



ANA LUCIA SILVA SOUZA ANDRADE

Ensaio Eletromagnético não Destrutivo para Detecção de Anisotropia

**João Pessoa - PB
Setembro 2016**



ANA LUCIA SILVA SOUZA ANDRADE

Ensaio Eletromagnético não Destrutivo para Detecção de Anisotropia

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo

Orientador: Edgard de Macedo Silva, Dr, IFPB

João Pessoa – PB, Setembro de 2016
Ana Lucia Silva Souza Andrade
– aluciassouza@gmail.com

A ficha catalográfica deve ser inserida no verso da folha de rosto (2ª folha deste documento) e deve ser providenciada junto à Biblioteca. **Exemplo:**

Seção de Informação e Referência
Catalogação da Publicação na Fonte. IFPB / Nilo Peçanha

Andrade, Ana Lucia Silva Souza.

**Ensaio Eletromagnético não Destrutivo para
Detecção de Anisotropia**

Ana Lucia Silva Souza Andrade. – João Pessoa, PB, 2016.
xx f.

Orientador: Fulano de Tal.

Ana Lucia Silva Souza Andrade

ENSAIO ELETROMAGNÉTICO NÃO DESTRUTIVO PARA DETECÇÃO DE ANISOTROPIA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

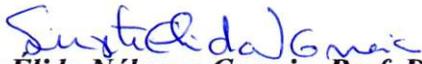
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 26 /09/2016.

BANCA EXAMINADORA


Edgard de Macedo Silva, Prof. Dr., IFPB
(Orientador)


Alfrêdo Gomes Neto, Prof. Dr., IFPB
(Examinador Interno)


Jefferson Costa e Silva, Prof. Dr., IFPB
(Examinador Interno)


Suzete Elida Nóbrega Correia, Prof. Dr., IFPB
(Examinador Interno)


Josinaldo Pereira Leite, Prof. Dr., UFPB
(Examinador Externo)

João Pessoa – PB Setembro 2016

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, que apesar das minhas limitações, tem me guiado, me protegido, me amado incondicionalmente, velando o meu deitar e o meu levantar.

A todos os professores do PPGEE, que foram importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta dissertação, em especial ao professor Dr. Edgard de Macedo Silva, meu mestre, amigo e orientador que me acolheu de braços abertos, me conduzindo pelos caminhos da pesquisa com paciência e maestria.

A minha mãe, Maria de Lourdes Silva Souza, por cada dia desses 46 anos. Obrigada, minha mãe pelo seu amor. Mãe, mulher guerreira de lombos cingidos.

A família Andrade, em nome do meu esposo, João Andrade, exemplo de filho, esposo e pai e as minhas filhas Izabel Valéria e Míriã Raquel, filhas sábias e virtuosas.

RESUMO

Os processos de fabricação convencionais causam deformação plástica que provocam anisotropia magnética do material. Isto torna importante encontrar a direção em que é mais fácil alinhar os domínios magnéticos. Um maior entendimento da caracterização dos materiais sobre o fenômeno de magnetização em função da direção permite que os engenheiros possam otimizar o volume total, a massa e o desempenho dos dispositivos de máquinas elétricas na indústria. Estas direções podem ser obtidas através de ensaios destrutivos como o método do quadro Epstein e o de única folha, que são medidos na região de magnetização de irreversibilidade dos movimentos dos domínios. No presente trabalho, amostras de aço SAE 1045 laminado (formado por perla e ferrita) são submetidas a um campo magnético induzido na região de reversibilidade dos domínios magnéticos, para detectar a direção fácil magnetização. Estes campos magnéticos foram aplicadas a amostras circulares com diferentes espessuras e o ângulo de aplicação variando entre 0° a 360° com passo de 45° . Uma amostra quadrada com uma espessura fixa também foi usada. Os resultados mostram que o sistema proposto é um dispositivo promissor que pode ser aplicado para a avaliação experimental de anisotropia magnética em aços. A abordagem proposta é considerada um ensaio não destrutivo e mostrou-se capaz de determinar a direções de fácil magnetização do aço estudado, mesmo em amostras com diferentes geometrias. A região estudada pertence a de perdas de baixa indução e mostrou ser sensível para determinação da anisotropia magnética, ao contrário de outros trabalhos que somente relatam a detecção de anisotropia magnética na região de perdas de alta indução.

Palavras-Chave: Anisotropia Magnética. Região do Domínio Reversibilidade. Campo Induzido Magnético. Aço Sae 1045

ABSTRACT

The conventional manufacturing processes cause plastic deformation which leads to magnetic anisotropy of the material. It is important to find the best direction in which is easier the magnetic domains alignment. A deeper understanding of materials characterization under rotational magnetization conditions phenomena enables the engineers to optimize the overall volume, mass and performance of devices of electrical machines in industry. These directions can be obtained through destructives tests as the Epstein frame method and the Single Sheet Tester (SST) measurements in the irreversible domains region of the magnetization. At the present work, samples of rolled SAE 1045 steel (formed by perlite and ferrite microstructures) are submitted to an induced magnetic field in the reversibility region of magnetic domains, to detect the easy magnetic direction. These magnetic fields were applied to circular samples which have different thickness and the application angle varied from 0° to 360° with step of 45° . A square sample with a fixed thickness was also used. The results show that the proposed system can be a promisor device applied to the experimental evaluation of magnetic anisotropy in steels. The proposed approach is considered non-destructive and showed to be able to determine the easy directions of the steel studied, even in samples with different geometries. This studied region belonged to the low induction losses one and showed sensitive to magnetic anisotropy as not observe by others work that only reported in the high induced losses region.

Keywords— Magnetic Anisotropy. Reversibility Domain Region. Induced Magnetic Field. SAE 1045.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Disposição aleatória de domínios magnéticos dentro de um material (HOLANDA, 2012)	20
Figura 2.2	Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos (SERNA-GIRARDO, 2007)	20
Figura 2.3	Curva de magnetização característica para aços (NASCIMENTO, 2011)	21
Figura 2.4	Subdivisão da perda histerética nas componentes de alta indução (acima de $B(\mu_{\text{máx}})$) e baixa indução abaixo de $B(\mu_{\text{máx}})$ (Landgraf, 2011).	22
Figura 2.5	Comportamento angular das perdas histeréticas de alta Indução e de baixa indução(LANDGRAF, 2001).	23
Figura 2.6	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).	24
Figura 2.7	Curvas de magnetização para cristais cúbicos de Fe e Ni (adaptado de CULLITY, 1972).	26
Figura 2.8	Dipolos magnéticos não compensados dentro de um material (MEDEIROS, 2014).	27
Figura 2.9	Efeito das tensões de tração e compressão na curva de magnetização (CULLITY, 1972)	28
Figura 2.10	Quadro de Epstein (EMURA, 2001).	30
Figura 2.11	Variação das perdas totais P_{total} e da indução B_{50} com o ângulo de aplicação do campo magnético (LANDGRAF, 2015).	31
Figura 2.12	Equipamento clássico de ensaio Barkhausen (a) e amostra utilizada para análise do eixo de fácil magnetização do material (b) (adaptado de CALDAS-MORGAN <i>et al</i> , 2012)	32

Figura 2.13	Esquema do goniômetro usado para determinar a dependência angular do aço estudado em função da energia do ruído magnético de Barkhausen (MARTINEZ-ORTIZ, 2015)	33
Figura 2.14	Dependência angular da energia RBN (MARTINEZ-ORTIZ, 2015)	34
Figura 2.15	Simulação pelo Método dos Elementos Finitos da interação entre densidade de fluxo magnético e a microestrutura ferrita mais perlita (MARTINEZ-ORTIZ, 2015).	35
Figura 2.16	Tipos de sensores magnéticos e suas faixas de detecção (TAMARA,1998).	36
Figura 2.17	Efeito Hall (a) produção do diferencial de potencial (b) relação da direção do campo magnético aplicado com o campo elétrico e a força magnética produzida (LUZ, 2007).	38
Figura 2.18	Sensor de efeito Hall típico (adaptado de Honeywell, 2004).	39
Figura 2.19	Funções de transferências típicas do sensor SS495A (adaptado de HONEYWELL, 2004).	39
Figura 2.20	Curva típica de saturação de sensores Hall (ALLEGRO, 2012).	41
Figura 2.21	Variação da tensão Hall com o deslocamento entre sensor e a fonte produtora do campo magnético (ALLEGRO, 2012).	41
Figura 3.1	Geometria das amostras dos Tipos 1, 2 e 3	42
Figura 3.2	Equipamento experimental 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	43
Figura 3.3	Equipamento de ensaio (GSCMat, IFPB, PB): (1) Fonte de alimentação; (2) bancada; (3) placa de aquisição de dados; (4) computador; (5) Multímetro	44
Figura 3.4	Princípio de funcionamento da técnica de ensaio proposta: (1) Alimentação do solenóide; (2) solenóide; (3) núcleo do solenóide; (4) sensor Hall; (5) amostra	45
Figura 3.5	Esquema de posicionamento da bobina, sensor Hall e amostra para estudo do efeito da espessura do material	46
Figura 3.6	Posição da medição de B versus H no centro e na proximidade da borda das amostras Tipo1	46
Figura 3.7	Preparação da amostra para medições intermitentes de campo	48

Figura 4.1	Curva de magnetização para as amostras Tipo 1 – SAE 1045(SILVA,2014).	49
Figura 4.2	Variação do campo magnético induzido em função da intensidade de campo magnético (campo externo) para amostras de 8 mm de espessura.	51
Figura 4.3	Campo induzido no centro e na borda para amostras Tipo1 de aço SAE 1045 para H de 282 A/m (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro)	52
Figura 4.4	Curva de magnetização para amostras do Tipo 1 do aço SAE 1045 para amostra com 12mm de espessura.	54
Figura 4.5	Curva de magnetização para amostras do Tipo 1 do aço SAE 1045 para amostra com espessuras: a) 2mm; b) 4mm; c) 6mm e d) 8mm.	54
Figura 4.6	Medidas de campo magnético induzido em função do ângulo de rotação das medições no centro e a 6 mm deste (borda).	57
Figura 4.7	Variação do campo magnético induzido em função da espessura das amostras, para um campo externo de 282 A/m.	62
Figura 4.8	Campo magnético induzido em função do ângulo de rotação para amostra de 12 mm de espessura e seção quadrada	63
Figura 4.9	Variação do campo induzido em função dos diâmetros das amostras e diagonais.	64
Figura 4.10	Micrografia óptica da superfície estudada. As regiões claras são ferrita e a escura o constituinte perlita (ferrita + cementita).	66
Figura 4.11	Variação do tamanho médio da ferrita em função do ângulo de rotação.	67
Figura 4.12	Microscopia eletrônica de varredura da superfície estudada. Detalhe da estrutura lamelar do constituinte perlita.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Aplicação de sensores de baixo, médio e alto campo (TAMARA, 1998).	37
Tabela 3.1:	Especificações do solenóide	44

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Campo magnético induzido
Br	Remanescência
D	Tamanho dos grãos
DL	Direção de laminação
END	Ensaios não destrutivos
G	Gauss
GNO	Grãos não orientados
GO	Grãos orientados
H	Campo magnético aplicado
Hc	Campo coercitivo
HD	Campo desmagnetizante
L	Comprimento do solenoide
MBRC	Método Barkhausen de rotação contínua
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
Ms	Magnetização de saturação
N	Número de espiras
NBR	Norma Brasileira
Pa	Perda anômala
Ph	Perda por histerese
Pp	Perda por corrente parasita
RMB	Ruído magnético de Barkhausen
SAE	Society of Automotive Engineers
Ss	Sensibilidade do sensor Hall
T	Tesla
Vh	Tensão Hall
Vn	Tensão de polo norte
Vs	Tensão de polo sul
θ	Ângulo entre B e a perpendicular à superfície do material

Φ	Fluxo magnético
μ	Permeabilidade magnética do material
μ_0	Permeabilidade do vácuo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS...	19
2.1.1	Efeito da microestrutura e composição química nas perdas magnéticas.	23
2.2	ANISOTROPIA.....	25
2.2.1	Anisotropia magnetocristalina.....	25
2.2.2	Anisotropia de forma.....	27
2.2.3	Anisotropia por deformação.....	27
2.2.4	Anisotropia induzida.....	28
2.3	ESTUDO DA DIREÇÃO DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO.....	29
2.4	SENSORES MAGNÉTICOS.....	36
2.4.1	Sensor de efeito Hall.....	38
3	<u>MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	42
3.1	MATERIAL.....	42
3.2	EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE.....	43
3.3	ENSAIO EXPERIMENTAL.....	44
3.4	DESCRIÇÃO DO ENSAIO.....	45
3.4.1	Estudo do efeito da espessura do material.....	45
3.4.2	Estudo do efeito de borda.....	46
3.4.2.1	Determinação do campo ideal.....	47
3.4.3	Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra (ϕ).....	47
3.4.4	Estudo do formato da seção transversal da amostra.....	47
3.4.5	Estudo do efeito da anisotropia do material.....	47
3.4.6	Análise microestrutural do material.....	48
4	RESULTADOS.....	49
4.1	ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA E DE BORDA DO MATERIAL.....	49
4.2	DETERMINAÇÃO DO CAMPO IDEAL.....	52
4.3	ESTUDO DA ANISOTROPIA MAGNÉTICA.....	56

4.4	ESTUDO DO EFEITO DA GEOMETRIA DA SEÇÃO.....	62
4.5	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	64
5	CONCLUSÃO.....	68
	REFERÊNCIAS.....	69

INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END) são considerados uma técnica de análise preventiva por possibilitar a medição de propriedades específicas de peças ou componentes sem causar um dano permanente aos mesmos. A utilização desses pode levar a implantação de inspeção de lotes produzidos, garantindo confiabilidade e qualidade com um menor custo.

As técnicas END também podem ser utilizadas na detecção de anomalias mecânica, física e química de equipamentos e até materiais estruturais em serviço, 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 de impactos ambientais irreversíveis. Nestes casos, essas técnicas podem ser utilizadas para a criação de sensores de monitoramento contínuo de propriedades críticas em equipamentos e materiais em serviço, o que possibilita um acompanhamento integral e progressivo de sua condição (TAVARES, 1996; PINTO *et al.*, 1999).

O consumo atual de materiais ferromagnéticos, como o aço, na fabricação de produtos e equipamentos é cerca de 1,3 milhões de toneladas anual, motivo pelo qual as propriedades magnéticas têm sido usadas com frequência como medidas em ensaios END para verificar o comportamento ou examinar falhas de materiais. O aço SAE 1045 é utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior a dos aços de baixo carbono convencionais. Aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, entre outros. O estudo do comportamento do fluxo magnético tem sido estudado com resultados promissores na detecção da existência de descontinuidades tanto na superfície como de defeitos internos em materiais (EMURA, 2001).

Um exemplo do uso de materiais ferromagnéticos é o motor que é um conversor eletromecânico que possui princípios eletromagnéticos e converte energia elétrica em energia mecânica, porém essa conversão não é completa devido à existência das perdas ocasionadas no seu interior. Essas perdas estão relacionadas com o tipo de material utilizado e a tecnologia de fabricação dos motores.

As perdas nos motores e transformadores têm origem em dois fatores: perdas por histerese e perdas por correntes parasitas. A perda por histerese se refere à energia perdida pela inversão do campo magnético no núcleo à medida que a corrente alternada de magnetização

aumenta, diminui e muda de sentido. A perda por corrente parasita é resultante das correntes induzidas que circulam no material do núcleo. O aumento no rendimento dos motores está relacionado com a redução dessas perdas.

Os processos convencionais de fabricação, como forjamento, trefilação e laminação, provocam deformações plásticas que criam anisotropia magnética no material. A obtenção da direção de melhor facilidade de alinhamento de domínios magnéticos é importante para a redução de perdas por histerese. Os testes normatizados, para análise de anisotropia, são realizados para determinação do ângulo magnético de menor perda, utilizando-se campos magnéticos da ordem 1,5 T, o que promove modificação dos domínios magnéticos dos materiais. Isso provoca histerese no material, que dependendo do material, pode continuar magnetizado com maior ou menor intensidade.

A curva de magnetização de um material pode ser dividida em três regiões distintas. Para valores de até 0,1 T, tem-se uma região da curva linear e corresponde à região de reversibilidade na movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Acima dessa região e até o ponto de máximo de permeabilidade magnética, corresponde a região irreversível de movimento das paredes de domínio. Depois dessa e até a saturação tem-se a região de rotação de domínios magnéticos (SERNA-GIRALDO, 2007). Estudos de anisotropias em aços para fins elétricos têm sido realizados através de END com campo magnéticos induzidos de 1,5 T, na região irreversível de movimento de paredes de domínio (LI-HONG, 2004; PRAXEDES, 2012). No presente trabalho, é realizado o estudo de anisotropia na região de reversibilidade dos domínios magnéticos. Deste modo, a aplicação a campos abaixo de 0,1 T, resultará em uma configuração mais simples que poderá ser aplicada em geometrias de menores dimensões e sem a necessidade de remoção de corpos de prova do material. O ensaio é não destrutivo e pode ser executado na peça em serviço.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um ensaio não destrutivo para determinação da anisotropia magnética em materiais, com a aplicação de campos magnéticos na região de reversibilidade de domínios magnéticos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Estudar a anisotropia magnética em um material ferromagnético laminado e recozido;
- ii. Determinar o campo magnético ideal para ensaio;
- iii. Estudar a influência do efeito de borda das amostras nas medidas de anisotropia;
- iv. Correlacionar microestrutura com densidade de linhas de campo.

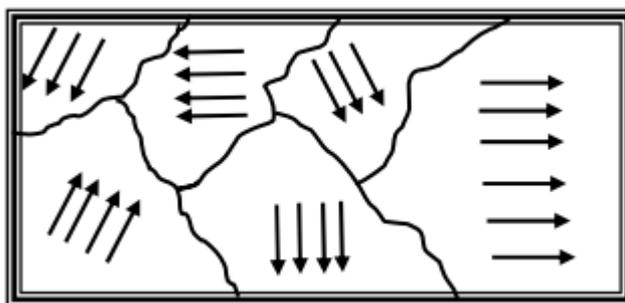
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre os materiais disponíveis, o ferro é o mais utilizado em motores e transformadores. O mesmo possui alta permeabilidade e é de baixo custo. É usado comercialmente em muitas estruturas de máquinas e dispositivos eletromagnéticos. O aço SAE 1045 estudado neste trabalho possui na sua microestrutura perlita fina e ferrita. As curvas de magnetização e histerese são as principais fontes de caracterização dos materiais magnéticos. Serão descritas as distintas regiões existentes no gráfico da curva de histerese. Em seguida será exposta a influência do efeito da microestrutura e da composição química nas perdas magnéticas. Mostrar-se-ão também que existem direções cristalográficas de fácil, média e difícil magnetização, bem como as técnicas utilizadas para sua detecção.

