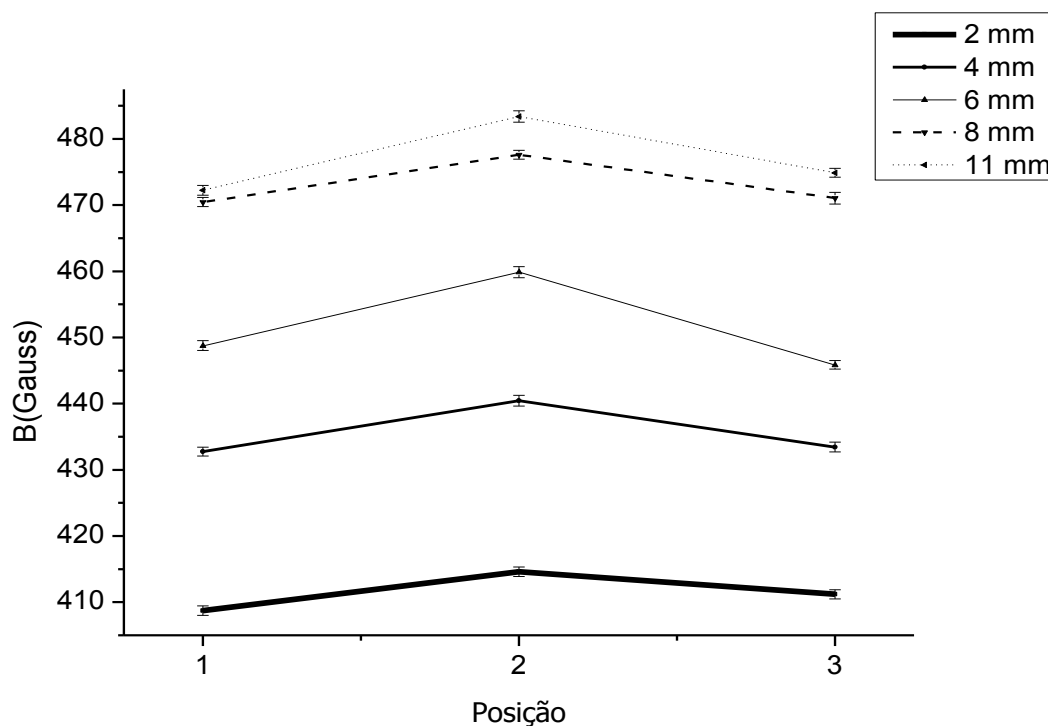
Com os valores de amplitude calculados, buscou-se entender a influência do efeito de borda nos valores de B e como ele se relaciona com o campo magnético aplicado e a espessura das amostras, de maneira a poder se determinar os valores de H e espessura ótimos. Esses valores foram utilizados na determinação da espessura das amostras Tipo2 e Tipo3 a serem confeccionadas para a realização do estudo da

influência da influência do diâmetro e do formato das amostras e do valor de H ao qual essas amostras serão submetidos.

4.2.1 Estudo do efeito de borda do aço SAE 1045

O comportamento das curvas de B com a distância do centro para as amostras Tipo1 do aço SAE 1045 submetidas ao valor de H médio da curva de magnetização B x H do aço ($H = 7,43 \text{ Oe}$) é apresentado na figura 4.6. No eixo das abscissas são apresentadas as posições onde H foi aplicado e B medido, sendo a posição 1 aquela a 6 mm à esquerda do centro da amostra; a posição 2 aquela exatamente no centro da amostra; e a posição 3 aquela a 6 mm à direita do centro das amostras. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada uma das espessuras analisadas.

Figura 4.6 - Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do aço SAE 1045 para H de 7,43 Oe (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro)



Pela análise da figura 4.6, pode-se observar que para todas as posições (posição 1, posição 2 e posição 3) o comportamento de B com relação à espessura do material é compatível com o que já fora observado na região de ampliação das curvas de

magnetização do aço apresentadas na figura 4.1. Em todas as posições ocorreu o aumento do valor de B com o aumento da espessura e este valor tendeu a se estabilizar a partir da espessura de 8 mm, mostrando que a partir de determinada espessura, B não mais variará, se tornando independente dela.

Sabe-se, de acordo com a Lei de Faraday, que o valor de B é proporcional à quantidade de linhas de indução que atravessam o material e que seu valor é máximo quando elas o cruzam perpendicularmente (PURCELL, 2013). Dessa maneira pode-se concluir que com o aumento da espessura houve uma maior penetração das linhas de campo magnético no material, tornando-as cada vez mais concentradas e perpendiculares ao elemento Hall do sensor. Ao se utilizar espessuras acima 8 mm a maioria das linhas de campo já estavam concentradas e orientadas o bastante para não influenciarem mais significativamente no valor de B.

Com relação ao efeito de borda, pode-se, ainda da análise da figura 4.6, observar que os valores de B medidos no centro e a 6 mm do centro das amostras variaram, tendo os valores de B no centro sido em todos os casos maiores. Isso ocorreu para todas as espessuras.

Para se entender o efeito de borda é importante ser esclarecido que o valor de H foi mantido constante para todos os casos apresentados na figura 4.6, logo, a densidade de linhas de campo magnético se manteve inalterada. Nos sensores de efeito Hall lineares como o utilizado, o deslocamento entre a área de maior densidade de linhas de campo (área central dos ímãs ou solenoide) e a área ativa do sensor (área que contém o elemento Hall), causa variações perceptíveis nos valores de saída de tensão Hall (ALLEGRO, 2012). Deve-se considerar que na situação estudada, estará incidindo no sensor Hall um campo magnético B_b , onde B_b representa o valor de H gerado pelo solenoide. Esse campo magnético produzirá uma força magnética sobre cargas em movimento, quando o sensor Hall for alimentado por uma corrente elétrica (I). Essas variáveis que podem ser relacionadas a partir da equação de Lorentz (equação 2.1).

$$F_m = q \cdot V \times B_b \quad (2.6)$$

Onde:

F_m = força magnética (N);

q = carga do elétron (C);

V = Velocidade de deriva do elétron (m/s);

B_b = Campo magnético aplicado (T).

A força magnética de Lorentz tende a se contrapor ao campo elétrico de Hall, tendo ambos a mesma intensidade (CARUSO et al, 2014). A partir dessa igualdade pode-se chegar a uma equação que relaciona a dimensão do elemento Hall existente no sensor com a corrente aplicada e o ângulo de incidência das linhas de campo magnético sobre esse elemento, conforme equação 2.2.

$$V_h = I \cdot B_b \cdot \text{sen}\alpha / (n \cdot q \cdot L) \quad (2.2)$$

Onde:

V_h = tensão Hall (V);

I = corrente elétrica (A);

B_b = campo magnético aplicado (T);

α = ângulo de incidência ($^\circ$);

n = densidade de carga (C/m);

q = carga do elétron (C);

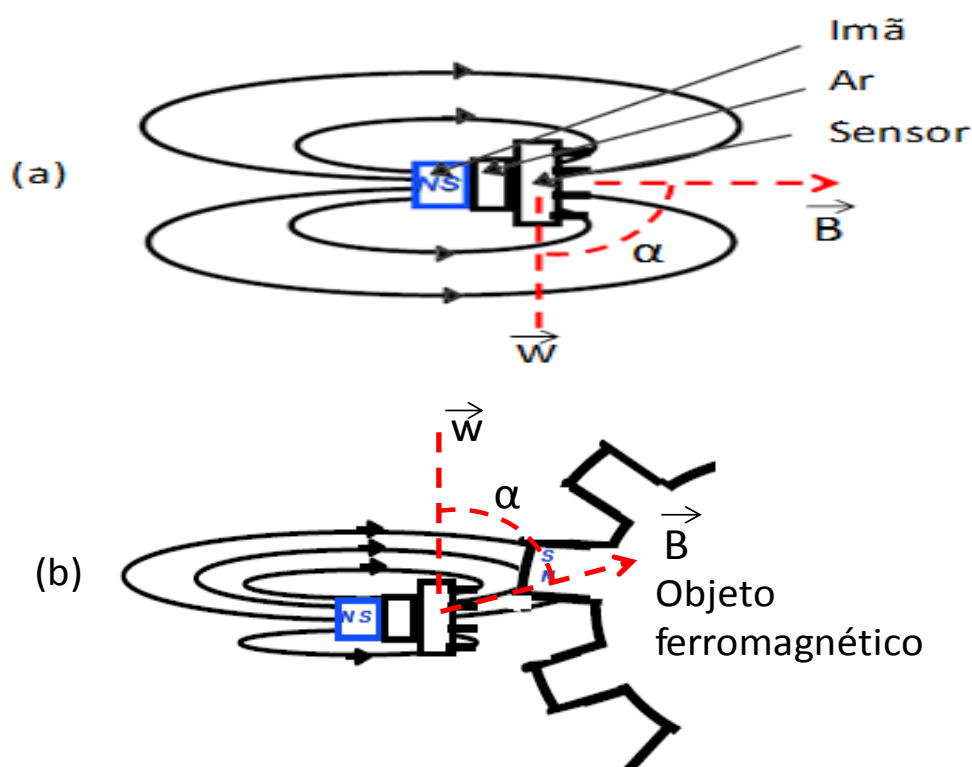
L = espessura do elemento Hall (m).

O ângulo de incidência α apresentado na equação 2.2 representa o ângulo entre B_b e um vetor qualquer (w) paralelo ao elemento Hall (ver figura 4.7). Dessa forma, relacionando-se essa equação com a situação estudada, pode-se dizer que deslocando-se a posição de aplicação de H do centro das amostras na direção de suas bordas, a única perturbação possível foi no ângulo de incidência α , sendo essa a única das variações capaz de gerar alguma redução na tensão de saída do sensor (V_h), isso porque o campo magnético aplicado não foi variado e o sensor não foi mudado, o que manteve as demais variáveis da equação 2.2 inalteradas.

A perturbação no ângulo de incidência α se deu porque na proximidade da borda o ar, que tem permeabilidade magnética menor que o aço, passou a interferir no trajeto das linhas de campo magnético, reduzindo o valor do $\text{sen}\alpha$ da equação 2.2. Caruso et al (2014) apresentam na figura 4.7 um efeito semelhante ao efeito de borda, representando as alterações de direção que sofrem as linhas de campo magnético na

passagem de dentes de engrenagens por um campo magnético. Na figura 4.7(a) é apresentado o trajeto das linhas de campo magnético e o ângulo de incidência α para um aparato onde o efeito de borda não está presente. Na figura 4.7(b) é apresentada a interferência gerada pelo efeito de borda na direção do vetor B e a variação causada no ângulo de incidência α .

Figura 4.7 - Representação do efeito de borda a partir da variação do ângulo de incidência α . (a) trajeto das linhas de campo magnético e ângulo de incidência sem a presença do efeito de borda. (b) trajeto das linhas de campo e variação do ângulo de incidência com a presença do efeito de borda (Adaptado de CARUSO et al, 2014)

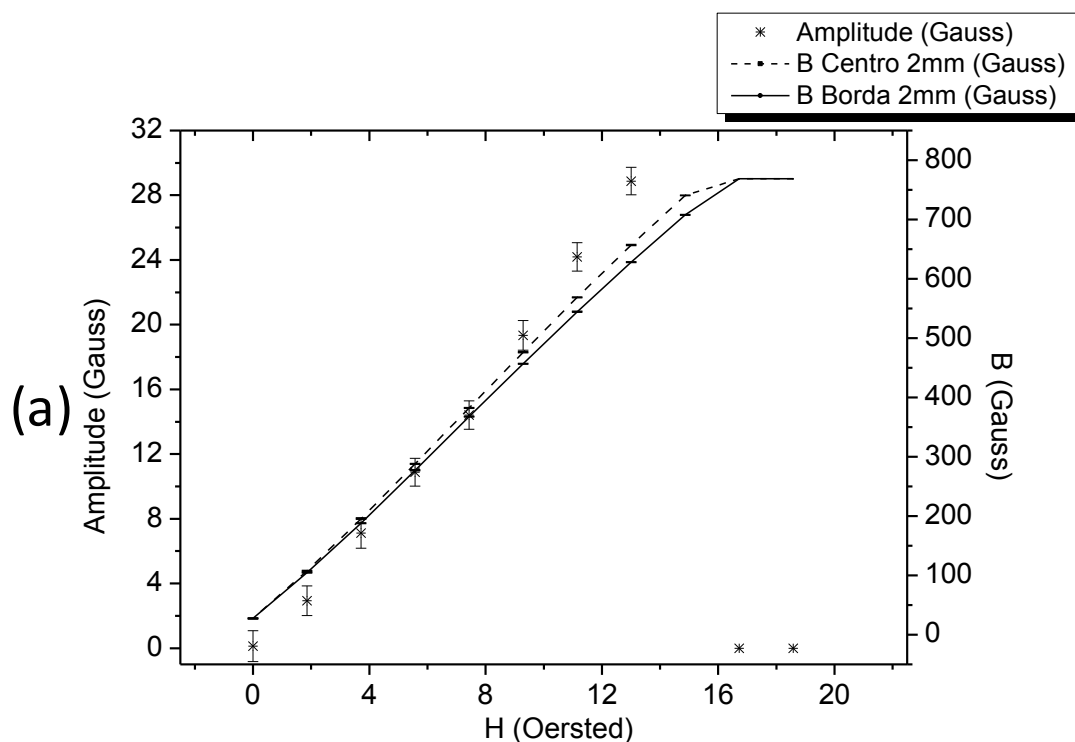


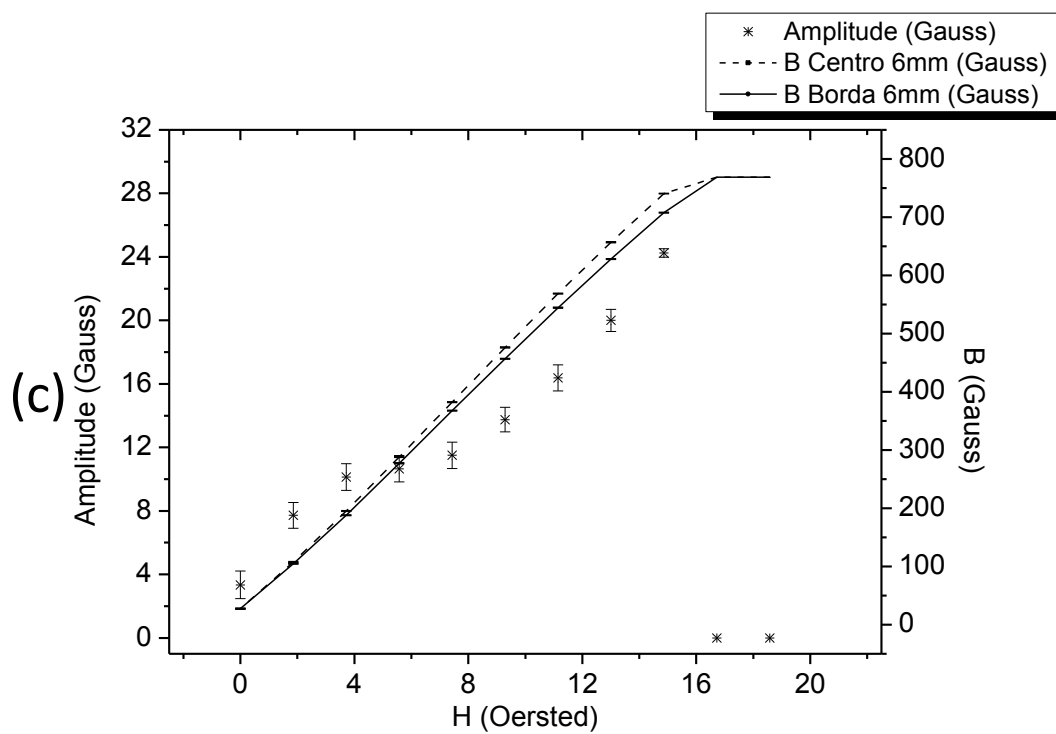
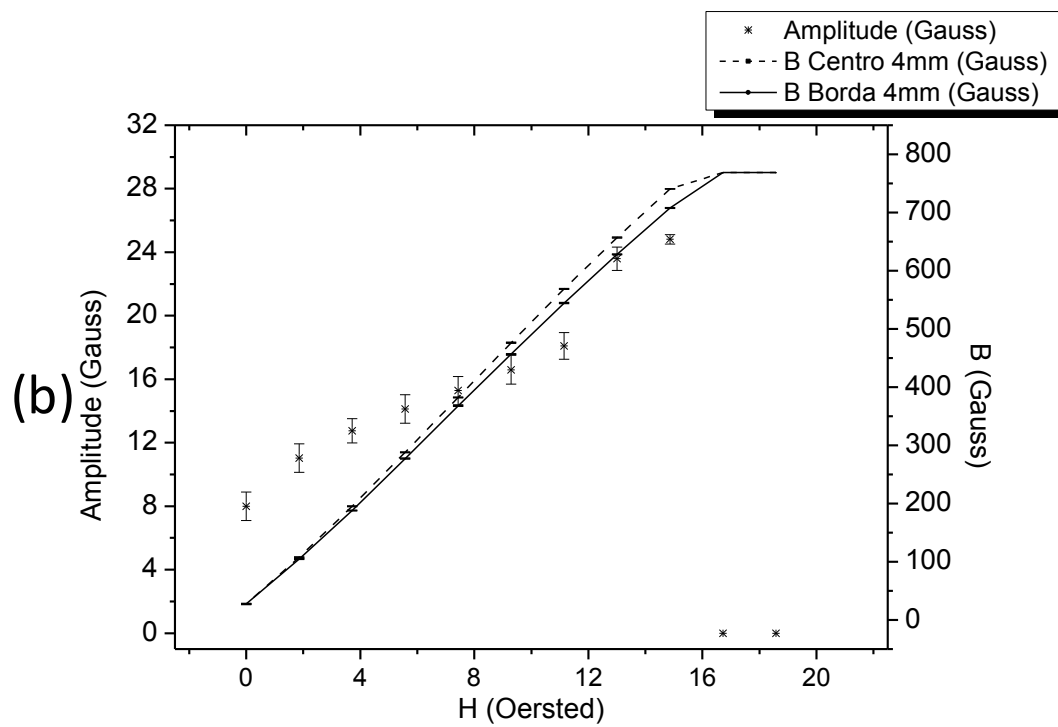
O comportamento apresentado nas figuras 4.7(a) e 4.7(b) é similar ao que está ocorrendo na região de borda das amostras de aço SAE 1045, levando a uma redução no ângulo de incidência α e consequentemente nos valores de B .

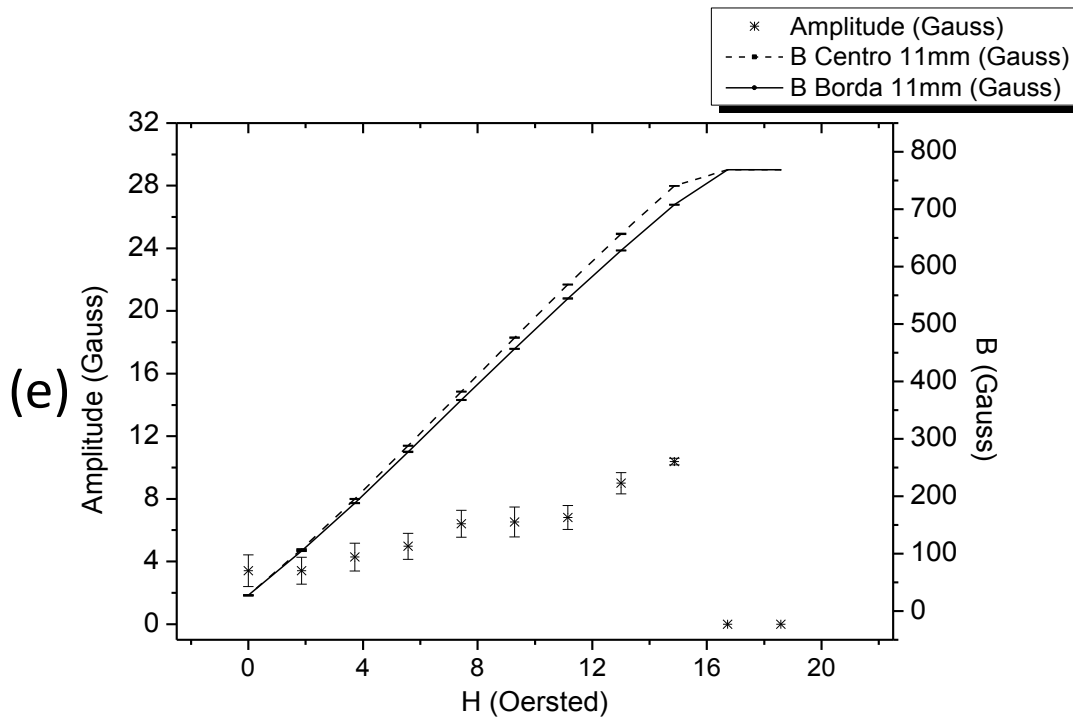
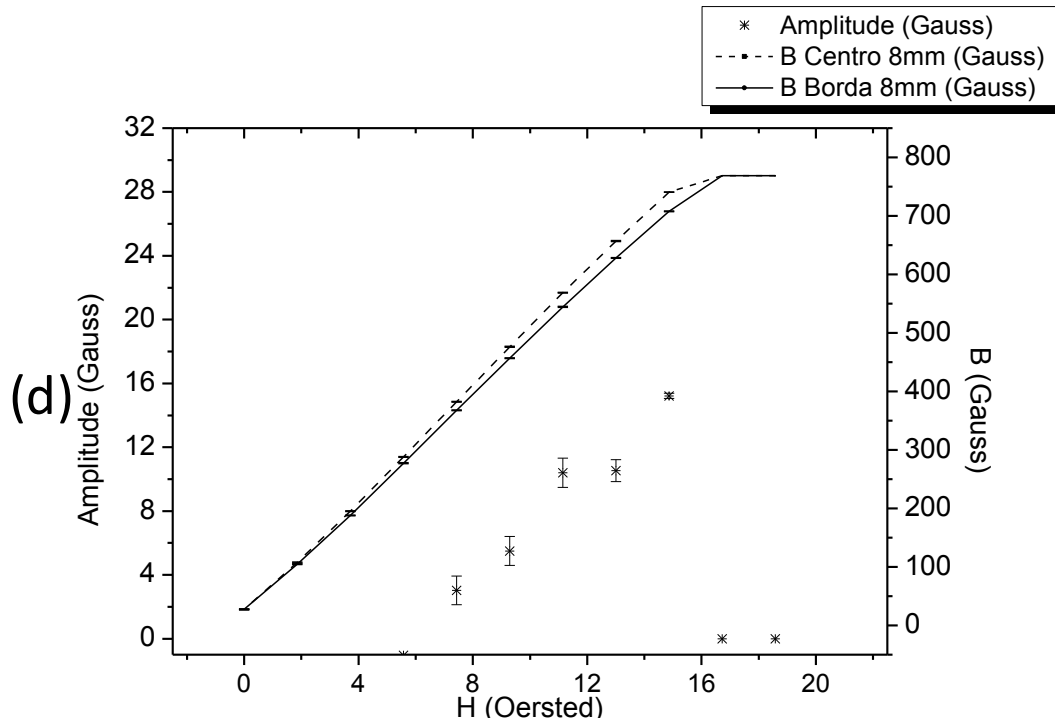
Como houve variações de B entre o centro e a proximidade da borda das amostras, buscou-se determinar os valores de H e espessura ótimos. Para tanto fez-se variar os valores de H até a saturação do sensor e como resposta foi calculada a amplitude da medição, dada pela diferença entre os valores de B obtidos no centro e a 6 mm do centro das amostras, para um mesmo valor de H . Os valores de amplitude

apresentaram sinal positivo e negativo e foram comparados em termos relativos com a finalidade de se saber se o valor de B no centro foi maior (amplitude positiva) ou menor (amplitude negativa) que o da borda. Já a análise dessas amplitudes para a determinação do H ótimo foi realizada levando-se em consideração seus valores absolutos. Os valores de amplitude calculados são apresentados na figura 4.8. No eixo das abscissas são apresentados os valores de H. No eixo das ordenadas à esquerda são apresentados os valores das amplitudes e no eixo das ordenadas à direita são apresentados os valores de B.

