

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

BRUNA IOST CAMACHO

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS
PARA INSPEÇÃO DE DEFEITOS NO AÇO API 5L X65
ATRAVÉS DE UM SENSOR PLANAR.**

Porto Alegre
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

BRUNA IOST CAMACHO
Engenheira Metalúrgica

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais.
Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Porto Alegre
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice- Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Coordenador substituto: Afonso Reguly

Camacho, Bruna Iost

Avaliação do Método de Correntes Parasitas para Inspeção de Defeitos no Aço API 5L X65 Através de um Sensor Planar/ Bruna Iost Camacho – 2018.

63 f.:il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

Orientador: Thomas Gabriel Rosauo Clarke.

1. *Correntes Parasitas*. 2. Bobinas Planares. 3. API 5L X65. 4. Ensaio Não Destrutivo.

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke
Coordenado PPGE3M: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Aprovado em 28/02/2018

BANCA EXAMINADORA

Dr. Marcelo Favaro Borges – UFRGS/LAMEF
Dra. Joseane Ortiz Breitenbach Canterle – UFRGS/LAMEF
Dr. Toni Roger Schifelbrain De Lima – UFRGS/LAMEF

AGRADECIMENTOS

À UFRGS pelo ensino de excelência oferecido.

Ao professor Thomas Clarke pela orientação e confiança.

Ao meu pai Claudio pelo apoio, palavras de incentivo e suporte financeiro na realização dos meus sonhos.

À minha mãe Marta e à minha irmã Amanda pela presença em minha vida.

Aos amigos Rodrigo Praetzel, Alessandra Schifino e João Vares pela amizade e companheirismo ao longo da realização desse trabalho.

Aos colegas Alberto Bisognin, Alessandra Felizari, Eduardo Groth, Fernando Vendramim e Thinnie Hahn pelo apoio na realização dos ensaios expostos nesse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização desse trabalho bem como na minha jornada acadêmica.

“Na vida não existe nada a temer, mas a entender”

(Marie Curie)

RESUMO

O petróleo e o gás natural são insumos de extrema importância na sociedade em seu uso como combustíveis e geradores de energia, além de serem agregados na fabricação em uma série de produtos. Assim têm se estimulado a utilização de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) como uma maneira eficaz para a utilização de sistemas duto viários operando a altas pressões e vazões com reduzidos peso e custo. O aço API 5L X65 é utilizado na produção de dutos que serão submetidos a pressões médias e altas e nos quais a preocupação com o peso e economia é importante. Com o aumento da extração e produção desses insumos torna-se vital a constante ampliação dos níveis de segurança e confiabilidade estrutural em sistemas duto viário para o seu transporte. As estruturas utilizadas se encontram em meios agressivos tais como atmosferas corrosivas, ambiente de alta pressão e temperaturas extremas, e em condições desfavoráveis de operação. Os ensaios não destrutivos (END) se destacam entre as opções disponíveis de inspeção devido a sua capacidade de detectar, localizar e dimensionar defeitos, sem causar nenhum dano às propriedades do componente. Nesse trabalho são apresentados os parâmetros e características para o uso da técnica de correntes parasitas na inspeção de descontinuidades no aço API 5L X65 através do uso de um sensor composto por bobinas planares desenhadas em placas de circuito impresso (PCB). A otimização dos parâmetros a serem aplicados na construção do sensor, foi realizada através do software de modelagem por elementos finitos (MEF) COMSOL Multiphysics® 5.2a no ambiente "2D axisymmetric" na qual o sensor composto pelas bobinas de 5 voltas se mostrou mais sensível. Posteriormente foi realizada a modelagem no ambiente "3D" do mesmo software simulando a detecção de defeitos superficiais em uma placa do aço em estudo. O processo de construção do sensor foi realizado de forma empírica no qual o uso de placas PCB se mostrou uma alternativa eficiente, de considerável usabilidade e baixo custo. Obtiveram-se relações satisfatórias entre os resultados numéricos e experimentais. Ainda, foi realizado um ensaio de fadiga visando avaliar a capacidade de detecção do sensor à propagação de uma trinca. Os resultados obtidos no ensaio de fadiga também foram satisfatório.

Palavras-chave: *Correntes Parasitas, Bobinas Planares, API 5L X65, Ensaio Não Destrutivos.*

ABSTRACT

Oil and gas are extremely important inputs into society in their use as fuels and energy generators, as well as being aggregated in manufacturing into a series of products. Thus the use of high strength and low alloy steels (HSLA) has been stimulated as an effective way to use duct systems operating at high pressures and flows with reduced weight and cost. API 5L X65 steel is used in the production of ducts that will be subjected to medium and high pressures and in which concern about weight and economy is important. With the increase in the extraction and production of these inputs, it is vital to constantly increase levels of safety and structural reliability in road duct systems for their transportation. The structures used are in aggressive media such as corrosive atmospheres, high pressure environment and extreme temperatures, and under unfavorable operating conditions. Non-destructive testing (NDT) excels among the available inspection options due to its ability to detect, locate and size defects without causing any damage to component properties. In this work the parameters and characteristics for the use of the parasitic current technique in the inspection of discontinuities in API 5L X65 steel are presented through the use of a sensor composed of planar coils drawn on printed circuit boards (PCBs). The optimization of the parameters to be applied in the construction of the sensor was performed using COMSOL Multiphysics® 5.2a finite element modeling software (MEF) in the "2D axisymmetric" environment in which the sensor composed of the 5-turn coils proved to be more sensitive. Afterwards, 3D modeling of the same software was performed simulating the detection of surface defects in a steel plate under study. The sensor construction process was carried out in an empirical way in which the use of PCB boards proved to be an efficient alternative, of considerable usability and low cost. Satisfactory relationships between numerical and experimental results were obtained. In addition, a fatigue test was carried out to evaluate the detection capacity of the sensor for the propagation of a crack. The results obtained in the fatigue test were also satisfactory.

Keywords: Eddy Current, Planar Coils, 5L X65 Steel, Non-destructive Testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Demonstração esquemática do princípio do ensaio por correntes parasitas: (a) Campo magnético primário; (b) Correntes induzidas no material condutor; (c) Geração do campo magnético secundário na peça	20
Figura 2.2 Perturbação do fluxo de correntes parasitas provocado por uma descontinuidade: (a) Descontinuidade paralela ao caminho das correntes parasitas. (b) Descontinuidade perpendicular ao caminho das correntes parasitas. (Helier, 2001)	22
Figura 2.3. Intensidade de correntes parasitas em função da profundidade de penetração no material. (Hansen, 2004a)	26
Figura 2.4 Influência do Efeito de borda no fluxo das correntes parasitas. (Helier, 2001)	27
Figura 2.5 Plano de impedância diferenciando metais magnéticos e não magnéticos. (Rosado, 2009)	28
Figura 2.6. Bobinas nos modos absoluto e diferencial (Shull, 2002)	29
Figura 2.7. Sensor referencial com (a) bobina de referência ao ar e (b) bobina de referência em alumínio (Shull, 2002)	30
Figura 2.8 Exemplos de configurações de bobinas utilizadas em ensaios por correntes parasitas	30
Figura 2.9. Impedância absoluta ao longo do sensor percorrendo um corpo de prova com defeitos de tamanhos distintos	32
Figura 2.10. Formas mais comuns de sensores planares (a) quadrada, (b) octagonal, (c) hexagonal e (d) circular (Wheeler, 1998)	33
Figura 2.11. Dutos metálicos em ambiente agressivo. (SUBSEA WORLD NEWS, 2016)	34
Figura 2.12. Evolução dos aços micro ligados tipo API (HILLERNBRAND, 2002)	35
Figura 3.1. Fluxograma apresentando a sequência de atividades realizadas neste estudo	36
Figura 3.2. Geometria da bobina e da placa sem defeito no COMSOL Multiphysics® 5.2a	38
Figura 3.3. Geometria da bobina e da placa com defeito no COMSOL Multiphysics® 5.2a	38
Figura 3.4. Modelo do sensor sobre a placa de aço contendo três defeitos de diâmetros distintos	40
Figura 3.5. Modelo placa de aço com defeitos manufacturados utilizada no trabalho	41
Figura 3.6. Bobinas desenhadas no software Proteus Design Suite	42
Figura 3.7. Bobinas oriundas de placas PCB (a) após a fresagem e (b) unidas no sensor finalizado	43
Figura 3.8. Configuração experimental do sensor planar de correntes parasitas	43
Figura 3.9 Geometria do corpo de prova do tipo C(T) utilizado no ensaio. Sendo $w = 60$ mm e $B = 10$ mm	44
Figura 3.10. Arranjo experimental ensaio de propagação de fadiga para detecção de propagação de trinca	45
Figura 4.1. Comparação dos valores de ΔZ na faixa de frequência dos sensores compostos de bobinas de 5, 10 e 20 voltas	46

Figura 4.2. Variação da impedância na faixa de frequência no sensor composto de bobinas de 5 voltas	47
Figura 4.3. Variação de impedância na faixa de frequência nos sensores compostos de 5, 10 e 20 voltas	47
Figura 4.4. Variação da impedância na faixa de frequência no sensor composto de bobinas de 5 voltas na simulação “3D”	48
Figura 4.5. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.1 mm de raio, em frequências de excitação de 5.0 e 5.5 MHz	49
Figura 4.6. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.1 mm de raio, em frequências de excitação de 6.0 e 6.5 MHz	49
Figura 4.7. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.1 mm de raio, em frequências de excitação de 7.0 e 7.5 MHz	50
Figura 4.8. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.5 mm de raio, em frequências de excitação de 5.0 e 5.5 MHz	50
Figura 4.9. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.5 mm de raio, em frequências de excitação de 6.0 e 6.5 MHz	50
Figura 4.10. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.5 mm de raio, em frequências de excitação de 7.0 e 7.5 MHz	50
Figura 4.11. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 1.0 mm de raio, em frequências de excitação de 5.0 e 5.5 MHz	52
Figura 4.12. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 1.0 mm de raio, em frequências de excitação de 6.0 e 6.5 MHz	52
Figura 4.13. Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 1.0 mm de raio, em frequências de excitação de 7.0 e 7.5 MHz	52
Figura 4.14. Valores de impedância do sensor em função da profundidade dos defeitos nas frequências de excitação de 5.0 e 6.0 MHz	53
Figura 4.15. Valores de impedância do sensor em função da profundidade dos defeitos nas frequências de excitação de 6.5 e 7.0 MHz	54
Figura 4.16. Variação de impedância do sensor em função do crescimento da trinca e do número de ciclos do ensaio de fadiga	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Descobertas mais relevantes relacionadas à técnica de correntes parasitas	19
Tabela 2.2. Resumo das principais vantagens e desvantagens do método de correntes parasitas.(Shull, 2002)	23
Tabela 2.3. Valores de resistividade e condutividade elétrica de alguns materiais. (Pereira, 2007)	24
Tabela 3.1. Composição química aço API SL X65	37
Tabela 3.2. Parâmetros iniciais do modelo proposto	39
Tabela 3.3. Parâmetros definidos para a construção do sensor	41
Tabela 3.4. Valores dos coeficientes da função compliance. (ASTM E647, 2000)	44

SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

anp	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<i>bpd</i>	<i>Barris por dia</i>
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
API	“American Petroleum Institute”
END	Ensaio não destrutivo
EC	Correntes Parasitas
MEF	Modelagem por Elementos Finitos
2D	Dois dimensões
3D	Três dimensões
PCB	Printed Circuit Board
Z_0	Impedância
V_0	Tensão
I_0	Corrente
R_0	Resistência
X_0	Reatância Indutiva
$ Z $	Magnitude da impedância
φ	Ângulo de fase
ε	Força Eletromotriz
$d\phi_B$	Varição do fluxo magnético
σ	Condutividade Elétrica
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
d	Profundidade de penetração padrão
e	Número de Euler
ρ	Resistividade

V_{induzido}	Tensão induzida na bobina de leitura
$I_{\text{excitação}}$	Corrente de excitação na bobina de emissão
D_i	Diâmetro interno
w	Espessura da trilha
b	Espaçamento entre trilhas
N	Número de voltas
f	Frequência
ΔZ	Sensibilidade de detecção
ΔZ_{max}	Sensibilidade máxima de detecção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	18
2.2. ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS	18
2.2.1. Histórico	18
2.2.2. Fundamentos	20
2.2.3. Vantagens e desvantagens	23
2.2.4. Fatores que afetam a resposta das correntes parasitas	23
2.2.4.1. Condutividade elétrica	23
2.2.4.2. Permeabilidade magnética	24
2.2.4.3. Profundidade de penetração (skin-depth)	25
2.2.5. Efeito lift-off	26
2.2.6. Efeito de borda (edge-effect)	26
2.2.7. Plano de impedância	27
2.3. SONDAS E BOBINAS	28
2.3.1. Modo de operação	29
2.3.1.1. Absoluta	29
2.3.1.2. Diferencial	29
2.3.1.3. Referência	30
2.3.2. Configuração	30
2.4. BOBINAS PLANARES	32
2.5. AÇO API 5L X65	34
3. METODOLOGIA	36
3.1. MATERIAL	37
3.2. MÉTODOS	37

3.2.1. Modelagem numérica do sensor	37
3.2.1.1. Otimização dos parâmetros do sensor	37
3.2.1.2. Simulação do processo de detecção de defeitos superficiais	38
3.2.2. Construção do sensor	42
3.2.2.1. Detecção de defeitos superficiais	42
3.2.3. Monitoramento de propagação de trinca por fadiga	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SENSOR	46
4.2. PROCESSO DE DETECÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS	49
4.2.1. Sensibilidade para detecção de defeitos isolados	49
4.2.2. Detecção de defeitos de diferentes profundidades	53
4.3. MONITORAMENTO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA	56
5. CONCLUSÕES	58
6. TRABALHOS FUTUROS	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um insumo de extrema importância em razão de ser usado como combustível, além de ser agregado na fabricação em uma série de produtos. A primeira jazida de petróleo brasileira com viabilidade econômica para exploração foi descoberta em 1939, no município de Lobato, mediações do Recôncavo Baiano e, a partir de 2007, o Brasil alcançou a autossuficiência em sua produção. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (anp), em 2016 a produção média brasileira alcançou recorde histórico nacional com a média de 2.144.256 barris por dia (bpd). Em terra, a maioria das jazidas brasileiras de petróleo se estabelece em locais que apresentam rochas sedimentares. No oceano, o petróleo é encontrado nas plataformas continentais. A fim de aumentar a eficiência operacional e reduzir custos, torna-se necessário aumentar os níveis de segurança e confiabilidade estrutural em sistemas duto viário.

Assim, têm se estimulado rapidamente a utilização de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) como uma maneira eficaz para a utilização de sistemas duto viários operando a altas pressões e vazões com reduzidos peso e custo além do aumento contínuo no uso de técnicas de inspeção e avaliação de integridade estrutural. Para garantir a qualidade e a segurança operacional e ambiental, existem normas internacionais que regulamentam a produção de dutos, são elas as normas API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2000). O aço API 5L X65 é utilizado na produção de dutos que serão submetidos a pressões médias e altas e nos quais a preocupação com o peso e economia é importante.

As estruturas utilizadas se encontram em meios agressivos tais como atmosferas corrosivas, ambiente de alta pressão e temperaturas extremas, e em condições desfavoráveis de operação. Dessa forma, a inspeção dos componentes se torna vital em qualquer operação objetivando determinar a integridade do componente em serviço. Os ensaios não destrutivos (END) se destacam entre as opções disponíveis de inspeção devido a sua capacidade de detectar, localizar e dimensionar defeitos, sem causar nenhum dano às propriedades do componente. Ensaios não destrutivos se baseiam na aplicação de fenômenos físicos tais como ondas eletromagnéticas, acústicas, elasticidade, emissão de partículas subatômicas, capilaridade, absorção e qualquer tipo de teste que não implique um dano considerável à amostra examinada. Assim, os END são técnicas altamente valiosas que economizam tempo e dinheiro em seus processos.

As técnicas baseadas na teoria eletromagnética, mais precisamente no fenômeno da indução eletromagnética, tal como a inspeção por Correntes Parasitas (EC), já são historicamente utilizadas na indústria automotiva e aeronáutica e vem sendo cada vez mais acionadas na indústria de óleo e gás devido a sua teoria consolidada e de fácil acesso, simplicidade, boa probabilidade de detecção e custo reduzido. O método de correntes parasitas é fortemente influenciado pela composição química e microestrutura e, portanto, é bastante difundido como ferramenta industrial de controle de qualidade sendo utilizado na caracterização de diversos aços (Ghanei et al, 2013). Entretanto um ponto crítico na aplicação da técnica está no emprego de sensores otimizados de acordo com as características do material e dos tipos de defeitos esperados.

O uso de sensores com design apropriados pode incrementar consideravelmente a probabilidade de detecção de descontinuidades através do método. Assim, surgiu a alternativa de uso de sensores construídos em geometria planar para ensaios por correntes parasitas. A geometria se mostra vantajosa em aspectos muito importantes para inspeções em ambientes hostis, tais como a baixa sensibilidade nas variações de temperatura e das condições de contorno na estrutura inspecionada. Ainda sensores planares tem demonstrado bom desempenho em medidas de condutividade em altas frequências e alta sensibilidade a trincas e outras imperfeições superficiais. (Fava, 2004)

O presente trabalho possui como objetivo principal a avaliação da técnica de correntes parasitas na inspeção de defeitos superficiais no aço API 5L X65 através da construção de um sensor planar. Como objetivos secundários estão: i) validação da metodologia desenvolvida para construção do sensor planar, ii) modelagem numérica do sensor planar, iii) avaliação da capacidade do sensor desenvolvido em detectar a propagação de uma trinca por fadiga no aço estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

O ensaio não-destrutivo (END) tem um papel crucial no processo de gestão da qualidade bem como em garantir segurança de utilização a uma vasta gama de componentes para aplicações aeroespaciais, geração de energia, transportes rodoviário e ferroviário e nas indústrias química e petrolífera (Matarezi, 2009).