2.1 CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos podem existir, tanto no estado magnetizado quanto desmagnetizado, e isso se deve a orientação (alinhamento) dos momentos magnéticos atômicos ou moleculares no material. Cada átomo se comporta como um minúsculo ímã permanente e, eventualmente, se alinha paralelamente aos seus vizinhos em regiões dentro do material (FARIA, 2005). Tais regiões são denominadas de domínios magnéticos. O conceito de domínio tem sua origem na necessidade de explicar o comportamento de materiais magnéticos desmagnetizados, que mantêm magnetização espontânea diferente de zero. O fato é que embora certas regiões no interior do material estejam magnetizadas em uma direção, de forma espontânea, os domínios estão arranjados aleatoriamente uns em relação aos outros como mostrado na Figura 2.1.

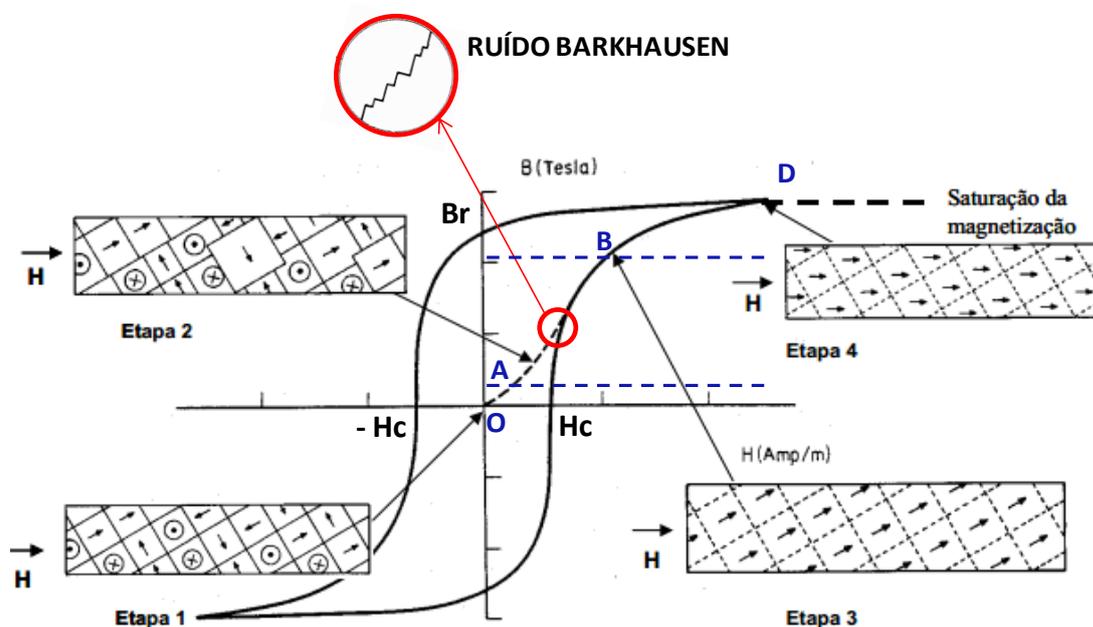
Figura 2.1: Disposição aleatória de domínios magnéticos dentro de um material.



Fonte: adaptada de HOLANDA , 2012.

O comportamento dos materiais ferromagnéticos é representado pela curva de magnetização, que relaciona duas variáveis: intensidade de campo magnético (H) e campo induzido magnético (B). Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 2.2.

Figura 2.2: Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos.



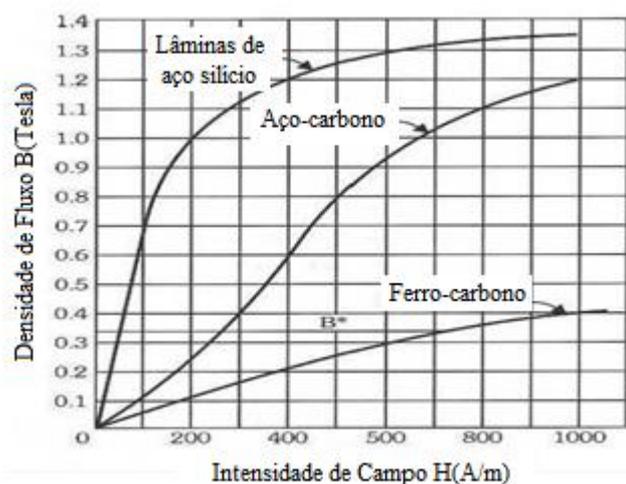
Fonte: adaptado de SERNA-GIRARDO, 2007.

Na Figura 2.2, H representa a intensidade de campo magnético, B o campo induzido magnético, B_r a remanescência e H_c o campo coercitivo (CULLITY, 1972; CALLISTER, 2002). A região O-A representa a faixa de deslocamento reversível das paredes de domínio magnético, onde os domínios estão orientados ao acaso e a aplicação de campos magnéticos de baixo valor não causa mudança na sua orientação (SERNA-GIRARDO, 2007). Já na região A-B, a aplicação de um campo magnético crescente é suficiente para favorecer o crescimento de

domínios orientados na mesma direção do campo aplicado, fazendo com que os mesmos domínios não favoráveis à aplicação diminuam ou desapareçam. Continuando aumentando o campo magnético, os domínios tendem a se orientar na direção do eixo de fácil magnetização mais próxima da direção de aplicação do campo, e posteriormente (região B-D) sofrem uma última rotação, agora, se alinhando na mesma direção do campo magnético aplicado (SERNA-GIRARDO, 2007). As regiões A-B e B-D são regiões de irreversibilidade da curva de magnetização, sendo B_r o campo remanescente 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.

A curva de magnetização de alguns aços é apresentada 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. Da análise da Figura 2.3, pode-se notar que, para aços-carbono, a permeabilidade pode ser considerada constante para campos induzidos da ordem de até 2000 Gauss (0.2 Teslas). Esta região corresponde a de reversibilidade dos domínios magnéticos.

Figura 2.3: Curva de magnetização característica para aços.

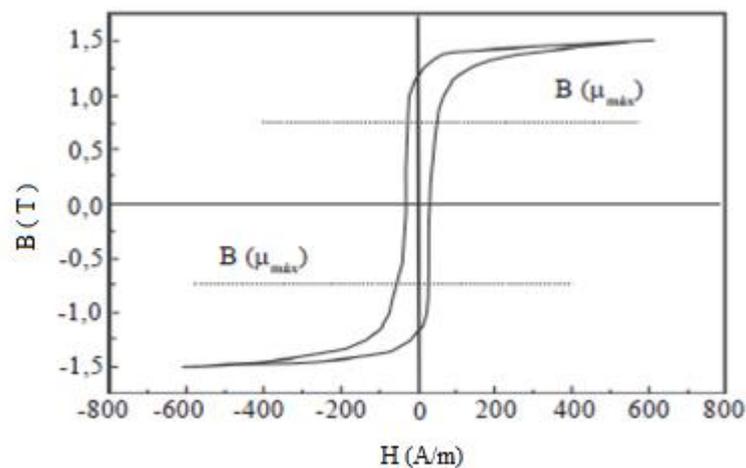


Fonte: NASCIMENTO, 2011.

Landgraf (2001) dividiu a curva de histerese magnética em duas regiões. O corte horizontal foi realizado no ponto de indução de remanência ou na indução da permeabilidade

máxima, conforme pode ser visto na Figura 2.4. Os valores de B abaixo da reta correspondem à região de baixa indução e os acima são de alta indução. A região de baixa indução corresponde à região do movimento das paredes dos domínios magnéticos e a de alta indução a de rotação dos domínios até a saturação. A Figura 2.4 mostra a curva de histerese magnética e a divisão dela nas duas regiões. Deste modo, ele pode dividir o estudo das perdas por histerese em de alta e baixa indução.

Figura 2.4: Subdivisão da perda por histerese nas componentes de alta indução (acima de $B(\mu_{\text{máx}})$) e baixa indução (abaixo de $B(\mu_{\text{máx}})$).

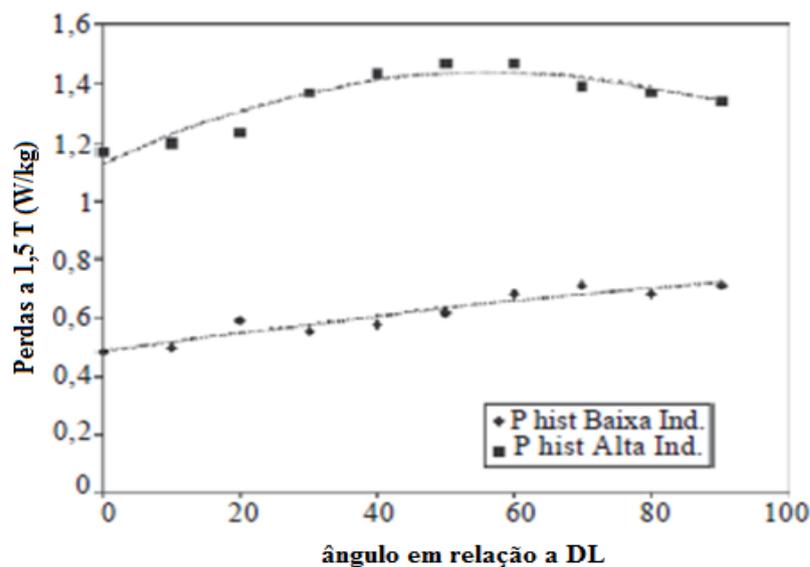


Fonte: LANDGRAF, 2001.

Tomando como base as duas regiões da curva de histerese, Landgraf (2001) estudou o comportamento angular das perdas por histerese em um aço de grão não-orientado com 3% de silício. Os resultados demonstraram, conforme pode ser observado na Figura 2.5, que o comportamento das perdas de histerese de baixa indução é continuamente crescente com o ângulo de aplicação do campo de 1,5 T, enquanto que a componente de perdas por histerese de alta indução passa por um máximo a 55° , indicando associação deste último componente com a textura do material. Deste modo, a região de baixa indução não é sensível à textura do material. Além disso, a Figura 2.5 mostra também que as perdas de baixa indução são substancialmente menores que as perdas de alta indução, nesse material. As perdas por histerese foram também correlacionadas com a direção de fácil magnetização e notou-se que a direção de laminação (DL) era a de fácil magnetização e a de 55° a de difícil. Deste modo as direções

de maiores e menores perdas magnéticas podem ser correlacionadas com as direções de difícil e fácil magnetização.

Figura 2.5. Comportamento angular das perdas por histerese de alta indução e de baixa indução, Aço GNO 3% Si.



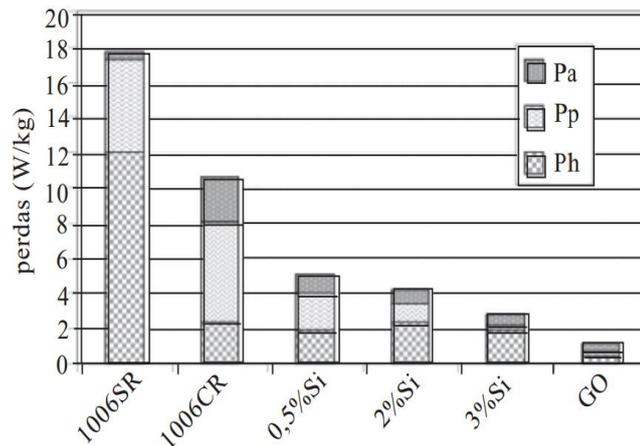
Fonte: LANDGRAF, 2001.

2.1.1 Efeito da microestrutura e composição química nas perdas magnéticas

As propriedades magnéticas de aços para fins eletromagnéticos são influenciadas por cinco variáveis: composição química, distribuição de precipitados, tamanho de grãos, densidade das discordâncias e a orientação cristalográfica (GIROTO, 2010; LANDGRAF, 2001; FUKUHARA, 2010). Cada uma dessas variáveis podem influenciar nas perdas magnéticas, que são de origem histeréticas, parasitas e anômalas, conforme ilustrado na Figura 2.6 e fazem com que os equipamentos elétricos tenham uma baixa eficiência energética.

A Figura 2.6 mostra o efeito da microestrutura e composição química nas perdas magnéticas. Nesta é apresentado um aço 1006 sem e com recozimento, onde a diferença é que após o recozimento tem-se a eliminação do excesso de discordâncias, mostrando assim o efeito das discordâncias e tamanho de grão. Os aços com 0,5% Si, 2% Si e 3% Si são apresentados para análise do efeito da composição química e GO tem como função o estudo do efeito da orientação cristalográfica.

Figura 2.6 Perdas magnéticas totais e suas componentes por histerese (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).



Fonte: LANDGRAF, 2001.

Da análise da Figura 2.6 pode-se ver que aços sem recozimento têm uma maior perda total quando comparados com os recozidos em virtude da quantidade de discordância aumentar a sua componente por histerese (Ph). Esta reduz após o recozimento para recristalização e crescimento de grãos. Já a adição do silício reduz cada vez mais a componente de perda parasita (Pp), pois a adição do Si aumenta a resistência elétrica do material. Por fim, aços GO (grãos orientados) que tenham silício em sua composição apresentam perdas significativamente menores, cerca de 1/18 das perdas totais, comparados com aços de grão não orientados e sem silício.

Landgraf (2001) relaciona as perdas de histerese e anômalas à microestrutura, enquanto que as perdas parasitas à composição química. 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 conseguido com a adição de elementos de liga

como o silício, o alumínio e a redução da espessura do material, o que justifica lâminas de transformadores cada vez mais finas.

2.2 ANISOTROPIA

Anisotropia é a característica que um material possui, de variar suas propriedades físicas com a direção cristalográfica. A anisotropia magnética consiste em variar as propriedades magnéticas com a direção. Do ponto de vista tecnológico, a anisotropia magnética é uma das mais importantes propriedades dos materiais magnéticos. Materiais com alta, média ou baixa anisotropia podem ser utilizados para diversas aplicações, como por exemplo: imãs permanentes, meios de armazenamento de informações, núcleos magnéticos em transformadores e cabeçotes de sistemas de gravação magnética.

Segundo Cullity (2009), a anisotropia pode ser dividida em:

1. Anisotropia magnetocristalina;
2. Anisotropia de forma;
3. Anisotropia por tensão;
4. Anisotropia induzida por: a) Recozimento magnético; b) Deformação plástica; c) Irradiação;
5. Anisotropia de troca;

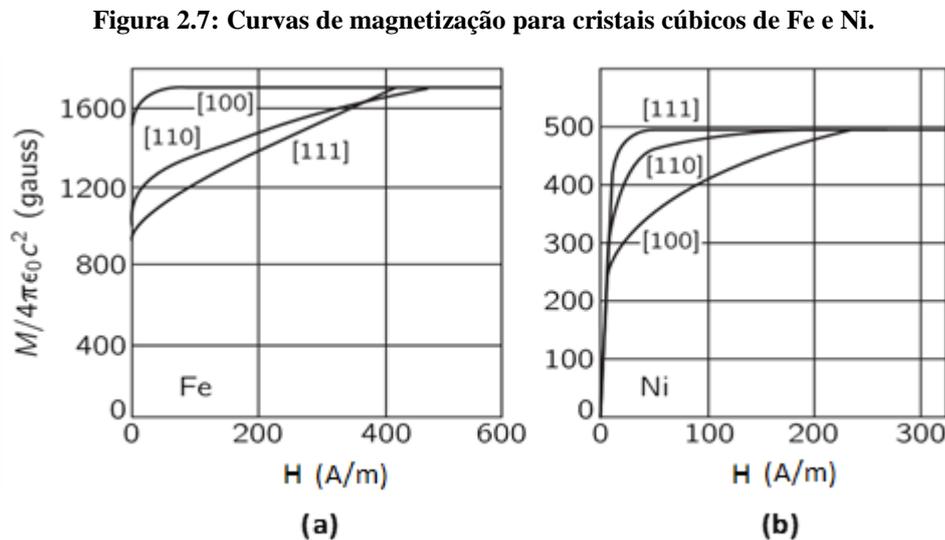
Dessas anisotropias, somente a magnetocristalina é intrínseca do material, sendo as outras induzidas.

2.2.1 Anisotropia magnetocristalina

A energia de anisotropia magnetocristalina está associada às direções de alinhamento preferenciais. Quando os momentos magnéticos estão orientados ao longo dessas direções a energia é mínima e o material apresenta o menor campo de saturação. Isso significa que, independentemente da direção, as perdas podem ser maiores ou menores. Como a redução das perdas é uma preocupação constante nos projetos elétricos é justificável se determinar, em cada

conjunto de cristais que formam determinado núcleo magnético, qual a direção em que se deve aplicar o campo magnético.

Cullity (1972) cita a anisotropia magnética como um dos fatores que afetam fortemente a forma das curvas B versus H, tornando as propriedades dependentes da direção na qual são medidas. Na Figura 2.7 pode-se ver a variação do comportamento das curvas de saturação para o ferro puro e níquel.



Fonte: adaptado de CULLITY, 1972.

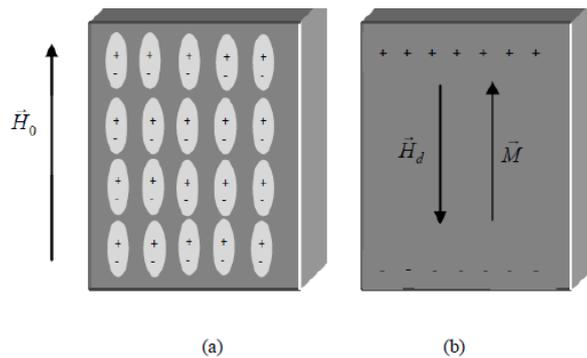
Da análise da Figura 2.7 (a) vê-se que a mais fácil magnetização do Fe ocorre na direção [100] que corresponde aos eixos [XYZ], onde valores de H da ordem de dezenas de Oe são suficientes para levar o material à saturação magnética, enquanto que na direção de difícil magnetização [111] campos maiores são necessários. Na Figura 2.7 (b) nota-se 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 2.7 pode-se ver que os valores dos campos de saturação magnética são os mesmos e independem da direção de magnetização para um mesmo material. 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 poder considerá-los como uma propriedade intrínseca do material.

2.2.2 Anisotropia de forma

Considerando uma amostra policristalina sem orientação preferencial e de forma esférica, o campo magnético irá magnetizá-la da mesma forma em todas as direções. Caso essa amostra não seja esférica, será mais fácil ocorrer a magnetização na direção do eixo de maior dimensão do que no de menor. A razão para isso é a existência de um campo de desmagnetização ao longo do eixo, sendo esse maior no menor eixo do que no de maior. A Figura 2.8 mostra como ocorre a formação do campo desmagnetizante devido a anisotropia de forma. Segundo MEDEIROS (2014), a anisotropia de forma, também conhecida como energia desmagnetizante, está ligada ao surgimento do campo desmagnetizante H_D , contrário ao campo magnético externo H_0 devido a presença de dipolos não compensados na extremidade do material. A energia desmagnetizante depende do número de dipolos não compensados, que está ligado ao formato da peça.

