



**Francisco Eduardo Mendes da Silva**

**Desenvolvimento de um Ensaio Eletromagnético  
Através de Medidas de Permeabilidades e  
Simulações pelo Método dos Elementos Finitos**

**João Pessoa - PB  
Fevereiro de 2019**



**Francisco Eduardo Mendes da Silva**

## **Desenvolvimento de um Ensaio Eletromagnético Através de Medidas de Permeabilidades e Simulações pelo Método dos Elementos Finitos**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Edgard de Macedo Silva, Dr. IFPB  
Coorientador: Neilor Cesar dos Santos, Dr. IFPB

João Pessoa – PB, Fevereiro de 2019  
Francisco Eduardo Mendes da Silva  
[eduardomendess@hotmail.com](mailto:eduardomendess@hotmail.com)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Nilo Peçanha - IFPB, *campus* João Pessoa

S586d Silva, Francisco Eduardo Mendes da.  
Desenvolvimento de um ensaio eletromagnético através de medidas de permeabilidade e simulações pelo método dos elementos finitos / Francisco Eduardo Mendes da Silva. – 2019.  
98 f. : il.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.  
Orientação : Prof. D.r Edgard de Macedo Silva, Prof. D.r Neilor Cesar dos Santos.  
1. Eletromagnetismo – ensaios eletromagnéticos. 2. Permeabilidade. 3. Métodos dos elementos finitos. I. Título.

CDU 537.6/.8(043)

Lucrecia Camilo de Lima  
Bibliotecária  
CRB 15/132

Francisco Eduardo Mendes da Silva

# Desenvolvimento de um Ensaio Eletromagnético Através de Medidas de Permeabilidades e Simulações pelo Método dos Elementos Finitos

Dissertação de Mestrado submetida  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia da  
Paraíba, como requisito necessário à  
obtenção do grau de Mestre em Ciências  
no Domínio da Engenharia Elétrica.

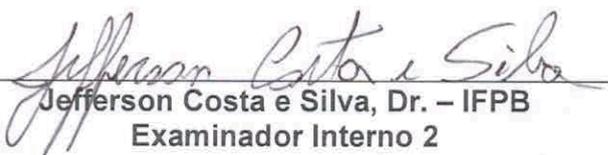
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 11 / 02 / 2019.

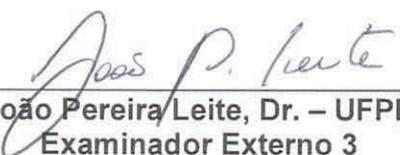
## BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Edgard de Macedo Silva, Dr. – IFPB  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Neilor Cesar dos Santos, Dr. – IFPB  
Coorientador

  
\_\_\_\_\_  
Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB  
Examinador Interno 1

  
\_\_\_\_\_  
Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB  
Examinador Interno 2

  
\_\_\_\_\_  
João Pereira Leite, Dr. – UFPB  
Examinador Externo 3

João Pessoa – PB  
Fevereiro de 2019

## DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista aos meus pais Ângela e Déda, por não medirem esforços pra me ajudar durante a minha vida acadêmica, por sempre estarem ao meu lado durante as minhas decisões e por mostrarem que a educação é sempre o melhor caminho.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por me iluminar nas minhas conquistas e me ajudar espiritualmente a enfrentar as dificuldades que a vida me trouxe até aqui, conseguindo desviar de todas elas e chegar sempre à vitória.

A todos os profissionais que compõe o PPGEE, pois foram importantes durante o curso, em especial ao meu orientador professor Dr. Edgard de Macedo Silva, que foi muito importante na minha evolução durante o curso e no meu crescimento profissional. Ao professor Dr. Neilor Cesar dos Santos, pela coorientação do trabalho na qual sempre estive à disposição quando necessitei.

A minha irmã Damiana e ao meu cunhado Diego que estão sempre ao meu lado em todos os momentos.

Em nome de Fábio Araújo de Lima, que é uma pessoa que nunca mediu esforços pra me ajudar, agradeço a todos os meus amigos que ajudaram durante este período.