Os END incluem métodos capazes de fornecer informações a respeito das discontinuidades de um determinado produto, das características tecnológicas de um material e ainda monitorar a degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas. Para tal são comumente utilizados para inspeção de matéria-prima, inspeção de material de para controle de processos, inspeção de produtos acabados e inspeção de produtos e estruturas em serviço.

Procurando obter resultados satisfatórios e válidos são necessários profissionais de inspeção treinados, qualificados e certificados, além de equipamentos calibrados e procedimentos de execução de ensaios baseados em normas e critérios de aceitação previamente estabelecidos.

A seleção do ensaio depende de uma série de fatores, tais como: tipo de material, acabamento, processo de fabricação, discontinuidades esperadas, etc. (DCTA/IFI, 2006a). Assim, são as técnicas de END mais exploradas na atualidade: inspeção visual, inspeção por partículas magnéticas, inspeção por correntes parasitas, inspeção por Raios-X, inspeção por ultrassom, réplicas metalógrafas e emissões acústicas.

2.2. ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS

2.2.1. Histórico

A respeito do histórico das pesquisas em eletromagnetismo, pode-se destacar quatro pesquisadores muito representativos: Oersted, Ampère, Faraday e Maxwell, aos quais suas contribuições inovadoras foram base para um grande número de teóricos e investigadores. (Rosado, 2009)

O primeiro a usar técnica de correntes parasitas como um ensaio não destrutivo foi David Hughes em 1879 distinguindo metais registrando a variação da indutância da bobina ao aproximá-la de dois metais diferentes. Na tabela 2.1 abaixo está apresentado o histórico em ordem cronológica do desenvolvimento dos fenômenos das correntes parasitas.

Tabela 2.1 Descobertas mais relevantes relacionadas à técnica de correntes parasitas.

	ANO	DESCOBERTA
H. C. Oersted	1819	Mudança da corrente elétrica afeta o magnetismo.
A. M. Ampère	1820	Distinção entre tensão elétrica e corrente elétrica.
M. Faraday	1832	Lei da indução eletromagnética.
J. B. Foucault	1851	Demonstração da existência de correntes parasitas.
J. Maxwell	1864	Equacionamento das teorias do eletromagnetismo.
D.E. Hughes	1879	Distinção de metais através de correntes parasitas.
F. Krantz	1920	Medição de espessura através de correntes parasitas.
C. Farrow	1926	Inspeção de tubos através de correntes parasitas em escala industrial.
F. Forster	1952	Diagramas de plano de impedância.

Na década de 1920, Kranz desenvolveu um sistema de correntes parasitas para medir espessuras de paredes em metais condutores elétricos, então aproximadamente em 1926 Farrow desenvolveu um sistema para inspeção de tubos de aço soldados.

Os equipamentos comerciais foram desenvolvidos pela primeira vez entre 1950 e 1960 por Forster, a fim de atender a indústria aeronáutica e nuclear. Foi criado também a análise de plano de impedâncias, conceito de ampla relevância até a atualidade.

2.2.2. Fundamentos do método

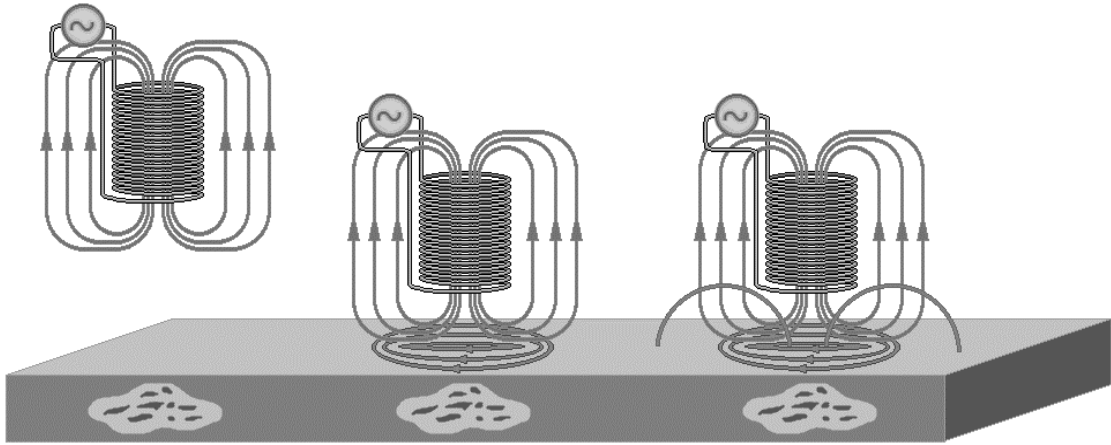
Quando uma tensão é aplicada em um circuito que contém inicialmente apenas elementos resistivos, a corrente flui de acordo com a Lei de Ohm (equação 2.1):

$$I = \frac{V}{R} \text{ ou } V = I.R \quad (2.1)$$

Toda corrente elétrica que flui em um fio de material condutor tem um campo magnético associado. Sendo uma corrente alternada usada para excitar uma bobina, o campo magnético produzido será por consequência alternado e linhas magnéticas do fluxo serão concentradas no centro da bobina, denominado campo primário (H_p). Quando esse campo entra em contato com material condutor, o campo magnético alternado penetra no material e gera as correntes parasitas (eddy currents), vide Figura 2.1.

As correntes parasitas geradas estão defasadas em 90° em relação a tensão indutora e se opõem ao campo magnético indutor. Dessa forma, geram o campo secundário (H_s) que consiste em um campo magnético alternado em sentido oposto ao campo primário. Assim a bobina de ensaio reflete a influência de dois fluxos magnéticos que ocorrem ao mesmo tempo, o indutor e o induzido, e assim obtém-se um campo magnético resultante $H_p - H_s$. É interessante observar que os campos elétricos induzidos não são produzidos por cargas elétricas e sim por fluxos magnéticos variáveis.

Figura 2.1 Demonstração esquemática do princípio do ensaio por correntes parasitas: (a) Campo magnético primário; (b) Correntes induzidas no material condutor; (c) Geração do campo magnético secundário na peça.



(Fonte: A autora)

A intensidade do campo magnético primário está diretamente relacionada à intensidade da corrente de excitação, assim:

$$H_p = \Phi(I) \quad (2.2)$$

Já a intensidade do campo secundário a depende de fatores tais como a condutividade elétrica (σ), a permeabilidade magnética (μ) e das características geométricas (γ) do material ensaiado, bem como a frequência de excitação (f) da bobina, assim:

$$H_s = \varphi(\sigma, \mu, \gamma, f) \quad (2.3)$$

Dessa forma, a intensidade do campo magnético resultante será:

$$H_t = H_p - H_s = \phi(I) - \varphi(\sigma, \mu, \gamma, f) \quad (2.4)$$

A técnica de inspeção por correntes parasitas é regida pela Lei de Indução de Faraday, que diz que a variação da corrente em uma bobina resulta em um campo magnético

B que induzirá uma corrente elétrica em outros circuitos próximos. Abaixo, a equação representativa da Lei de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{\partial\Phi_B}{\partial t}, \quad (2.5)$$

sendo ε a força eletromotriz em volts, e Φ_B o fluxo magnético em webers. A força eletromotriz é proporcional à variação do fluxo magnético no tempo. Assim, após definidas as variáveis externas corrente de excitação (I) e frequência de excitação (f), o ensaio passa a depender exclusivamente das características da peça.

A alteração do fluxo magnético através da bobina pode ser detectada com um sensor sensível ao campo magnético ou pela alteração na impedância da bobina original. Quando a corrente alternada flui através da bobina próxima à superfície condutora, o campo magnético gerado pela bobina induzirá as correntes parasitas nessa superfície afetando a carga na bobina (através de sua magnitude e fase) e, por consequência, sua impedância.

Assim, toda bobina é caracterizada por uma impedância (Z_O), que consiste em um número complexo definido conforme a equação 2.6 abaixo, que demonstra a relação entre tensão e corrente (V_O/I_O) para uma frequência senoidal f . A impedância Z_O tem uma magnitude $|Z|$ e uma fase ϕ .

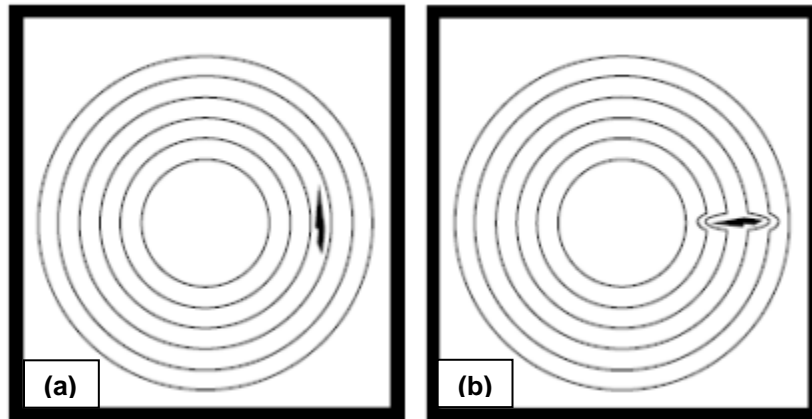
$$Z_O = \frac{V_O}{I_O} = R_O + jX_O = R_O + j2\pi fL_O = \sqrt{R_O^2 + X_O^2} = |Z|_\phi$$

$$\Phi = \arctan 2(X_O/R_O)$$

(2.6)

Assim, descontinuidades tais como trincas, modificam a impedância através da distorção do fluxo de correntes parasitas. E, dessa forma, é possível detectar e dimensionar diferentes descontinuidades superficiais e subsuperficiais através do monitoramento da impedância ao longo do tempo. É importante observar que descontinuidades paralelas ao caminho das correntes parasitas não causam interrupção no campo e não podem ser detectadas. (DCTA/IFI, 2006b). A figura 2.2 apresenta o sentido das descontinuidades no ensaio.

Figura 2.2 Perturbação do fluxo de correntes parasitas provocado por uma descontinuidade: (a) Descontinuidade paralela ao caminho das correntes parasitas. (b) Descontinuidade perpendicular ao caminho das correntes parasitas.



(Fonte: Helier, 2001)

2.2.3. Vantagens e desvantagens do método

A técnica de correntes parasitas se apresenta como uma alternativa consideravelmente vantajosa ao usuário devido a sua versatilidade e sensibilidade a diversas variáveis, bem como devido a seu custo competitivo quando comparado a outras técnicas de END. A tabela 2.2 abaixo apresenta um resumo com as principais vantagens e desvantagens do método.

Tabela 2.2 Resumo das principais vantagens e desvantagens do método de correntes parasitas.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção de materiais condutores elétricos. • Inspeção rápida e sem fortes questões de segurança. • Sensível a diversos parâmetros relacionados à condutividade elétrica, permeabilidade magnética e geometria. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspecciona apenas materiais condutores elétricos. • É capaz de detectar apenas defeitos superficiais e subsuperficiais. • É sensível a mais de uma variável ao mesmo tempo, dificultando a interpretação dos resultados.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • A operação é viável em uma larga faixa de temperatura. • Sondas e equipamentos leves, portáteis e com custo competitivo. • Tecnologia já estabelecida. • Pode ser configurado em “arrays”. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensível apenas a defeitos perpendiculares ao caminho das correntes parasitas. • Sensível a variações de lift-off e efeito de borda.

(Fonte: Shull, 2002)

2.2.4. Fatores que afetam a resposta das correntes parasitas

2.2.4.1. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (σ) se define pela facilidade ou não do material em conduzir a corrente elétrica: quanto maior a condutividade do material, maior o fluxo de correntes parasitas em sua superfície. Todo material possui um valor de resistência ao fluxo de corrente que se caracteriza pela condutividade ou pelo seu inverso, a resistividade elétrica ($1/\sigma$).

No sistema IACS, o valor da condutividade do cobre puro recozido e a temperatura de 20°C são tomados como padrão. Na tabela 2.3 abaixo, estão os valores da resistividade e condutividade elétrica de alguns materiais.

Tabela 2.3 Valores de resistividade e condutividade elétrica de alguns materiais.

MATERIAL	RESISTIVIDADE ($\mu\Omega.cm$)	CONDUTIVIDADE (%IACS)
Alumínio	2.82	61
Cobre recozido	1.72	100
Inconel 600	101	1.7
Magnésio	4.65	37
Ouro	2.46	70
Prata	1.63	105
Zircônio	50.6	3.4

(Fonte: Pereira, 2007)

Quanto maior for o valor de condutividade elétrica do material, mais intensas serão as correntes parasitas geradas na superfície de teste. Assim, em materiais de alta condutividade elétrica, tal com o alumínio, a diferença de fase entre as linhas da trinca e do lift-off é maior. Porém em materiais de condutividade mais elevada, as profundidades de penetração padrão para uma frequência fixa serão menores do que em materiais de menor condutividade.

2.2.4.2. Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética se define como a tendência do material de alterar as linhas de força do campo magnético. (Junnich, 1990). Em materiais não magnéticos, como o alumínio e o cobre, o valor da permeabilidade magnética é igual a do ar, assim sua permeabilidade relativa $\mu_r=1$. Já em materiais ferrosos o valor da permeabilidade relativa pode chegar a valores muito altos, o que é bastante relevante para a resposta das correntes parasitas.

A profundidade de penetração é inversamente proporcional a permeabilidade magnética, assim serão utilizadas frequências mais baixas na inspeção de materiais ferrosos. Também são significativas na variação da permeabilidade características tais como tensões localizadas, segregações e tratamentos térmicos.

2.2.4.3. Profundidade de penetração (skin-depth)

A profundidade de penetração (skin-depth) determina que as correntes parasitas produzidas em uma amostra apresentam-se mais intensas e concentradas na superfície adjacente à bobina e à medida que a profundidade aumenta, sua intensidade se torna menor. A consequência prática é o aumento da resistência elétrica, já que a área efetiva para a condução de corrente se torna menor (HAYT, 1989).

Tanto a frequência do ensaio quanto o material ensaiado são limitadores da profundidade de penetração. A permeabilidade magnética e a condutividade elétrica também possuem influência na profundidade de penetração. Assim, materiais ferromagnéticos tais como níquel, ferro, aços ferríticos possuem alta permeabilidade magnética e consequentemente as correntes parasitas induzidas neles tem baixa penetração. Observa-se na equação 2.7 abaixo observa-se o cálculo da profundidade de penetração das correntes parasitas:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (2.7)$$

Sendo:

δ = profundidade de penetração [m]

f = frequência de teste [Hz]

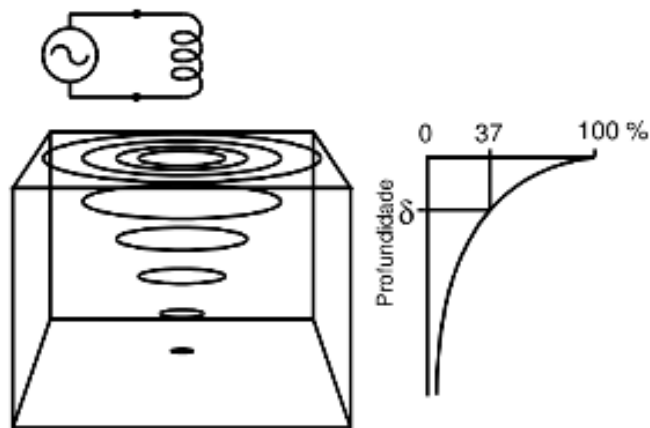
μ_0 = permeabilidade absoluta [$1,25 \times 10^6$ H/m]

μ_r = permeabilidade relativa do material.

σ = condutividade elétrica do material [$\text{m}/\Omega \times \text{m}^2$]

A profundidade de penetração padrão (δ) consiste na profundidade na qual o decréscimo da densidade de correntes parasitas é de 37% em relação à superfície do material, vide Figura 2.3.

Figura 2.3 Intensidade de correntes parasitas em função da profundidade de penetração no material.



(Fonte: Hansen, 2004a)

2.2.5. Efeito lift-off

A bobina de ensaio energizada e distante de qualquer material condutor, apresenta um determinado valor de impedância. À medida em que a bobina é aproximada de um material condutor e o campo magnético intercepta esse material, o valor de impedância da bobina sofre alteração. Tal variação da impedância se mantém até que a bobina encoste no material resultando na maior variação em relação ao valor inicial. Portanto, observa-se

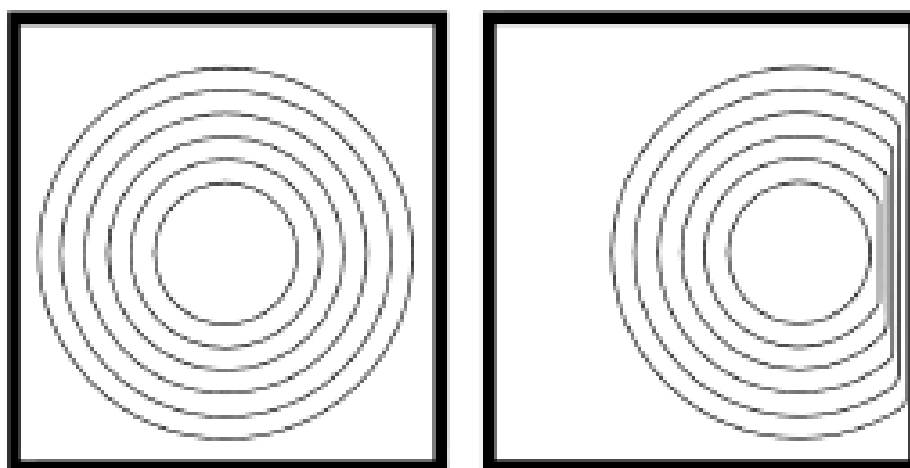
que a maior sensibilidade do ensaio ocorre quando a sonda encontra-se em contato total com a superfície ensaiada.

