

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA INTERAÇÃO DAS LINHAS DE CAMPO SOBRE UMA AMOSTRA
DE AÇO SAE 1020 POR MEIO DE MEDIDAS DE TENSÃO HALL

Daniel Cesar de Macedo Cavalcante

Campina Grande
Fevereiro/2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA INTERAÇÃO DAS LINHAS DE CAMPO SOBRE UMA AMOSTRA
DE AÇO SAE 1020 POR MEIO DE MEDIDAS DE TENSÃO HALL

Daniel Cesar de Macedo Cavalcante

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
como requisito parcial à obtenção do
título de MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA.

Orientador: Dr. Neilor Cesar dos Santos

Agência Financiadora: CAPES

Campina Grande

Fevereiro/2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

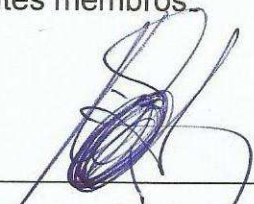
- C376e Cavalcante, Daniel Cesar de Macedo.
Estudo da interação das linhas de campo sobre uma amostra de aço SAE 1020 por meio de medidas de tensão Hall / Daniel Cesar de Macedo Cavalcante. – Campina Grande, 2013.
72 f.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2013.
- "Orientação: Prof. Dr. Neilor Cesar dos Santos".
Referências.
1. Ensaio Não Destrutivo. 2. Efeito Hall. 3. Elementos Finitos.
4. Densidade de Fluxo Magnético. I. Santos, Neilor Cesar dos. II. Título.

CDU 621:620.179.1(043)

“ESTUDO DA INTERAÇÃO DAS LINHAS DE CAMPO SOBRE UMA AMOSTRA
DE AÇO SAE 1020 POR MEIO DE MEDIDAS DE TENSÃO HALL”.

DANIEL CESAR DE MACEDO CAVALCANTE

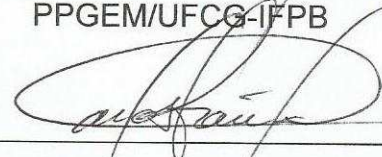
Dissertação Aprovada em 28/02/2013 pela banca examinadora constituída dos
seguintes membros:



Dr. Neilor Cesar dos Santos

Orientador

PPGEM/UFCCG-IFPB



Dr. Carlos José de Araújo

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCCG



Dr. Josinaldo Pereira Leite

Examinador Externo

DEM/UFPB



Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

Examinador Externo

PPGEE/IFPB

DEDICATÓRIA

A minha amada Luana Guimarães pelo seu enorme amor e carinho e, aos meus pais pelo incentivo nos vários anos de estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de vida, por todas as conquistas e vitórias durante a minha longa caminhada e por ter me dado esperança para nunca desistir dos meus ideais.

Aos meus pais Adnaloi de Macedo e Eugênio Cavalcante pelo incentivo e carinho.

Ao Professor Neilor Cesar dos Santos, pela orientação.

Aos meus tios Eloy de Macedo e Edgard de Macedo pelas orientações, amizade, confiança, incentivo e entusiasmo na execução deste trabalho, responsáveis pelo meu crescimento pessoal e científico.

Ao Professor Carlos José de Araújo por ceder à licença do software Ansys versão 14

A minha amada Luana Guimarães pelo carinho, apoio nos momentos mais marcantes dessa jornada.

A graduanda Ana Lúcia Andrade pelo auxílio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao aluno Igor Xavier pelo auxílio de grande importância nas atividades experimentais.

Ao amigo Alysson Daniel e Família pelo apoio moral e intelectual, e por estarem sempre dispostos a ajudar nas horas mais difíceis.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, entre os quais, todos aqueles que fazem parte do meu convívio particular que de alguma forma são parte do sucesso nos trabalhos.

ESTUDO DA INTERAÇÃO DAS LINHAS DE CAMPO SOBRE UMA AMOSTRA DE AÇO SAE 1020 POR MEIO DE MEDIDAS DE TENSÃO HALL

RESUMO

Ensaio não destrutivo visam analisar a existência de descontinuidades ou defeitos em materiais, peças ou estruturas. Estes ensaios são realizados por meio de princípios físicos definidos, sem alterar as características físicas, químicas ou dimensionais do componente ensaiado. No presente trabalho estudaram-se as potencialidades de utilização de sensores de efeito Hall, para a análise do comportamento da densidade do fluxo magnético e sua interação com um material ferromagnético. Amostras de Aço SAE 1020 com diferentes geometrias foram utilizadas para determinação do efeito das dimensões em relação ao campo magnético aplicado na peça ensaiada. O efeito da espessura também foi estudado por meio de simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos. Os resultados mostram que, a partir da geometria estudada, existe um valor de espessura a partir da qual as medidas de densidade de linhas de campo passam a independer da mesma. De acordo com os resultados das simulações, em comparação com os dados experimentais, foi observado que os menores erros foram obtidos para valores da densidade de campo distante dos valores que levam ao ponto de saturação do sensor.

Palavras chaves: ensaio não destrutivo, efeito Hall, elementos finitos, densidade de fluxo magnético.

STUDY OF THE INTERACTION OF FIELD LINES ON A SAMPLE OF 1020 SAE STEEL BY MEANS OF MEASURES OF HALL VOLTAGE

ABSTRACT

Nondestructive tests aim at analyzing the existence of discontinuities or faults in materials, parts or structures. These tests are performed using physical principles defined without altering the physical, chemical and dimensional properties of them. In the present study it was evaluated the potentialities of using hall effect sensors in order to analyze the behavior of the magnetic flux density and its interaction with a ferromagnetic material. SAE 1020 Steel samples with different geometries were used to determine the effect of dimensions in relation to the density of the magnetic field applied to the part to be tested. The geometry effect was also evaluated through simulations using the Finite Element Method. The results show that from the geometry studied there is a thickness value from which measures the density of field lines become independent of it. According to the simulations results, comparing them to the experimental data, it was observed that the minor errors values were obtained for the density of distant field values that lead to the saturation point of the sensor.

Keywords: non destructive test, Hall effect, finite element, magnetic flux density

PUBLICAÇÕES

ANDRADE, A. L. S.; CAVALCANTE, D. C. M.; SILVA, E. M. SANTOS, N. C.; XAVIER, I.; LEITE, J. P. Metodologia não destrutiva para acompanhamento de transformações micro estruturais baseadas em medidas de tensão hall In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS. **Anais**. Joinville - SC. Novembro, 2012

ANDRADE, A. L. S; SILVA, E. M.; SANTOS, N. C.; GONÇALVES, P. G.; CAVALCANTE, D. C. M.; LEITE, J. P. Ensaio não destrutivo, baseado em medidas de tensão hall, para acompanhamento de transformações microestruturais In: 10º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. **Anais**. João Pessoa - PB. Agosto, 2012

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
PUBLICAÇÕES.....	vi
SUMÁRIO.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Geral.....	3
2.2 Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Ensaios não destrutivos.....	4
3.1.1 Ensaio por correntes parasitas.....	5
3.1.2 Ensaio por ultrassom.....	8
3.1.3 Ensaio por partículas magnéticas.....	11
3.1.4 Ensaio por ruído barkhausen.....	13
3.1.5 Ensaio por ferritoscópio.....	16
3.2 Métodos dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo.....	18
4. UTILIZAÇÃO DO EFEITO HALL PARA ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA DE MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	31
4.1 O efeito Hall.....	31
4.2. Sensor Hall.....	33
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
5.1. O estudo experimental da influência da espessura da peça nas medidas de tensão Hall.....	37

5.1.1	Determinação do campo externo para medição	37
5.1.2	Determinação da influência da espessura sobre as medidas	38
5.2	Simulação dos resultados	38
5.2.1	Levantamentos dos dados experimentais necessários para simulação.....	38
5.2.1.1	Determinação da relação entre número de espiras(N) e comprimento da bobina(L) (calibração da bobina solenóide).....	38
5.2.1.1	Determinação da permeabilidade do núcleo do solenóide	39
5.2.1	Determinação da permeabilidade da peça	39
5.2.2	Simulação dos experimentos	39
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
6.1	Apresentação	40
6.1.1	O estudo da influência da espessura da peça nas medidas de tensão Hall.....	40
6.1.2	Determinação dos parâmetros geométricos do solenoide	45
6.1.2.1.	Determinação da relação entre número de espira (N) e comprimento da bobina (L).	45
6.1.2.2	Determinação da permeabilidade magnética do núcleo da bobina.	47
6.1.2.3	Cálculo da permeabilidade magnética do material estudado	50
6.1.3	Simulação do efeito da espessura sobre as medidas de campo obtidas a partir de um sensor Hall	52
6.1.3.1	Simulação da bobina sem núcleo	52
6.1.3.2	Simulação da bobina com núcleo	53
6.1.3.3	Simulação do efeito da espessura do material	54
6.	CONCLUSÕES	65
7.	SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
Tabela 6.1. Valores de tensão Hall para centro e extremidade, de amostras com 11 mm de espessura e campos de 270, 370 e 470 Gauss	43
Tabela 6.2. Valores de corrente elétrica e do campo magnético.	47
Tabela 6.3. Campo magnético em relação a intensidade.	50
Tabela 6.4 Valores de campo, experimental e simulado, para a posição central das amostras de aço SAE 1020, em função da espessura.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 3.1. Princípio básico do ensaio de correntes parasitas (Adaptado de Pereira, 2007).	6
Figura 3.2. Princípio básico do ensaio por ultrassom. (Adaptado de Andreucci, 2009).....	9
Figura 3.3. Princípio básico do ensaio por partículas magnéticas. (Adaptado de Andreucci, 2009).....	12
Figura 3.4. Efeito Barkhausen e a curva de histerese relacionadas (Adaptado de Freitas, 2012).....	15
Figura 3.5. Princípio de funcionamento de um ferritoscópio (Adaptado de Helmut , 2006)	17
Figura 3.6. Exemplo de magnetostática: distribuição de campo regido pela equação de Poisson. (Adaptado de Pereira, 2008)	26
Figura 3.7. Condição de contorno de Dirichlet. (Adaptado de Pereira, 2008) ..	27
Figura.3.8. Condição de contorno de Neumann. (Adaptado de Pereira, 2008) ..	27
Figura. 4.1. Princípio básico do efeito Hall. (Adaptado de http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod00/index.html).....	32
Figura 4.2. Diagrama básico de um sensor hall. (Adaptado de de Allegro®, 2009).....	33
Figura 4.3. Curva típica de saída de um sensor Hall. (Adaptado de de Allegro®, 2009).....	34
Figura 5.1. Configuração experimental do END, contendo: (1) computador; (2) placa de aquisição de dados; (3) fonte c/ regulador de tensão; (4) bancada de ensaios; (5) sensor Hall; (6) amostra; (7) Bobina. (Adaptado de França Neto, 2011).....	37
Figura 6.1. Variações de medidas entre a extremidade e o centro, para um aço SAE 1020 com 11mm de espessura, em função dos campos de 170 e 270 Gauss.....	42
Figura 6.2 Variação da tensão Hall em relação a posição.	43

Figura 6.3. Densidade de campo magnético em função da intensidade de corrente elétrica.....	46
Figura 6.4. Campo magnético em função da intensidade de campo para a bobina com núcleo.....	49
Figura 6.5. Bobina com e sem núcleo.....	50
Figura 6.6. Variação de B contra H para o aço SAE 1020, com diferentes espessuras.....	51
Figura 6.7. Variação de B contra H para o aço SAE 1020 com espessura de 11 mm.	52
Figura 6.8. Medidas experimentais e simuladas da variação da densidade de campo e corrente, para bobina sem núcleo.....	53
Figura 6.9. Variação de B versus H . Resultados experimentais e simulados da bobina com núcleo.....	54
Figura 6.10 Simulação do solenoide com o núcleo, mostrando a densidade de campo magnético.....	55
Figura 6.11 Simulação da curva de magnetização para a peça com 11mm de espessura.	56
Figura 6.12 Perfil dos valores da densidade de linhas de campo para as intensidades de campo magnético de: a) 4,522 Oested e b) 18,487 Oested. ...	57
Figura 6.13 Perfis de linhas de campo simuladas para o aço SAE 1020 para diferentes espessuras. Aplicação de um campo no centro do solenoide de 270 Gauss, antes da colocação da amostra.....	60
Figura 6.14 Perfis de linhas de campo simuladas para o aço SAE 1020 para diferentes espessuras. Aplicação de um campo no centro do solenoide de 370 Gauss, antes da colocação da amostra.....	62
Figura 6.15 Perfis de linhas de campo simuladas para o aço SAE 1020 para diferentes espessuras. Aplicação de um campo no centro do solenoide de 470 Gauss, antes da colocação da amostra.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME – American Society of Mechanical Engineering

ASTM – American Society for Testing and Materials

MEF – Método dos elementos finitos

NDT – Non Destructive Testing

END – Ensaio não destrutivo

LISTA DE SÍMBOLOS

σ - Condutibilidade elétrica

V_H - Tensão Hall

f - Frequência

∇ - Operador nabla

$\nabla \times$ - Rotacional

$\nabla \cdot$ - Divergente

∇^2 - Laplaciano

A – Vetor Potencial Magnético

B - Densidade campo magnético

D - Densidade campo elétrico

E - Intensidade campo elétrico

g - Função teste

H - Intensidade campo magnético

I - Corrente elétrica

S - Densidade superficial de corrente elétrica

V_n – Tensão norte

V_s – Tensão sul

ϵ - Permissividade elétrica

P - Densidade volumétrica de cargas

1. INTRODUÇÃO

Os END são utilizados para avaliar a presença de descontinuidades que possam vir afetar a integridade de materiais, peças ou estruturas em serviço. Por não afetar o normal funcionamento destes componentes nem os danificar, estes tipos de ensaios considera-se não destrutivo. Esse é o motivo principal pelo qual são usados na manutenção para detectar defeitos. Várias técnicas não destrutivas são utilizadas para este fim como, por exemplo: ultrassom, radiografia industrial, exames termográficos, entre outras, sendo estas técnicas amplamente consolidadas (KOSMAS, *et. al.*, 2005).

Considerados como ferramentas indispensáveis para garantia de qualidade, estes métodos visam diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade (BI e Jiles, 1998).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias e conseqüentemente novas aplicações os materiais ferromagnéticos vem ganhando espaço na engenharia, pois os fenômenos magnéticos são investigados experimentalmente com uma grande variedade de técnicas tais como: perda de fluxo magnético, ruído magnético de Barkhausen, emissão magnetoacústica, anisotropia magnética induzida por tensão, metal com memória magnética (WANG *et. al.*, 2012), magnometria, calor específico, espalhamento elástico de nêutrons (BI e Jiles, 1998).

A análise do fluxo magnético e suas alterações estão ganhando importância como uma técnica não destrutiva, pois permite determinar a descontinuidade tanto na superfície, como no interior de uma determinada peça. A aplicação do campo magnético próximo ao lugar onde existe a descontinuidade permite o sensoriamento sem contato da componente vertical de fuga do campo magnético aplicado, logo, sensores Hall estão sendo aplicados para detectar tamanho e posição de trincas em materiais, estes sensores também são sensíveis a detecção de falhas na superfície em materiais metálicos (BI e Jiles, 1998; KOSMAS, *et. al.*, 2005).

As análises por meio de ensaios que usam sensores hall estão cada vez mais se difundido como técnicas promissoras e não destrutivas (KOSMAS,

et. al., 2005; CAVALCANTE, 2008). Para as mais variadas análises das variações microestruturais, num material ferromagnético, ocasionadas por perda de massa, mudança microestrutural, fragilização, e acúmulo de tensões internas, BI e JILES (1998), também utilizou sensores hall.

Sensores de efeito Hall também têm sido aplicado em uma metodologia não destrutiva para acompanhamento de microestruturas em aços (SILVA *et. al.*, 2012).

No presente trabalho, sensores de efeito Hall são utilizados, para medição da densidade de linhas de campo em uma bancada de testes, com o objetivo de estudar a interação entre as linhas de campo e um material ferromagnético de diferentes espessuras.

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo faz-se a introdução a respeito da importância dos ensaios não destrutivos e a utilização do sensor de hall. No segundo capítulo é apresentando o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho. O terceiro capítulo apresenta a revisão bibliográfica descrevendo alguns ensaios não destrutivos existentes e uma pequena revisão do método dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo. O quarto capítulo apresenta o princípio básico dos sensores de efeito Hall. O quinto capítulo descreve como foi executado os experimentos e também o levantamento de dados para a simulação. No sexto e último capítulo apresenta-se os resultados experimentais e os resultados simulados.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar as potencialidades do uso de sensores de efeito Hall, para análise da interação entre a densidade de linhas de campo magnético e um material ferromagnético considerando a variação da espessura, sendo correlacionado experimento e simulação.

2.2 Específicos

- Definir, experimentalmente, os valores da densidade de campo a serem utilizados no estudo da influência da espessura do corpo de prova;
- Determinar experimentalmente o efeito da espessura de um aço SAE 1020 sobre os valores de tensão Hall, para uma determinada densidade de linhas de campo aplicada na peça;
- Calibrar os parâmetros geométricos e de material do núcleo da bobina solenóide necessários para a simulação;
- Determinar a permeabilidade do material estudado necessário para a simulação;
- Simular por meio do Método dos Elementos Finitos o efeito da espessura, de um aço SAE 1020, sobre os valores de densidade de linhas de campo do material, gerado pela aplicação de uma densidade de linhas de campo externa;
- Correlacionar os resultados experimentais com os simulados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ensaios não destrutivos

As indústrias, nos últimos anos, vêm investindo em alternativas para analisar materiais em serviço, sem comprometer suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, realizando manutenções preventivas e preditivas. Assim, os ensaios não destrutivos vêm ganhando destaque no decorrer dos anos para essas análises.

Os END são utilizados para avaliar a presença de descontinuidades que possam afetar a integridade de materiais em serviço. Por não afetar o normal funcionamento das peças nem as danificar, este tipo de ensaios são considerados não destrutivos. Os END constituem uma das principais ferramentas do controle de qualidade de materiais e produtos, contribuindo para garantir a qualidade, reduzir os custos e aumentar a confiabilidade das operações de inspeção. São utilizados na fabricação, montagem, inspeção em serviço e manutenção, sendo largamente aplicados em juntas soldadas, peças fundidas, peças forjadas, peças laminadas, peças de plásticos, estruturas de concreto, entre outros, nos setores petróleo/petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, ferroviário, naval, eletromecânico e automotivo (FERREIRA JUNIOR E MARQUES, 2006)

Várias técnicas não destrutivas são utilizadas para analisar a integridade de materiais como, por exemplo, ultrassom, correntes parasitas, utilizando-se ferritoscópio, efeito backhausen radiografia industrial, infravermelho, exames termográficos, entre outras (ABENDI, 2012).

Estas técnicas são amplamente consolidadas para análise de materiais, consideradas também, como ferramentas indispensáveis para garantia de qualidade, visando diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade.

Para obter resultados satisfatórios e válidos, os seguintes itens devem ser considerados como elementos fundamentais para os resultados destes ensaios citados anteriormente (ABENDI, 2012).

- Pessoal treinado, qualificado e certificado;
- Equipamentos calibrados;
- Procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos.

A seguir serão apresentados alguns ensaios não destrutivos utilizados na indústria, com seus princípios, características, limitações e aplicações. As técnicas a seguir são utilizadas tanto em aplicações já consolidadas na indústria, quanto em aplicações novas na área de caracterização microestrutural, (NORMANDO *et. al.*, 2003)

3.1.1 Ensaio por correntes parasitas

O teste não destrutivo denominado, correntes parasitas, ou também por correntes de Foucault, tem como princípio básico a indução magnética. Este ensaio, além de ser aplicado na detecção de descontinuidades, possibilita também a determinação de algumas características físicas, tais como medição de espessura de camadas, condutibilidade elétrica, permeabilidade magnética (PEREIRA, 2007),

Na figura 3.1 apresenta-se o princípio básico do ensaio por correntes parasitas. Uma corrente elétrica alternada alimenta uma bobina, na qual produz um campo magnético na direção perpendicular a superfície da peça ensaiada, esse campo é chamado de campo magnético primário (figura 3.1a). Colocando-se a bobina próxima a superfície da amostra, o campo indutor induz correntes elétricas na superfície e no interior da peça ensaiada, denominada correntes parasitas (figura 3.1b), com o aparecimento dessas correntes elétricas alternadas, elas fluem em planos paralelos as espiras da bobina utilizada e ocasiona o campo magnético alternado que é denominado de campo magnético secundário, sua direção é a mesma do indutor, mas com sentido oposto (figura 3.1c) (PEREIRA, 2007).