## EPÍGRAFE

*A educação é sempre o verdadeiro  
caminho pra progredir  
espiritualmente, socialmente e  
profissionalmente.*

*Eduardo Mendes*

## RESUMO

Ensaio não destrutivo são empregados para detecção de descontinuidades em materiais. Estas são interrupções físicas causadas pela abertura de uma trinca ou pela presença de um segundo material como gás e inclusão. Contudo, esses ensaios também vêm sendo empregados para acompanhamento de formação de novas fases. Estas podem mudar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão dos materiais. Além disso, a presença dessas pode mudar a permeabilidade magnética do meio. Assim, ensaios eletromagnéticos baseados na interação entre campo magnético e material passam a ser empregados para estes tipos de aplicações. Entre esses temos o do ruído de Barkhausen e o da medição da permeabilidade na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. No presente trabalho é feito um estudo deste segundo ensaio através de medidas experimentais de permeabilidade de um material ferromagnético e um paramagnético, com diferentes geometrias circulares e por simulação pelo Método dos Elementos Finitos. O objetivo é determinar os limites de aplicação do ensaio em termo de medidas de permeabilidades e de dimensões de amostras, para acompanhamento de fases. Em adição a isso, um estudo é feito para levantar a possibilidade do uso do ensaio para detecção de descontinuidade. Os resultados obtidos mostraram que o ensaio eletromagnético estudado é não destrutivo, necessitando porém correções nos valores de densidade de fluxo magnético para amostras com espessuras abaixo de 4 mm, devido a influência da permeabilidade do meio externo. Além disso, o ensaio mostrou ser útil como técnica complementar para ensaios de ultrassom, por poder detectar descontinuidades mesmo em regiões da zona morta desta técnica.

Palavras-Chave: Ensaio eletromagnéticos, Permeabilidade, Método dos Elementos Finitos.

## ABSTRACT

Non-destructive tests are used to detect discontinuities in materials. These are physical interruptions caused by the opening of a cracking or by the presence of a second material such as gas and inclusion. Yet, these tests are also being used to formation of new phases. These may change the mechanical and resistance properties to corrosion of materials. In addition, its presence of these ones may change the magnetic permeability of the environment. Thus, electromagnetic tests based on the interaction between magnetic field and material become used for these types of applications. Among the mainwe essay, have Barkhausen´s noise and the measurement of permeability in the region of movement reversibility on the walls of magnetic domains. In the present work, it is made a study from this second test through experimental measurements of permeability of a ferromagnetic material and a paramagnetic one, with circular geometries and by simulation through the Element Method Finite. The objective is to determine the limits of application of the test in terms of measures of permeability and sample sizes, to phase monitoring. In addition to this, a study is made to raise possibility of using the test to detect discontinuity. The results showed that the electromagnetic test studied is not destructive, but requiring corrections in the values of magnetic flow density for samples with thicknesses below 4 mm due to the influence of permeability of the external medium environment. In addition, the test proved to be useful as complementary technique for ultrasound testing, since it is capable of detecting discontinuities even in regions of the dead zone of this technique.

Key words: Electromagnetic testing, Permeability, Method of Finite elements.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Domínios magnéticos.....	20
Figura 2-	Curva de magnetização.....	21
Figura 3-	Princípio de funcionamento do ensaio eletromagnético. (1) fonte de alimentação, (2) núcleo ferrítico, (3) bobina, (4) sensor de efeito <i>Hall</i> e (5) amostra a ser analisada.....	23
Figura 4-	Curva de magnetização para o aço SAE 1045 em função da espessura.....	24
Figura 5-	Curva de $B \times H$ do AID SAF 2205 para a temperatura de 800°C e os tempos de envelhecimento de 15 minutos, 60 minutos e 120 minutos.....	25
Figura 6-	Presença da fase sigma em um AID SAF 2205 tratada a 900°C por 120 min obtida por MO.....	26
Figura 7-	Variação do campo magnético induzido em função do ângulo de rotação das amostras e gráfico polar para amostras com diferentes espessuras. a) 2 mm, b) 4 mm, c) 8 mm, d) 12 mm.....	27
Figura 8-	Variação da permeabilidade e energia de impacto em função da quantidade de fase sigma.....	28
Figura 9-	Campo magnético induzido e energia absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento para amostras com diferentes intensidades de campo magnético aplicado. (a) 44,3 A/m, (b) 88,6 A/m, (c) 132,8 A/m, (d) 177,1 A/m, (e) 221,4 A/m.....	29
Figura 10-	Micrografia da superfície estudada do aço SAE 1045.....	33
Figura 11-	Variação do campo magnético induzido em função do ângulo de rotação das amostras e gráfico polar para amostras com diferentes espessuras. a) 2 mm, b) 4 mm, c) 8 mm, d) 12 mm.....	34
Figura 12-	Exemplo de malha de elementos finitos, incluindo somente elementos triangulares (a) e elemento triangular isolado (b).....	38