Figura 4.8 - Curvas de magnetização e amplitude do aço SAE 1045, sendo: (a) espessura de 2 mm; (b) espessura de 4 mm; (c) espessura de 6 mm; (d) espessura de 8 mm; (e) espessura de 11 mm







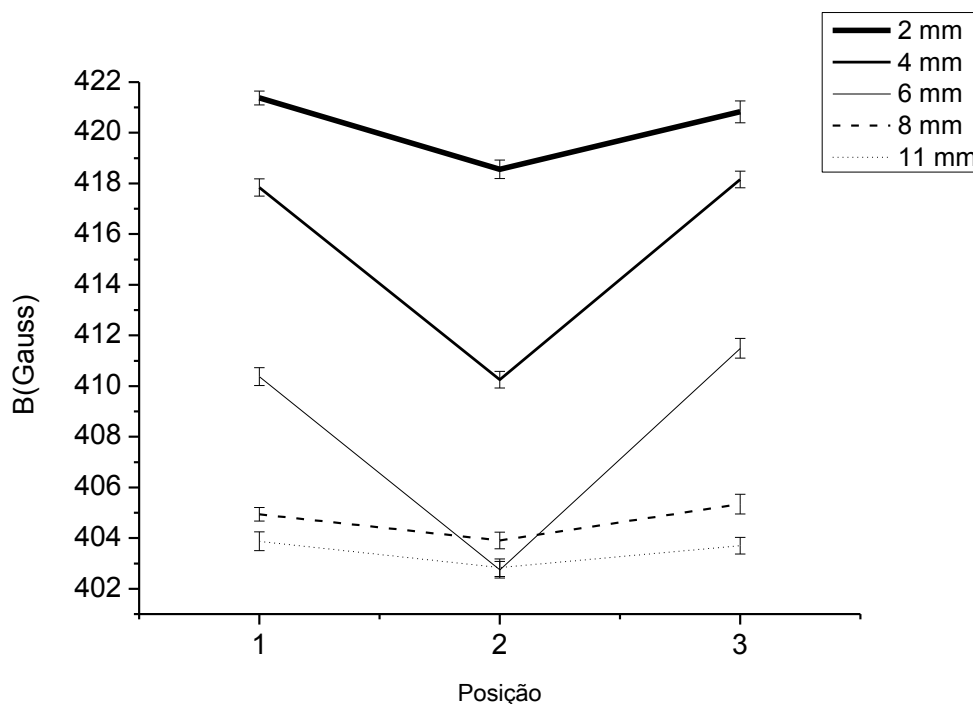
Da análise das figuras 4.8(a) até 4.8(e) pode-se verificar que tanto as espessuras das amostras como os valores de H aplicados influenciaram nos valores de amplitude, tendo a amplitude, em termos absolutos, reduzido com o aumento da espessura e aumentado com os valores de H. A amostra de menor espessura (2 mm), figura 4.8(a), por exemplo, quando submetida ao valor máximo de H aplicável pelo equipamento ($H = 14,9$ Oe) produziu um valor de amplitude de 32,5 Gauss. Já a amostra de maior

espessura (11 mm), figura 4.8(e), para este mesmo valor de H produziu uma amplitude de apenas 8,5 Gauss. Esses valores de amplitude representaram o maior e o menor valor encontrado para as diversas espessuras estudadas, quando submetidas ao maior valor de H aplicado. A amostra que obteve menores valores de amplitude, em termos absolutos, foi a de 11 mm de espessura. O maior valor de amplitude para essa amostra ocorreu para o H de 14,9 Oe, do que se pode concluir que os valores de H e espessura ótimos são 14,9 Oe e 11 mm, respectivamente.

4.2.2 Estudo do efeito de borda do alumínio ASTM 6261

O comportamento das curvas de B com a distância do centro para as amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261 submetidas ao valor de H médio da curva de magnetização B x H do alumínio ($H = 14,9$ Oe) é apresentado na figura 4.9. No eixo das abscissas são apresentadas as posições onde H foi aplicado e B medido, sendo a posição 1 aquela a 6 mm à esquerda do centro da amostra; a posição 2 aquela exatamente ao centro da amostra; e a posição 3 aquela a 6 mm à direita do centro das amostras. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada uma das espessuras analisadas.

Figura 4.9 - Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261 para H de 14,9 Oe (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro)



Pela análise da figura 4.9, pode-se observar que para todas as posições (posição 1, posição 2 e posição 3) o comportamento de B com relação à espessura do material foi compatível com o que já fora observado na região de ampliação das curvas de magnetização do alumínio apresentadas na figura 4.4. Em todas as posições ocorreu a redução do valor de B com o aumento da espessura e este valor tendeu a se estabilizar a partir da espessura de 6 mm, mostrando que a partir de determinada espessura, B não mais variará, se tornando independente desta.

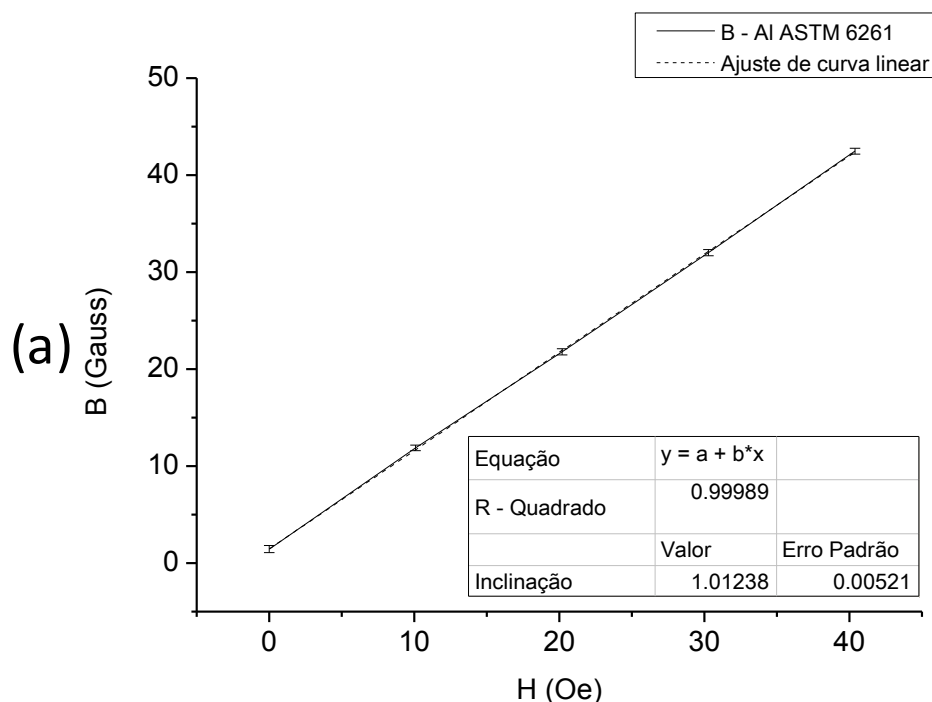
Com relação ao efeito de borda, pode-se, ainda da análise da figura 4.9, observar que os valores de B medidos no centro e a 6 mm do centro das amostras variaram, tendo seus valores na borda sido em todos os casos maiores. Isso ocorreu para todas as espessuras.

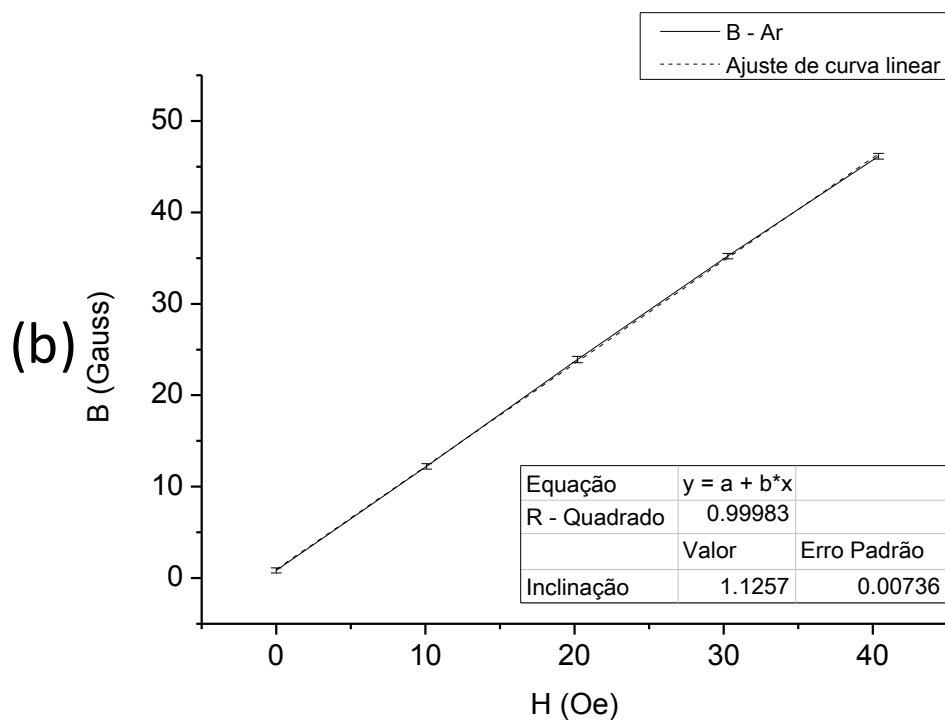
A variação dos valores de B entre a borda e o centro das amostras Tipo1 do alumínio pode ser explicada pelo mesmo princípio utilizado para explicar essa ocorrência no aço, ou seja, ocorreu uma perturbação no ângulo de incidência α , porém, no caso do alumínio, ao contrário do que ocorreu no aço, B foi maior na borda das amostras, onde havia uma maior interferência do ar. Esse comportamento diferente é possível devido às características magnéticas do aço e do alumínio serem diferentes. O

alumínio é um material paramagnético e tem permeabilidade magnética muito baixa, próxima a do ar, enquanto que o aço é um material ferromagnético com permeabilidade magnética muito superior a do ar.

Para se entender o motivo dos valores de B terem reduzido quando o sensor Hall foi aproximado de uma maior massa de alumínio na região de centro das amostras, as curvas de magnetização do Ar e do Alumínio ASTM 6261 foram determinadas experimentalmente utilizando-se uma bobina com a relação N/L conhecida, sendo N o número de espiras e L o comprimento da bobina, e em seguida foram calculadas as permeabilidades magnéticas dos dois materiais, dadas pelas inclinações de suas curvas de magnetização, conforme apresentadas na figura 4.10. Na figura 4.10(a) são apresentados os resultados para o alumínio ASTM 6261 e na figura 4.10(b) os resultados para o ar. No eixo das abscissas são apresentados os valores de H. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos experimentalmente e os resultados simulados.

Figura 4.10 - Curvas de magnetização do ASTM 6261(a) e do Ar (b) e valores de permeabilidade magnética dos materiais





Do comparativo das figuras 4.10(a) e 4.10(b) pode-se verificar que os valores de inclinação das curvas de magnetização do alumínio ASTM 6261 e do Ar foram diferentes. Esses valores de inclinação representam as permeabilidades magnéticas dos materiais. Os valores de permeabilidade magnética obtidos experimentalmente para os materiais estudados são apresentados na tabela 4.1 juntamente com o valor de permeabilidade magnética do Ar, também obtido experimentalmente.

Tabela 4.1 - Valores de permeabilidade magnética obtidos experimentalmente para o aço SAE 1045, a liga de alumínio ASTM 6261 e o Ar

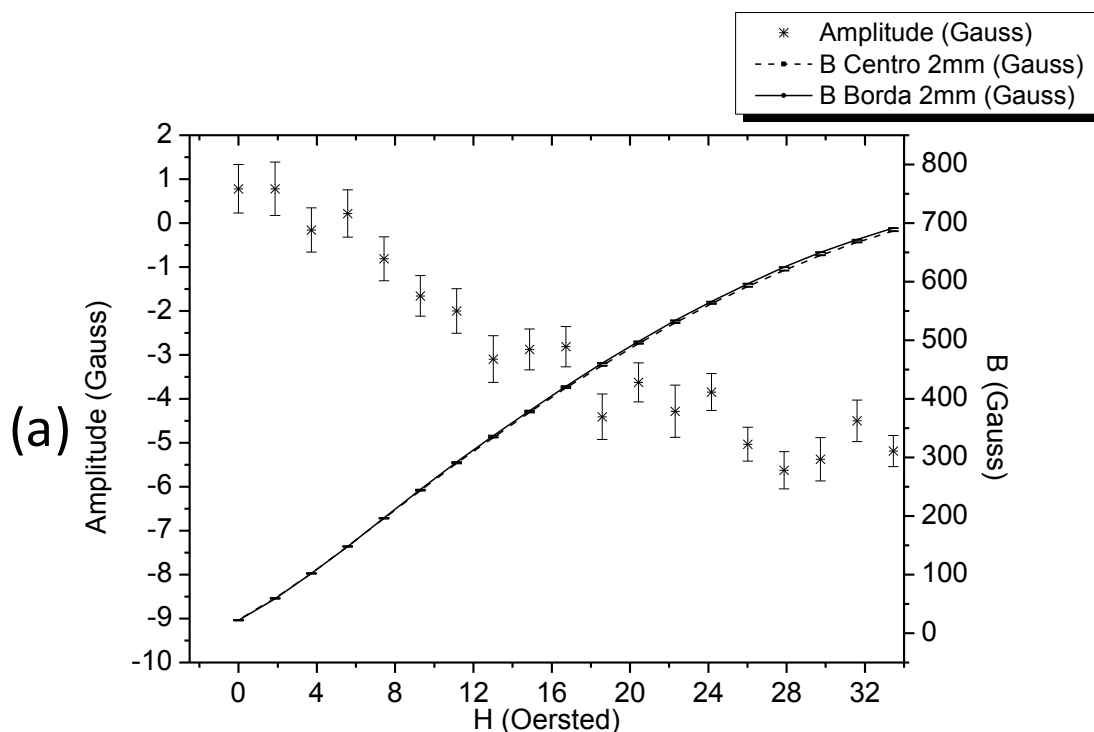
Material	Permeabilidade Magnética (adimensional)
Aço SAE 1045	4,5588
Alumínio ASTM 6261	1,0124
Ar	1,1257

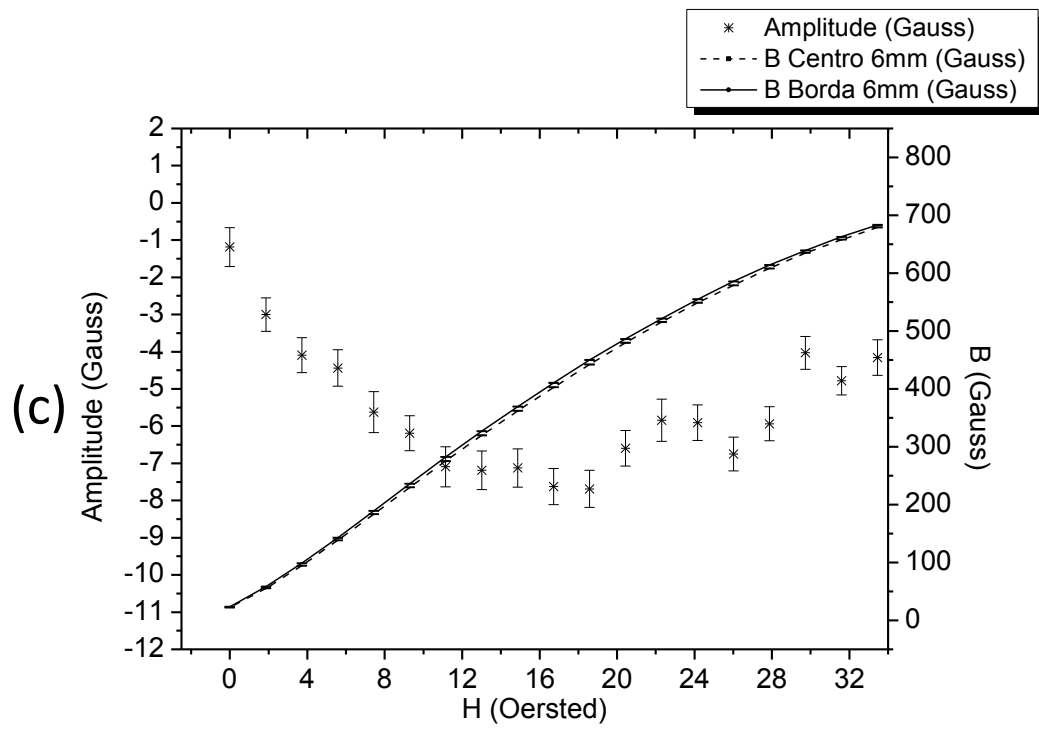
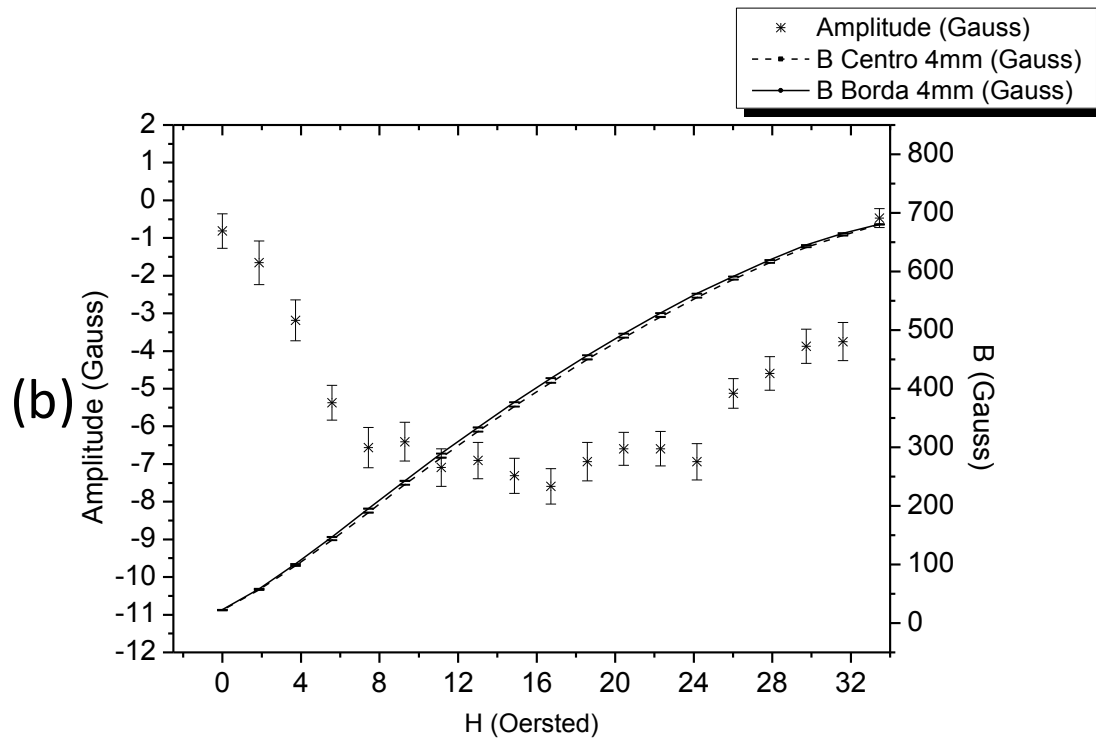
O valor da permeabilidade magnética encontrado para o alumínio confirma que o mesmo se comportou de acordo com a literatura, ou seja, teve um comportamento esperado para um material paramagnético, com baixa permeabilidade magnética

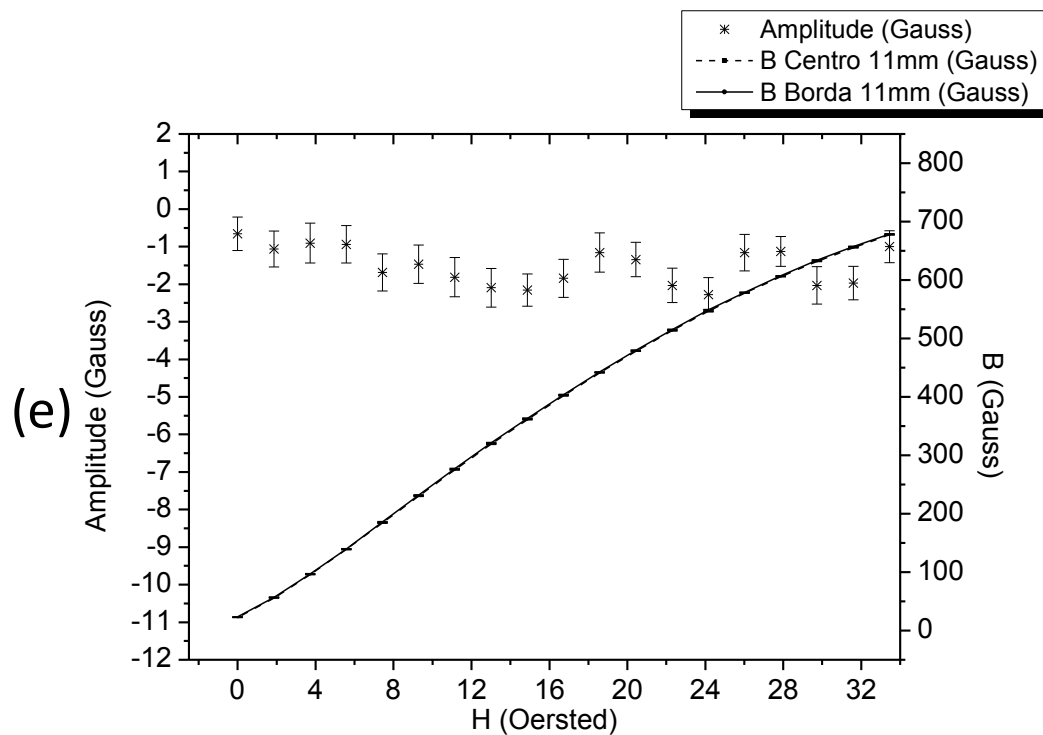
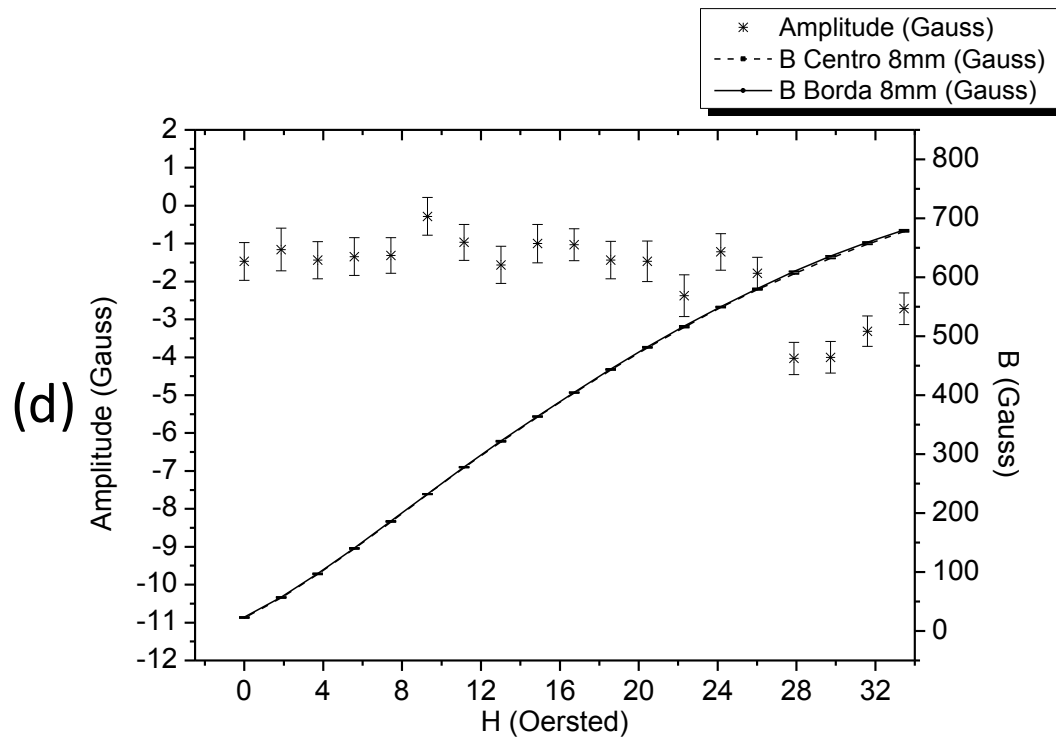
próxima a do ar. Também pôde ser observado que a permeabilidade do ar foi ligeiramente superior à do alumínio, o que explica o motivo dos valores de B na proximidade da borda terem sido maiores, pois nessa região há uma maior massa de ar interagindo com o sensor Hall.

Como ocorreu com o aço, para o alumínio também houve variações de B entre o centro e a proximidade da borda das amostras, motivo pelo qual foram determinados os valores de H e espessura ótimos. Seguindo-se o mesmo procedimento utilizado para o aço determinou-se os valores de amplitude da medição, conforme apresentados na figura 4.11. No eixo das abscissas são apresentados os valores de H . No eixo das ordenadas à esquerda são apresentados os valores das amplitudes e no eixo das ordenadas à direita são apresentados os valores de B .