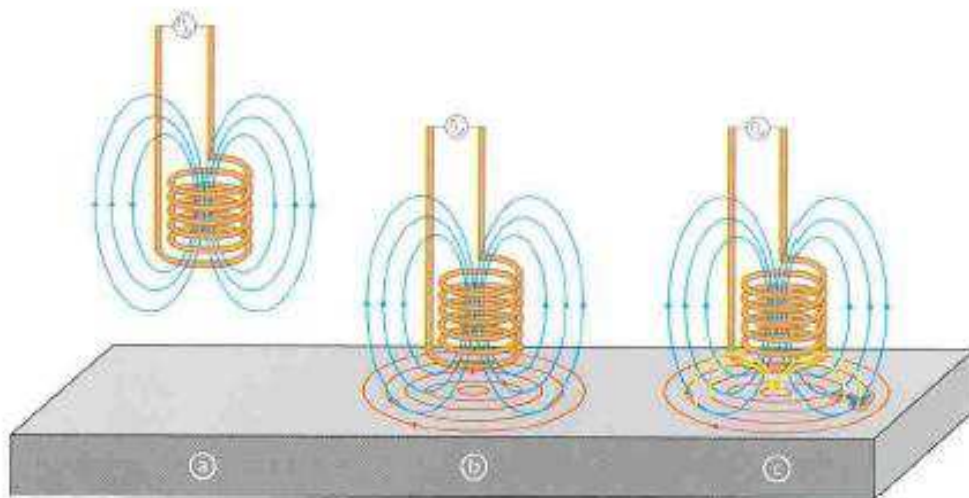


Figura 3.1. Princípio básico do ensaio de correntes parasitas (Adaptado de Pereira, 2007).

O comportamento das correntes parasitas primárias e secundárias afeta diretamente a impedância da bobina (LOUREIRO, 2010).

O campo resultante entre o campo magnético primário e secundário tem um valor menor relacionado ao campo magnético primário.

Durante a realização do ensaio, enquanto o campo aplicado pela bobina estiver em uma região homogênea no material, a impedância permanecerá a mesma. Assim, logo que a bobina atravesse uma região que contenha uma trinca, variação química, entre outros, as correntes parasitas serão afetadas e acarretará mudanças no campo secundário e assim no campo resultante.

Existe uma profundidade limite para detecção de uma descontinuidade, por meio de medidas por correntes parasitas, pois o campo magnético aplicado decresce à medida que aumenta a profundidade do material (UCHANIM, 2006).

A profundidade da penetração das correntes parasitas depende da condutibilidade elétrica do material (quanto maior a condutividade, menor a penetração), da permeabilidade magnética do material (quanto maior a permeabilidade, menor a penetração), frequência do ensaio (quanto menor a frequência, maior a penetração).

Segundo Rao (1996), a profundidade padrão para as correntes parasitas é dada por:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (3.1)$$

Onde:

f = Frequencia em s^{-1}

μ = Permeabilidade magnética em T.m/A

σ = condutividade elétrica em S/m

Segundo Loureiro (2010) esta equação realaciona a frequência de inspeção com a profundidade de penetração, pois a medida que a frequência aumenta a penetração diminui e a distribuição das correntes fica mais densa na superfície do material. A permeabilidade magnética e condutividade elétrica também possuem influência, pois quando aumentamos ambas, a penetração diminui.

O ensaio por correntes parasitas apresenta as seguintes características:

- Ótima sensibilidade na detecção de descontinuidades superficiais;
- Aplica-se tanto a materiais ferrosos e não-ferrosos;
- Possibilita elevadas velocidades de inspeção;
- Não exige uma preparação superficial rigorosa das peças e serem ensaiadas;
- Grande versatilidade, pois permite que o mesmo seja utilizado com sucesso em inúmeras aplicações.

Segundo Barboza (2009) o ensaio por correntes parasitas é um dos poucos métodos usados para a aplicações em altas temperaturas, portátil e abrange uma grande faixa de parâmetros geométricos.

Pereira (2007) em seu trabalho usou o método não destrutivo citado para inspecionar e medir a camada de óxido em tubos de revestimento de elementos combustíveis nucleares irradiados de reatores do tipo PWR. Verificando-se que a maior limitação apresentada por este método de ensaio está ligada ao fato de que somente materiais eletricamente condutores podem ser inspecionados.

Outras limitações, que de algum modo podem ser minimizadas, estão intimamente ligadas às características do material ensaiado (Pereira, 2007), podem-se citar:

- A profundidade de penetração das correntes parasitas pode ser reduzida a fração de milímetro, em materiais de condutividade maior, como é o caso do cobre, ligas de alumínio dentre outros;
- Materiais ferromagnéticos apresentam maior dificuldade na detecção e avaliação de descontinuidades devido à variação de permeabilidade magnética;
- Outra limitação diz respeito ao profundo conhecimento que o operador deve possuir sobre este método de ensaio, assim como a necessidade de padrões conhecidos para calibração do aparelho.

Alencar (2004) aplicou uma metodologia para avaliação não destrutiva de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais, dos tipos instalados nos reatores IPR-RI (TRIGA) e IEA-RI (MTR), utilizando o ensaio eletromagnético de correntes parasitas.

Loureiro (2010) caracterizou aços inoxidáveis duplex com diferentes percentuais de fase sigma por meio da técnica de correntes parasitas pulsadas, correlacionando os parâmetros da técnica com a amplitude do sinal e o tempo em que o sinal atinge o máximo.

3.1.2 Ensaio por ultrassom

O ensaio por ultrassom consiste em um método não destrutivo utilizado na detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais

variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos (ABENDI, 2012).

Este ensaio Detecta descontinuidades internas em materiais, baseando-se no fenômeno da reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material.

Seu princípio de funcionamento consiste na aplicação de um pulso ultrassônico que é gerado por um cristal com efeito piezoelétrico e transmitido por meio de um transdutor especial, encostado ou acoplado ao material. Os pulsos ultrassônicos refletidos por uma descontinuidade, ou pela superfície oposta da peça, são captados pelo transdutor, convertidos em sinais eletrônicos e mostrados na tela LCD ou em um Tubo de Raios Catódicos (TRC) do aparelho, figura 3.2, (ANDREUCCI, 2009).

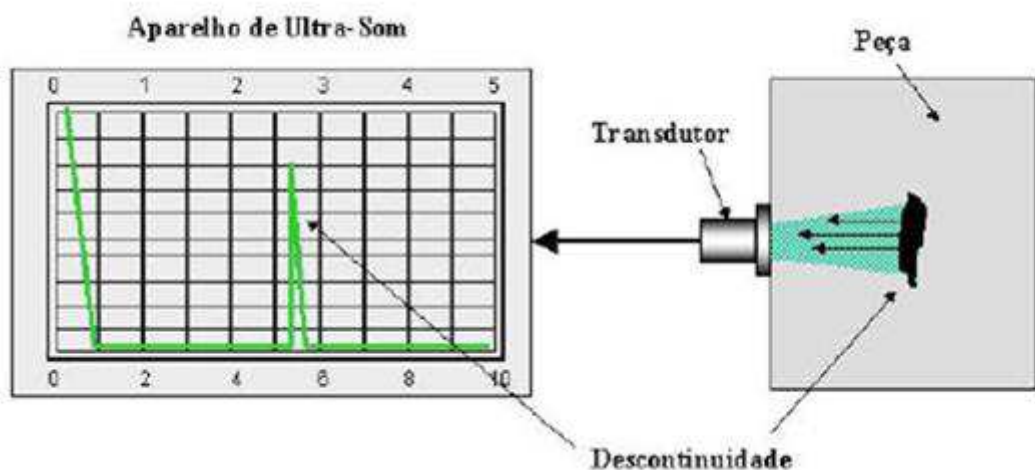


Figura 3.2. Princípio básico do ensaio por ultrassom. (Adaptado de Andreucci, 2009)

O método ultrassônico possui alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, por exemplo:

- Trincas devido a tratamento térmico e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia);
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção;
- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico,

enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não sua profundidade que em muitos casos é um fator importante para proceder a um reparo.

As limitações em relação a outros ensaios são:

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor;
- O registro permanente do teste não é facilmente obtido;
- Faixas de espessuras muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método;
- Requer o preparo da superfície para sua aplicação. Em alguns casos de inspeção de solda, existe a necessidade da remoção total do reforço da solda, que demanda tempo de fabricação.

Em seu trabalho Albuquerque *et. al.* (2010), determinaram a constante elástica de uma liga com memória de forma CuAlBe por meio do ensaio por ultrassom, eles usaram um transdutor longitudinal com frequência central de 54kHz, e um osciloscópio para medir o intervalo de tempo envolvido. Como a espessura do material ensaiado era conhecida, foi possível determinar a velocidade sônica. A partir dos dados desta velocidade e da densidade do material determinou-se a constante elástica da liga em estudo.

Silva *et. al.* (2009), aplicaram o ensaio de ultrassom em amostras de aço inoxidável duplex UNS-S31803, da classe 2205, envelhecidas na faixa de temperatura de 425 a 475 °C por diferentes tempos de envelhecimento, acompanharam as transformações de fase do material por meio das medidas da velocidade do som. Observaram que existe uma relação direta entre a velocidade do som e a dureza do material, nessa faixa de temperatura, indicando que a velocidade do som é capaz de acompanhar as transformações de fase.

Badidi *et al.* (2003) observaram em seu trabalho que a variação da microestrutura com a dureza está relacionada com a velocidade do som. Esses autores ao estudarem microestruturas mais finas de aços, verificaram que a

dureza do material aumenta a medida que a quantidade das superfícies de contornos de grãos forem maiores e conseqüentemente, maior será a velocidade do som.

3.1.3 Ensaio por partículas magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas baseia-se no princípio de que as linhas de campo magnético em um material ferromagnético são distorcidas por uma interrupção na continuidade do material, que pode ser provocada por variações dimensionais abruptas, presença de descontinuidades estruturais como trincas e porosidades (ABENDI, 2012). As linhas magnéticas do fluxo induzido no material desviam-se de sua trajetória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou sub superficial no material, pulando para fora da superfície e criando uma região denominada de campo de fuga, altamente atrativa à partículas magnéticas. Alguns exemplos típicos de aplicações deste método são na análise de materiais fundidos de aço ferrítico, forjados, extrudados, juntas soldadas, peças que sofreram tratamento térmico (porcas e parafusos), peças que sofreram retífica (trincas por retífica) e muitas outras aplicações em materiais ferrosos (ANDREUCCI, 2009).

Quando se aplica um campo magnético em um material ferromagnético, as linhas de campo fluem no material, logo se existir algum obstáculo, elas tendem a contornar. Acaso este obstáculo estiver próximo a superfície as linhas de campo tendem a contorna o mesmo ocasionando fuga de fluxo (SAMPAIO, 2009). Na figura 3.3 ilustra-se o princípio da técnica segundo Andreucci (2009).

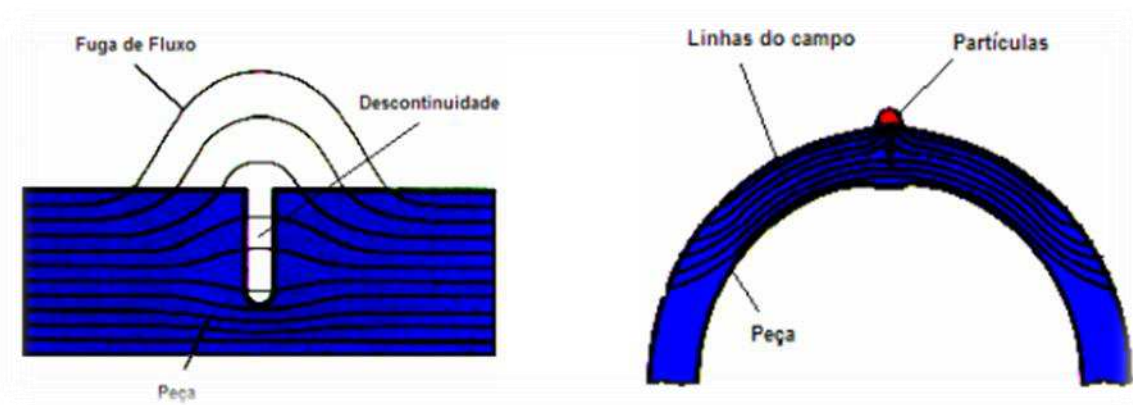


Figura 3.3. Princípio básico do ensaio por partículas magnéticas. (Adaptado de Andreucci, 2009).

As partículas magnéticas utilizadas como meio detector são classificadas conforme duas características básicas de aplicação: Via Seca em que são utilizadas a seco e Via Úmida em que são utilizadas em suspensão de um líquido como água ou óleos minerais de fina viscosidade.

As partículas magnéticas via seca são geralmente de cores amarela, cinza, branca, dentre outras. Elas possuem essas cores para dar um bom contraste com a peça analisada. Quando aplicada usa-se aplicadores de pós manuais ou bombas aspersoras que pulverizam as partículas da peça ensaiada, na forma de jato de pó. Comparando com o método por via úmida, as partículas por via seca são mais sensíveis na detecção de descontinuidades próximas a superfície, mas não são mais sensíveis para pequenas descontinuidades superficiais (ANDREUCCI, 2009).

As partículas magnéticas via úmida são realizados com luz branca e ultravioleta. Elas são preparadas para serem utilizadas como suspensão de destilado leve de petróleo ou água, a uma da concentração, sendo aplicada a superfície a ser examinada por aspersion, spray, gotejamento (MARQUES, 2006).

As características da técnica são:

- Capacidade de detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais;

- É um método portátil e os procedimentos para análise das peças é simples e fácil;
- Possível de ser realizado em peças de geometrias complexas;
- É uma técnica relativamente de baixo custo.

As limitações do ensaio por partículas magnéticas são:

- A técnica é aplicável somente em materiais ferromagnéticos;
- Baixa sensibilidade para descontinuidades esféricas;
- Só pode ser automatizado com sucesso nas etapas manuais;
- A interpretação dos resultados deve ser realizada por pessoal qualificado;
- Apesar da existência de especificações e padrões fotográficos, sempre existirá o elemento subjetivo na interpretação dos resultados;
- Normalmente o ensaio é limitado a áreas com fácil acesso.

Em seu trabalho, Carneval (2007) aplicou técnicas não-destrutivas de ultrassom *Phased Array* (aplicada pelo lado externo) e ultrassom TOFD (aplicada tanto pelo lado externo como pelo interno), que permitem essa avaliação com o equipamento ainda em operação. Estudou-se ainda as técnicas de radiografia, partículas magnéticas e ACFM que apesar de necessitarem da abertura do equipamento apresentam muito mais informações que a inspeção visual. Para esse estudo foram confeccionados corpos-de-prova com juntas soldadas de topo, com 15 mm de espessura, nas quais foram introduzidas trincas de fadiga com variados comprimentos e profundidades.

3.1.4 Ensaio por ruído barkhausen

Descoberto por Heinrich Georg Barkhausen em 1919, o efeito leva o seu nome e surge a partir de saltos repentinos que os domínios magnéticos realizam para se orientar ao campo magnético externo quando submetidos a ensaio para magnetização, figura 3.4, (YAMAURA *et. al.* 2001 e PELIZZARI, 2010). É uma técnica bastante difundida para monitorar tensão mecânica por eletromagnetismo, aplicada principalmente no controle de qualidade da fabricação de peças em aço.

A descoberta do fenômeno forneceu forte evidência para a aceitação do modelo dos domínios magnéticos, que até então havia apenas sido previsto teoricamente (FREITAS, 2011). Por meio de um experimento que hoje pode ser considerado simples. Ao colocar o sinal proveniente de uma bobina enrolada sobre um metal na entrada de um amplificador de áudio é capaz de se ouvir pequenos estalos, ruídos de frequência que são associados aos movimentos dos domínios magnéticos (FREITAS, 2011).

Segundo Pellizari (2010) os domínios magnéticos constituem a microestrutura dos materiais ferromagnéticos e no estado desmagnetizado encontram-se com a direção dos vetores de magnetização aleatoriamente distribuídos. As fronteiras entre os domínios de diferentes magnetizações são constituídas pelas paredes dos domínios que apresentam uma distribuição suave nas suas direções de magnetização.

Quando aplicamos um campo magnético, os vetores de magnetização tendem a aumentar na direção do campo magnético, causando desaprisionamento das paredes dos domínios magnéticos. Assim, quando os domínios magnéticos crescem a partir do campo magnético externo aplicado, eles encontram barreiras como: contornos de grão, discordâncias, impurezas e flutuações de composição, que são vencidos com o aumento do campo do campo magnético aplicado. Logo, o ensaio descrito, parte da idéia de descrever o movimento das paredes dos domínios como uma sequência randômica de saltos elementares das paredes dos domínios entre posições metaestáveis (BONH, 2005).

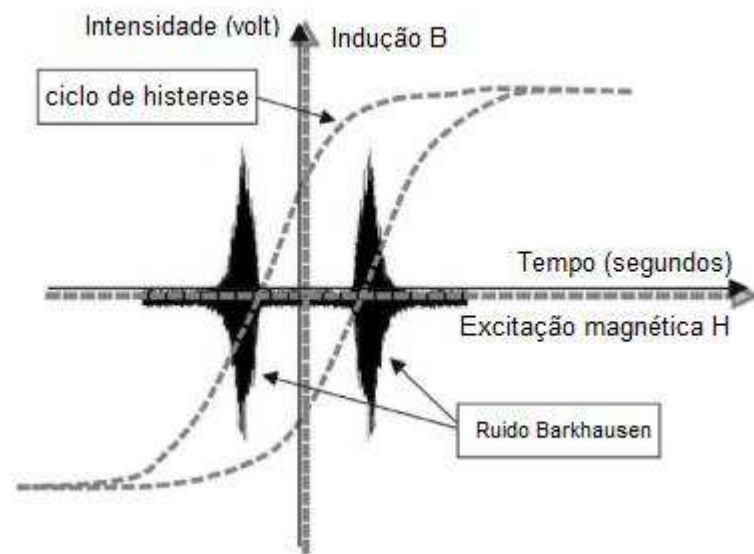


Figura 3.4. Efeito Barkhausen e a curva de histerese relacionadas (Adaptado de Freitas, 2011).

Este procedimento, pode ser utilizado para analisar uma grande variedade de propriedades intrínsecas do material: variações na dureza, alteração microestrutural, controle de qualidade em tratamentos de superfícies e em processos de usinagem e conformação, avaliação de degradação térmica ou nuclear, análise de textura e anisotropia, vida residual de fadiga, etc. e também de propriedades extrínsecas como deformações plásticas e tensões mecânicas residuais. É portátil e automatizável.

Devido à sensibilidade a uma vasta gama de características dos materiais, o Ruído Magnético Barkhausen (RMB) deve ser utilizado de maneira relativa, sendo necessária a utilização de um estado padrão de referência do material a ser inspecionado, em relação ao qual se deseja avaliar alterações. Não é possível inspeção em profundidades maiores que unidades de milímetros.

Em seu trabalho, Martins *et.al.* (2000) apresentaram alguns resultados na visualização de domínios magnéticos em amostras de aços carbono 1000 submetidos à um tratamento térmico de alívio de tensões residuais. Registrou-se imagens das estruturas de domínios magnéticos em função do tamanho de grão e intensidade dos campos magnetizantes. A visualização dos domínios

magnéticos foi feita pela técnica de microscopia por efeito Kerr juntamente com a medida da intensidade do ruído Barkhausen, permitindo assim, uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, e o desenvolvimento com maior segurança de técnicas e métodos de ensaios não destrutivos para o controle da qualidade de aços para aplicações mecânicas.

Em seu trabalho, Bohn (2005) , estudou os aços elétricos de grão não orientados em aplicações que exigem isotropia das propriedades magnéticas ao longo do plano da chapa, nas quais o campo magnético era aplicado em diferentes ângulos em relação a direção de laminação. Assim, o estudo do efeito Barkhausen auxilia o entendimento da magnorestricção, auxiliando o esclarecimento do processo de magnetização e o complexo processo de perdas nos aços elétricos ao longo da curva de histerese quando o campo magnético é aplicado em direções diferentes. Os resultados foram apresentados em termos de paredes de domínio, rotação da magnetização, nucleação e aniquilação de domínios magnéticos e evolução da complexa estrutura de domínios presente nestes aços.

3.1.5 Ensaio por ferritoscópio.

O ferritoscópio é um aparelho que emprega um campo magnético para determinar a quantidade de ferrita (fase ferromagnética) presente na amostra (TAVARES, 2006). A medida do ferritoscópio é baseada no método da indução magnética. De acordo com Tavares (2006) um campo magnético gerado por uma bobina interage com as fases magnéticas da amostra. As mudanças no campo magnético induzem uma tensão proporcional ao conteúdo de fase ferromagnética numa segunda bobina. Essa tensão é então avaliada. Como a fase estudada é uma fase paramagnética, gerada a partir da ferrita, sua precipitação deve provocar uma queda no sinal de leitura da fase ferromagnética no ferritoscópio, figura 3.5, (HELMULT, 2006).