Figura 13-	Problema com simetria planar.....	39
Figura 14-	Problema real com representação em 3D.....	39
Figura 15-	Representação do mesmo problema da Figura 9 em um plano, usando simetria axissimétrica.....	39
Figura 16-	Condições de contorno de Dirichlet, para problemas de eletrostática (a) e para problemas de magnetostática (b).....	40
Figura 17-	Condições de contorno de Neumann, para problemas de eletrostática (a) e para problemas de magnetostática (b).....	41
Figura 18-	Distribuição equipotencial de indução magnética no material isolante do cabo umbilical para a simulação tridimensional.....	42
Figura 19-	Linhas de fluxo magnético.....	43
Figura 20-	Esquema do sensor usado na simulação.....	44
Figura 21-	Representação da simulação por MEF.....	44
Figura 22-	Efeito da espessura. a) Linhas de fluxo magnético, b) Densidade de fluxo magnético.....	45
Figura 23-	Modelo MRRV com malha tetraédrica.....	47
Figura 24-	Figura 24- a) Configuração experimental: (1) computador; (2) sistema de alimentação; (3) bancada; (4) sensor <i>Hall</i> ; (5) amostra; (6) bobina; (7) potenciômetro ; (8) placa de aquisição de dados e (9) Fonte de alimentação. b) Configuração real: (1) Fonte, (2) Bateria, (3) Placa de aquisição de dados, (4) Computador, (5) Bancada.....	49
Figura 25-	Bancada simulada com dimensões mantendo proporcionalidades.....	51
Figura 26-	Área da bancada experimental a ser simulada.....	51
Figura 27-	Esquema de medição de discontinuidades em uma amostra de aço.....	56
Figura 28-	Modelo com medidas reais.....	58

Figura 29-	Modelo com a redução da região de poliacetal e ar.....	58
Figura 30-	Simulação com densidade de malha com razão igual a 1.....	61
Figura 31-	Simulação com densidade de malha com razão igual a 2.....	62
Figura 32-	Curva de calibração. Variação da intensidade de campo magnético aplicado simulado, em função da intensidade de campo magnético experimental.....	64
Figura 33-	Variação da densidade de fluxo magnético experimental e simulado para amostras de um aço SAE 1045 com diferentes espessuras.....	66
Figura 34-	Variação da densidade de fluxo magnético em função da espessura, para materiais com diferentes permeabilidades.....	68
Figura 35-	Variação da densidade de fluxo magnético em função da espessura para um aço SAE 1045- Simulação pelo Método dos Elementos Finitos.....	70
Figura 36-	Variação da densidade de fluxo magnético em função da espessura para o Alumínio ASTM 6261.....	71
Figura 37-	Gráfico da variação da densidade de fluxo magnético em função do diâmetro, para materiais ferromagnéticos com espessuras de até 8 mm.....	73
Figura 38-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 6 mm para o material ferromagnético.....	74
Figura 39-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 12 mm para o material ferromagnético.....	75
Figura 40-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 16 mm para o material ferromagnético.....	76
Figura 41-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 20 mm para o material ferromagnético.....	77
Figura 42-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 24 mm para o material ferromagnético.....	78