Figura 2.8: Dipolos magnéticos não compensados dentro de um material. a) Dentro da amostra os polos dos momentos magnéticos se cancelam e b) Na superfície não há cancelamento e surgem as cargas magnéticas.



Fonte: MEDEIROS, 2014.

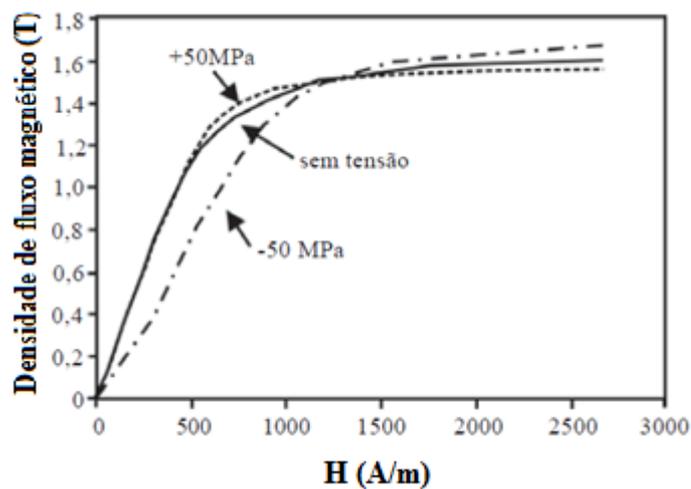
2.2.3 Anisotropia x deformação

Quando uma substância é exposta a um campo magnético, suas dimensões são afetadas. Esse efeito é chamado de magnetoestricção. Embora esta deformação seja pequena em muitos materiais magnéticos, sua existência significa que a aplicação de tensões mecânicas podem

alterar a estrutura dos domínios magnéticos e criar anisotropia por tensão. Esta pode levar a variações nos valores da permeabilidade magnética e remanência do material.

A Figura 2.9 mostra que para ferro policristalino, o efeito das tensões sob tração é desprezível até 1,0T, aumenta a permeabilidade entre 1,0 e 1,5T, e diminui a permeabilidade acima de 1,5T. Já as tensões de compressão diminuem significativamente a permeabilidade até 1,5T.

Figura 2.9: Efeito das tensões de tração e compressão na curva de magnetização.



Fonte: adaptado de CULLITY, 1972.

2.2.4 Anisotropia induzida

Anisotropias podem ser induzidas em materiais através da aplicação de tratamentos apropriados. Anisotropias magnéticas induzidas são aplicadas em estudos básicos de fenômenos magnéticos, bem como no desenvolvimento de materiais magnéticos para aplicações específicas.

O tratamento de recozimento aplicado em conjunto com um campo magnético, também chamado tratamento termomagnético pode induzir anisotropia. Certas ligas de Ferro e com silício, quando tratadas termicamente em um campo magnético e resfriadas, podem desenvolver uma anisotropia uniaxial permanente com o eixo paralelo a direção do campo durante o tratamento. Elas tornam-se mais fáceis de magnetizar nesta direção do que eram antes do

tratamento. Este tipo de anisotropia pode ser intensificado quando aplicamos simultaneamente ao tratamento térmico tensões ou deformação plástica. Estas induzem textura no material que facilitam a movimentação dos domínios magnéticos na direção de aplicação dessas, gerando assim uma direção preferencial de magnetização (CULLITY,1972).

2.3 ESTUDO DA DIREÇÃO DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO

Ensaio não destrutivo têm sido usados para caracterização de materiais e correlação entre microestrutura e propriedades (ALBUQUERQUE, 2010; DIEGO, 2016; FREITAS, 2010; NORMANDO, 2010). Propriedades magnéticas são afetadas por processamentos termomecânicos que produzem anisotropia nos materiais. Ensaio destrutivo como quadro de Epstein e testes de única amostra têm sido usados para determinar direções de maiores e menores perdas magnéticas, que estão relacionadas à direções de difícil ou fácil magnetização. Ensaio destrutivo e não destrutivo baseado na detecção de ruídos de Barkhausen também têm sido usados com esse propósito.

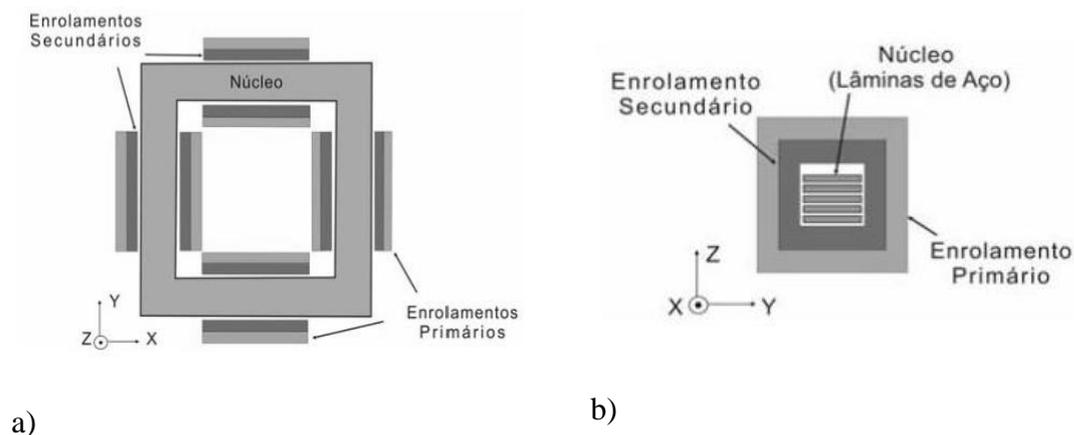
Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos tais como perda em núcleos e indução magnética dependem da microestrutura e textura, que são produzidas através de processamento termomecânico. Essas envolvem reaquecimento de materiais, deformações a quente e a frio, e recozimento final para recristalização (CHEN, 2014; EMURA, 2001; FRYSKOWSKI, 2008; QIN, 2015). Esses processos podem gerar anisotropia magnética no material, pois o comportamento do aço depende dos estados de tensão e deformação do material (CHWASTEK, 2013; CHERNENKOV, 2007; CLAPHAM, 1999; ELMASSALAM, 2011; FIORILLO, 2006).

Quando testam-se materiais ferromagnéticos policristalinos deve-se levar em consideração que as propriedades magnéticas dependem da direção em que são medidas e que existem certas orientações macroscópicas, nas quais o material é mais fácil de ser magnetizado (eixo de fácil magnetização) (CAPÓ-SANCHEZ, 2007; GALLAUGHE, 2015; MARTINEZ-ORTÍZ, 2015).

O quadro de Epstein é um dispositivo padrão para medições de propriedades magnéticas como permeabilidade e perdas magnéticas. Ele é usado para determinação de propriedades e é especialmente usado para testes de materiais elétricos. No caso de chapas de aços para transformadores o quadro de Epstein é usado em ensaio destrutivo de lotes de chapas (EMURA, 2001; FRYSHOWSKI, 2008; YONAMINE, 2004).

O quadro de Epstein é constituído por dois enrolamentos, sendo um primário e o outro secundário (EMURA, 2001). O enrolamento primário é responsável pela criação do campo magnético (ou da força magnetomotriz). O enrolamento secundário é responsável pela medida da densidade de fluxo magnético. As amostras de aço são colocadas no interior dos enrolamentos, formando o caminho magnético entre eles. A Figura 2.10 mostra a configuração do quadro de Epstein.

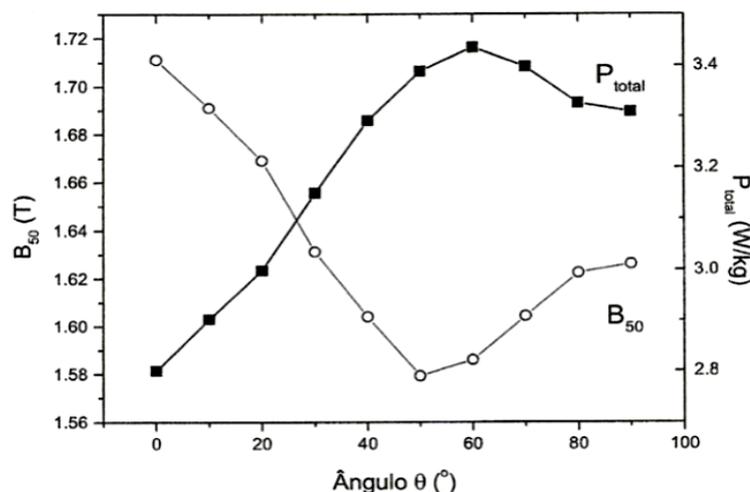
Figura 2.10: Quadro de Epstein: a) vista superior, b) vista em corte.



Fonte: EMURA, 2001.

Emura *et al.* (2001) estudou a anisotropia das propriedades magnéticas de um aço com 2% Si. A permeabilidade, perdas no núcleo e remanência foram analisadas por tiras de aço, pelo método de Epstein, cortadas em diferentes direções entre 0° a 90° , em relação à direção de laminação. Eles correlacionaram as menores e maiores perdas magnéticas com as direções de laminação como sendo a 0° e 54° , respectivamente. A direção de 0° foi considerada a de fácil magnetização. A Figura 2.11 mostra a variação da densidade de fluxo magnético e as perdas totais, em função da direção de medição. Nota-se os maiores valores de densidade de fluxo magnético na direção de 0° e os menores na direção de 54° .

Figura 2.11: Variação das perdas totais P_{total} e da indução B_{50} (5000 A/m) com o ângulo de aplicação do campo magnético (em relação à direção de laminação da chapa).



Fonte: LANDGRAF, 2003.

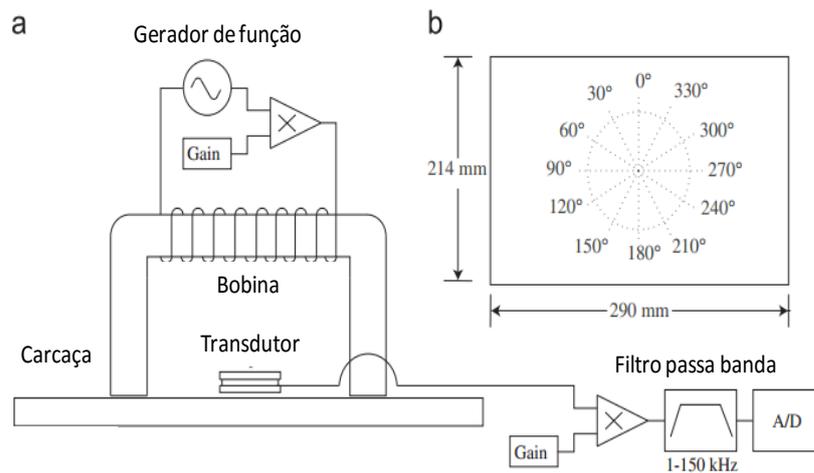
O comportamento magnético de muitos aços ferromagnéticos comerciais é geralmente anisotrópico e eles apresentam um eixo de fácil magnetização (CHWASTEK, 2013; CLAPHAM, 1999; CAPÓ-SÁNCHEZ, 2007; MARTINEZ-ORTIZ, 2015; BÜKKI-DEME, 2010; CALDAS-MORGAN, 2012). As mudanças na direção desse eixo estão relacionadas a variações mecânicas e anomalias que ocorrem durante o processo de fabricação.

Alguns trabalhos propõem novas técnicas não destrutivas, baseadas em sinais dos ruídos magnéticos de Barkhausen (RMB), para determinação da direção do eixo de fácil magnetização macroscópico. Eles também mostram a possibilidade da obtenção dos resultados em tempo real da anisotropia magnética (CAPÓ-SÁNCHEZ, 2013; CALDAS-MORGAN, 2012; PÉREZ-BENITEZ, 2007).

Quando submetidos a campos externos, os materiais ferromagnéticos 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 que produzem uma série de pulsos elétricos que podem ser captados por transdutores para isso construídos, formando o que se chama de ruído Barkhausen (SERNA-GIRARDO, 2007).

Caldas-Morgan *et al* (2012) propôs uma nova técnica para o estudo da anisotropia magnética em função da direção através de medidas de RMB, esta foi denominada de Método Barkhausen de rotação contínua (MBRC). Esta técnica foi utilizada para detecção do eixo de fácil magnetização de chapas de aço, utilizando o método de rotação do material. 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 2.12.

Figura 2.12: Equipamento clássico de ensaio Barkhausen (a) e amostra utilizada para análise do eixo de fácil magnetização do material (b).



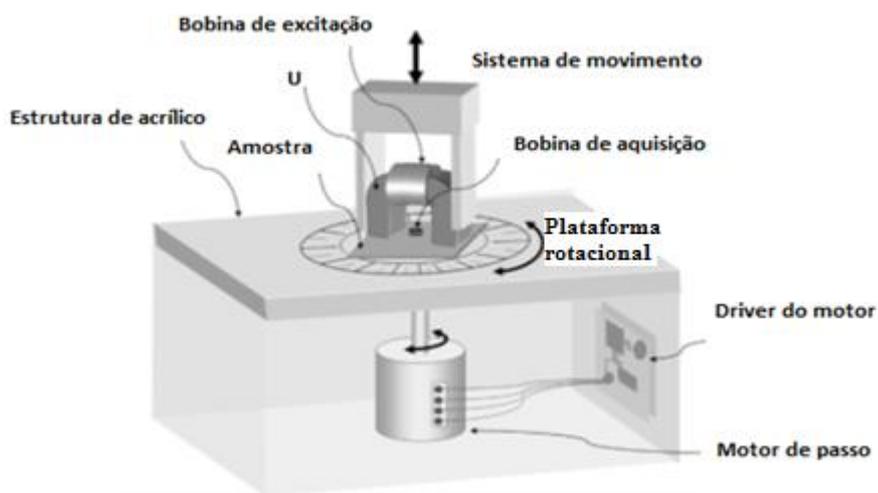
Fonte: adaptado de CALDAS-MORGAN *et al*, 2012.

Da análise realizada por Caldas-Morgan *et al* (2012), concluiu-se que os aços estudados apresentaram anisotropia magnéticas capazes de serem detectadas pela técnica de ruído Barkhausen e que o eixo de fácil magnetização é rapidamente detectável.

A técnica angular baseada no ruído magnético de Barkhausen também foi aplicada para caracterizar anisotropia magnética em aços para tubulação (CLAPHAM, 1999; MARTINEZ-ORTIZ, 2015). Clapham *et al*. (1999) mostraram ter dificuldade de achar uma correlação entre a textura cristalográfica e a dependência angular da energia do RMB e seus resultados indicaram que a deformação plástica e as tensões residuais são responsáveis pelo eixo de fácil magnetização.

Martinez-Ortiz *et al*. (2015) propuseram um método para determinação do eixo de fácil magnetização conforme a Figura 2.13.

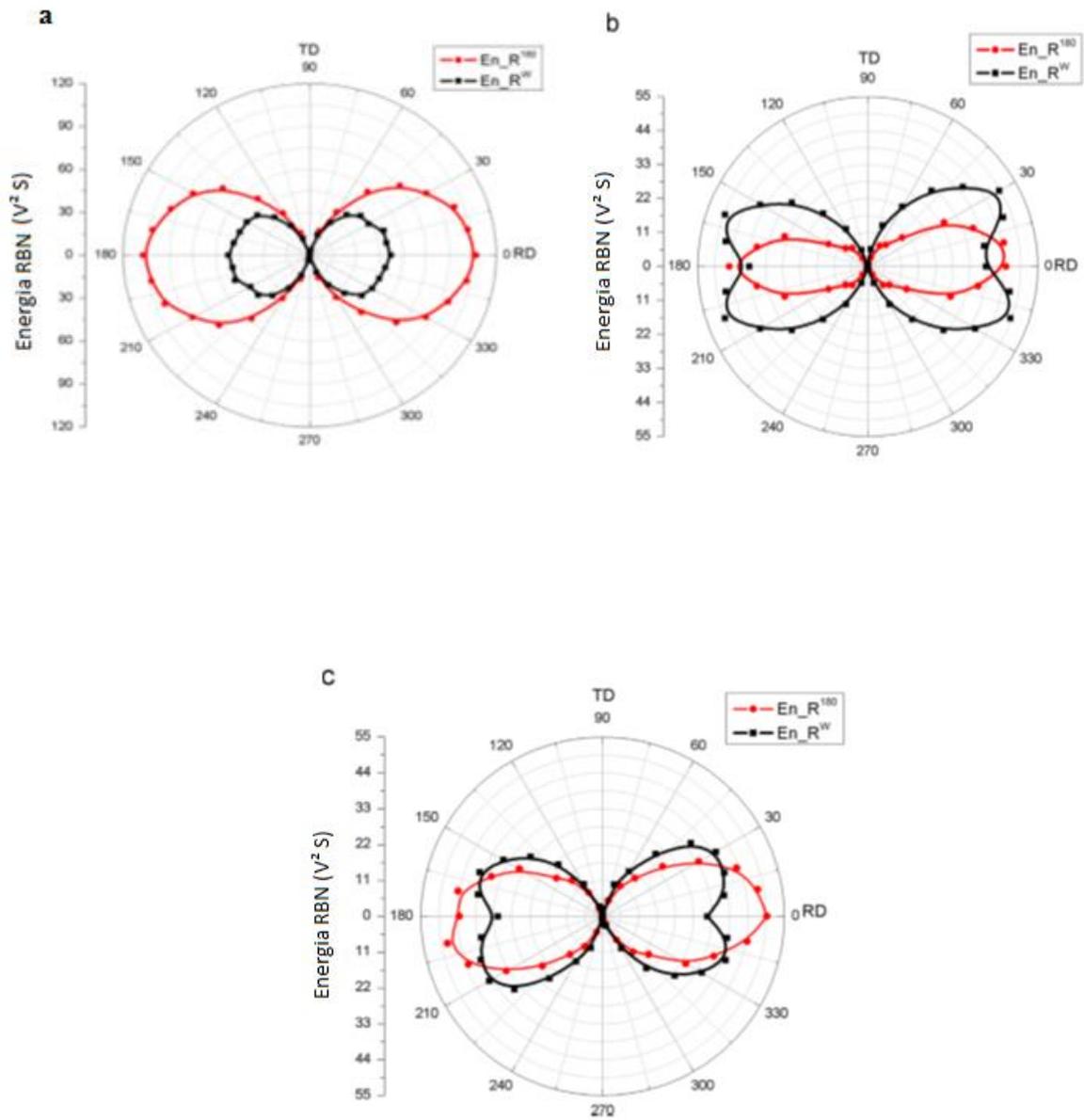
Figura 2.13: Esquema do goniômetro usado para determinar a dependência angular do aço estudado em função da energia do ruído magnético de Barkhausen.