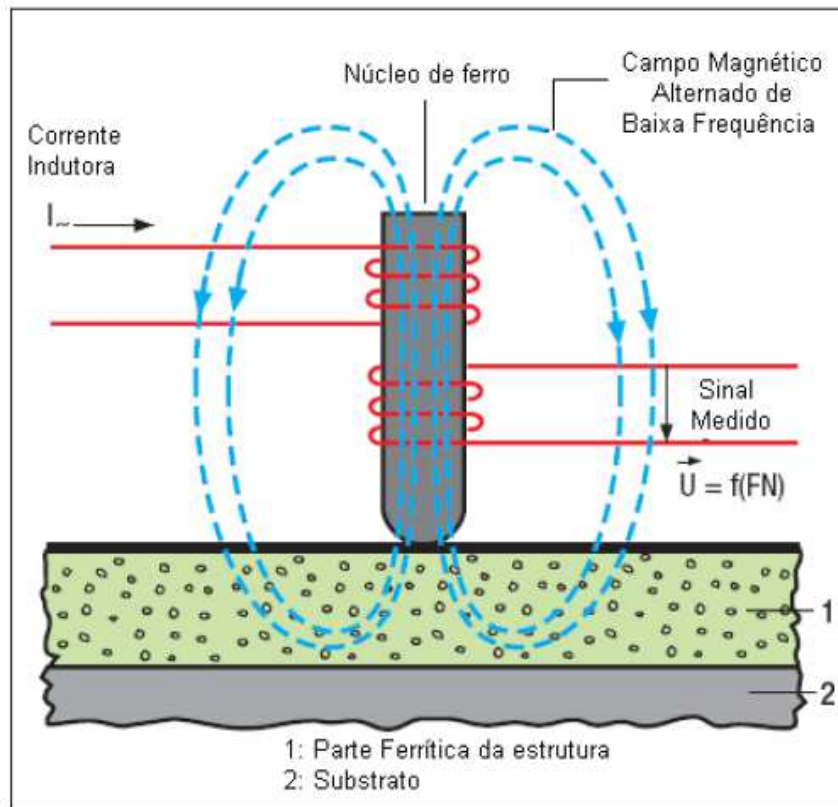


Figura 3.5. Princípio de funcionamento de um ferritoscópio (Adaptado de Helmut, 2006)

Em seu trabalho, Valeriano (2012) mostrou a variação da fração volumétrica de ferrita do aço inoxidável duplex UNS S32520 solubilizado nas temperaturas de 1050°C, 1150°C e 1250°C e envelhecido a 850°C por cinco e dez minutos.

Escriba *et. al.* 2010, em seu estudo sobre a precipitação de fases intermetálicas em aços inoxidáveis, utilizaram esse método para determinação da porcentagem de ferrita em suas amostras.

Em seu trabalho, Morais *et. al.* (2011) quantificaram a martensita induzida por deformação no aço inoxidável austenítico AISI 301L. Comparando qualitativamente com as técnicas de segmentação de imagens, difração de raios x e ferritoscopia. O mesmo comportamento foi observado para todas as amostras testadas, ou seja, que o percentual de martensita aumenta com o grau de deformação real medido em relação à redução de área, no entanto a quantificação das fases proposta por cada uma difere significativamente em

percentual, tendo a segmentação de imagens menor dispersão entre as técnicas analisadas.

Em seu trabalho, Borba e Magnabosco (2008) investigaram as alterações microestruturais entre 550°C e 650°C para o aço UNS S31803 (SAF 2205). O material em estudo foi submetido ao tratamento térmico de envelhecimento nas temperaturas de 550°C, 600°C e 650°C nos tempos de 0,5h até 96h. Assim, realizaram-se os ensaios de caracterização microestrutural por microscopia óptica, quantificação da fração volumétrica de ferrita por estereologia quantitativa e por ferritoscópio. Eles concluíram que a houve precipitação da fase α' nas temperaturas de 550°C e 600°C, devido à redução de ferrita magnética, se comparada àquela medida por estereologia quantitativa

De acordo com Passos e Otubo (2010), um estudo de caso foi analisado, onde a presença de ferrita δ e precipitados intermetálicos, particularmente a fase σ , tornaram impraticável a aplicação de flanges forjados de aço ASTM A182 F 317L em plantas de processo. Assim, foram executadas medições com ferritoscópio para avaliação da mesma ferrita δ por meios magnéticos.

3.2 Métodos dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo

O eletromagnetismo é regido por quatro equações que permite explicar a relação entre carga e campo elétrico, carga e corrente, campo magnético e corrente e o aspecto não divergente dos campos magnéticos. Esse conjunto de equações foram formuladas pelo físico inglês James Clerk Maxwell (SADIKU, 2004).

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{S} \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.5)$$

Onde:

E = Intensidade campo elétrico (grandeza vetorial)

H = Intensidade campo magnético (grandeza vetorial)

D = Densidade campo elétrico (indução elétrica, grandeza vetorial)

B = Densidade campo magnético (indução magnética, grandeza vetorial)

S = Densidade superficial de corrente elétrica (grandeza vetorial)

ρ = Densidade volumétrica de cargas (grandeza escalar)

Nas expressões anteriores, ∇ representa o operador Nabla, dado pela seguinte relação em coordenadas cartesianas.

$$\nabla = \frac{\partial \vec{i}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{j}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{k}}{\partial z} \quad (3.6)$$

Onde \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} , são os vetores unitários nas direções x , y e z respectivamente. O uso deste operador é muito semelhante ao uso de um vetor; assim, operações $\nabla \times$ e $\nabla \cdot$ (rotacional e divergente) podem ser obtidas formalmente a partir do produto vetorial e do produto escalar entre ∇ e o vetor sobre o qual o operador efetua. Entre as intensidades e as densidades de campo elétrico e magnético existem ainda as seguintes relações, válidas para materiais isotrópicos lineares:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.7)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.8)$$

$$\vec{S} = \sigma \vec{E} \quad (3.9)$$

Onde:

μ = permeabilidade magnética (Henry/metro)

ϵ = permissividade elétrica (Faraday/metro)

σ = condutividade elétrica (1 / (Ohm·metro))

μ , ϵ , e σ são grandeza escalares (constantes) para materiais isotrópicos.

Para o caso especial de fenômenos estáticos as equações 3.2 a 3.5 se reduzem à seguinte forma:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (3.10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{S} \quad (3.11)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.13)$$

Por outro lado, as equações 3.7 a 3.9 seguem válidas. Neste caso existe uma independência entre o campo elétrico e o campo magnético. Para o estudo de campos magnéticos estáticos, os quais serão abordados mais adiante pelo método dos elementos finitos, necessita-se considerar apenas as seguintes equações:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (3.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.15)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.16)$$

As equações 3.14 a 3.16 são as equações fundamentais da magnetostática. Para a derivação do Método dos Elementos Finitos será

utilizado ainda o Teorema de Green no Plano, o qual estabelece que para duas funções $u(x,y)$ e $v(x,y)$ vale a relação:

$$\iint_A \nabla^2 u(x, y) \cdot v(x, y) \cdot dA = -\iint \nabla u(x, y) \cdot \nabla v(x, y) \cdot dA + \oint_{L(A)} \nabla u(x, y) \cdot v(x, y) \cdot dl \quad (3.17)$$

As equações de Maxwell são raramente solucionadas na forma em que estão colocadas nas expressões 3.14 a 3.16, pois implicaria encontrar uma solução (analítica ou numérica) que satisfaça três equações simultaneamente, o que torna o processo de solução em geral mais difícil, sobretudo quando se procura uma solução numérica aproximada. Neste caso, torna-se mais difícil encontrar parâmetros para a solução que satisfaçam simultaneamente três equações segundo um determinado critério de otimização. Desta forma, costuma-se solucionar uma equação equivalente, a qual decorre das três equações citadas. Para tanto, introduz-se uma grandeza vetorial auxiliar chamada de "Potencial Vetorial", o qual em princípio não possui um significado físico, servindo apenas para facilitar a solução numérica, (PEREIRA, 2008).

O vetor potencial magnético \mathbf{A} é definido de tal forma que a indução \mathbf{B} seja obtida por meio do seu rotacional:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (3.18)$$

Por outro lado, pode-se mostrar que a relação abaixo vale para qualquer função vetorial:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (3.19)$$

Assim, a definição do vetor potencial magnético dada acima satisfaz a equação 3.15, conforme se pode verificar:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (3.20)$$

Introduzindo-se a equação 3.16 na equação 3.18 obtém-se:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.21)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \vec{A} \quad (3.22)$$

Introduzindo-se agora a equação 3.22 na equação 3.11 resulta a seguinte expressão:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.23)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{S} \quad (3.24)$$

Considerando-se apenas materiais isotrópicos lineares pode-se escrever ainda:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \mu \vec{S} \quad (3.25)$$

A expressão no lado esquerdo do sinal de igualdade pode ser expandida, resultando:

$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = -\mu \vec{S} \quad (3.26)$$

De acordo com a equação 3.18 a indução \mathbf{B} é obtida por meio de uma operação derivação do potencial. Existe, desta forma, um determinado grau de liberdade de escolha para o potencial vetor. A fim de simplificar a expressão acima, pode-se optar por um potencial vetor que atenda a seguinte condição:

$$\nabla \times \vec{A} = 0 \quad (3.27)$$

Com esta condição a equação 3.26 se torna

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{S} \quad (3.28)$$

A equação 3.28 é conhecida como **Equação de Poisson** no espaço, ela descreve não apenas os fenômenos eletromagnéticos, mas também muitos outros, tais como, problemas de transmissão de calor, distribuição de temperaturas, escoamento de fluidos, etc. Para o caso especial em que \mathbf{S} é igual a zero, a equação assume a uma forma conhecida como **Equação de Laplace**.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = 0 \quad (3.29)$$

A equação de Laplace pode, portanto ser considerado um caso especial da equação de Poisson, sendo que os métodos numéricos em geral procuram a solução da equação de Poisson. Conforme mostrado, por meio da introdução do vetor potencial magnético chega-se a uma única equação que representa as equações 3.14 a 3.16 O processo de solução visa assim determinar o vetor $\mathbf{A}(x,y,z)$, por meio do qual as grandezas eletromagnéticas de interesse podem ser obtidas. Para o caso particular em que o campo não variar segundo uma das variáveis (em geral a variável z), obtém-se um caso bi-dimensional. O vetor densidade de corrente é perpendicular ao plano em

que o campo é descrito, conforme estabelece a equação 3.18. Sendo o campo dependente apenas das direções x e y, a densidade de corrente terá apenas componentes segundo o eixo z. O vetor potencial magnético terá igualmente apenas componentes segundo o eixo z:

$$\vec{S} = S\vec{k} \quad (3.30)$$

$$\vec{A} = A\vec{k} \quad (3.31)$$

A e **S** são as amplitudes da densidade de campo e do vetor potencial magnético respectivamente, ambos funções escalares de x e y. No caso bi-dimensional, a equação de Poisson para a magnetostática toma a seguinte forma:

$$\nabla \times \nabla \times A = -\mu S \quad (3.32)$$

A última equação em geral é escrita da seguinte forma:

$$\nabla^2 A = -\mu S \quad (3.33)$$

O operador ∇^2 é chamado de Laplaciano. Nas regiões do domínio em estudo em que **S** é zero, vale a equação de Laplace:

$$\nabla^2 A = 0 \quad (3.34)$$

As expressões 3.33 e 3.34 representam equações diferenciais parciais de segunda ordem, as quais descrevem problemas conhecidos como

"Problemas de Valores de Contorno" ou ainda "Problemas de Potencial". Escrita de uma forma mais explícita a equação 3.33 toma a forma:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu S \quad (3.35)$$

A determinação do campo nas direções x e y se reduz à determinação do potencial $\mathbf{A}(x,y)$ segundo estas direções. A solução da equação 3.35 na forma analítica só é possível para casos com geometrias muito simples e sob certas aproximações, as quais nem sempre são justificáveis na prática, fazendo com que a solução analítica, embora possível, não possua um valor inquestionável para a grande maioria dos casos práticos.

A vantagem da solução analítica é, todavia, o fato de que a influência dos parâmetros físicos e geométricos aparece explícita na solução, facilitando a sua análise. Por outro lado, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método de solução numérica da equação 3.35 que pode ser aplicado para qualquer espécie de domínio, ele não fornece, entretanto, uma solução na forma analítica.

Uma análise da influência dos parâmetros físicos e geométricos precisa ser obtida por variações discretas de um grande número de casos semelhantes, fato que se torna cada vez mais irrelevante a medida que computadores cada vez mais potentes e sistemas de cálculo por elementos finitos mais sofisticados vão surgindo. Outra vantagem importante do MEF é a possibilidade de tratamento de casos não-lineares, o que por métodos analíticos é praticamente impraticável.

A figura 3.6 mostra um exemplo de domínio onde os fenômenos eletromagnéticos são regidos pela equação 3.35. O domínio Ω onde a solução é procurada é limitado por um contorno Γ em torno da estrutura magnética. Nas regiões em que circula corrente (\mathbf{S} diferente de zero) vale a equação de Poisson (3.33 ou 3.35). Por outro lado, onde não existe corrente (\mathbf{S} igual a

zero) vale a equação de Laplace (3.34). A solução procurada para o potencial \mathbf{A} deve, portanto, ser tal que as equações e 3.33 sejam satisfeitas.

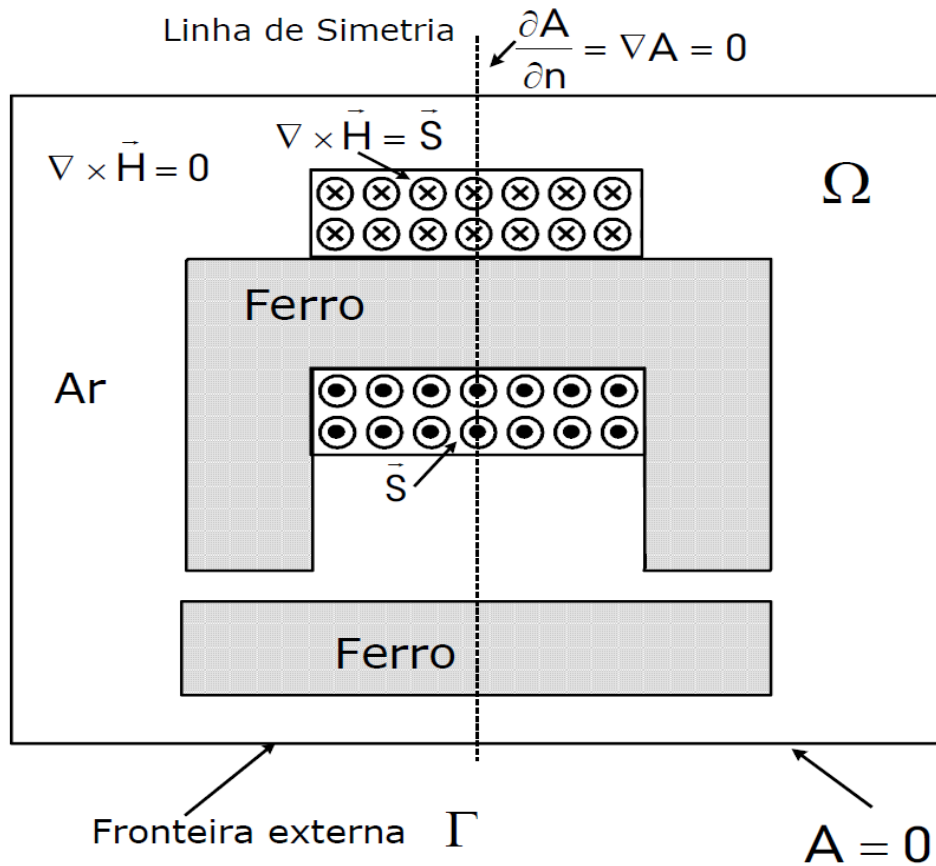


Figura 3.6. Exemplo de magnetostática: distribuição de campo regido pela equação de Poisson. (Adaptado de Pereira, 2008)

Como no caso de equações diferenciais ordinárias, a solução completa da Equação de Poisson depende dos valores do potencial na fronteira do domínio em estudo. Os dois tipos mais comuns de condições de contorno (condições de fronteira) que ocorrem no eletromagnetismo são apresentados e discutidos no que segue

A condição de contorno de *Dirichlet* é válida para segmentos do contorno em que o potencial é constante (em geral igual zero). Neste caso, o campo é paralelo ao segmento, conforme mostra a figura 3.7:

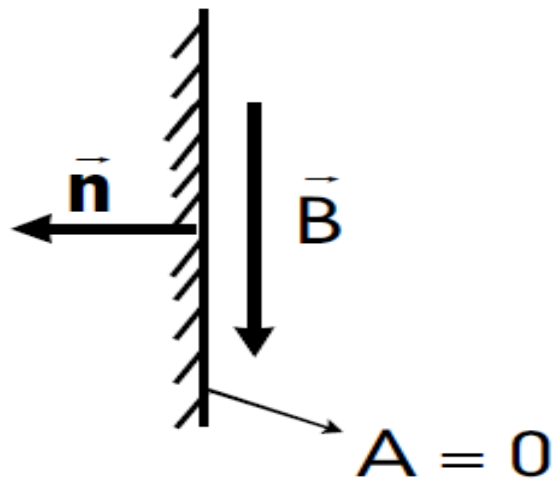


Figura 3.7. Condição de contorno de Dirichlet. (Adaptado de Pereira, 2008)

$$A = \text{constante} = 0 \quad (3.36)$$

No exemplo mostrado na figura 3.8, o potencial é assumido como zero no contorno externo do domínio considerado.

A condição de *Neumann* se aplica a segmentos do contorno em que a variação do potencial na direção perpendicular ao contorno é igual a zero. Nesta caso, a indução é perpendicular ao segmento em questão:

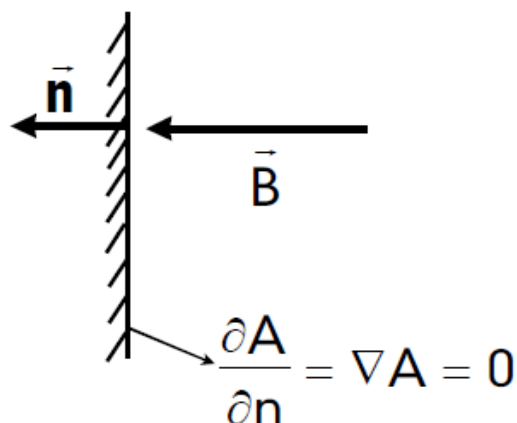


Figura.3.8. Condição de contorno de Neumann. (Adaptado de Pereira, 2008)

$$\frac{\partial A}{\partial n} = \nabla A = 0 \quad (3.37)$$

A condição de *Neumann* também se relaciona com as linhas de simetria de uma dada estrutura. No exemplo mostrado na figura 3.8 existe uma linha de simetria indicada pela linha em tracejado. Assim, existe a possibilidade de se estudar apenas uma metade da estrutura, tornando a linha de simetria numa linha de contorno tipo *Neumann*.

Baseado no exposto até aqui, a descrição dos problemas de potencial pode ser resumida na forma mostrada nas equações 3.38. Compondo a equação de Poisson, a qual é válida para o interior do domínio Ω e das condições de contorno impostas no contorno externo Γ . A condição de Dirichlet é imposta na parte do domínio designado por Γ_1 , enquanto que a condição de Neumann é imposta no restante do domínio designado por Γ_2 .

$$\begin{aligned} \nabla^2 A &= -\mu S && \text{sobre } \Omega \\ A &= 0 && \text{sobre } \Gamma_1 \\ \frac{\partial A}{\partial n} &= \nabla A = 0 && \text{sobre } \Gamma_2 \end{aligned} \quad (3.38)$$

Uma vez definido o problema de valor de contorno que se deseja resolver, pode-se passar para a solução do mesmo por meio do Método dos Elementos Finitos. O problema definido pelas equações 3.38 é um problema do tipo contínuo, uma vez que todos os pontos do domínio são incluídos tanto na descrição quanto na solução do problema. O MEF transforma este domínio contínuo num domínio discreto, onde a solução é conhecida em pontos discretos do domínio de cálculo, por exemplo em pontos de união da malha (nós).

O MEF pode ser derivado basicamente por dois caminhos, no primeiro as equações discretas são obtidas por meio da minimização de funções de energia (ou outra função equivalente), utilizando-se de princípios variacionais. O método variacional utilizado neste caso é o método de Ritz. O segundo caminho, mais rápido para a derivação das equações discretas, e que será seguido aqui, é a aplicação do método dos resíduos ponderados. Neste caso, o método empregado na derivação é o método de Galerkin, também com a particularidade de que as equações de aproximação se referem aos subdomínios discretos (elementos da malha).

