



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CAMPUS DE BOM JESUS DA LAPA - BA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE CORRENTES PARASITAS PULSADAS UTILIZANDO COMSOL MULTIPHYSICS

Orientador: Prof. Dr. Manoel Messias Silva Junior

Daniel Barbosa Bastos

**SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE CORRENTES
PARASITAS PULSADAS UTILIZANDO
COMSOL MULTIPHYSICS**

Monografia de Graduação submetida ao Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Oeste da Bahia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Instrumentação e Medidas
Linha de Pesquisa: Eletrônica

Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Manoel Messias Silva Junior
Orientador - UFOB

1º Membro:

Prof. Dr. Antônio José Sobrinho de Sousa
Examinador Interno - UFOB

2º Membro:

Prof.^a. Dra. Stefânia de Oliveira Silva
Examinador Interno - UFOB

Bom Jesus da Lapa, Bahia, 18 de julho de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

B327 Bastos, Daniel Barbosa
Simulação de ensaios de correntes parasitas pulsadas utilizando
Comsol Multiphysics. / Daniel Barbosa Bastos. – 2023.

51f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Messias Silva Júnior
TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade
Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom
Jesus da Lapa - BA, 2023.

1. Engenharia Elétrica. I. Silva Júnior, Manoel Messias. II.
Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro
Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.3

DEDICATÓRIA

À memória de Ana Rita da Conceição, sábia mulher analfabeta que incentivou minha educação, e me ensinou o significado da palavra caráter.

AGRADECIMENTOS

A busca por uma boa formação acadêmica é árdua e sofrida, no entanto torna-se mais “leve” com o apoio de pessoas próximas que desempenham papéis fundamentais ao longo dessa jornada. Agradeço aos meus pais, Edmilson Conceição Bastos e Maria Mata Barbosa Bastos, que sempre prestaram apoio emocional e financeiro incondicionalmente; meu amigo Cecilio Cardoso Belo Rodrigues, que compartilhou a convivência desde os primeiros dias de aula, e demais membros da EngBeer, festa universitária por nós instituída. Agradeço aos demais colegas da universidade, representados na pessoa de Sâmia Arcanja Ferreira e Paulo Claudio Valentim, presentes no dia a dia que compartilharam de muitas das frustrações, bem como das alegrias que a vida universitária proporciona. Agradeço ao professor Ricardo Reis que, além de sabedoria ímpar, mostrou-nos que o lado humano deve sempre prevalecer. Ao meu orientador, Manoel Messias Silva Junior que se empenhou na confecção deste trabalho desde o primeiro momento e não mediu esforços para que obtivéssemos êxito e ao demais professores da Universidade Federal do Oeste da Bahia, representados neste pelo professor Antônio José Sobrinho de Sousa. Minha gratidão aos demais amigos e familiares que direta ou indiretamente prestaram apoio e torceram para que eu obtivesse êxito nesta jornada.

RESUMO

Sabe-se que em vários setores industriais, máquinas e equipamentos estão constantemente sob o efeito de transformações químicas, como a corrosão, que promovem a deterioração deles, resultando no comprometimento das suas propriedades mecânicas e estruturais. Em casos extremos há a ocorrência de falhas na operação da planta, riscos humanos, bem como elevados custos de manutenção. Assim sendo, o escopo deste trabalho propõe a construção de um sistema para realizações de ensaios não destrutivos utilizando a técnica de correntes parasitas pulsadas, atrelado a um estudo de caso com abordagem qualitativa. O sistema compreende etapas de geração e aquisição dos sinais de inspeção. Para geração do sinal de excitação da sonda usou-se modulação por largura de pulsos, com frequência ajustável. O sistema de aquisição dos sinais é composto por uma bobina de recepção dos dados. Toda simulação do sistema projetado foi desenvolvida no ambiente do software COMSOL *Multiphysics*®, os resultados encontrados mostram que a técnica de inspeção utilizada possui grande potencial para ser usada nesta aplicação.

Palavras-Chave: Correntes Parasitas Pulsadas; Sistema Eletrônico; Corrosão; Ensaios não Destrutivos.

ABSTRACT

It is known that in several industrial sectors, machines and equipment are constantly under the effect of chemical transformations, such as corrosion, which promote their deterioration, resulting in the compromise of their mechanical and structural properties. In extreme cases there are failures in plant operation, human risks, as well as high maintenance costs. Therefore, the scope of this work proposes the construction of a system for carrying out non-destructive tests using the pulsed eddy current technique, linked to a case study with a qualitative approach. The system comprises stages of generation and acquisition of inspection signals. Pulse width modulation was used to generate the probe excitation signal, with adjustable frequency. The signal acquisition system is composed of a data reception coil. All simulation of the designed system was developed in the COMSOL Multiphysics® software environment, the results found show that the inspection technique used has great potential to be used in this application.

Keywords: Pulsed Eddy Current; Electronic System; Corrosion; Non-destructive testing.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DE	Defeito externo
DI	Defeito interno
EC	<i>Eddy Current</i> (Correntes Parasitas)
END	Ensaio Não Destrutivo
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i> (Método dos Elementos Finitos Magnéticos)
GB	<i>Gigabyte</i>
GMR	<i>Giant Magnetoresistance</i> (Magnetorresistência Gigante)
MB	<i>Megabyte</i>
MEF	Modelagem por Elementos Finitos
MHz	<i>Megahertz</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placas de Circuito Impresso)
PEC	<i>Pulsed Eddy Current</i> (Correntes Parasitas Pulsadas)
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Randômico)
SD	Sem defeito

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ_B	Fluxo magnético
ε	Força eletromotriz induzida
B	Módulo do vetor campo magnético
F	Força magnética
q	Carga elétrica
\mathbf{B}	Vetor campo magnético
\mathbf{v}	Velocidade
$d\mathbf{S}$	Elemento infinitesimal de área
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
μ_r	Permeabilidade relativa
I	Corrente elétrica
r	Raio de uma circunferência
π	Número irracional PI
H_p	Intensidade de campo magnético primário
H_s	Intensidade de campo magnético secundário
N_V	Número de espiras
L_I	Diâmetro total da bobina
W_C	Diâmetro do fio de cobre
W_S	Seção circular do fio de cobre
R_F	Resistência do fio de cobre
L_R	Altura total da bobina
R_1	Resistência total da bobina
L_1	Indutância total da bobina
L_X	<i>Lift-off</i>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama geral de implementação do trabalho.	15
Figura 2 - Surgimento de correntes de Foucault em placa condutora.....	22
Figura 3 - (a e b) Interação entre uma bobina com excitação senoidal e uma placa maciça de material condutor; (c) surgimento de campo magnético contrário ao campo aplicado.	23
Figura 4 - Linhas de força do campo magnético induzido.	24
Figura 5 - Detecção de falhas em materiais utilizando PEC.	25
Figura 6 - Principais sinais de excitação aplicados na técnica de correntes parasitas (a) monofrequência; (b) multiplexação do tempo em múltiplas frequências; (c) multiplexação da fequência em múltiplas frequências; (d) sinal pulsado.....	25
Figura 7 - A: enrolamento de uma sonda absoluta; B: modelos de sonda absouta.	26
Figura 8 - Inspeção utilizando uma sonda diferencial.	27
Figura 9 - Sonda reflexiva.	28
Figura 10 - Aplicação da técnica de PEC a (a) materiais espessos e (b) materiais finos.	29
Figura 11 - Profundidade de penetração do campo magnético.	30
Figura 12 - Representação gráfica do <i>lift-off</i>	31
Figura 13 - Ambiente de simulação do software COMSOL Multiphysics ®.	32
Figura 14 - Módulo analógico para recepção do sensor.	35
Figura 15 - Exemplificação da montagem final da sonda.....	35
Figura 16 - Esboço da resposta do sensor AAL002-02.	36
Figura 17 - Detalhamento dos defeitos.	38
Figura 18 - Corpo de prova.	38
Figura 19 - Sinal de excitação.	39
Figura 20 - Estudo de região Sem Defeito.	40
Figura 21 - Estudo região Sem Defeito (vista superior)	41
Figura 22 - Densidade de corrente.....	41
Figura 23 - Densidade de fluxo magnético.	42
Figura 24 - Estudo região com Defeito Externo.....	42
Figura 25 - Estudo região com Defeito Externo (vista superior).	43
Figura 26 - Densidade de corrente com ênfase na região com defeito.	43
Figura 27 - Densidade de fluxo magnético região com Defeito Externo.....	44
Figura 28 - Estudo região com Defeito Interno.....	45
Figura 29 - Estudo região com Defeito Interno (vista superior).....	45
Figura 30 - Densidade de corrente com ênfase na região com Defeito Interno.	46
Figura 31 - Densidade de fluxo magnético região com Defeito Interno.....	46
Figura 32 - Sinal de excitação 100 Hz.	47
Figura 33 - Sinal de excitação 10 kHz.	47
Figura 34 - Densidade de corrente 100 Hz.....	48
Figura 35 - Densidade de corrente 10 kHz.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de Ensaio Não Destrutivos.....	20
Tabela 2 - Especificações da bobina.....	34
Tabela 3 - Especificações de hardware.....	37
Tabela 4 - Características dos defeitos.....	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO GERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3. METODOLOGIA DA PESQUISA	15
1.4. ESTRUTURA OU ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	16
2. ESTADO DA ARTE	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1. TÉCNICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	19
3.1.1. Partículas magnéticas	20
3.1.2. Ultrassom	21
3.1.3. Radiografia (raio-x)	21
3.2. TESTES POR CORRENTES PARASITAS PULSADAS	22
3.3. TIPOS DE SONDAS	26
3.3.1. Sonda absoluta	26
3.3.2. Sonda diferencial	26
3.3.3. Sonda reflexiva	27
3.4. PROPRIEDADES QUE AFETAM O ENSAIO POR PEC	28
3.4.1. Condutividade elétrica	28
3.4.2. Permeabilidade magnética	28
3.4.3. Geometria	29
3.4.4. Profundidade de penetração e frequência de excitação	29
3.4.5. Distância do corpo de prova (<i>lift-off</i>)	31
3.5. SOFTWARE COMSOL	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1. ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO	33
4.1.1. Módulo de excitação	33
4.1.2. Módulo de aquisição de sinais	34
4.2. FERRAMENTAS A SEREM UTILIZADAS PARA DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	36
4.3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	38
5. RESULTADOS PARCIAIS	39
5.1. SEM DEFEITO	39
5.2. DEFEITO EXTERNO	42

5.3. DEFEITO INTERNO	44
5.4. PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO E FREQUÊNCIAS	46
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
7. REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

No caso dos equipamentos com material metálico revestido ou com isolamento térmico, a detecção de anomalias só é possível mediante realização de estudos não invasivos que reflitam informações acerca das condições do material. Os ensaios não destrutivos (END) consistem em técnicas de inspeção aplicadas em diferentes fases da produção de equipamentos e componentes com a finalidade de avaliá-los sem que haja alterações permanentes na sua forma ou propriedades físicas, garantindo assim a sua integridade. A avaliação não destrutiva por Correntes Parasitas Pulsadas (*Pulsed Eddy Current* - PEC) tem demonstrado alta eficiência na detecção de corrosão em materiais metálicos de diversos segmentos industriais (SANTANA, et al., 2018).

A técnica de ensaios por correntes parasitas (*Eddy Current* - EC) consiste na aplicação de um campo magnético à uma superfície metálica, promovendo um movimento ordenado dos elétrons livres. Corriqueiramente utiliza-se excitação senoidal contínua em mono frequência, no entanto, há aplicações que sugerem a utilização de um pulso como sinal de entrada. A técnica de PEC apresenta vantagens significativas em relação à técnica EC, visto que a primeira permite uma maior profundidade de penetração no material em que se atua, bem como uma maior riqueza de informação sobre os defeitos, atrelada a uma maior robustez contra interferências (SILVA, et al., 2015). Em relação aos custos de implementação, o END utilizando correntes parasitas pulsadas também supera o ensaio por multifrequência já que requer investimentos menores (SILVA, et al., 2014).