Fonte: MARTINEZ-ORTIZ, 2015.

A Figura 2.14 mostra a dependência angular do ruído magnético de Barkhausen para as regiões R^{180} e R^w denominada energia R^{180} (anisotropia magnetocristalina) e energia R^w , (movimentação das paredes dos domínios magnéticos), respectivamente. Mostrando a formação de curvas polares em forma de oito para matérias com mesma microestrutura. Martinez utilizou corrente alternada para geração do campo. Nota-se que os aços X52 e X60 apresentam dois eixos de fácil magnetização a 30° e -30° em relação à direção de laminação, não sendo observado para o aço X56. A dependência angular da energia R^{180} mostra uma variação na forma do número oito, para os três materiais, com a direção de fácil magnetização na mesma direção de laminação. A direção obtida pela R^w foi associada a anisotropia magnetocristalina e a de R^{180} foi associada a movimentação das paredes dos domínios magnéticos.

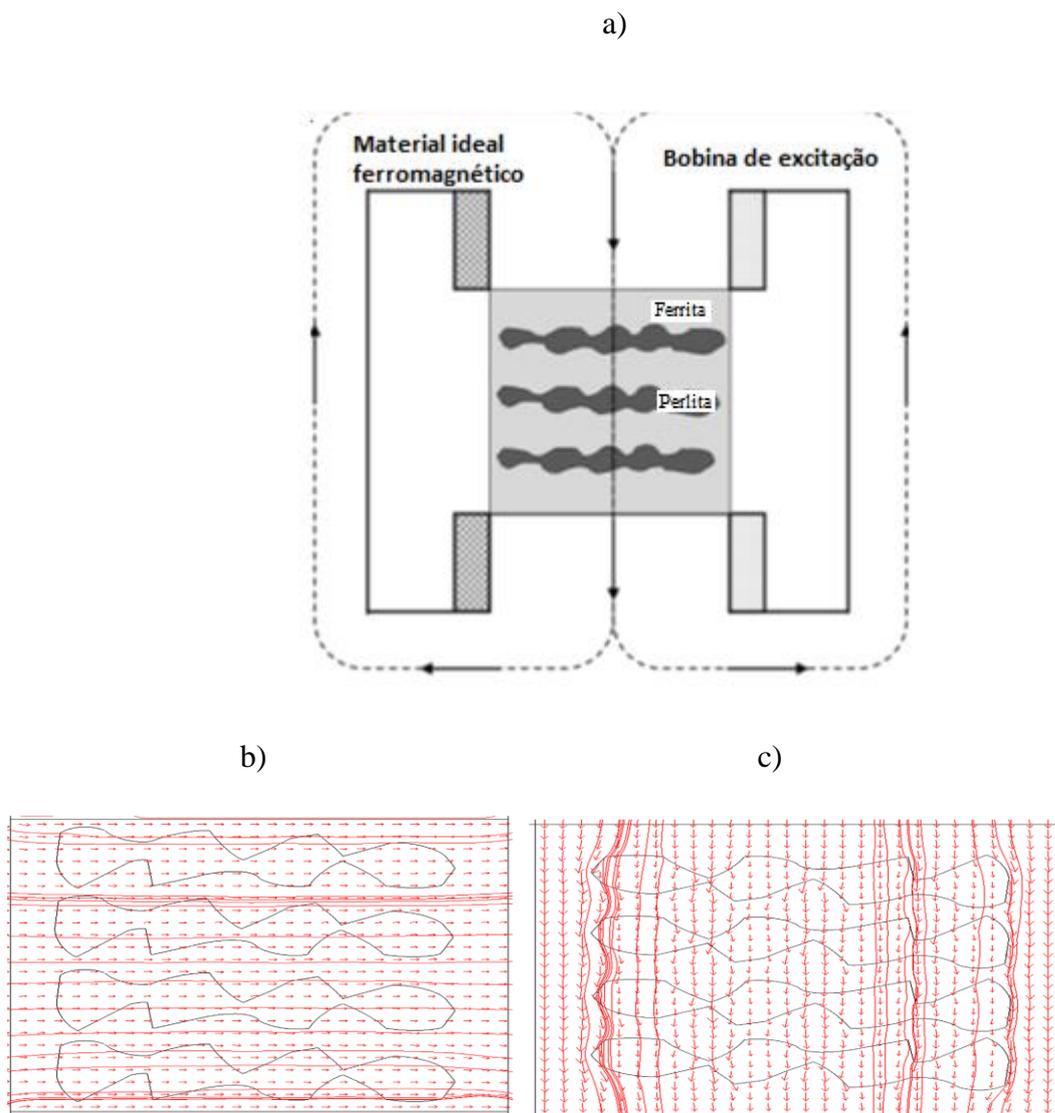
Figura 2.14: Dependência angular da energia RBN para as regiões R^{180} e R^w , denominadas $En_{R^{180}}$ e En_{R^w} , respectivamente para os aços: a) X56, b) X52, e c) X60.



Fonte: MARTINEZ-ORTIZ, 2015.

A Figura 2.15 mostra a simulação por elementos finitos da interação entre campo magnético e a microestrutura ferrita mais perlita dos aços X56, X52 e X60, (MARTINEZ-ORTIZ, 2015).

Figura 2.15 Simulação pelo Método dos Elementos Finitos da interação entre densidade de fluxo magnético e a microestrutura ferrita mais perlita. a) Representação da microestrutura. b) Simulação na direção de laminação. c) Simulação na direção transversal à laminação.



Fonte: MARTINEZ-ORTIZ, 2015.

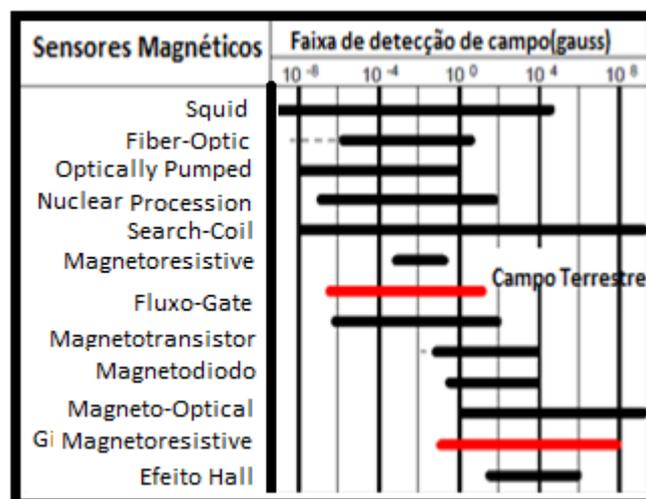
Observa-se na Figura 2.15 (b) que a densidade de linhas de campo tendem a passar mais facilmente pela estrutura ferrita do que na perlita. A ferrita possui um campo coercivo de 8 A/m, enquanto que a perlita tem um valor em torno de 160 A/m. Nota-se na Figura 2.5 (c) que as linhas de campo desviam em torno perlita devido ao seu papel desmagnetizante.

O estudo da interação entre intensidade de campo magnético aplicado e material depende da determinação do campo magnético induzido resultante e para isso são utilizados sensores de campo magnéticos. A Seção 2.4 mostra os diferentes sensores magnéticos e suas aplicações, bem como detalhamento do sensor a ser utilizado no presente estudo.

2.4 SENSORES MAGNÉTICOS

Os sensores magnéticos podem ser divididos em três categorias de detecção de baixos campos, médios campos e altos campos (TAMARA, 1998). Sensores que detectam campos magnéticos menores que 1 μ Gauss são considerados de baixos campos. Sensores que trabalham na faixa de 1 μ Gauss até 10 Gauss são considerados sensores de campos terrestre e acima disso de sensores de campo magnéticos de polarização. A Figura 2.16 mostra vários tipos de sensores e suas faixas de detecção de campo magnético (TAMARA, 1998).

Figura 2.16. Tipos de sensores magnéticos e suas faixas de detecção.



Fonte: TAMARA, 1998.

Os sensores de baixo campo são mais utilizados para aplicações médicas e militares. Nesses sensores a variação diária do campo magnético terrestre pode gerar variações superiores a sua faixa de medição, o que deve ser considerado. Os sensores de médio campo usam o campo magnético terrestre como fonte. A faixa de medição é de 1 μ Gauss até 10 Gauss. Para campos acima de 10 Gauss têm-se os sensores de alto campo que são os mais utilizados na indústria e podem usar ímãs magnéticos como fontes de campo magnético. A Tabela 2.1 mostra os diversos sensores e suas aplicações.

Tabela 2.1- Aplicação de sensores de baixo, médio e alto campo.

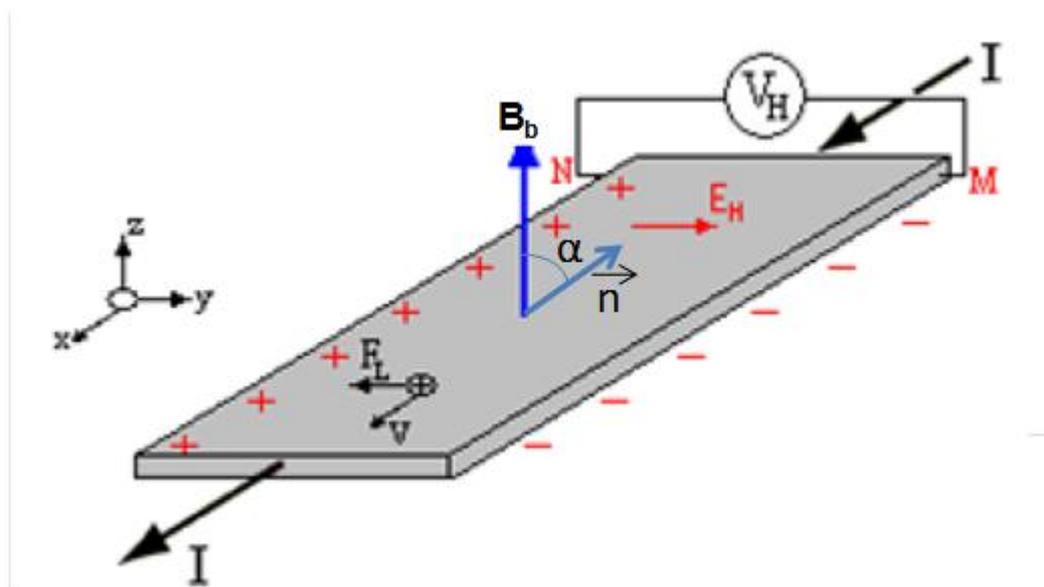
	SENSORES	APLICACÕES
BAIXO CAMPO	Squid (Dispositivo de interferência quântica supercondutora)	Detecção de campo neuromagnético do cérebro humano.
	Seach coil – bobina de pesquisa	Controle de sinais de trânsito.
	Fiber-Optic Optically Pumped Nuclear Precession	Instrumentos de precisão utilizados em laboratórios de pesquisa e aplicações médicas.
MÉDIO CAMPO	Fluxgate	Sistema de navegação, prospecção geofísica, mapeamento de campo magnético transportado pelo ar.
	Magnetoinductive	Bússulas de navegação
	Anisotropic Magnetoresistive	Cabeça para leitura de discos, detecção de corrente, detecção de velocidade de rodas automotivas, navegação.
ALTO CAMPO	Magnetotransistor Magnetodiode Magneto-Optical Sensor Giant Magnetoresistive Hall-Effect Sensor	Aplicações industriais como: detecção de proximidades, deslocamentos, referência de rotação entre outras.

Fonte: TAMARA, 1998.

2.4.1 Sensor de efeito Hall

O efeito Hall consiste na produção de uma diferença de potencial através de um condutor elétrico submetido a um campo magnético por onde circula uma corrente. Essa tensão é transversal a corrente no condutor e é perpendicular ao campo magnético. Esse princípio se encontra ilustrado na Figura 2.17.

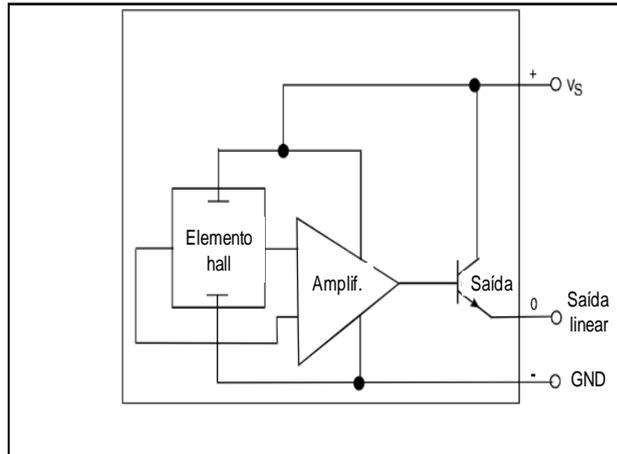
Figura 2.17: Efeito Hall.



Fonte: LUZ, 2007.

Os valores de tensão Hall produzidos são pequenos, da ordem de μV , motivo pelo qual os sensores Hall consistem comumente de um elemento Hall e de um amplificador diferencial (ALLEGRO, 2012; HONEYWELL, 2004). Um esquema interno básico de um sensor Hall pode ser observado na Figura 2.18.

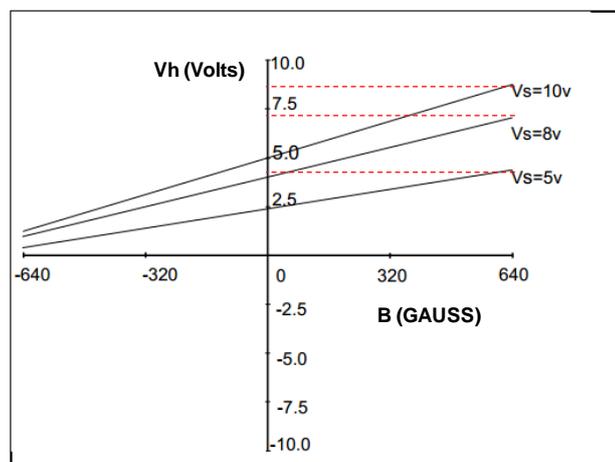
Figura 2.18: Sensor de efeito Hall típico.



Fonte: adaptado de HONEYWELL, 2004.

Valores de B pequenos podem ser medidos com sensores lineares de baixo custo, como os da série SS49, da *AllegroMicrosystems*. Sua sensibilidade é da ordem de 3,125 mVolts/Gauss. Esse sensor pode ser alimentado com tensões entre 0 e 10V, e sua saída é proporcional à entrada. A curva de transferência característica do sensor modelo SS495A pode ser vista na Figura 2.19.

Figura 2.19: Funções de transferências típicas do sensor SS495A.



Fonte: adaptado de HONEYWELL, 2004.

A tensão V_S constante nos gráficos da Figura 2.19 representa 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 a seguinte relação inicial:

$$V_S - 2,5 = 2,5 - V_N \quad (2.1)$$

Para o sensor em questão, conforme apresentado em seu *Datasheet* (ALLEGRO, 2004), a relação entre o campo induzido e os valores V_S e V_N , podem ser dados pela seguinte relação:

$$B = (V_S - V_N)/2.S_s \quad (2.2)$$

Relacionando as equações 2.1 e 2.2, se encontra uma equação que permite relacionar a permeabilidade a características do sensor:

$$\mu = \frac{(V_S - 2,5).10^3}{S_s.H} \quad (2.3)$$

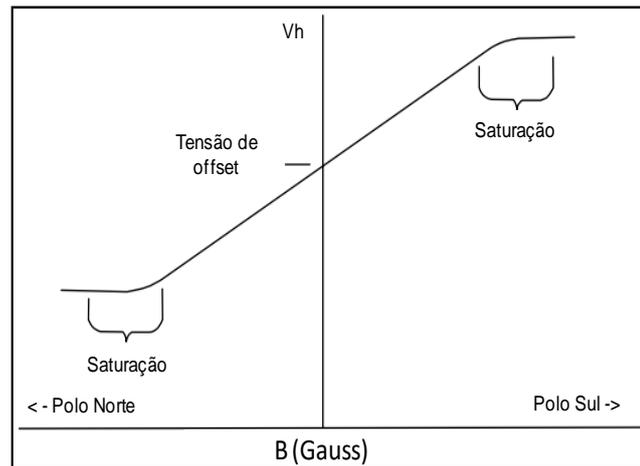
Em que: V_S é a tensão de saída (Volts)

S_s é a sensibilidade de saída do sensor (mVolts/Gauss)

H o campo magnético aplicado (Oe).

Se escolhida a função de transferência de 5V (vide Figura 2.19) ter-se-á uma tensão de saída Hall variando de 2.5 V (*offset*) até aproximadamente 5V. Campos acima desse limite levarão a saturação do sensor. Uma curva de saturação típica de sensores de efeito Hall pode ser vista na Figura 2.20.

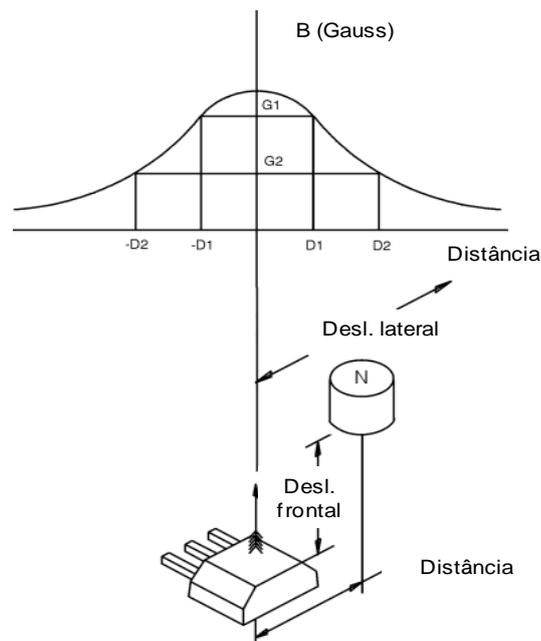
Figura 2.20: Curva típica de saturação de sensores Hall.



Fonte: adaptado de ALLEGRO, 2012.

Sensores de efeito Hall também são sensíveis a alterações na posição do campo aplicado, ou seja, afastar e aproximar este sensor da fonte do campo magnético, seja lateralmente ou frontalmente, causará alterações no valor de V_h . A Figura 2.21 ilustra esses efeitos.

Figura 2.21: Variação da tensão Hall com o deslocamento entre sensor e a fonte produtora do campo magnético.