Ainda que tal efeito sonda-peça seja um limitador para alguns ensaios por correntes parasitas, pode representar uma vantagem para outros. É um exemplo a utilização do efeito lift-off para medição de camadas não condutoras sobre metais condutores, pois nesses casos a sonda é encostada na superfície não condutora e a espessura da camada representa uma medida direta da distância sonda-metal base (Stegemann 1990).

2.2.6. Efeito de borda (edge-effect)

O efeito de borda (edge-effect) é um fenômeno que ocorre quando a bobina de inspeção está no final da peça de teste, vide Figura 2.4 abaixo. Nesses casos, as correntes não podem fluir na borda e, portanto, o fluxo de correntes parasitas é distorcido. A distância onde o efeito de borda está presente é de aproximadamente um a três vezes o diâmetro da bobina de inspeção. Portanto, uma redução no tamanho da bobina reduz o efeito da borda, pois o diâmetro das bobinas circulares externas deve ser maior que o dos materiais inspecionados. (Skarlatos, 2010).

Figura 2.4 Influência do Efeito de borda no fluxo das correntes parasitas.

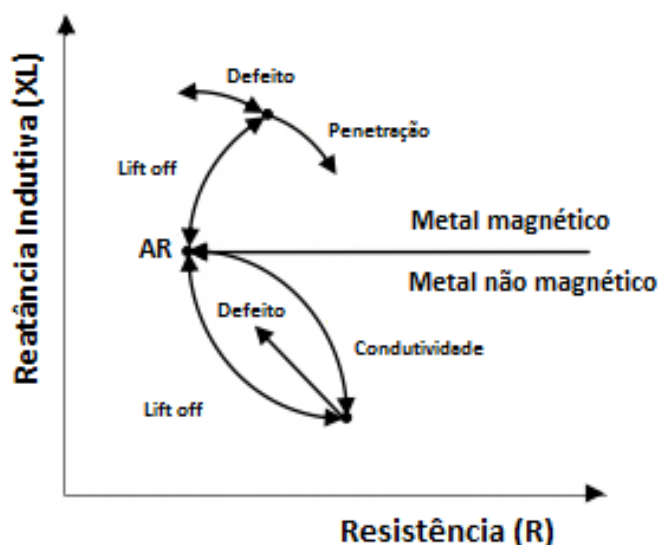


(Fonte: Helier, 2001)

2.2.7. Plano de impedância

A resposta do ensaio de correntes parasitas pode ser dado através do plano de impedância que consiste em uma representação gráfica da impedância da bobina, dada por um número complexo contendo sua parte real (chamada componente resistiva) e sua parte imaginária (chamada componente indutiva). Na Figura 2.5 abaixo, encontra-se um plano de impedância mostrando mudanças em materiais magnéticos e não magnéticos.

Figura 2.5 Plano de impedância diferenciando metais magnéticos e não magnéticos.



(Fonte: Rosado, 2009)

A sonda inicialmente equilibra-se no ar e ao se aproximar de um metal não magnético, como o alumínio por exemplo, a componente resistiva aumenta porque as correntes parasitas geradas no alumínio tiram energia da bobina aumentando sua resistência. Por outro lado, a reatância indutiva irá decrescer porque o campo magnético gerado pelas correntes parasitas se opõe ao campo magnético da própria bobina resultando assim em um campo magnético para produzir indutância menor. Ainda, se um defeito estiver presente no material, menos correntes parasitas serão formadas e a resistência decrescerá enquanto a reatância indutiva crescerá.

Quando a sonda é aproximada de um metal magnético, como o aço por exemplo, a componente resistiva aumenta pelos mesmos motivos do caso anterior. Entretanto, a reatância indutiva aumenta devido à alta permeabilidade magnética do metal que concentra o campo magnético da bobina se sobrepondo ao campo magnético gerado pelas correntes parasitas. Se um defeito estiver presente no material, haverá uma mudança de sinal semelhante ao observado no metal não magnético.

2.3. SONDAS E BOBINAS

Existem variados tipos de sondas de correntes parasitas e cada uma é ajustada para uma finalidade de inspeção específica. Ainda que essa classificação não seja rígida, as sondas podem ser divididas devido ao seu modo de operação, e também devido à sua configuração.

As sondas podem ser manufaturadas helicoidalmente ou em uma disposição planar. Ainda, a sonda pode ser blindada a fim de reduzir a interação do campo magnético gerado com estruturas não relevantes que estejam próximas e núcleos de ferrita podem ser usados como concentradores de fluxo magnético elevando a sensibilidade da sonda. (Rosado, 2009)

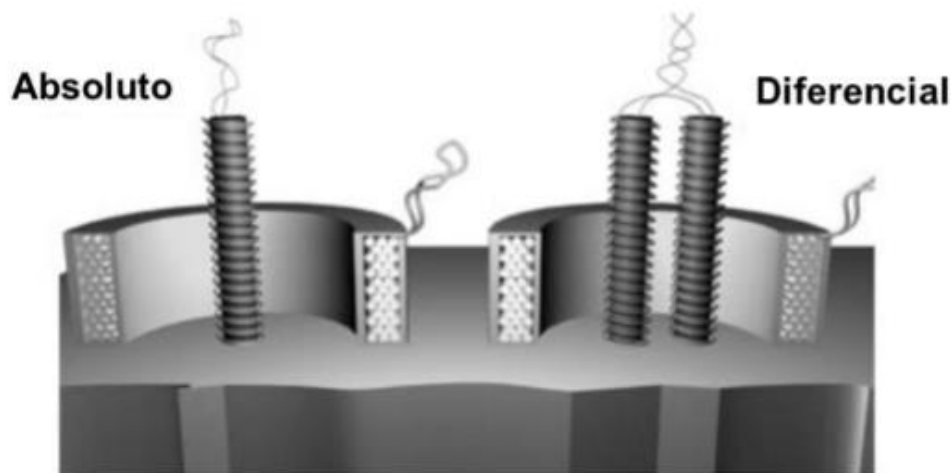
2.3.1. Modo de operação

O modo de operação se define na reação da bobina na amostra. Usualmente são classificados em sondas absolutas, diferenciais ou de referência.

2.3.1.1. Absoluta

A sonda absoluta consiste em um dispositivo que contenha uma única bobina que irá gerar correntes parasitas, vide Figura 2.6, mudar as direções no campo magnético e, dessa forma, será capaz de detectar qualquer alteração no fluxo de correntes parasitas. Tais sondas são extremamente sensíveis e susceptíveis a sinais indesejados tais como lift-off e variações de temperatura, e podem ser usadas para detecção de defeitos e para medições de condutividade e espessura

Figura 2.6 Bobinas nos modos absoluto e diferencial.



(Fonte: Shull, 2002).

2.3.1.2. Diferencial

A sonda diferencial, vide Figura 2.6, consiste no arranjo de duas bobinas idênticas, porém em sentidos opostos a fim de eliminar problemas da operação com bobinas absolutas tais como o lift-off e a variação de temperatura. Quando as duas bobinas estão sobre uma área de material sem defeito, não há sinal alguns porque a contribuição do modo comum é

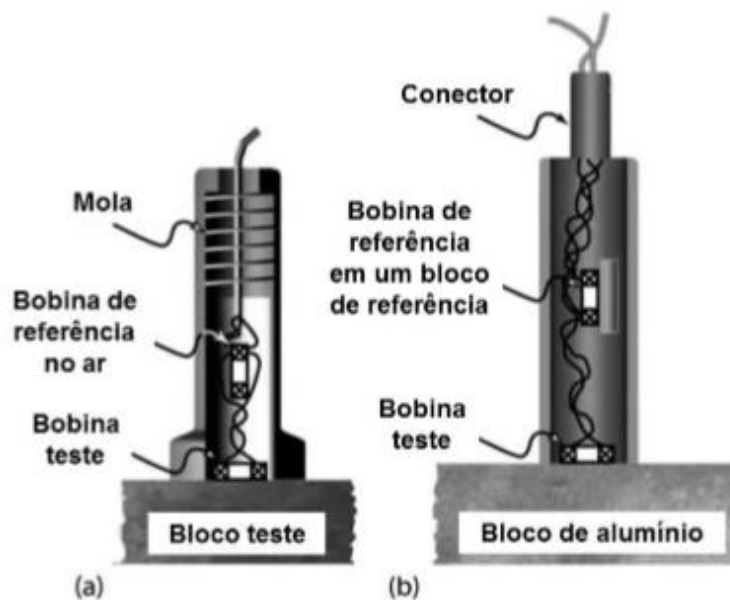
cancelada. Porém, quando apenas uma bobina está sobre uma descontinuidade, o sinal desenvolvido entre as duas bobinas aumenta.

A principal desvantagem desse modo de operação é a baixa sensibilidade à trincas longas ou graduais, detectando apenas o início e o fim do defeito. Ainda, essas sondas são muito sensíveis a defeitos ainda insensíveis às variações indesejadas (Helier, 2001).

2.3.1.3. Referência

A sonda de referência, vide Figura 2.7, é uma combinação dos modos de operação absoluto e diferencial e consiste no uso de duas bobinas idênticas: uma em contato direto com o material em teste e a outra em um padrão de referência ou no ar. Assim, indicará as diferenças entre o material em teste e a referência. É um arranjo bastante insensível ao lift-off, variações de temperatura e geometria, porém bastante sensível a pequenos defeitos.

Figura 2.7 Sensor referencial com (a) bobina de referência ao ar e (b) bobina de referência em alumínio.

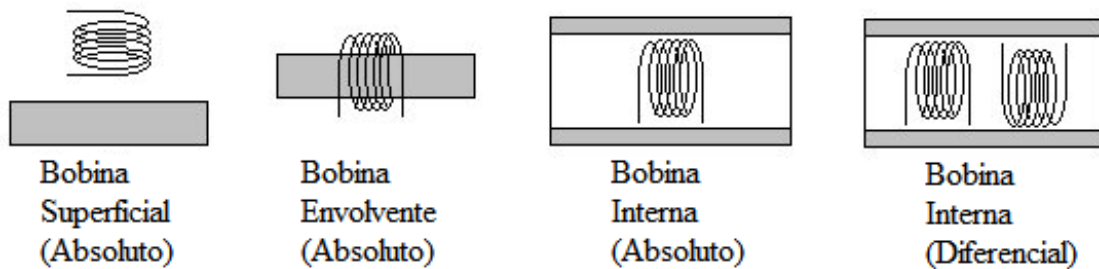


(Fonte: Shull, 2002).

2.3.2. Configuração

A configuração se define no acesso das bobinas às peças e usualmente são classificadas em sondas internas, envolventes ou superficiais. Usualmente, as bobinas superficiais são desenvolvidas de modo a serem de forma manual e fazendo uso de equipamentos capazes de escanear a superfície dos materiais (Helier, 2001). Na Figura 2.8 abaixo, estão alguns exemplos de configuração.

Figura 2.8 Exemplos de configurações de bobinas utilizadas em ensaios por correntes parasitas.



(Fonte: A autora.)

As bobinas superficiais são fabricadas em diversas configurações de acordo com a aplicação pretendida. Na configuração mais simples, uma bobina é responsável pela geração e pela recepção do fluxo de correntes parasitas na peça. Porém outras configurações mais elaboradas vem sendo utilizadas, tais como transmissão, reflexão e transmissão-recepção. Neste texto será abordada apenas a configuração transmissão-recepção, por ser a de relevância no trabalho desenvolvido.

TRANSMISSÃO-RECEPCÃO

Nessa configuração o sistema é formado por duas bobinas, uma delas responsável pela indução das correntes parasitas no material de teste (bobina de emissão) e a outra responsável pela leitura dos campos magnéticos gerados (bobina de leitura) (Garcia-Martin, Gomez Gil e Vasquez- Sanchez, 2011). Tal configuração é interessante à medida que possibilita a configuração de parâmetros tais como diâmetro e número de voltas na bobina de emissão a fim produzir um campo magnético mais homogêneo. Ainda é possível adequar o tamanho da bobina de leitura ao defeito (Lopes et al., 2009).

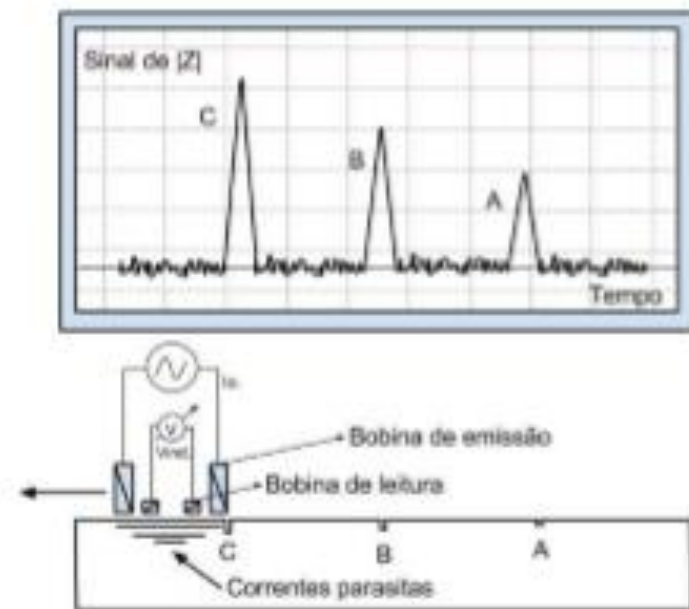
Cada uma das duas bobinas se caracteriza por um valor de impedância que, quando combinadas, geram a impedância do sistema (Z) que é calculada, como demonstrado na equação 2.8 abaixo, relacionando a tensão induzida na bobina de leitura (V_{induzido}) e a corrente na bobina de emissão ($I_{\text{emissão}}$).

$$Z = \frac{V_{\text{induzido}}}{I_{\text{emissão}}}$$

(2.8)

São fatores de extrema importância a frequência de excitação e a geometria da bobina, pois a união desses fatores determina a resolução espacial e a profundidade de penetração do sensor. Na Figura 2.9 abaixo, observa-se o desenho esquemático de um sensor na configuração transmissão-recepção e os resultados de impedância esperados da análise de um corpo de prova contendo defeitos de distintas profundidades.

Figura 2.9 Impedância absoluta ao longo do sensor percorrendo um corpo de prova com defeitos de tamanhos distintos.

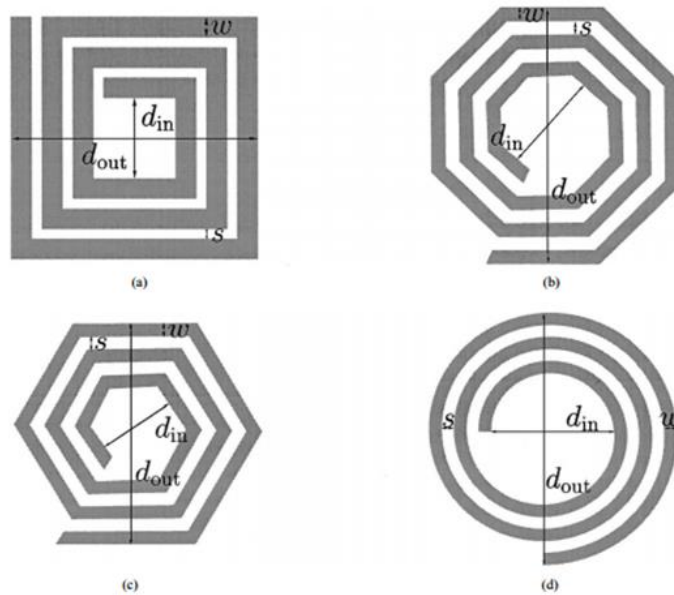


(Fonte: Shull, 2002).

2.4. SONDAS PLANARES

A construção de bobinas em geometria plana tem se destacado e vem sendo cada vez mais aplicada. Essas bobinas possuem características interessantes, tais como bom desempenho em medidas de condutividade em altas frequências e alta sensibilidade a trincas e outras imperfeições superficiais (Fava 2004). Na Figura 2.10 abaixo estão expostas as formas usualmente empregadas no desenvolvimento de bobinas planas (quadrada, octogonal, hexagonal e circular), sendo d_{in} o diâmetro interno, d_{out} o diâmetro externo, w a largura da trilha e s o espaçamento entre duas trilhas.

Figura 2.10 Formas mais comuns de sensores planares (a) quadrada, (b) octagonal, (c) hexagonal e (d) circular.



(Fonte: Wheeler, 1998).

O uso da geometria planar em testes por correntes parasitas é bastante promissor devido às suas vantagens para inspecionar superfícies planas: alta sensibilidade neste tipo de superfícies, redução dos sinais de aproximação em inspeções para detectar falhas perto das bordas na peça inspecionada. Outras vantagens são a sua fácil adaptação às superfícies curvas devido à sua flexibilidade ou reprodutibilidade no fabrico do mesmo se feito pela técnica do circuito impresso (PCB). Em geral, bobinas planares possuem maior estabilidade térmica e consistência nos parâmetros da bobina quando comparado a outras geometrias (Lay, 2005).