Em comparação com as técnicas de ultrassom e de partículas magnéticas, a técnica EC apresenta-se mais sensível a defeitos e descontinuidades nos materiais metálicos, o que representa uma maior facilidade na detecção de defeitos ou falhas. Além disso, não há necessidade de contato físico com a superfície do material. Em contrapartida, há limitações na capacidade de inspecionar materiais ferromagnéticos, tornando-se necessários tratamentos especiais para efeitos da permeabilidade (SILVA, 2022).

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema para ensaios não destrutivos utilizando a técnica de correntes parasitas pulsadas, projetado com o objetivo de identificar defeitos provocados por corrosão em estruturas industriais. A simulação deste sistema foi realizada no ambiente do *software* COMSOL.

1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de um sistema que visa, por meio da excitação de uma bobina, medir campos magnéticos decorrentes das correntes parasitas, com a finalidade de detectar falhas em materiais metálicos.

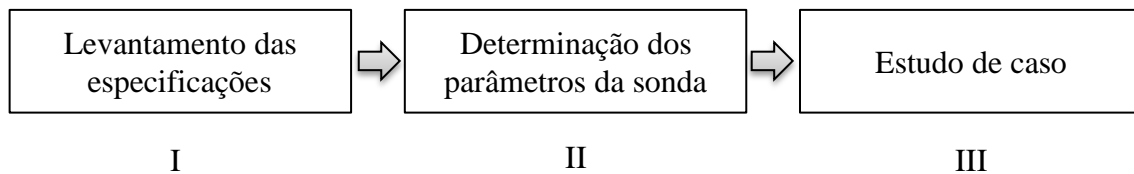
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simulação e projeto da sonda de inspeções por correntes parasitas;
- Simulação das detecções máximas e mínimas possíveis;
- Testes do sistema projetado;

1.3. METODOLOGIA DA PESQUISA

O desenvolvimento desse trabalho dar-se-á por meio da construção de um modelo teórico de um sistema de detecção de falhas em materiais condutores. Dessa forma, apresenta-se a estrutura utilizada no diagrama de blocos a seguir.

Figura 1 - Diagrama geral de implementação do trabalho.



Fonte: O Autor

- I. **Levantamento das especificações:** Nesta etapa, deve-se realizar o levantamento das especificações do problema, assim como os principais limites de detecção da sonda;
- II. **Determinação dos parâmetros da sonda:** Simulação de uma sonda indutiva para aplicações utilizando a técnica de correntes parasitas pulsadas;
- III. **Estudo de caso:** Testes devem ser aplicados em uma estrutura usualmente encontrada no setor industrial.

1.4. ESTRUTURA OU ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O trabalho em questão é subdividido em sete capítulos que têm como objetivo fornecer embasamento teórico com ênfase no entendimento da proposta de estudo, bem como justificar a metodologia utilizada. O capítulo 2 apresenta o referencial teórico do trabalho. O capítulo 3 traz de forma concisa os conceitos e leis da Física que regem os fenômenos característicos desse tipo de abordagem. Posteriormente, no capítulo 4, ocorre o detalhamento de todos os procedimentos realizados, seguido das considerações acerca dos resultados no capítulo 5. Por fim o capítulo 6 traz a consolidação do trabalho face ao que foi proposto nos objetivos e construído nas seções anteriores. O capítulo 7 apresenta as referências utilizadas e que forneceram embasamento teórico para a construção do trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

No artigo de Silva et al. (2014), é descrito o funcionamento de um sistema de inspeção por correntes parasitas pulsada que emprega sonda baseada em um sensor de estado sólido (GMR). São apresentados os resultados obtidos para corpos de provas em aço-carbono com revestimento acrílico e diferentes descontinuidades, simulando processo corrosivo sob isolamento.

O trabalho desenvolvido por Rosa (2015) propõe a construção de um protótipo para ensaios não destrutivos através da aplicação de correntes parasitas. O sistema proposto utiliza excitação de uma bobina com frequência programável e a detecção das correntes parasitas que surgem no material ensaiado será realizada por um sensor do tipo *Giant Magnetoresistive* (GMF).

O artigo “Simulação de Ensaio de Correntes Parasitas Pulsadas Utilizando Elementos Finitos”, escrito por Silva et al. (2015), fornece informações importantes acerca dos processos corrosivos sofridos por equipamentos e componentes metalúrgicos e como a inspeção por PEC é utilizada. Neste trabalho é mostrado como o *software* FEMM® (*Finite Element Method Magnetics*) foi utilizado para a detecção de defeitos por meio de um modelo de bobina que forneça um sinal próximo do utilizado experimentalmente.

Camacho, (2018), em sua dissertação de mestrado apresenta os parâmetros e características para o uso da técnica de correntes parasitas na inspeção de descontinuidades no aço API 5L X65 por meio 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 a partir do software de modelagem por elementos finitos (MEF) COMSOL *Multiphysics*® 5.2a no ambiente “2D *axisymmetric*”. 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 trabalho de Ulapane et al. (2018) propõe um método de quantificação da espessura do material ferromagnético baseado na taxa de decaimento da tensão da bobina do detector de corrente pulsada. Uma expressão para uma taxa de decaimento é derivada e uma relação entre uma taxa de decaimento e a espessura do material é estabelecida.

O trabalho realizado por Silva (2022) trata dos desafios na detecção de corrosão em materiais metálicos, caracterizado pela presença de revestimento ou isolamento

térmico e justifica a aplicação da técnica de inspeção não destrutiva por correntes parasitas pulsadas (*Pulsed Eddy Current* - PEC), haja vista que tal método permite a inspeção de peças metálicas com isolamento térmico, sem a necessidade de remover a camada ou interromper a operação do sistema. Afim de garantir a correta interpretação dos sinais obtidos desenvolveu-se um sistema de processamento eletrônico, para gerar, adquirir e processar sinais de PEC, resultando na identificação adequada da corrosão em tubos com isolamento térmico. O sistema inclui subsistemas analógicos (circuito de excitação dos sinais PEC e aquisição de dados) e digitais (processamento de sinal, extração de atributos e suporte à decisão).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção obtém-se o embasamento teórico necessário para compreender o funcionamento do sistema eletrônico descrito anteriormente.

3.1. TÉCNICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os Ensaio Não Destrutivos (ENDs) consistem em um conjunto de técnicas que têm como objetivo detectar descontinuidades, falhas ou inconformidades em materiais, sem que haja alterações permanentes acerca das suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, objetivando o controle de qualidade dos produtos, matérias primas ou meios produção. Sua grande vantagem é o não descarte do material ou estrutura sob teste (SGS, 2018).

As falhas mais comuns estão associadas a trincas, poros, inclusões de materiais no cordão de solda ou ainda alterações nas propriedades estruturais, que acarretam, possivelmente, na perda da resistência e posteriormente à falha do material. Subdividem-se em dois grupos: descontinuidades e defeitos (SGS, 2018).

Descontinuidades são imperfeições que não afetam o funcionamento de um determinado equipamento, como, por exemplo, vazios intrínsecos na estrutura do material, provenientes do processo de fundição, que se caracterizam como aceitáveis. Já os defeitos, por sua vez, compreendem descontinuidades que são críticas para a operação do equipamento, situando-se acima do critério de aceitação (CAMACHO, 2018).

Dentre os ENDs mais conhecidos e acessíveis, encontram-se: partículas magnéticas, ultrassom, radiografia (Raio-X), correntes parasitas, entre outros (SHRIFRAN; AKBAR; ISA, 2019). A Tabela 1 fornece um comparativo entre os métodos considerando algumas das principais variáveis.

Tabela 1 - Métodos de Ensaio Não Destrutivos.

Variáveis	Método de ensaio			
	Partículas magnéticas	Raio-X	Ultrassom	Correntes Parasitas
Tempo para os resultados	Pequeno atraso	Atraso	Imediato	Imediato
Efeito da geometria	Não é importante	Importante	Importante	Importante
Tipos de defeito	Externos	Maioria	Internos	Externos e internos
Sensibilidade	Baixa	Média	Alta	Alta
Habilidade do operador	Baixa	Alta	Alta	Média
Dependência da composição do material	Somente Ferromagnéticos	Alta	Baixa	Alta

Fonte: (SILVA, 2022)

3.1.1. Partículas magnéticas

Esse ensaio possibilita a detecção de falhas superficiais em observância ao comportamento do campo magnético dos materiais ferromagnéticos devido à configuração das partículas do mesmo (SGS, 2018). Ao magnetizar uma dada região do corpo de ensaio, a presença de descontinuidades condiciona a formação de um campo de fuga do fluxo magnético. Quando aplicadas as partículas magnéticas, é possível verificar uma aglomeração no local da fuga do campo, possibilitando a identificação do formato e da extensão da descontinuidade (SILVA, 2022).

3.1.2. Ultrassom

É caracterizado pela emissão de ondas com frequência da ordem de 500 kHz a 25 Mhz por um transdutor (SGS, 2018). Quando a emissão acontece, o aparelho inicia uma contagem de tempo; ao incidir na descontinuidade, ocorre uma reflexão da onda provocando o seu retorno ao transdutor. Um sinal elétrico é gerado e ao ser processado fornece informações sobre a localização da descontinuidade. Como principal vantagem apresenta uma boa sensibilidade na detecção de descontinuidades internas (SILVA, 2022).

Ao contrário do ensaio por radiografia, não há a necessidade de revelação de um filme para obter os resultados, que podem ser extraídos apenas pela análise dos dados presentes na tela do equipamento ou ainda registrados de forma permanente no caso de aparelhos mais modernos (SGS, 2018).

3.1.3. Radiografia (raio-x)

A técnica de Raio-X segue o mesmo princípio da radiografia clínica, entretanto com doses de radiação muitas vezes maiores. Por essa característica, requer um maior nível de segurança e habilidade de operação (SGS, 2018). Quando a radiação penetra no objeto sob análise, cada região irá absorver uma quantidade distinta de radiação ionizante, visto que há diferentes densidades, alterações na espessura do material ou desigualdades nas características de absorção provocadas por variações na composição do material. (ANDREUCCI, 2013). Tal diferença na absorção de radiação poderá ser detectada por um filme ou ainda mensurada por meio de detectores eletrônicos de radiação. Variações na quantidade de radiação absorvida sinalizam a possibilidade de existência de falhas internas ou defeitos no material (SILVA, 2022).

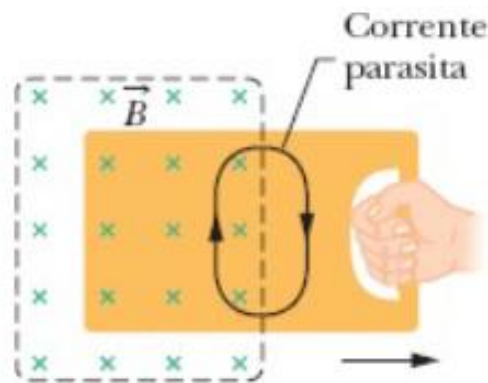
A relevância do ensaio por radiografia encontra-se na característica de detecção de equipamentos que exigem alta confiabilidade, tais como gasodutos transportando óleo à alta pressão, caldeiras de vapor, etc. (SGS, 2018).

3.2. TESTES POR CORRENTES PARASITAS PULSADAS

Quando uma placa de material metálico é condicionada a uma região de campo magnético, surge uma classe de correntes conhecidas como correntes de Foucault ou correntes parasitas. Ao contrário do movimento ordenado que ocorre em uma espira condutora perpendicular à uma variação de fluxo magnético, por exemplo, as correntes parasitas surgem em materiais metálicos compactos, devido a variação do campo magnético em uma dada região desse material (SOUZA; et al., 2019).