Figura 43-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 30 mm para o material ferromagnético.....	79
Figura 44-	Variação da densidade de fluxo magnético em função do diâmetro para materiais paramagnéticos com espessuras de até 8 mm.....	80
Figura 45-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 6 mm para o material paramagnético.....	81
Figura 46-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 12 mm para o material paramagnético.....	82
Figura 47-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 16 mm para o material paramagnético.....	83
Figura 48-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 20 mm para o material paramagnético.....	84
Figura 49-	Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 24 mm para o material paramagnético.....	85
Figura 50-	Amostras experimentais, com furo passante representando a descontinuidade e amostra sem furo.....	87
Figura 51-	Medidas experimentais de densidade de fluxo magnético em função da posição para amostras de aço.....	88
Figura 52-	Diferença das medidas de densidade de fluxo magnético para os furos de 2 e 6 mm.....	89
Figura 53-	Simulação para amostra sem furo.....	90
Figura 54-	Simulação para amostra com furo.....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Especificações da bobina.....	50
Tabela 2-	Valores referentes às amostras.....	52
Tabela 3-	Valores de permeabilidades das regiões consideradas nas simulações.....	60
Tabela 4-	Valores de densidade de fluxo magnético para simulação com razão 1 obtidas na simulação da Figura 30.....	62
Tabela 5-	Valores de densidade de fluxo magnético para simulação com razão 2 obtidas na simulação da Figura 31, região definida para simulação.....	63
Tabela 6-	Valores de intensidade de campo magnético e densidade de fluxo magnético experimentais e simulados referentes a calibração, bem como tensão aplicada na bobina.....	65
Tabela 7-	Valores de densidade de fluxo magnético experimental e simulado, em função da espessura para um aço SAE 1045.....	67

## LISTA DE SIGLAS

A	Ampere
AID	Aço Inoxidável Duplex
APDL	Ansys Parametric Desing Language
<i>B</i>	Densidade de Fluxo Magnético
CAD	Projeto Assistido por Computador
<i>H</i>	Intensidade Campo Magnético
L	Comprimento
LFET	Técnica Eletromagnética de Baixa Frequência
$\mu_r$	Permeabilidade Relativa
$\mu_0$	Permeabilidade no Vazio
M	Momento Magnético
MEF	Método dos Elementos Finitos
MRRV	Motor Rotativo de Relutância Variável
MO	Microscopia Óptica
N	Número de Espiras
Oe	Oersted
V	Volts
$\alpha$	Fase Ferrita
$\sigma$	Fase Sigma

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1. OBJETIVO GERAL .....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	20
2.1. CURVA DE MAGNETIZAÇÃO .....	20
2.2. ENSAIO ELETROMAGNÉTICO NA REGIÃO DE REVERSIBILIDADE.....	22
2.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO AO ELETROMAGNETISMO.....	36
<b>2.3.1. Pré-processamento</b> .....	37
<b>2.3.2. Processamento</b> .....	40
<b>2.3.3. Pós-processamento</b> .....	41
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	48
3.1. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE.....	48
3.2. DEFINIÇÃO DAS REGIÕES E PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA A SIMULAÇÃO.....	50
3.3. DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO NECESSÁRIA PARA SIMULAÇÃO.....	53
<b>3.3.1. Determinação do <math>H</math> ideal experimental</b> .....	53
<b>3.3.2. Definição da região a ser simulada</b> .....	53
<b>3.3.3. Definição da malha</b> .....	54
<b>3.3.4. Determinação da intensidade de campo magnético induzido equivalente para simulação (Curva de Calibração)</b> .....	54
3.4. SIMULAÇÃO DO ENSAIO ELETROMAGNÉTICO.....	54

<b>3.4.1</b>	<b>Estudo do efeito da espessura para diferentes permeabilidades.....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Estudo do efeito do diâmetro para diferentes permeabilidades.....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Estudo do uso do ensaio eletromagnético para detecção de descontinuidades, um estudo de caso.....</b>	<b>55</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>
4.1.	DEFINIÇÃO DA REGIÃO A SER SIMULADA.....	57
4.2.	DEFINIÇÃO DA MALHA.....	60
4.3.	CURVA DE CALIBRAÇÃO.....	63
4.4.	ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DO MATERIAL.....	65
4.5.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE DO MEIO SOBRE AS MEDIDAS DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA.....	69
4.6.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE DO MEIO SOBRE AS MEDIDAS DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO.....	72
4.7.	ESTUDO DE CASO.....	86
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>94</b>
<b>7.</b>	<b>TRABALHOS PUBLICADOS.....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>96</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os Ensaio não Destrutivos (END) são realizados em materiais acabados ou semi-acabados para avaliar a presença ou não de descontinuidades sem alterar suas características físicas, químicas ou mecânicas. Em outras palavras, podem ser realizados testes para aferir a qualidade de uma determinada peça sem que ela seja danificada ou prejudicada. A utilização desses tipos de ensaios pode levar a inspeção de lotes produzidos, garantindo uma melhor qualidade e aumentando a confiabilidade com um menor custo. Vários tipos de técnicas de ensaios não destrutivos são usados para esses fins, como por exemplo: ensaio visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrassom, radiografia industrial, exames termográficos, entre outros.