Figura 4.11 - Curvas de magnetização e amplitude do alumínio ASTM 6261, sendo: (a) espessura de 2 mm; (b) espessura de 4 mm; (c) espessura de 6 mm; (d) espessura de 8 mm; (e) espessura de 11 mm







Da análise da figura 4.11 pode-se verificar que, da mesma forma como ocorreu para o aço, tanto a espessura das amostras como os valores de H aplicados influenciaram nos valores de amplitude. A amostra de menor espessura (2 mm), figura 4.11(a), por exemplo, quando submetida ao valor de H máximo ($H = 33,5$ Oe) produziu

um valor de amplitude de 5 Gauss. Já a amostra de maior espessura (11 mm), figura 4.11(e), para este mesmo valor de H produziu uma amplitude de apenas 1 Gauss. Esses valores de amplitude representaram, em termos absolutos, o maior e o menor valor encontrado para as diversas espessuras estudadas, quando submetidas ao valor de H máximo aplicável. A amostra que obteve menores valores de amplitude, em termos absolutos, foi a de 11 mm de espessura, com seus valores, na maioria dos casos, variando dentro da margem de erro estatístico. Dessa forma pode-se concluir que o valor de espessura ótimo é de 11 mm, tendo sido convencionado o valor de H de 14.9 Oe como o valor ótimo devido à maioria dos valores de amplitude variado dentro da margem de erro estatístico. Isso possibilitará que se use o mesmo valor de H para o aço e para o alumínio.

4.2.3 Comparativo do efeito de borda no aço e alumínio estudados

O estudo do efeito de borda mostrou ambos os materiais, um ferromagnético e o outro paramagnético, sofrem influência tanto da espessura como da geometria e que a dimensão das peças pode interferir nos valores de B. Analisando-se as figuras 4.6 e 4.7 pode-se ver que o valor de B aumentou com a espessura para o aço e reduziu para o alumínio, porém, esse efeito foi minimizado com o aumento da espessura. Já Comparando-se os valores de B obtidos entre centro e proximidade das amostras, figuras 4.6 e 4.9, pode-se concluir que o valor de B cai quando as amostras são deslocadas para uma região de proximidade de materiais que apresentem uma menor permeabilidade magnética. Como o alumínio ASTM 6261 apresentou uma permeabilidade magnética ligeiramente menor que a do Ar os valores de B caíram ao se aproximar uma maior massa de alumínio da região central do sensor Hall. Já para o caso do aço, que tem uma permeabilidade magnética mais elevada que o Ar, esse efeito de queda nos valores de B só ocorreu quando a massa de aço foi deslocada para distante do centro do sensor Hall.

Comparando-se os resultados de amplitude obtidos para as amostras de aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261, figuras 4.8 e 4.11, respectivamente, em ambos os casos, as amostras que obtiveram menores valores de amplitude, em termos absolutos, foram as amostras de 11 mm de espessura. Isso aconteceu devido a uma maior contribuição do material, já que nas amostras mais espessas a massa de material é maior.

Pelos resultados obtidos pode-se dizer que mesmo o aço e o alumínio tendo características magnéticas diferentes, sendo um ferromagnético e outro paramagnético, foi possível se determinar os valores de H e espessura ótimos a serem utilizados nos estudos da influência do diâmetro (amostras Tipo2) e do formato das amostras (amostras Tipo3), tendo os valores de H e espessura ótimos sido considerados os mesmos para ambos os casos, ou seja, 14,9 Oe e 11 mm, respectivamente.

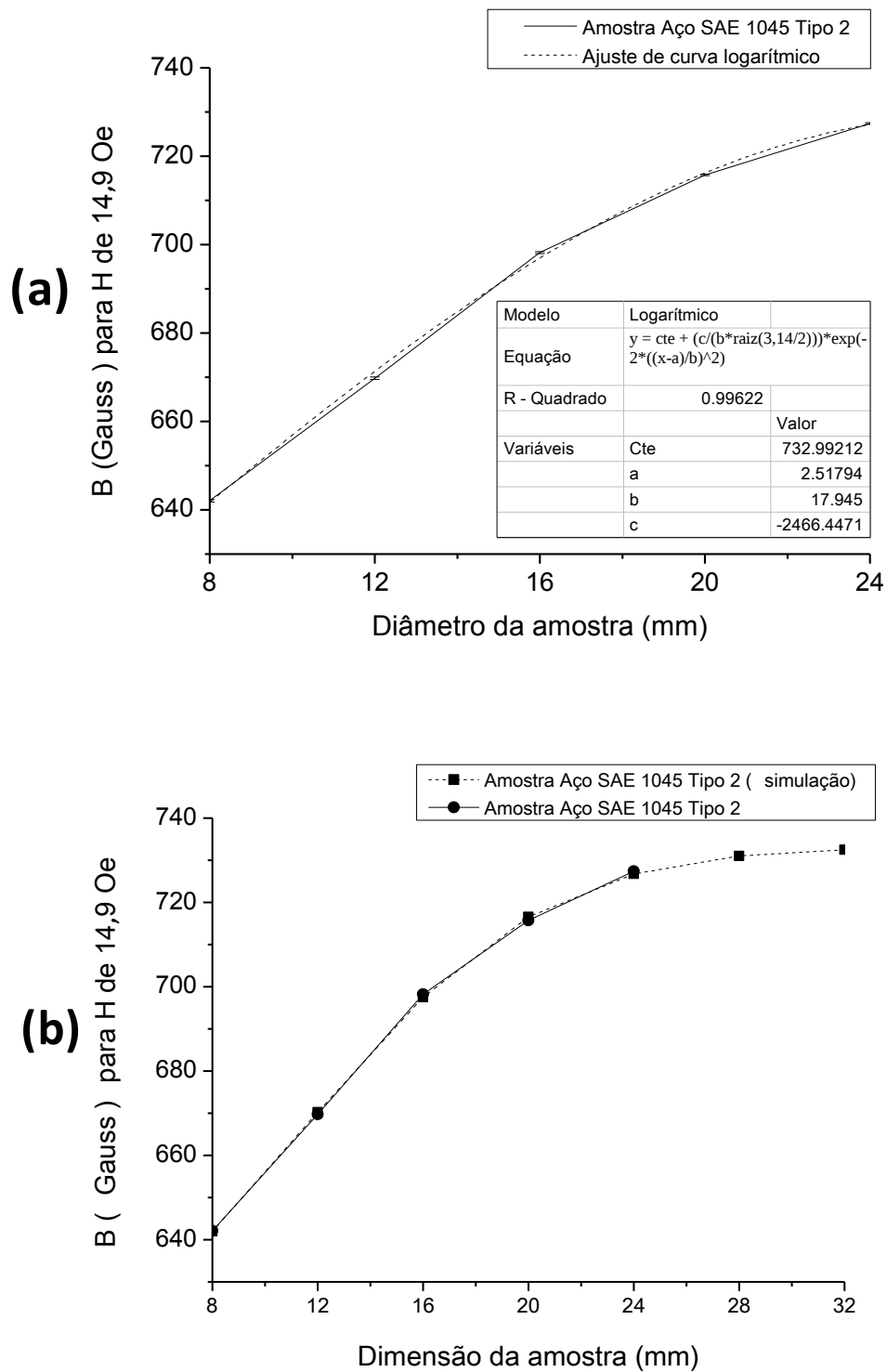
4.3 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE DIÂMETRO DAS AMOSTRAS ($\varnothing$)

O Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra foi realizado utilizando-se amostras do Tipo2 ($\varnothing$ 24 mm, $\varnothing$ 20 mm, $\varnothing$ 16 mm, $\varnothing$ 12 mm e $\varnothing$ 8 mm e espessura de 11 mm) para ambos os materiais. Foi aplicado no centro das amostras o valor de H ótimo calculado na seção 4.2 (14,9 Oe) e foram medidos os valores de B induzidos. Como resposta foi determinada a influência do diâmetro das amostras nos valores de B de maneira a se determinar qual o diâmetro mínimo a partir do qual o mesmo passa a não mais interferir nos valores de B e como se pode realizar estudos comparativos utilizando materiais de diferentes diâmetros.

4.3.1 Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra ($\varnothing$) para o aço SAE 1045

O estudo da influência da variação de diâmetro para o aço SAE 1045 é apresentado na figura 4.12. Na figura 4.12(a) são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, o ajuste realizado a partir desses resultados e a equação representativa desse ajuste. Na figura 4.12(b) são comparados os resultados obtidos experimentalmente e os resultados simulados extrapolando-se os valores de espessura até 32 mm. No eixo das abscissas são apresentados os diâmetros das amostras que foram submetidas ao valor de H ótimo de 14,9 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada um dos diâmetros analisados.

Figura 4.12 - Valores de B para diferentes valores de ϕ das amostras Tipo2 do aço SAE 1045



Da análise da figura 4.12(a) pode-se verificar que os valores de B aumentaram com o aumento da dimensão da amostra (diâmetro). Pode-se ainda verificar que para as amostras com ϕ de até 16 mm essa variação foi linear, não havendo alterações na

inclinação da curva. Continuando o aumento do diâmetro, B tendeu a se estabilizar, podendo-se observar uma diminuição da inclinação da curva, o que indica que B se tornará independente do diâmetro, com o aumento deste. A simulação apresentada na figura 4.12(b), realizada a partir da equação da curva de ajuste traçada na figura 4.12(a), extrapolada para os diâmetros de 28 mm e 32 mm, mostra que os valores de B simulados encontram-se dentro da margem de erro estatística obtida para um valor de diâmetro de até 32 mm, o que indica haver estabilização dos valores de B a partir de determinada dimensão, já que equação simulada representa com boa aproximação o comportamento característico da influência do diâmetro da amostra, sendo essa dimensão o diâmetro de 28 mm. Já amostras com diâmetros abaixo desse valor, onde seu valor influencia nos valores de B se faz necessária a realização da correção do diâmetro utilizando a equação 4.3 para o aço SAE 1045.

$$B = 732,99212 + \left(\frac{-2466,4471}{17,945 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{(-2 \times \left(\frac{D-2,51794}{17,945} \right)^2)} \quad (4.3)$$

Onde:

B = Campo magnético induzido (Gauss);

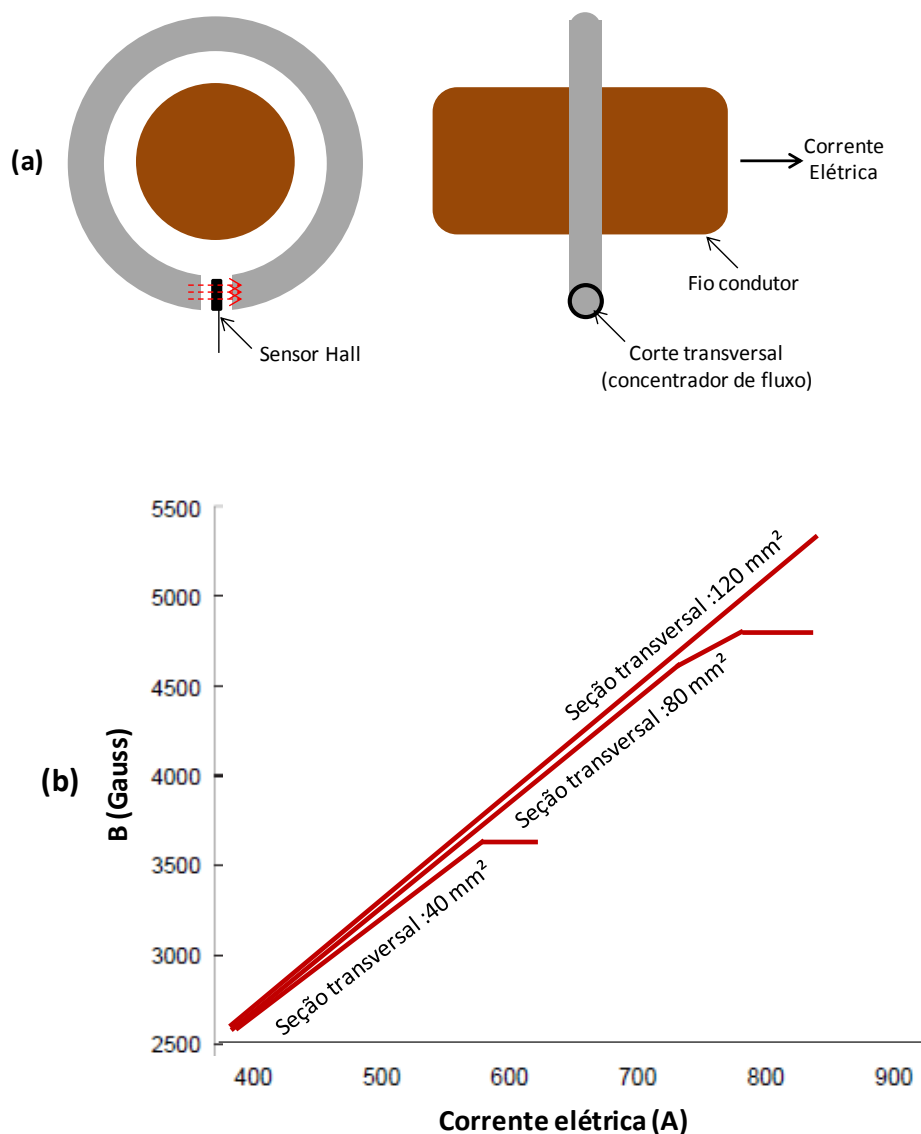
D = Diâmetro da amostra (mm).

A equação 4.3 deve ser utilizada para se fazer a correção do diâmetro no intervalo onde B é dependente de seu valor. Durante a realização de END o material deve ter seu diâmetro medido e o valor de B calculado utilizando a equação. O valor de B deve então ser medido experimentalmente e comparado com o valor teórico calculado. Caso esses valores apresentem resultados diferentes a existência da anomalia que se busca acompanhar deve ser considerada.

A estabilização de B com o diâmetro se encontra em consonância com a literatura. Uma configuração similar à adotada nesta pesquisa tem sido proposta por fabricantes de sensores Hall (Gillet et al, 2014). Essa configuração consiste em se colocar após o sensor Hall um concentrador de fluxo magnético de aço carbono como forma de amplificar o campo magnético resultante, fazendo-se variar o diâmetro desse concentrador até que a maximização de B desejada seja alcançada. Na figura 4.13(a) é

apresentada uma configuração proposta por um fabricante. Já a figura 4.13(b) apresenta os valores de B obtidos com a variação do diâmetro do concentrador.

Figura 4.13 - Montagem de concentrador de fluxo magnético para amplificação dos valores de B. (a) esquema de posicionamento; (b) Curva B x Diâmetro do concentrador (adaptado de Gillet et al, 2014)



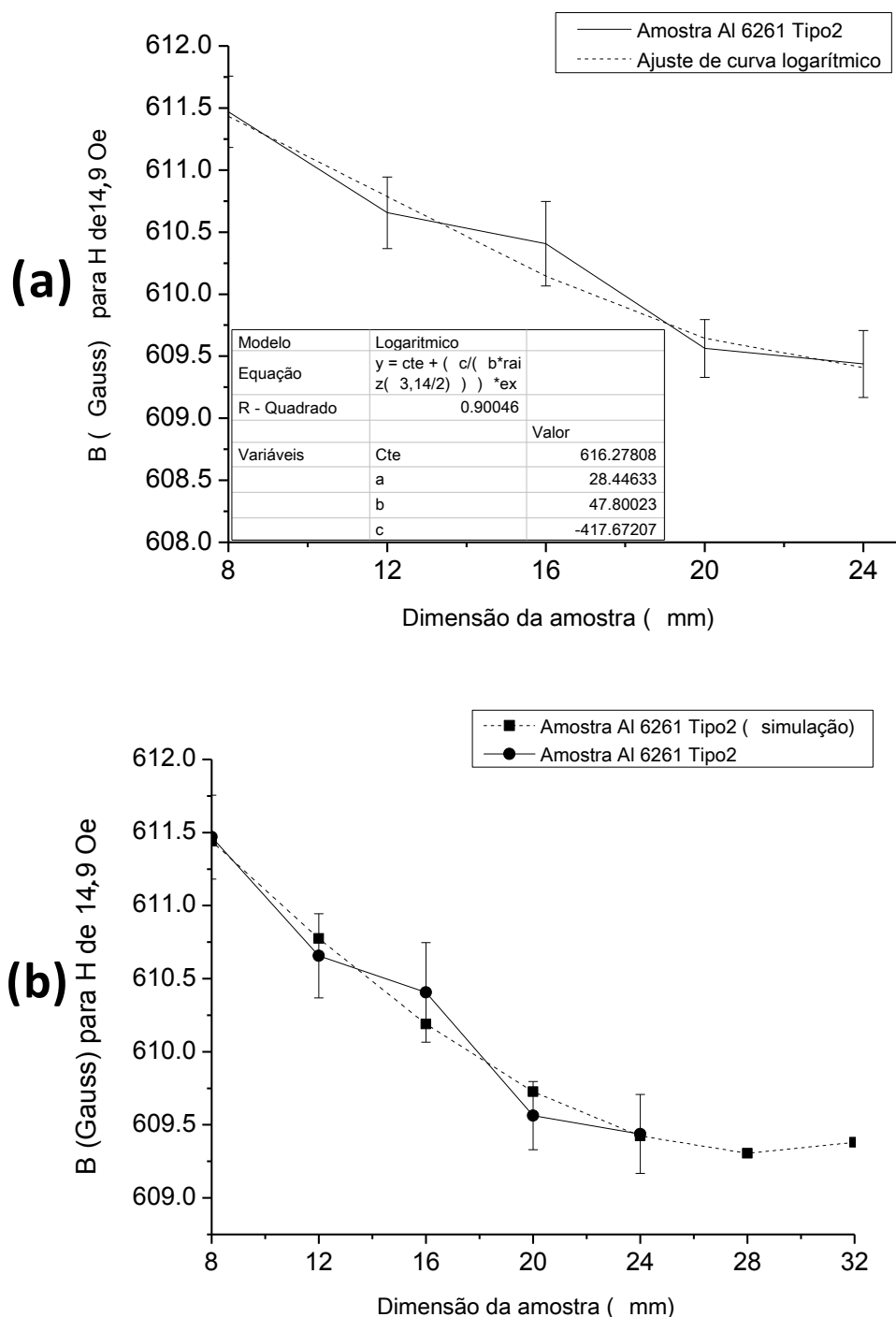
Da análise da figura 4.13(a) pode-se ver que a configuração de posicionamento do concentrador de fluxo magnético é similar à configuração de posicionamento do sensor Hall proposta nessa pesquisa. O fio condutor será responsável por gerar o campo magnético. Um dos lados do concentrador de fluxo magnético terá a função de direcionar o campo magnético na direção correta. O outro lado do concentrador reduzirá a relutância magnética do ar, amplificando ainda mais o campo magnético gerado.

Da análise das figuras 4.13(b) pode-se ver que a variação da área do concentrador de fluxo magnético fez variar os valores de B. O aumento da área do concentrador fez o valor de B aumentar até um determinado valor, havendo uma tendência de redução no crescimento dos valores de B com o aumento da área, o que está em consonância com os valores obtidos no gráfico de B x Diâmetro da amostra para o aço SAE 1045 estudado, conforme resultados apresentados na figura 4.12.

4.3.2 Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra ($\varnothing$) para o alumínio ASTM 6261

O estudo da influência da variação de diâmetro para o alumínio ASTM 6261 é apresentado na figura 4.14. Na figura 4.14(a) são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, o ajuste realizado a partir desses resultados e a equação representativa deste ajuste. Na figura 4.14(b) são comparados os resultados obtidos experimentalmente e os resultados simulados extrapolando-se os valores de espessura até 32 mm. No eixo das abscissas são apresentados os diâmetros das amostras que foram submetidas ao valor de H ótimo de 14,9 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada um dos diâmetros analisados.

Figura 4.14 - Valores de B para diferentes valores de ϕ de amostras Tipo2 do alumínio ASTM 6261



Da análise da figura 4.14(a) pode-se verificar que os valores de B diminuíram com o aumento do diâmetro. Pode-se ainda verificar que para as amostras com ϕ de até 16 mm essa variação foi linear. Já a partir da dimensão de 20 mm os valores de B

tenderam a se estabilizar, havendo alterações na inclinação da curva dentro da margem de erro estatística. A simulação apresentada na figura 4.14(b), realizada a partir da equação da curva de ajuste traçada na figura 4.14(a), extrapolada para as espessuras de 28 mm e 32 mm mostra que os valores de B simulados encontram-se dentro da margem de erro estatística obtida para um valor de diâmetro de até 32 mm, o que indica haver estabilização dos valores de B a partir de determinada dimensão, já que equação simulada representa com boa aproximação o comportamento característico da influência do diâmetro da amostra para o aço, sendo essa dimensão o diâmetro de 20 mm para o alumínio. Já amostras com diâmetros abaixo desse valor, onde seu valor influencia nos valores de B se faz necessária a realização da correção da do diâmetro utilizando a equação 4.4 para o alumínio ASTM 6261.

$$B = 616,27808 + \left(\frac{-417,67207}{47,80023 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{(-2 \times \left(\frac{D-28,44633}{47,80023} \right)^2)} \quad (4.4)$$

Onde:

B = Campo magnético induzido (Gauss);

D = Diâmetro da amostra (mm).

A equação 4.4 deve ser utilizada para se fazer a correção do diâmetro no intervalo onde B é dependente de seu valor. Durante a realização de END o material deve ter seu diâmetro medido e o valor de B calculado utilizando a equação. O valor de B deve então ser medido experimentalmente e comparado com o valor teórico calculado. Caso esses valores apresentem resultados diferentes a existência da anomalia que se busca acompanhar deve ser considerada.

4.3.3 Comparativo da influência da variação de diâmetro da amostra ($\emptyset$) para o aço e o alumínio

Comparando-se as curvas B x $\emptyset$ para o aço SAE 1045 e o alumínio ASTM 6261, figuras 4.12 e 4.14, respectivamente, pode-se observar que em ambos os casos B variou com $\emptyset$. Os valores de B aumentaram para o aço e reduziram para o alumínio com o aumento do diâmetro. Também foi possível verificar que em ambos os casos B passou a

ser independente do diâmetro, a partir de um determinado valor, sendo esse valor o diâmetro de 28 mm para o aço e 20 mm para o alumínio. Essa estabilização com um menor diâmetro no caso do alumínio se deu devido sua menor permeabilidade magnética comparada à do aço, o que limitou a capacidade de concentração das linhas de fluxo magnético com o diâmetro, antecipando esse efeito.

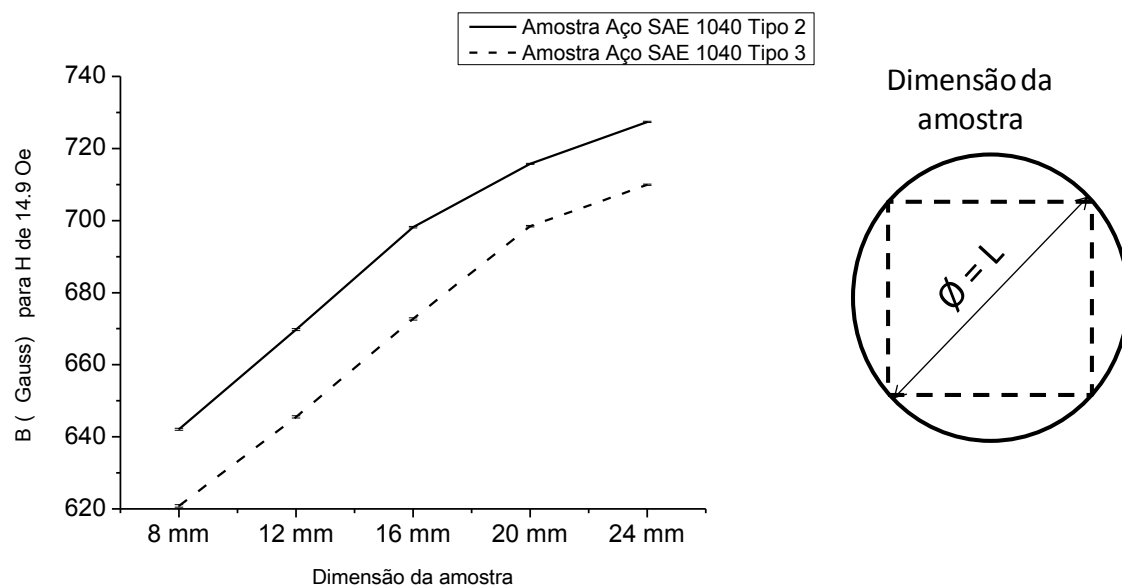
4.4 ESTUDO DO FORMATO DA SEÇÃO LONGITUDINAL DA AMOSTRA

O Estudo do formato da seção longitudinal da amostra foi realizado utilizando-se amostras do Tipo3 (L 24 mm, L 20 mm, L 16 mm, L 12 mm e L 8 mm e espessura X de 11 mm) para ambos os materiais, onde L representa a diagonal do quadrado formado pela seção longitudinal das amostras. Foi aplicado no centro das amostras o valor de H ótimo de 14,9 Oe e foram medidos os valores de B induzidos. Em seguida foram traçados os gráficos de B x L junto com os de B x ϕ (figura 4.15). Como resposta foi determinada a influência do formato da seção longitudinal das amostras nos valores de B para que saiba se é possível realizar estudos comparativos utilizando-se amostras de um mesmo material com diferentes formatos de seções longitudinais.