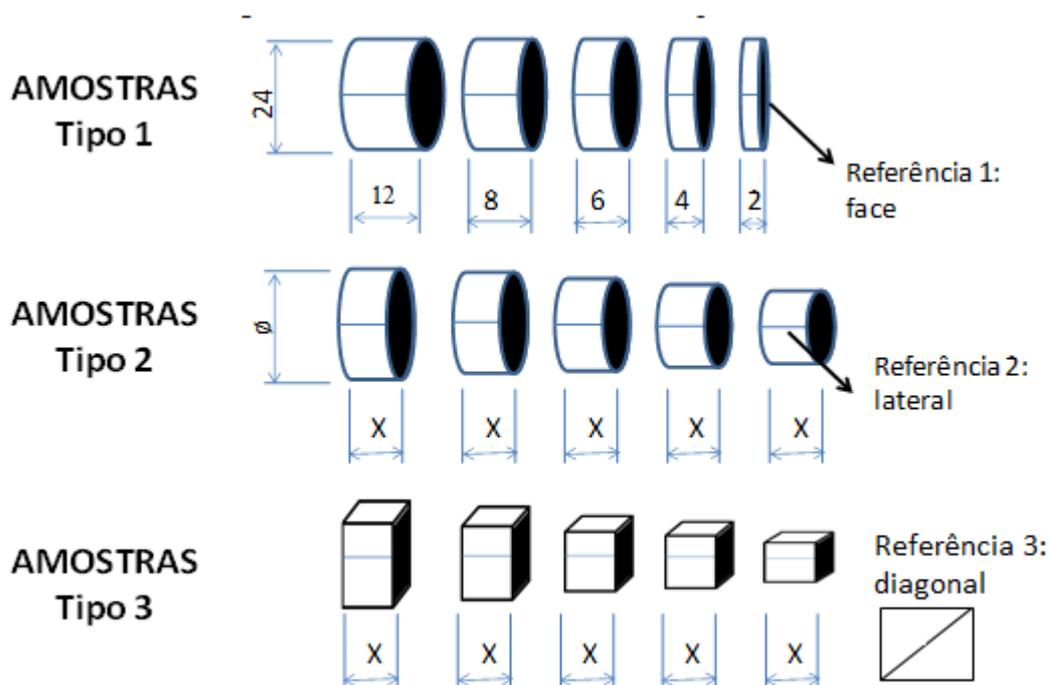
Fonte: ALLEGRO, 2012.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Neste trabalho um aço SAE 1045 foi escolhido para estudo. O material foi recebido na forma de vergalhão laminado com diâmetros de 30 mm. As amostras a serem estudadas foram identificadas como: Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, a depender de sua geometria. As diferenças entre esses tipos de amostras podem ser melhor compreendidas a partir da Figura 3.1. Essas amostras terão suas laterais e faces marcadas para garantir pontos de referência que permitam correlacioná-las durante e após a realização das medições.

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



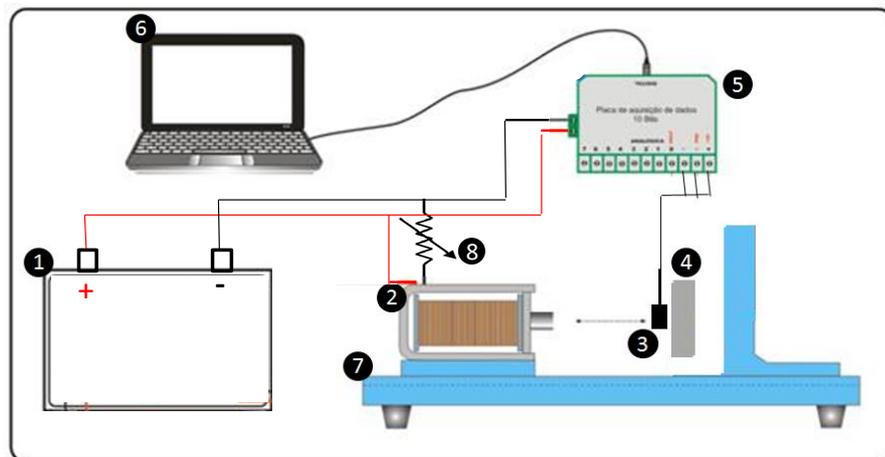
Da observação da Figura 3.1, vê-se que a variação da geometria das amostras consistirá em mudanças de espessura, diâmetro e formato da seção transversal. Para as amostras do Tipo 1 variar-se-ão apenas as espessuras, para um diâmetro prefixado de 24 mm. Para as amostras do Tipo 2, variar-se-á o diâmetro (\emptyset) entre 24, 20, 16, 12 e 8 mm, mantendo-se uma espessura fixa (8mm) a ser definida. Já para as amostras do Tipo 3, alterar-se-á o formato da seção

transversal para quadrado e variar-se-ão os valores de suas diagonais (L) entre 17, 14, 11, 8 e 5 mm, mantidas as espessuras fixas (8mm).

3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE

O equipamento de teste foi desenvolvido no laboratório do Grupo de Simulação 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.

Figura 3.2: Equipamento experimental 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.



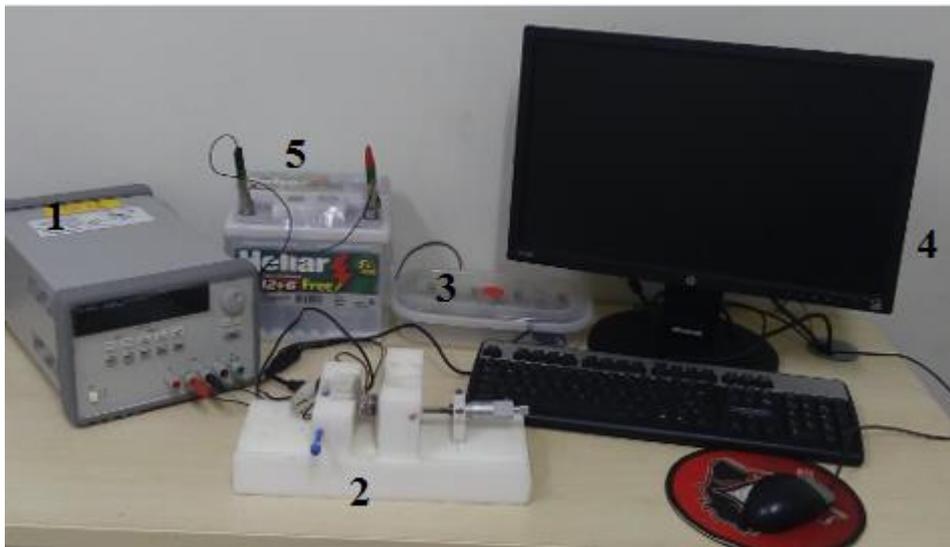
A alimentação do sistema se dá por uma bateria de 12V (dc) e 55A. O solenoide tem as especificações apresentadas na Tabela 3.1. O sensor escolhido é de efeito Hall linear modelo SS495A, da *AllegroMicrosystems*, com sensibilidade da ordem de 3,125 mVolts/Gauss e tensão de alimentação entre 0 e 10V, e é alimentado com uma tensão contínua de 5V. Uma placa de aquisição de dados multicanal é utilizada, a qual possui um conversor analógico-digital de 10 bits com taxa de amostragem de 0,5 amostra ms, uma entrada USB e uma saída regulada de tensão de 5V e é alimentada por uma tensão estabilizada de 12V. A saída regulada é utilizada na alimentação do sensor Hall. A bancada serve como base para fixação do solenóide e do sensor e é confeccionada em Poliacetal, material com baixo coeficiente de atrito e boa estabilidade dimensional.

Tabela 3.1- Especificações do solenóide

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

Uma foto do equipamento de ensaio com todos os seus itens é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3: Equipamento de ensaio (GSCMat, IFPB, PB): (1) fonte de alimentação; (2) bancada; (3) placa de aquisição de dados; (4) computador; (5) bateria.

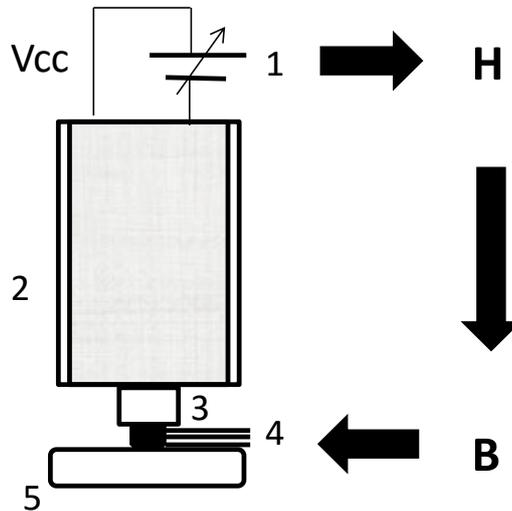


3.3 ENSAIO EXPERIMENTAL

A metodologia experimental busca o conhecimento de como as variáveis geometria e anisotropia microcristalina podem interferir nas respostas de campo magnético induzido (B) em um material ferromagnético, em função de um campo magnético aplicado (H). Além, disso é feito o estudo da direção de fácil magnetização do material em estudo e o efeito da geometria nessas medições.

O princípio de funcionamento da técnica consiste 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 3.4.

Figura 3.4: Princípio de funcionamento da técnica de ensaio proposta: (1) alimentação do solenóide; (2) solenóide; (3) núcleo do solenóide; (4) sensor Hall; (5) amostra.



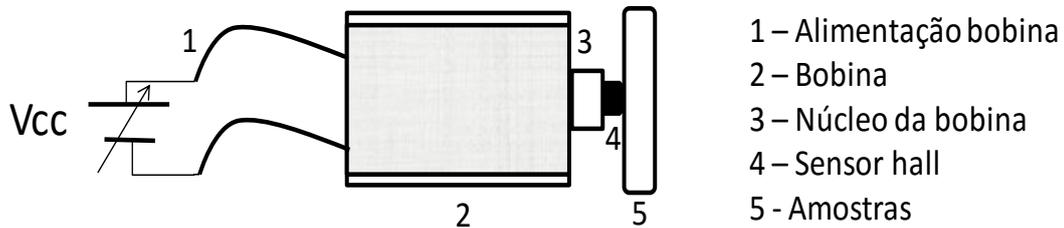
3.4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Estudo da influência do campo magnético aplicado, geometria e anisotropia para um material ferromagnético denominado de Aço SAE 1045.

3.4.1 Estudo do efeito da espessura do material

As amostras de aço SAE 1045 do Tipo1, diâmetro de 24 mm e espessuras de 2, 4, 6, 8 e 12 mm, são submetidas à aplicação de valores de H até a saturação do equipamento para se verificar o comportamento das curvas de magnetização B versus H . As medições serão realizadas no centro de cada amostra. Esse procedimento pode ser melhor entendido a partir do esquema apresentado na Figura 3.5.

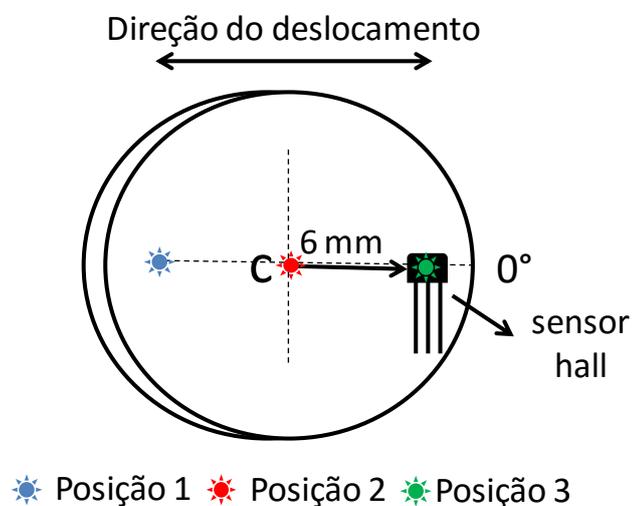
Figura 3.5: Esquema de posicionamento da bobina, sensor Hall e amostra para estudo do efeito da espessura do material.



3.4.2 Estudo do efeito de borda

Amostras do aço SAE 1045 do Tipo 1 são submetidas à aplicação de diferentes valores de H até a saturação do sistema e serão medidos os valores de B no centro e a 6 mm do centro, conforme a Figura 3.6. Com o resultado será verificada a influência da borda das peças sobre os valores de campo magnético induzido, já que a dimensão da peça pode ser um fator limitante à aplicação da técnica.

Figura 3.6: Posição da medição de B versus H no centro e na proximidade da borda das amostras Tipo 1.



3.4.2.1 Determinação do campo ideal

O campo ideal é determinado em função do campo externo aplicado até a saturação do sensor, que resulte na maior amplitude de medida entre centro e a 6 mm deste. Este será determinado com a utilização das amostras com diâmetro de 24 mm e diferentes espessuras.

3.4.3 Estudo da influência da variação de diâmetro da amostra (\emptyset)

Amostras do aço SAE 1045 Tipo 2, de diâmetros 24, 20, 16, 12 e 8 mm e espessura a ser determinada a partir dos resultados obtidos na seção 3.4.1 serão submetidas ao H ideal e os valores de B serão medidos. O menor diâmetro a partir do qual o valor de B sofrerá interferência B será determinado e representará a dimensão limite à utilização da técnica.

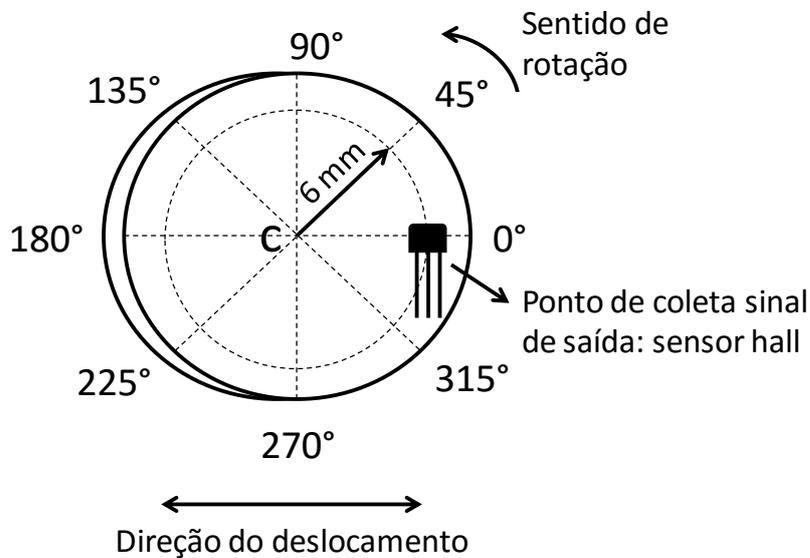
3.4.4 Estudo do formato da seção transversal da amostra

Amostras do aço SAE 1045 do Tipo 3 (quadradas), com lados de 17, 14, 11, 8 e 5 mm e espessura a ser determinada a partir dos resultados obtidos na seção 3.4.1 serão submetidas à aplicação do H ideal e os valores de B serão medidos. O impacto do formato da seção transversal nos valores de B possibilitará o conhecimento de como a seção transversal da amostra pode influenciar nos valores medidos e se este representa um limitante à utilização da técnica.

3.4.5 Estudo do efeito da anisotropia do material (Estudo da variação de B versus H com rotação da amostra)

Amostras do aço SAE 1045 Tipo 1 serão submetidas à aplicação de um valor de H e os valores de B serão medidos com a rotação das peças. A posição de cada medição será 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 serão realizadas exatamente a 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 e 360° . Isso possibilitará verificar a interferência que as medições com rotação da amostra causarão no valor do campo magnético induzido. O processo de preparação das amostras pode ser melhor entendido a partir da Figura 3.7.

Figura 3.7: Preparação da amostra para medições intermitentes de campo induzido.



3.4.6 Análise microestrutural do material

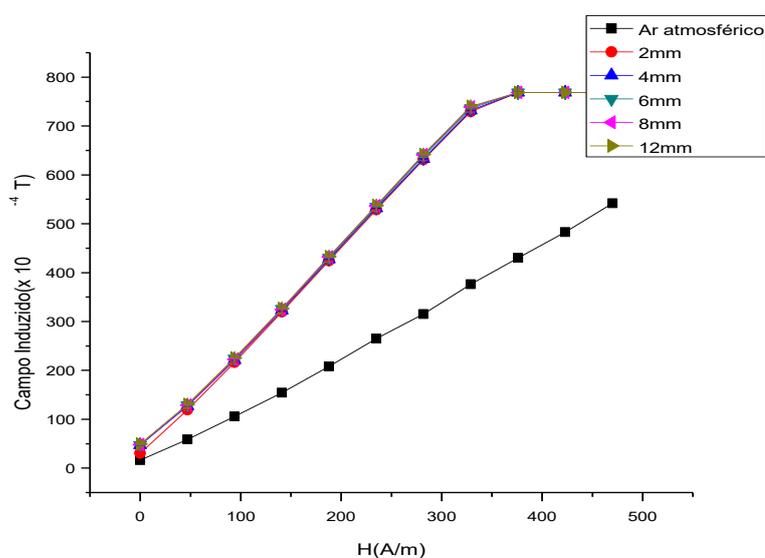
As amostras do aço SAE 1045 serão submetidas à análise metalográfica tanto no sentido longitudinal como transversal, para o estudo de suas microestruturas. Será utilizado um microscópio óptico NIKON FX 35XD com câmera acoplada. As imagens obtidas serão capturadas por um *software* de aquisição de imagem acoplado a um computador. As amostras de aço serão atacadas com Nital 2%. A microestrutura também será analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de modo a se observar detalhes que possam não ser observados por microscopia ótica, como detalhe do constituinte perlita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA E DE BORDA DO MATERIAL

O comportamento das curvas B versus H para amostras com diâmetro fixo e espessura variando de 2 a 12 mm (Tipo 1) do aço SAE 1045 pode ser visto na Figura 4.1.

Figura 4.1: Curva de magnetização para as amostras Tipo 1 – SAE 1045.



Fonte: SILVA (2014)

A curva de magnetização do aço SAE 1045 pode ser dividida em três regiões, só tendo um comportamento linear em sua primeira região, onde os valores de B são baixos, na faixa de centenas de Gauss, para o aço. Essa região corresponde à região de reversibilidade da movimentação das paredes dos domínios (SERNA-GIRALDO, 2007). Na faixa de trabalho escolhida, com resultados apresentados na Figura 4.1, a resposta de B em função de H foi linear para todas as espessuras das amostras Tipo 1, sendo o comportamento esperado na região de reversibilidade de sua curva de magnetização.