Considere uma placa condutora maciça imersa em uma região de campo magnético constante B , sob ação de uma força externa movendo-a para fora da região conforme visto na Figura 2.

Figura 2 - Surgimento de correntes de Foucault em placa condutora.



Fonte: (HALLIDAY; RESNICK, 2016)

Observa-se o surgimento de uma corrente induzida na superfície do material. De acordo com a Lei de Faraday-Lenz, quando há uma variação do fluxo magnético no tempo, surge neste condutor uma corrente. Esta, por sua vez, dá origem a um campo magnético cujo fluxo opõe-se à variação que lhe deu origem (HALLIDAY; RESNICK, 2016). Sabe-se que:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

onde \mathbf{F} é a força magnética, em newtons (N), que se opõe ao movimento forçado da placa.

A Lei de Ampère nos fornece que:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 I \quad (2.1)$$

$$B \oint dS = \mu_0 I \quad (2.2)$$

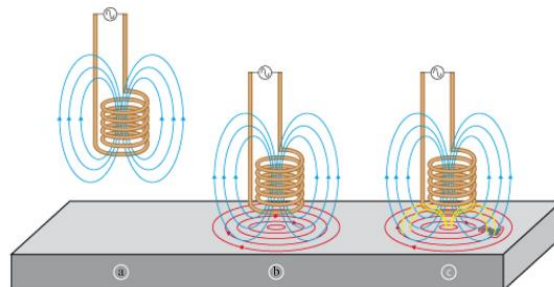
Para a integral de superfície de uma circunferência, $dS=2\pi r$. Assim,

$$B(2\pi r) = \mu_0 I \quad (3.1)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3.2)$$

Quando uma corrente alternada é utilizada na excitação de uma bobina, o campo magnético associado será por consequência alternado. As linhas magnéticas de fluxo serão concentradas no centro da bobina, denominado campo primário (H_p). A Figura 3 apresenta a interação entre o campo magnético alternado gerado por uma bobina e uma placa maciça de material condutor. O surgimento das correntes parasitas é justificado pela Lei de Faraday. Analisando o padrão dessas correntes geradas é possível efetuar a detecção de deformidades no objeto (CAMERINI, 2012).

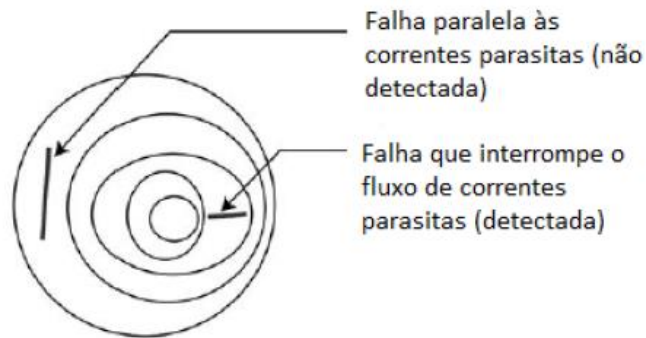
Figura 3 - (a e b) Interação entre uma bobina com excitação senoidal e uma placa maciça de material condutor; (c) surgimento de campo magnético contrário ao campo aplicado.



Fonte: (PEREIRA, 2007)

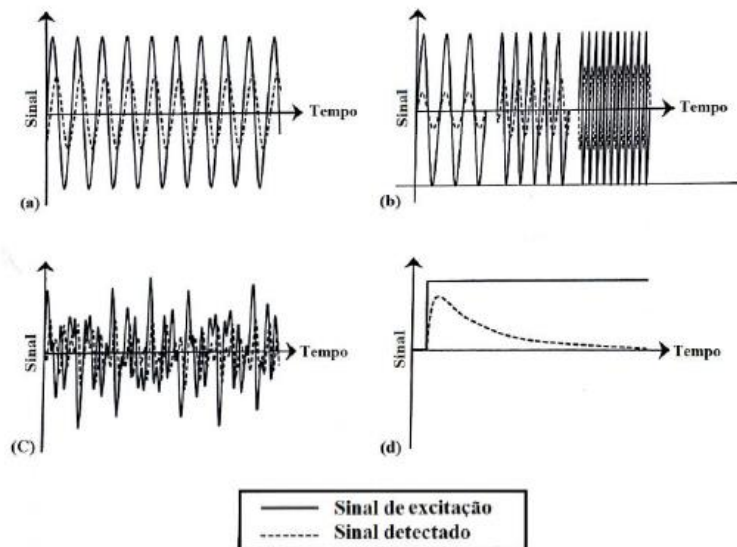
- maior riqueza de informação sobre os defeitos;
- maior robustez contra interferência;
- instrumentação com menos custos.

Figura 5 - Detecção de falhas em materiais utilizando PEC.



Fonte: (HANSEN, 2004)

Figura 6 - Principais sinais de excitação aplicados na técnica de correntes parasitas (a) monofrequência; (b) multiplexação do tempo em múltiplas frequências; (c) multiplexação da fequência em múltiplas frequências; (d) sinal pulsado.



Fonte: (SILVA; et al., 2015)

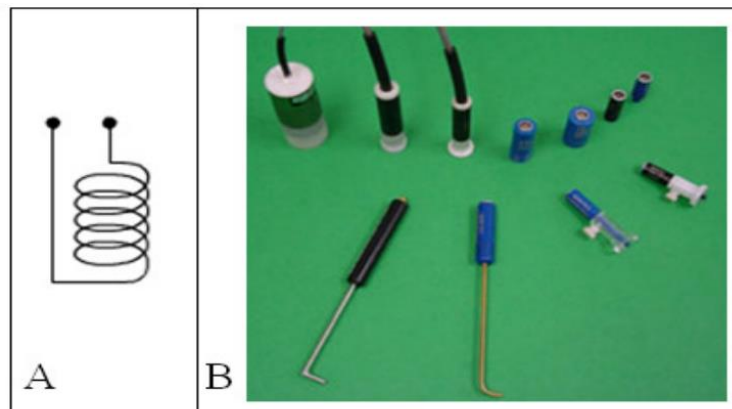
3.3. TIPOS DE SONDAS

Uma das principais vantagens no ensaio por correntes parasitas é a diversidade de tamanhos e formatos de sondas projetadas, que promovem uma versatilidade de aplicações de acordo com o seu formato (CAMERINI, 2012). A classificação destas varia de acordo com o método de conexão da(s) bobina(s).

3.3.1. Sonda absoluta

Geralmente compostas por uma única bobina, as sondas absolutas (Figura 7) são utilizadas para gerar as correntes parasitas e, ao mesmo tempo, captar as alterações no campo magnético em resposta à excitação. Variações na impedância da sonda são fonte de muitas informações acerca do material ensaiado. São frequentemente usadas na detecção de falhas, medidas de condutividade dos materiais, medidas de *lift-off* e espessura (CAMERINI, 2012).

Figura 7 - A: enrolamento de uma sonda absoluta; B: modelos de sonda absoluta.



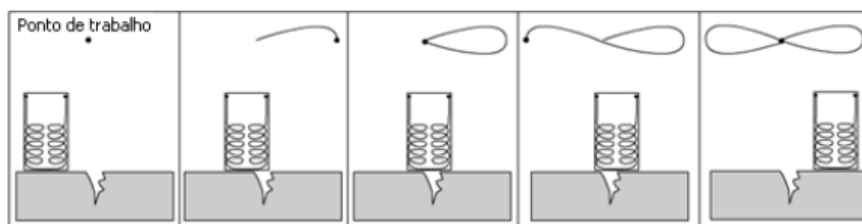
Fonte: (BUCKLEY, 1998)

3.3.2. Sonda diferencial

Proveniente do arranjo diferencial entre duas bobinas com a mesma quantidade de espiras, entretanto com polaridade invertida, a sonda diferencial é aplicada na detecção

de pequenos defeitos devido à sua grande sensibilidade. O campo gerado por ambas as bobinas, quando em condições normais (sem defeito) é igual em módulo, mas possuem sentidos opostos e sua resposta é “zero”. Quando uma das bobinas se encontra em uma região defeituosa, ocorre uma alteração na impedância desta, o que acarreta a produção de um sinal diferente de “zero”. Em relação a grandes defeitos, onde o comprimento do defeito é maior que a distância entre as bobinas, o sinal resultante será “zero”, visto que as duas bobinas apresentam a mesma resposta ao defeito. Assim sendo, apenas as bordas do defeito serão detectadas, o que gera uma falsa impressão de dois pequenos defeitos (CAMERINI, 2012). A Figura 8 apresenta a inspeção de um elemento utilizando uma sonda diferencial.

Figura 8 - Inspeção utilizando uma sonda diferencial.

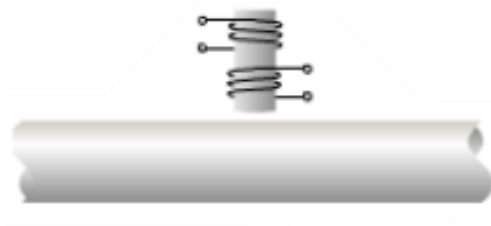


Fonte: (CAMERINI, 2012)

3.3.3. Sonda reflexiva

Similar ao arranjo anterior, as sondas reflexivas (Figura 9) também possuem dois enrolamentos, entretanto com funções distintas. Um dos enrolamentos tem como função promover a formação das correntes parasitas no material; o segundo enrolamento analisa as alterações provenientes de possíveis falhas.

Figura 9 - Sonda reflexiva.



Fonte: adaptada de (CAMERINI, 2012)

3.4. PROPRIEDADES QUE AFETAM O ENSAIO POR PEC

Existem alguns fatores não relacionados às características do defeito, mas às propriedades do material que condicionam a aplicação da técnica de PEC ao êxito. Assim sendo, é necessário garantir a constância destes, de modo que não haja influência desses fatores sobre os resultados (ROSA, 2015).

3.4.1. Condutividade elétrica

Caracterizada como uma propriedade intrínseca do material, a condutividade elétrica possui um efeito significativo sobre como as correntes parasitas fluem no mesmo. Quanto maior a condutividade elétrica do material, maior será o fluxo de correntes parasitas em sua superfície. Modificações na composição, tratamentos térmicos, endurecimento, encruamento, entre outros fatores podem afetar a condutividade do material (BUCKLEY, 1998).

3.4.2. Permeabilidade magnética

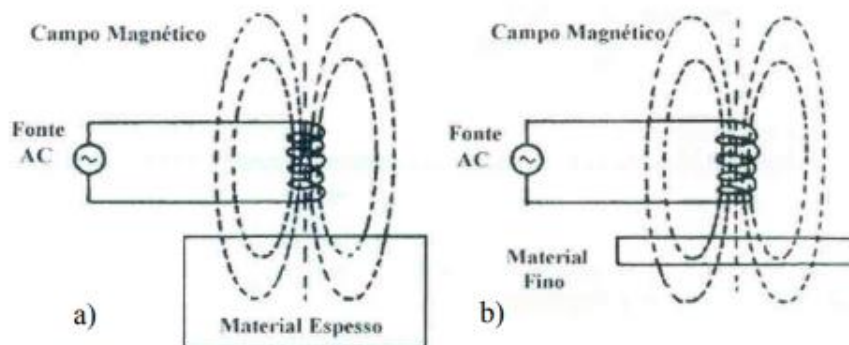
A permeabilidade magnética quantifica a capacidade de um material ser magnetizado. Para materiais não magnéticos a permeabilidade magnética é a mesma do vácuo (μ_r), assumindo, portanto, a permeabilidade relativa (μ_r) valor 1. Suponha que haja uma variação da intensidade do campo magnético indutor em diversos locais de um dado material, mesmo que levemente. Tais variações apresentam um grande efeito sobre a

impedância da bobina, o que, muitas vezes, ofusca quaisquer outras variações provocadas por mudanças na condutividade e geometria (PEREIRA, 2007).