4.4.1 Estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o aço SAE 1045

O estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o aço SAE 1045 é apresentado na figura 4.15. A curva com linha sólida representa o comportamento para as amostras Tipo2 (ϕ 24 mm, ϕ 20 mm, ϕ 16 mm, ϕ 12 mm e ϕ 8 mm e espessura de 11 mm). A curva com linha tracejada representa o comportamento para as amostras Tipo3 (L 24 mm, L 20 mm, L 16 mm, L 12 mm e L 8 mm e espessura de 11 mm). No eixo das abscissas são apresentadas as dimensões das amostras que foram submetidas ao valor de H ótimo de 14,9 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada uma das dimensões analisadas.

Figura 4.15 - Valores $B \times \phi$ para amostras Tipo2 e $B \times L$ para amostras Tipo3 do aço SAE 1045

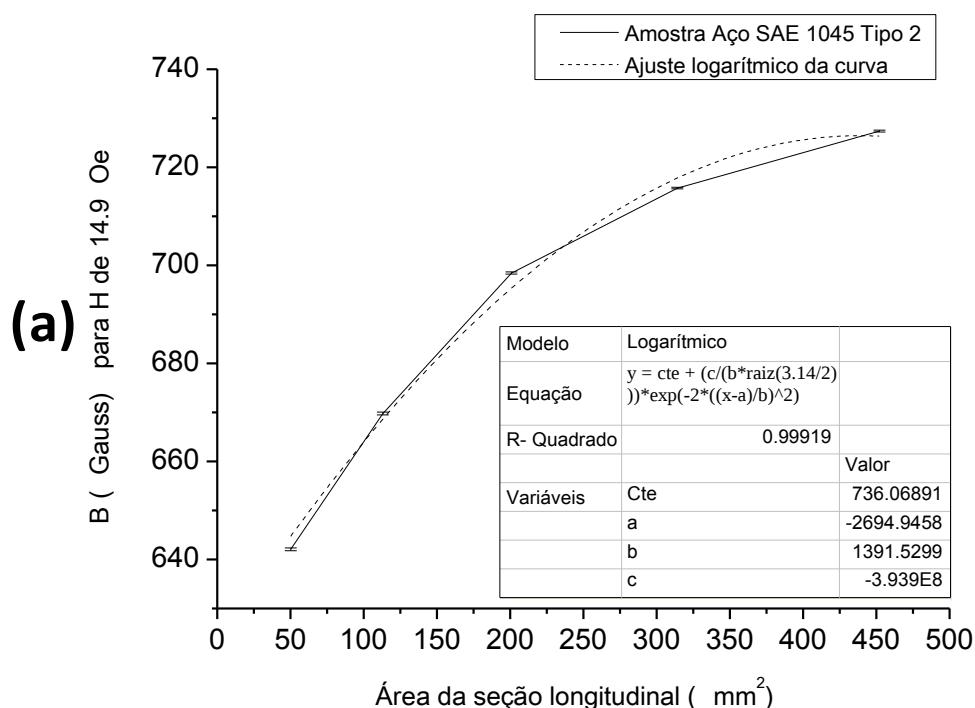


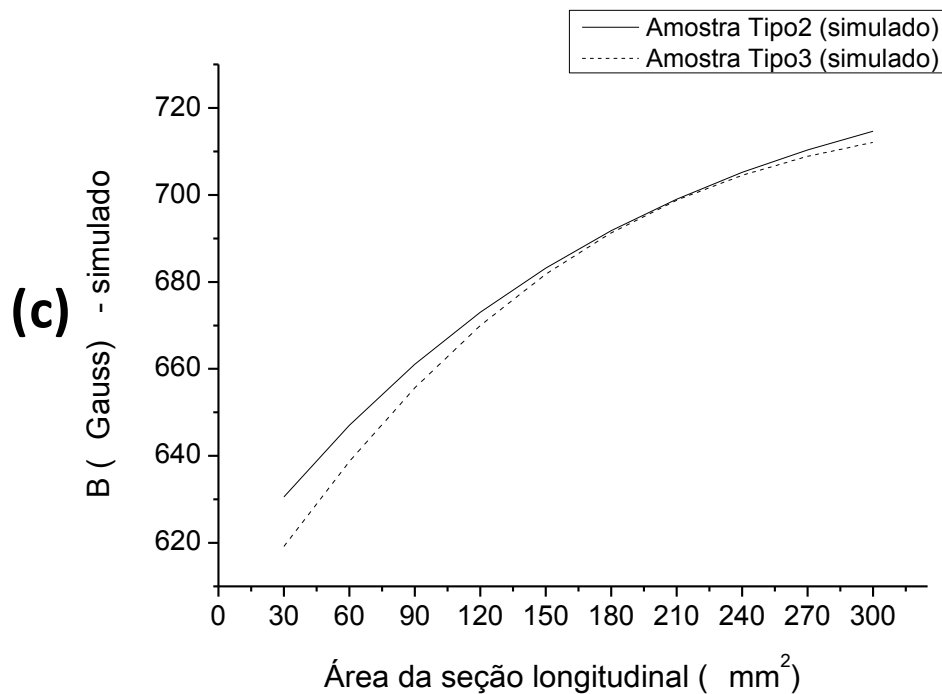
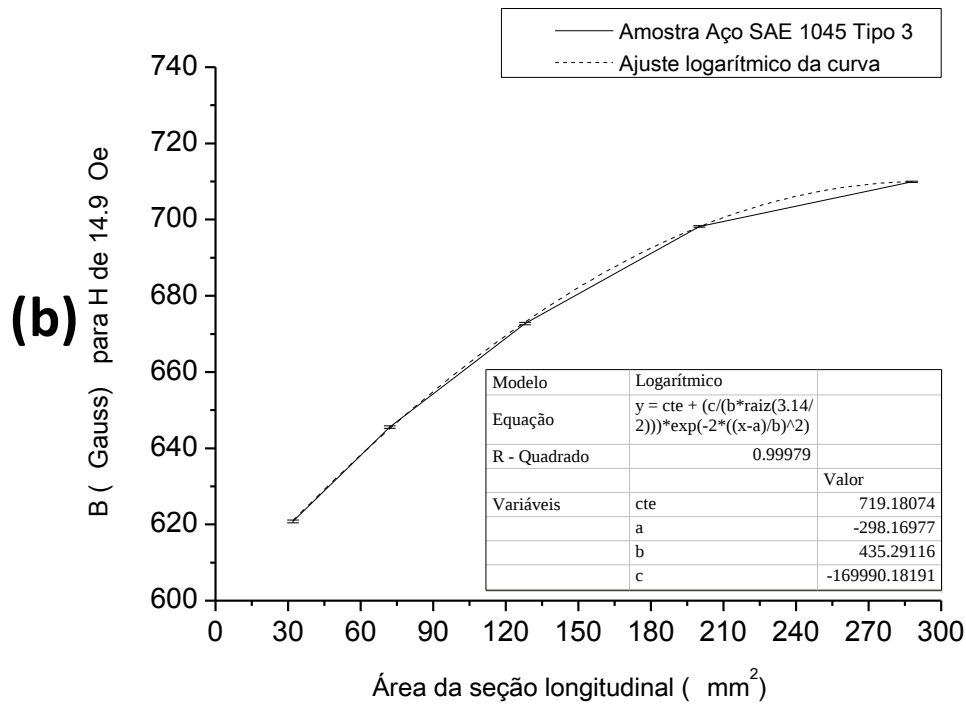
A figura 4.15 apresenta uma comparação da variação do valor de B com a variação do formato da seção longitudinal das amostras. Foram utilizadas amostras de formato circular e amostras quadradas. As curvas obtidas apresentaram um perfil similar. Pode-se verificar que B também aumentou com o aumento da dimensão para as amostras de seção longitudinal quadrada, porém, os resultados de B sempre foram menores para uma amostra quadrada de mesma dimensão que uma circular, comparando-se a diagonal da seção quadrada (L) com um diâmetro da seção circular (ϕ) de mesmo valor. Também pode-se verificar que para ambos os formatos das amostras, para dimensões de até 16 mm a variação de B foi linear, não havendo alterações na inclinação da curva fora da margem de erro estatístico. A partir desse valor B aumentou menos, podendo-se observar uma redução na inclinação da curva, o que indica que B se tornará independente também a partir de uma determinada dimensão longitudinal, com o aumento desta.

As dimensões das amostras comparadas foram o diâmetro das amostras Tipo2 e a diagonal do quadrado das amostras Tipo3, portanto, para se entender se há alguma influência da quantidade de massa de material nos valores de B obtidos, já que a área da seção longitudinal de amostras de um mesmo valor de ϕ e L são diferentes, sendo a área da seção longitudinal de uma amostra Tipo2 maior que a de uma amostra Tipo3, um

gráfico relacionando a área da seção longitudinal com os valores de B obtidos foi construído convertendo-se ($\varnothing$) e (L) em valores de área e é apresentado na figura 4.16. Na figura 4.16(a) são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, o ajuste realizado a partir desses resultados e a equação representativa desse ajuste para as amostras Tipo2. Na figura 4.16(b) são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, o ajuste realizado a partir desses resultados e a equação representativa desse ajuste para as amostras Tipo3. Na figura 4.16(c) são comparadas as curvas simuladas de B x área da seção longitudinal par as amostras Tipo2 e Tipo3 extrapolando-se os valores de área até 300 mm² ($\varnothing=19,5$ mm e L=24,5 mm). No eixo das abscissas são apresentadas as áreas das amostras que foram submetidas ao valor de H ótimo de 14,9 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada área da seção longitudinal.

Figura 4.16 - Valores de B para diferentes valores de áreas da seção longitudinal de amostras do Tipo2 (a) e Tipo3 (b) e simulados (c) do aço SAE 1045





As curvas das figuras 4.16(a) e 4.16(b) mostram que tanto as amostras Tipo2 como Tipo3 apresentaram curvas características semelhantes. As equações representativas dessas curvas também são similares, mudando apenas os valores de suas variáveis conforme pode ser visto nas equações 4.5 e 4.6. A equação 4.5 representa o

comportamento de B com a variação da área de amostras de seção longitudinal do Tipo2. A equação 4.6 representa o comportamento de B com a variação da área de amostras de seção longitudinal do Tipo3.

$$B = 736,06891 + \left(\frac{-3,939E8}{1391,52996 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{(-2 \times \left(\frac{A+2694,94588}{1391,52996} \right)^2)} \quad (4.5)$$

$$B = 719,18074 + \left(\frac{-169990,1819}{435,29116 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{(-2 \times \left(\frac{A+298,16977}{435,29116} \right)^2)} \quad (4.6)$$

Onde:

B = Campo magnético induzido (Gauss);

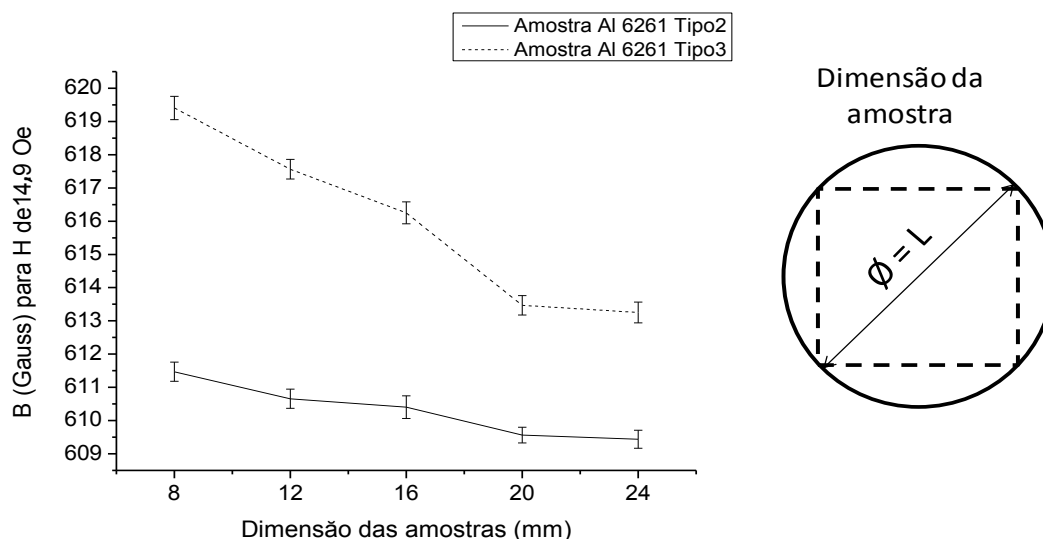
A = Área da seção longitudinal da amostra (mm).

A simulação apresentada na figura 4.16(c), realizada a partir das equações das curvas de ajuste traçadas nas figuras 4.16(a) e 4.16(b), extrapolada para áreas de até 300 mm² (ø=19,5 mm e L=24,5 mm) mostra que mesmo comparando-se as variações nos valores de B com relação à área, as amostras do Tipo3 continuam induzindo campos menores, porém mais próximos dos obtidos nas amostras Tipo2, o que indica que dois efeitos estão presentes, sendo à quantidade de massa um desses e a variação no formato da seção longitudinal o outro.

4.4.2 Estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o alumínio ASTM 6261

O estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o alumínio ASTM 6261 é apresentado na figura 4.17. A curva com linha sólida representa o comportamento para as amostras Tipo2 (ø 24 mm, ø 20 mm, ø 16 mm, ø 12 mm e ø 8 mm e espessura X de 11 mm). A curva com linha tracejada representa o comportamento para as amostras Tipo3 (L 24 mm, L 20 mm, L 16 mm, L 12 mm e L 8 mm e espessura X de 11 mm). No eixo das abscissas são apresentadas as dimensões das amostras que foram submetidas ao valor de H ótimo de 14,9 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada uma das dimensões analisadas.

Figura 4.17 - Valores $B \times \emptyset$ para amostras Tipo2 e $B \times L$ para amostras Tipo3 do alumínio ASTM 6261

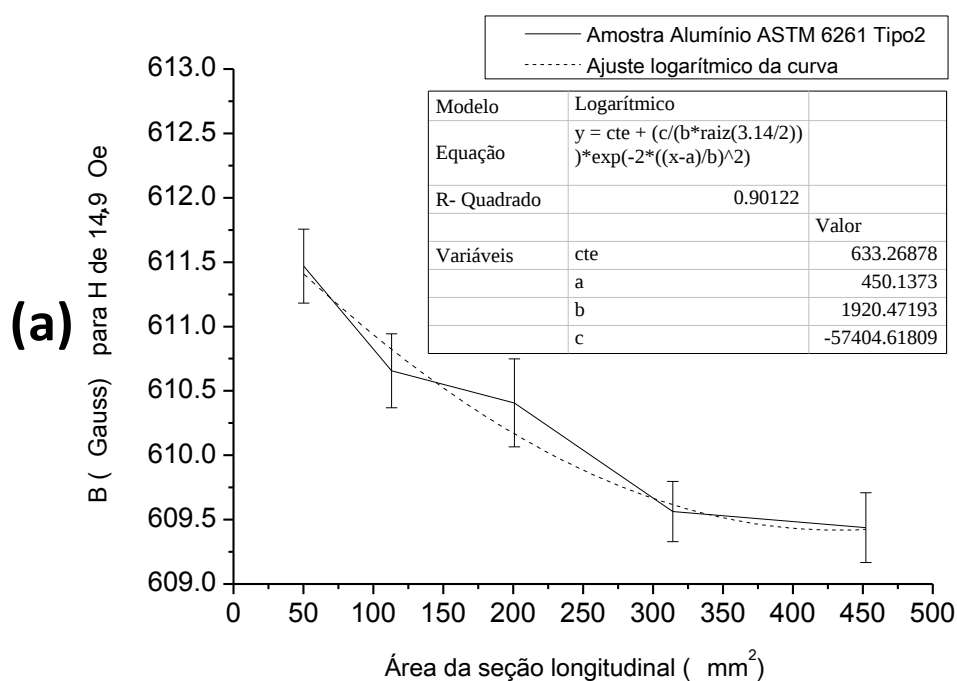


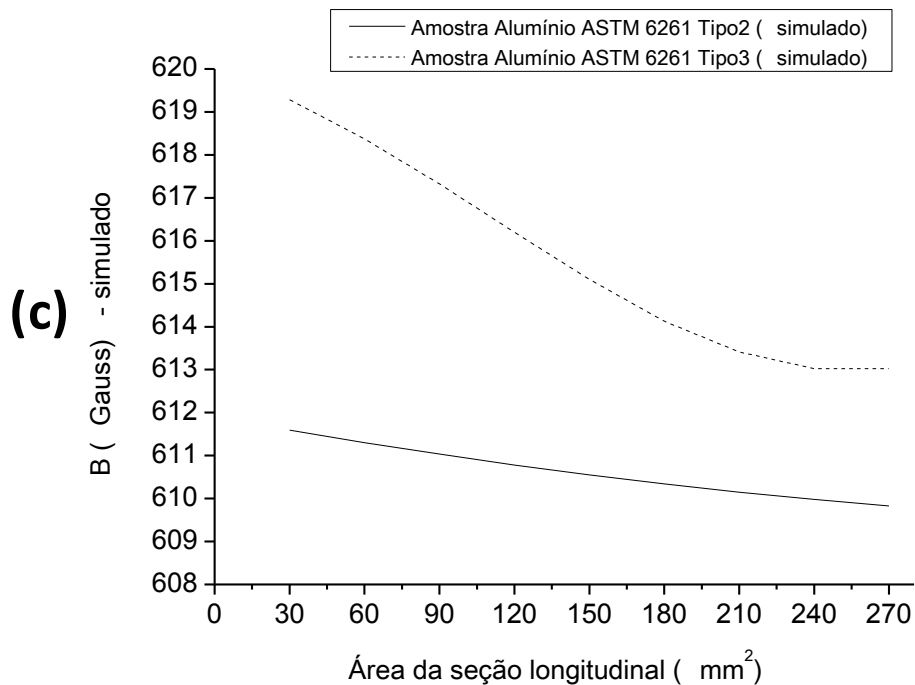
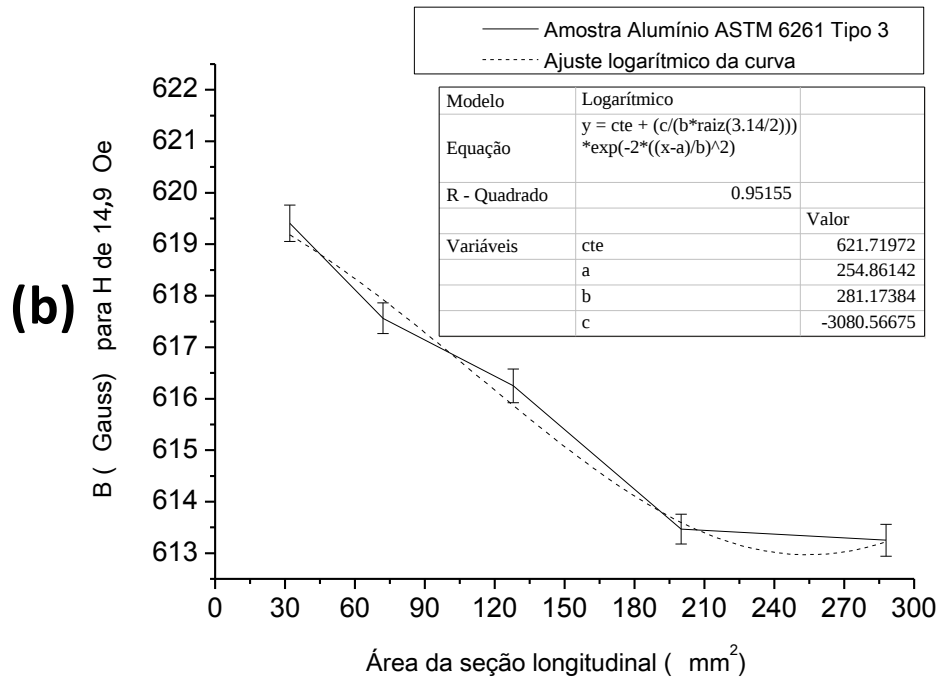
As curvas de $B \times \emptyset$ para as amostras Tipo2 e $B \times L$ para as amostras Tipo3 apresentadas na figura 4.17 tiveram um perfil similar. Pode-se verificar que B diminuiu com o aumento da dimensão das amostras, porém, diferentemente do que aconteceu no aço, os resultados de B sempre foram maiores para uma amostra quadrada de mesma dimensão de uma circular, comparando-se a diagonal da seção quadrada (L) com o diâmetro da seção circular ($\emptyset$) de mesmo valor. Pode-se ainda verificar que em ambos os tipos de amostras, para dimensões de até 16 mm a variação de B foi linear, não havendo alterações na inclinação da curva. A partir desse valor B aumentou menos, podendo-se observar uma redução na inclinação da curva, o que indica que B também se tornará independente a partir de uma determinada dimensão longitudinal, com o aumento desta. Os valores de B para as dimensões de 20 mm e 24 mm variaram dentro da margem de erro estatístico, do que se pode concluir que B se tornou independente a partir da dimensão das amostras de 20 mm, tanto para as amostras Tipo2 como para as amostras Tipo3.

Como no estudo realizado para o aço, as dimensões das amostras comparadas foram o diâmetro das amostras Tipo2 e a diagonal do quadrado das amostras Tipo3, portanto, para se entender se há alguma influência da quantidade de massa de material nos valores de B obtidos, já que a área da seção longitudinal de amostras de um mesmo valor de $\emptyset$ e L são diferentes, sendo a área da seção longitudinal de uma amostra Tipo2 maior que a de uma amostra Tipo3, um gráfico relacionando a área da seção

longitudinal com os valores de B obtidos foi construído convertendo-se (ϕ) e (L) em valores de área e é apresentado na figura 4.18. Na figura 4.18(a) são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, o ajuste realizado a partir desses resultados e a equação representativa desse ajuste para as amostras Tipo2. Na figura 4.18(b) são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, o ajuste realizado a partir desses resultados e a equação representativa desse ajuste para as amostras Tipo3. Na figura 4.18(c) são comparadas as curvas simuladas de B x área da seção longitudinal par as amostras Tipo2 e Tipo3 extrapolando-se os valores de área até 270 mm² ($\phi=16,4$ mm e L=23,3 mm). No eixo das abscissas são apresentadas as áreas das amostras que foram submetidas ao valor de H ótimo de 14,9 Oe. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada área da seção longitudinal.

Figura 4.18 - Valores de B para diferentes valores de áreas da seção longitudinal de amostras do Tipo2 e Tipo3 do alumínio ASTM 6261





As curvas das figuras 4.18(a) e 4.18(b) mostram que tanto as amostras Tipo2 como Tipo3 apresentaram curvas características semelhantes. As equações representativas dessas curvas também são similares, mudando apenas os valores de suas variáveis conforme pode ser visto nas equações 4.7 e 4.8. A equação 4.7 representa o

comportamento de B com a variação da área de amostras de seção longitudinal do Tipo2. A equação 4.8 representa o comportamento de B com a variação da área de amostras de seção longitudinal do Tipo3.

$$B = 633,26878 + \left(\frac{-57404,61809}{1920,47193 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{(-2 \times \left(\frac{A-450,1373}{1920,47193} \right)^2)} \quad (4.7)$$

$$B = 621,71972 + \left(\frac{-3080,56675}{281,17384 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{(-2 \times \left(\frac{A-254,86142}{281,17384} \right)^2)} \quad (4.8)$$

Onde:

B = Campo magnético induzido (Gauss);

A = Área da seção longitudinal da amostra (mm).