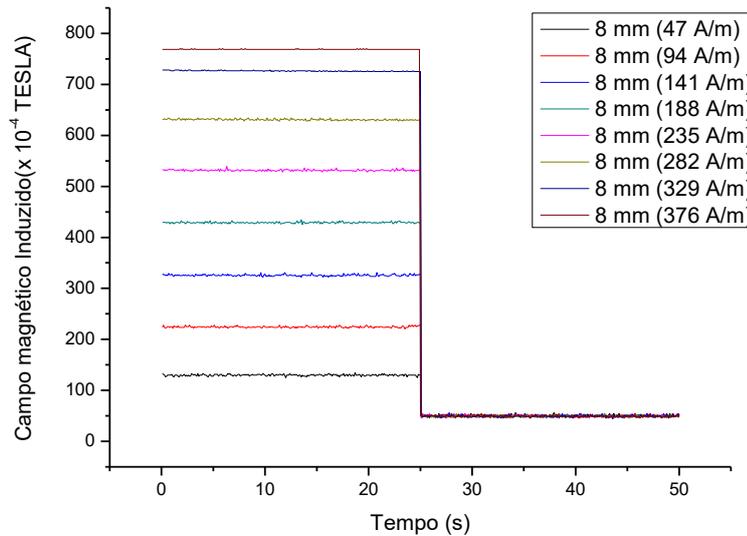
Ainda da observação da Figura 4.1 vê-se que para tensões aplicadas na bobina a partir de 300 A/m, ocorre à estabilização no valor de B em torno de 700 Gauss. Nesta faixa de trabalho

o valor de B ainda varia linearmente com o aumento no valor de H , mas não consegue ser captado pelo equipamento, em virtude de uma restrição do sensor utilizado, que satura para valores maiores que esse (HONEYWELL DIVISION, 2013). Por fim, pode-se observar na Figura 4.1 que as curvas de B versus H para o aço e para o Ar atmosférico apresentam valores e inclinações diferentes, apesar do mesmo comportamento linear. Em um material magnético, como o aço utilizado, os campos magnéticos se alinham formando regiões que apresentam magnetismo espontâneo, chamadas de domínios, que tendem a se neutralizar sem a ação de um campo magnético externo (MAGALHÃES, 2012), porém, a aplicação de um H crescente, produziu uma magnetização induzida em função da interação do campo magnético com os domínios, que fizeram com que os mesmos se alinhassem (CALLISTER, 2002). Como a permeabilidade magnética do aço é muito maior do que a do ar, o valor induzido foi maior, o que justifica variações em patamares tão diferentes.

Os materiais ferrosos são fortemente influenciados pelas ações dos campos magnéticos. A curva de magnetização possui três regiões distintas de movimentação das paredes dos domínios magnéticos. A região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos; a região de irreversibilidade; e a de rotação e saturação (WLODARSKI, 2006). Na região de reversibilidade o comportamento entre a intensidade de campo magnético e a densidade de linhas de campo é linear e uma vez sendo cessado o campo externo os domínios retornam a sua posição inicial sem deixar campo remanente (SERNA-GIRARDO, 2007). O presente trabalho foi realizado na primeira região de modo que se trabalhou na região de linearidade da curva de magnetização do material.

A Figura 4.2 mostra os valores de campos induzidos em função dos campos externos aplicados até a saturação do sensor, para a amostra de 8 mm de espessura e diâmetro de 24 mm. Nota-se que após a remoção do campo externo aplicado, os valores de campo induzidos voltaram ao mesmo valor inicial, antes da aplicação de campo, mostrando não haver campo remanente da magnetização e confirmando que o trabalho está sendo realizado na região de reversibilidade dos domínios magnéticos. Contudo, os valores de campo induzido sem a aplicação de campo externo foram de 40 Gauss. Este valor corresponde à amplificação do campo magnético local a partir da interação deste com o material ferromagnético estudado.

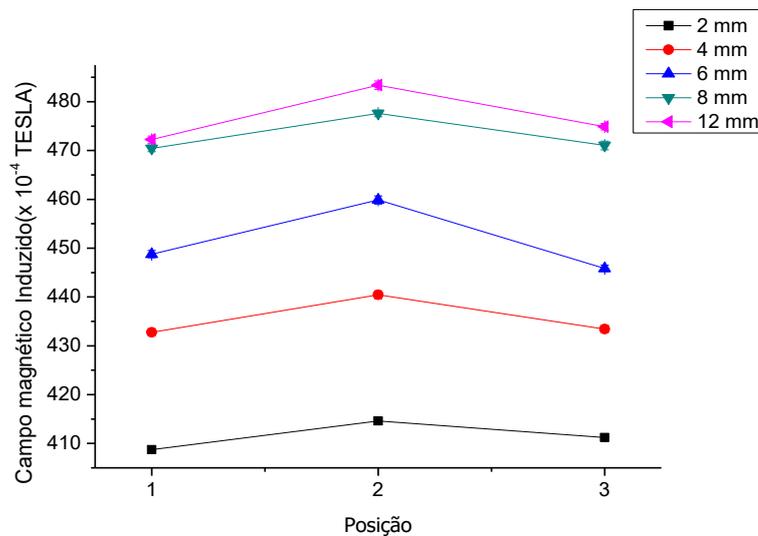
Figura 4.2. Variação do campo magnético induzido em função do tempo para amostra de 8 mm de espessura.



O estudo do comportamento das curvas B versus H no centro e na proximidade da borda é apresentado na Figura 4.3. O estudo foi realizado com a aplicação de uma intensidade de campo magnético de 282 A/m. Da análise da Figura 4.3 pode-se observar que ocorre o aumento do valor de B com o aumento da espessura e que este valor tende a se estabilizar a partir de determinada espessura. Ainda é possível notar que há uma variação do valor de B entre centro e borda.

O material utilizado em todas as amostras foi o aço SAE 1045, logo, não houve alteração da permeabilidade do material. O valor de H também foi mantido constante, logo, a densidade de linhas de campo magnético também se manteve inalterada. Sabe-se ainda, 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 quanto 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 no material, tornando-as cada vez mais concentradas e perpendiculares ao elemento Hall contido no sensor. Ao se utilizar espessuras acima 8 mm a maioria das linhas de campo já estavam concentradas e orientadas o bastante para não mais influenciarem no valor de B .

Figura 4.3: Campo induzido no centro e na borda para amostras Tipo 1 de aço SAE 1045 para H de 282 A/m (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro).



Com relação ao comportamento entre centro e borda, pode-se admitir que, para 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 solenóide) e a área ativa do sensor (área que contém o elemento Hall), causa variações perceptíveis nos valores de saída de tensão Hall (ALLEGRO, 2012). Pelo resultado apresentado na Figura 4.3, a amostra do aço SAE 1045 comportou-se da mesma forma, ou seja, os valores de B foram maiores na proximidade do centro da amostra, decaindo com a aproximação da borda. Isso se deu em função da perturbação da proximidade maior do meio externo, que é o ar que tem permeabilidade inferior e reduz a resultante destas.

4.2 DETERMINAÇÃO DO CAMPO IDEAL

A determinação da intensidade de campo magnético externo ideal a ser aplicado, para se obter a maior amplitude de medida na região de estudo, foi realizada aplicando-se campo até a saturação do sensor, em dois pontos distintos, no centro e a 6 mm dele, para as amostras com diferentes espessuras. O campo externo referente a maior amplitude na medida foi escolhido como campo ideal a ser utilizado.

A Figura 4.4 mostra as variações nos valores do campo magnético induzido (B) em função do campo magnético externo aplicado (H) para amostra com 12 mm de espessura. As

medidas foram realizadas no centro e a 6 mm deste, para valores de campos magnéticos externos até a saturação do sensor de efeito Hall utilizado. A Figura 4.4 também apresenta a diferença entre o campo magnético induzido medido no centro e a 6 mm deste, o qual foi denominado de amplitude de medida. Nota-se um aumento desta até um pico, seguida de uma redução. Esta redução se deve ao início da saturação do sensor de efeito Hall. Um valor de campo magnético externo de 282 A/m foi escolhido como o campo magnético ideal a ser aplicado para obtenção da maior amplitude de medida e não ser próximo o suficiente do ponto de saturação do sensor. O mesmo procedimento foi aplicado para as demais amostras com espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm, conforme apresentado na Figura 4.5 e o mesmo valor de campo ideal foi escolhido.

A Figura 4.5 mostra também um comportamento linear entre B e H , que corresponde à região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. Esta região corresponde à área da curva de magnetização onde os domínios estão orientados de forma aleatória e a aplicação de um campo magnético externo não causa movimentação permanente das paredes dos domínios magnéticos e nem campo residual (COEY, 2010; BRICAKOVA, 2015; LANDGRAF 2003). Esta região está também associada à zona de perdas de baixa indução que está relacionada à energia dissipada pelo deslocamento das paredes de domínios magnéticos (LANDGRAF, 1999; BRICAKOVA, 2015; LANDGRAF, 2003). Landgraf *et al.* (2003) associou a área entre as duas linhas de indução de máxima permeabilidade de uma curva de magnetização de um material, como região de perdas de histerese de baixa indução e a área complementar da curva acima e abaixo destas linhas, como região de perdas de histerese de alta indução. No presente trabalho, as medidas foram realizadas nas regiões lineares e de baixa indução de uma curva de magnetização, e um campo magnético externo de 282 A/m foi utilizado para o estudo da direção de fácil magnetização.

Figura 4.4: Curva de magnetização para amostras do Tipo 1 do aço SAE 1045 para amostra com 12 mm de espessura.

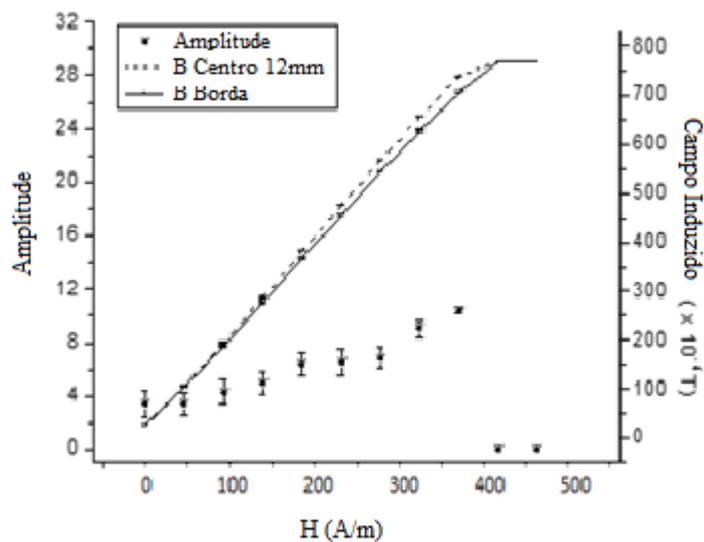
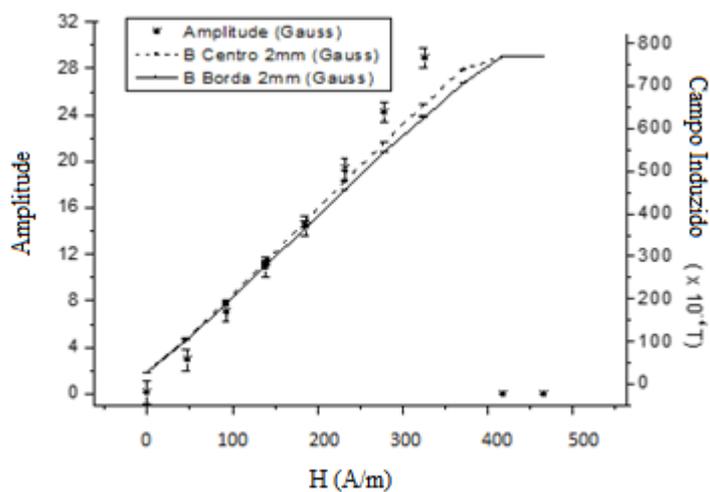
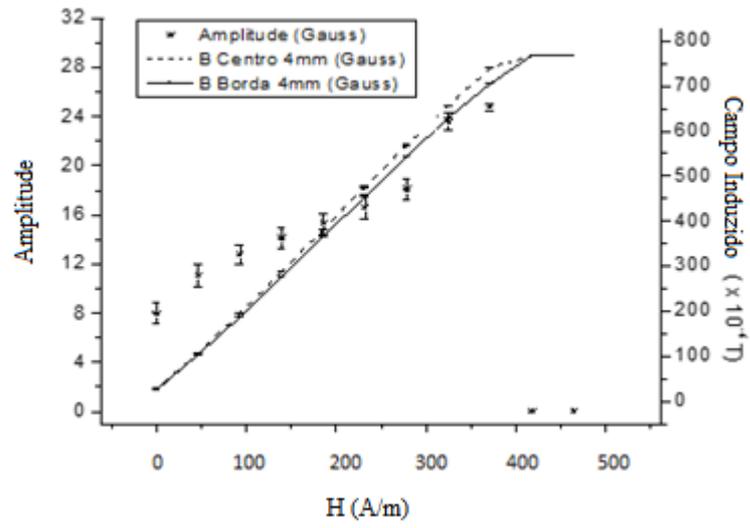


Figura 4.5: Curva de magnetização e amplitude para amostras do Tipo1 do aço SAE 1045, para amostras com espessuras de : a) 2mm, b) 4 mm, c) 6 mm e d) 8mm.

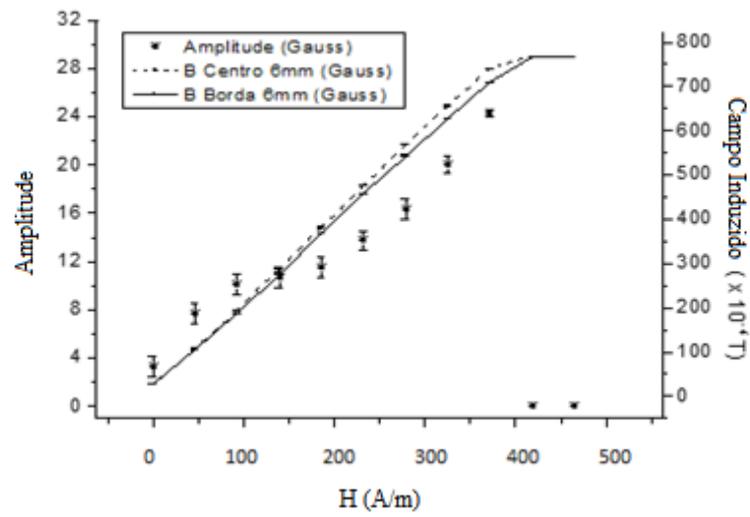
a)



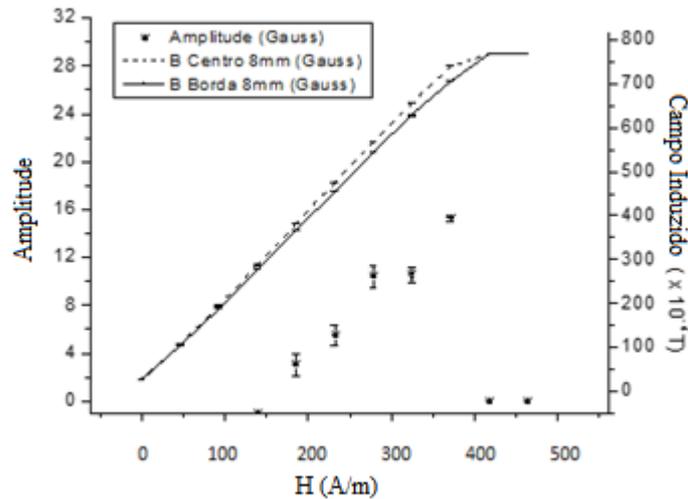
b)



c)



d)



4.3 ESTUDO DA ANISOTROPIA MAGNÉTICA

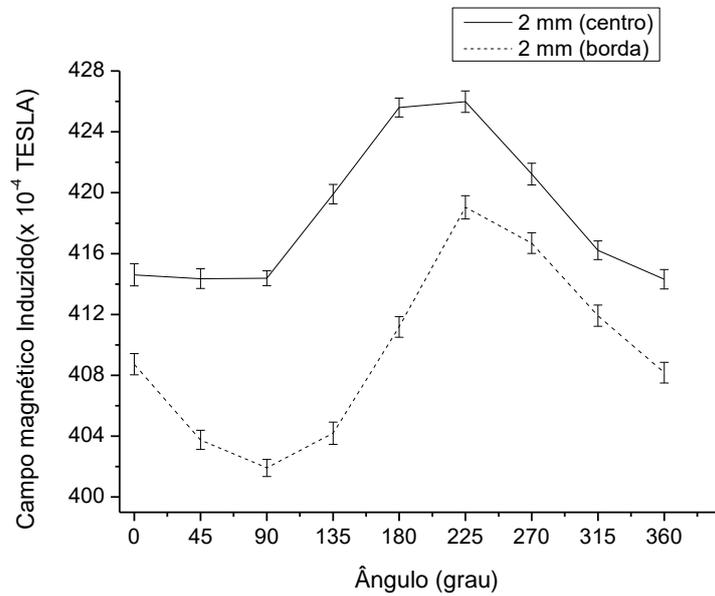
O presente trabalho estudou a anisotropia magnética de um aço 1045 laminado e recozido, mostrando que as propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos sofrem interferência da microestrutura e das condições de tensões provenientes de deformação plástica. Isso é causado pelos processos convencionais de manufaturas, que levam ao comportamento anisotrópico dessas propriedades.

O procedimento para o estudo da anisotropia magnética consistiu na medição em duas regiões das amostras sobre análise: no centro e próximo as bordas, sendo a amostras giradas de 0 a 360°. O comportamento obtido do campo magnético induzido em função do ângulo de rotação das amostras com espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8mm e 12 mm, pode ser observado na Figura 4.6, bem como a representação polar dos resultados realizados no centro das amostras. As amostras são todas do mesmo material e desse modo não houve mudança de permeabilidade do material. Além disso, o campo magnético externo foi mantido constante.

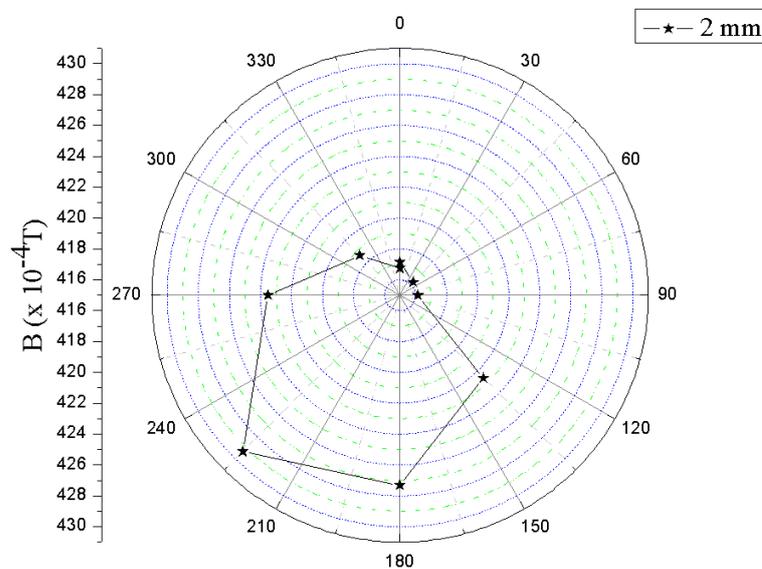
Nota-se nas Figuras 4.6 a, c, e, g, que os valores do campo magnético induzido foram maiores no centro e reduziram quando aproximado da borda. À medida que se deslocou do centro para a extremidade das amostras a permeabilidade magnética do meio (ar) passou a afetar a permeabilidade resultante e reduziu os valores medidos.