São dois desafios associados à substituição de bobinas helicoidais por bobinas planares, a alta resistência estática (R) e a baixa indutância (L). A primeira é diretamente dependente da geometria da bobina, como demonstrado a partir da equação 2.9 e sendo R a resistência estática, ρ a resistividade da trilha de cobre, l o comprimento total e A , a área da seção transversal da trilha.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

(2.9)

A resistência estática deve ser mantida no mínimo para uma sensibilidade ideal do sensor e para tal a área da seção transversal da pista de cobre deve ser maximizada. A

espessura de cobre da placa de circuito padrão varia entre 35 μm e 135 μm , sendo o primeiro a opção menos dispendiosa e, portanto, a mais conveniente (Abdilla, 2009).

As bobinas planares ainda têm baixos valores de indutância devido ao pequeno campo magnético gerado e à capacitância distribuída entre as espiras, ou seja, a capacitância parasita (Lugli et al, 2013). Uma maior frequência de operação é frequentemente usada como fator compensatório, mas isso nem sempre é possível devido aos requisitos de compatibilidade eletromagnética. Portanto, para maximizar o valor da indutância, pode ser necessário um grande número de voltas. Isso aumenta o raio externo das bobinas planares, um problema de fabricação que pode ser minimizado usando PCBs de várias camadas ou com espaçamentos menores entre as trilhas. A redução dos espaçamentos atinge maiores correntes de parasitas induzidas na placa alvo e, portanto, melhora significativamente a sensibilidade do sensor, todavia a opção é limitada pelas regras de projeto de fabricação e, portanto, os limites tecnológicos do processo de fabricação devem ser levados em consideração. Ao usar sensores compostos de duas ou mais bobinas planares sobrepostas, um alto valor de indutância pode ser alcançado.

2.5. AÇO API 5L X65

Com o crescimento mundial do consumo de energia a partir dos anos 70, novas fontes de óleo e gás passaram a ser exploradas, principalmente em regiões com condições climáticas adversas. Surgiu assim a necessidade de se transportar quantidades crescentes destes recursos tornando comum a utilização de dutos de grandes diâmetros e espessuras, operando sob altas pressões.

Figura 2.11 Dutos metálicos em ambiente agressivo.



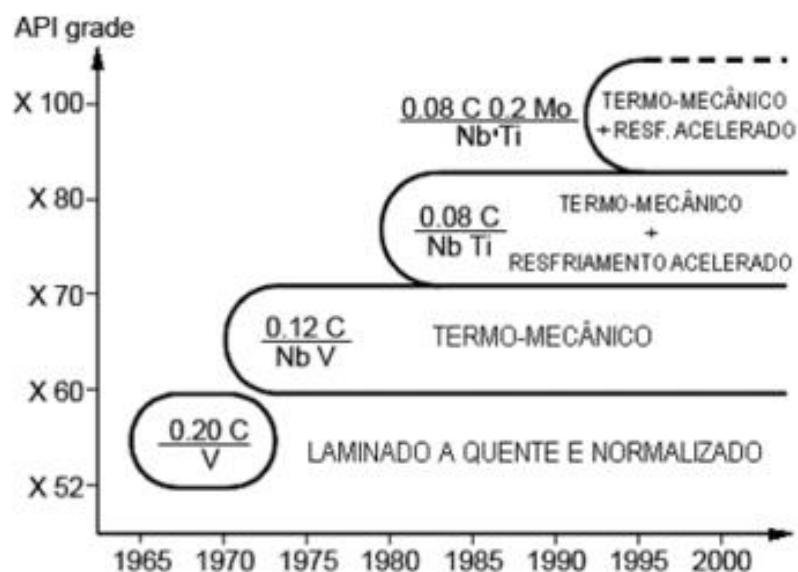
(Fonte: SUBSEA WORLD NEWS, 2016)

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) são utilizados com sucesso em aplicações que requerem custo baixo, boa resistência mecânica e boa tenacidade à fratura. Estes aços são considerados micro ligados e apresentam comumente microestrutura típica de ferrita-perlita. Sua composição química é similar à de um aço baixo carbono, mas com micro adições de elementos de liga de aproximadamente 0,1% Nb, Ti ou V para garantir propriedades mecânicas superiores (CHEN, 1984).

O Instituto Americano do Petróleo (API) classifica os aços de alta resistência e baixa liga empregados na fabricação de dutos em função de sua composição química e resistência mecânica seguindo a norma API-5L. O aumento da resistência destes aços proporcionou o menor consumo de material permitindo também o transporte de gás a maiores pressões. O grau do aço é definido a partir do limite inferior de escoamento do material em [ksi], assim o API grau X65, objeto de estudo desse trabalho, tem limite inferior de escoamento de 65 ksi (aproximadamente 448 Mpa).

Na Figura 2.12 abaixo mostra a evolução dos aços grau API para a fabricação de tubos com grande diâmetro ao longo dos últimos 40 anos. Pode-se observar que a adição de elementos de liga e o uso de laminação controlada, a qual foi posteriormente implementada com resfriamento acelerado, permitiu uma progressiva redução do teor de C, ao mesmo tempo em que a resistência mecânica do material se elevou do grau X52 para X100.

Figura 2.12 Evolução dos aços micro ligados tipo API.

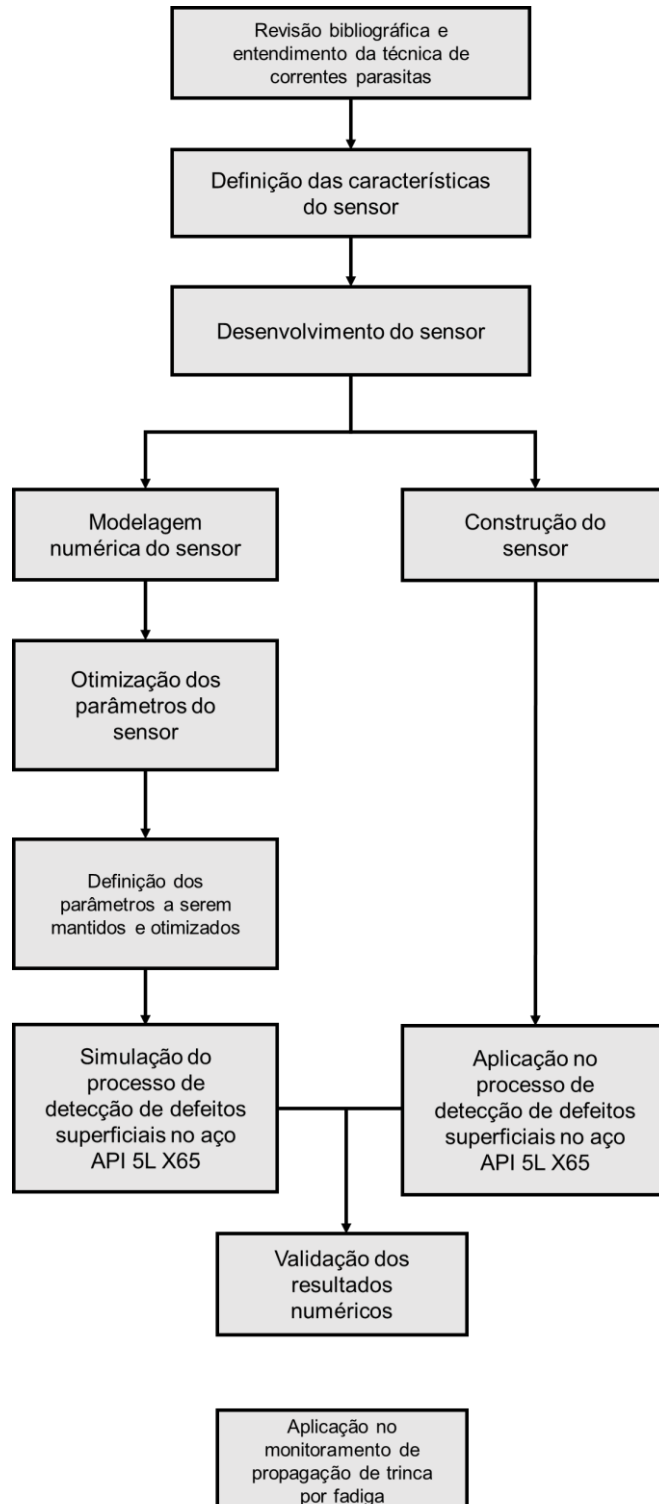


(Fonte: HILLERNBRAND, 2002)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as etapas que compõe a metodologia deste trabalho, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.1 abaixo.

Figura 3.1 Fluxograma apresentando a seqüência de atividades realizadas neste estudo.



Inicialmente foi realizada ampla revisão bibliográfica a cerca da técnica de correntes parasitas a fim de aprimorar o conhecimento desta autora sobre a mesma, possibilitando assim o embasamento necessário para a escolha do modelo, bem como das características, do sensor a ser construído.

3.1.MATERIAL

Os ensaios foram realizados a partir de uma chapa de aço API 5L X65. A composição química está demonstrada na tabela 3.1 abaixo e foi obtida via espectrômetro de emissão ótica, modelo *Spectrolab* tipo LAVFA 18B, da empresa *Spectro*, situado no GAF-LAMEF do prédio da Escola de Engenharia da UFRGS.

Tabela 3.1 Composição química aço API SL X65.

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Nb (%)	Ti (%)	V (%)	Fe (%)
1	0.174	0.247	1.135	0.017	0.0045	0.0770	0.0240	0.0290	0.0029	0.0010	0.0051	0.0024	98.24
2	0.176	0.253	1.125	0.016	0.0093	0.0720	0.0250	0.0300	0.0032	0.0015	0.0055	0.0028	98.23
3	0.172	0.249	1.124	0.016	0.0100	0.0710	0.0260	0.0290	0.0030	0.0016	0.0054	0.0031	98.24
média	0.174	0.250	1.128	0.016	0.0079	0.0733	0.0250	0.0293	0.0030	0.0014	0.0053	0.0028	98.24
desvio	0.0020	0.0031	0.0061	0.0006	0.0030	0.0032	0.0010	0.0006	0.0002	0.0003	0.0002	0.0004	0.0058

3.2.MÉTODOS

A partir do entendimento da técnica de correntes parasitas e com suporte da literatura, foi definida a construção de um sensor planar, superficial e na configuração transmite-recebe.

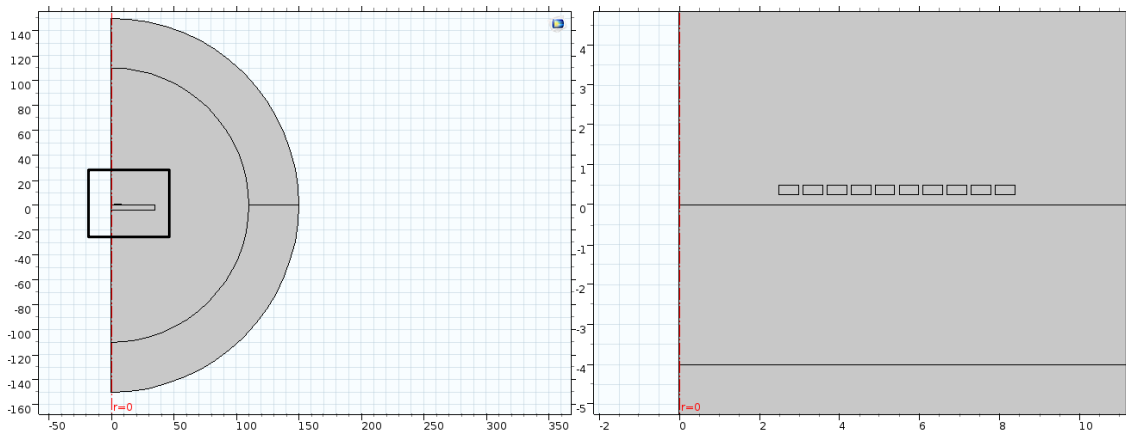
3.2.1. MODELAGEM NUMÉRICA DO SENSOR

3.2.1.1. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SENSOR

Na simulação por elementos finitos, o software COMSOL Multiphysics[®] 5.2a foi utilizado no módulo AC / DC e na interface Magnetic Field (mf). O modelo foi construído no ambiente "2D axisymmetric", vide Figura 3.2, a fim de possibilitar a modelagem de três diferentes números de voltas (5, 10 e 20 voltas) na bobina em uma mesma simulação. Tal modelagem ainda otimiza a memória do processador, além de reduzir o tempo de processamento. Cada trilha das bobinas foi individualmente modelada como um retângulo de

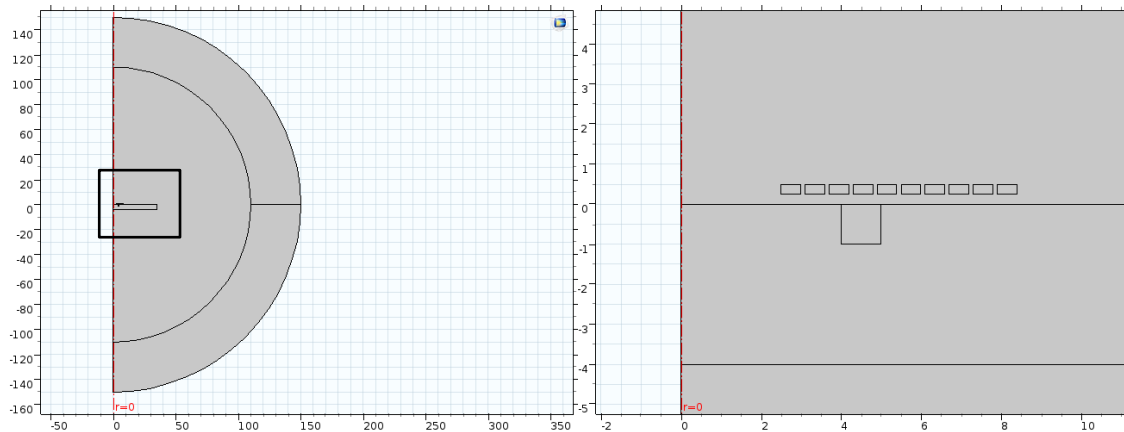
0.50 mm de largura e espaçadas 0.10 mm entre si e assim, ao girar o modelo no próprio eixo, se obteve a bobina circular.

Figura 3.2 Geometria da bobina e da placa sem defeito no COMSOL Multiphysics® 5.2a.



Foram realizadas três simulações, a primeira, exposta na Figura 3.2, em uma placa circular de raio 35 mm e altura 4 mm contendo as propriedades eletromagnéticas do aço API 5L X65. As bobinas de emissão e leitura foram modeladas em material contendo as propriedades eletromagnéticas do cobre. A segunda simulação, conforme Figura 3.3, foi modelada nos mesmos parâmetros da simulação anterior, porém com a adição de um defeito na região central. Finalmente foi realizada uma terceira simulação sem a presença da placa de aço, a fim de replicar o sensor “ao ar”, ou seja, sem contato direto com nenhum material metálico. Tanto as bobinas quanto a peça foram construídas em um volume contendo as propriedades eletromagnéticas do ar. Ainda, foi construída uma malha tetraédrica com elementos de tamanho 0,03 nas menores regiões do modelo.

Figura 3.3 Geometria da bobina e da placa com defeito no COMSOL Multiphysics® 5.2a.



ETAPAS DE OTIMIZAÇÃO

A Tabela 3.2 abaixo apresenta os parâmetros iniciais do modelo proposto. O número de voltas das bobinas de excitação e leitura (N) e a frequência de excitação (f) foram definidos como parâmetros a serem otimizados, devido a sua forte influência na sensibilidade de detecção do sensor a ser construído. A magnitude da impedância normalizada (ΔZ) foi calculada comparando os valores de impedância na primeira simulação (sem defeito) e na segunda simulação (no defeito superficial) em uma faixa de frequência de 0.10 a 10 MHz com passo de 0.10 MHz em arranjos com bobinas de 5, 10 e 20 voltas. O objetivo dessa etapa consiste em determinar o número de voltas e a frequência de excitação ótimos para construir um sensor com a melhor sensibilidade possível para o material estudado.

Tabela 3.2 Parâmetros iniciais do modelo proposto.

		Símbolo	Medida (mm)
Bobina de emissão	Diâmetro interno	D_i	1.60
	Espessura da trilha	w	0.50
	Espaçamento entre trilhas	b	0.70
	Número de voltas	N	Indefinido
	Frequência	f	Indefinido
Bobina de leitura	Diâmetro interno	D_i	1.00
	Espessura da trilha	w	0.50
	Espaçamento entre trilhas	b	0.70
	Número de voltas	N	Indefinido

3.2.1.2. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE DETECÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS

Sequencialmente à definição do número de voltas e a frequência de excitação ótimos para esse estudo, ocorre à simulação da detecção de defeitos manufaturados. Na simulação do processo de detecção de defeitos superficiais, o software COMSOL Multiphysics® 5.2a foi utilizado assim como nas simulações citadas anteriormente, porém o modelo foi construído no ambiente “3D” (vide Figura 3.4) a fim de possibilitar a modelagem da placa e dos defeitos a serem inspecionados, bem como de obter maior precisão na resposta do software.

As medidas foram simuladas ao longo de 33 pontos espaçados igualmente entre si a uma distância de 5 mm em uma placa medidas 200x200x15 mm com as propriedades eletromagnéticas do aço e com três defeitos manufaturados na geometria de semicírculo de raios $d_1 = 0.1$ mm, $d_2 = 0.5$ mm e $d_3 = 1$ mm, respectivamente. Na Tabela 3.3 estão descritas as medidas das bobinas, observa-se a escolha pelas bobinas de 5 voltas e as frequências de excitação de 5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0 e 7.5 MHz. Tais parâmetros serão justificados na sequência desse texto.

A sensibilidade para a detecção dos defeitos de forma isolada e para diferenciação entre diferentes profundidades, são primordiais em um sensor a ser utilizado na inspeção de defeitos superficiais. Assim, as dimensões das descontinuidades foram escolhidas visando reproduzir trincas de soldagem ou fadiga. Ainda, foram dimensionadas suficientemente

pequenas para se assemelhar à “zona morta” do sensor tradicional de ultrassom, que é uma técnica tradicionalmente utilizada para inspeção de descontinuidades nesse tipo de aço.