A formação de novas fases dentro do material, devido à imposição de ciclos térmicos, provenientes de processos de fabricação como o de soldagem, por exemplo, levam a mudanças nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão dos materiais. Métodos não destrutivos como de ultrassom, correntes parasitas, de medidas do ruído de Barkhausen e de permeabilidade na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos vêm sendo estudados para aplicações nestes casos, entre estas, as duas últimas se baseiam na interação entre campo magnético e material e suas medições são influenciadas pela permeabilidade do material.

Na engenharia o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) apareceu na década de 50, já como método computacional. Sua utilização em soluções numéricas em eletromagnetismo começou, de fato, na década de 1960, com a redução do custo computacional. A simulação pelo MEF é uma ferramenta útil na análise de fluxo magnético e linhas de campo dentro do material auxiliando no entendimento da interação entre esses. Além disso, o uso da simulação reduz a quantidade de amostras experimentais e facilita a extrapolação dos resultados.

No presente trabalho, é feito um estudo da interação entre densidade de fluxo magnético e material, na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos, através da simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e medidas experimentais. Este estudo busca um melhor entendimento do

efeito da permeabilidade do material e meio externo, de modo, a determinar as limitações do ensaio empregado nesta região. O estudo será realizado em um material ferromagnético e em um material paramagnético e os resultados serão extrapolados. Além disso, será realizado um estudo da potencialidade do uso do ensaio na detecção de descontinuidades, tanto interior ao material como próximo à superfície.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um ensaio a partir da análise da interação entre densidade de fluxo magnético e material, de um ensaio eletromagnético, realizado na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos a partir de simulações pelo Método dos Elementos Finitos.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

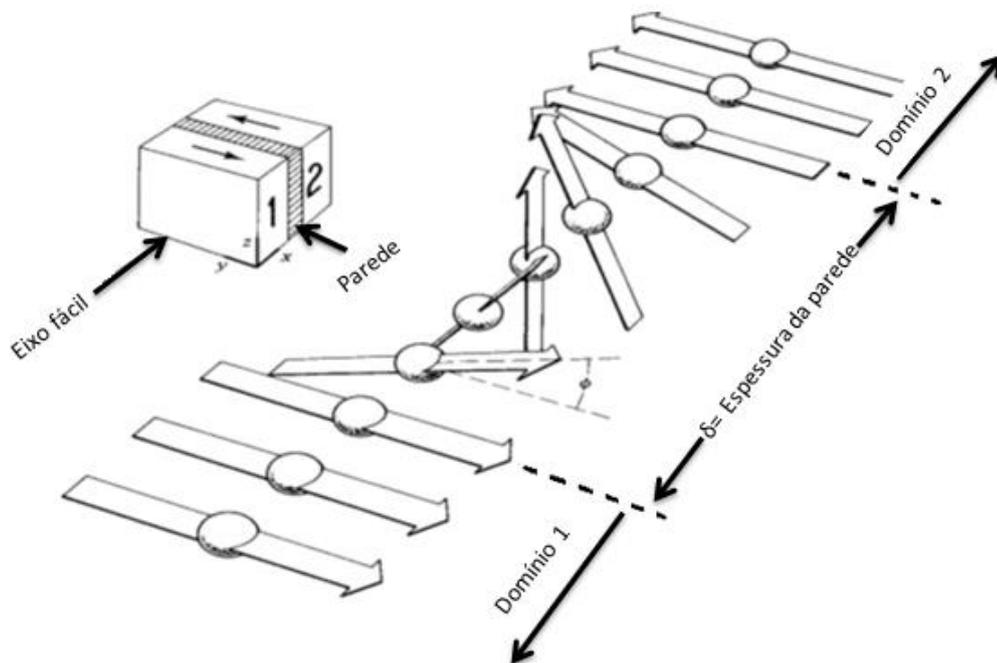
- Estudar o efeito da espessura na interação da densidade de fluxo magnético e material.
- Simular pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) a bancada experimental de ensaio na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos.
- Extrapolar os resultados do efeito da interação da densidade de fluxo magnético e material para diferentes espessuras, diâmetros e permeabilidades, através de simulações.
- Determinar as limitações da bancada de ensaio eletromagnético através das medidas experimentais e simuladas.
- Estudar a possibilidade da utilização do ensaio na determinação de descontinuidades.
- Publicar os resultados.
- Defender a dissertação.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