Multiplicando-se a equação 3.33 por uma função $g(x, y)$ chamada de função peso ou função de amostragem, obtém-se a seguinte expressão:

$$\nabla^2 A g = -\mu S g \quad (3.39)$$

Integrando-se ambos os lados da equação anterior sobre o domínio Ω resulta:

$$\iint_{\Omega} \nabla^2 A g \cdot d\Omega = -\iint_{\Omega} \mu S g d\Omega \quad (3.40)$$

Usando-se o teorema de Green para o plano, enunciado anteriormente, chega se à forma seguinte:

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \cdot d\Omega - \int_{\Gamma} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma = \iint_{\Omega} \mu S g d\Omega \quad (3.41)$$

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \cdot d\Omega - \int_{\Gamma_1} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma - \int_{\Gamma_2} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma = \iint_{\Omega} \mu S g d\Omega \quad (3.42)$$

Considerando-se as condições de contorno definidas anteriormente, pode-se simplificar a última expressão para a que segue:

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \, d\Omega - \iint_{\Gamma} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma = \iint_{\Omega} \mu S g \, d\Omega \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial A}{\partial n} = \nabla A = 0$$

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \, d\Omega - \iint_{\Gamma_1} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma = \iint_{\Omega} \mu S g \, d\Omega \quad (3.44)$$

Como existe uma determinada liberdade na escolha da função $g(x, y)$ pode-se escolher $g(x, y)$ de tal forma que a seguinte condição seja satisfeita:

$$g(x, y) = 0 \text{ sobre } \Gamma_1 \quad (3.45)$$

Desta forma a equação 3.44 assume a forma simplificada:

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \, d\Omega = \iint_{\Omega} \mu S g \, d\Omega \quad (3.46)$$

A forma da equação acima é conhecida como "forma fraca" da equação de Poisson, ela pode ser considerada como uma forma alternativa para o problema de potencial. Assim, toda solução da equação original dada por 3.33 ou 3.35 é simultaneamente uma solução de 3.46. O termo "fraca" se refere ao fato de que as condições impostas à uma possível solução da equação 3.46 são menos restritivas que às impostas à equação de Poisson original, dada pela equação 3.33 ou 3.35. A função admissível como solução

da equação 3.33 ou 3.35 deve ter as derivadas de segunda ordem contínuas, ao passo que uma função admissível para a solução da equação 3.46 só precisa possuir a derivada de primeira ordem contínua. A grande vantagem que se obtém com o uso da forma fraca é o fato de que funções lineares podem ser admitidas como solução. A equação 3.46 representa a equação básica utilizada no MEF.

4. UTILIZAÇÃO DO EFEITO HALL PARA ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA DE MATERIAIS MAGNÉTICOS.

4.1 O efeito Hall

O efeito Hall, descoberto por Edwin Herbert Hall em 1879, já é conhecido por mais de cem anos, mas só foi colocado à utilização perceptível nas últimas três décadas com o advento da microeletrônica. O efeito Hall é utilizado na indústria em uma ampla variedade de aplicações de sensoriamento, podendo ser encontrado em tacômetros, *switches*, medidores: de posição, inclinação, nível, pressão, espessura, corrente, tensão, potência, frequência e campo magnético. Também podem ser encontrados na indústria de aviação, utilizados em avaliações não destrutivas, detectando trincas em materiais (KOSMAS, 2005).

Edwin Hall buscava compreender a influência de um campo magnético externo sob um fio condutor. Durante seu experimento, ele submeteu um condutor elétrico a um campo magnético perpendicular a direção da corrente elétrica. Ele queria verificar se a força gerada pelo campo externo atuaria sobre o fio ou sobre os portadores de carga. Se essa força atuasse sobre o fio, a resistência do mesmo se alteraria já que mudanças na corrente medida eram observadas. Como a resistência apresentou-se inalterada, Hall verificou que uma diferença de potencial elétrico aparecia nas laterais deste condutor na presença do campo magnético. Ele propôs a presença de um estado de tensão em uma determinada região do condutor, devido ao acúmulo de portadores de

carga, que originaria uma diferença de potencial transversal mais tarde conhecida como tensão de Hall.

Este efeito ocorre devido a cargas elétricas tenderem a desviar-se de sua trajetória por causa da força de Lorentz. Desta forma cria-se um acúmulo de cargas nas superfícies laterais do condutor produzindo uma diferença de potencial. O excesso de cargas positivas e negativas funciona como um capacitor de placas paralelas, com um campo elétrico conhecido como campo Hall ou tensão Hall. Chegará um momento em que a força Hall equilibra a força magnética

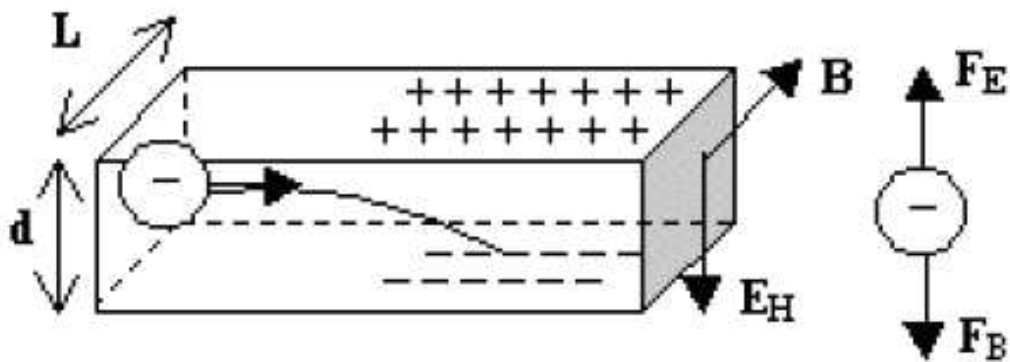


Figura. 4.1. Princípio básico do efeito Hall. (Adaptado de <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod00/index.html>)

A equação que relaciona tensão hall, campo magnético intensidade de corrente é dado por:

$$V_H = I B \operatorname{sen} \alpha \quad (4.1)$$

Onde:

V_H = tensão hall

I = corrente elétrica

B = densidade de campo magnético

A equação 4.1 mostra que a Tensão Hall (V_H) é proporcional ao produto vetorial da corrente (I) com o campo magnético (B).

4.2. Sensor Hall

O elemento Hall é o sensor de campo magnético básico. Ele requer o condicionamento do sinal para fazer a saída utilizável para a maioria das aplicações, pois a tensão Hall é um sinal de baixo nível na ordem de 30 microvolts na presença de um Gauss magnético. Para o condicionamento desses sinais eletrônicos, é preciso um amplificador e um compensador de temperatura. É preciso um regulador de tensão quando a operação do sensor se dá por meio de uma fonte que não mantém uniformidade de valores, figura 4.2.

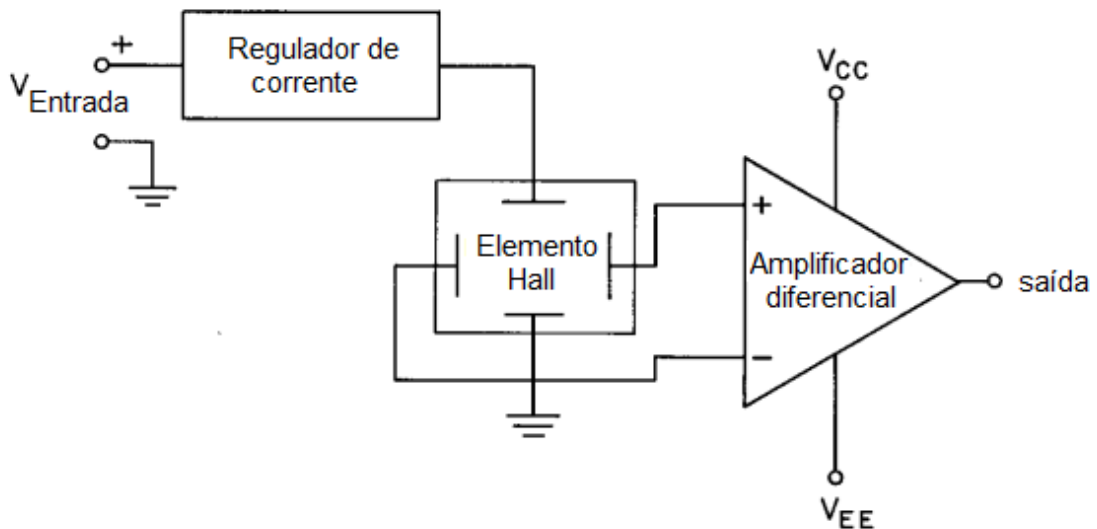


Figura 4.2. Diagrama básico de um sensor hall. (Adaptado de Allegro®, 2009)

Como a tensão de Hall é uma função da corrente de entrada. A finalidade do regulador na Figura 4.2 é manter esta corrente constante, de modo que a saída do sensor apenas reflete a variação na intensidade do campo magnético. Como muitos sistemas têm um fornecimento regulado

disponível, alguns sensores de efeito de Hall podem não incluir um regulador interno (ALLEGRO®, 2009).

O amplificador mostrado na Figura 4.2 deve ser um amplificador diferencial, de modo a amplificar somente a diferença de potencial - a tensão Hall. Os sensores fornecem uma tensão hall de saída proporcional ao campo magnético aplicado. Como o campo magnético tem duas polarizações, ou seja, norte e sul, dependendo da direção em que ele é aplicado ao sensor, ou seja, o resultado da saída do amplificador será positivo ou negativo. Para que a saída da tensão hall não seja muito afetada em relação a polaridade do campo magnético, é forçado um “*Null Off Set*” que ocasiona a simetria de trabalhar tanto com qualquer uma das polaridades. Esse valor aparece quando nenhum campo magnético é aplicado ao sensor. Assim, quando um campo positivo é detectado, a saída aumenta acima da tensão nula. Por outro lado, quando um campo magnético negativo for detectado, a saída diminui abaixo do nulo da tensão, mas permanece positivo (ALLEGRO®, 2009). Este conceito é ilustrado na Figura 4.3.

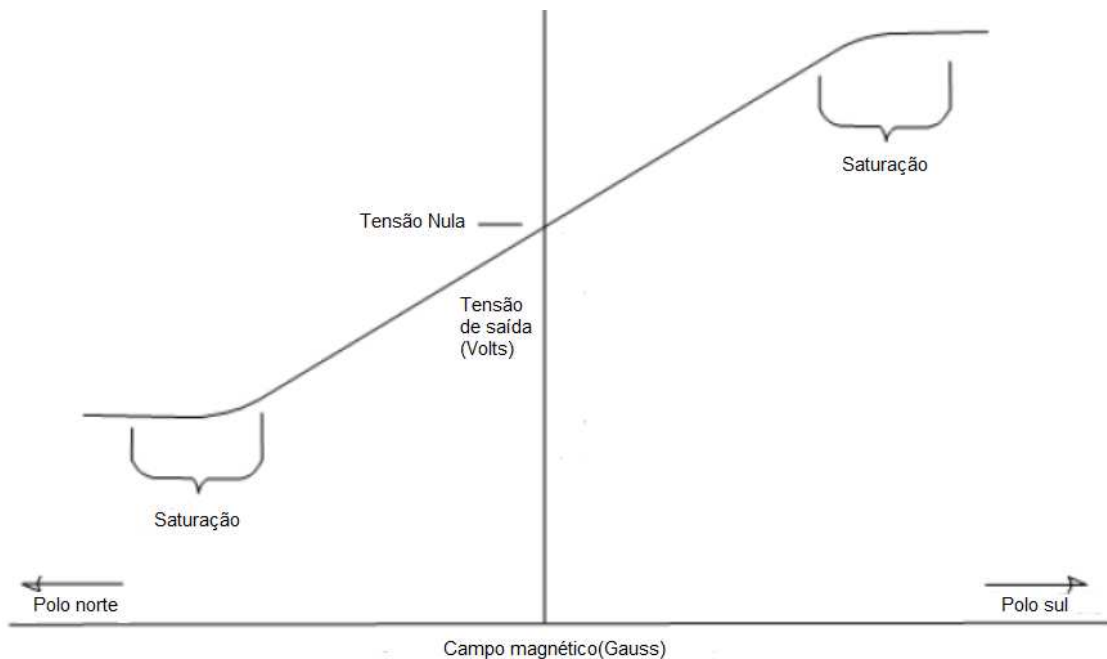


Figura 4.3. Curva típica de saída de um sensor Hall. (Adaptado de Allegro®, 2009).

A saída do amplificador não pode exceder o limites impostos pela fonte de alimentação. Na verdade, o amplificador começará a saturar antes dos limites da fonte de alimentação serem atingidos. Esta é a saturação ilustrada na Figura 4.3 É importante notar que esta tem lugar no amplificador e não no elemento de Hall. Assim, valores altos de campos magnéticos aplicados aos sensores de efeito Hall, não irá danificar os sensores, mas sim levá-los para a saturação (ALLEGRO®, 2009).

A função que descreve a tensão de saída em termos da sua entrada no sensor é chamada de função transferência, ela pode ser expressa em termos de uma equação ou um gráfico figura 4.4.

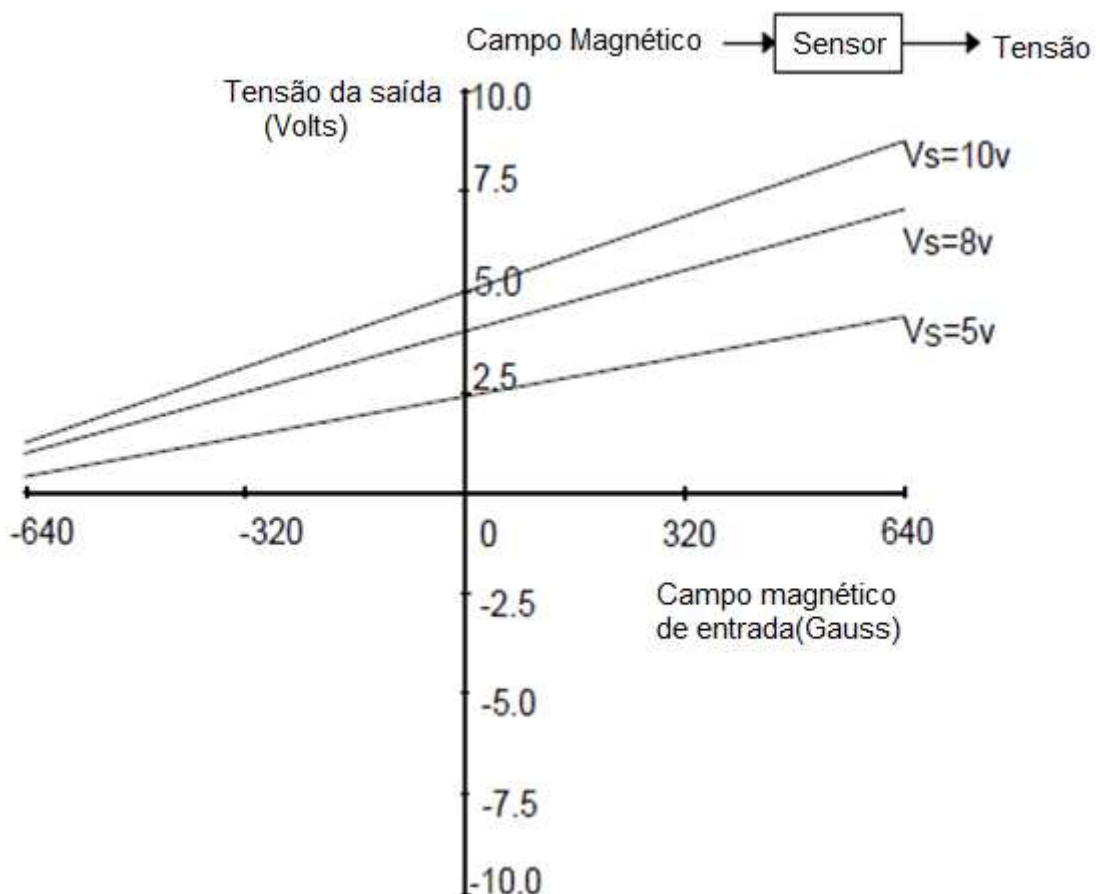


Figura 4.4. Função transferência graficamente

A função de transferência expressa a relação entre uma entrada de campo magnético (gauss) e uma saída de tensão. O função de transferência para um sensor de saída analógico é dada por:

$$V_{OUT} = (6.25 \times 10^{-4} \times V_S)B + (0.5 \times V_S) \quad - 640 < B(\text{Gauss}) < 640 \quad (4.2)$$

Onde:

V_{OUT} = Tensão de saída.

B = Campo magnético

A função de transferência, ou seja, a equação 4.2 é caracterizada por três parâmetros: sensibilidade, *null offset* e extensão.

A sensibilidade é a entrada mínima do parâmetro físico que irá criar uma variação detectável na saída, ou em outras palavras, a inclinação da reta do gráfico da figura 4.4.

Tensão nula é a tensão de saída do sensor sem a aplicação do campo magnético.

Span define o intervalo de saída de um sensor de saída analógica. Span é a diferença na tensão de saída, quando a entrada é variada de gauss negativo (norte) para gauss positivo (sul), dado por:

$$V_S - 2,5 = 2,5 - V_N \quad (4.3)$$

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. O estudo experimental da influência da espessura da peça nas medidas de tensão Hall

Esta etapa foi dividida em duas partes: a primeira para determinação do campo externo a ser aplicado e a segunda para determinação da influência da espessura nas medidas realizadas pelo sensor Hall.

5.1.1 Determinação do campo externo para medição

Utilizou-se uma amostra de aço SAE 1020 de 24 mm de diâmetro e espessura de 11 mm. As medidas foram realizadas na posição central e a 3 mm das extremidades, na mesma linha.

As medidas de tensão Hall foram realizadas em uma bancada de teste conforme figura 5.1 (FRANÇA NETO, 2011). Esta é constituída por uma placa de aquisição de dados equipada com conversor analógico-digital de 10 bits, uma fonte de alimentação com regulador de corrente, um sensor de efeito Hall do tipo SS495A com sensibilidade de 3.125mV e um solenoide.

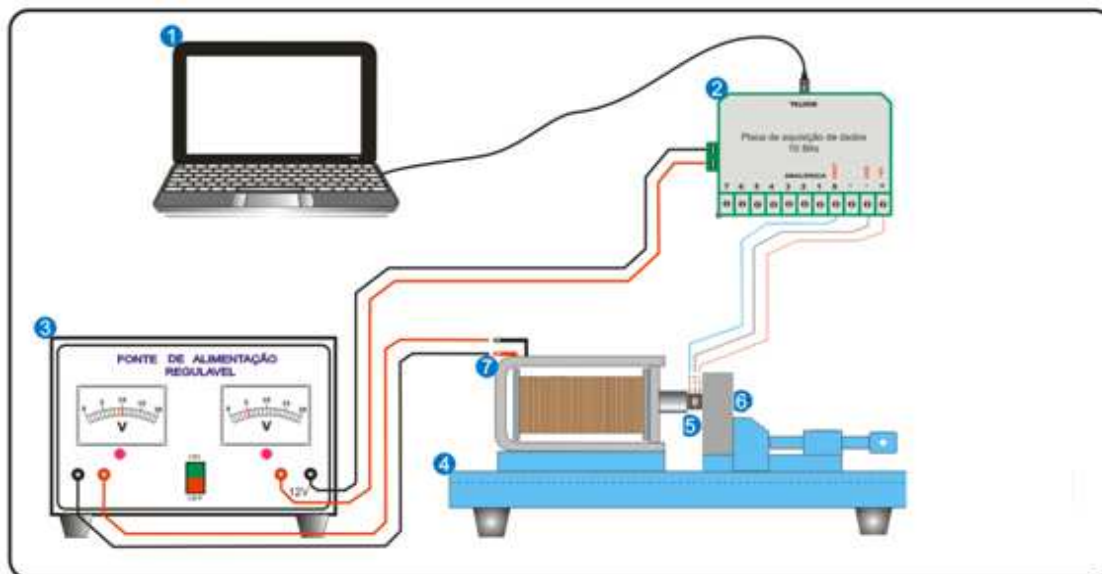


Figura 5.1. Configuração experimental do END, contendo: (1) computador; (2) placa de aquisição de dados; (3) fonte c/ regulador de tensão; (4) bancada de ensaios; (5) sensor Hall; (6) amostra; (7) Bobina. (Adaptado de França Neto, 2011)

Foram aplicados os seguintes campos magnéticos externos na peça: 270, 370 e 470 Gauss. Estes campos foram gerados, na região central do núcleo de um eletroímã, antes do posicionamento da peça, através da aplicação de diferentes correntes elétricas. Cinquenta medidas foram realizadas em cada ponto e o intervalo de confiança adotado foi de 95%.