Figura 3.4 Modelo do sensor sobre a placa de aço contendo três defeitos de diâmetros distintos.

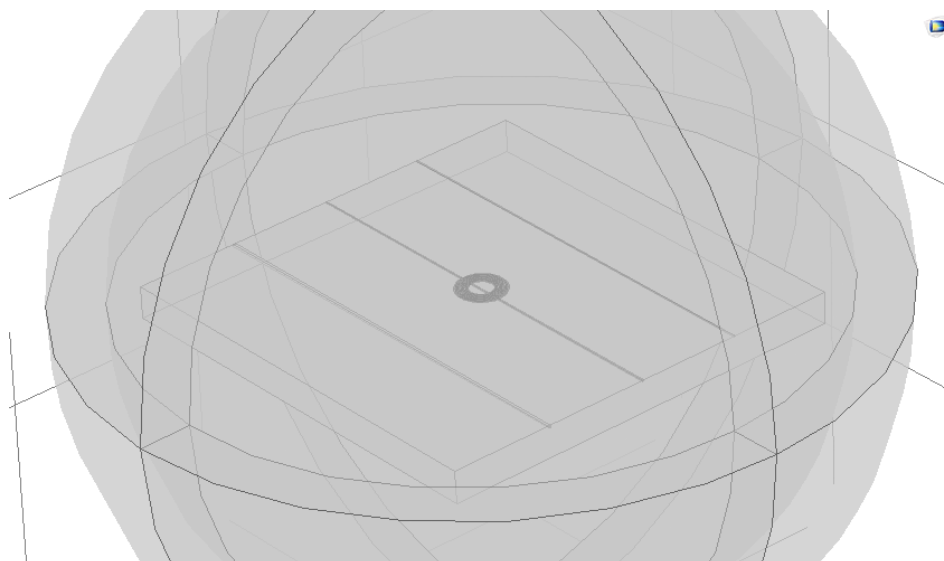


Tabela 3.3 Parâmetros definidos para a construção do sensor.

		Símbolo	Medida (mm)
Bobina de emissão	Diâmetro interno	D_i	1.60
	Espessura da trilha	w	0.50
	Espaçamento entre trilhas	b	0.70
	Número de voltas	N	5 voltas
	Frequência	f	5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0 e 7.5 MHz
Bobina de leitura	Diâmetro interno	D_i	1.00
	Espessura da trilha	w	0.50
	Espaçamento entre trilhas	b	0.70
	Número de voltas	N	5 voltas

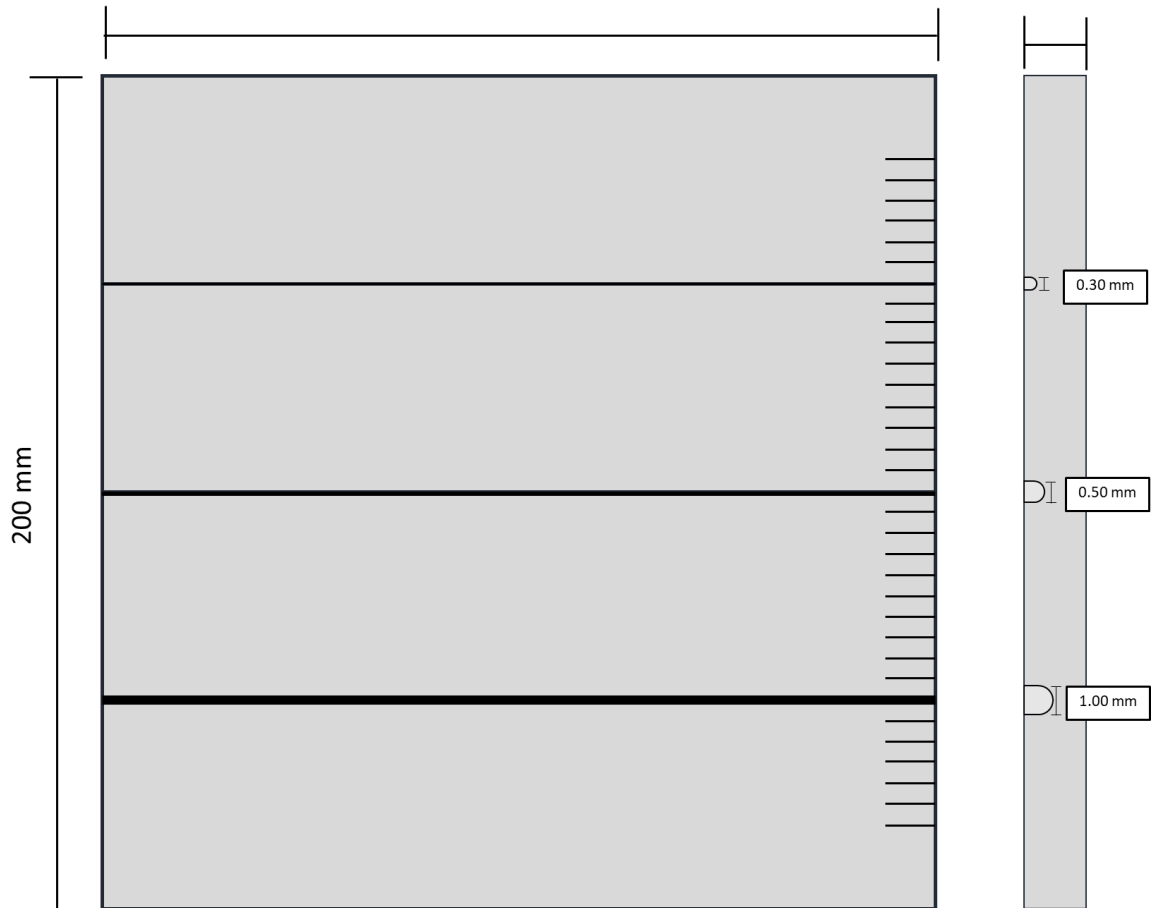
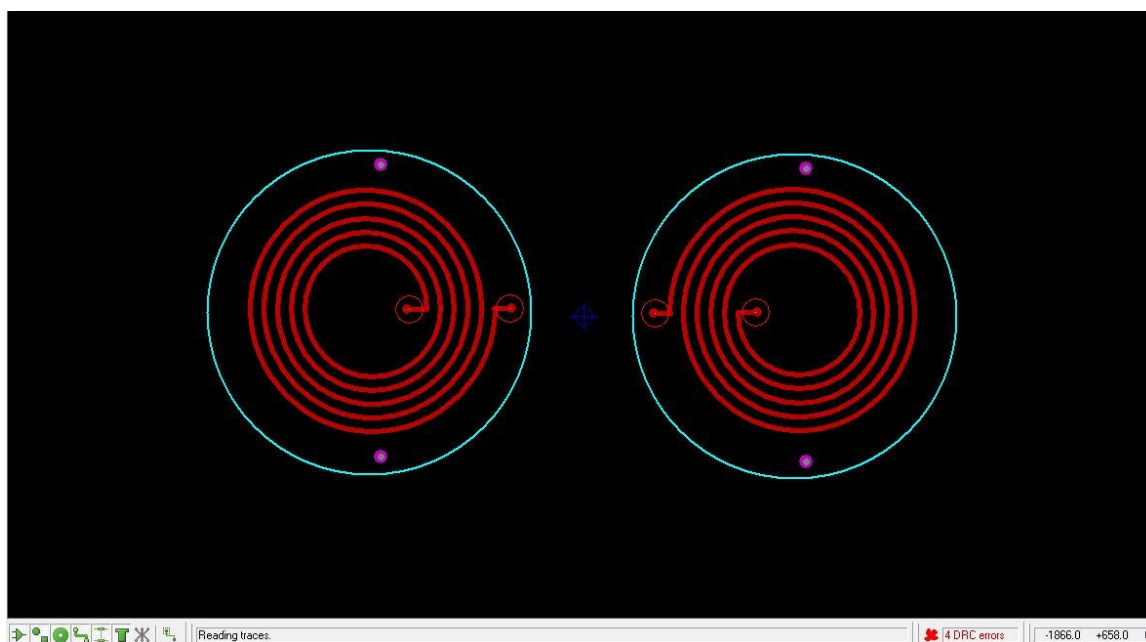


Figura 3.5 Modelo placa de aço com defeitos manufaturados utilizada no trabalho.

3.2.2. CONSTRUÇÃO DO SENSOR

A escolha do melhor material, bem como da melhor forma de produzir o sensor foi amplamente estudada e testada preliminarmente a esse trabalho, e em caráter totalmente experimental e intrínseco por parte dessa autora. Assim, O sensor foi construído através da união de placas de circuito impresso (PCB) produzidas separadamente (bobina de emissão e de leitura). As placas PCB foram projetadas no software *Proteus Design Suite* (Figura 3.6), e então fresadas em equipamento apropriado no material **FR-4**. As bobinas possuem medidas semelhantes e se diferenciam apenas na sua orientação e no seu diâmetro interno, a fim de facilitar seu alinhamento. A espessura do substrato de cobre influencia minimamente as medidas de impedância e, portanto, não será considerado nesse estudo.

Figura 3.6 Bobinas desenhadas no software *Proteus Design Suite*.



Na tabela 3.3 estão descritas as medidas das bobinas. As placas foram então unidas, isoladas eletricamente e finalizadas com a ligação à cabos coaxiais. A Figura 3.7 abaixo apresenta as bobinas tão logo foram retiradas da fresa e após unidas e isoladas no sensor. As letras “E” e “L” foram escritas a fim de identificar as bobinas de emissão e leitura, respectivamente.

Figura 3.7 Bobinas oriundas de placas PCB (a) após a fresagem e (b) unidas no sensor finalizado.

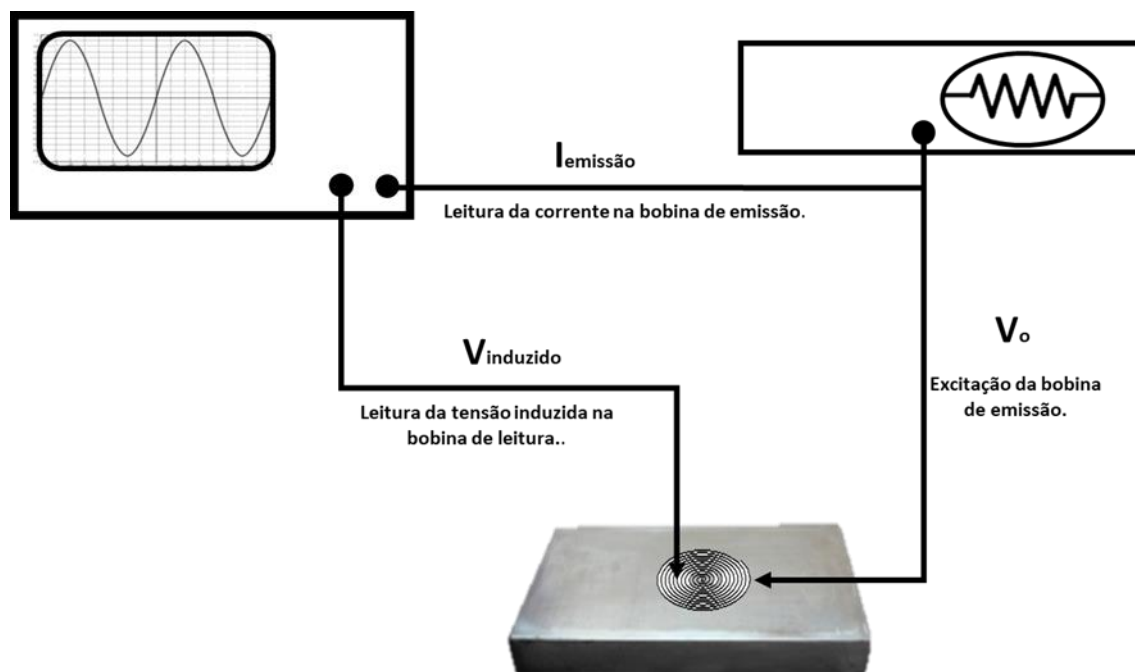


3.2.2.1. DETECÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS

Na Figura 3.8 abaixo, está descrita a configuração utilizada, na qual a bobina de emissão do sensor foi excitada por uma tensão senoidal (V_o) de 5 Volts e 6.50 MHz de frequência através de um gerador de funções da marca Agilent, modelo 33521A. A tensão induzida na

bobina de leitura (V_{induzido}) foi feita através de osciloscópio, também da marca Agilent, modelo DSO8064A. Foi acoplada uma resistência de 1Ω a fim de computar a corrente induzida na bobina de leitura. Dessa forma, foram calculados pela autora os valores de impedância através de cálculo já detalhado nesse trabalho, no capítulo 2.1.2.

Figura 3.8 Configuração experimental do sensor planar de correntes parasitas.



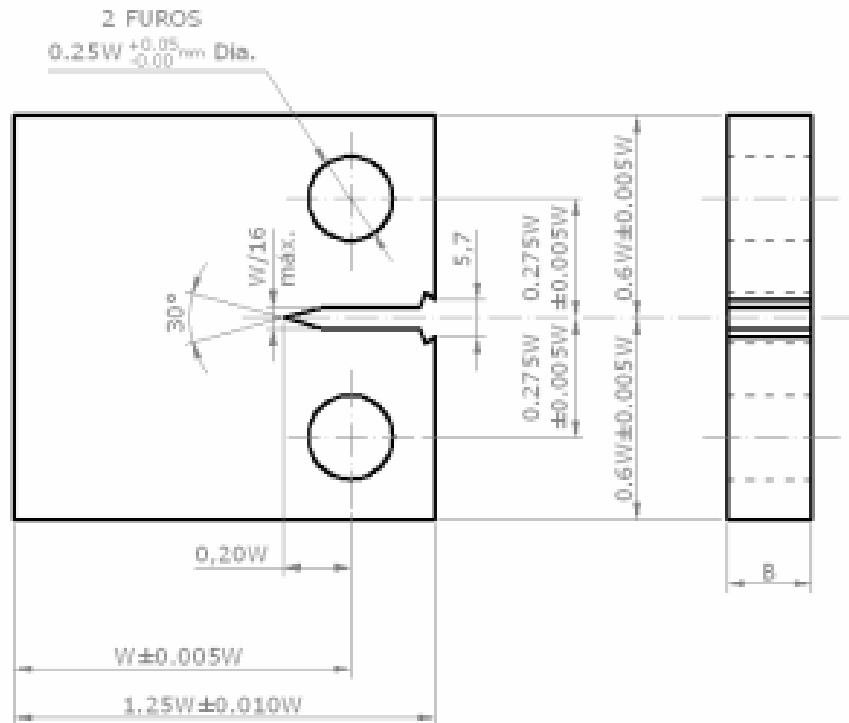
3.2.3. MONITORAMENTO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA

A fadiga ocorre quando um material está sujeito a uma variação cíclica ou alternada de cargas. A repetição desses esforços provoca uma falha, fratura por fadiga, com uma tensão muito menor do que o limite de resistência estática do material. (Chiaverini, 1986). O ensaio de fadiga consiste em um teste dinâmico no qual se busca determinar o comportamento relativo do material quando submetido a essas cargas repetitivas ou flutuantes. Nesse trabalho, o ensaio de fadiga foi realizado visando monitorar a efetividade do sensor estudado em detectar o crescimento de uma trinca em propagação.

O ensaio foi realizado utilizando o aço API 5L X65 em corpo de prova do tipo C(T) – *compact tension* confeccionado de acordo com a norma ASTM E647/2000 (Figura 3.9). A amostra foi submetida a ensaio de carregamento uniaxial cíclico com aplicação de sobrecargas, para qual, se utilizou uma máquina servo-hidráulica marca MTS modelo 640

com capacidade de 100kN, controlada pelo software *MTS Fatigue Crack Growth*, na temperatura ambiente.

Figura 3.9 Geometria do corpo de prova do tipo C(T) utilizado no ensaio. Sendo $w = 60$ mm e $B = 10$ mm.



O comprimento da trinca foi monitorado por um extensômetro (*clip gage*) instalado no corpo de prova, ao qual também foi acoplado o sensor. O extensômetro foi acoplado na face do corpo de prova e foi usado para medir a abertura do entalhe, com o objetivo de se medir o comprimento de trinca pelo uso da função *compliance* (flexibilidade), prevista na norma ASTM E647/2000, cuja forma geral é mostrada nas equações 3.1 e 3.2 abaixo:

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1\mu_x + C_2\mu_x^2 + C_3\mu_x^3 + C_4\mu_x^4 + C_5\mu_x^5$$

(3.1)

Onde

$$\mu_x = \left\{ \left[\frac{EvB}{P} \right]^{1/2} + 1 \right\}^{-1}$$

(3.2)

Os coeficientes da equação 3.1 dependem do ponto onde é feita a medição da abertura do entalhe. Neste trabalho, se aplicam os valores de coeficientes dados na tabela 3.4 abaixo:

Tabela 1.4 Valores dos coeficientes da função compliance. (ASTM E647, 2000).

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1,0010	-4,6695	18,460	-236,82	1214,90	-2143,60

Na Figura 3.10 está o arranjo experimental utilizado no ensaio, que foi realizado através de carregamentos de amplitude variável, frequência 10Hz, razão de carregamento $R=0,1$ e temperatura ambiente.

Figura 3.10 Arranjo experimental ensaio de propagação de fadiga para detecção de propagação de trinca.