Assim como no aço, as curvas das figuras 4.18(a) e 4.18(b) mostram que tanto as amostras Tipo2 como Tipo3 apresentaram curvas características semelhantes. As equações representativas dessas curvas também são similares, mudando apenas os valores de suas variáveis. A simulação apresentada na figura 4.18(c), realizada a partir das equações das curvas de ajuste traçadas nas figuras 4.18(a) e 4.18(b), extrapolada para áreas de até 270 mm² (ø=16,4 mm e L=23,3 mm) mostra que mesmo comparando-se as variações nos valores de B com relação à área, as amostras do Tipo3 continuam induzindo campos maiores, porém mais próximos dos obtidos nas amostras Tipo2, o que indica que dois efeitos estão presentes, sendo à quantidade de massa um desses e a variação no formato da seção longitudinal o outro.

4.4.3 Comparativo do estudo do formato da seção longitudinal da amostra para o aço e o alumínio

Comparando-se as curvas B x L para o aço SAE 1045 e o alumínio ASTM 6261 apresentadas nas figuras 4.15 e 4.17, respectivamente, pode-se observar que em ambos os casos B variou com L. Os valores de B aumentaram para o aço e reduziram para o alumínio com o aumento da dimensão da diagonal do quadrado. Também é possível verificar que a partir de um determinado valor B passará a ser independente do formato

da seção longitudinal para ambos os casos. Para ambos os casos, a partir do valor de L de 20 mm B sofreu uma menor influência da dimensão da amostra. Já da análise das figuras 4.16 e 4.18, pode-se ver que dois fatores influenciaram os valores de B, sendo à quantidade de massa um desses e a variação no formato da seção longitudinal o outro.

4.5 DEPENDÊNCIA ANGULAR DE B EM FUNÇÃO DE H COM A ROTAÇÃO DA AMOSTRA

O estudo de dependência angular de B em função de H com a rotação da amostra foi realizado utilizando-se amostras do Tipo1($\varnothing$ 24 mm e espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) de aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261. Foi aplicado no centro das amostras o valor de H médio de 7,43 Oe e 16,73 Oe para aço e alumínio (figuras 4.1 e 4.4), respectivamente, e foram medidos os valores de B induzidos para os ângulos de 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° e 360° . O procedimento foi repetido a 6 mm do centro das amostras (borda). Em seguida foram construídos os gráficos com os valores de B x ângulo de rotação no centro e na borda.

Vários estudos têm sido conduzidos utilizando esse mesmo procedimento proposto nesta seção para analisar possíveis comportamentos de anisotropia magnética em materiais ferromagnéticos (YONAMINE, 2002; EMURA, 2001; DA SILVA, 2004; PRAXEDES, 2012), os quais têm mostrado que suas propriedades magnéticas sofrem interferência da microestrutura e dos estados de tensão, provenientes da deformação plástica causada nos processos convencionais de fabricação. Como resposta à utilização desse procedimento buscou-se identificar uma possível dependência de B com a rotação das amostras, que existindo, pode produzir anisotropia magnética. A anisotropia magnética foi então relacionada à existência de textura metalográfica do material. Sendo constatada a existência desses fenômenos, foi confirmada a necessidade de identificação da direção de laminação em materiais deformados quando da realização de estudos comparativos relacionando campo magnético e material utilizando-se amostras diferentes de um mesmo material.

4.5.1 Estudo da dependência angular de B em função de H com a rotação da amostra para o aço SAE 1045

O comportamento obtido para as curvas de B x ângulo de rotação pode ser observado a partir da análise das figuras 4.19 até 4.23. Com linha sólida estão apresentadas as curvas obtidas no centro das amostras. Com linha tracejada estão apresentadas as curvas obtidas a 6 mm do centro das amostras (borda). No eixo das abscissas são apresentados os ângulos os quais as amostras foram rotacionadas (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° e 360°). No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada posicionamento angular.

Figura 4.19 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 2mm)

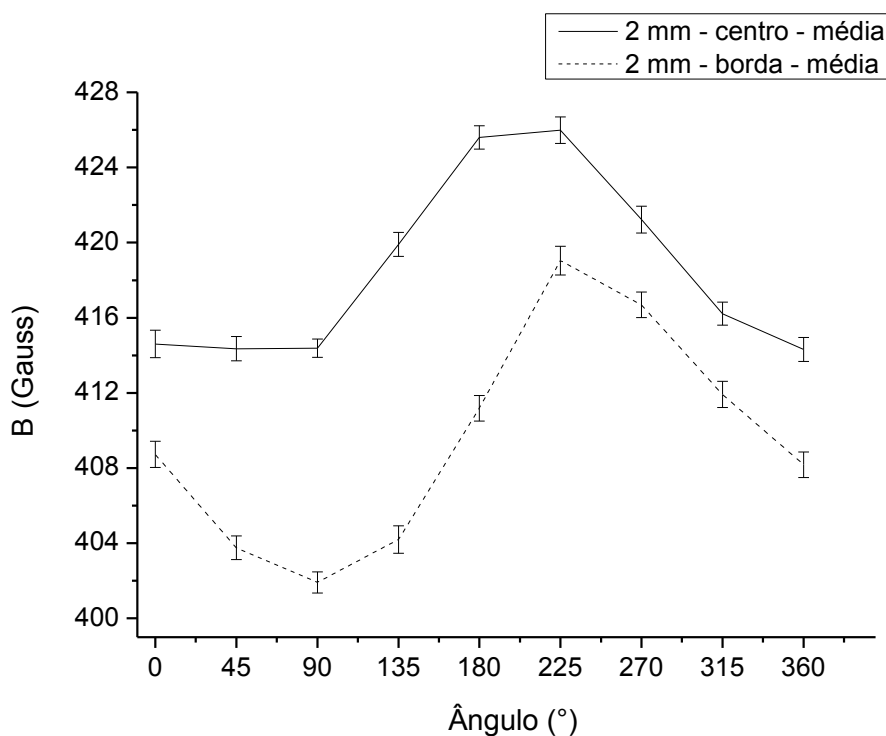


Figura 4.20 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 4mm)

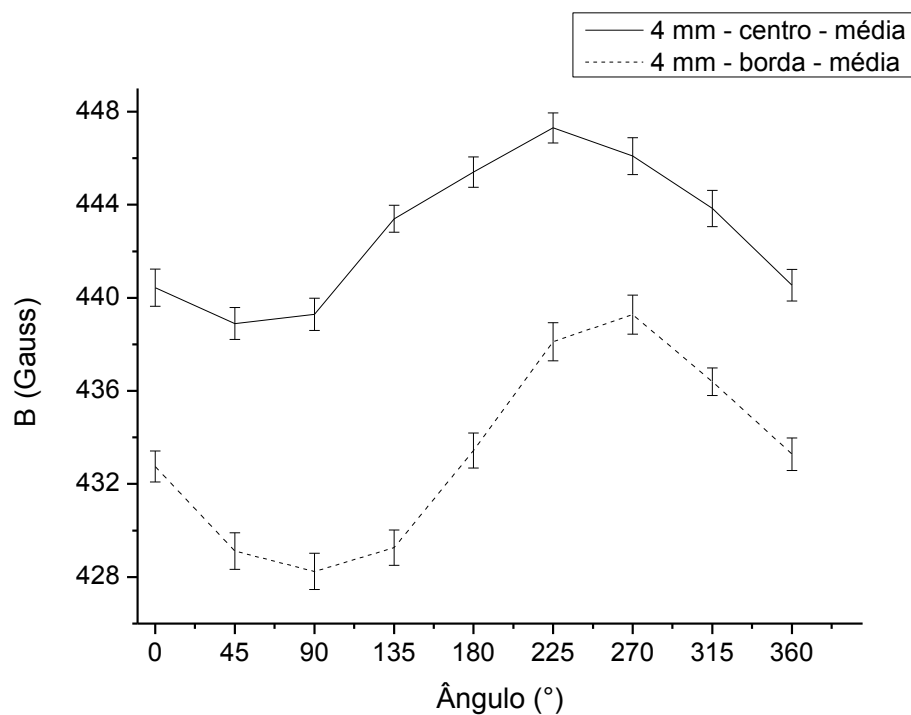


Figura 4.21 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 6mm)

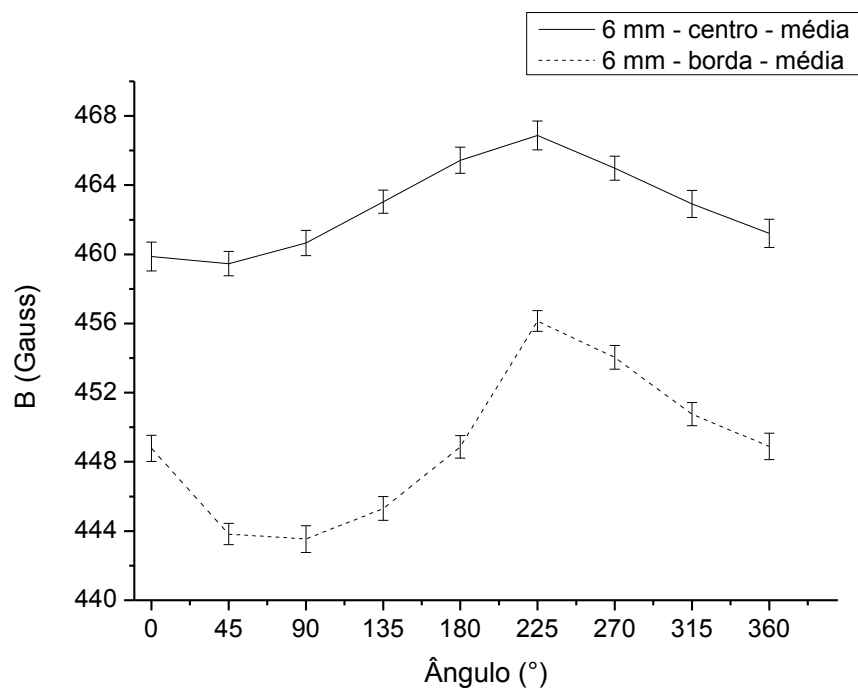


Figura 4.22 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE 1045, 8mm)

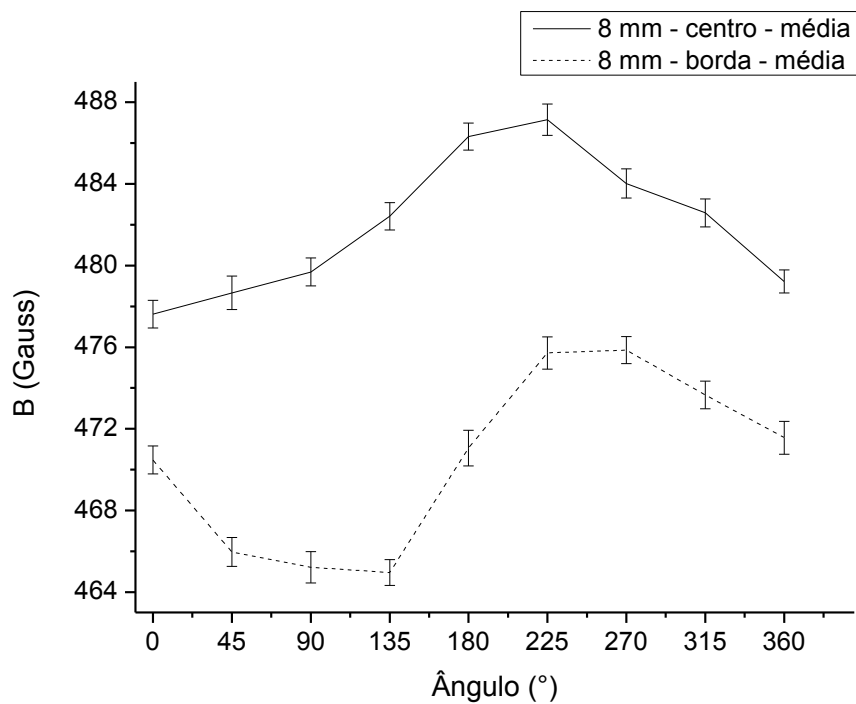
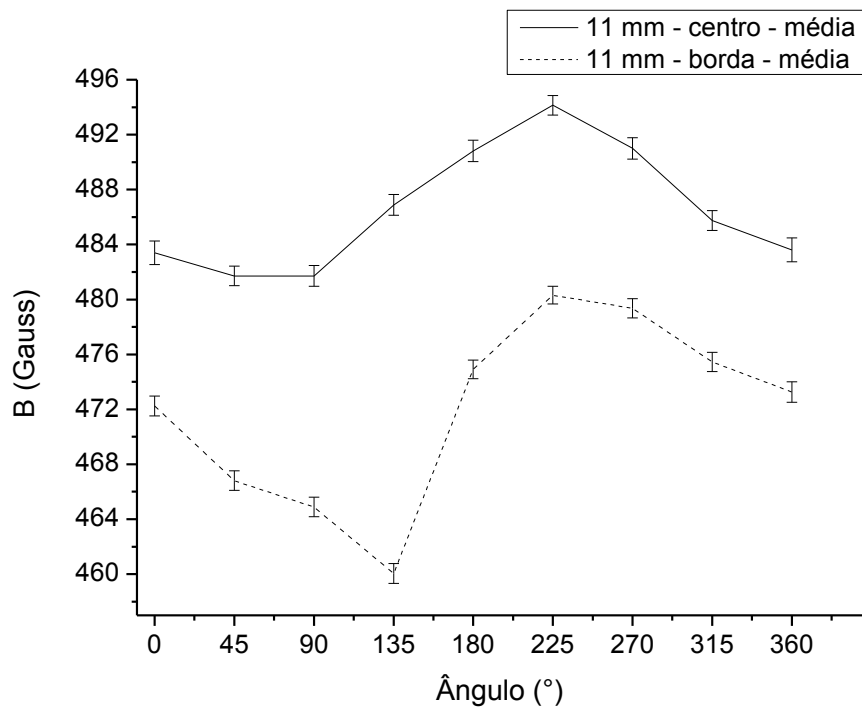


Figura 4.23 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, SAE1045, 11mm)



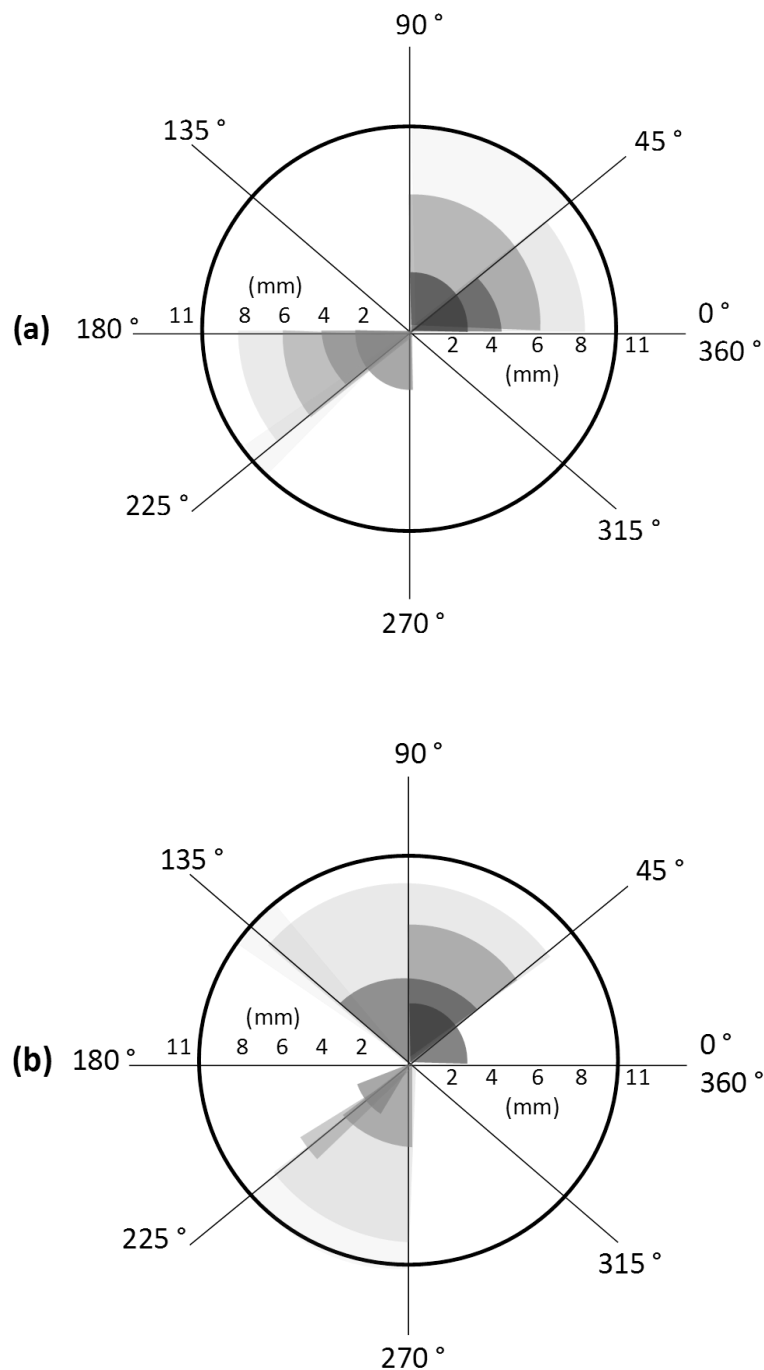
Para facilitar a discussão do comportamento magnético obtido, os intervalos dos ângulos onde foram obtidos valores de B mínimo (Bmin.) e B máximo (Bmáx.), para cada uma das espessuras das amostras Tipo1 do aço SAE 1045, estão apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Intervalo de ângulos de ocorrência de Bmin. e Bmáx. para as amostras Tipo1 de aço SAE 1045

Amostra	Centro		Borda	
	θ Bmin. (°)	θ Bmáx. (°)	θ Bmin. (°)	θ Bmáx. (°)
2 mm	0 e 90	180 e 225	90	225
4 mm	45 e 90	225 e 270	45 e 135	225 e 270
6 mm	0 e 90	180 e 225	45 e 90	225
8 mm	0 e 45	180 e 225	45 e 135	225 e 270
11 mm	45 e 90	225	135	225 e 270

Da análise da tabela 4.2 pode-se ver que no centro das amostras os valores de Bmin. ocorreram entre 0° e 90° e Bmáx. entre 180° e 270°. Já na borda os valores de Bmin. ocorreram entre 45° e 135° e Bmáx. entre 225° e 270°. Uma melhor visualização desses ângulos se torna possível pela observação da figura 4.24. Nas figuras 4.24(a) e 4.24(b) a seção longitudinal das amostras foi dividida em 8 quadrantes, intervalados de 45° em 45° e foram representadas as regiões onde ocorreram os valores de Bmáx. e Bmín. no centro e na borda respectivamente. Os tons de cinza representam os intervalos angulares onde ocorreram os valores de Bmáx. e Bmin. A intensidade desses tons diminuem com o aumento da espessura, sendo a amostra de 2 mm a que apresenta os tons mais fortes e a amostra de 11 mm a que apresenta os mais fracos.

Figura 4.24 - Representação da região longitudinal das amostras de aço SAE 1045 onde ocorreram os valores de $B_{\text{máx.}}$ e $B_{\text{min.}}$. (a) região de $B_{\text{máx.}}$ e $B_{\text{min.}}$ no centro das amostras/ (b) região de $B_{\text{máx.}}$ e $B_{\text{min.}}$ na borda das amostras

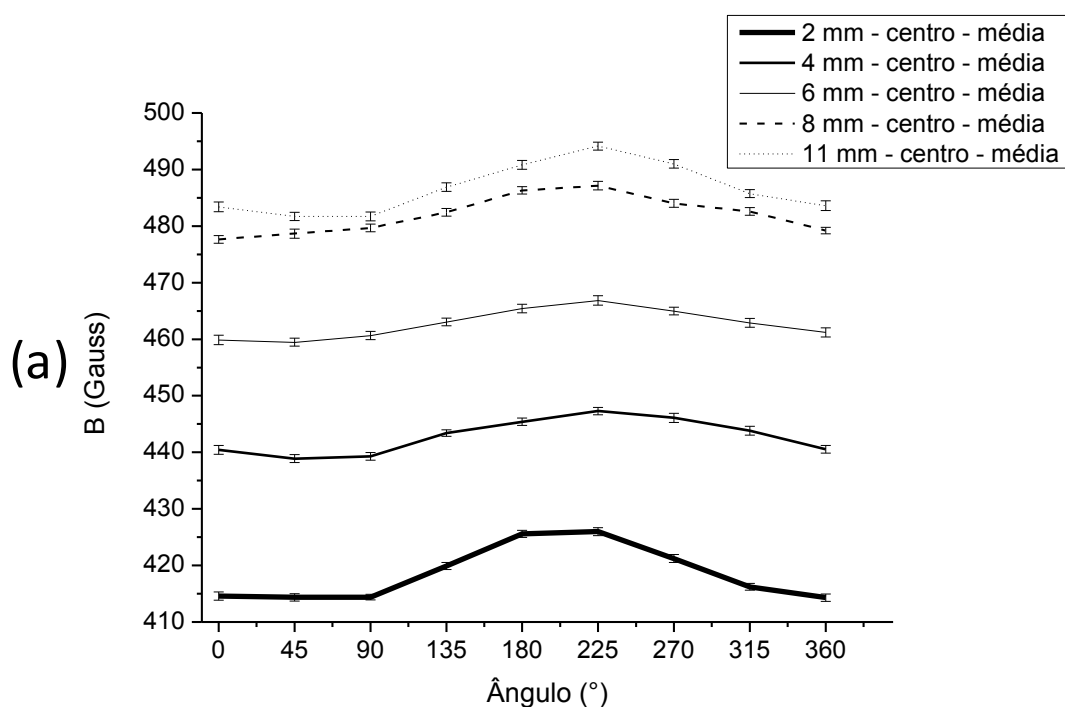


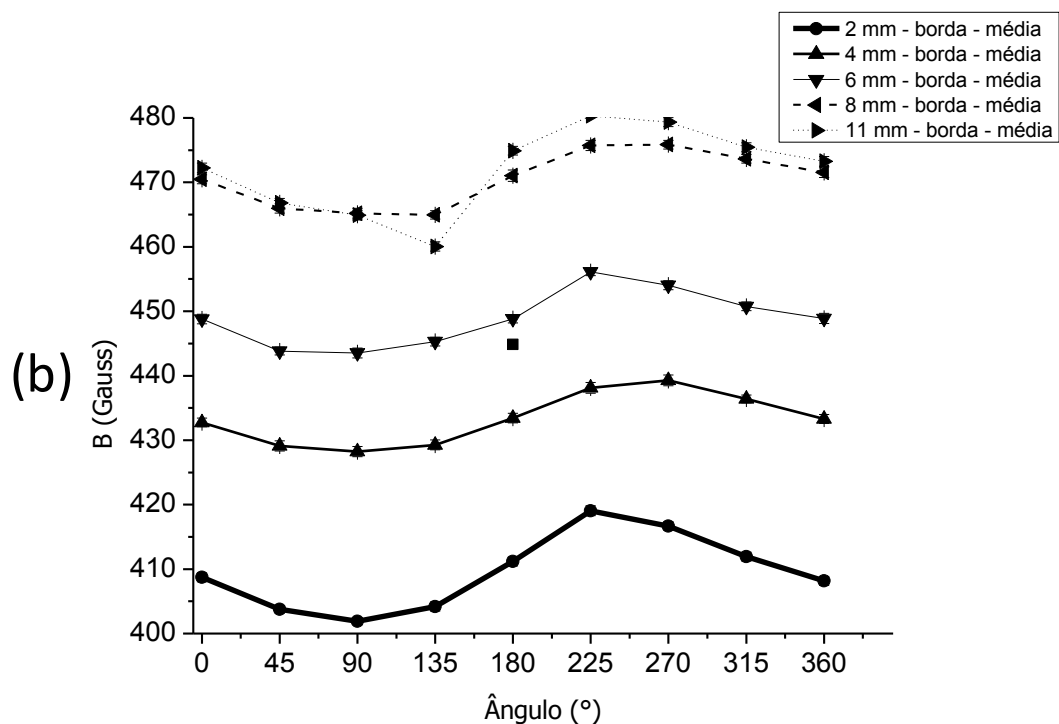
Da análise das figuras 4.24(a) e 4.24(b) pode-se ver que tanto no centro como na borda da amostra de aço SAE 1045 os valores de $B_{\text{máx.}}$ e $B_{\text{min.}}$ se concentraram em torno de uma região específica da amostra, o que evidencia a existência de uma direção de mais fácil magnetização do material. YONAMINE (2002) e EMURA (2001), realizando procedimento semelhante, encontraram valores de $B_{\text{mín.}}$ de 90° e 55°,

respectivamente, para aços elétricos de baixo carbono, ou seja, em ambos os casos $B_{mín.}$ ocorreu no intervalo de 0 e 90° para as medições realizadas no centro das amostras. Ambos só rotacionaram as amostras em ângulos que variaram de 0 e 90°. Esse procedimento utilizado pelos autores de só rotacionar as amostras nesse intervalo está em consonância com a norma ABNT NBR 5161 que trata da verificação das propriedades para produtos laminados planos de aço para fins elétricos. Os resultados obtidos, porém, indicam que há um comportamento diferente das propriedades magnéticas fora desse intervalo.