Figura 4.6: Medidas de campo magnético induzido em função do ângulo de rotação das medições no centro e a 6 mm deste (borda).

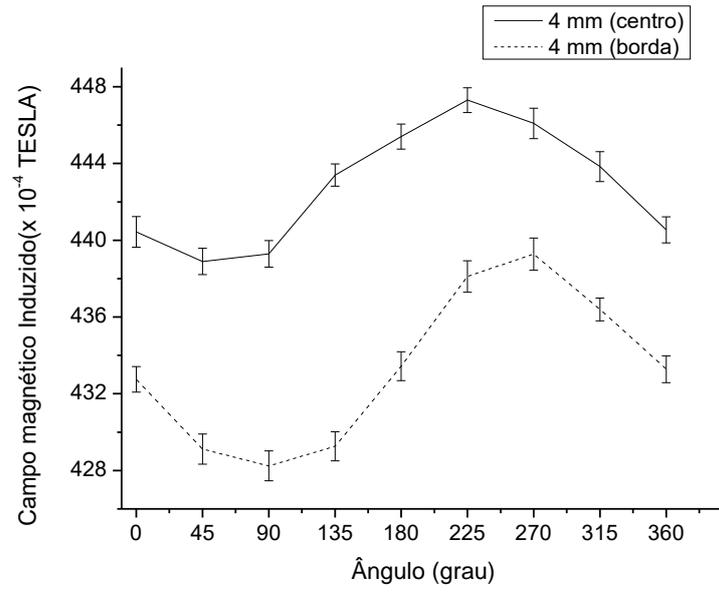
a) Campo induzido contra ângulo para 2 mm de espessura.



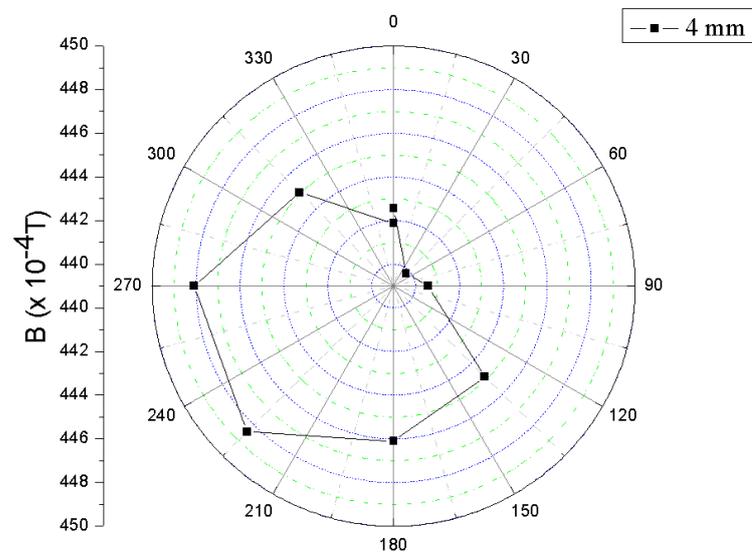
b) Gráfico polar do Campo induzido contra ângulo para 2 mm de espessura.



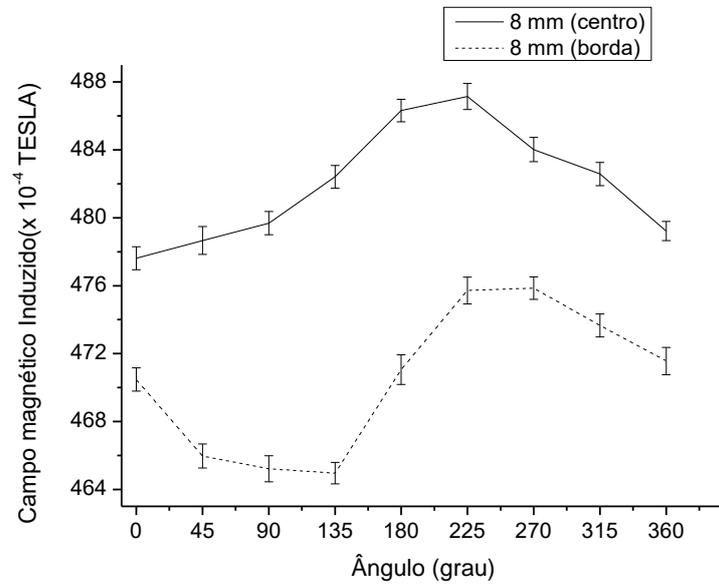
c) Campo induzido contra ângulo para 4 mm de espessura.



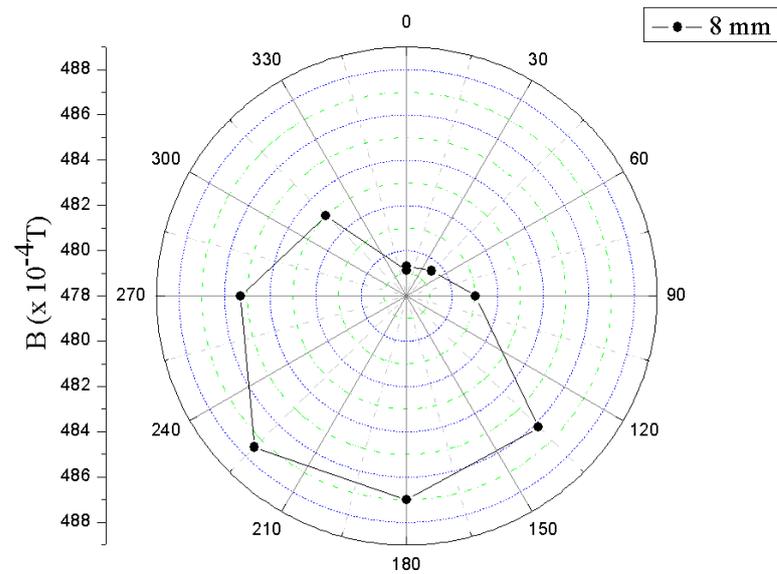
c) Gráfico polar do Campo induzido contra ângulo para 4 mm de espessura.



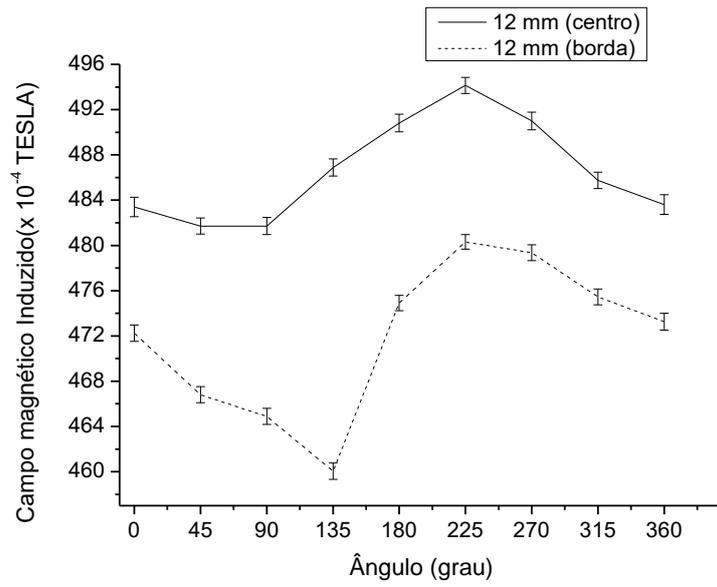
e) Campo induzido contra ângulo para 8 mm de espessura.



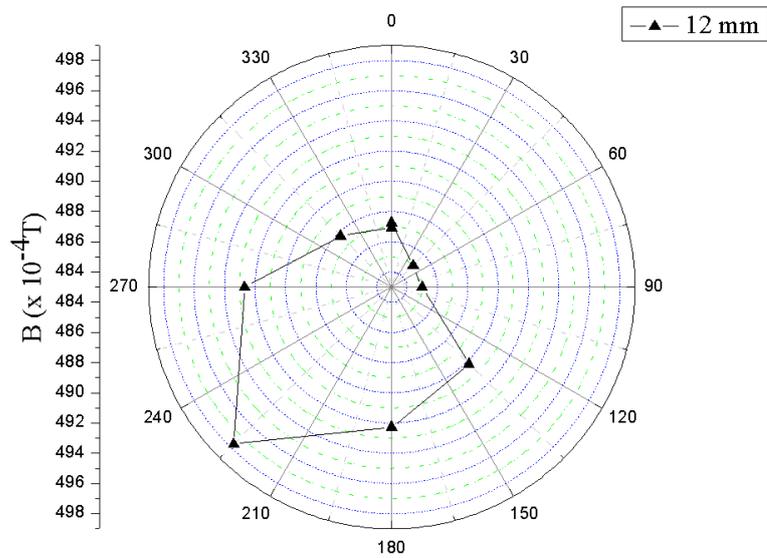
f) Gráfico polar do Campo induzido contra ângulo para 8 mm de espessura.



g) Campo induzido contra ângulo para 12 mm de espessura.



h) Gráfico polar do Campo induzido contra ângulo para 12 mm de espessura.



A relação entre o campo magnético induzido (B) e o ângulo de incidência apresentado na Figura 4.6, mostra um comportamento anisotrópico, pois o campo magnético induzido varia em função da variação do posicionamento da amostra relativamente ao campo magnético incidente e também devido à rotação da amostra. Outros estudos também detectaram mudanças nos valores de B devido ao ângulo de rotação, indicando que a magnetização sofre interferência da deformação plástica, que causa anisotropia magnética (CHAPHAM, 1999; LANDGRAF, 1999; PÉREZ, 2007; LANDGRAF, 2003; MARRA, 2005).

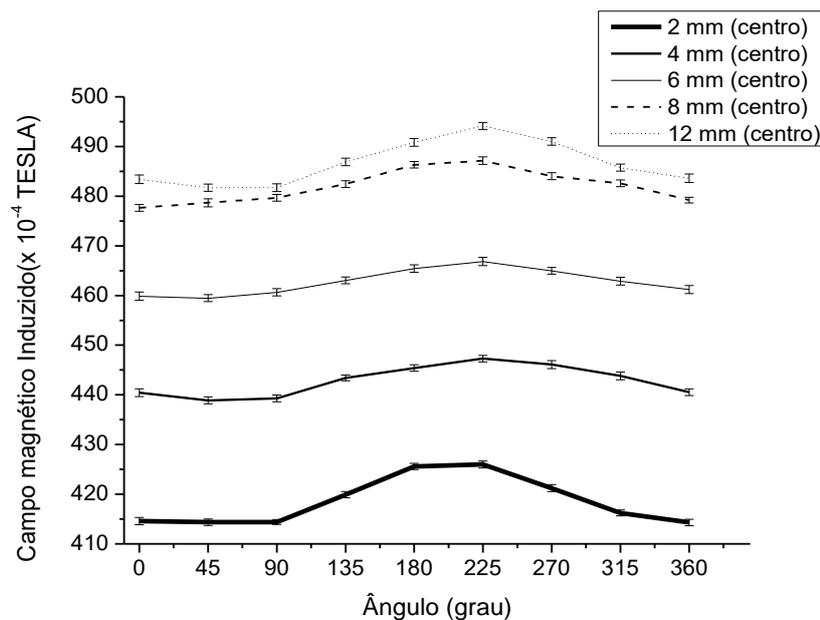
A Figura 4.6 mostra que as medidas realizadas no centro apresentam um pico em torno do ângulo de 225° . Isto pode ser notado, tanto nas figuras das medições feitas no centro quanto nos seus gráficos polares (Figura 4.6). Os resultados mostram que o ângulo de 225° corresponde ao de fácil magnetização por apresentar maiores valores de campos induzidos. Isso significa que as perdas magnéticas são menores nesta direção. O presente trabalho é realizado com corrente contínua e polarização fixa do solenoide, ou seja, ao inverter-se a polarização do mesmo iremos obter-se-á um gráfico polar com valores complementares com maiores resultados de campo induzido para o ângulo de 45° . Os ângulos de 45° e 225° correspondem aos sentidos opostos da mesma direção de fácil magnetização.

Os experimentos realizados no presente trabalho, tem mostrado que a aplicação de campos magnéticos externos de baixa intensidade, na região de baixas perdas magnéticas da curva de histerese, permitem a determinação da direção de fácil magnetização em materiais, sem a necessidade da remoção de amostras, sendo assim um ensaio eletromagnético não destrutivo. A região de perdas de indução alta, da curva de magnetização de um material ferromagnético, está relacionada à rotação de vetores de magnetização, bem como a criação e aniquilação de paredes de domínios magnéticos. Contudo, a região de perdas de indução baixa está associada à dissipação de energia devido ao deslocamento das paredes dos domínios magnéticos (BRICAKOVA, 2015; LANDGRAF, 2003). A região estudada no presente trabalho está associada a perdas de indução baixa e mostra ser sensível a anisotropia magnética, o que não foi observado em outros trabalhos, nos quais, observam o comportamento na região de perdas de indução alta (EMURA, 2001; LANDGRAF, 2003).

A Figura 4.6 também mostra que as medidas realizadas deslocadas do centro apresentam uma redução nos valores de campo induzido entre 0° e 180° , o que não se observa nas medições feitas no centro das amostras. Esta redução se deve ao efeito desmagnetizador do constituinte perlita presente nas amostras. Martinez (2015) também observou este comportamento desmagnetizante em aços com os mesmos constituintes.

A Figura 4.7 mostra as variações nos valores de campo magnéticos induzidos em função do ângulo de rotação, para amostras com 2, 4, 6, 8 e 12 mm de espessura, para medições realizadas no centro das amostras. Para amostras com espessuras acima de 8 mm, os valores de campo magnético induzido começam a ficar independentes da espessura. Isto se deve ao fato que o aumento da espessura diminui o efeito da permeabilidade do meio externo sobre a penetração das linhas de campo no material em estudo.

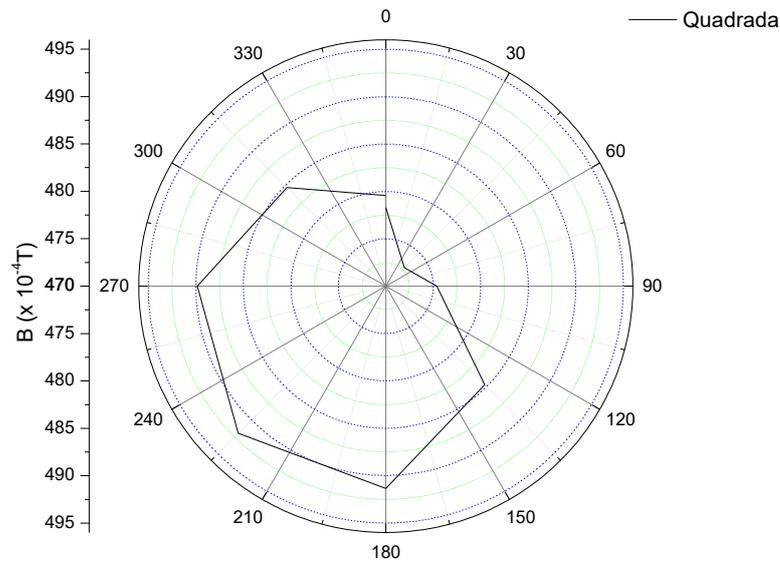
Figura 4.7: Variação do campo magnético induzido em função do ângulo de rotação e da espessura das amostras, medidas realizadas no centro.



4.4 ESTUDO DO EFEITO DA GEOMETRIA DA SEÇÃO

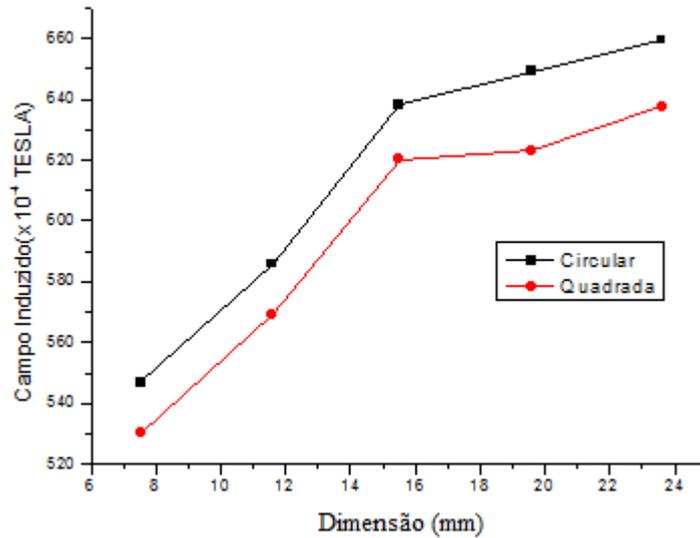
Para estudar o efeito da geometria da seção da peça estudada, uma amostra de seção quadrada com 24 mm de diagonal e uma espessura de 8 mm foi submetida às mesmas condições de ensaios e os resultados obtidos comparados com os das amostras de 24 mm de diâmetro. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.8. Nota-se que mesmo para amostras com seção quadradas, a mesma direção de fácil magnetização foi detectada, indicando que para as dimensões em estudo a obtenção dessa direção independe da geometria.

Figura 4.8: Campo magnético induzido em função do ângulo de rotação para amostra de 24 mm diagonal com espessura de 8 mm e seção quadrada.



Prosseguindo no estudo do formato de seção longitudinal das amostras do Aço SAE 1045, a Figura 4.9 apresenta a variação do campo induzido em função do diâmetro para as amostras do Tipo 2 (24mm, 20mm, 16mm, 12mm, 8mm, com espessura fixa de 8mm), bem como em função do comprimento da diagonal para amostras do Tipo 3 (L 24mm, L 20mm, L 16mm, L 12mm, L 8mm) com espessura de 8 mm. As dimensões das amostras encontram-se no eixo das abcissas e no eixo das ordenadas os valores do campo induzido (B), vale salientar que o valor de H utilizado foi de 282 A/m para as amostras do Tipo 2 e Tipo 3.

Figura 4.9: Variação do campo induzido em função dos diâmetros das amostras e diagonais.