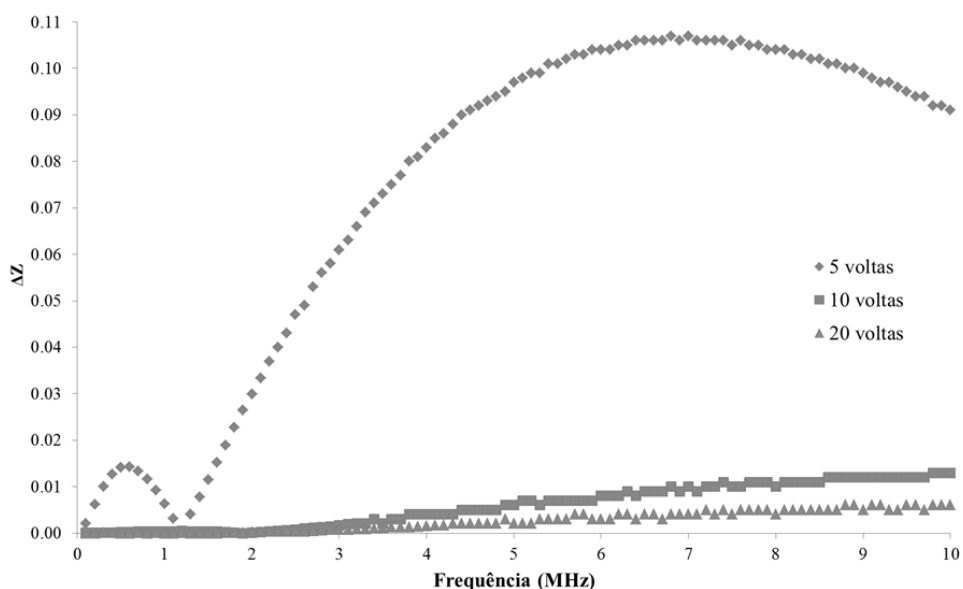


4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SENSOR

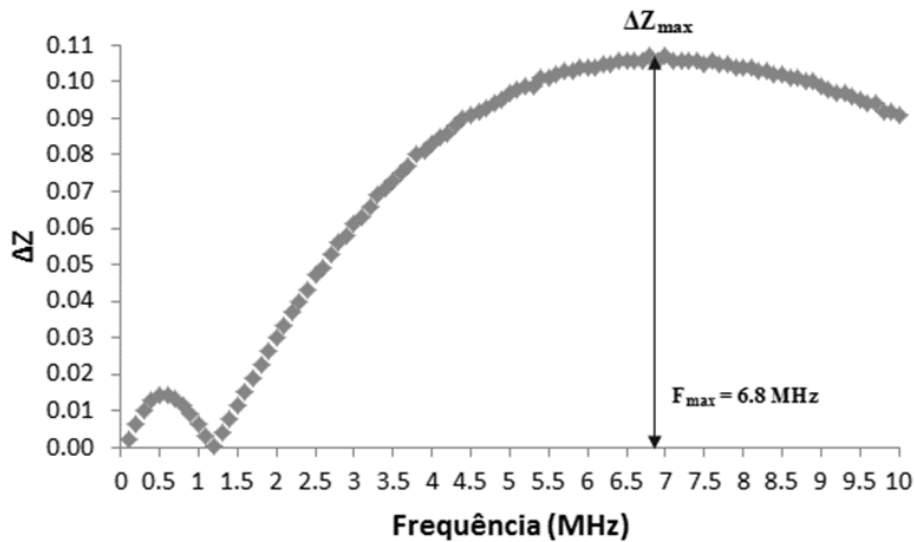
Nas Figuras 4.1 e 4.2 abaixo estão os primeiros resultados obtidos no processo de otimização numérica do sensor para a posterior inspeção dos defeitos superficiais. As curvas demonstradas tiveram os valores de ΔZ calculados a partir da subtração dos valores de impedância obtidos na simulação dos sensores na placa de aço com defeito pelos valores de impedância obtidos na simulação dos sensores na placa de aço sem o defeito. No primeiro gráfico, comparando os sensores com bobinas de 5, 10 e 20 voltas, se observa com facilidade a sensibilidade superior do sensor de 5 voltas em relação aos sensores de 10 e 20 voltas na faixa de frequência de 0.1 a 10 MHz.

Figura 4.1 Comparação dos valores de ΔZ na faixa de frequência dos sensores compostos de bobinas de 5, 10 e 20 voltas.



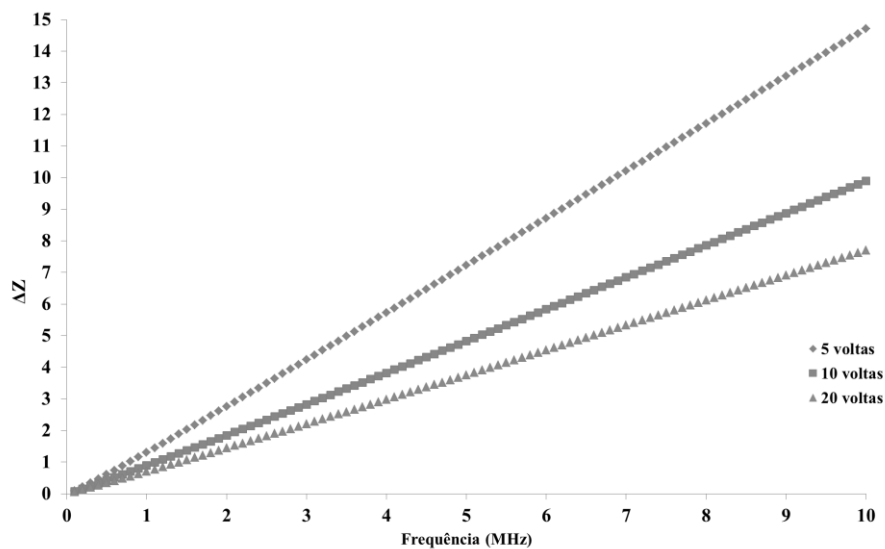
Ainda, na Figura 4.2, observa-se com maior clareza a variação máxima de impedância no sensor de 5 voltas em 6.8 MHz de frequência de trabalho. Possivelmente haveriam picos de variação de impedância em frequências de trabalho mais elevadas para os sensores de 10 e 20 voltas, porém não seriam interessantes para esse estudo, e mesmo para aplicações práticas, devido às limitações dos equipamentos utilizados.

Figura 4.2 Variação da impedância na faixa de frequência no sensor composto de bobinas de 5 voltas.



Também foram simulados os valores de impedância do sensor sem contato com material metálico. Na Figura 4.3 estão expostos os valores de ΔZ entre os sensores em contato com a placa de aço e ao “ar”. Novamente a sensibilidade superior do sensor de 5 voltas é observado. É importante ressaltar que as figuras retratam variações de impedância, que são os objetos de interesse desse trabalho, e não os valores de impedância normalizados.

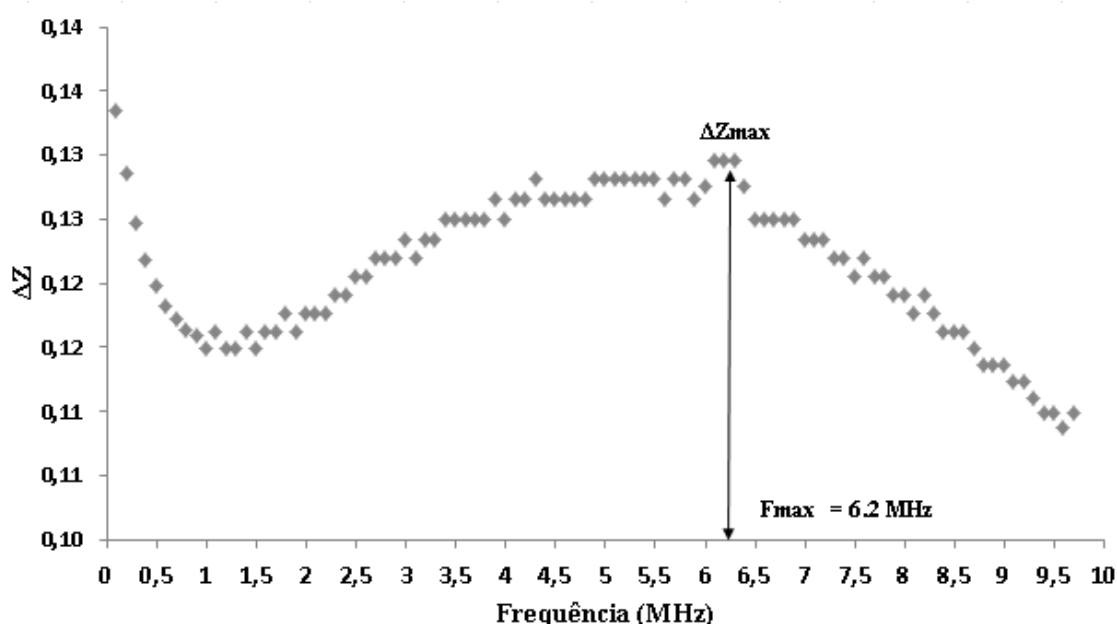
Figura 4.3 Variação de impedância na faixa de frequência nos sensores compostos de 5, 10 e 20 voltas.



A partir das simulações de otimização dos parâmetros do sensor, foi definida a utilização do arranjo composto de bobinas de 5 voltas nesse trabalho. Porém, no processo de otimização, os modelos foram construídos no ambiente "2D axisymmetric" e, portanto, o defeito quando

rotacionado possui o formato de um anel no sentido das trilhas das bobinas. Dessa forma, a fim de auxiliar na validação da performance do sensor, foram realizadas simulações no ambiente “3D” do *software*, na mesma faixa de frequência em um defeito de largura e profundidade semelhantes, porém ao longo de uma linha perpendicular ao sensor modelado.

Figura 4.4 Variação da impedância na faixa de frequência no sensor composto de bobinas de 5 voltas na simulação “3D”.



Os resultados estão expostos na Figura 4.4 acima, na qual se observam que a variação de impedância máxima ocorre na frequência = 6.2 MHz. Dessa forma, e considerando também a frequência de 6.8 MHz apurada nas simulações em “2D axisymmetric”, foi definido que as frequências a serem estudadas nesse trabalho serão: 5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0 e 7.5 MHz.

4.2.PROCESSO DE DETECÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS

4.2.1. SENSIBILIDADE PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS ISOLADOS

Nas Figuras 4.5; 4.6 e 4.7 estão apresentadas as comparações entre as respostas numéricas e experimentais em relação às descontinuidades superficiais de raios $d_1 = 0.1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.5 \text{ mm}$ e $d_3 = 1 \text{ mm}$, respectivamente. Os resultados se referem às seis frequências de operação definidas. O deslocamento “0” se refere ao momento em que o sensor está com seu centro

exatamente sob o defeito estudado e os demais pontos se referem às posições que estão espaçadas do centro e entre si em 5 mm, conforme já citado nesse texto.

Figura 4.5 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.1 mm de raio, em frequências de excitação de 5.0 e 5.5 MHz.

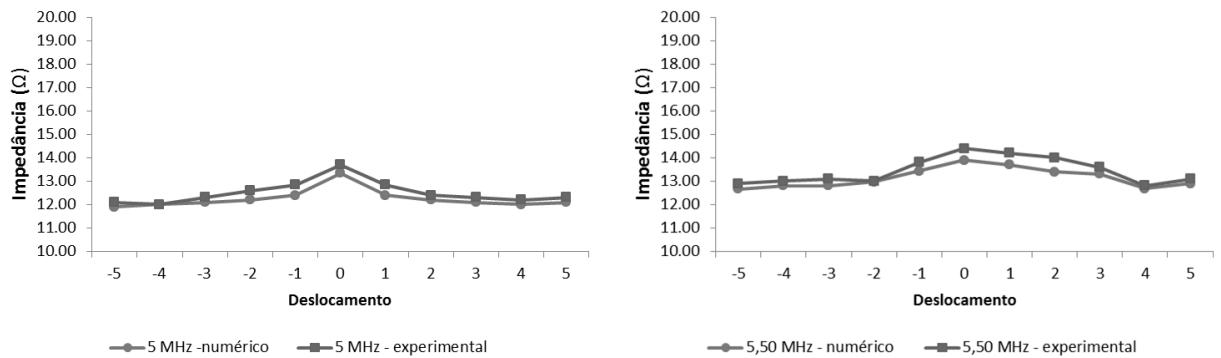


Figura 4.6 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.1 mm de raio, em frequências de excitação de 6.0 e 6.5 MHz.

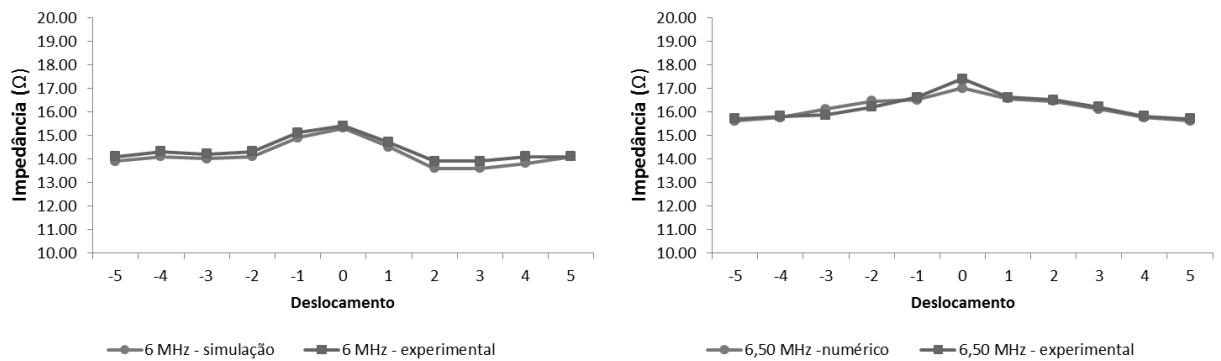
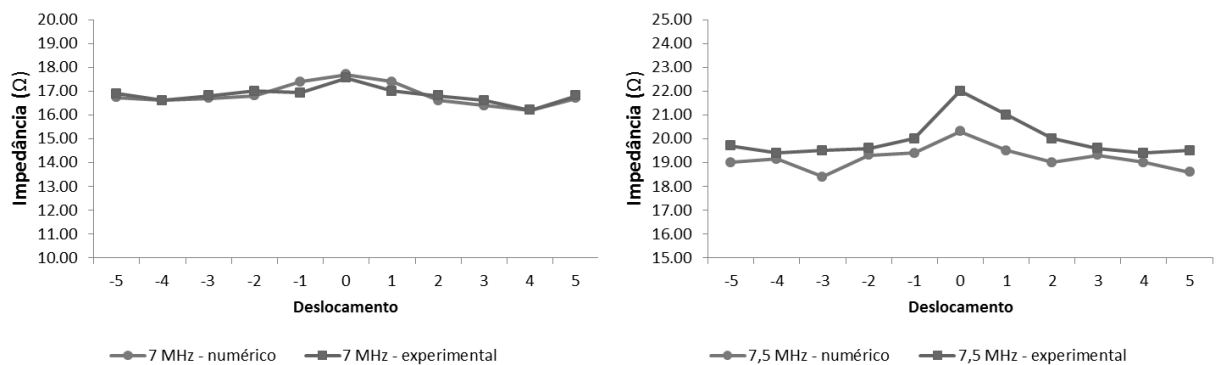


Figura 4.7 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.1 mm de raio, em frequências de excitação de 7.0 e 7.5 MHz.



Na figura 4.5 observa-se a sensibilidade satisfatória do sensor na detecção do defeito de raio $d_1 = 0,1$ mm em todas as frequências de excitação estudadas, tanto nas respostas numéricas quanto nas experimentais. Uma ótima correlação entre as respostas se dá sobretudo nas frequências de trabalho de 6 e 6.5 MHz, validando novamente as informações coletadas nas primeiras simulações.

Figura 4.8 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.5 mm de raio, em frequências de excitação de 5.0 e 5.5 MHz.

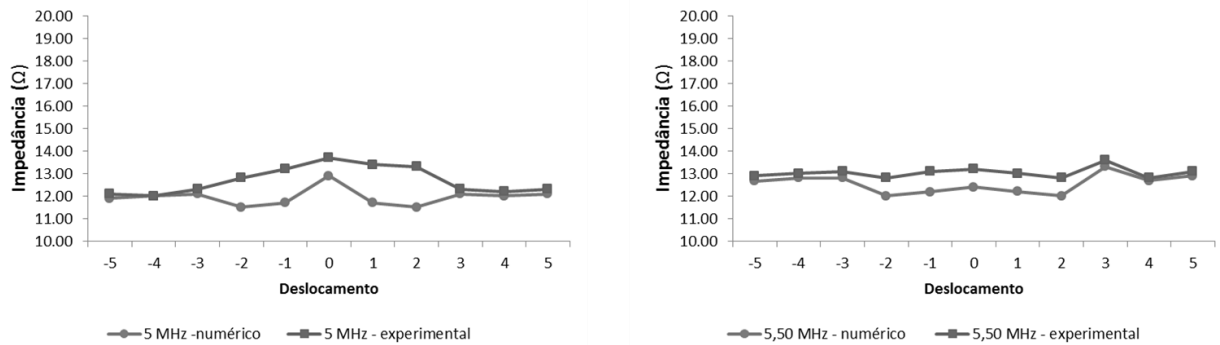


Figura 4.9 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.5 mm de raio, em frequências de excitação de 6.0 e 6.5 MHz.