Gráficos consolidado dos valores de B com o ângulo de rotação para todas as espessuras das amostras do aço SAE 1045 Tipo1 são apresentados na figura 4.25. Na figura 4.25(a) são apresentadas as curvas obtidas para a região do centro das amostras. Na figura 4.25(b) são apresentadas as curvas obtidas para a região a 6 mm do centro das amostras (borda). No eixo das abscissas são apresentados os ângulos nos quais as amostras foram rotacionadas (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° e 360°). No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada posicionamento angular.

Figura 4.25 - Campo magnético induzido com rotação para todas as amostras Tipo1 para o aço SAE1045 (a) H aplicado no centro das amostras e (b) H aplicado na borda das amostras





Da análise da figura 4.25 pode-se observar que o formato das curvas de magnetização com a rotação é similar para todas as espessuras, tanto no centro como na borda das amostras. Também pode-se verificar que B aumentou com a espessura das amostras (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) para medições realizadas em um mesmo ângulo (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° e 360°). Isso ocorreu tanto no centro como na borda, porém B aumentou cada vez menos com o aumento da espessura, se tornando praticamente estável para espessuras acima de 8 mm. Esses resultados estão em consonância com os apresentados na região de ampliação da figura 4.1, onde, para as espessuras acima de 8 mm o valores de B teve uma menor influência da espessura das amostras. Pode-se também verificar que os valores de B variaram com o ângulo de rotação fora da margem de erro estatística para todos os valores de espessura de amostras analisados. Deve-se salientar que o valor de H foi mantido fixo durante todo o experimento e que as distâncias e forma de posicionamento também se mantiveram inalteradas, só sendo variado o ângulo de rotação, portanto, nenhuma variável diferente foi inserida ou alterada, o que indica que essa variação de B só pode estar relacionada ao fenômeno de anisotropia magnética.

4.5.2 Estudo da dependência angular de B em função de H com a rotação da amostra para o alumínio ASTM 6261

O comportamento obtido para as curvas de B x ângulo de rotação pode ser observado a partir da análise das figuras 4.26 até 4.30 para o alumínio. Nas curvas com linha sólida estão apresentadas as curvas obtidas no centro das amostras. Nas curvas com linha tracejada estão apresentadas as curvas obtidas a 6 mm do centro das amostras (borda). No eixo das abscissas são apresentados os ângulos os quais as amostras foram rotacionadas (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° e 360°). No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada posicionamento angular.

Figura 4.26 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 2mm)

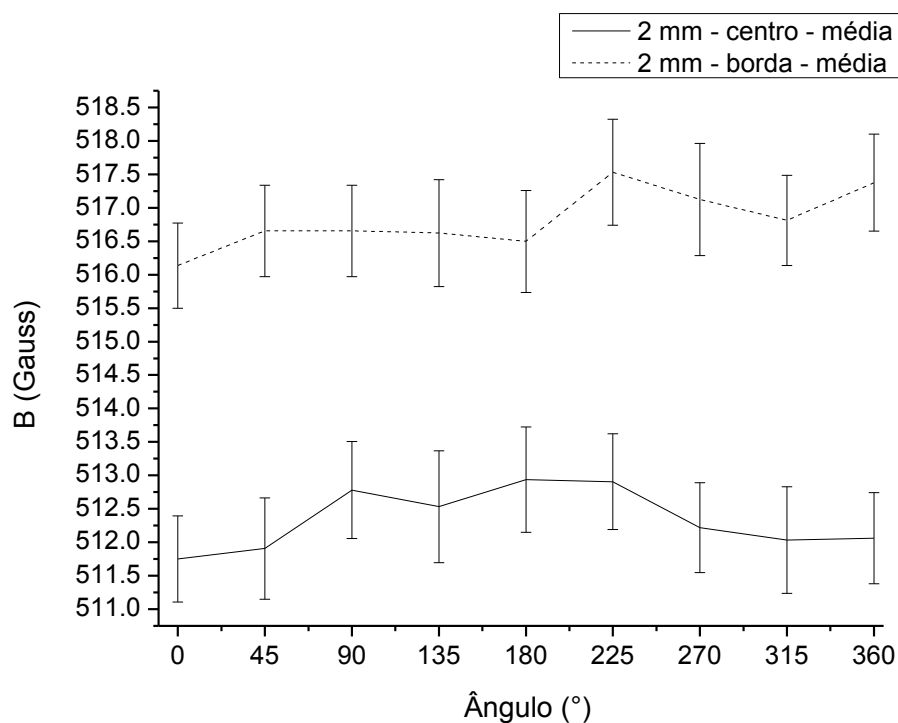


Figura 4.27 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 4mm)

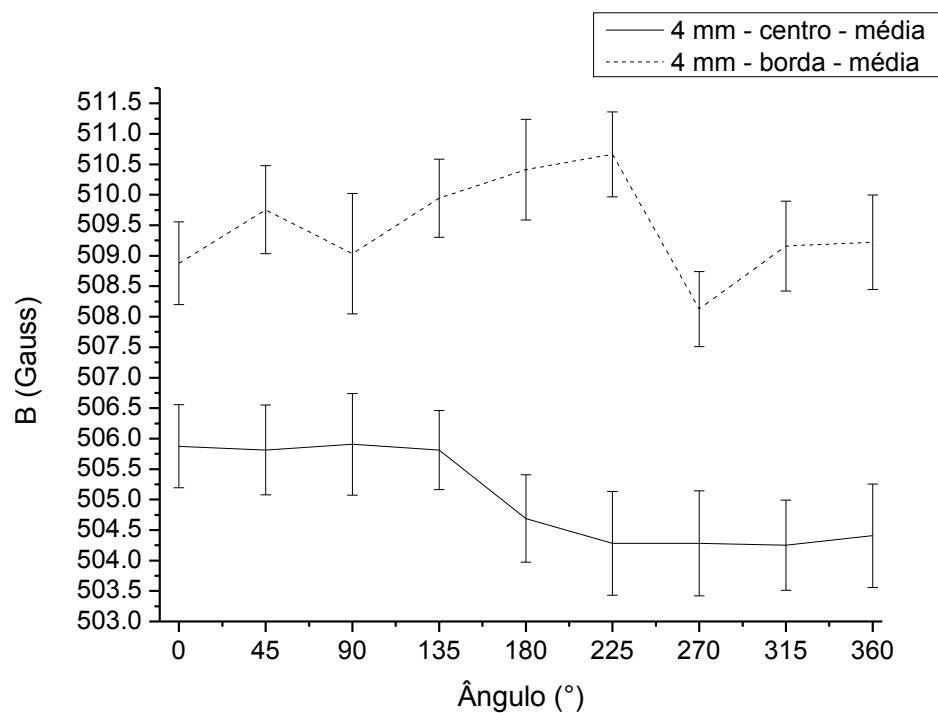


Figura 4.28 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 6mm)

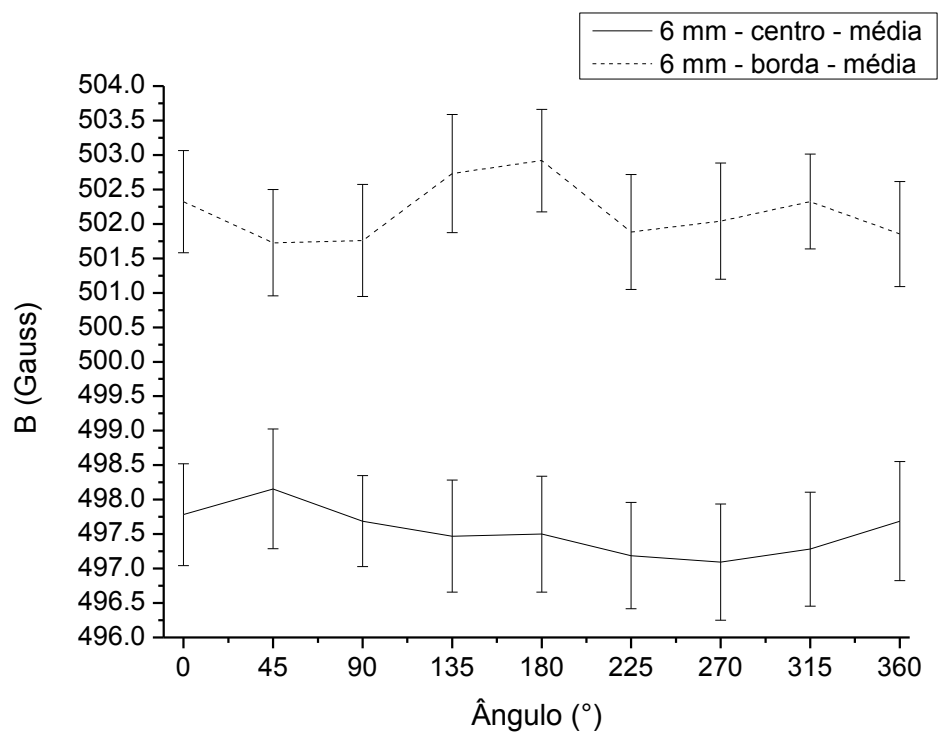


Figura 4.29 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 8mm)

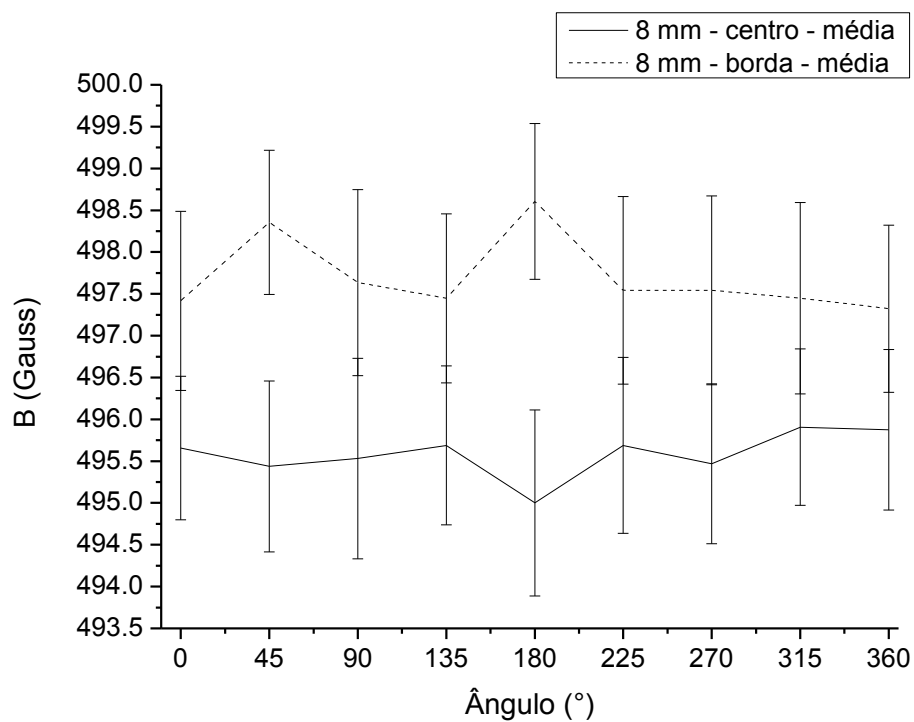
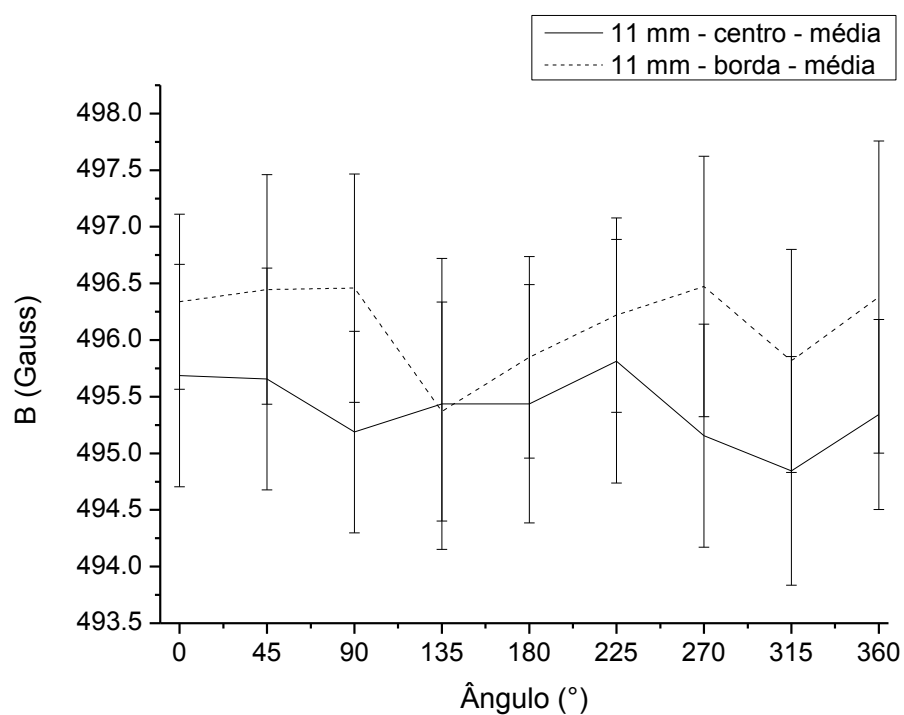
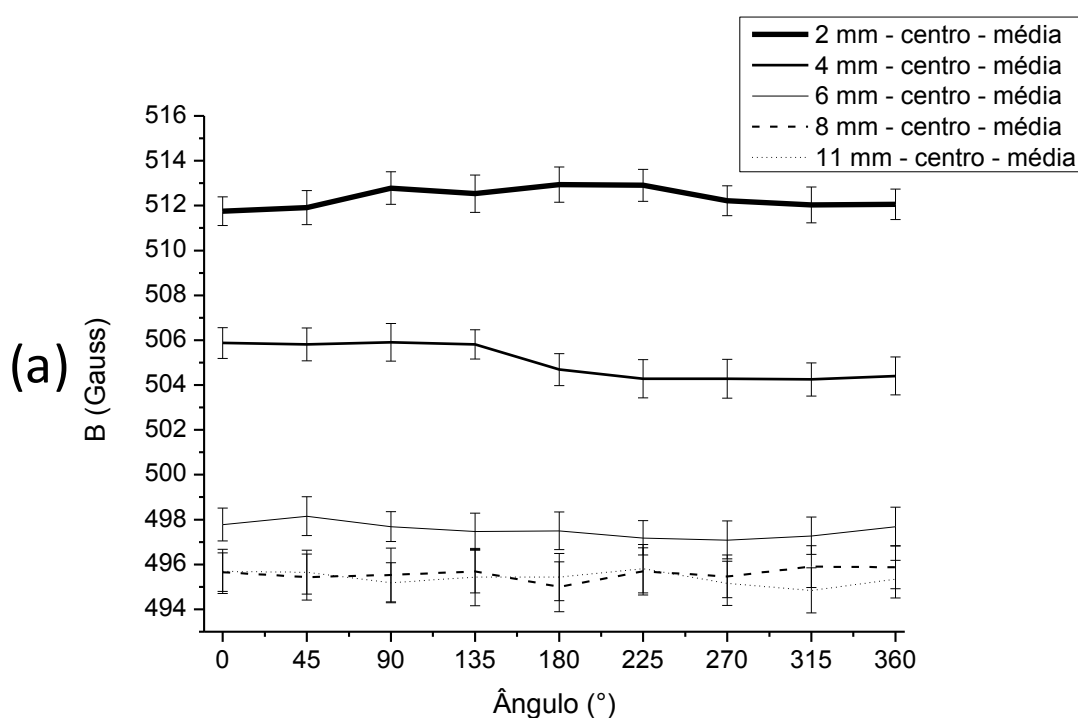


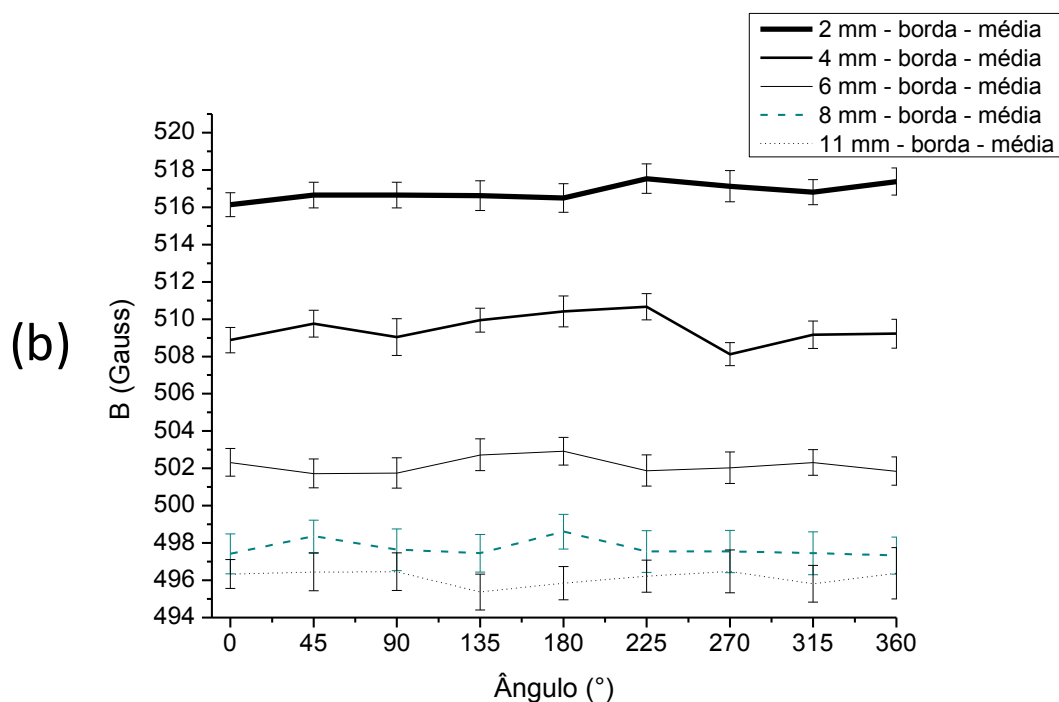
Figura 4.30 - Campo magnético induzido com rotação (amostra Tipo1, ASTM 6261, 11mm)



Da análise das figuras 4.26 até 4.30 pode-se verificar que o formato das curvas não apresenta semelhança com a do aço, ou seja, não há um formato cosenoidal que permita definir os valores de $B_{\text{máx.}}$ e $B_{\text{min.}}$. Pode-se verificar ainda, em consonância com os resultados obtidos nas figuras 4.4 e 4.9, que há uma variação entre os valores de centro e borda, e que a espessura também altera os valores de B até um determinado valor. Para melhor visualização desse comportamento, foi construído um gráfico consolidado dos valores de B com o ângulo de rotação para todas as espessuras das amostras do alumínio ASTM 6261 Tipo1, conforme apresentado na figura 4.31. Na figura 4.31(a) são apresentadas as curvas obtidas para a região do centro das amostras. Na figura 4.31(b) são apresentadas as curvas obtidas para a região a 6 mm do centro das amostras (borda). No eixo das abscissas são apresentados os ângulos nos quais as amostras foram rotacionadas (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° e 360°). No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada posicionamento angular.

Figura 4.31 - Campo magnético induzido com rotação para todas as amostras Tipo1 para o alumínio ASTM 6261 (a) H aplicado no centro das amostras e (b) H aplicado na borda das amostras





Os resultados da variação dos valores de B com a rotação das amostras de alumínio apresentados na figura 4.31 mostram que não há um formato característico das curvas $B \times$ ângulo de rotação, e que os valores de B variaram, em sua maioria, dentro da margem de erro estatístico calculada. Esse comportamento ocorreu tanto no centro das amostras, figura 4.31(a), como na borda, figura 4.31(b). Também pode ser verificado que B diminuiu com a espessura das amostras (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm) para medições realizadas em um mesmo ângulo (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° e 360°). Isso ocorreu tanto no centro como na borda, porém B diminuiu cada vez menos com o aumento da espessura, se tornando menos praticamente estável para espessuras acima de 6 mm na região do centro das amostras. Esses resultados estão em consonância com os apresentados na região de ampliação da figura 4.4, onde, para as espessuras acima de 6 mm o valores de B teve uma menor influência da espessura das amostras. Pode-se também verificar que os valores de B variaram com o ângulo de rotação dentro da margem de erro estatística para todos os valores de espessura de amostras analisados. Deve-se salientar que o valor de H foi mantido fixo durante todo o experimento e que as distâncias e forma de posicionamento também se mantiveram inalteradas, só sendo variado o ângulo de rotação, portanto, nenhuma variável diferente foi inserida ou alterada, o que indica que para o alumínio a variação de B com o ângulo de rotação não

se tornou presente como no aço, inexistindo o fenômeno de anisotropia magnética para o alumínio.

4.5.3 Comparativo da dependência angular de B em função de H com a rotação da amostra entre o aço e o alumínio

Os resultados do estudo de dependência angular de B para o aço SAE 1045 apresentado na figura 4.24 mostraram que o aço apresenta um formato característico para as curvas de B com o ângulo de rotação da amostra que se assemelha a uma curva cosenoidal, para todas as espessuras. Já os resultados obtidos para o alumínio ASTM 6261 para todas as espessuras foram apresentados na figura 4.31 e mostraram que não há um formato característico para as curvas de B com o ângulo de rotação da amostra. Outros estudos também detectaram alterações no valor de B com o ângulo de rotação, indicando que as curvas de magnetização sofrem interferência da direção de laminação, causando anisotropia magnética para o caso do aço (YONAMINE et al, 2002; DA SILVA, 2004; PRAXEDES, 2012). Em se tratando do alumínio, os resultados mostraram que mesmo ele sendo paramagnético, na região de trabalho escolhida, com baixos campos magnéticos aplicados e operando na região de reversibilidade magnética dos aços, foi possível se ter respostas de variações de B com os estímulos magnéticos recebidos para as diferentes espessuras, porém, com relação ao comportamento angular, esses estímulos não foram capazes de identificar efeitos de anisotropia magnética, já que não se detectou um formato característico para as curvas de B com a rotação, como ocorreu com o aço.

Os estudos de Yonamine et al (2002), Emura (2001), Da Silva (2004) e Praxedes (2012) reforçam a tese de que a anisotropia magnética está ligada a efeitos de textura metalográfica causada pela deformação proveniente dos processos de fabricação. A existência de grãos deformados na microestrutura das amostras utilizadas nessa pesquisa justificaria a ocorrência deste comportamento para o aço, enquanto que a inexistência de grãos orientados na microestrutura das amostras de alumínio justificaria a inexistência dessa ocorrência para o alumínio. Uma análise metalográfica do material foi realizada buscando-se justificar esses resultados, conforme apresentada na seção 4.6.

4.6 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO MATERIAL

A análise metalográfica buscou responder a suposições levantadas quanto à textura metalográfica, já que os resultados apresentados nas figuras 4.19 até 4.24 mostraram haver influência não apenas do efeito de borda e espessura nos valores de B obtidos para o aço. Se apenas esses efeitos estivessem presentes, as medições levariam a repetição dos valores de campo magnético induzido no centro e a 6 mm do centro para qualquer ângulo, em uma amostra de mesma espessura. Já para o alumínio, os resultados apresentados nas figuras 4.26 até 4.31 mostraram que só os efeitos de borda e espessura parecem estar presentes, não havendo variação nos valores de B com a rotação, comportamento diferente do aço, que só pode ser respondido a partir da comparação de suas microestruturas.

4.6.1 Análise microestrutural do aço SAE 1045

Os resultados das microscopias óticas realizadas no aço SAE 1045 são apresentados nas figuras 4.32 até 4.34. À esquerda é apresentada a microscopia ótica das amostras. Os caminhos, em tracejado, representados por letras, indicam a direção da textura metalográfica. À direita é apresentada a orientação de posicionamento angular da amostra no microscópio e a seção onde as amostras foram fotografadas. A seção longitudinal da amostra representa a posição onde a face do sensor foi posicionada e as medições realizadas e está representada nas figuras 4.32 e 4.33. A seção transversal representa a posição de corte da amostra e está representada na figura 4.34.