3.4.3. Geometria

Aspectos tais como curvatura, bordas, sulcos, etc. alteram a resposta às PEC. Não é possível obter conclusões acerca das características internas de materiais cuja espessura é maior do que o alcance do campo magnético gerado, como é visto na Figura 10(a). De forma similar, estudos em materiais cuja espessura é menor do que o alcance do campo magnético gerado apresentam um aumento irreal da condutividade do material ensaiado, conforme Figura 10(b) (PEREIRA, 2007).

Figura 10 - Aplicação da técnica de PEC a (a) materiais espessos e (b) materiais finos.



Fonte: (PEREIRA, 2007)

3.4.4. Profundidade de penetração e frequência de excitação

O método de inspeção convencional (EC) utiliza em sua excitação um sinal senoidal de frequência fixa, o que proporciona uma banda de frequência muito estreita. Por outro lado, no ensaio por correntes parasitas pulsadas utiliza-se excitação pulsada (pulso, onda quadrada ou triangular) (SHRIFAN; AKBAR; ISA, 2019). A aproximação de um campo constante no pulso proporciona magnetização de materiais ferromagnéticos, melhorando as respostas do sensor de aquisição de dados (ASNT, 2004). Ocorre, portanto, uma simplificação na detecção de defeitos, visto que um único pulso é

constituído pela soma de senoides de frequências e amplitudes diferentes, o que permite a identificação de falhas em diversas profundidades.

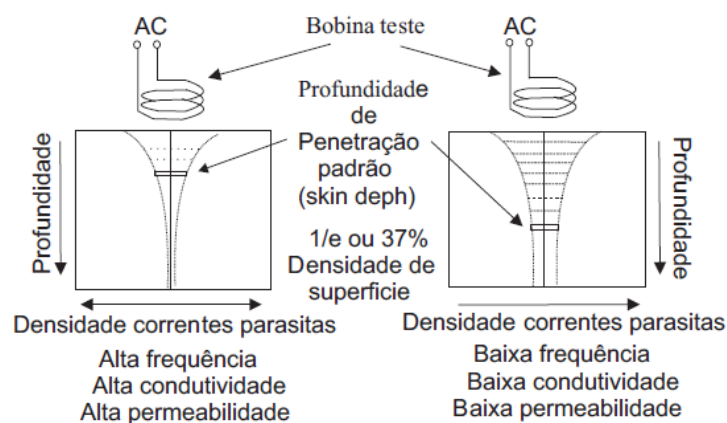
À medida que a profundidade do material aumenta, ocorre um decréscimo no campo magnético penetrante. Dessa forma, há uma redução na densidade de correntes parasitas que fluem. O decaimento exponencial da densidade de correntes parasitas com a profundidade é conhecido como “*skin depth*”. A profundidade na qual a densidade de correntes parasitas é reduzida a 1/e, ou cerca de 37% da densidade da superfície, é chamada de profundidade padrão de penetração (BUCKLEY, 1998), como mostra a Figura 11.

A profundidade de penetração diminui com o aumento da frequência e o crescimento da condutividade e permeabilidade magnética (NAFIAH; SOPHIAN, 2017). Seu valor é obtido a partir da seguinte expressão:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu f \sigma \pi}} \quad (4)$$

onde μ_r é a permeabilidade magnética [Tm/A], f é a frequência de excitação da sonda [Hz], e σ é a condutividade elétrica do material [S/m].

Figura 11 - Profundidade de penetração do campo magnético.

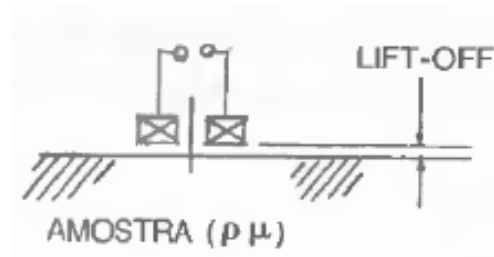


Fonte: (SILVA, M. M., 2022)

3.4.5. Distância do corpo de prova (*lift-off*)

O espaçamento existente entre a sonda e o corpo de prova é denominado *lift-off* e exerce um papel determinante na inspeção. Na maior parte das vezes o *lift-off* (Figura 12) exerce interferências negativas, visto que promove atenuações no sinal de inspeção e mascara pequenos defeitos, especialmente em regiões em que a superfície é irregular.

Figura 12 - Representação gráfica do *lift-off*.

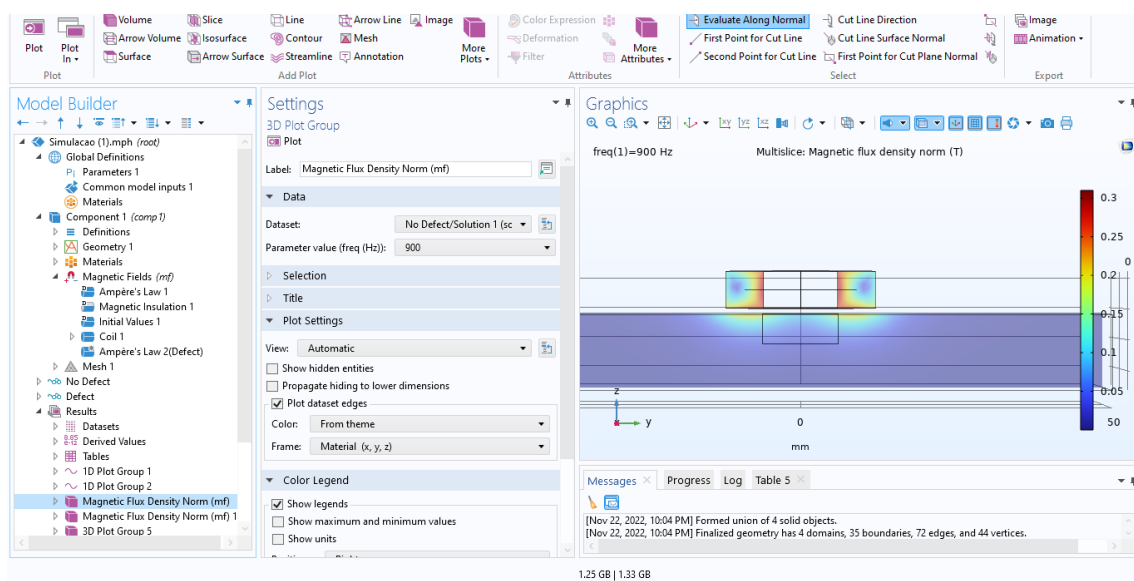


Fonte: (HENRIQUES; CARNEVAL, 1990)

3.5. SOFTWARE COMSOL

Para efeito de simulação, será utilizado o módulo AC/DC do *software* COMSOL *Multiphysics*® que oferece, dentre outras possibilidades, o estudo das propriedades magnéticas e fenômenos físicos associados (Figura 13). Neste tipo de inspeção, a simulação fornece conclusões qualitativas a respeito dos principais parâmetros que compõem uma sonda de correntes parasitas, conforme mencionado anteriormente (geometria do núcleo e da bobina, densidade de corrente aplicada, frequência de operação, etc.). A partir desta avaliação, deseja-se obter os parâmetros que oferecem melhor desempenho do protótipo sugerido.

Figura 13 - Ambiente de simulação do software COMSOL Multiphysics®.



Fonte: O Autor

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A qualidade de serviços prestados, bem como a vida útil dos equipamentos utilizados sofrem influência de processos abrasivos, tais como a corrosão (SILVA, 2022). A presente proposta tem por finalidade desenvolver uma sonda indutiva para aplicações em ensaios não destrutivos utilizando a técnica de PEC e, dessa forma, promover o controle de tais processos.

Serão investigados defeitos provenientes da corrosão em um bloco de aço carbono 1020. Propõe-se que haja a detecção de defeitos provocados por corrosão, essas falhas foram simuladas por meio do processo de usinagem do corpo de provas no ambiente de simulação utilizado. Em caso de uma região sem defeito (SD), a técnica também auxilia na certificação.

4.1. ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO

O sensor projetado será ser capaz de promover a geração de sinais de inspeção, ao passo que atesta, mediante detecção dos sinais de resposta, a qualidade do material de estudo.

4.1.1. Módulo de excitação

Inicialmente, um campo magnético oscilatório é gerado pelo módulo de excitação, composto por uma bobina de fio condutor. Os parâmetros iniciais da bobina são listados na

Tabela 2. Grandezas tais como a resistência do fio de cobre - R_F , resistência (R_1) e indutância (L_1) total da bobina serão obtidos posteriormente.

Tabela 2 - Especificações da bobina.

Número de espiras - N_V	450
Diâmetro total da bobina - L_I [mm]	25
Diâmetro do fio de cobre - W_C [mm]	0,7230
Seção circular do fio de cobre - W_S [mm ²]	0,41
Altura total da bobina - L_R [mm]	12,50
<i>Lift-off</i> - L_X [mm]	$\cong 0$

Fonte: O Autor

A sensibilidade do dispositivo encontra-se atrelada a características tais como o diâmetro, tamanho e formato da sonda, além da frequência de excitação. Estes parâmetros influenciam no fluxo magnético gerado e, conseqüentemente, na profundidade de penetração no material, podendo ser ajustados para a obtenção de melhores resultados. Alterações na espessura do corpo de prova devem ser tratadas através do ajuste de frequência de excitação do sinal PEC. Adicionalmente, ressalta-se a necessidade do tratamento das informações por meio de um processamento adequado do sinal com o objetivo de minimizar influências de parâmetros indesejados (SILVA, 2022).

Em uma implementação física, o fio condutor deverá ser envolto em um núcleo de material polimérico de forma que não haja interferências no processo. Para geração do sinal de excitação da sonda será usada a modulação por largura de pulsos, com tensão de - 4 a 4 Volts (8 Volts pico a pico), frequência de 1 kHz e *duty cycle*¹ de 40%.

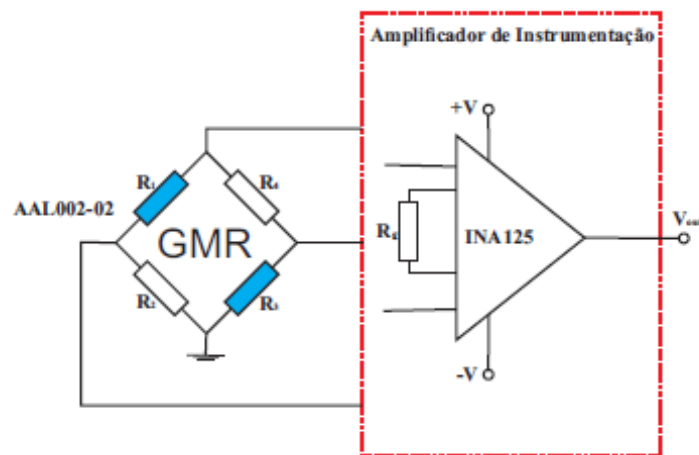
4.1.2. Módulo de aquisição de sinais

¹ *Duty cycle* (ciclo de trabalho) - é a proporção entre o tempo que um dado circuito permanece ligado e desligado.

A detecção da resposta dos sinais de PEC será realizada por dois sensores *Giant Magnetoresistance* (GMR). A saída do sensor será conectada a um circuito amplificador de instrumentação (INA125) e, posteriormente, submetida ao circuito de condicionamento de sinais. Neste circuito, um filtro *anti-aliasing*² será aplicado com o objetivo de remover os ruídos de alta frequência, limitando, portanto, a banda do sinal.

A Figura 14 apresenta o circuito interno do dispositivo AAL002-02 que possui quatro sensores GMR encadeados em uma configuração de ponte de *Wheatstone*, conectado ao amplificador de instrumentação (INA125). Tal elemento será posicionado no eixo central da bobina (Figura 15), visando a detecção de campos magnéticos perpendiculares à base do sensor (ENNEN; et al., 2016). As variações detectadas possuem resposta semelhante para os campos em ambas as direções (positiva e negativa). Adicionalmente, o sensor possui pequenas dimensões, alta sensibilidade em uma larga faixa de frequência, baixos níveis de ruídos e região linear de operação variando de -1 a 1 mT.