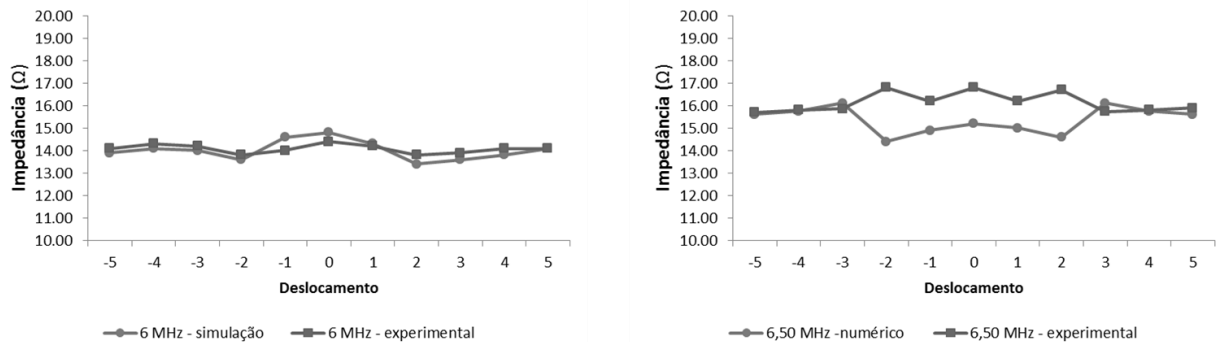
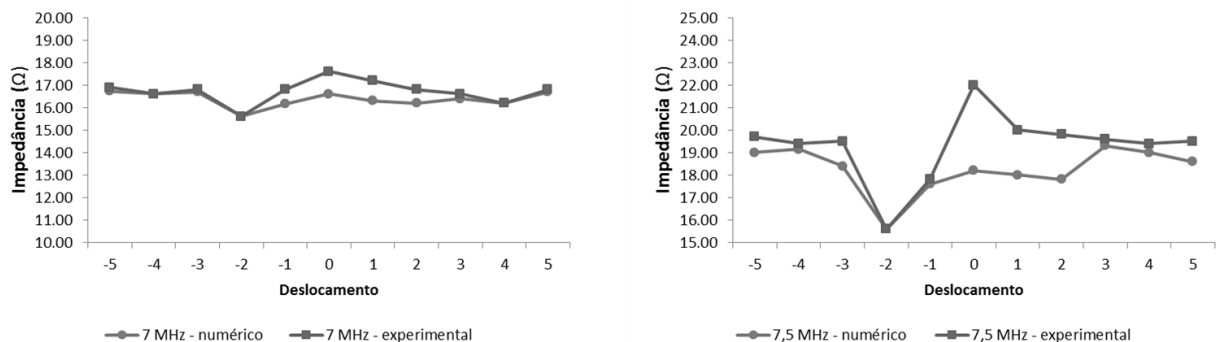


Figura 4.10 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 0.5 mm de raio, em frequências de excitação de 7.0 e 7.5 MHz.



Todavia, nas Figuras 4.8; 4.9 e 4.10, estão expostos os resultados numéricos e experimentais referentes à detecção do defeito de raio $d_2=0,5$ mm os quais não são tão satisfatórios quanto os obtidos anteriormente. Os valores de impedância não se mostram tão explícitos quanto o necessário para considerar o sensor eficiente em detectar descontinuidades em defeitos com tal dimensão e no aço API 5L X65. É interessante ressaltar que para diferentes materiais e tipo de defeitos, diferentes respostas podem ser analisadas, assim como diferentes parâmetros podem ser definidos. Ou seja, o método pode ser customizado para condições diversas envolvendo a inspeção de descontinuidades.

Uma provável razão para tal discrepância pode estar no fato de que como o sensor tem medida de aproximadamente 20 mm de diâmetro. As medidas foram realizadas em pontos espaçados 5 mm entre si, logo é coerente afirmar que quando o sensor está com seu centro posicionado nos pontos -2; -1; 1 ou 2, o mesmo está com parte de suas dimensões ainda em contato com o defeito. Tal constatação seria mais prejudicial na sensibilidade a esse tamanho de descontinuidade especificamente, por ser a medida de largura exata das trilhas das bobinas utilizadas. Ainda, é relevante observar que mesmo com resultados discrepantes na detecção do defeito, existe uma tendência similar no comportamento das curvas numéricas e experimentais para todas as frequências estudadas.

Figura 4.11 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 1.0 mm de raio, em frequências de excitação de 5.0 e 5.5 MHz.

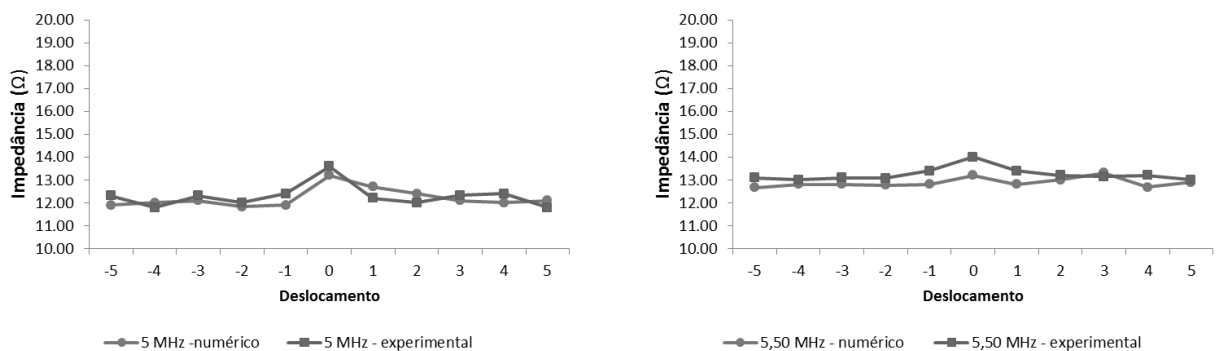


Figura 4.12 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 1.0 mm de raio, em frequências de excitação de 6.0 e 6.5 MHz.

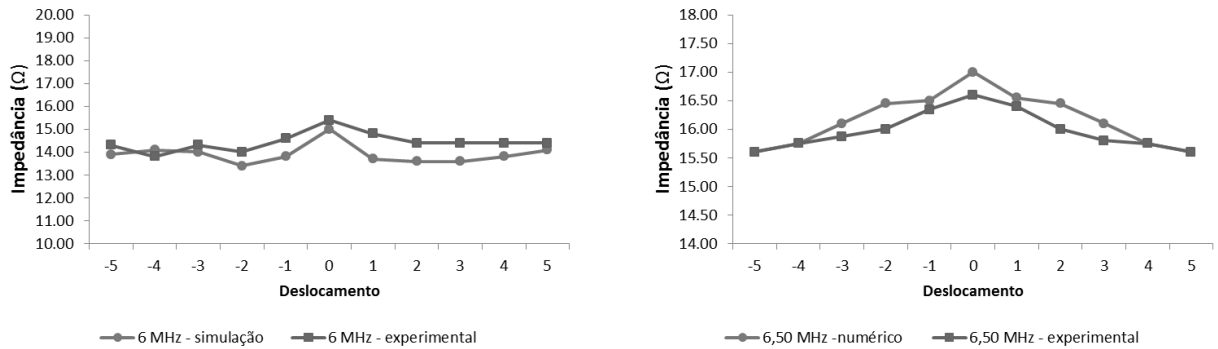
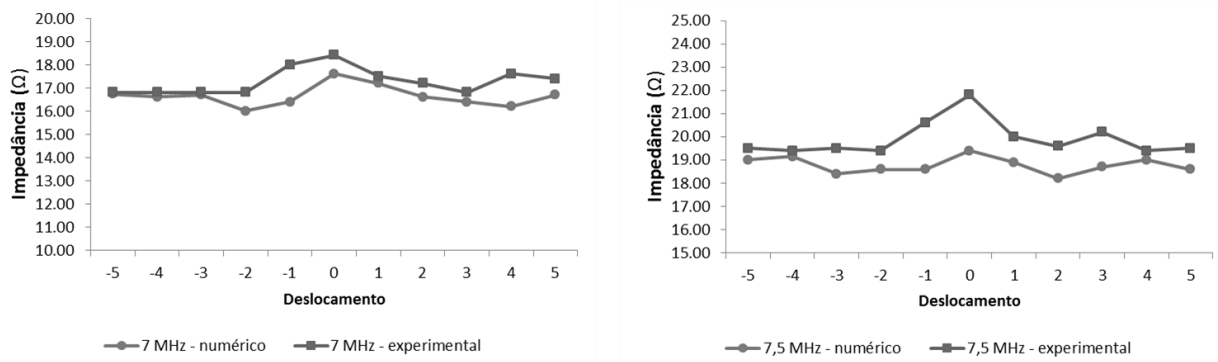


Figura 4.13 Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo do defeito superficial de 1.0 mm de raio, em frequências de excitação de 7.0 e 7.5 MHz.

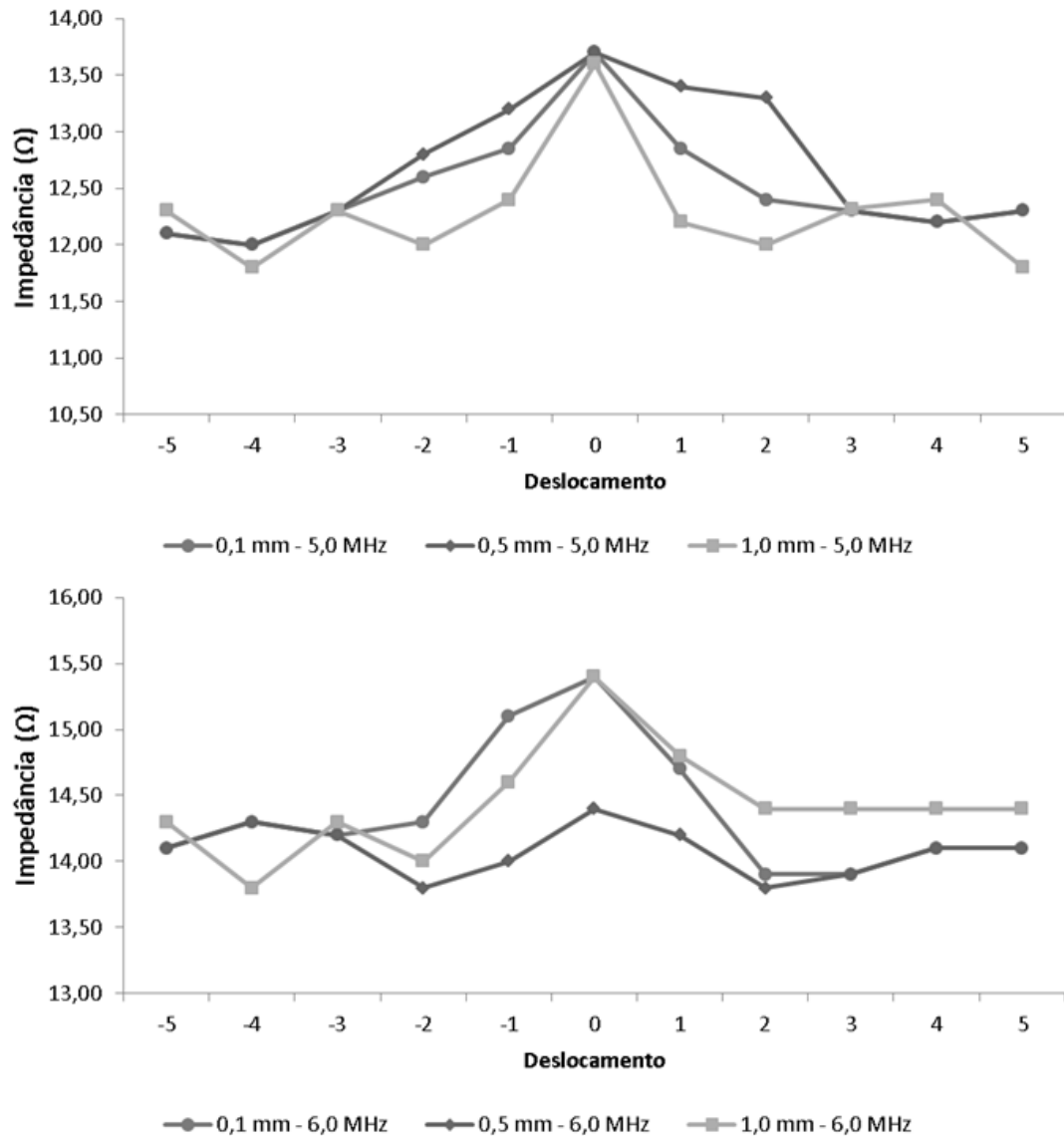


Por último, nas Figuras 4.11; 4.12 e 4.13, os resultados referentes ao defeito de raio $d_3 = 1$ mm se mostram bastante satisfatórios, sobretudo nas frequências de operação de 5.0; 5.5; 6.0 e 6.5 MHz. Maiores discrepâncias são observadas nas duas frequências mais elevadas, porém mesmo nesses casos ainda se observa uma tendência de comportamento razoavelmente similar entre as curvas.

4.2.2. DIFERENCIAÇÃO DE DEFEITOS DE DIFERENTES PROFUNDIDADES

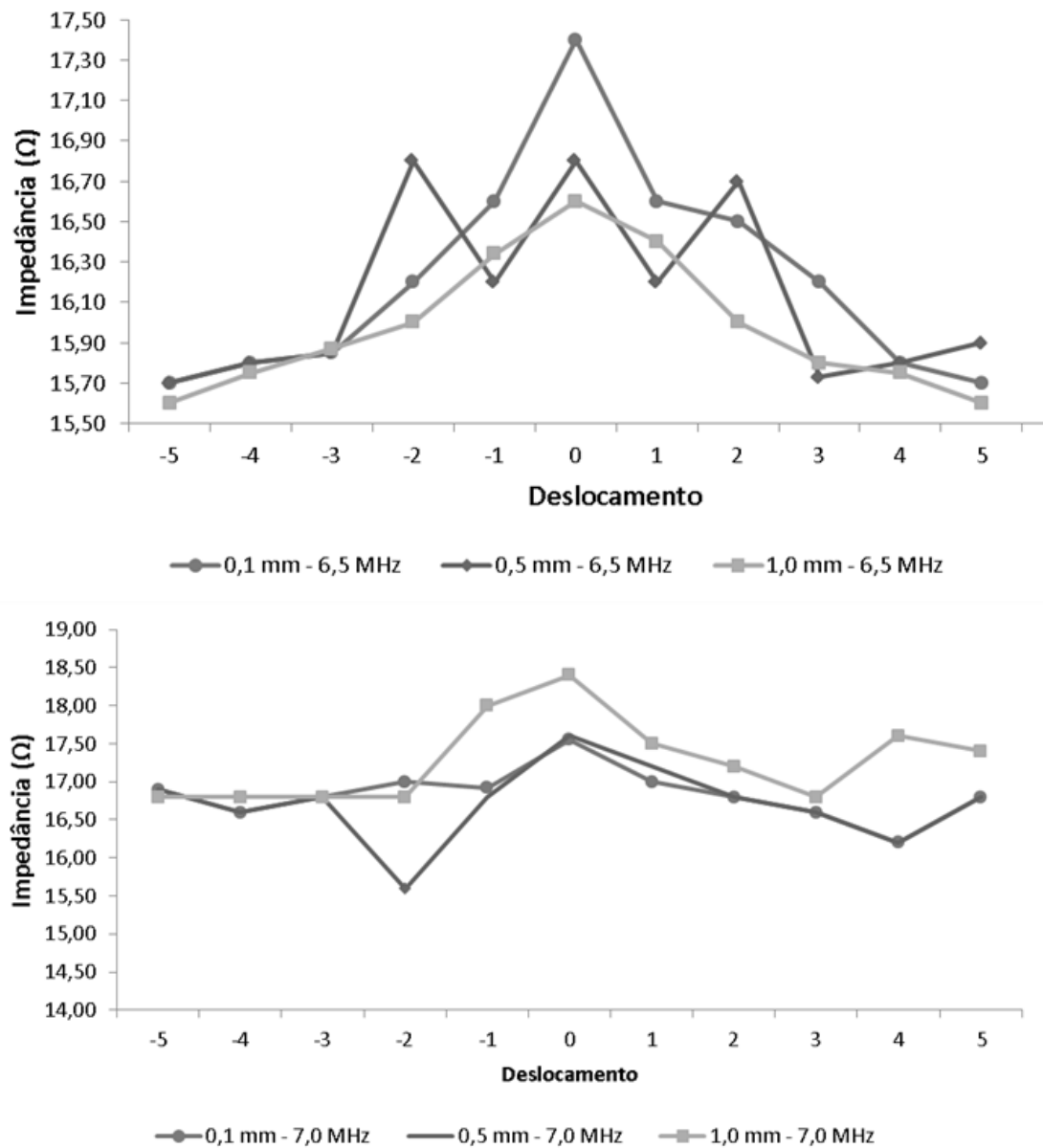
As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os resultados experimentais de impedância do sensor em função da profundidade de cada defeitos nas frequências de excitação 5.0; 6.0; 6.5 e 7.0 MHz.

Figura 4.14 Valores de impedância do sensor em função da profundidade dos defeitos nas frequências de excitação de 5.0 e 6.0 MHz.



Na frequência de excitação de 5 MHz o sensor apresenta valores de impedância semelhantes quando centralizado (posição 0), porém se observa maior variação ao sofrer deslocamento quando ainda em contato com os defeitos (pontos -2, -1, 1 e 2) no entalhe de 1 mm indicando, assim, maior sensibilidade na detecção dessa dimensão. Se observa elevação dos valores absolutos de impedância na medida do aumento da frequência de trabalho, como esperado na literatura.