Figura 4.32 - Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, SAE 1045 (face de acoplamento do sensor) na posição 0°

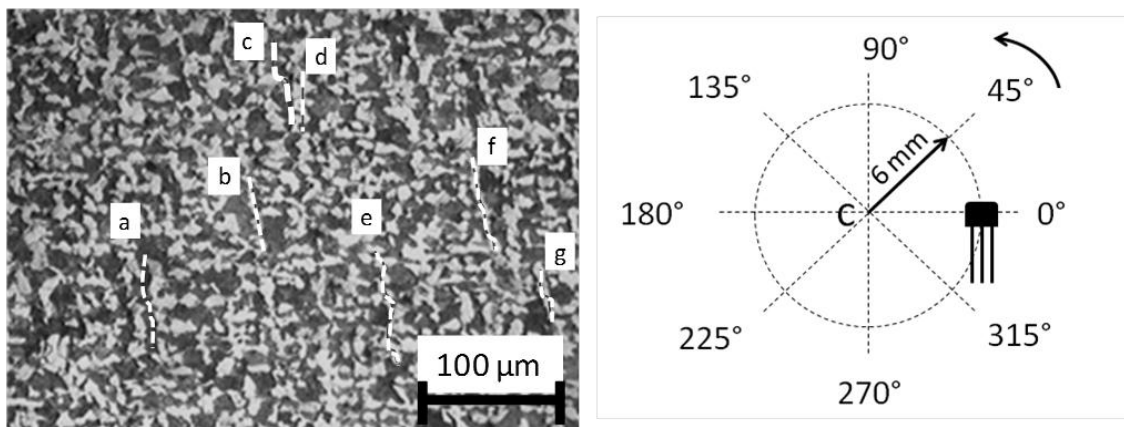


Figura 4.33 - Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, SAE 1045 (face de acoplamento do sensor) na posição 90°

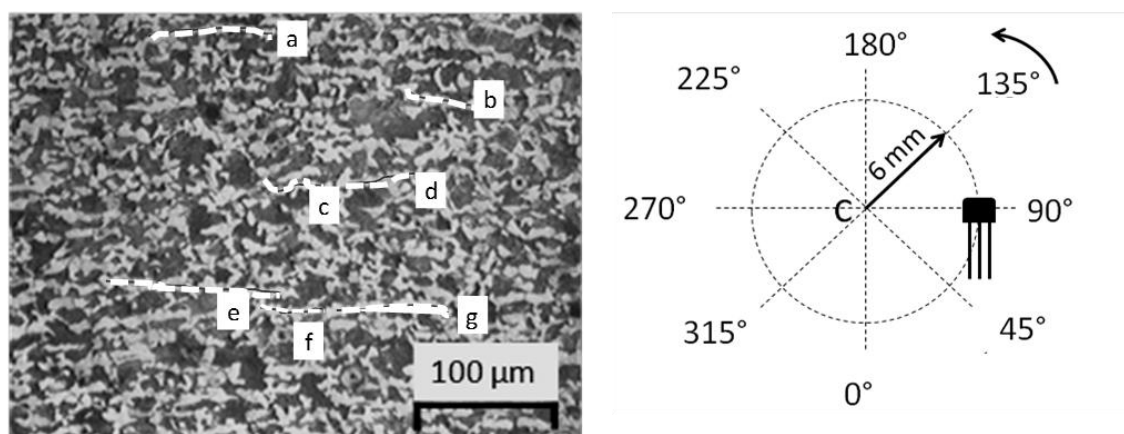
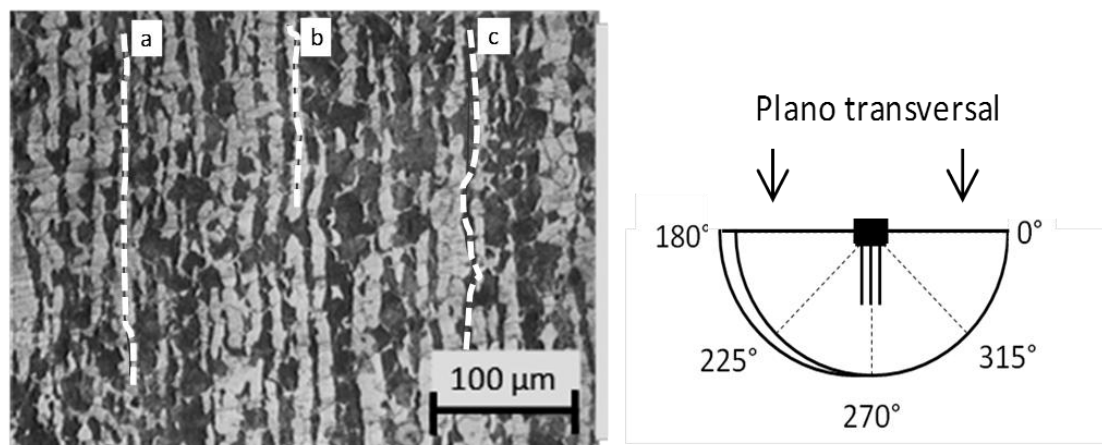


Figura 4.34 - Micrografia ótica da seção transversal da amostra Tipo1, SAE 1045 (corte a 0°)

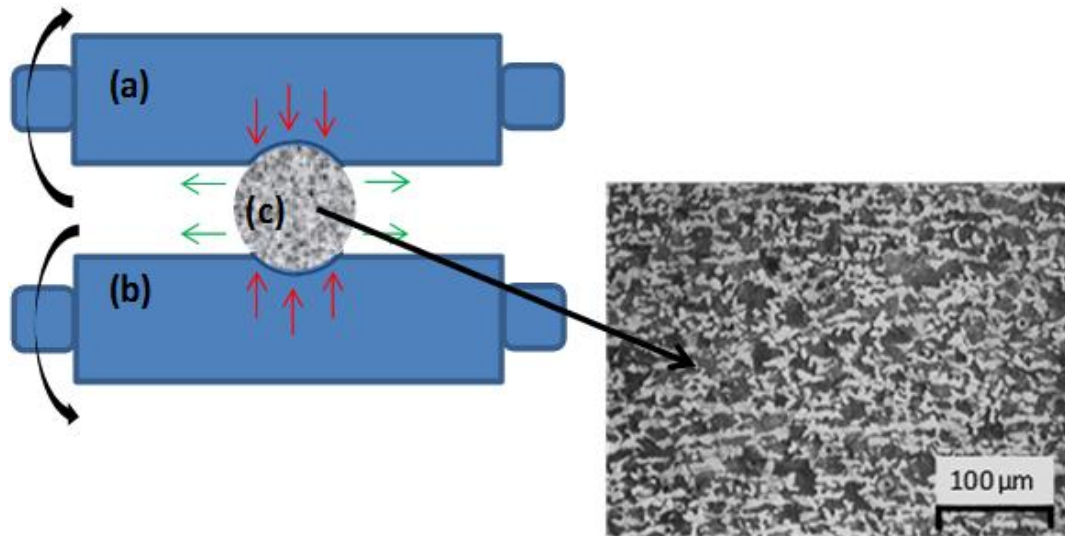


Analisando-se as figuras 4.32 e 4.33 nota-se a presença grãos alongados, com direção de deformação representada pelos caminhos desenhados nas figuras (pontos a, b, c, d, e, f e g). Para comprovar a existência dessa deformação o valor do comprimento médio dos grãos ($L_{\text{médio}}$) foi determinado utilizando-se o método de Heyn. O valor do $L_{\text{médio}}$ dos grãos de perlita obtidos foi de $11,99 \pm 0,29 \mu\text{m}$ e $12,81 \pm 0,46 \mu\text{m}$ nas direções de 0° e 90° na superfície longitudinal das amostras, respectivamente. Já na região transversal (figura 3.4) a deformação dos grãos é muito mais acentuada, com direção representada pelos caminhos desenhados nas figuras (pontos a, b, c), sendo desnecessário o cálculo do $L_{\text{médio}}$ para comprová-la.

Mesmo sendo comum a realização de um tratamento térmico de recozimento ou normalização na fase final de produção de materiais comerciais produzidos por laminação como o utilizado, no caso estudado, ainda houve uma direção preferencial de orientação dos grãos tanto na seção longitudinal (figuras 4.32 e 4.33), que é a de medição, quanto na seção transversal (figura 4.34), onde não foram realizadas medições. Isso indica que a variação de B com o ângulo de rotação está relacionada com a deformação plástica presente, o que gerou uma anisotropia magnética suficiente para ser detectada mesmo com a aplicação de pequenos valores de H.

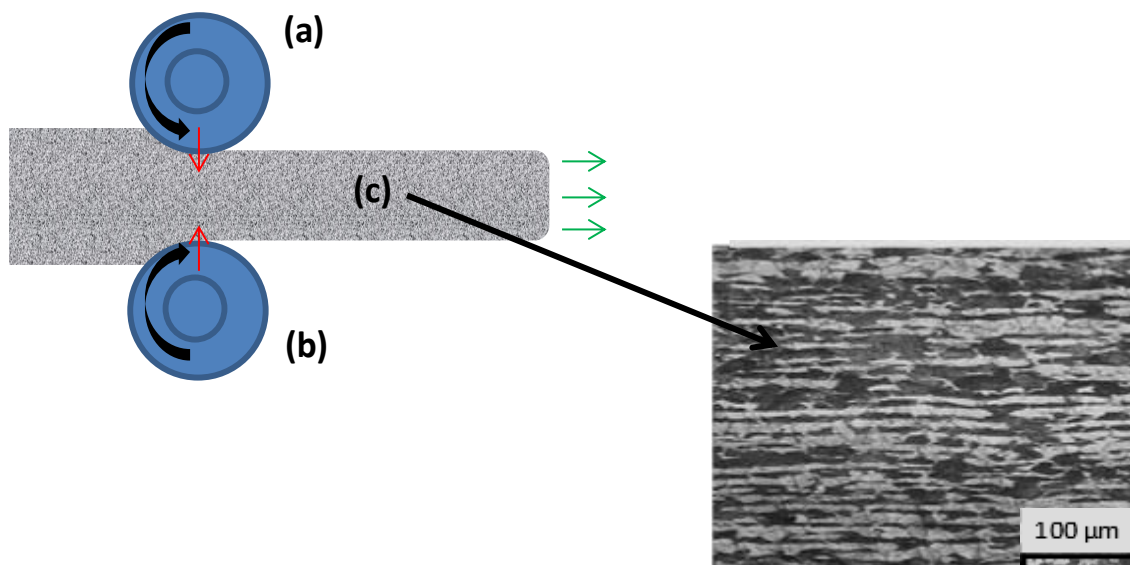
Na seção longitudinal das amostras ocorreram grandes esforços de compressão gerados pelos rolos laminadores durante o processo de fabricação e esforços de tração produzidos pela deformação plástica (efeito Barril). Nos processos de laminação de tarugos dois efeitos de deformação agem sobre o material, um é o alongamento do material e outro é o alargamento (PALMEIRA, 2005). O alargamento é o responsável pelo efeito de Barril e se dá devido à abertura existente entre os rolos laminadores. Esse efeito é compensado por uma deformação a 90° no conjunto laminador subsequente, o que evita a assimetria na seção do perfil, mas gera a textura metalográfica, conforme ilustrada na figura 4.35. À esquerda nessa figura é apresentada uma representação esquemática dos laminadores. (a) e (b) representam os rolos laminadores, que geram esforços de compressão representados por setas. (c) representa o tarugo de aço SAE 1045 submetido ao esforço de compressão. As setas representam a direção de escoamento do material e deformação dos grãos em virtude dos esforços de compressão sofridos e das forças trativas produzidas. À direita é apresentada a textura metalográfica resultante dos esforços de compressão aplicados e das forças trativas produzidas.

Figura 4.35 - Representação dos esforços compressivos causadores da deformação plástica na seção longitudinal das amostras de aço SAE 1045. (a) e (b) – rolos laminadores; (c) tarugo de aço SAE 1045



A existência de textura metalográfica na seção transversal do aço SAE 1045 se dá em virtude da velocidade periférica dos rolos laminadores ser maior que a velocidade de entrada do material, o que gera o seu agarramento e uma tensão de tração que leva ao alongamento do material (PALMEIRA, 2005). Isso pode ser melhor visualizado a partir da análise da figura 4.36. À esquerda nesta figura é apresentada uma representação esquemática dos laminadores. (a) e (b) representam os rolos laminadores, que geram os esforços de compressão representados por setas. (c) representa o tarugo de aço SAE 1045 submetido aos esforços de compressão. As setas representam a direção de deformação dos grãos em virtude dos esforços de compressão sofridos, direção na qual também ocorreram esforços de tração. À direita é apresentada a textura metalográfica gerada a partir dos esforços de compressão aplicados. Nesta seção transversal das amostras, também ocorreram forças de tração, o que justifica grãos mais deformados e mais alongados que os apresentados nas figuras 4.32 e 4.33, o que justifica a textura metalográfica presente.

Figura 4.36 - Representação dos esforços compressivos e trativos causadores da deformação plástica na seção transversal das amostras de aço SAE 1045. (a) e (b) – rolos laminadores; (c) vergalhão de aço SAE 1045



Fukuhara (2010) afirma que durante o processo de laminação ocorrem mudanças no formato dos grãos, gerando um aumento da área total do seu contorno e o aparecimento de estruturas internas, como bandas de deformação e transição que deterioram as propriedades magnéticas, recomendando que um tratamento de recozimento posterior seja realizado em aços deformados. Dessa forma, a identificação da direção de laminação se torna importante para a determinação das propriedades magnéticas em materiais deformados.

Vários autores têm estudado o efeito da anisotropia magnética em aços deformados, trabalhando no intervalo de 0 a 90° (LI-HONG, 2004; PRAXEDES, 2012). Os resultados obtidos por esses autores demonstraram que as tensões de deformação na direção de laminação favoreceram o aumento da magnetização nesta direção, comprovando a existência de anisotropia magnética relacionada com a deformação plástica gerada durante o processo de fabricação.

Comparando-se os resultados obtidos para o aço SAE 1045 estudado no mesmo intervalo angular dos estudos realizados por Li-Hong (2004) e Praxedes (2012), ou seja, para os ângulos entre 0° e 90°, pode-se concluir que os mesmos estão em consonância com a literatura, ou seja, na medição realizada a 0° o valor de B foi maior que a 90°. Estudos a partir de outros ângulos, maiores que 90°, não foram encontrados na literatura. Isso se dá porque a preocupação com as propriedades magnéticas dos aços é

maior na produção dos aços para fins elétricos (aços ao silício), que segundo Cardoso (2005), apresenta uma textura cristalográfica próxima da ideal (orientação $\langle 100 \rangle$). Essa orientação é favorecida graças à aplicação de um campo magnético externo nas etapas finais do processo de produção do aço. Esse campo é aplicado na direção de laminação (0°) durante o recozimento do material, o que retarda a recristalização e tende a orientar os grãos na direção de aplicação do campo.

Estudos têm mostrado que os domínios magnéticos tendem a ter uma maior facilidade de orientação na direção da laminação e que nesta direção os grãos adquirem orientação preferencial (YONAMINE, 2002; EMURA, 2001). Sabe-se que o ferro tem uma direção de fácil magnetização $\langle 100 \rangle$ e outra de difícil $\langle 111 \rangle$ indicando, portanto, que a textura cristalográfica exerce grande influência em suas propriedades magnéticas. O eixo de magnetização espontânea nos cristais de Fe- α é o $\langle 001 \rangle$ e a direção de pior magnetização é a $\langle 111 \rangle$ (FELIX, 2013; CALLISTER, 2002; LAW, 2013). A detecção de uma maioria de grãos com esta orientação explicaria tal fenômeno. A textura onde se apresenta grãos com essa orientação de fácil magnetização é chamada textura Goss e é comumente encontrada em aços ricos em silício como os aços elétricos (LAW, 2013; DA SILVA, 2004). Os aços elétricos possuem uma forte textura cristalográfica do tipo $\{110\} \langle 001 \rangle$, onde a maior parte da estrutura cristalográfica têm seus planos $\{110\}$ paralelos à superfície da chapa e com a direção $\langle 001 \rangle$ alinhado paralelamente à direção de laminação, onde as propriedades magnéticas são as melhores conseguidas (FUKUHARA, 2010). É possível que este fenômeno esteja presente no material estudado (amostras do Tipo1 de aço SAE 1045).

4.6.2 Análise microestrutural do alumínio ASTM 6261

Os resultados da microscopia ótica realizadas no material de alumínio utilizado para realização das amostras é apresentado nas figuras 4.37 até 4.39. À esquerda é apresentada a microscopia ótica das amostras. Já direita é apresentada a orientação de posicionamento angular da amostra no microscópio e a seção onde as amostras foram fotografadas. A seção longitudinal da amostra representa a posição onde a face do sensor foi posicionado e todas as medições realizadas na pesquisa foram efetuadas e está representada nas figuras 4.37 e 4.38. A seção transversal representa a posição de corte

da amostra e está representada na figura 4.39. Os caminhos, em tracejado, representados por letras nesta figura (figura 4.39), indicam a direção da textura metalográfica.

Figura 4.37 - Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, alumínio ASTM 6261 (face de acoplamento do sensor) na posição 0°

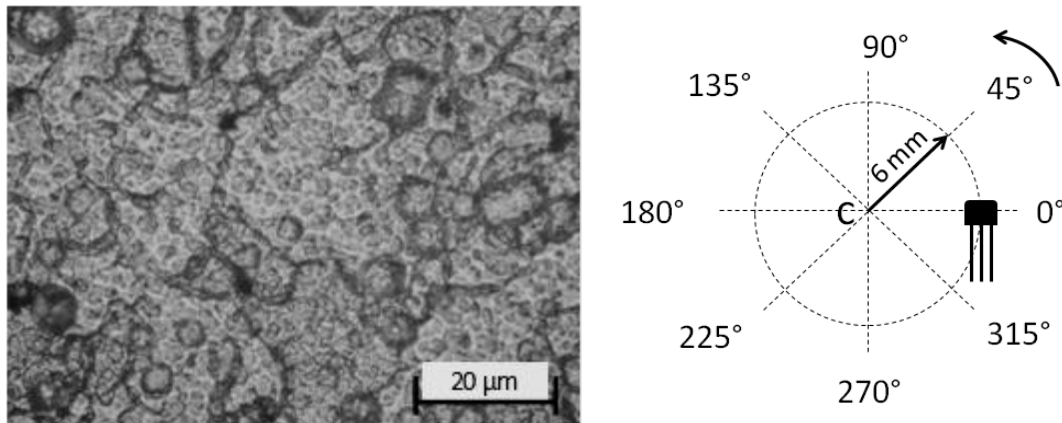


Figura 4.38 - Micrografia ótica da seção longitudinal da amostra Tipo1, alumínio ASTM 6261 (face de acoplamento do sensor) na posição 90°

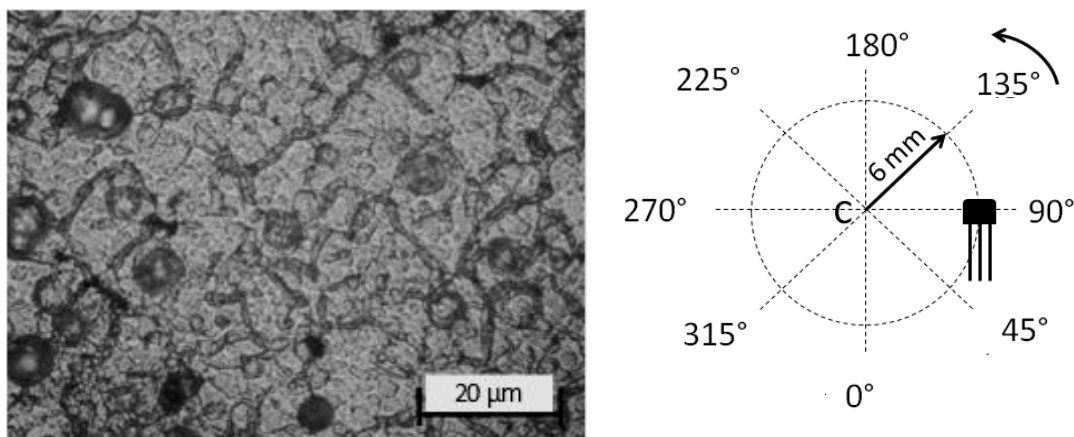
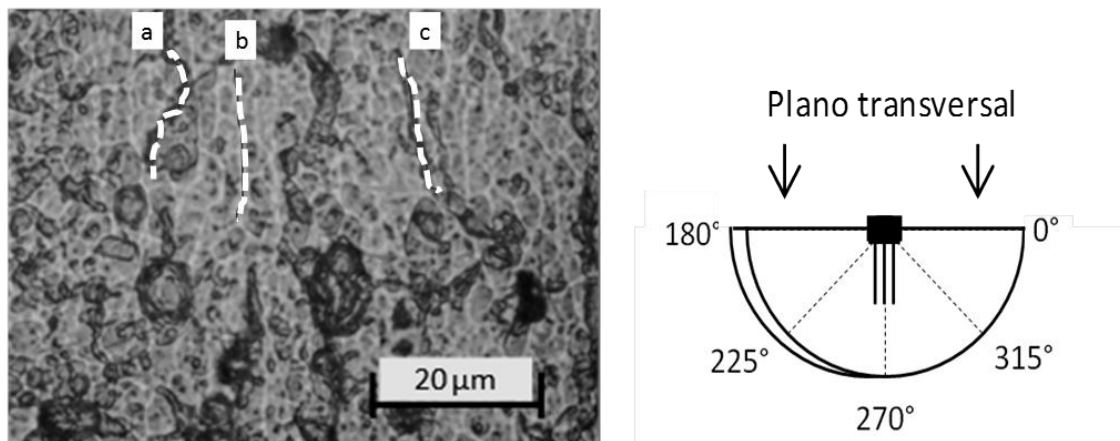


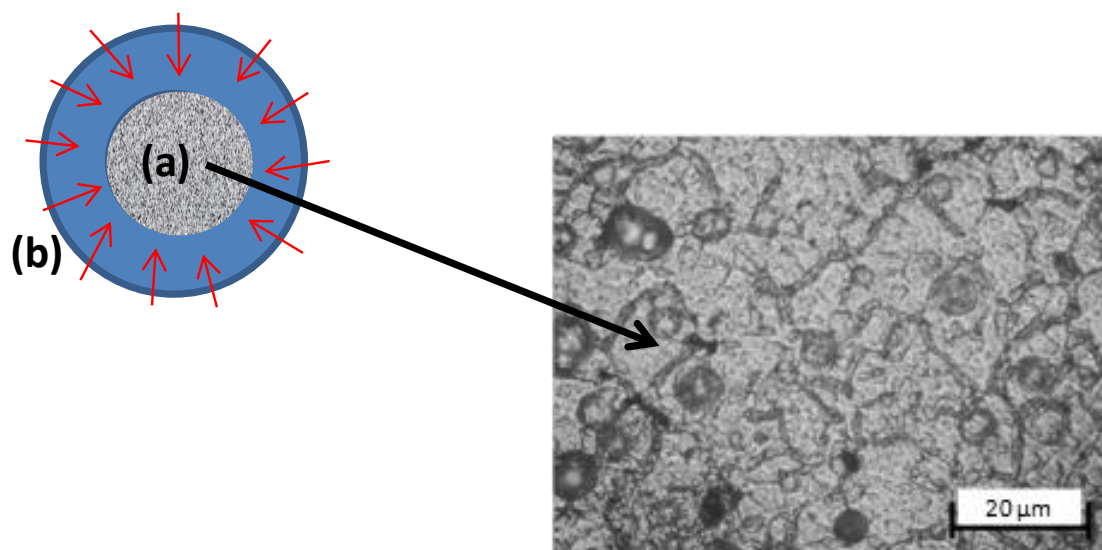
Figura 4.39 - Micrografia ótica da seção transversal da amostra Tipo1, alumínio ASTM 6261 (corte a 0°)



As amostras de alumínio não variaram os valores de B com a rotação, o que tornou necessário o estudo da microestrutura do material utilizado para preparação das amostras de alumínio ASTM 6261. Os vergalhões de alumínio ASTM 6261 sólidos redondos na dimensão utilizada são comumente obtidos por extrusão a quente em temperatura acima da temperatura de recristalização, o que resultaria em uma menor influência da anisotropia microestrutural.