5.1.2 Determinação da influência da espessura sobre as medidas

O estudo da influência da espessura da peça nas medidas de tensão Hall foi realizado em uma amostra de aço SAE 1020 de 24 mm de diâmetro e espessuras de 2, 4, 6, 8 e 11 mm. As medidas foram realizadas na posição central das amostras e deslocadas para direita e esquerda, com espaçamentos iguais a três milímetros, sendo realizadas em três posições para direita e três para esquerda na mesma linha. Estas medidas foram realizadas utilizando a mesma configuração experimental da figura 5.1. Aplicou-se o campo externo considerado e definido como estabelecido no item 5.1.1.

5.2 Simulação dos resultados

Esta etapa foi dividida em duas partes, sendo a primeira para calibração dos dados experimentais levantados para simulação e a segunda a simulação, propriamente dita, pelo Método dos Elementos Finitos.

5.2.1 Levantamentos dos dados experimentais necessários para simulação

5.2.1.1 Determinação da relação entre número de espiras(N) e comprimento da bobina(L) (calibração da bobina solenóide).

A relação N/L foi determinada a partir da inclinação do gráfico da curva de densidade de linhas de campo contra corrente aplicada, no solenóide, sem a presença do núcleo. A melhor curva foi obtida por regressão dos pontos, pelo método dos mínimos quadrados, para obtenção da inclinação. Esta

relação foi utilizada para ser multiplicada pela corrente aplicada e obter-se a intensidade de campo magnético (H) aplicada.

5.2.1.1 Determinação da permeabilidade do núcleo do solenóide

A permeabilidade do núcleo foi obtida a partir da inclinação do gráfico de **B** contra **H** para o solenoide com núcleo. A melhor curva, para determinação da inclinação, foi obtida pela regressão dos dados, usando - se o método dos mínimos quadrados.

5.2.1 Determinação da permeabilidade da peça

As amostras com diferentes espessuras foram submetidas a diferentes intensidades de campo magnéticos e levantado o gráfico de **B** contra **H**. A inclinação da melhor reta foi obtida pelo método dos mínimos quadrados. O valor desta inclinação correspondeu a permeabilidade do material

5.2.2 Simulação dos experimentos

Os experimentos foram simulados usando o programa computacional Ansys® versão 14. Os seguintes foram simulados: solenóide sem núcleo, solenóide com núcleo e solenóide com o material com as espessuras de 2, 4, 6, 8, 11, 14, 17 e 20mm. Aplicou-se os seguintes campos externos: 270, 370 e 470 Gauss.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Apresentação

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e a discussão do estudo realizado. Na primeira parte apresenta - se o estudo da influência da geometria e espessura da peça nas medidas de tensão Hall. Na segunda parte descreve - se o levantamento de dados para a análise numérica e a partir daí as simulações propriamente ditas, dividindo-se na seguinte sequência:

- Determinação dos parâmetros geométricos do solenóide.
- Determinação da permeabilidade magnética do núcleo da bobina.
- Determinação da permeabilidade magnética do corpo de prova.

Na terceira parte é apresentada a simulação da influência da espessura da peça nas medidas de campo obtidas a partir de um sensor de efeito Hall.

6.1.1 O estudo da influência da espessura da peça nas medidas de tensão Hall

No presente estudo a análise da interação da penetração de linhas de campo em um aço SAE 1020 foi realizada com a aplicação de vários campos magnéticos.

Na figura 6.1 temos os resultados de medidas de tensão Hall para uma amostra de 24 mm de diâmetro de aço SAE 1020 e 11mm de espessura. Neste teste foram aplicados os seguintes campos: de 270, 370, 470 Gauss. As medidas foram realizadas na região central da amostra e próximo às extremidades. Nas tabelas 6.1 e 6.2 são apresentados os valores das medidas de tensão Hall para os campos empregados, bem como as margens de erro para uma amostragem de cinquenta medições.

Tabela 6.1. Valores de tensão Hall para centro e extremidade, de amostras com 11 mm de espessura e campos de 270, 370 e 470 Gauss

Campo magnético de 270 Gauss		
-9	3,36514	0,00250
0	3,34492	0,00262
9	3,36260	0,00257
Campo magnético de 370 Gauss		
-9	3,61514	0,00258
0	3,59131	0,00214
9	3,61465	0,00267
Campo magnético de 470 Gauss		
-9	3,90206	0,00273
0	3,88562	0,00257
9	3,89758	0,00258

Na figura 6.1 estes valores são colocados nos gráficos, bem como as respectivas margens de erros.

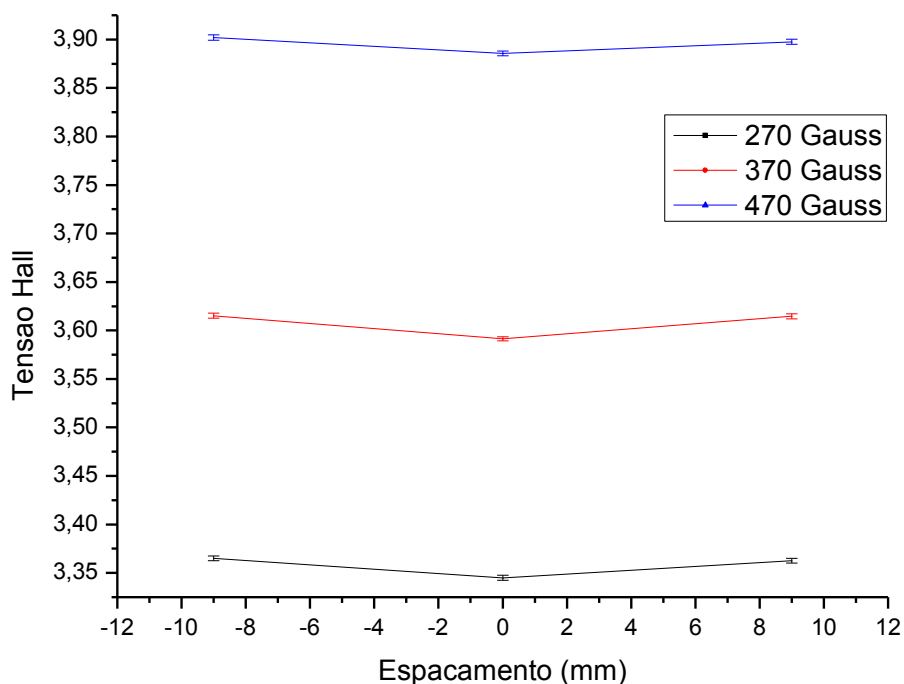


Figura 6.1. Variações de medidas entre a extremidade e o centro, para um aço SAE 1020 com 11mm de espessura, em função dos campos de 270,370,470 Gauss.

Analisando a figura 6.1, nota-se um aumento dos valores de tensão Hall em função dos valores crescentes de campos aplicados. Isto se deve ao fato de que a tensão Hall é diretamente proporcional ao valor do campo, (SILVA *et. al.*, 2012). Mostra-se nas figuras, que existe uma diferença de comportamento nos valores de medidas entre as extremidades e o centro da peça. O valor do campo em que se mede esta diferença com uma maior amplitude, é o de 270 Gauss, ou seja, este apresenta maior variação de tensão hall entre o centro e a extremidade. Este aumento de amplitude, a medida que reduz o valor do campo aplicado, pode ser explicado pelo fato de que o sensor Hall utilizado satura com 600 Gauss.

O valor de 270 Gauss foi escolhido como campo, a ser utilizado nos experimentos seguintes.

Na figura 6.2 temos a variação das medidas de tensão Hall, em função da variação da espessura, para uma amostra com 24 mm de diâmetro, submetida a um campo magnético de 270 Gauss. As medidas foram realizadas a partir do centro da amostra, sendo realizadas três medidas para cada lado. O ponto central corresponde ao ponto zero do gráfico.

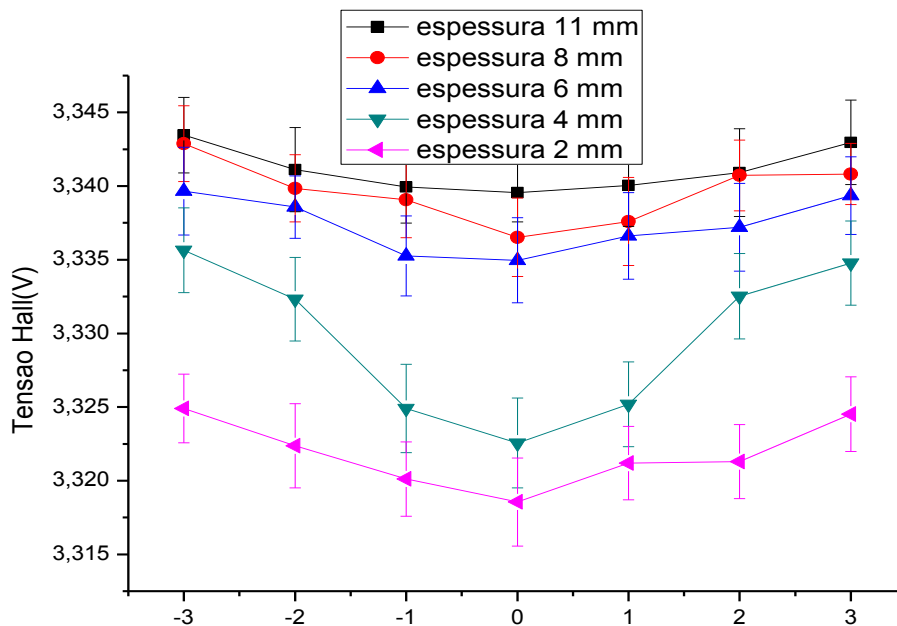


Figura 6.2 Variação da tensão Hall em relação a posição.

Em um material ferromagnético quando submetido à ação de um campo externo, ocorre a magnetização, devido à interação do campo com os dipolos magnéticos e domínios magnéticos do material (CALLISTER, 2002). Na figura 6.2 temos a aplicação de um campo magnético sobre um material com variação apenas da espessura. A contribuição da magnetização sobre o material é a mesma, visto que a variação é somente da espessura do material. Como a permeabilidade magnética é a mesma, o sensor Hall estará submetido a uma densidade de linhas de campo constante. Sensores de efeito Hall têm como resposta um valor de tensão que é proporcional a corrente e campo

aplicados. Para que os valores sejam máximos o campo tem que ser aplicado perpendicularmente ao elemento Hall.

Ao analisarmos o ponto central (zero), que corresponde a medidas realizadas no centro da peça, notamos que os valores de tensão Hall aumentam com o aumento da espessura do material. Estes valores tendem a ficar constante para espessuras a partir de 8mm. Este aumento se deve a maior facilidade de penetração das linhas de campo à medida que a espessura aumenta. Como a diferença de permeabilidade magnética entre a peça ferromagnética ensaiada e o meio externo ar é grande, as linhas de campo terão maior dificuldade de penetração para espessuras menores, levando a uma redução do ângulo de penetração das linhas de campo e uma consequente redução dos valores de tensão Hall. Deste modo, existe um valor de espessura a partir da qual as linhas terão facilidade de penetrar sem sofrer a influência da interface oposta, que é de ar. Para o ensaio realizado esta espessura foi de 8mm.

Na figura 6.2 observa - se também um aumento nos valores de tensão à medida que as medições são deslocadas para a extremidade da peça. As linhas de campo quando aplicadas, no centro de simetria da peça, elas têm a facilidade de deslocarem uniformemente ao longo do raio da peça, resultando numa redução do ângulo de incidência e redução nos valores de tensão. Contudo, quando aplicadas nas extremidades, as linhas tendem a migrar para o lado de maior permeabilidade. As linhas próximas à interface ferro e ar tenderam a penetrar o mais perpendicular da peça e depois fluir para o material. Este comportamento também foi observado em trabalhos realizados com a simulação de linhas de campo em transformadores (CARLSON e WURTZ, 2012).

6.1.2 Determinação dos parâmetros geométricos do solenoide

6.1.2.1. Determinação da relação entre número de espira (N) e comprimento da bobina (L).

O número de espiras do solenóide e o seu comprimento são dados necessários para simulação dos experimentos. Para obtenção destes, foi levantado o gráfico da variação entre a densidade de linhas de campo (**B**) contra **I** (intensidade de corrente elétrica), para o solenóide sem o núcleo, possuindo somente o ar no seu interior. Os resultados obtidos experimentalmente pela variação da corrente elétrica e campo magnético são mostrados na tabela 6.2.

Tabela 6.2. Valores de corrente elétrica e do campo magnético.

Corrente Elétrica (Ampére)	Campo Magnético (Gauss)
0.034	1.375
0.041	2.562
0.048	3.718
0.055	4.625
0.062	5.375
0.069	6.062

Os dados da tabela 6.2 foram utilizados para construção do gráfico da figura 6.3.

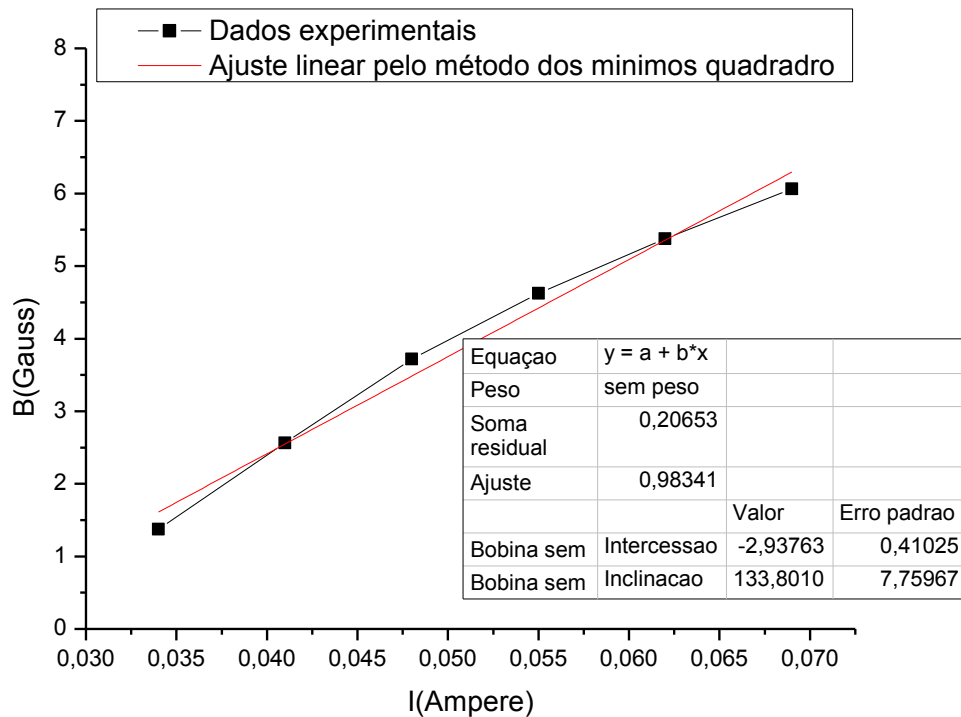


Figura 6.3. Densidade de campo magnético em função da intensidade de corrente elétrica.

Os resultados mostram que a curva entre o campo magnético e a intensidade de corrente é linear, figura 6.3. Sabemos que para uma bobina sem núcleo a relação entre intensidade e densidade de campo magnético, no sistema cgs é dado por:

$$B = H \tag{6.1}$$

com $H = \frac{NI}{L}$ para um solenóide

Onde:

B = Densidade de campo magnético

H = Intensidade de campo magnético

N = número de espiras

I = Corrente elétrica (Ampere)

L = Comprimento da bobina (Metro)

A partir da equação 6.1 temos que a relação B/I , determina a tangente da reta **mostrada na figura 6.3, correspondendo** à relação entre N/L , que vale 133,8. Este valor será usado para determinação da intensidade de campo magnético aplicado (\mathbf{H}), que será o produto dessa relação pela corrente aplicada.

6.1.2.2 Determinação da permeabilidade magnética do núcleo da bobina.

A permeabilidade magnética do núcleo da bobina é obtida a partir da tangente do gráfico entre a variação de \mathbf{B} (densidade de linhas de campo) contra \mathbf{H} (intensidade de campo magnético). Este gráfico é apresentado na figura 6.4. Os dados deste gráfico com a margem de erro das medidas são mostrados na tabela 6.3.

Os resultados mostram que a curva entre a densidade de linhas de campo e a intensidade de campo magnético linear, figura 6.4, sabendo-se que para uma bobina com núcleo a relação entre a intensidade de campo e a densidade de campo magnético no sistema cgs é dado por:

$$B = \mu H \tag{6.2}$$

Onde:

μ = Permeabilidade do material

Tabela 6.3. Campo magnético em relação a intensidade.

Corrente elétrica (Ampere)	Campo magnético (Gauss)	Intensidade de campo magnético (Oested)	Margem de erro (%)
0,034	112,0	4,522	0,88685
0,041	137,6	5,453	0,70319
0,048	156,8	6,384	0,75856
0,055	179,2	7,315	0,5278
0,062	198,4	8,246	0,70299
0,069	217,6	9,177	0,71420
0,076	233,6	10,108	0,70428
0,083	256,0	11,039	0,77068
0,090	275,2	11,970	0,67414
0,097	317,2	12,901	0,66208
0,104	320,0	13,832	0,74122
0,111	342,4	14,763	0,52458
0,118	358,4	15,694	0,69413
0,125	374,4	16,625	0,63454
0,132	387,2	17,556	0,73521
0,139	406,4	18,487	0,66294

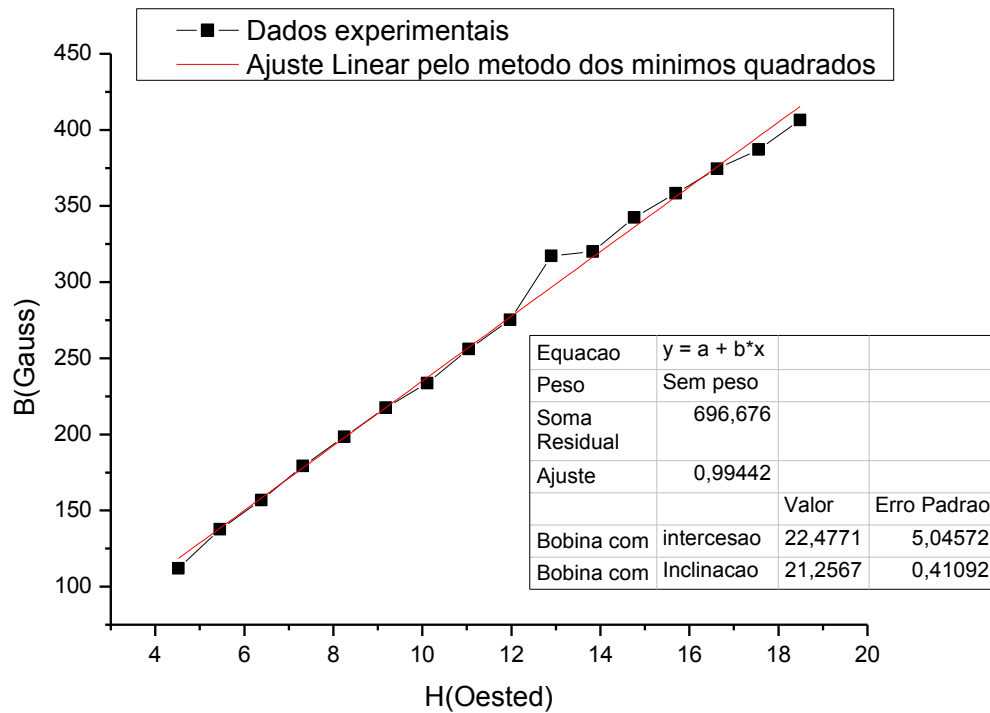


Figura 6.4. Campo magnético em função da intensidade de campo para a bobina com núcleo.

Conforme análise da figura 6.4 temos que a permeabilidade do núcleo ferrítico é 21,2567 uem, que é a tangente da reta de ajuste.

A presença do núcleo da bobina tem um efeito sobre a magnetização do material. Sobrepondo os dois graficos anteriores, figura 6.3 e 6.4, nota-se um aumento dos valores do campo para o material com núcleo, figura 6.5.