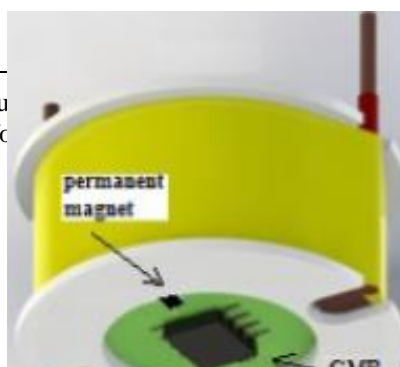
Figura 14 - Módulo analógico para recepção do sensor.



Fonte: (SILVA, 2022)

Figura 15 - Exemplificação da montagem final da sonda.

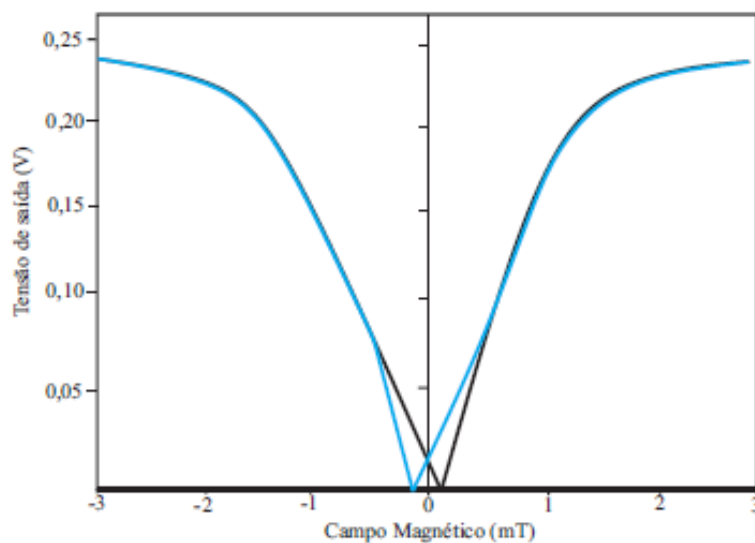
² Filtro *anti-aliasing* - é um filtro utilizado para restringir a largura de banda de um sinal, de forma que a largura de interesse seja satisfeito.



nal com o objetivo de restringir a largura de banda de um sinal, de forma que a largura de interesse seja satisfeito.

Este trabalho utiliza sensores GMR que apresentam um comportamento simétrico. A saída é sensível para ambas as polaridades do campo magnético, conforme visto na Figura 16.

Figura 16 - Esboço da resposta do sensor AAL002-02.



4.2. FERRAMENTAS A SEREM UTILIZADAS PARA DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Os parâmetros da sonda devem ser estimados mediante simulações realizadas no software de elementos finitos *COMSOL Multiphysics*®, que, conforme mencionado anteriormente na seção 3.5, auxilia no estudo das propriedades magnéticas dos materiais. No quesito *hardware*, será utilizado um desktop com as seguintes configurações:

Tabela 3 - Especificações de *hardware*.

Componente	Especificação
Sistema operacional	<i>Microsoft Windows 10 ®</i>
Processador	<i>Intel64 Family 6 Model 58 Stepping 9 GenuineIntel ~ 2400 MHz</i>
RAM (Memória de acesso randômico)	12 GB
Velocidade de leitura	Até 535 MB/s
Velocidade de gravação	Até 445 MB/s

Fonte: O Autor

O processo de simulação no COMSOL *Multiphysics* é descrito a seguir de forma generalista, mencionando os módulos físicos que o compõe, bem como o estudo utilizado. Em uma posterior discussão, apresenta-se o passo a passo para obtenção dos resultados.

1. Utiliza-se o módulo AC/DC, em modo 3D, e, seleciona-se as propriedades elétricas e magnéticas a serem utilizadas. Utiliza-se as seguintes físicas: *Magnetic Fields* (Campos magnéticos) e *Electrical Circuit* (Circuito elétrico);
2. Posteriormente, realiza-se a escolha do estudo utilizado: *Time Dependent* (Dependente do Tempo);
3. No ambiente de simulação, constrói-se as geometrias pertinentes levando em consideração os aspectos físicos e estruturais do projeto: bobina (subdomínio 6), corpo de prova (subdomínio 2) e região limite (subdomínio 1);
4. Adiciona-se os materiais e seleciona-se os respectivos subdomínios;
5. Define-se as propriedades elétricas e magnéticas atreladas a cada subdomínio;

6. Utiliza-se um circuito elétrico cujo objetivo é realizar a excitação da bobina com um sinal pulsado, conforme as especificações descritas no escopo deste projeto;
7. Confecciona-se a malha de elementos finitos, sendo para este trabalho utilizado elemento tetraédrico com quatro nós.

A técnica PEC foi aplicada a um bloco de aço carbono 1020 sem nenhum tipo de revestimento, a fim de identificar três regiões distintas: Sem Defeito (SD), Defeito Interno (DI) e Defeito Externo (DE). A Figura 17 mostra a seção transversal do corpo de prova com suas regiões de estudo e a

Tabela 4 resume as características do defeito.

Figura 17 - Detalhamento dos defeitos.

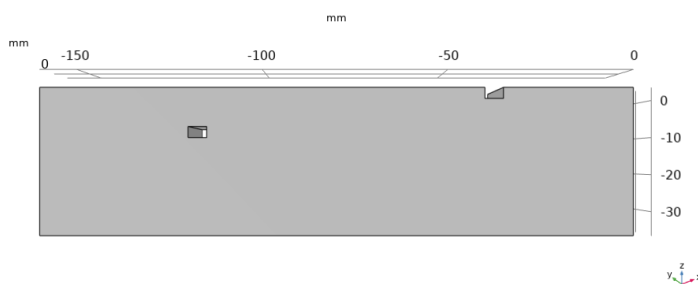


Figura 18 - Corpo de prova.

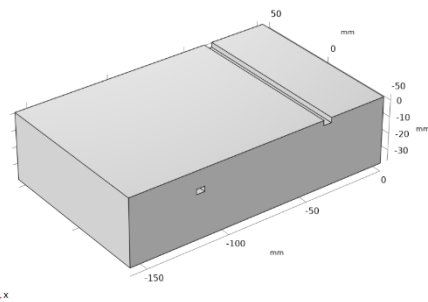


Tabela 4 - Características dos defeitos.



Tipo de defeito	Largura (mm)	Altura (mm)	Posição eixo z (mm)
Externo	5	3	0
Interno	5	3	16,55

4.3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliação dos resultados serão considerados os seguintes aspectos:

1. Durante a simulação diferentes distâncias entre a sonda e o defeito foram testadas, a fim de determinar o limite máximo do isolamento térmico de revestimento do material ou profundidade de detecção de falhas;

2. Variações na frequência foram inseridas no decorrer dos testes para verificar qual a capacidade de penetração das correntes parasitas no material;

3. Após o processo de simulação, é realizada uma análise dos parâmetros encontrados para construção da sonda, selecionando aqueles que convergirem para as especificações desta proposta.

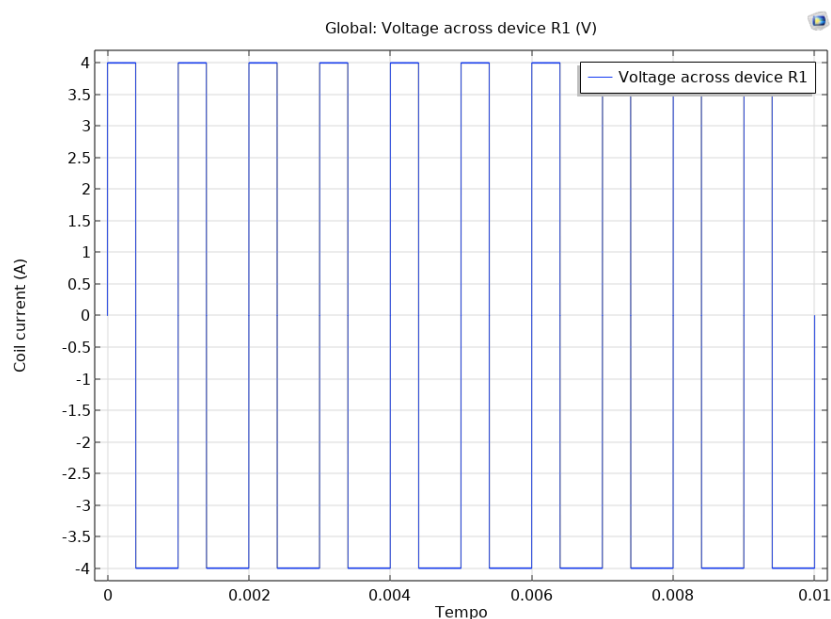
5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados encontrados durante o desenvolvimento deste trabalho. Neste caso, foram projetados, em um ambiente virtual, os circuitos de excitação do sinal PEC e de recepção dos sinais, além de testes iniciais de ensaios utilizando a técnica de Correntes Parasitas Pulsadas, para uma primeira estimativa do sistema projetado.

5.1. SEM DEFEITO

O processo de obtenção dos resultados dá-se início com a excitação da sonda utilizando o sinal proveniente de uma fonte de alimentação contida no modo *Electrical Circuit* (Figura 19). As especificações são as mesmas apresentadas na seção 4.1.1.

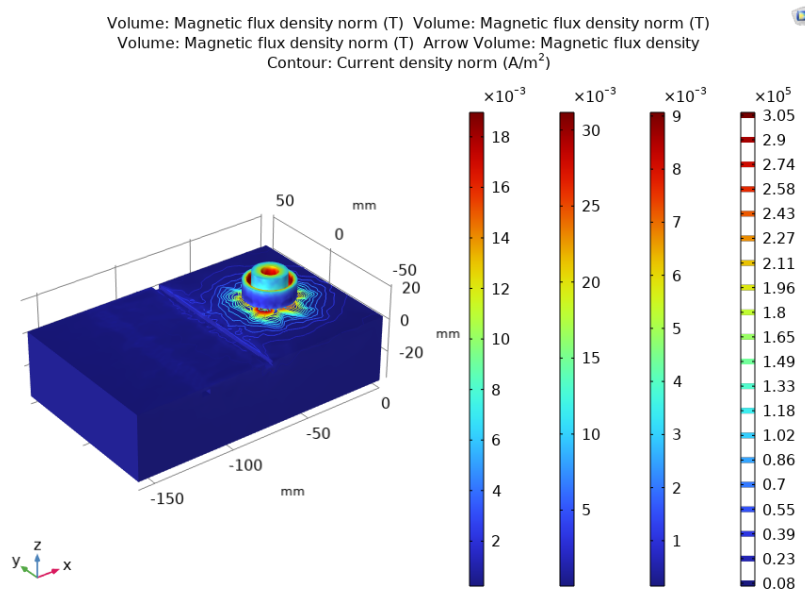
Figura 19 - Sinal de excitação.



Posteriormente utiliza-se um estudo dependente do tempo com duração de um período e incrementos de 1 e^{-4} . O fluxo concatenado da bobina é da ordem de 10^{-3} Wb e a resistência do enrolamento é de $1.7147 \text{ } \Omega$. Na seção resultados, define-se os *Datasets* (regiões limite de estudo) a serem observados. Utilizando o comando 3D Plot Group,

realiza-se as configurações convenientes para obtenção dos dados mostrados na Figura 20.

Figura 20 - Estudo de região Sem Defeito.