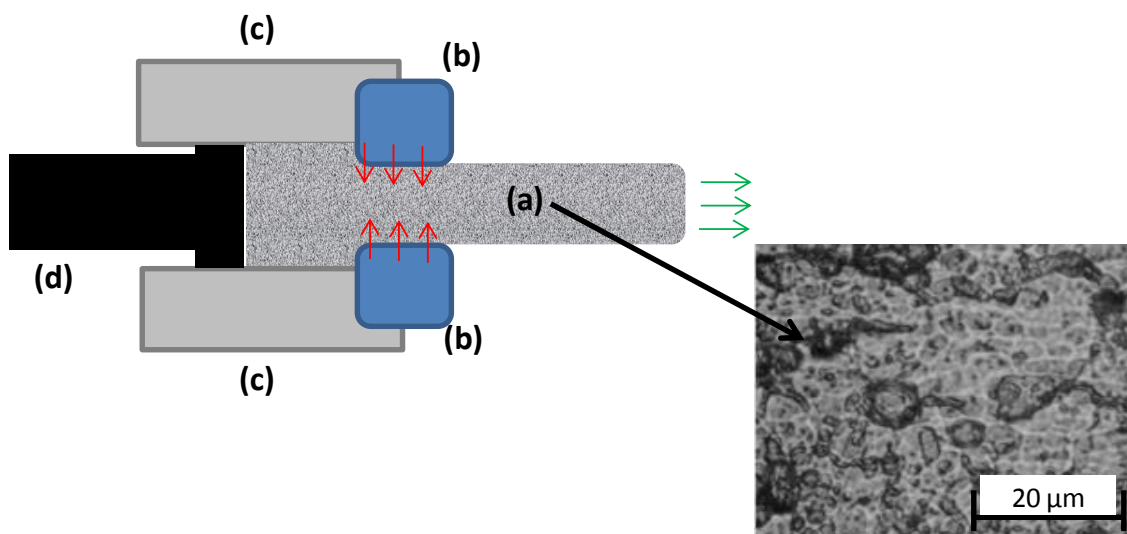
Da análise das figuras 4.37 até 4.39, nota-se que não há uma direção preferencial de orientação dos grãos na face de acoplamento do sensor (seção longitudinal das amostras) representadas pelas figuras 4.37 e 4.38 e que há uma direção preferencial de orientação dos grãos na seção transversal (figura 4.39), onde não foram realizadas medições. Isso justifica que não houve a variação de B com o ângulo de rotação por não haver textura metalográfica nos grãos da face das amostras onde foram realizadas as medidas. Nessa região as forças de compressão geradas durante o processo de extrusão, distribuídas uniformemente, contribuíram para esse resultado, conforme ilustrado na figura 4.40. À esquerda nessa figura é apresentada uma representação da matriz de extrusão. (a) representa o tarugo de alumínio ASTM 6261 submetido ao esforço de compressão. (b) representa a matriz de extrusão, que gera os esforços de compressão representados por setas. Já à direita é apresentada a textura metalográfica gerada a partir dos esforços de compressão aplicados. Nesta seção longitudinal das amostras, ocorreram forças de compressão simetricamente distribuídas, o que justifica o que justifica a ausência de textura metalográfica.

Figura 4.40 - Representação dos esforços compressivos causadores da deformação plástica na seção longitudinal das amostras de alumínio ASTM 6261. (a) vergalhão de alumínio ASTM 6261; (b) Matriz de extrusão



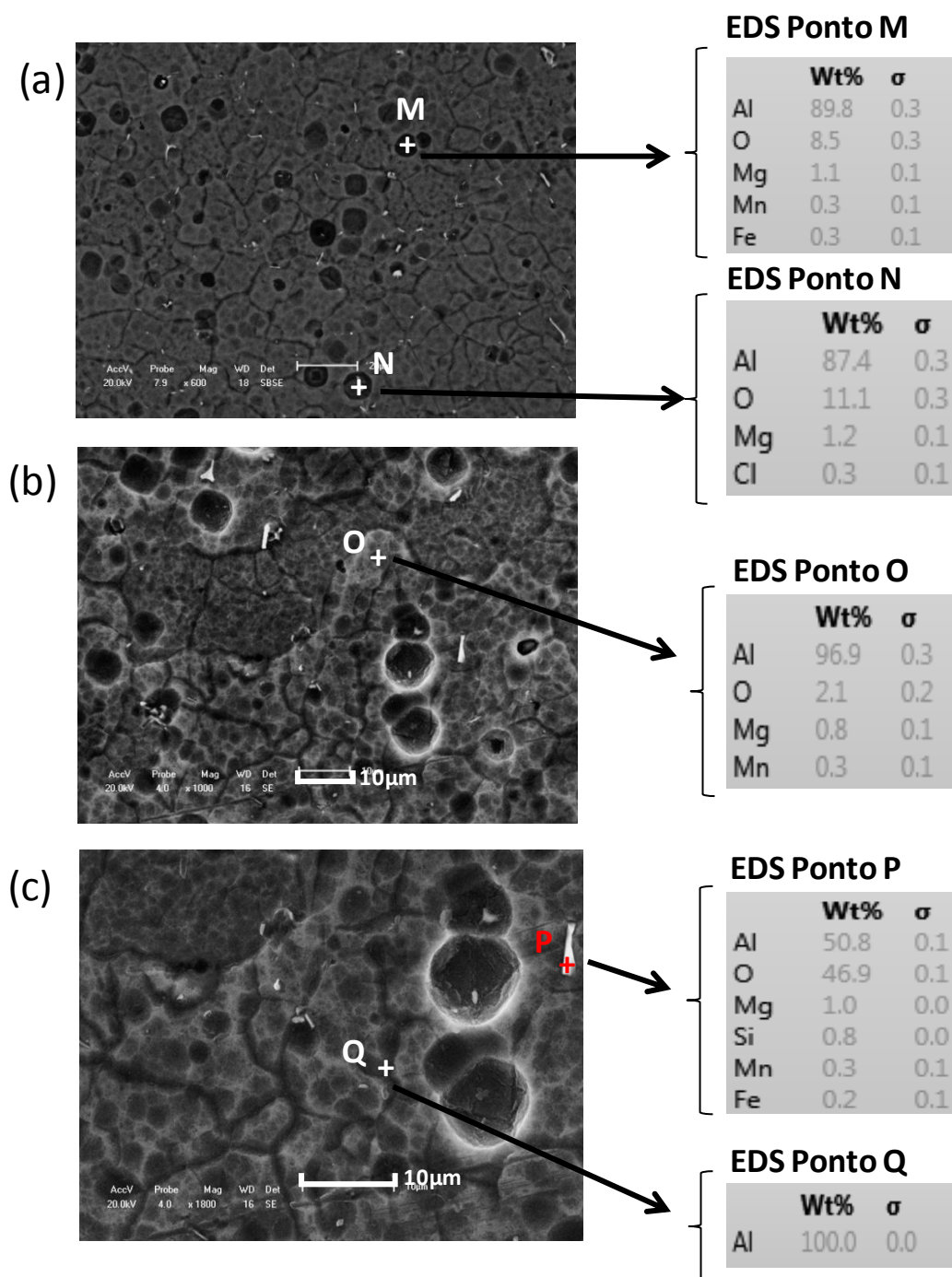
Já analisando a região transversal da amostra apresentada na figura 4.39, pode-se verificar grãos alongados representados pelos caminhos desenhados na figura (pontos a, b, e c). Nesta seção transversal das amostras, as forças de compressão geraram o escoamento do material da direção representada pelas setas, o que justifica os grãos deformados em uma direção preferencial, conforme ilustrado na figura 4.41. À esquerda nessa figura é apresentada uma representação da matriz de extrusão. (a) representa o tarugo de alumínio ASTM 6261 submetido ao esforço de compressão, (b) representa a matriz de extrusão, que gera os esforços de compressão representados pelas setas em vermelho, (c) representa a câmara de extrusão e (d) representa o êmbolo de compressão. Já à direita é apresentada a textura metalográfica gerada a partir dos esforços de compressão aplicados. Nesta seção transversal das amostras, as forças de compressão aplicadas geraram escoamento do material na direção das setas representadas na figura, o que produziu grãos mais deformados e mais alongados que os apresentados nas figuras 4.39 e 4.40, justificando a textura metalográfica presente.

Figura 4.41 - Representação dos esforços compressivos causadores da deformação plástica na seção transversal das amostras de alumínio ASTM 6261. (a) vergalhão de alumínio ASTM 6261 (b) – matriz de extrusão; (c) câmara de extrusão; (d) êmbolo de compressão



Visando complementar as respostas obtidas a partir da microscopia ótica, aprofundar o estudo da morfologia, ter uma visão de profundidade da superfície das amostras e de seus constituintes, foram também realizadas imagens da microestrutura do alumínio ASTM 6261 utilizando-se MEV com EDS acoplado, conforme podem ser observadas na figura 4.42. À esquerda nessa figura são apresentadas as imagens de MEV. À direita são apresentados os resultados do EDS com os constituintes encontrados e sua porcentagem. (a) representa a análise de MEV para um aumento de 600x, (b) para um aumento de 1000x e (c) para 1800x.

Figura 4.42 - MEV com EDS para as amostras de alumínio ASTM 6261. (a) aumento de 600 x; (b) aumento de 1000x; e (c) aumento de 1800x



A liga de alumínio utilizada na produção das amostras (ASTM 6261) é uma liga da série 6xxx, liga alumínio-magnésio-silício, envelhecida artificialmente por trabalho a quente e têmpera (Cobden,1994). Os elementos de liga magnésio e silício formam precipitados Mg_2Si na forma de finas agulhas de tamanhos nanométricos responsáveis pelo aumento de resistência e dureza da liga (XIAO-SONG et al, 2011). Os demais

materiais comumente encontrados, principalmente o Fe é considerado como impureza. Esses elementos formam partículas intermetálicas duras e frágeis e podem trincar durante o processamento, usinagem e acabamento, gerando sítios de iniciação de trincas por fadiga (Da Silva, 2013). O Fe forma fases do tipo α -(Fe,Mn)SiAl de formato levemente arredondado e α -FeSiAl mais alongada e o Mg forma fases do tipo Mg_5Al_2 ou Mg_5Al_2 que precipitam nos contornos de grão e aumentam a susceptibilidade ao trincamento intergranular (Da Silva, 2013).

Da análise de EDS das figuras 4.42(a) até 4.42(c) pode-se ver que foram encontrados além do Al, Mg e Si, alguns elementos considerados impurezas nas ligas de alumínio, como o Fe, Mn e O. Da análise das imagens de MEV apresentada na figura 4.42(a), pode-se observar com uma maior nitidez os contornos dos grãos. Também é possível verificar a presença de poros causados pelo trincamento de partículas intermetálicas durante a usinagem e preparação das amostras como provenientes do processo de produção da liga. A presença de poros em ligas de alumínio Al-Mg-Si comerciais também é citada por XIAO-SONG (2011). O oxigênio é um elemento comumente presente nas análises de MEV, porém os altos teores encontrados na região dos poros, podem se referir a vestígios de alumina aprisionada durante o processo de polimento. Na figura 4.42(b) é possível verificar a presença de vários outros elementos diluídos na matriz de alumínio. Na figura 4.42(c) é possível ver um grão de composição e morfologia diferente, provavelmente de algum carboneto não diluído na matriz de alumínio durante o envelhecimento.

4.6.3 Comparativo da análise microestrutural do aço e alumínio

Os resultados de MO e MEV possibilitaram um melhor conhecimento da morfologia das microestruturas dos materiais estudados. O estudo da morfologia dos materiais ajudou na justificativa dos resultados obtidos para o comportamento magnético apresentado pelas amostras. A MO mostrou que existe deformação microestrutural no aço e no alumínio em sua seção transversal, porém, em sua seção longitudinal, correspondente a face das amostras, onde fora aplicado o campo magnético apenas o aço apresentou anisotropia microestrutural. Essa anisotropia microestrutural causou anisotropia magnética nesse material, formando curvas com perfil cosenoidal. Já a inexistência de anisotropia microestrutural na face longitudinal das amostras justificou

os resultados diferentes para o alumínio, que não apresentaram anisotropia magnética. O MEV por sua vez ajudou a se ter uma visão de profundidade do material, obtendo-se uma visão de profundidade do mesmo, tendo sido verificada a existência de poros, cuja presença não inviabilizou o estudo do comportamento do material pela técnica proposta.

5 CONCLUSÃO

O estudo proposto consistiu no desenvolvimento de uma técnica não destrutiva baseada na interação entre a densidade de linha de campo magnético e material para acompanhamento de variações microestruturais e de textura metalográfica utilizando-se sensores de efeito Hall. Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- i. A técnica representa uma contribuição inovadora por ter conseguido respostas para questões relacionadas à microestrutura e textura metalográfica operando em uma região da curva de magnetização dos materiais na qual a literatura considera não ser possível;
- ii. O sensor utilizado foi capaz de medir a interação entre a densidade de linhas de campo e o material estudado, para a faixa de campo induzido de até 700 Gauss, aproximadamente;
- iii. Por ser utilizado um campo magnético baixo, na região de reversibilidade da movimentação das paredes de domínios magnéticos para o aço, foi possível se estabelecer comparações entre ele e o alumínio, materiais com classificação magnética diferente;
- iv. O método utilizado mostrou ser sensível à textura metalográfica do material, sendo promissora para a determinação da direção de melhor magnetização em materiais para fins elétricos;
- v. A geometria das peças influenciaram os valores de campo magnético induzido, tendo sido observado que existe uma dimensão para espessura, tamanho e formato em que o método independe da geometria. Para as demais dimensões o

método é não destrutivo desde que aplicado um fator de correção para a geometria;

- vi. Para o alumínio ASTM 6261 não ocorreu anisotropia magnética em virtude da inexistência de textura metalográfica.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- i. Aplicar a técnica desenvolvida para o acompanhamento do surgimento de fases em materiais;
- ii. Aplicar a técnica desenvolvida para a determinação do eixo de fácil magnetização de aços para fins elétricos;
- iii. Aplicar a técnica desenvolvida para acompanhar o envelhecimento dos aços inoxidáveis duplex;
- iv. Aplicar a técnica desenvolvida para acompanhar a corrosão de tubos em instalações de utilidade.

REFERÊNCIAS

ABENDI – NA001. **Qualificação e Certificação de Pessoas em Ensaios Não Destrutivos**. Verificação das Propriedades. São Paulo, 2012.

ABNT – **NBR 5161**: Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos: Verificação das Propriedades. Rio de Janeiro, julho de 1977. 35 p.

ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. **Low Noise, Linear Hall Effect Sensor ICs with Analog Output**. USA, 2011.

ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. **Tecnical Documents, Massachusets**. USA, 2012.

ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. **Applications Information. Hall-Effect IC Application Guide, Massachusets**. USA, 2014.

BATISTA, L. et al. On the mechanism of nondestructive evaluation of cementite content in steels using a combination of magnetic Barkhausen noise and magnetic force microscopy techniques. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n.354 p. 248–256, 2014.

BERTOTTI, G. **Hysteresis in magnetism**: for physicists, material scientists and engineers. Academic Press. USA, 1998.

BI, Y.; JILES, D.C. Dependence of magnetic properties on crack size in steels. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, Trans. Magn. n. 34, p. 2021–2224, 1998.

BRAY, D. E. **Historical review of Technology Development in NDE**. 15o WCNDT. Roma, Italia, 2000.

CALDAS-MORGAN, M.; PADOVESE, L. R. Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational. **NDT&E International**, n. 45 p. 148–155, 2012.

CALLISTER JR, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. Ed. LCT: Rio de Janeiro, 2002.

CAMPOS, M. F.; TEIXEIRA, J. C.; LANDGRAF, F. J. G. The optimum grain size for minimizing energy losses in iron. **Journal of magnetism and magnetic Materials**. n.301, p. 94-99, 2006.

CARDOSO, RODRIGO FELIX DE ARAÚJO. **Influência do Tamanho de Grão e das Adições de Al e Mn nas Propriedades Magnéticas dos Aços Elétricos de Grão Não Orientados com 3% de Si**. 160 f. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro – RJ, 2005.

CARNEVAL, RICARDO DE O. et al. **Definição de técnicas não-destrutivas para inspeção de parafusos e estojos quanto a presença de trincas**. IV Conferência Panamericana de END. Buenos Aires. 2007.

CARUSO, M. J; SMITH, C. H; BRATLAND, T.; SCHNEIDER, R.. **A New Perspective on Magnetic Field Sensing**. Honeywell, SSEC Nonvolatile Electronics, Inc. 2014.

CASTRO, N. A. et al. **Recristalização e textura de aços elétricos semiprocessados**. Associação Brasileira de Materiais. Disponível em: < <http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/79177.pdf> >. Acesso em: 11 de outubro de 2013.

CHAUVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 5. Ed. São Paulo: ABM, 1984.

COBDEN, Ron. et al. **Aluminium**: Physical properties, characteristics and alloys. TALAT. EAA: European Aluminium Association, 1994.

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

DA SILVA, ANA MARCIA BARBOSA. **Estudo do comportamento em fadiga de alto ciclo das ligas de alumínio AA6005 T6, AA6003 T6 e AA6351 T6**. 155 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP), Lorena – SP, 2013.

DA SILVA, M. C. A. et al. **Textura de recristalização de um aço com textura (100) [001] laminado em diferentes ângulos em relação à direção de laminação**. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Materiais (CBECIMAT). Porto Alegre –RS, Brasil, 2004.

DENMA, H. et al. Effect of grain diameter on iron loss properties of non-oriented silicon steel sheets. **Journal of magnetism and magnetic Materials**. p. 106-109, 2000.

EMURA, M.; DE CAMPOS, M. F.; LANDGRAF, F. J. G.; TEIXEIRA, J. C. Angular dependence of magnetic proprieties of 2% silicone electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 226-230, p. 1524-1526, 2001.

FELIX, R. A. C. et al. **Avaliação da relação entre textura e propriedades magnéticas através do coeficiente de anisotropia magnetocristalina**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia e Materiais (CBECIMAT). Joinville –SC, Brasil, 2012.

FORMIGONI, ANDRÉ LUIZ. **Análise de defeitos em tubos de geradores de vapor de usinas nucleares utilizando a transformada de Hilbert-Huang em sinais de inspeção por correntes parasitas**. 103 f. Dissertação de Mestrado. IPEN-USP – São Paulo -SP, 2012.

FORSYTH, DAVID S. et al. Evaluation of nondestructive testing methods for the detection. **International Journal of Fatigue**. n. 29, p.810–821, 2007.

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

FUKUHARA, MARCOS. **Subdivisão das perdas histeréticas em aços elétricos deformados e recozidos**. 105 f. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2010.

GHANEI, S. et al. Eddy current nondestructive evaluation of dual phase steel. **Materials and Design**. n.50, p. 491–496, 2013.

GILLET, Cedric; Friedrich, Andreas. **Guidelines for Designing a Concentrator for High-Current Sensing Applications with an Allegro Hall-Effect Sensor IC**. Allegro Microsystems Inc, 2014.

GIROTO, ELLEN REGINA. **O efeito do potencial de oxigênio na oxidação superficial e suas influencias nas propriedades magnéticas dos aços elétricos após o recozimento final**. 89 f. Dissertação de Mestrado. USP/ SP, São Paulo-SP, 2010.

Handbook on the Magnetic Examination of Welds. The Welding Institute, Cambridge, UK, 1988.

HE, YUNZE et al. Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation. **NDT&E International**, n. 44, p. 344–352, 2011.

HONEYWELL DIVISION. **Miniature Radiometric Linear Hall Effect Sensor**. USA, 2013.

HONEYWELL. **Hall effect sensing and application**. USA, 2004.

KASHEFI, MEHRDAD et al. Magnetic nondestructive technology for detection of tempered. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. n. 324, p. 4090–4093, 2012.

KIM, DONG-WON; KWON, DONGIL. Quantification of the Barkhausen noise method for the evaluation of time-dependent degradation. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. n. 257, p. 175–183, 2003.

KREUTZBRUCK, M.V.; ALLWEINS, K. High field resolution for nondestructive testing using sensitive magnetometers. **Sensors and Actuators A Physical**, n. 101, p. 85–91, 2003.

LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades magnéticas dos aços para fins elétricos**. IPT, 2001, 20 p.

LI-HONG, DONG et. al. Metal magnetic memory signals from surface of low-carbon steel and low-carbon alloyed steel. **SPRINGER. J. Cent. South Univ. Technol**, n. 01, p. 01-24, 2004.

LOW, MARJORIE et al. **Estudo do desenvolvimento da textura durante a recristalização primária de aços ferríticos por difração de raios x e difração de eletros retroespalhados**. III Workshop sobre textura. IPEN/CNEN-SP. Disponível em: < <http://www.pmt.usp.br/pagina%20no%20site%20do%20departamento/pdf/ID5.pdf> >. Acesso em: 11 de outubro de 2013.

LUZ, MÁRIO SÉRGIO DA. **Efeito Hall em supercondutores a campo magnético nulo**. 105 f. Tese de Doutorado. USP, Lorena- SP, 2007.

PALMEIRA, ALEXANDRE ALVARENGA. **Processos de Laminação**. Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2005.

PINHO, LUÍS CARLOS ALMEIDA BASTOS. **Materiais magnéticos e suas aplicações**. 99 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto - Portugal, 2009.

MAGALHÃES, MICHEL. **Materiais Magnéticos**. Artigo. UNIUBE: Uberaba, MG, 2012.

MARTINS, C.O.D.; SOUZA, R.R.; LIMA, T.R.S.; REGULY, A. Desenvolvimento de técnicas micromagnéticas de análise de tensões em risers flexíveis. **Revista Matéria**, v. 16, n. 1, p. 613 – 620, 2011.

McCURRIE, R. A. **The Structure and Properties of Ferromagnetic Materials**. Academic Press. USA, 1994.

NASCIMENTO JR, Geraldo Carvalho. **Máquinas Elétricas: teoria e ensaios**. 4. Ed. São Paulo: Érica, 2011.

NETO, O.S.G., SILVA, A.C.F., BORGES, F.F., SANTOS, N.C., 2008. “**Utilização de sensor de efeito Hall para caracterização microestrutural de aços**”. *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2008*, Salvador, Bahia, Brasil, agosto 25 a 28.

NG, D.H.L. et al. Study of microstructure, mechanical properties, and magnetization process in low carbon steel bars by Barkhausen emission. **Materials Science and Engineering**. n. A358, p. 186-198, 2003.

NICHOLSON, P.I., SO., M.H., MEYDAN, T., MOSES, A.J. Non-destructive surface inspection system for steel and other ferromagnetic materials using magnetoresistive sensors. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. n. 160, p. 162-164, 1996.

Non-destructive Testing. DetNorske Veritas AS (DNV). Classification Notes N° 7, 2012. Disponível em: < <https://exchange.dnv.com/publishing/cn/CN7.pdf> >. Acesso em: 05 de outubro de 2013.

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. **Material Science and Engineering**, n. A 527, p. 2886–2891, 2010.

PEREDA, ANA ISABEL CASTILLA. **Automação de diagnóstico para ensaios não destrutivos magnéticos**. 115 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo – SP, 2010.

PEREZ-BENITEZ, J. A. et al. Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. n. 347, p. 51–60, 2012.

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio Nascif. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro, Qualitymark Ed., 1999.

PRAXEDES, T. O. **Sistema experimental para realização de ensaios não-destrutivos magnéticos e sua aplicação na avaliação da degradação microestrutural do aço A516 grau 60**. 162 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza- CE, 2012.

PURCELL. **Electromagnetism**. Lecture 14. Havard University, USA, 2013.

RADTKE, U.; ZIELKE, R.; RADEMACHER, H. G. Application of magneto-optical method for real-time visualization of eddy currents with high spatial resolution for nondestructive testing. **Optics and Lasers in Engineering**. n. 36, p. 251–268, 2001.

RINGLEE, STEPHENR et al. **Perspectives on Technology Transfer and NDT Markets**. Essay IV. E-Markets, Inc., 125.

SERNA-GIRALDO, C.P. **Avaliação de juntas soldadas de aços carbono através do ruído magnético de Barkhausen**. 140 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo – SP, 2007.

SILVA JR., PEDRO ARMANDO DA. **Bancada para ensaios de materiais ferromagnéticos em chapa única sob campos rotacionais**. 122 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2007.

STUPAKOV, O. et al. Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel. **Elsevier. Materials Science and Engineering**, n. A 462, 2006.

TAVARES, Lourival Augusto. **Excelência na Manutenção: Estratégias, Otimização e Gerenciamento**. Salvador, BA, Casa da Qualidade, 1996.

VACHER, F. et al. Eddy current nondestructive testing with giant magneto-impedance sensor. **NDT&E International**, n. 40, p. 439–442, 2007.

WANG, Z.D. et al. A review of three magnetic NDT technologies. Department of Mechanics, School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 324, p. 382–388, 2012.

WLODARSKI, ZDZISLAW. Analytical description of magnetization curves. **Elsevier Physica B**, n. 373, p. 323–327, 2006.

YONAMINE, TAEKO et al. **Anisotropia das propriedades magnéticas de aços semi-processados**. 57º Congresso Anual da ABM - Internacional, 913-931 (2002).

XIAO-SONG, J. et al. Microestructure-based analysis of fatigue behavior of Al-Si-Mg alloy. **Transaction of Nonferrous Metals Society of China**, n. 21, p. 443-448, 2011.