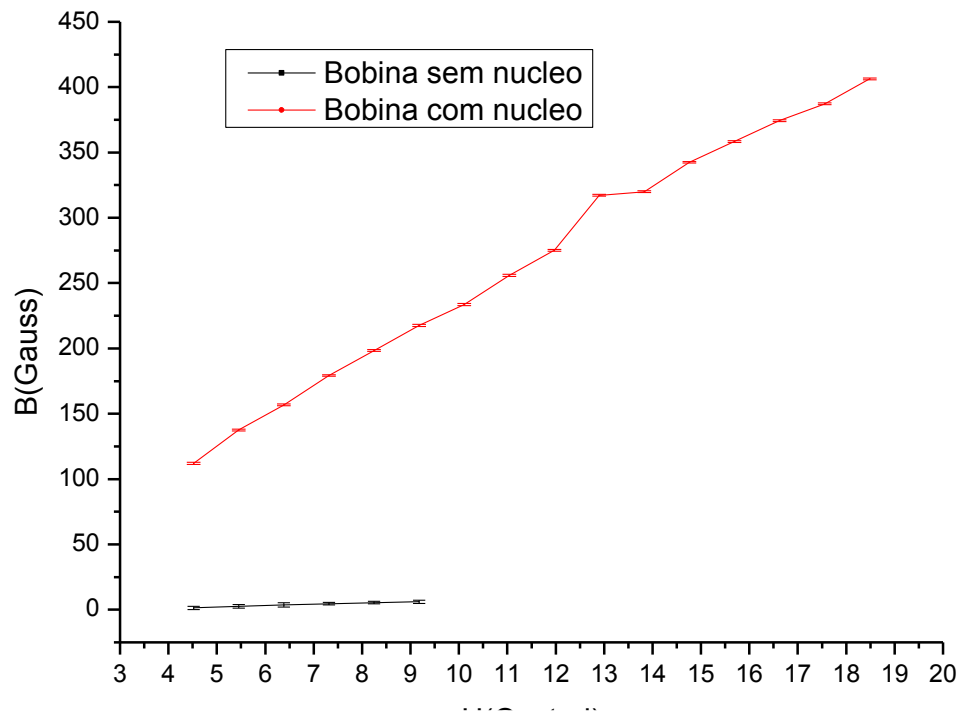


Figura 6.5. Bobina com e sem núcleo.

Um material ferromagnético quando submetido à ação de um campo externo, o campo aplicado é ampliado pela parcela de magnetização, devido à interação do campo com os dipolos magnéticos e domínios magnéticos do material (CALLISTER, 2002).

6.1.2.3 Cálculo da permeabilidade magnética do material estudado

Na figura 6.6 mostra-se a curva de magnetização **B** contra **H** do material em estudo, para diferentes espessuras. Nota-se que para todas as espessuras utilizadas a inclinação é a mesma e que os resultados tendem a saturar para a intensidade de campo magnético a partir de valores em torno de 13 Osted. Isto se deve ao ponto de saturação do sensor Hall SS495A.

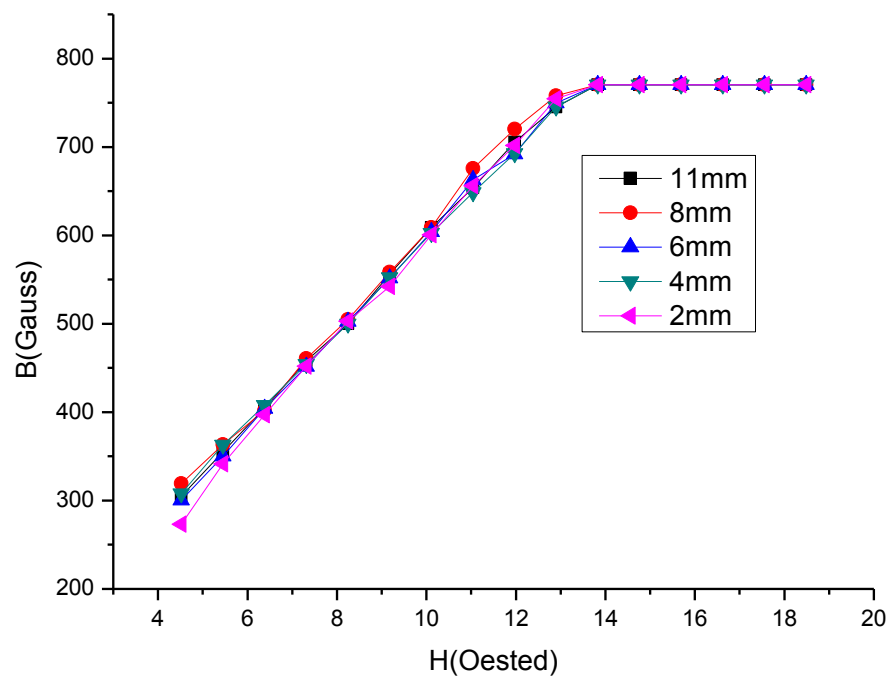


Figura 6.6. Variação de **B** contra **H** para o aço SAE 1020, com diferentes espessuras.

Para o cálculo da permeabilidade do corpo de prova, escolhemos o corpo de prova de 11mm de espessura. O gráfico de **B** contra **H** para esta espessura é apresentado na Figura 6.7. A permeabilidade calculada foi de 51,667uem.

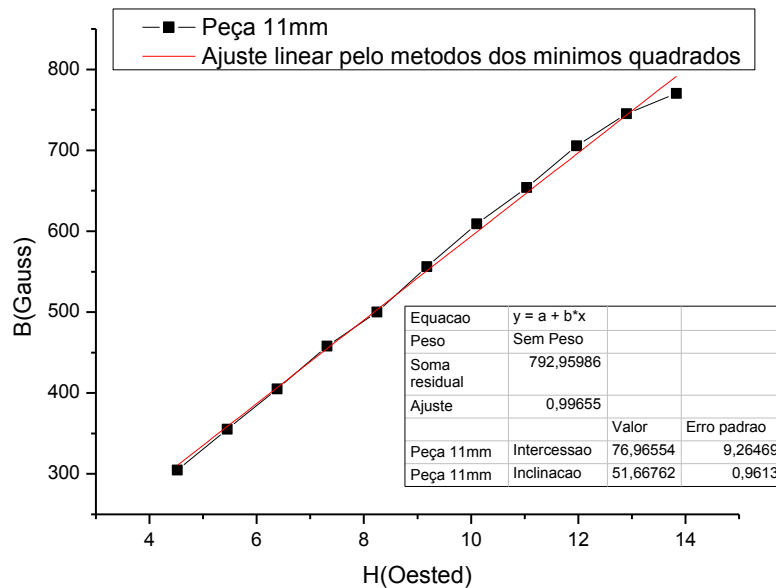


Figura 6.7. Variação de **B** contra **H** para o aço SAE 1020 com espessura de 11 mm.

6.1.3 Simulação do efeito da espessura sobre as medidas de campo obtidas a partir de um sensor Hall

Para a simulação do efeito da espessura nas medidas de campo magnético, esta parte foi dividida em três seções:

- Simulação da bobina sem núcleo;
- Simulação da bobina com núcleo;
- Simulação do efeito da espessura do material.

6.1.3.1 Simulação da bobina sem núcleo

Na figura 6.8 mostra-se a variação das medidas de densidade de campo e corrente elétrica, da bobina sem núcleo, confrontando resultados experimentais e simulados. Os resultados mostram a concordância entre estes resultados. A medida experimental do gráfico foi utilizada na determinação da relação entre o número de espiras e o comprimento da bobina (relação N/L), necessária para determinação das medidas de intensidade de campo magnético (**H**).

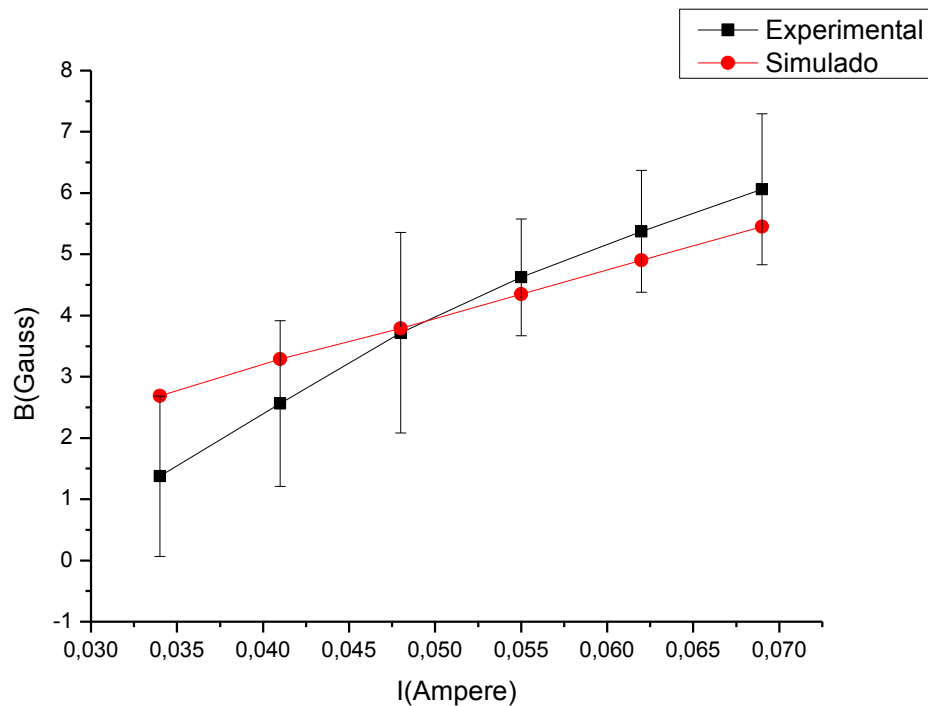


Figura 6.8. Medidas experimentais e simuladas da variação da densidade de campo e corrente, para bobina sem núcleo.

6.1.3.2 Simulação da bobina com núcleo

O gráfico de **B** contra **H** para bobina com núcleo utilizado para determinação da permeabilidade do material do núcleo foi simulado e é mostrado na figura 6.9. Os resultados simulados concordam com os experimentais para valores até 0,07A com erro de 3,7% para este valor de corrente. A partir deste ponto começa a ser observado um aumento entre a diferença das medidas experimentais e simuladas. Para uma corrente de 0,14 A esta diferença chega a ser de 13,5%. Este distanciamento entre as medidas experimentais e simuladas pode ser associado à particularidade do sensor utilizado que satura quando as medidas se aproximam de 600 Gauss. Perda de precisão em medidas realizadas com sensores de efeito Hall próximas ao ponto de saturação também foram observadas em trabalho realizado por França Neto (2011).

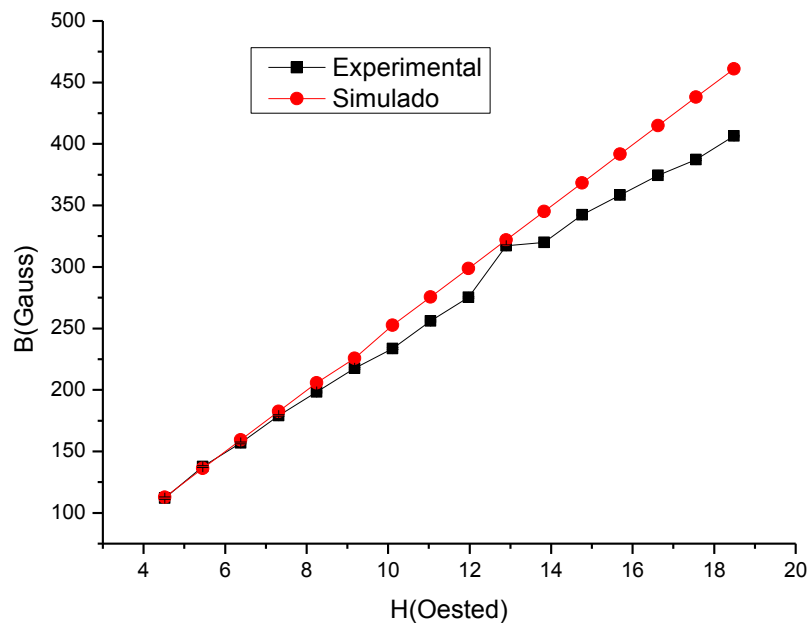


Figura 6.9. Variação de **B** versus **H**. Resultados experimentais e simulados da bobina com núcleo.

6.1.3.3 Simulação do efeito da espessura do material

A figura 6.2 mostrou a influência da espessura da peça sobre os valores de medidas realizadas com sensores de efeito Hall para um campo aplicado na peça de 270 Gauss. Este valor de campo foi obtido no centro do solenoide sem a presença da peça e depois a peça foi posicionada para a realização das medidas. Na figura 6.10 temos a simulação do solenóide antes da colocação da peça. Esta mostra que na região central do solenoide, representada em vermelho na figura, o campo é aplicado é de 281,9 Gauss, apresentando um erro de 4% em relação ao experimental. Parte deste erro está associada à imprecisão na determinação das medidas geométricas reais do solenoide.

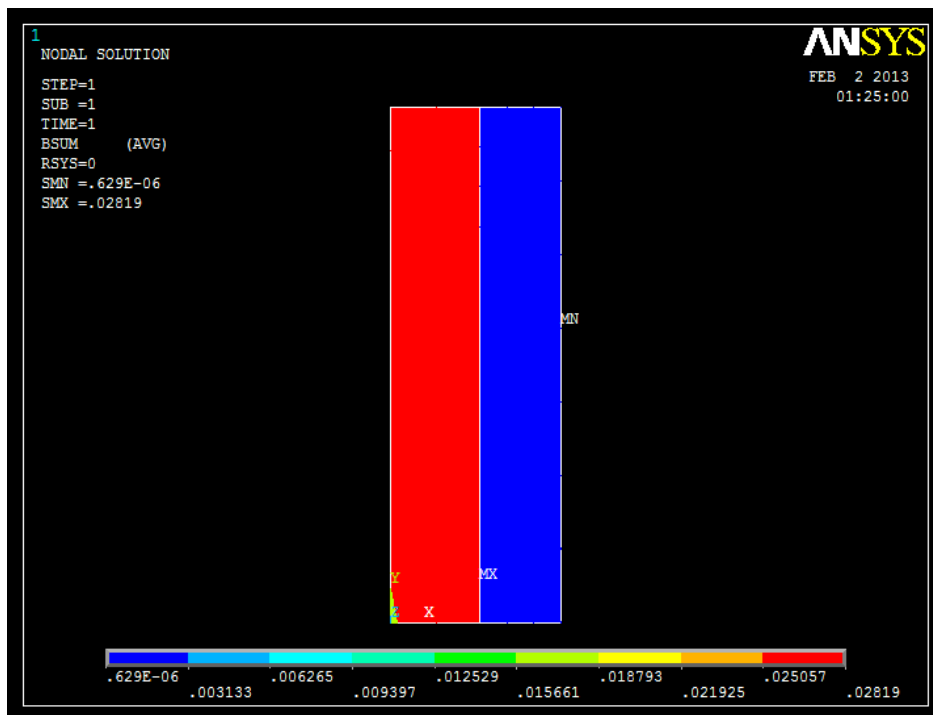


Figura 6.10 Simulação do solenoide com o núcleo, mostrando a densidade de campo magnético.

Na figura 6.11 pode-se observar a curva de **B** contra **H** da realização de medidas no material com espessura de 11 mm. Nota-se o patamar de saturação das medidas do sensor. Os valores simulados no ponto de início da saturação são 19,6% maiores que o experimental. Para valores de intensidade de campo inferiores a 7 Oested o erro é menor que 5%. O motivo deste comportamento foi discutido no item 6.1.3.2. O perfil da densidade de linhas de campo para dois pontos (primeiro e último) do gráfico da figura 6.13(6.11), correspondendo a 4,522 e 18,487 Oested, são apresentados na figura 6.12.

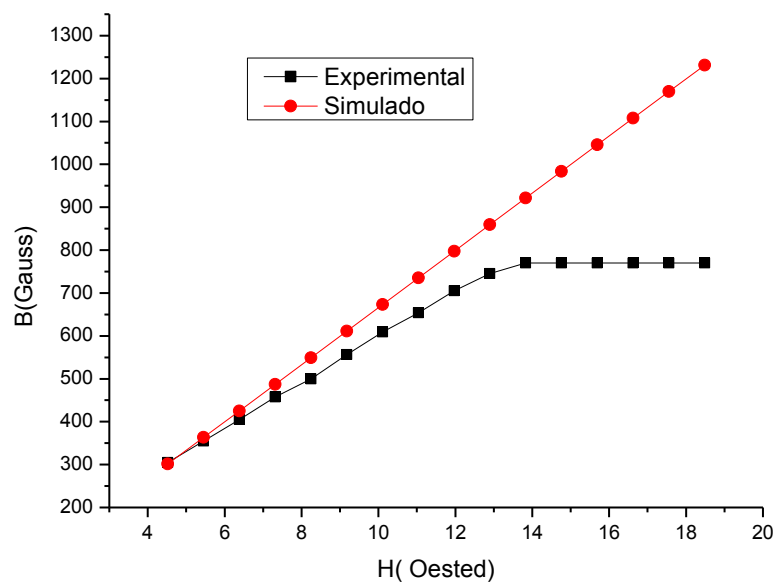
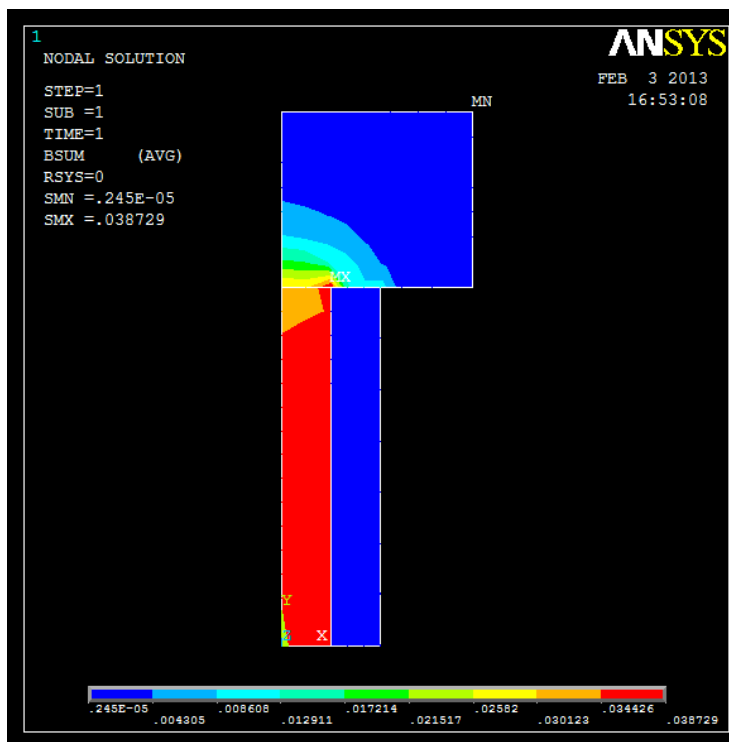
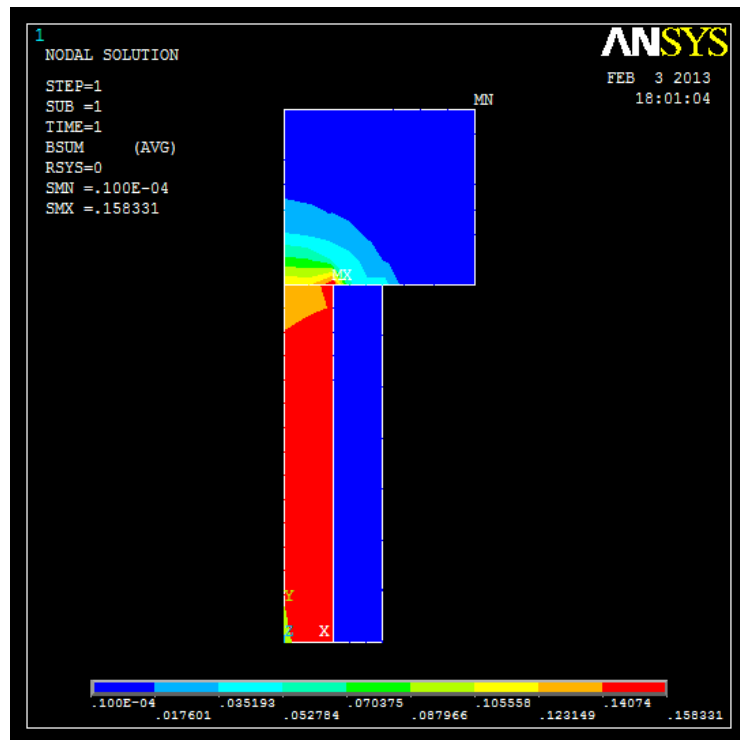


Figura 6.11. Simulação da curva de magnetização para a peça com 11mm de espessura.



(a)



(b)

Figura 6.12. Perfil dos valores da densidade de linhas de campo para as intensidades de campo magnético de: a) 4,522 Oested e b) 18,487 Oested.