Por tratar-se de uma região sem defeitos é perceptível uma distribuição uniforme radial das correntes parasitas pelo material, tendo o seu curso alterado nas proximidades da falha que se encontra fora do raio de detecção. A Figura 22 destaca a distribuição das correntes no corpo de prova analisando as linhas de contorno. Na Figura 23, as setas de volume (*arrow volume*) constroem uma representação adicional do fluxo magnético.

Figura 21 - Estudo região Sem Defeito (vista superior)

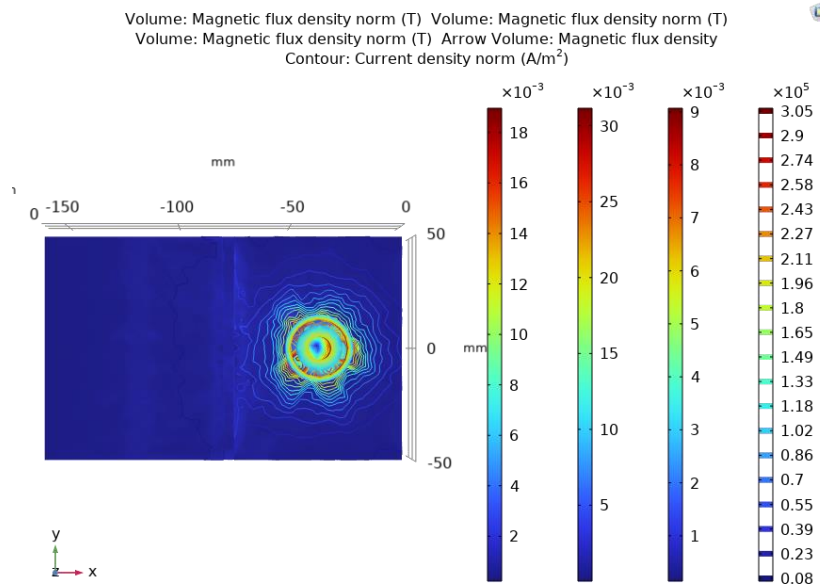


Figura 22 - Densidade de corrente.

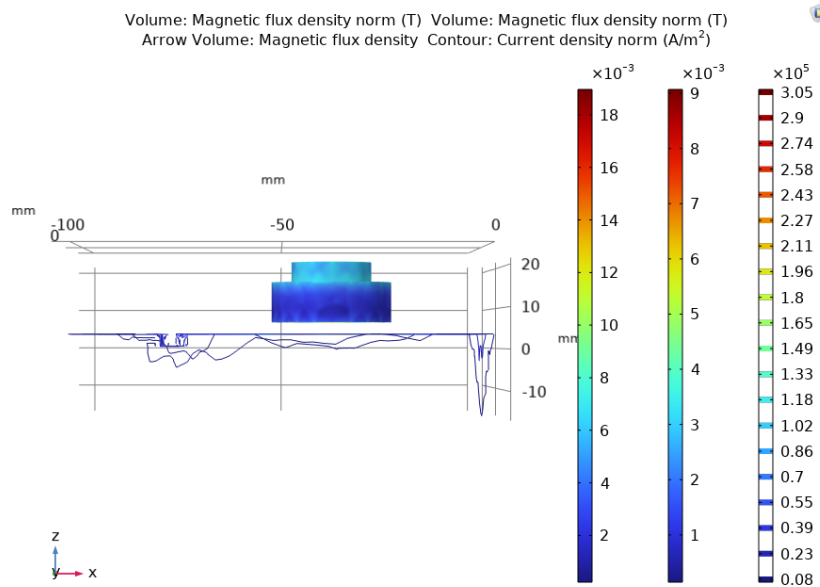
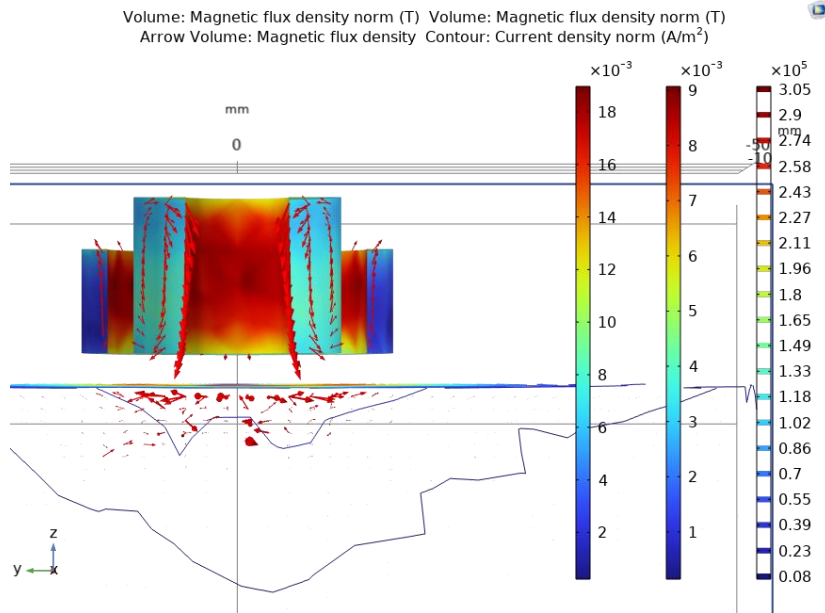


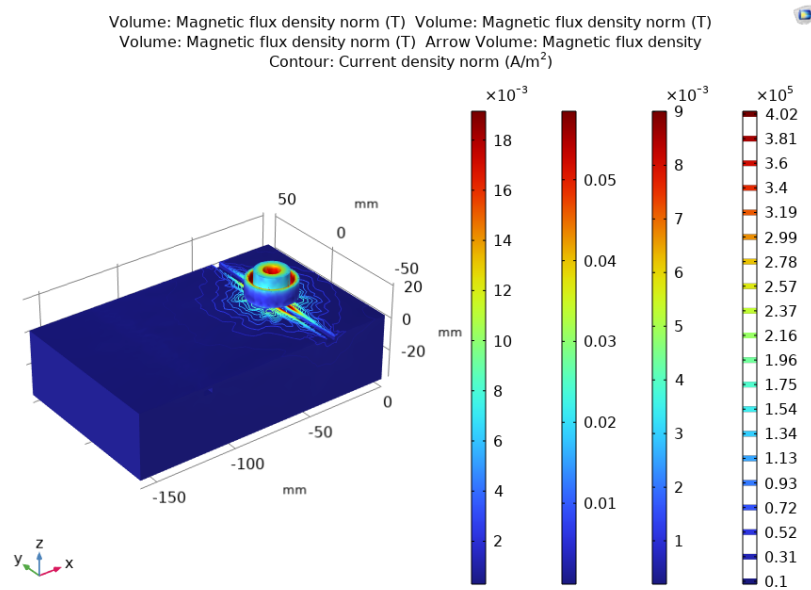
Figura 23 - Densidade de fluxo magnético.



5.2. DEFEITO EXTERNO

Utilizando o mesmo sinal de excitação da Figura 19, move-se a sonda até uma região de defeito externo a ser detectado. A Figura 24 apresenta uma perspectiva geral da distribuição das correntes parasitas ao longo do corpo de prova.

Figura 24 - Estudo região com Defeito Externo.



Ao contrário do apresentado na Figura 21, onde havia uma distribuição radial das correntes parasitas pulsadas, a Figura 25 retrata a interrupção destas, ocasionada pela existência da falha no material, conforme apresentado na Figura 5 e discutido da seção 3.2. As linhas de contorno da Figura 26 mostram a distribuição das correntes ao longo e em torno da falha detectada.

Figura 25 - Estudo região com Defeito Externo (vista superior).

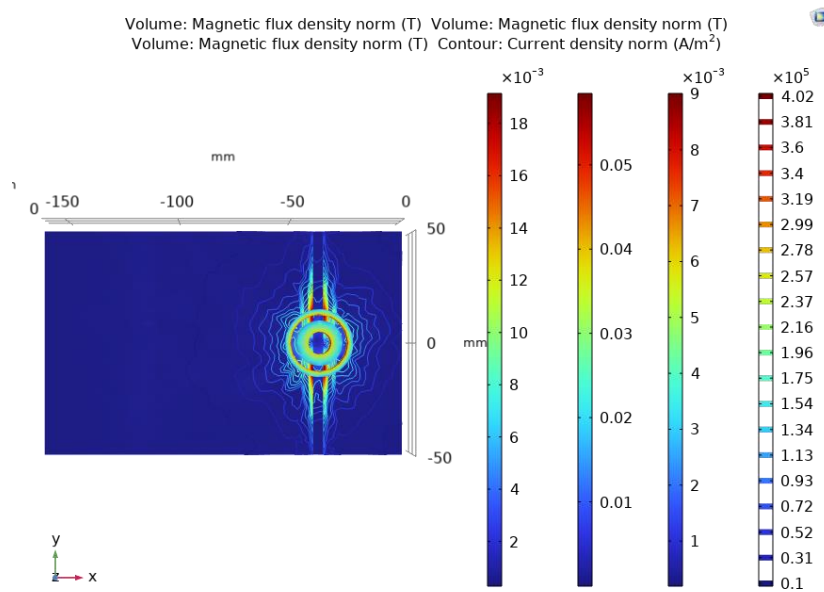
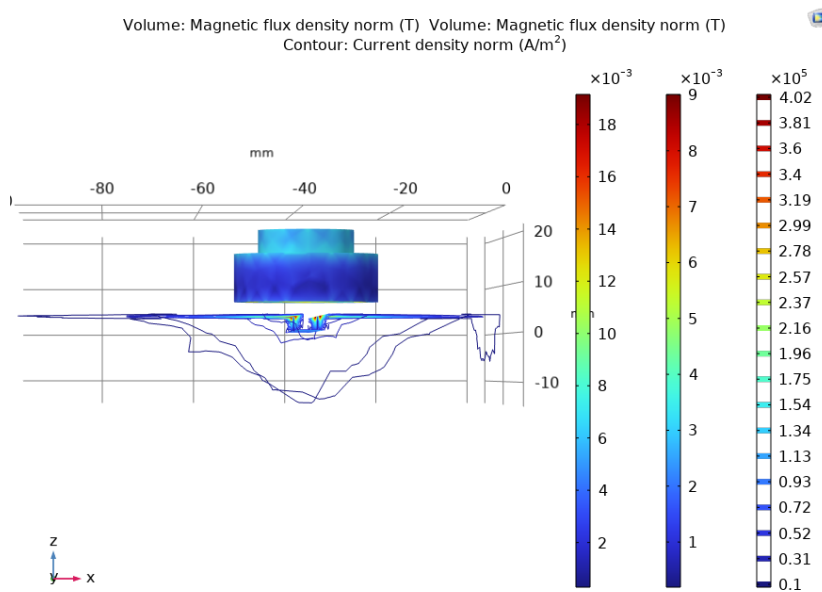
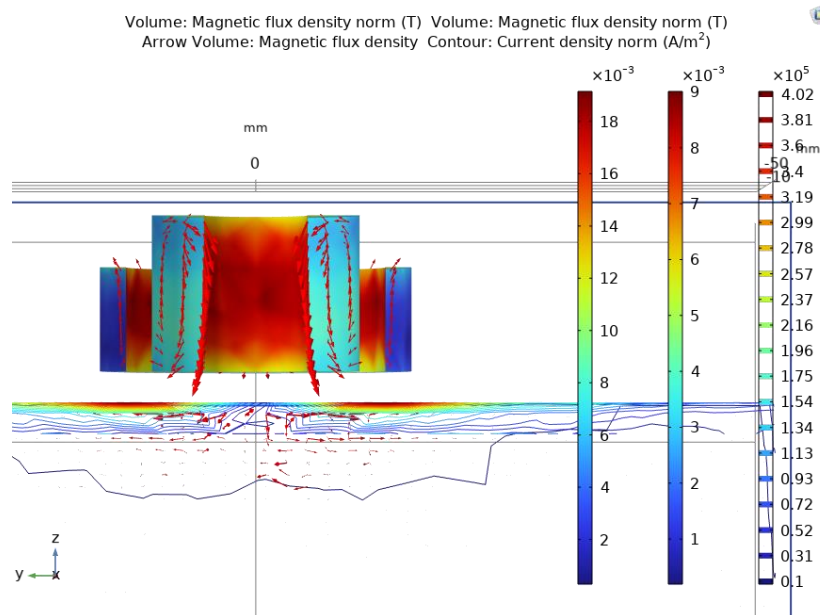


Figura 26 - Densidade de corrente com ênfase na região com defeito.