Figura 4.15 Valores de impedância do sensor em função da profundidade dos defeitos nas frequências de excitação de 6.5 e 7.0 MHz



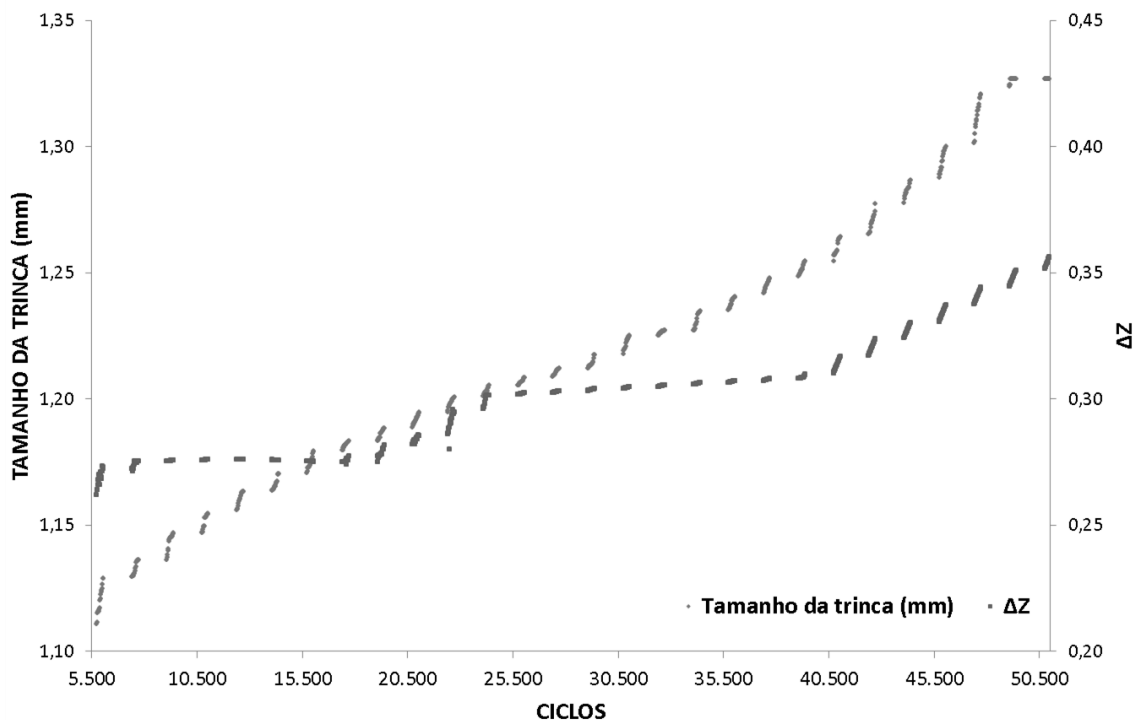
A detecção da descontinuidade de 0.5 mm não foi satisfatória nas frequências de excitação de 6.0 e 6.5 MHz, entretanto tal dificuldade se dá provavelmente devido a largura do defeito, que é semelhante à largura das trilhas das bobinas, e não devido a profundidade do mesmo. As descontinuidades de raios 0.1 e 1.0 mm foram igualmente detectadas em 6.0 MHz. Em 6.5 MHz houve maior sensibilidade em 0.1 mm do que em 1.0 mm evidenciando, assim, a provável efetividade superior do sensor em diferenciar defeitos na sua largura e não na sua profundidade.

Na frequência de 7MHz também não houveram indicativos significativos de sensibilidade a diferentes profundidades de defeitos. Conforme a equação 2.7 apresentada nesse trabalho como o cálculo da profundidade de penetração no material, seria esperado que proporcionalmente à elevação da frequência de trabalho, ocorresse a maior sensibilidade no defeito de 0.1 mm. Porém tal equação foi desenvolvida projetando os sensores tradicionais compostos pelas bobinas helicoidais. Será interessante, em trabalhos futuros, o estudo e adequação dos cálculos de profundidade de penetração em sensores compostos de bobinas planares.

4.3.MONITORAMENTO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA

Os resultados dos ensaios de propagação de trinca por fadiga podem ser apresentados de duas maneiras: tamanho da trinca versus o número de ciclos e taxa de propagação de trinca em função do fator de intensidade de tensões. A curva foi levantada na região linear do comportamento de propagação da trinca, ou seja, na região de Paris do gráfico da taxa de crescimento da trinca, que corresponde à sua propagação estável. A Figura 4.16 mostra a curva que relaciona o tamanho da trinca com o número de ciclos e a curva com a variação de impedância ocorrida ao longo da propagação da trinca.

Figura 4.16 Variação de impedância do sensor em função do crescimento da trinca e do número de ciclos do ensaio de fadiga.



O sensor se mostra satisfatoriamente sensível à propagação da trinca, pois detectou seu crescimento mesmo que tenha sido de aproximadamente 0,3 mm. Ainda, se observa que a curva de variação de impedância, mesmo que de baixa amplitude, acompanha a curva de crescimento da trinca. Tal comportamento endossa a constatação realizada anteriormente de que o sensor planar se mostra mais efetivo na detecção de defeitos através de sua largura do que em sua profundidade.

5. CONCLUSÕES

- A modelagem numérica utilizada no processo de otimização do sensor no ambiente "2D axsymmetric" do software de MEF se mostrou eficiente e satisfatória tornando-se assim, uma alternativa bastante interessante devido seu tempo consideravelmente reduzido de processamento.
- A simulação no ambiente "2D axsymmetric" também possibilitou a alternância das três configurações de bobinas propostas (5, 10 e 20 voltas) ao mesmo tempo.
- Na modelagem de bobinas planares no ambiente "3D" se faz necessário que cada geometria usada seja importada de um software de desenho assistido por computador (CAD).
- O sensor composto de bobinas de 5 voltas se mostrou mais sensível na simulação numérica no material proposto.
- Os resultados obtidos na validação dos resultados obtidos no processo de otimização, satisfatórios e auxiliaram na definição das frequências de excitação a serem trabalhadas: 5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0 e 7.5 MHz.
- O uso de placas PCB se mostrou uma alternativa eficiente, de considerável usabilidade e baixo custo no processo de construção do sensor.
- O software usado para desenhar as bobinas nas placas se mostrou eficiente no desafio proposto e de fácil acesso no mercado. A configuração experimental utilizada na metodologia também se mostrou satisfatória.
- O sensor apresentou sensibilidade considerada positiva na detecção dos defeitos superficiais isolados de raios $d_1 = 0,1$ e $d_2 = 1$ mm em todas as frequências de excitação estudadas, tanto nas respostas numéricas quanto nas experimentais. Os resultados foram ainda mais satisfatórios nas frequências 6.0 e 6.5 MHz.
- Na detecção do defeito superficial isolado de raio $d_2 = 0.5$ mm os valores de impedância não se mostraram tão explícitos quanto o necessário para considerar o sensor eficiente em detectar tal descontinuidade. Tal discrepância pode ocorrer devido as dimensões do sensor em relação ao espaçamento dos pontos inspecionados, agravado no caso desse tamanho de descontinuidade especificamente, por ser a medida de largura exata das trilhas das bobinas utilizadas.
- Na frequência de 7MHz também não houveram indicativos significativos de sensibilidade as diferentes profundidades de defeitos. Foi observada uma tendência

similar no comportamento das curvas numéricas e experimentais para todas as frequências estudadas.

- No processo de diferenciação de defeitos de diferentes profundidades, se observa elevação dos valores absolutos de impedância na medida do aumento da frequência de trabalho, como esperado na literatura. Porém, o sensor se mostrou mais efetivo na diferenciação de defeitos na sua largura e não na sua profundidade.
- O sensor se mostrou eficiente ao ser usado para detectar a propagação de uma trinca em fadiga. A curva de variação de impedância acompanhou a curva de crescimento da trinca.

6. TRABALHOS FUTUROS

Esse estudo deixa como sugestão de trabalho a serem realizados:

- Verificação da influência da capacitância no sensor planar construído através de placas PCB;
- Comportamento do sensor na detecção de defeitos subsuperficiais;
- Estudo e adequação dos cálculos de profundidade de penetração em sensores compostos de bobinas planares;
- Estudo da indutância de bobinas planares;
- Aprofundamento do estudo da efetividade da técnica em detectar o crescimento de trincas;
- Adequação do sensor para uso em ambiente marinho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDILLA, L. “**Eddy current sensing using planar coils.**” M.S. Thesis, U. Malta, Msida MSD, Malta, 2009.

ABDILLA, L.et. al. **Eddy Current Sensing Using Planar Coils.** IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2012.

AKSELSSEN, O. M., GRONG, O., RORVIK, G. “**Embrittlement phenomena in the grain coarsened heat affected zone of low carbon micro alloyed steels.**” Scandinavian Journal Materials Science and Technology of Metallurgy, v. 19, p. 258 – 264, 1990.

ALI, K. B.; ABDALLA, A. N., RIFAI, D. AND FARAJ., M. A. “**Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization.**” IET Circuits, Devices & Systems, Vol. 11 ,No. 5, pp. 330 – 343 , Março 2017.

ALEXANDER, CHARLES K; SADIKU, MATTHEW N. “**Fundamentos de Circuitos Elétricos**”. 3ª Edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2003.

AL-QADEEB, F. E., “**Tubing Inspection Using Multiple NDT Techniques**”. 3ºMENDT, Manama. Acesso em 23 de março de 2017, disponível em <http://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/p18.pdf>

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **ASM Handbook Nondestructive Evaluation and Quality Control**, Volume 17, 9th edition, USA, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, ASNT E.T.B. “**Electromagnetic Testing Book**”, USA, 2006.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. “**Specification for Line Pipe – API Specification 5L**”. 42hd Edition. Washington, July, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 8859:2008, **Ensaio Não Destrutivos – Correntes Parasitas – terminologia** . Segunda edição, 2008.

BATISTA, V. P. “**Transformador de Bobinas Planas.**” Primeira edição, 2016.

BARBOZA, K. R. A. “**Avaliação da Técnica de Inspeção por Correntes Parasitas em Tubos de Permutador de Calor.**” Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

BLITZ, J. **Electrical and magnetic methods of Nondestructive Testing**. Editora Chapman and Hall, ISBN – 0-412-79150-1, second edition, 1997.

CHADY, T.; LOPATO, O. **“Eddy current differential transducer for nondestructive evaluation of aluminum plates.”** Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 27a and 27b, 2008.

CHEN, J. H. et al. **“Micro-fracture behavior induced by MA constituent (island martensite) in simulated welding heat affected zone of HT80 high strength low alloyed steel.”** Acta Metallurgica, v. 32, n 10, p. 1779-1788, 1984.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL, DCTA/IFI – Instituto de Fomento e Coordenação Industrial. **“Ensaio Não Destrutivos, Qualificação no Ensaio por Correntes Parasitas”**, nível 1, 2006a.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL, DCTA/IFI – Instituto de Fomento e Coordenação Industrial. **“Ensaio Não Destrutivos, Qualificação no Ensaio por Correntes Parasitas”**, nível 2, 2006b.

FAVA, J. **Design and construction of eddy current sensors with rectangular planar coils**. National Commission of Atomic Energy(CNEA), Buenos Aires – Argentina, 2004.

FAVA, J. et. al. **Multilayer Planar Rectangular Coils for Eddy Current Testing: Design Considerations**. NDT&E International, v. 42, 2009.

FITZGERALD, A. E. **“Maquinas Elétricas”** 6. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GRANDI, G. ET AL., **“Stray Capacitances of Single-Layer Solenoid Air Core Inductors”**, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 5, pp. 1162-1168, September/October 1999.

GARCIA-MARTIN, J.; GOMEZ-GIL, J. **“Comparative evaluation of coil and hall probes in hole detection and thickness measurement on aluminum plates using eddy current testing”**. Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 49, n.8, 2013.

GARCIA-MARTIN, J.; GOMEZ-GIL, J.; VAZQUEZ-SANCHEZ, E. **“Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing.”** Sensors, v.11, n.3, 2011.

GHANEI, S. ET AL., **“Eddy current nondestructive evaluation of dual phase steel.”** Materials and Design, v. 50, pp. 491-496, 2013.

HANSEN, J., “**The eddy current inspection method: Part 1. History and electrical theory**”, Insight Vol. 46 No 5 May 2004a.

HANSEN, J., “**The eddy current inspection method: Part 2. The impedance plane and probe**”, Insight Vol. 46 No6 June 2004b.

HANSEN, J., “**The eddy current inspection method: Part 3. Instrumentation and applications**”, Insight Vol 46 NO7 July 2004c.

HANSEN, J., “**The eddy current inspection method: Part. 4. Applications, practical testing and advanced concepts**”, Insight Vol 46 No8 August 2004d.

Hay W. H., **Engineering Electromagnetics**, 5th ed., McGraw–Hill New York, 1989.

HELLIER, C. **Handbook of nondestructive evaluation**. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 0070281211.

HELLIER, C. **Handbook of nondestructive evaluation**. 2nd. New York: McGraw-Hill, 2013. ISBN 9780071777148.

HERSHENSON, M; MOHAN, S; BOYD, S. P; and LEE, T. H. “**Optimization of inductor circuits via geometric programming.**” In Design Automation Conf., New Orleans, LA, Jun. 1999, pp. 994-998.

HILLENBRAND, H. G.; LIESSEM, A.; BIERMANN, K.; HECKMANN, C. J.; SCHWINN, V. “**Development of high strength material and pipe production technology for grade X120 line pipe.**” In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE IPC 2004, Calgary, Canada. Proceedings Calgary, Canada, 2004.

HOLE M. J. AND APPEL L. C., “**Stray Capacitance of a two-layer air-core inductor**”, IEE Proc.-Circuits Devices Syst., Vol. 152, No. 6, pp. 565-572, December 2005.

IDA, N.; PALANISAMY, R; LORD, W. “**Eddy-Current Probe Design Using Finite-Element Analysis.**” Materials Evaluation, v. 41, n. 12, 1983.

KHAN, S. H. et al. **Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction.** Computational Materials Science, v. 43, n.4, 2008.

LAY, Y, “**Eddy Current Displacement Sensor with LTCC Technology.**”, Tese de Doutorado, - Universidade de Friburgo em Brisgóvia, 2005.

LUGLI, A, et al. **“A new method of planar inductive sensor for industrial application.”** 39th ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE, Vienna, Austria 2013.

MATAREZI, J. C. **“Aplicação do Ensaio de Eddy Current Phased Array em Componentes Aeroespaciais.”** Desertion de Mestrado – Universidade de Taubaté, 2009.

MEEKER, D. C. **“An improved continuum skin and proximity effect model for hexagonally packed wires”** J. Comput. Appl. Math., vol. 236, no 18, pp. 4635 – 4644, 2012.

NIKNEJAD, A. M. AND MEER, R. G., **“Analysis design and optimization of spiral inductors and transformers for Si RF IC’s”** IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 33, pp. 1470 – 1481, Oct. 1998.

NUSSENZVEIG, H. MOYSÉS. **Curso de Física Básica: eletromagnetismo.** Vol. 3.1.ed. São Paulo: Editora Blucher, 1997.

PEREIRA, D. **“Avaliação do Método de Correntes Parasitas para Caracterização Microestrutural e Inspeção de Defeitos em Superligas à Base de Níquel.”** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

PEREIRA, P. **“Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas Visando a Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis.”** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

ROSADO, L. F. S. G. **“Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents.”** Dissertação de Mestrado - Universidade Técnica de Lisboa. 2009.

SHULL, P. – **Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques and Applications.** 1a edição. Altoona 2002.

SICILIANO, F., SILVEIRA, J. H. D., CARNEY, K. **“Aços para a industria do petroleo e gá resistentes ao serviço ácido: desafios e perspectivas.”** Revista TMMM, v. 8, n. 4, p. 273-278. Out-dez. 2011.

SKARLATOS, A. e THEODOULIDIS, T. **“Impedance Calculation of a Bobbin Coil in a Conductive Tube with Eccentric Walls.”**. IEEE Transactions os Magnetics, v. 46, 2010.

SOUZA, P. V.; RABELLO, J. M. A.; CARVALHO. A. A. **“Confiabilidade dos ensaios não destrutivos utilizando curvas POD”**. Revista ABENDI, Ano 6, no 32, São Paulo. Junho 2009.

STEGEMANN, D – **Fundamentos do Método de Correntes Parasitas**. 1ª edição. Junnich 1990.

STILL, J. R. **“North sea pipelines past, present and future”** Wlding & Meal Fabrication. Jun, 1996.

SUN K.; LU R. S AND ZHANG, Y. **“Simulation and design of eddy current sensor by using COMSOL Multiphysics.”** China Instrumentation, 2010.

THEODOULIDIS, T.; KRIEZIS, E. **“Series expansions in eddy current nondestructive evaluation models”**. Journal of Materials Processing Technology, v. 161, 2005.

UDPA, S. AND UDPA, L. **“Eddy current testing – Are we at the limits?”** Department of Electrical and Computer Engineering Michigan State University, East Lansing, MI USA, 2009.

ZHOU, H. T.; HOU, K.; PAN H. L.; CHEN J. J.; WANG Q. M. **“Study on the Optimization of Eddy Current Testing Coil and the Defect Detection Sensitivity.”** 14th International Conference on Pressure Vessel Technology, 2009.

YU, Y. T., Du P AND LIAO, Y. Q. **“Study on effect of coil shape and geometric parameters on performance of eddy current sensor.”** Chinese Journal of Scientific Instrument, 28(6): 1045-1050, 2007.

YUSA, N., & MIYA, K. **“Discussion on the equivalent conductivity and resistance of stress corrosion cracks in eddy currents simulation”**. NDT&E International, 2010.

WHEELER, H.A., **“Simple Inductance formulas for radio coils.”** in Proc. IRE , vol. 16, no. 10, pp. 1398-1400, 1998.