Um elétron quando gira em torno do seu eixo produz um momento magnético ao longo desse. Cada elétron pode ser pensado como um ímã permanente com momento magnético. Regiões com magnetização espontânea na mesma direção são denominadas de domínios magnéticos. Na Figura 1, tem-se a representação esquemática de dois domínios magnéticos, sendo cada um constituído por três elétrons. A região de transição entre os dois domínios é denominada de parede de domínio e se caracteriza por um conjunto de elétrons não paralelos que fazem a transição entre os dois domínios. Os domínios magnéticos constituem a microestrutura dos materiais ferromagnéticos e no estado desmagnetizado encontram-se aleatoriamente distribuídos (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Figura 1- Domínios magnéticos

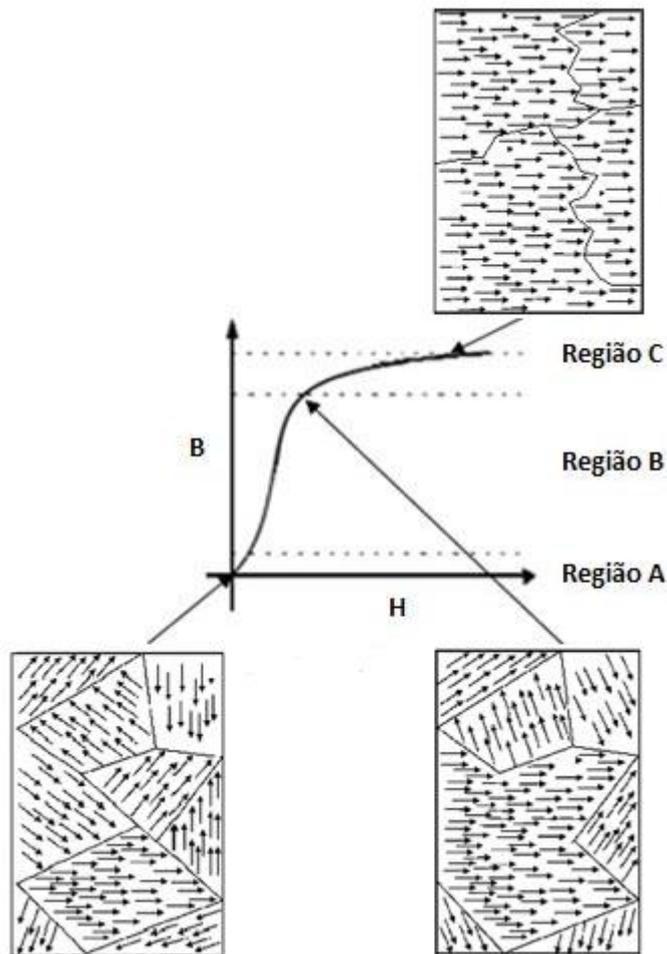


Fonte: Adaptado de CULLITY, 2009.

Quando um material magnético está inicialmente desmagnetizado e nele é aplicado um campo magnético externo, os domínios magnéticos crescem devido aos movimentos das paredes ou fronteiras dos domínios. Os domínios com momentos

magnéticos paralelos ao campo aplicado crescem à custa dos domínios com orientações menos favoráveis (PINHO, 2009). A Figura 2, apresenta uma curva de magnetização e ilustra o crescimento e rotação dos domínios magnéticos quando um material ferromagnético está inicialmente desmagnetizado e é aplicada uma intensidade de campo magnético externo a ele.