A distribuição do fluxo magnético que ora uniforme e radial, agora apresenta-se também paralelo à falha (Figura 27), o que fundamenta, conforme discutido na seção 3.2, o surgimento das correntes de Foucault (correntes induzidas).

Figura 27 - Densidade de fluxo magnético região com Defeito Externo.



5.3. DEFEITO INTERNO

Ao longo dos testes, foram utilizadas diferentes distâncias entre a sonda de inspeção e os defeitos internos, com o objetivo de encontrar uma distância máxima de detecção. Observou-se que, ao inserir a falha em uma distância superior a 16,55 mm o software exigia um poder de processamento e um tempo de simulação extremamente elevados, inviabilizando os estudos acerca do tema. Esta seção apresenta os resultados obtidos para uma falha inserida no corpo de prova à distância supramencionada da sonda de inspeção, tida como distância máxima de detecção.

As considerações são similares às feitas acerca da falha superficial da seção anterior, no entanto, superficialmente, a distribuição das correntes aparenta ser uniforme (Figura 28 e Figura 29). As linhas de contorno (Figura 30) e distribuição de fluxo magnético (Figura 31) atestam a existência de falha.

Figura 28 - Estudo região com Defeito Interno.

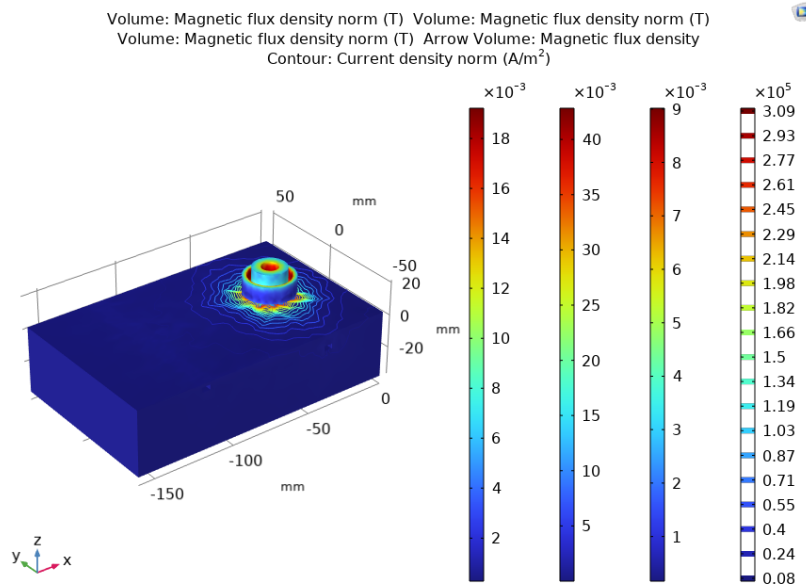


Figura 29 - Estudo região com Defeito Interno (vista superior).

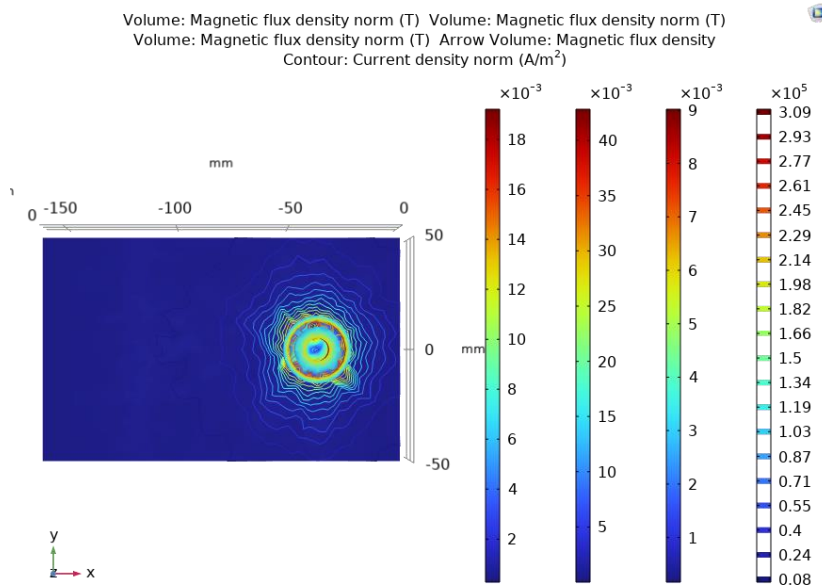


Figura 30 - Densidade de corrente com ênfase na região com Defeito Interno.

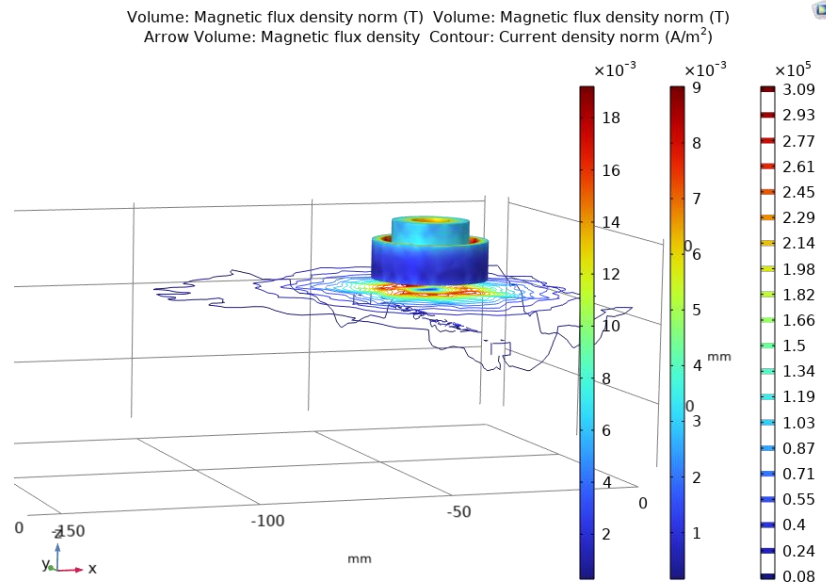
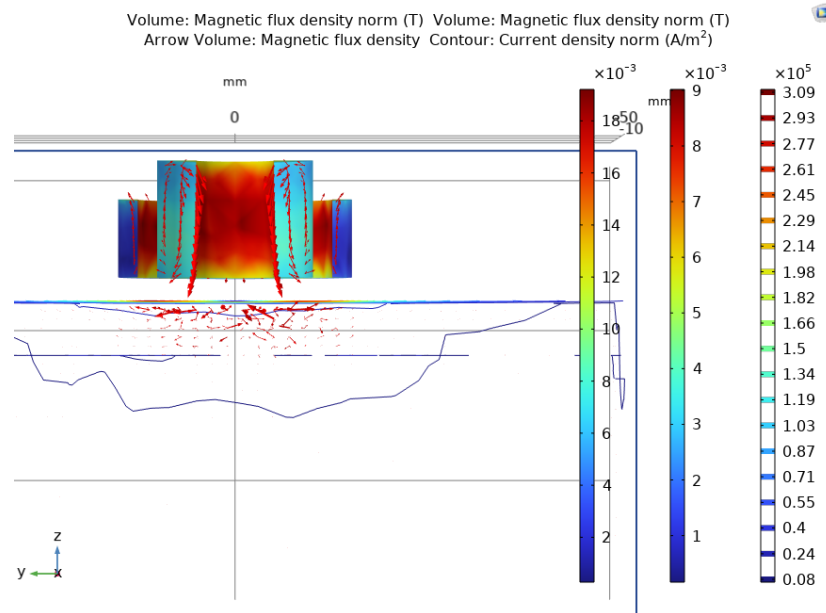


Figura 31 - Densidade de fluxo magnético região com Defeito Interno.



5.4. PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO E FREQUÊNCIAS

Conforme discutido na seção 3.4.4, a profundidade de penetração está inversamente relacionada com a frequência do sinal de excitação. Assim sendo, esta seção faz uma breve discussão a respeito das diferentes frequências utilizadas na excitação da sonda, sobre uma dada região do corpo de prova com uma falha à distância máxima de

detecção. Foram utilizados sinais com amplitude de -4 a 4 Volts, ciclo de trabalho de 40% e frequências de 100 Hz (Figura 32) e 10 kHz (Figura 33).

Figura 32 - Sinal de excitação 100 Hz.

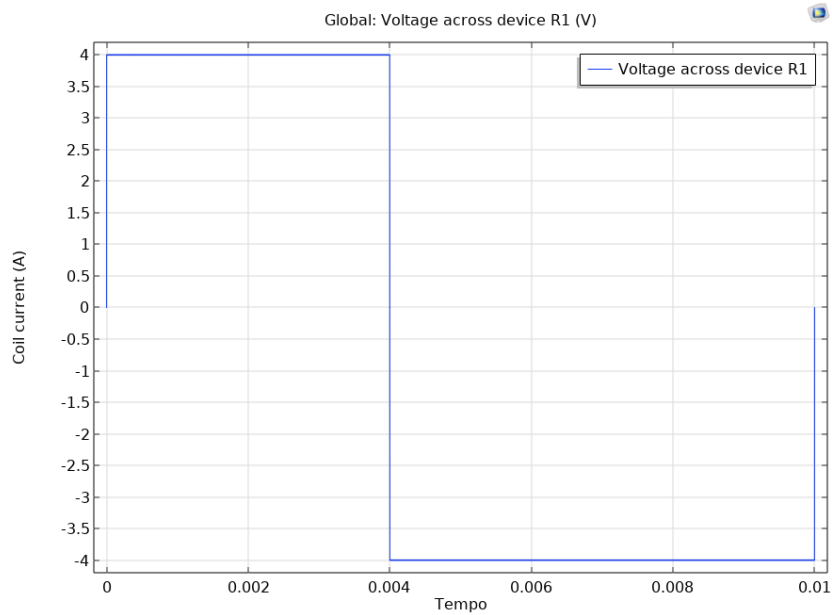
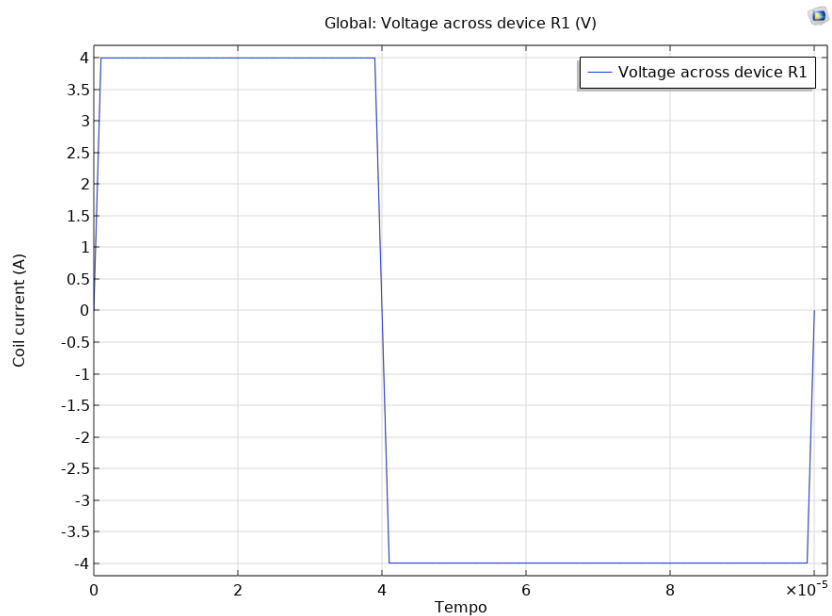


Figura 33 - Sinal de excitação 10 kHz.