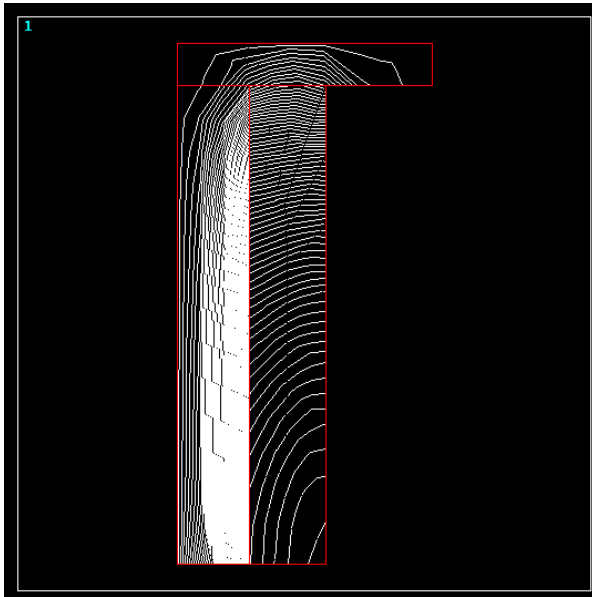
Na tabela 6.4 têm-se os valores da densidade de campo, experimental e simulado, para a posição central do aço em estudo, em função da espessura. Os valores simulados possuem erros inferiores a 5,5 %. A [figura 6.13](#) mostra o perfil das linhas de campo simuladas para as espessuras estudadas, em adição ao estudo simulou-se também para as espessuras de 14, 17 e 20mm.

Tabela 6.4 Valores de campo, experimental e simulado, para a posição central das amostras de aço SAE 1020, em função da espessura.

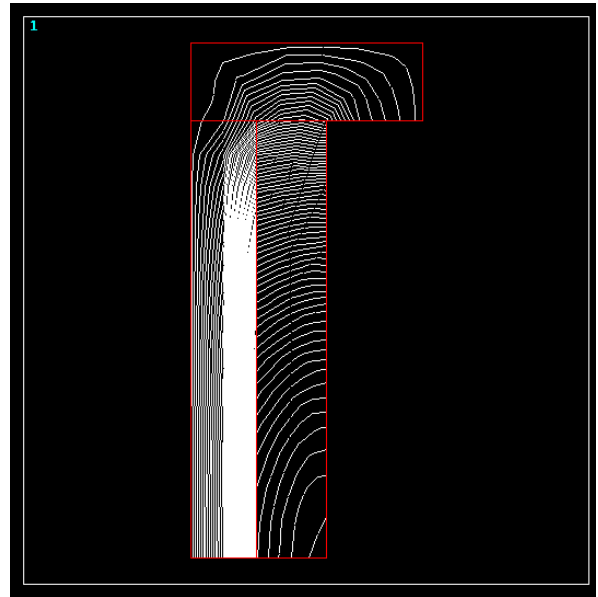
Espessura (mm)	Medida experimental do Campo (Gauss)	Medida simulada (Gauss)	Erro (%)
2	261,9376	247,27	5,599654
4	263,21	252,01	4,255157
6	267,187	258,14	3,386018
8	267,687	265,72	0,734813
11	268,653	274,17	-2,05358

A forma das linhas de campo é influenciada pela espessura do material. Quanto menor a espessura maior será a influência da mudança de permeabilidade do material para o meio externo que é o ar. Para espessuras a partir de 11mm, o perfil das linhas é formado sem a influência dessa mudança. Isto pode ser notado pelos perfis das espessuras acima de 11mm na figura 6.13. O achatamento das linhas de campo influi no ângulo de entrada das linhas de campo. A inclinação das linhas de campo que penetram no material cresce com o aumento da espessura. Sensores de efeito Hall são sensíveis ao ângulo de incidência do campo magnético aplicado (SILVA *et. al* 2012). Isto reflete no crescimento dos valores de Campo com a espessura.

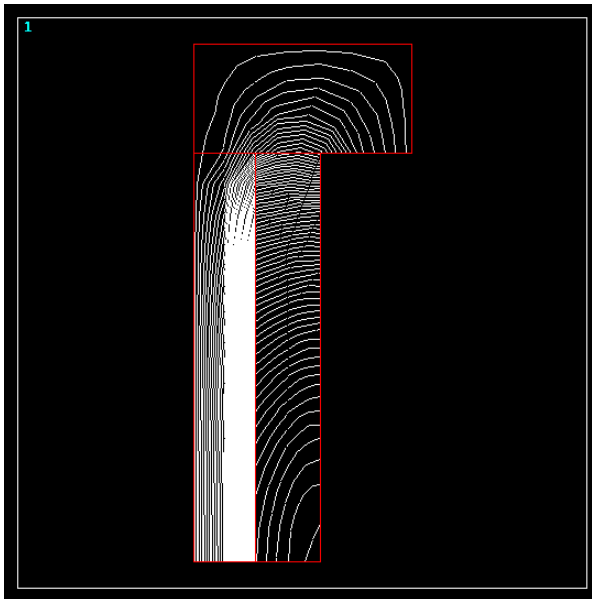
Para o campo aplicado no material de 270 Gauss a espessura na qual as linhas de campo percorrem toda a espessura sem a interferência do meio externo foi considerada como sendo de 11mm. A simulação para valores de campo de 370 e 470 Gauss (figuras 6.14 e 6.15) indicam que para estes a espessura de medida seria em torno de 14mm. As medidas para 370 e 470 Gauss foram próximas devido à aproximação do ponto de saturação do sensor.



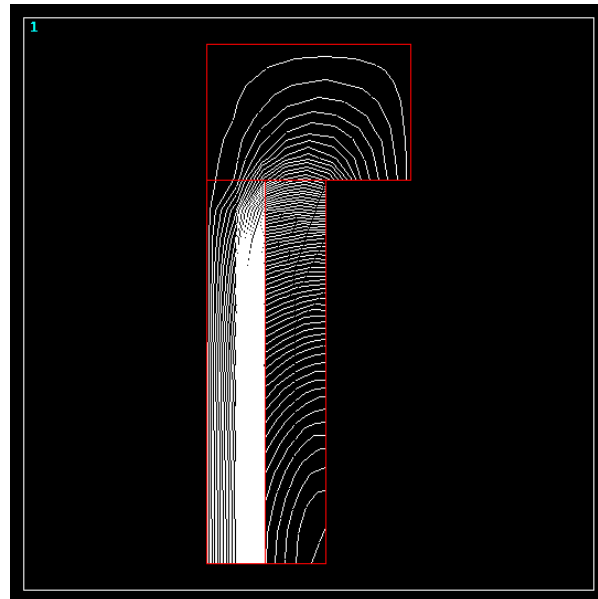
a) Espessura de 2 mm.



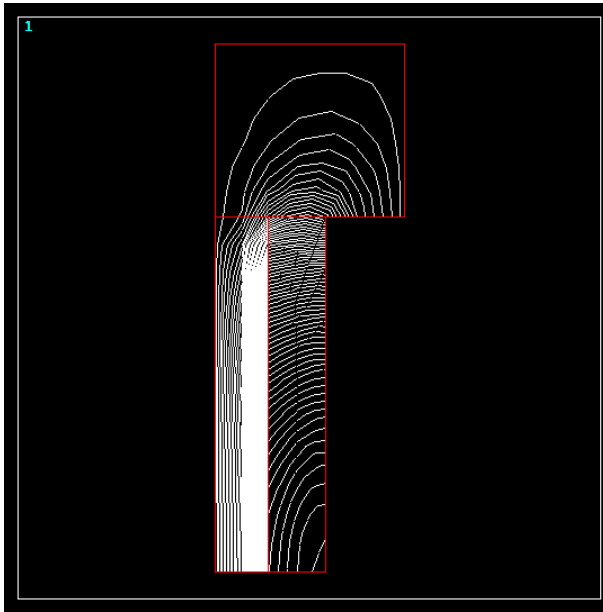
b) Espessura de 4 mm.



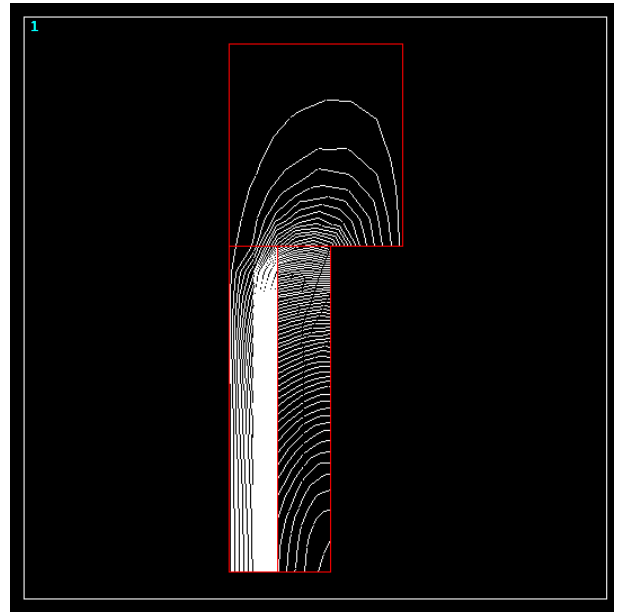
c) Espessura de 6 mm.



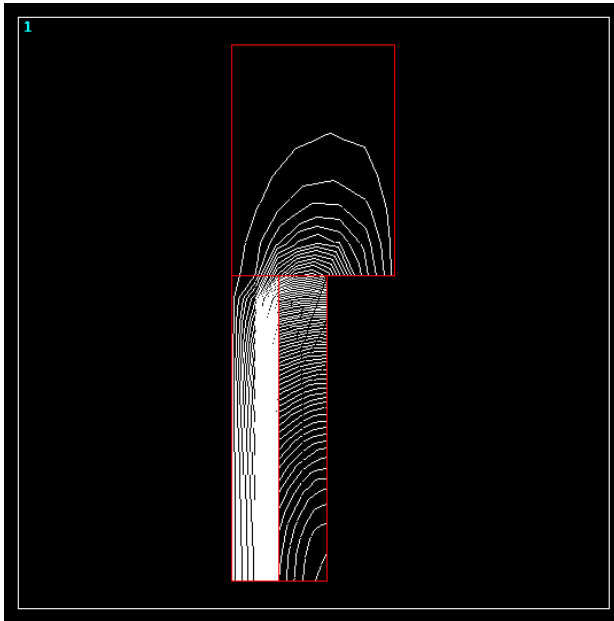
d) Espessura de 8 mm.



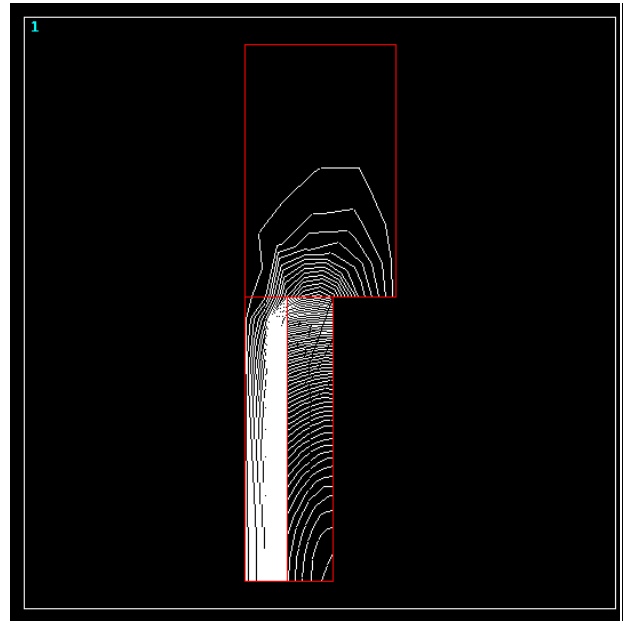
e) Espessura de 11 mm.



f) Espessura de 14 mm.

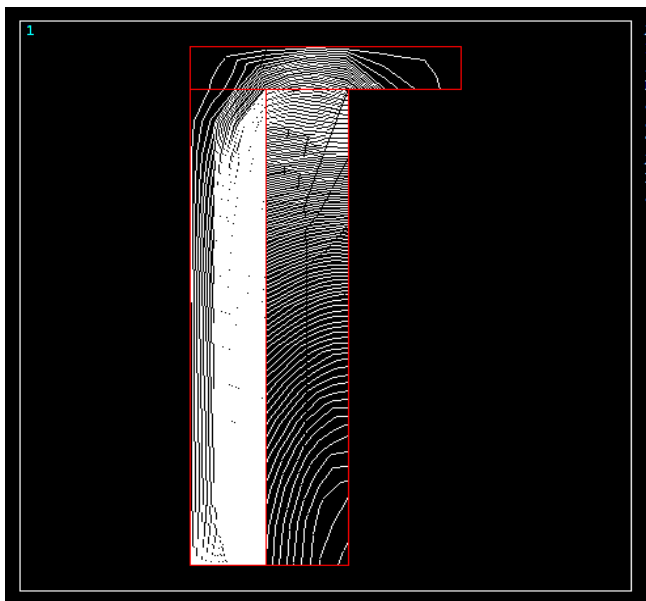


g) Espessura de 17 mm.

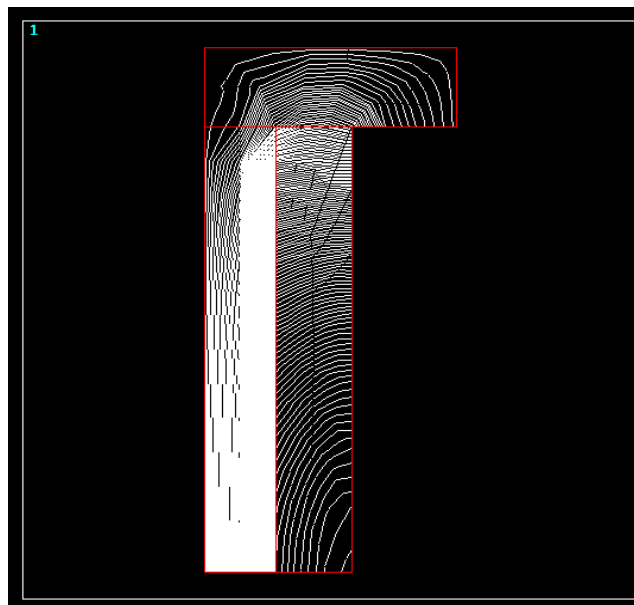


h) Espessura de 20 mm.

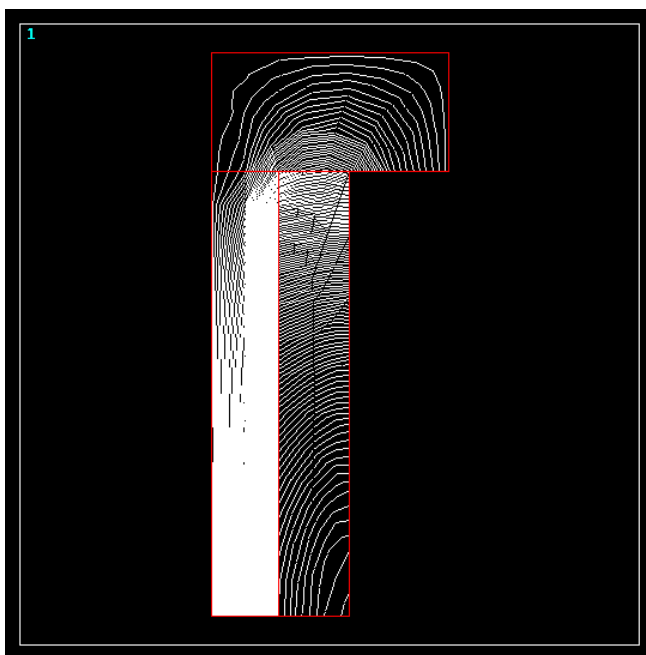
Figura 6.13. Perfis do fluxo magnético simuladas para o aço SAE 1020 para diferentes espessuras. Aplicação de um campo no centro do solenoide de 270 Gauss, antes da colocação da amostra.



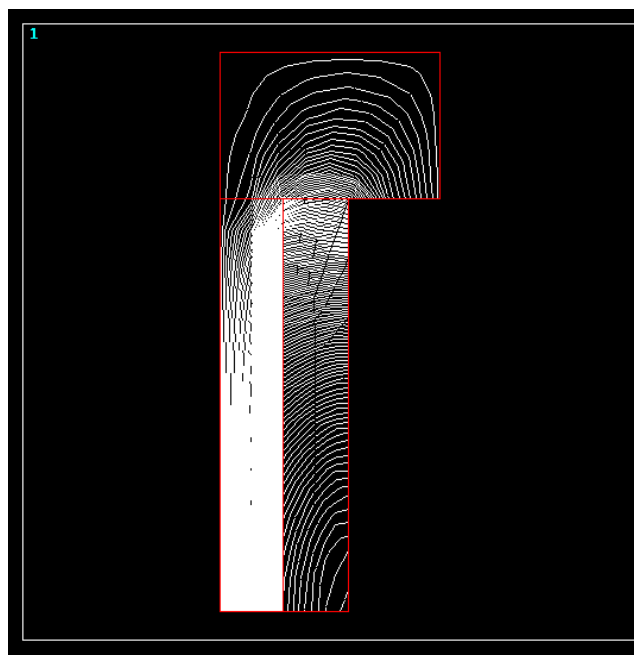
a) Espessura de 2 mm.



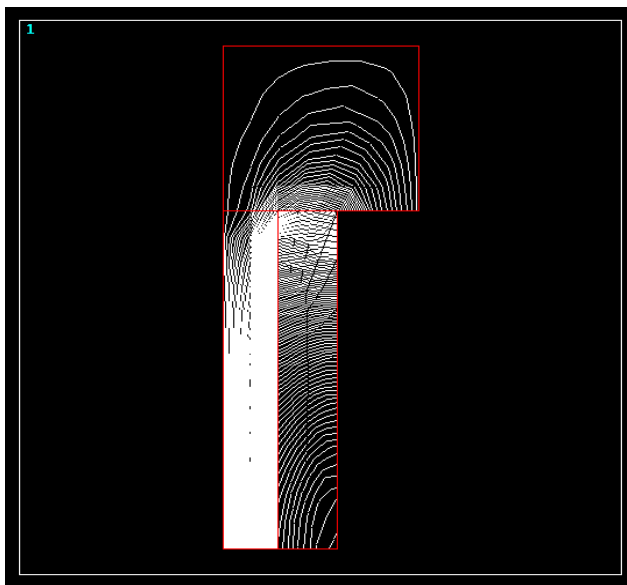
b) Espessura de 4 mm.



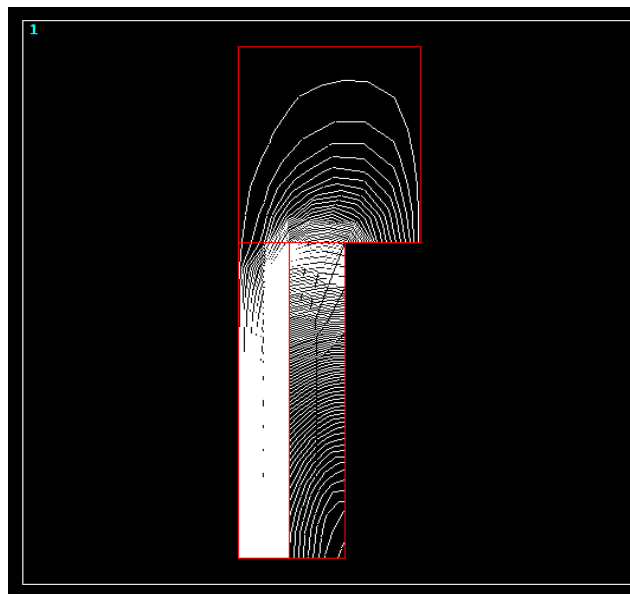
c) Espessura de 6 mm.



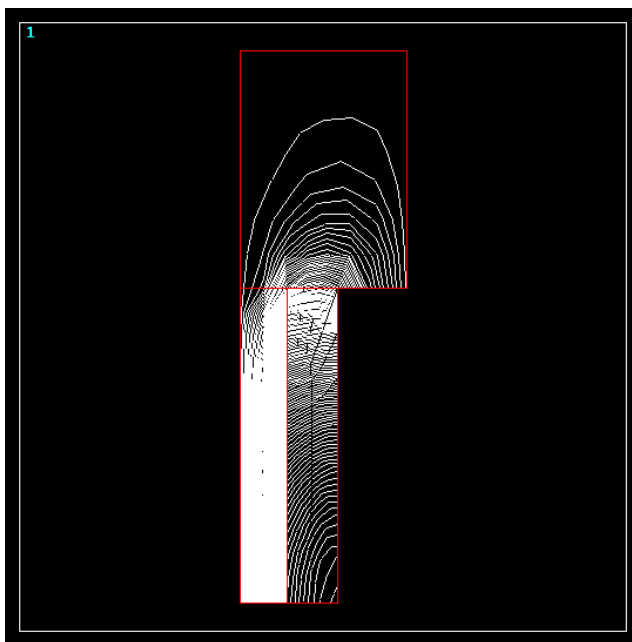
d) Espessura de 8 mm.