**Figura 2- Curva de magnetização**



**Fonte: Própria.**

Na Figura 2, temos a curva de magnetização, onde  $H$  representa a intensidade de campo magnético aplicado e  $B$  representa a densidade de fluxo magnético. A curva está dividida em três regiões. A região A constitui a área de deslocamento reversível das paredes de domínio magnético, na qual os domínios estão distribuídos de forma aleatória e com a aplicação de uma baixa intensidade de campo magnético não causa mudança em sua orientação. Esta região é conhecida

como de reversibilidade. A região B corresponde a de irreversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. Nessa, os domínios magnéticos começam a se orientar na mesma direção da intensidade de campo magnético aplicado, ou seja, à medida que o campo aplicado for aumentando ele favorece o crescimento de domínios orientados na mesma direção do campo, fazendo com que os domínios que não estão na mesma direção diminuam de tamanho ou desapareçam. No final desta região os domínios ficam orientados na direção de fácil magnetização do material.

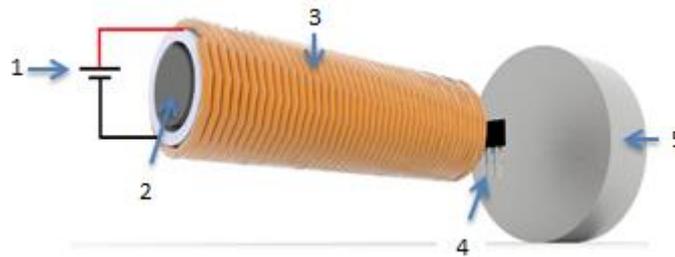
Na região de rotação dos domínios magnéticos (Região C), os domínios que estavam alinhados na direção de fácil magnetização, são forçados a girar e ficar alinhados com a direção do campo magnético externo aplicado (ANDRADE, 2016).

## 2.2. ENSAIO ELETROMAGNÉTICO NA REGIÃO DE REVERSIBILIDADE

A região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos tem sido estudada para desenvolvimento de ensaios eletromagnéticos para análise de permeabilidade e anisotropia magnética (LEITE, 2014), (FIALHO, 2015), (ANDRADE, 2016). Esta região se caracteriza pela relação linear entre a intensidade de campo magnético externo e a densidade de fluxo magnético. A permeabilidade é dada pela tangente da relação de  $B$  e  $H$  e não varia a cada ponto, simplificando assim o ensaio.

A Figura 3, mostra o princípio de um ensaio realizado na região de reversibilidade. Esta técnica consiste em aplicar uma tensão em uma bobina posicionada conforme a Figura 3, na qual a corrente que circula na bobina gera um campo magnético e interage com a amostra. Um sensor de efeito *Hall* é posicionado entre a peça a ser analisada e a bobina. A densidade de fluxo magnético gerada é ampliada ao passar por um núcleo ferrítico e passada pelo sensor *Hall* e o material a ser estudado. A densidade de fluxo magnético resultante dessa interação é medida com o sensor de efeito *Hall*. O valor da densidade de fluxo magnético medido é proporcional à permeabilidade do material a ser estudado.

**Figura 3- Princípio de funcionamento do ensaio eletromagnético. (1) Fonte de alimentação, (2) núcleo ferrítico, (3) bobina, (4) sensor de efeito *Hall* e (5) amostra a ser analisada**