As figuras Figura 34 e Figura 35 retratam, respectivamente, o aumento e a diminuição na profundidade de penetração das correntes parasitas, dado às linhas de contorno obtidas.

Figura 34 - Densidade de corrente 100 Hz.

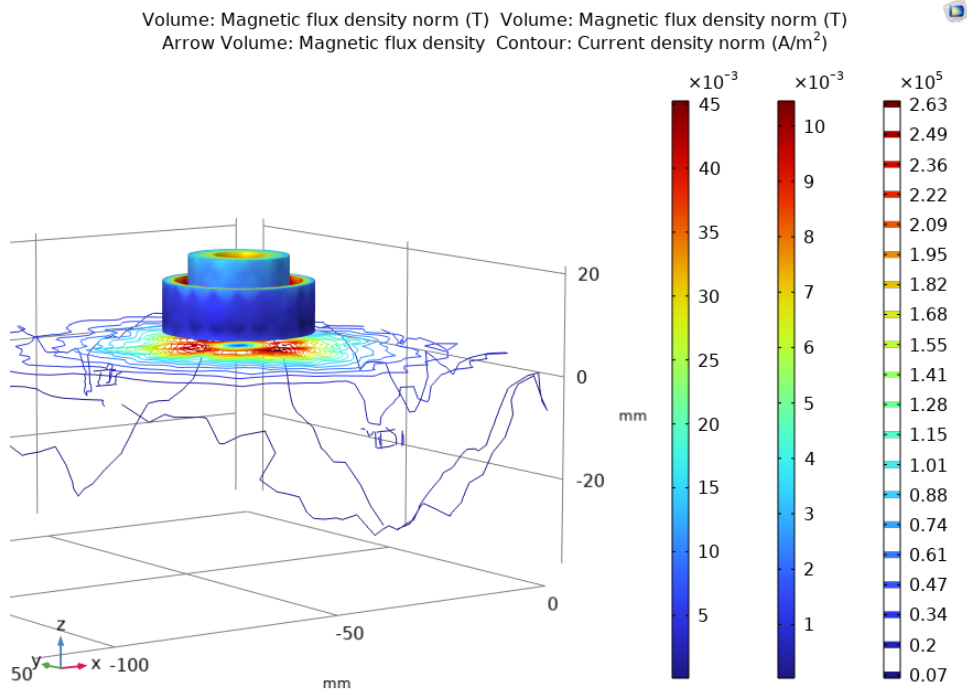
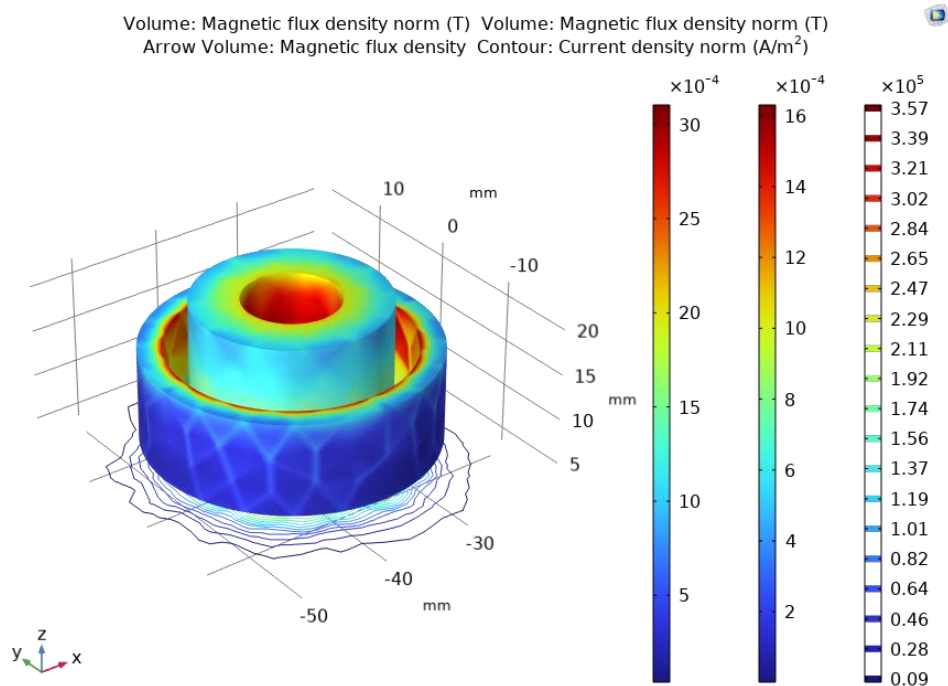


Figura 35 - Densidade de corrente 10 kHz.



6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido teve por finalidade simular um ensaio por correntes parasitas, método bastante utilizado na indústria, aplicado a materiais metálicos. Este teste se destaca no controle de qualidade de estruturas e equipamentos, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência na produção industrial.

Os resultados encontrados durante a realização deste trabalho mostram que quando alimentado por um pulso quadrado, o sistema torna-se capaz de utilizar múltiplas frequências na inspeção de um material. Dessa forma, medições podem ser combinadas com o objetivo de proporcionar uma avaliação mais rigorosa acerca da integridade estrutural, minimizando anomalias no sinal de inspeção que podem ser confundidas com falhas (Clauzon; Thollon; Nicolas, 1999).

O limite de detecção do defeito está diretamente relacionado ao tamanho da sonda de inspeção. Assim, quanto maior o defeito, maior a probabilidade de detecção, entretanto algumas considerações devem ser feitas: a região inspecionada não poderá conter um trecho uniforme maior do que a área de detecção da sonda, evitando assim a falsa informação de região SD; defeitos muito pequenos podem não ser detectados devido ao fato de promover alterações mínimas no caminho das correntes parasitas, promovendo variações insignificantes no fluxo magnético.

Para trabalhos futuros deve-se levar em consideração a análise da distância da sonda para o material metálico, assim como, avaliar o espectro do sinal de saída do ensaio por PEC. Outro aspecto importante é buscar otimizar os parâmetros da sonda a fim de melhorar a eficiência de detecção das falhas, além de explorar maiores diversidades de defeitos.

7. REFERÊNCIAS

- ASNT. “*Nondestructive testing handbook*”. Electromagnetic Testing, Third edition, vol. 5, 2004.
- BUCKLEY, J. M. “*An introduction to eddy current testing theory and technology*”. American Society of Nondestructive Testing, 1998.
- CAMACHO, B. I. “*Avaliação do Método de Correntes Parasitas para Inspeção de Defeitos no Aço API 5L X65 Através de um Sensor Planar*”. 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 - RS, 2018.
- CAMERINI, C. G.. “*Desenvolvimento de Sondas de Correntes Parasitas para Detecção e Quantificação de Fase Sigma em Aço Inoxidável Duplex*”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro – RJ, 2012.
- Clauzon T., Thollon F., Nicolas A. “*Flaws characterization with pulsed eddy currents*”. IEEE Trans. Magn., vol. 35, no. 3, pp. 1873-1876, 1999.
- CORRENTES de Foucault. **ELETRONICA PT**, [s. l.], s. d. Disponível em: <<https://www.electronica-pt.com/correntes-foucault>>. Acesso em: 17 nov. 2022.
- ENNEN, I.; et al. “*Giant Magnetoresistance: Basic concepts, microstructure, magnetic interactions and applications*”. Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 6, p. 904, 2016.
- GE, J.; HU, B.; YANG, C. “*Bobbin pulsed eddy current array probe for detection and classification of defects in nonferromagnetic tubes*”. Sensors and Actuators A: Physical, Elsevier, v. 317, p. 112450, 2021.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, Jearl. “**Fundamentos de Física, volume 3: eletromagnetismo**”. Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi – 10 ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2016.
- HANSEN, J. “**O método de inspeção por correntes parasitas**”. Insight, v. 46, n. 5, pág. 279-281, 2004.
- HENRIQUES, P.C. F; CARNEVAL, R. O. “**Ensaio Não-destrutivo por Correntes Parasitas**”. 1ªed., Rio de Janeiro - RJ, DITED/Petrobras, 1990.
- LAROCCA, C. B.; FARIAS, C. T. T.; FILHO, E. F. S.; SILVA, I. C. “*Wall Thinning Characterization of Composite Reinforced Steel Tube Using Frequency-Domain PEC Technique and Neural Networks*”. Journal of Nondestructive Evaluation, v. 37, n. 3, p. 1-8, 2018.
- LATHI, B. P. “*Sinais e sistemas lineares [recurso eletrônico]*”. Tradução Gustavo Guimarães Parma. – 2 ed. Porto Alegre - RS: Bookman, 2008.

- PEREIRA, P. A. de S. “**Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas Visando a Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis**”. Tese de M.Sc., COPPE COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2007.
- ROSA, M. C. “**Protótipo para ensaios não destrutivos utilizando correntes parasitas**”. Trabalho de conclusão em Engenharia de Controle e Automação – Relatório Final – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre - RS, 2015.
- SANTANA, C. S.; OLIVEIRA, F.; et al. “**Modelamento por elementos finitos de uma sonda de correntes parasitas pulsadas para tubos isolados**”. Trabalho apresentado durante o XXXVI – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo - SP, 2018.
- SGS. “**Ensaios não destrutivos: o que é preciso saber?**”. Abril. 2018. Disponível em: <<https://www.sgsgroup.com.br/-/media/local/brazil/documents/white-papers/industrial/sgs-ind-non-destructive-testing-pt-brazil.pdf>> Acesso em: 22 nov 2022.
- SHRIFAN, N. H.; AKBAR, M. F.; ISA, N. A. M. “**Prospect of Using Artificial Intelligence for Microwave Nondestructive Testing Technique: A Review**”. IEEE Access, IEEE, v. 7, p. 110628–110650, 2019.
- SILVA, I. C.; NETO, A. P. A.; NEVES, M. A.; SANTOS, Y. T. B.; SIMAS, E. F.; FARIAS, C. T. T. “**Simulação de Ensaios de Correntes Parasitas Pulsadas Utilizando Elementos Finitos**”. Trabalho apresentado durante a 12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. Cabo de Santo Agostinho, 2015.
- SILVA, I. C. da; SANTOS, Y. T. B. dos; BATISTA, L. S.; FARIAS, C. T. T.; “**Estudo da corrosão em aço carbono usando a técnica de correntes parasitas pulsadas**”. Trabalho apresentado durante o XXXII – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo - SP, 2014.
- SILVA, M. M. “**Sistema embarcado inteligente para auxílio ao diagnóstico em inspeção por correntes parasitas pulsadas**”. Tese de doutorado submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia. Salvador - BA, 2022.
- SOUZA, P. V. S.; SILVA, C. J. V.; BALTHAZAR, W. F. “**O arrasto magnético e as correntes de Foucault: um experimento de baixo custo com vídeo-análise**”. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, nº 2, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/TFjg7nPnRfxfmjbb4ZKjcZJ/?lang=pt>> Acesso em: 18 nov 2022.
- SOPHIAN, A.; TIAN, G.; FAN, M.. “**Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review**”. Chinese Journal of Mechanical Engineering, Springer, v. 30, n. 3, p. 500–514, 2017.
- TONDO, F. A. “**Identificação e análise da função de transferência do circuito equivalente de um sistema de medição por correntes parasitas**”. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2016.

- ULAPANE, N.; ALEMPIJEVIC, A.; et al. “*Non-destructive evaluation of ferromagnetic material thickness using pulsed eddy current sensor detector coil voltage decay rate*”. NDT & E International, Elsevier, v. 100, p. 108–114, 2018.