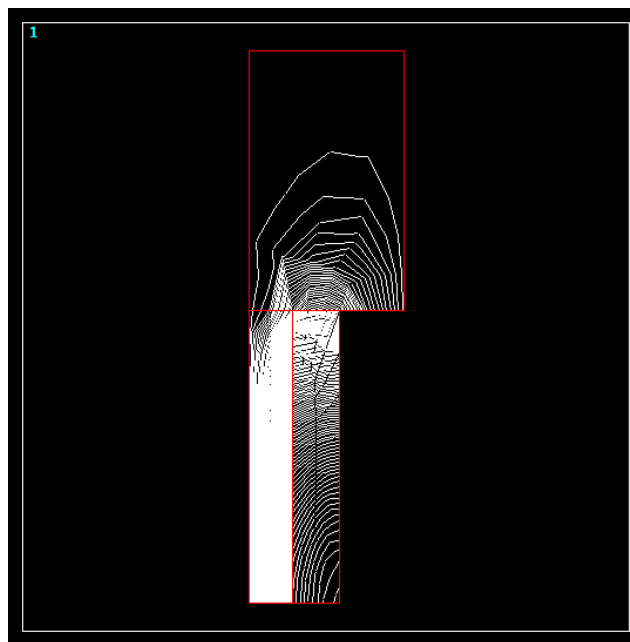
e) Espessura de 11 mm.



f) Espessura de 14 mm.

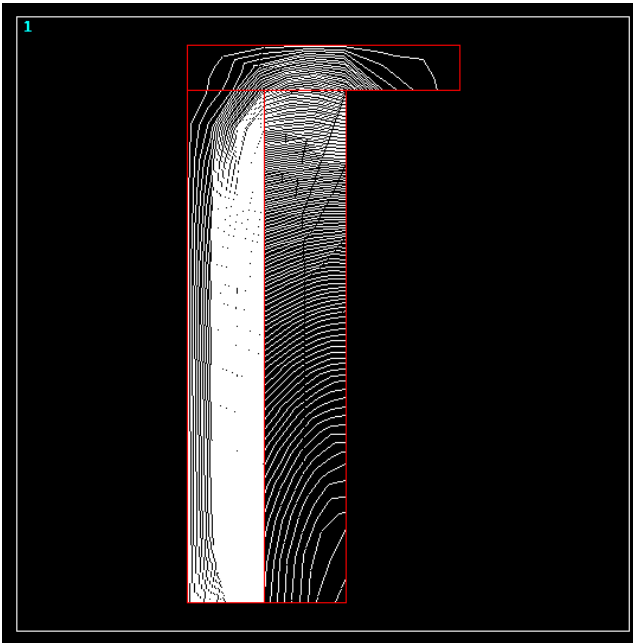


g) Espessura de 17 mm.

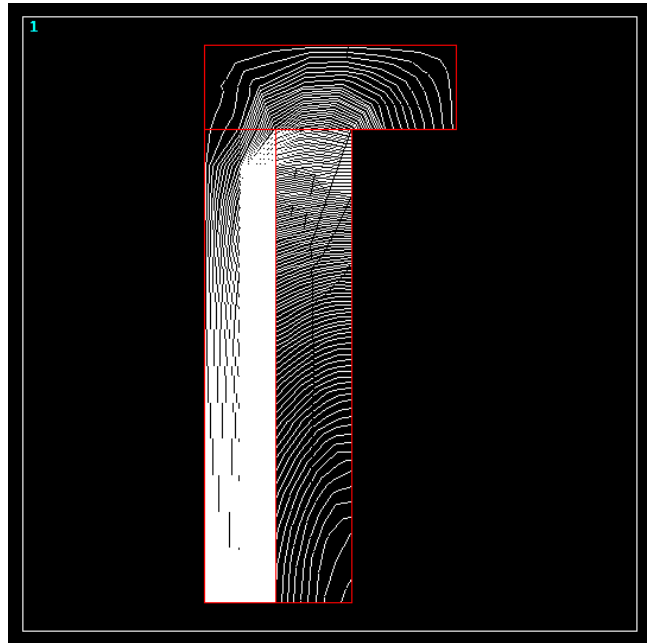


h) Espessura de 20 mm.

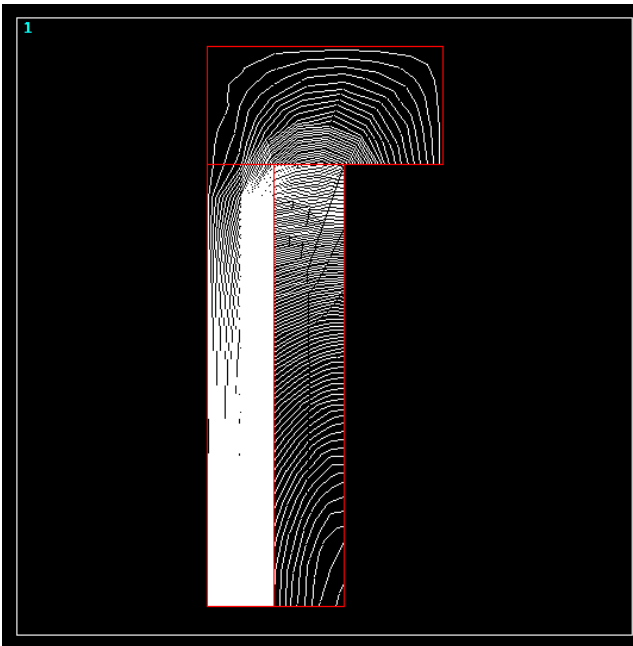
Figura 6.14. Perfis do fluxo magnético simuladas para o aço SAE 1020 para diferentes espessuras. Aplicação de um campo no centro do solenoide de 370 Gauss, antes da colocação da amostra.



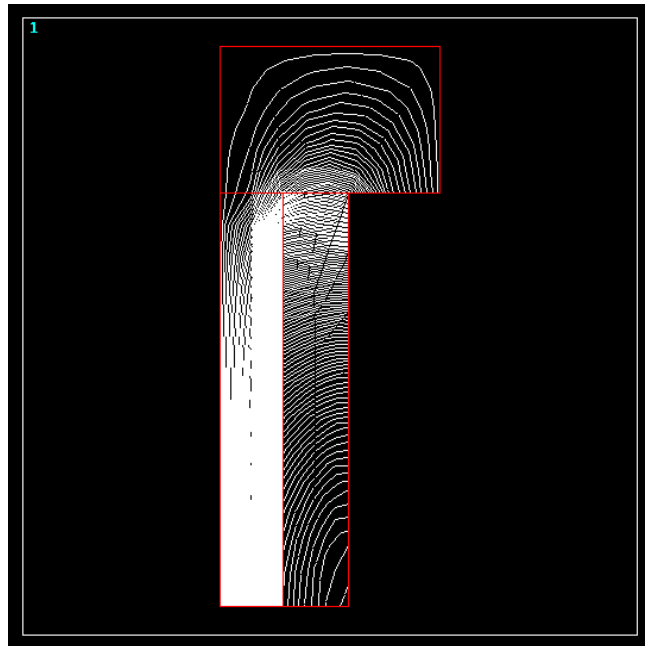
a) Espessura de 2 mm.



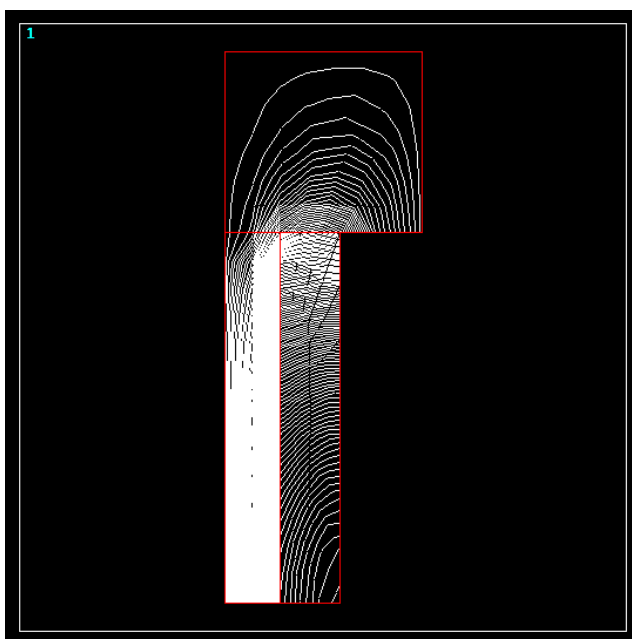
b) Espessura de 4 mm.



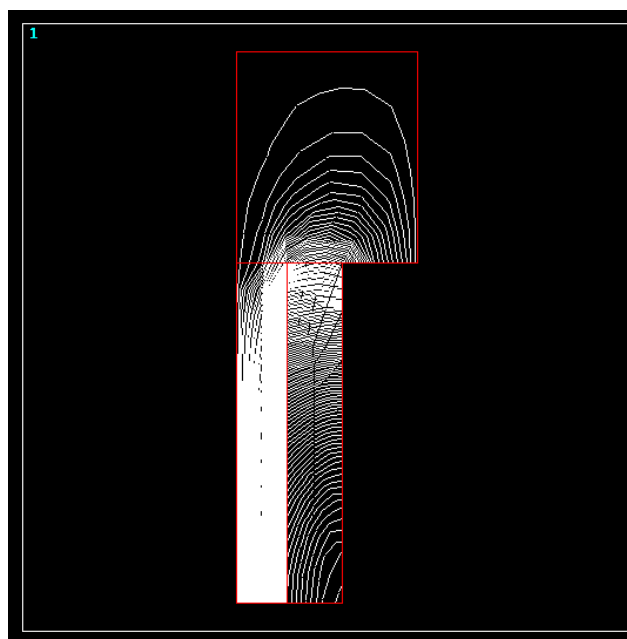
c) Espessura de 6 mm.



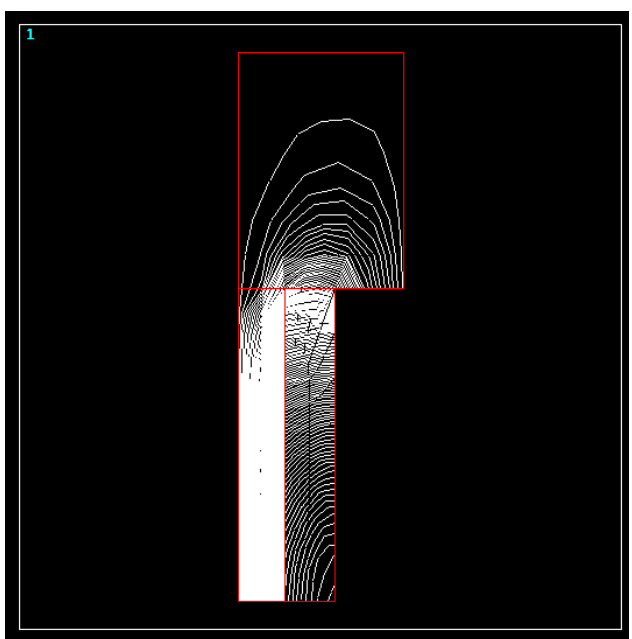
d) Espessura de 8 mm.



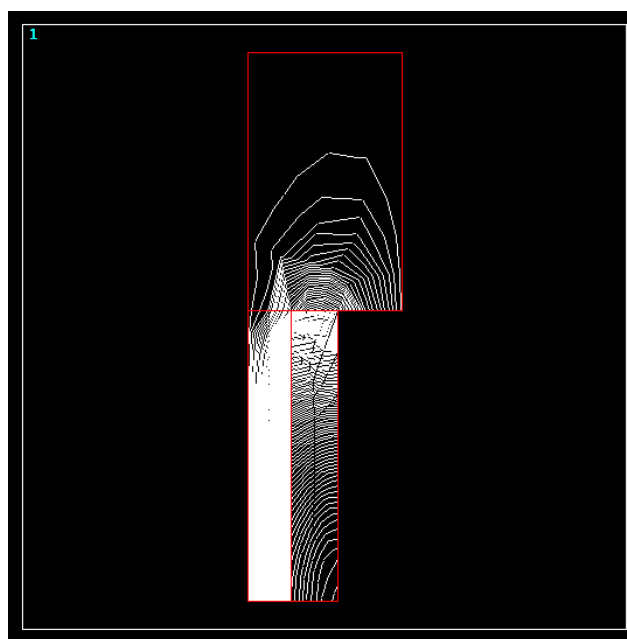
e) Espessura de 11 mm.



f) Espessura de 14 mm.



g) Espessura de 17 mm.



h) Espessura de 20 mm.

Figura 6.15. Perfis do fluxo magnético simuladas para o aço SAE 1020 para diferentes espessuras. Aplicação de um campo no centro do solenoide de 470 Gauss, antes da colocação da amostra.

6. CONCLUSÕES

O estudo da potencialidade do uso de sensores de efeito Hall para a análise da interação entre a aplicação de um campo magnético externo, sobre um aço SAE 1020 de diferentes espessuras, foi realizado com auxílio da simulação dessas por meio do Método dos Elementos Finitos, chegando as seguintes conclusões:

- Existe uma espessura a partir da qual as medidas de campo deixam de ser dependentes da espessura. Esta medida depende do campo magnético externo aplicado sendo em torno de 11 mm para um campo de 270 Gauss e de 14 mm para o um campo de 370 Gauss.
- As medidas simuladas reproduziram o comportamento das medidas experimentais, sendo limitada nas regiões de campo próxima a saturação do sensor.
- Os valores de tensão mostraram serem sensíveis ao ângulo de incidência das linhas de campo no material, sendo refletidas no aumento da tensão com o aumento da espessura.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o comportamento observado, devido ao campo magnético aplicado, poder-se-ia, para trabalhos futuros, sugerir variar a geometria do corpo de prova e considerar um modelo de simulação 3D (análise tridimensional).

Poder-se-ia sugerir a realização de análises considerando a influência da variação microestrutural ocorrida em diferentes tipos aços, tanto devido as transformações de fases ocorridas devido a tratamentos térmicos realizados bem como a trabalhos mecânicos ocorrido no material.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI. **Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção Disponível** em: < www.abende.org.br/Quem%20Somos/199?parent=abendi>. Acesso em: 27 de novembro de 2012.

ALBURQUERQUE, V. H. C.; OLIVEIRA, D. F.; GOMES, M. R.; MELO, A. A.; TAVARES, J. R. S. Ensaio experimental baseado em ultra-som para obtenção da constante elástica de uma liga memória de forma. **Revista Mecânica Experimental**, v.18, p.93-96, 2010.

ALBURQUERQUE, V. H. C.; OLIVEIRA, D. F.; GOMES, M. R.; MELO, A. A.; TAVARES, J. R. S. Ensaio experimental baseado em ultra-som para obtenção da constante elástica de uma liga memória de forma. **Revista Mecânica Experimental**, v.18, p.93-96, 2010.

ALENCAR, D. A. **avaliação de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores de pesquisa e teste de materiais utilizando o ensaio de correntes parasitas**. 2004. 141p. Tese. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. Datasheetcatalog, Massachusetts – USA, 2004, disponível em: <<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/>> Acesso em: 12 de Agosto de 2012.

ANDREUCCI, R. **Partículas Magnéticas**. Ed. Jan / 2009. 67p..

BADIDI, A., LEBAILI, S., BENCHALA, A. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation”, **NDT & E International**, v.36, pp. 1-5, 2003.

BARBOZA, K. R. A. **Avaliação da técnica de inspeção por correntes parasitas em tubos de permutador de calor.** 2009. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica), Centro de Ciências e tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

BOHN, F. **Magnetostricção e ruído barkhausen em aços elétricos de grão não- orientado.** 2005. 55p Dissertação (Mestrado de Física), Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Santa Maria.

BORBA, D. M. R; MAGNABOSCO, R. Alterações microestruturais entre 550°C e 650°C para o aço uns S31803 (SAF 2205). **Metalurgia física.** p. 30-35.

CALLISTER JR, W. D., in: SOARES, S. M. S. (trad.) **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2002.

CARLSON, R; WURTZ, F. Optimal desing of a set of permanent magnet generators with the same cross- section. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 10, 2012, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Cbmag, Brasil, 2012.

CARNEVAL, O. R. Uso das técnicas de END: Ultra-som (TOFD e PhasedArray), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga. In: IV CONFERÊNCIA PANAMERICANA DE END- BUENOS AIRES- OCTUBRE, 2007, Rio de Janeiro **Anais...**: Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales. Brasil, 2007. p.1-18.

CAVALCANTE, F. A. F. Utilização de sensor de efeito Hall para caracterização de microestrutura. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.3, 2008, Salvador-BA. **Anais** Salvador:Congresso Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM, Brasil, 2008.

ESCRIBA, D. M.; MATERNA-MORRIS, E.; PLAUT, R. L.; PADILHA, A. F. Intermetallic Phase Precipitation in Duplex Stainless Steels during High Temperature Exposition. **Materials Science Forum**, v. 636-637, p. 478-484, 2010

FRANÇA, F. N. **Estudo de uma nova técnica não destrutiva, baseada em medidas de permeabilidade magnética, para acompanhamento da fragilização de um aço inoxidável duplex.** 2011. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

FREITAS, A. D. M. **Monitoramento de tensão mecânica em risers flexíveis por eletromagnetismo.** 2011. 142p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica - PUC, do Rio de Janeiro.

HELMUT FISHER. Catalogo do ferritoscopio modelo MP 30E. [S.1]. 2006

JUNIOR, F. S.; MARQUES, V. P., **Ensaio não destrutivo.** Belo Horizonte, 2006, 96p.

KOSMAS, K.; SARGENTIS, C.; TSAMAKIS, D.; HRISTOFOROU, E. Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors. **Journal of Materials Processing Technology.** V161 p.359–362. 2005.

LOUREIRO, J. P. **Caracterização do aço inoxidável duplex UNS S31803 pela técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas**. 2010. 101p. Monografia. Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

MARQUES, V. P; JUNIOR, F. S. **Ensaio não destrutivo**. Belo Horizonte, Novembro 2006, 96p.

MARTINS, P. S; LANCAROTTE, M. S; PADOVESE, L.R. Observação de Domínios Magnéticos em Aços-Carbono. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14, 2000, São Pedro- SP. **Anais ...Brasil, 2000, p.1-11.**

MORAIS, N. W. S; VIANA, N. F; DE ABREU, H. G. F; Comparação entre técnicas de segmentação de imagens, difração de raios x e ferritoscopia na quantificação da martensita induzida por deformação no aço AISI301L. **Revista Materia**,V.16,p.836 - 841,2011.

NORMANDO, P. G. et.al. Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel. **Revista Materials Science and Engineering**. Estados Unidos. v.527, p. 2886- 2891,2003.

PASSOS, D. O.; OTUBO, J. A influência da ferrita delta em aços inoxidáveis austeníticos forjados. **Revista da Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 63, p. 057-063, 2010.

PELLIZZARI, E. **Análise de tensões em arames de risers flexíveis pelo método micromagnético de ruído barkhausen**. 2010. 59p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Metalúrgica), Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PEREIRA, L. A. **Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Eletromagnetismo. 2008.11p.**

PEREIRA, P. A. S. de. **Estudo preliminar da aplicação da técnica de correntes parasitas visando a inspeção submersa de elementos combustíveis.** 2007. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Centro de Ciência e tecnologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RAO, B. P. C. Numerical modeling of EDDY Current non destruting testing. **NDT& International**, v.29,p.269 -273,1996

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo.** 3ed. New York. Bookman, 2004. 688p.

SAMPAIO, M. V. C. **Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de pampo.** 2009. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas), Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, E. M.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; LEITE, J. P.; VARELA, A. C. G.; MOURA, E. P., TAVARES. Phase transformations evaluationon a UNS S31803 duplex stainlesssteelbasedonnondestructivetesting, **Mater. Sci. Engineering**, p.126-130, 2009.

SILVA, E. M.; CAVALCANTE, D. C. M.; ANDRADE, A. L. SANTOS, N. C.; XAVIER, I.; LEITE, J. P. Metodologia não destrutiva para acompanhamento de transformações micro estruturais baseadas me medidas de tensão hall In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS. **Anais...** Joinville - SC. Novembro, 2012.

TAVARES, M, S, S. *et. al.* Detecção de pequenos teores de fase sigma e avaliação dos seus efeitos na resistência á corrosão do aço inoxidável duplex uns S.31803. **Revista Engevista**, v. 8, n. 2, p. 77-82, 2006.

UCHAIN, V.; HESSE, O.; MOOK, G. Deep penetration eddy currents ond probes. In EUROPEAN NDT CONFERENCE, 2006.

VALERIANO, C, L, de. **Influência da precipitação de Fases Secundárias na Resistência á corrosão do aço Inoxidável Super Duplex UNS S32520.** 2012. 82p. Dissertação (Mestrado em Materiais para engenharia), Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal de Itajubá.

WANG, Z. D.; WANG, Y. S. A review of three magnetic NDT Technologies. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials.** China, v.324,p.382-388, 2012.

YAMAURA, S.; FURUYA, Y.; WATANABE, T. The effect of grain bondary microestruture on barkhausen noise in ferromagnetic materials. **Revista Acta Materialia.** v49. p 3019-3027, 2001