Observa-se na Figura 4.9, que o campo induzido (B) sofreu variações decorrentes da geometria. Utilizaram-se as amostras circulares e quadradas. Observou-se que o valor de (B) aumenta com o aumento do diâmetro das amostras, ou seja, (B) é diretamente proporcional ao diâmetro. Quanto às amostras quadradas, as mesmas se comportaram de forma semelhante. Porém, verifica-se que as amostras circulares têm valores de campo induzidos maiores que as quadradas, isso se dá em decorrência das amostras Tipo 2 conterem mais massa no material.

4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

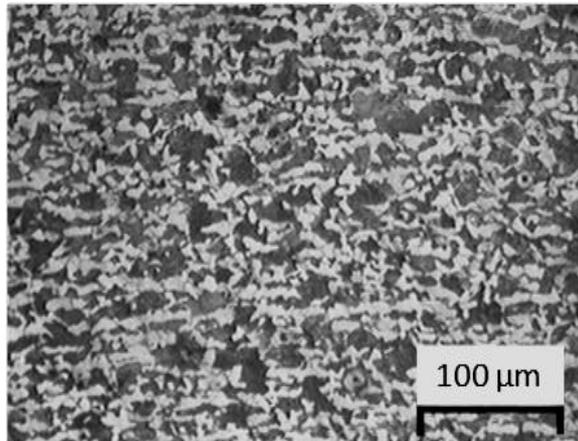
A Figura 4.10, mostra a superfície da microestrutura estudada. Na Figura 4.10 (a) tem-se a superfície estudada que é transversal ao sentido de laminação. A Figura 4.10b mostra a microestrutura no sentido de laminação. Nestas estão indicadas os grãos de fases ferrita (ferro α) e perlita (cementita lamelar + ferrita). O tamanho de grão médio da fase ferrita foi determinado em função do ângulo de rotação entre os ângulos de 0° e 90° , de acordo com o procedimento do intercepto médio de Heyn (ASTM E 112-96), para analisar a existência de deformação plástica. Os resultados do tamanho médio de ferrita são mostrados na Figura 4.11. Observa-se que a ferrita apresenta o maior tamanho médio de grão na direção de 45° , que

corresponde à direção de fácil magnetização. Embora a família de aço aqui estudado seja submetida a tratamentos térmicos de recozimento no estado final de laminação, existe uma direção preferencial de orientação dos grãos. A variação do campo magnético induzido obtido, em função do ângulo de rotação, está relacionada assim com a presença de deformação plástica, que provoca a anisotropia magnética detectada. Os grãos de ferrita estão assim, deformados na direção de fácil magnetização.

A produção do aço estudado envolve muitos passes de laminação e tratamentos térmicos que levam a anisotropia. Esses aços têm microestrutura formada por ferrita mais perlita. A densidade de linhas de fluxo magnética tende a passar mais facilmente através da fase ferrita do que da fase perlita, devido a diferença de permeabilidade magnética entre essas. A perlita tem uma estrutura lamelar que dificulta a movimentação das paredes de domínios magnéticos como mostrado na Figura 4.12. Martinez-Ortiz (2016) estudou a interação entre linhas de fluxo magnético e a microestrutura ferrita mais perlita e mostrou o maior valor de campo coercivo da perlita dificulta a direção do vetor de fluxo magnético, o qual muda próxima a região correspondente das bandas de perlita e seguem a microestrutura ferrita. Segundo Martinez 2015 a fase ferrita apresenta um valor de campo coercivo de 8 A/m, enquanto a perlita tem valor de 160 A/m.

Figura 4.10: Micrografia óptica da superfície estudada. As regiões claras são ferrita e a escura o constituinte perlita (ferrita + cementita).

a) Superfície de estudo. Transversal a de laminação



b) Microestrutura na direção de laminação

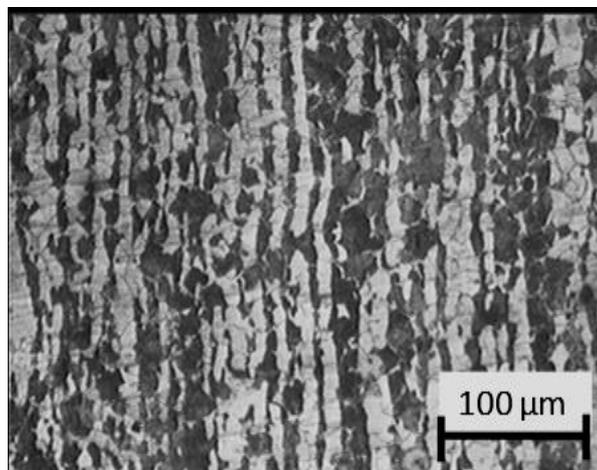


Figura 4.11 Variação do tamanho médio da ferrita em função do ângulo de rotação.

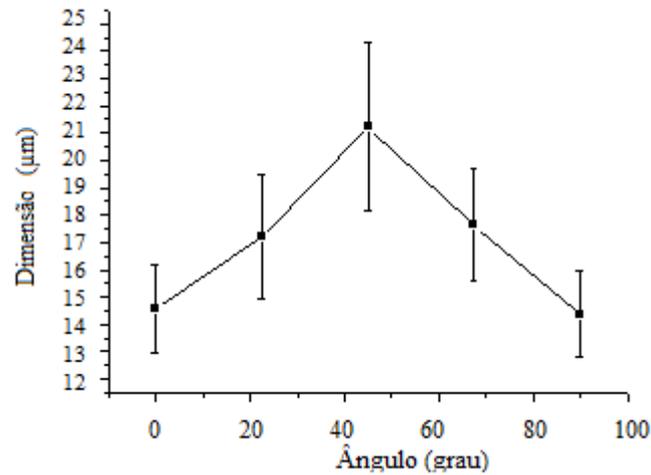
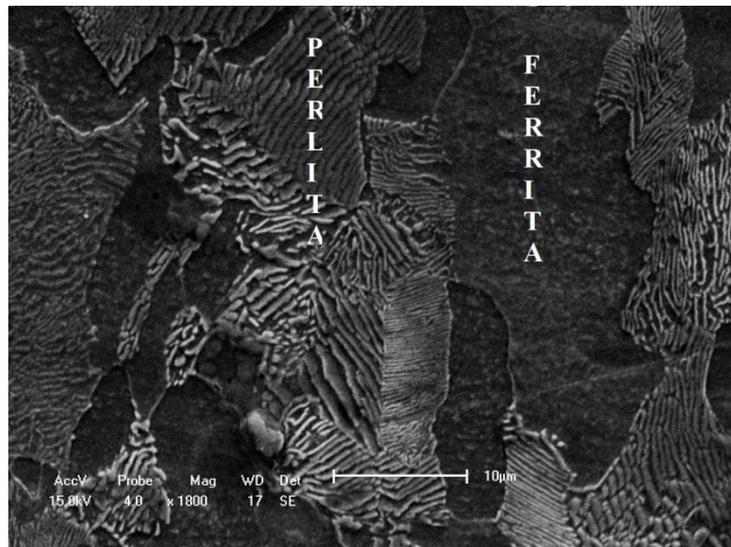


Figura 4.12: Microscopia eletrônica de varredura da superfície estudada. Detalhe da estrutura lamelar do constituinte perlita.



Os resultados aqui apresentados mostram que a técnica é capaz de determinar a direção de fácil magnetização do aço estudado, independente da geometria das amostras. A técnica também foi capaz de detectar a anisotropia microestrutural que foi responsável pela anisotropia magnética do material, que tem no caso estudado, a direção de fácil magnetização associada a deformação da fase ferrita na direção de 45°.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou o estudo da influência do campo magnético aplicado, da geometria e da anisotropia em um material ferromagnético denominado de Aço SAE 1045. Este estudo foi desenvolvido na região de reversibilidade dos domínios magnéticos chegando às conclusões descritas a seguir.

A utilização de densidade de linhas de campo, na região de reversibilidade de domínios magnéticos, e gerada por corrente contínua, foi capaz de acompanhar a anisotropia magnética do material estudado. Este material é fornecido comercialmente, no estado recozido. Contudo, os ensaios mostram que mesmo assim ele apresenta anisotropia microestrutural.

Materiais mais espessos induzem campos magnéticos de maior intensidade até um determinado valor, a partir do qual o aumento da espessura não gera grandes variações nos valores de B. Uma intensidade de campo magnético ideal de 282 A/m foi determinada para o ensaio. Sendo esta capaz de gerar uma maior amplitude da medida. O ensaio foi capaz de detectar a direção de fácil magnetização do material estudado, independente da geometria do mesmo, o ângulo de 45° foi determinado como sendo o da direção de menor perda magnética.

As medidas das densidades de campos magnéticos foram capazes de determinar a direção de anisotropia microestrutural como sendo de 45° correspondente a da direção de deformação da fase ferrita. As medidas realizadas deslocadas do centro foram capazes de determinar o efeito desmagnetizante do constituinte perlita. O ensaio eletromagnético apresentado neste trabalho supriu duas prioridades necessárias para engenharia: eficiência e baixo custo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS

Aplicar a técnica em materiais da classe Fe-Si, de grãos orientados e não orientados, utilizados em transformadores para determinação da direção de fácil magnetização.

Aplicar a técnica em aços ao carbono de diferentes teores para melhor entendimento do efeito desmagnetizante da perlita nos materiais.

Aplicar a técnica para estudo de anisotropia microestrutura em materiais paramagnéticos.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, V.H.C., P.P.R. Filho, T.S. Cavalcante, J.M.R.S. Tavares. **New computational solution to quantify synthetic material porosity from optical microscopic images**, J. Microsc. 240 (2010) 50–59.

ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. **Technical Documents**, Massachusetts. USA, 2012.

ASTM International, ASTM E 112-96(2004). **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**, (2004) 26.

BIRCAKOVA, R.B. Z. , P. Kollár, B. Weidenfeller, J. Fuzer, M. Fáberova. **Reversible and irreversible DC magnetization processes in the frame of.pdf**, J. Alloys Compd. 645 (2015) 283–289.

BÜKKI-DEME, A., I.A. Szabó, C. Cserhádi. **Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel**, J. Magn. Magn. Mater. 322 (2010) 1748–1751.

CALDAS-MORGAN, M., L.R. Padovese. **Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method**, NDT E Int. 45 (2012) 148–155.

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

- CAPÓ-SÁNCHEZ, J., J. Pérez-Benitez, L.R. Padovese. **Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise**, NDT E Int. 40 (2007) 168–172.
- CHEN, S., J. Butler, S. Melzer. **Effect of asymmetric hot rolling on texture, microstructure and magnetic properties in a non-grain oriented electrical steel**, J. Magn. Magn. Mater. 368 (2014) 342–352.
- CHERNENKOV, Y.P., N. V Ershov, V.A. Lukshina, V.I. Fedorov, B.K. Sokolov. **An X-ray diffraction study of the short-range ordering in the soft-magnetic Fe-Si alloys with induced magnetic anisotropy**, Phys. B-Condensed Matter. 396 (2007) 220–230.
- CHWASTEK, K. **Anisotropic properties of non-oriented steel sheets**, IET Electr. Power Appl. 7 (2013) 575–579.
- CLAPHAM, L., C. Heald, T.W. Krause, D.L. Atherton, P. Clark. **Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel**, J. Appl. Phys. 86 (1999) 1574–1580.
- COEY, J.M.D. **Magnetism and Magnetic Materials**, Cambridge University Press, New York, 2010.
- CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**, Reading (Massachusetts), Addison-Wesley, 1972.
- CULLITY, B. D.; C. D. Graham. **Introduction to Magnetic materials**, Second Edi, Wiley, New Jersey, 2009.
- DA SILVA, M. E. **Ensaio não destrutivo baseado na interação de linhas de campo magnético e microestrutura para determinação da anisotropia magnética**, MOMAG 2014.
- 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 CBECIMAT, 2004.
- DIEGO, F., L. Moreira, M. Nunes, H. Furtado, F. Nélio, C. Freitas, et al. **A novel Vickers hardness measurement technique based on Adaptive Balloon Active Contour Method**, Expert Syst. Appl. 45 (2016) 294–306.
- ELMASSALAMI, M., I. Palatnik-De-Sousa, M.C.L. Areiza, J.M. a Rebello, a. Elzubair. **On the magnetic anisotropy of superduplex stainless steel**, J. Magn. Magn. Mater. 323 (2011) 2403–2407.
- EMURA, M., M.F. de Campos, F.J.G. Landgraf, J.C. Teixeira. **Angular dependence of magnetic properties of 2% silicon electrical steel**, J. Magn. Magn. Mater. 226-230 (2001) 1524–1526.
- FARIA, R. N., Lima, L. F. C. P. **Introdução ao magnetismo dos materiais** – Livraria da Física, São Paulo, 2005.

- FIORILLO, F. **Anisotropy and magnetization process in soft magnets: Principles, experiments, applications**, J. Magn. Magn. Mater. 304 (2006) 139–144.
- FREITAS, V. L. de A., V.H.C. de Albuquerque, E. de M. Silva, A.A. Silva, J.M.R.S. Tavares. **Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements**, Mater. Sci. Eng. A. 527 (2010) 4431–4437.
- FRYSKOWSKI, B. **Experimental evaluation of magnetic anisotropy in electrical steel sheets**, J. Magn. Magn. Mater. 320 (2008) 515–522.
- FUKUHARA, M. **Subdivisão das perdas histeréticas em aços elétricos deformados e recozidos**. Dissertação. COPPE/UFRJ, 2010
- GALLAUGHE, M. R, P. Ghosh, A.M. Knight, R.R. Chromik. **The effect of easy axis misorientation on the low induction hysteresis properties of non-oriented electrical steels**, J. Magn. Magn. Mater. 382 (2015) 124–133.
- GIROTO, E. Regina. **O efeito do potencial de oxigênio na oxidação superficial e suas influencias nas propriedades magnéticas dos aços elétricos após o recozimento final**. Dissertação. USP/ SP, 2010.
- GRÖSSINGER, R., F. Keplinger, N. Mehmood, J.H. Espina-Hernández, J. Araujo, C. Eisenmenger, et al. **Magnetic and microstructural investigations of pipeline steels**, IEEE Trans. Magn. 44 (2008) 3277–3280.
- GURRUCHAGA, K., a. Martínez-De-Guerenu, I. Gutiérrez. **Sensitiveness of magnetic inductive parameters for the characterization of recovery and recrystallization in cold-rolled low-carbon steel**, Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 41 (2010) 985–993..
- HOLANDA, **Efeitos de Superfície nas Propriedades Magnéticas do Nanocompósito de CoFe₂O₄/Ag**, Dissertação, 2012
- HONEYWELL DIVISION. **Miniature Radiometric Linear Hall Effect Sensor**. USA, 2013.
- HONEYWELL. **Hall Effect Sensing Application**, Manual, 2004.
- KUMAR, A., A. Misra. **Shape anisotropy of magnetic field generation during tensile fracture in steel**, J. Magn. Magn. Mater. 285 (2005) 71–78..
- LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades magnéticas dos aços para fins elétricos**. IPT, 2001, p. 1-20.

LANDGRAF, F.J.G. , M. Emura, J.C. Teixeira, M.F. De Campos, C.S. Muranaka. **Anisotropy of the magnetic losses components in semi-processed electrical steels**, J. Magn. Magn. Mater. 196 (1999) 380–381.

LANDGRAF, F.J.G., T. Yonamine, M. Emura, M.A. Cunha. **Modelling the angular dependence of magnetic properties of a fully processed non-oriented electrical steel**, J. Magn. Magn. Mater. 254 (2003) 328–330.

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, 2004.

LUZ, M. S. **Efeito Hall em supercondutores a campo magnético nulo**, Tese de doutorado, USP,2007.

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

MARRA, K.M., E. a. Alvarenga, V.T.L. Buono. **Magnetic aging a nisotropy of a semi-processed non-oriented electrical steel**, Mater. Sci. Eng. A. 390 (2005) 423–426.

MARTÍNEZ-ORTIZ, P., J.A. Pérez-Benítez, J.H. Espina-Hernández, F. Caleyó, J.M. Hallen. **On the estimation of the magnetic easy axis in pipeline steels using magnetic Barkhausen noise**, J. Magn. Magn. Mater. 374 (2015) 67–74.

MARTÍNEZ-ORTIZ, P., J.A. Pérez-Benítez, J.H. Espina-Hernández, F. Caleyó, N. Mehboob, R. Grössinger, et al. **Influence of the maximum applied magnetic field on the angular dependence of Magnetic Barkhausen Noise in API5L steels**, J. Magn. Magn. Mater. 401 (2016) 108–115.

MEDEIROS, C. A. **Anisotropia Magnética (110) em nanofilmes de permalloy sobre MgO (100)**, Dissertação UFRN(2014).

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

NORMANDO, P.G., E.P. Moura, J. a. Souza, S.S.M. Tavares, L.R. Padovese. **Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel**, Mater. Sci. Eng. A. 527 (2010) 2886–2891. doi:10.1016/j.msea.2010.01.017.

PALTANEA, V.M., G. Paltanea, H. Gavrilă, S.M. Ieee, L. Dumitru. **Experimental Analysis of Magnetic Anisotropy in Silicon Iron Steels using the Single Strip Tester**, (2015) 456–459.

- PÉREZ-BENITEZ, J. a., J. Capó-Sánchez, L.R. Padovese. **Characterization of angular dependence of macroscopic magnetic properties in ASTM 36 steel using magnetic Barkhausen noise**, NDT E Int. 40 (2007) 284–288.
- PINTO, A. K. Xavier, J. N. **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**. Dissertação. UFC, 2012.
- PURCELL. **Electromagnetism**. Lecture 14. Havard University, 2013.
- QIN, J., P. Yang, W. Mao, F. Ye. **Effect of texture and grain size on the magnetic flux density and core loss of cold-rolled high silicon steel sheets**, J. Magn. Magn. Mater. 393 (2015) 537–543.
- SERNA-GIRALDO, C.P. **Avaliação de juntas soldadas de aços carbono através do ruído magnético de Barkhausen**. Tese de Doutorado. USP, 2007.
- STUPAKOV, O., T. Uchimoto, T. Takagi. **Magnetic anisotropy of plastically deformed low-carbon steel**, J. Phys. D. Appl. Phys. 43 (2010) 195003.
- TAMARA, B. **A new perspective on magnetic field sensing**, Sensors Online, 1998.
- TAVARES, L. A. **Excelência na manutenção**, Salvador, BA, Casa da Qualidade, 1996.
- WLODARSKI, ZDZISLAW. **Analytical description of magnetization curves**. Physica B 373 (2006) 323–327.
- YONAMINE, T., F.J.. Landgraf. **Correlation between magnetic properties and crystallographic texture of silicon steel**, J. Magn. Magn. Mater. 272-276 (2004) E565–E566.