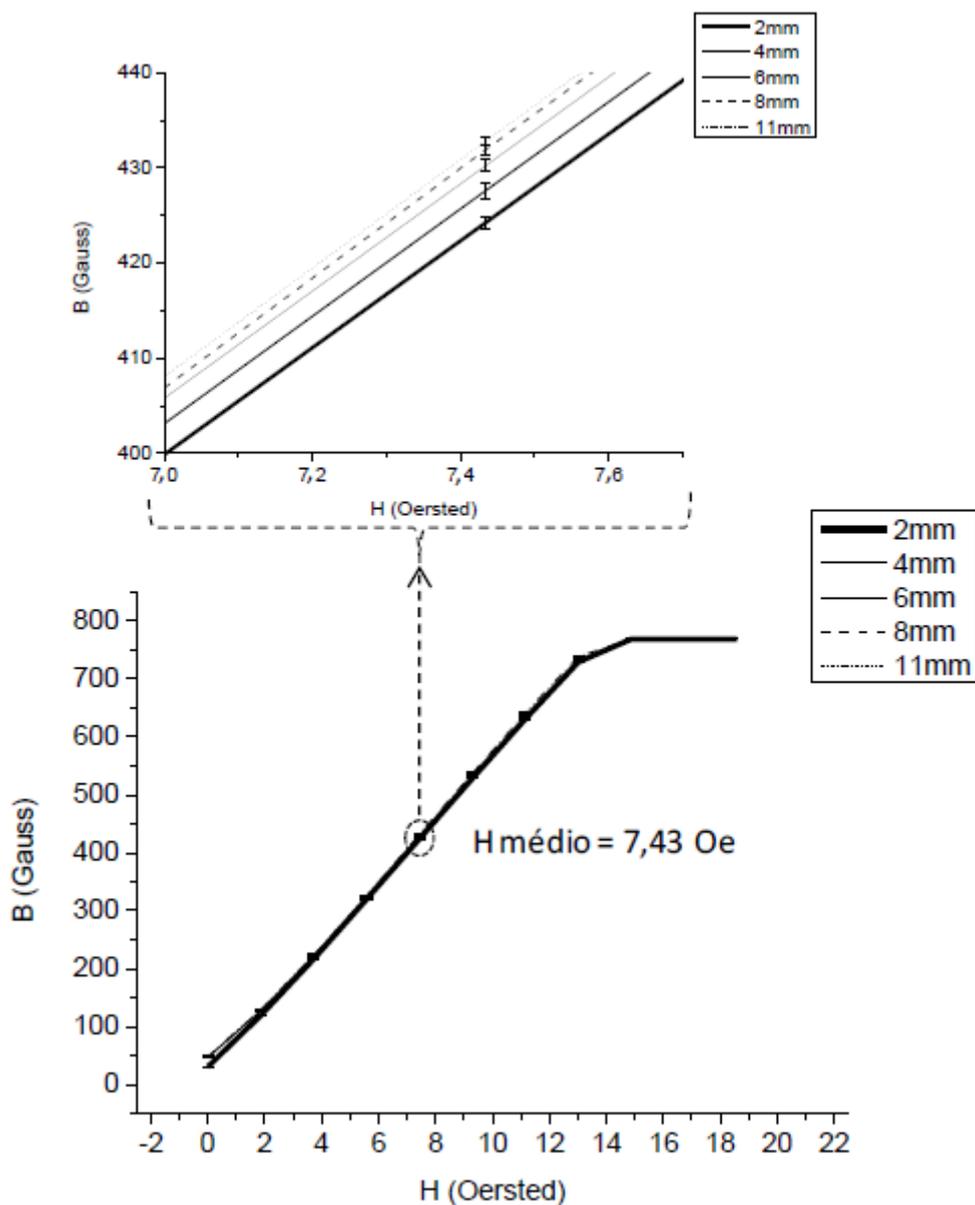


**Fonte: Própria.**

A Figura 4, mostra uma curva de magnetização obtida pelo ensaio. Esta foi realizada em amostras de um aço SAE 1045 com diâmetro de 24 mm e espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm. Observa-se no eixo horizontal os valores de  $H$  variando de 0 a 14,86 Oe e no eixo vertical observa-se os valores de  $B$  variando de 0 a 768,75 Gauss. Nota-se ainda da Figura 4 o comportamento linear para todas as amostras e uma estabilização dos resultados para valores em torno de 700 Gauss. A linearidade é uma característica da região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos e a saturação dos valores é proveniente da saturação do sensor, haja vista que esses valores ainda aumentam com o valor de  $H$  aplicado (LEITE, 2014). Esse estudo explica o efeito da espessura do material estudado na qual determina o comportamento da curva  $B \times H$  e a análise da influência da espessura nos valores de  $B$ .

Nota-se também da Figura 4 que à medida que se aumentou os valores da espessura do material os valores de densidade de fluxo magnético tendem a ficarem iguais. Este comportamento está associado à redução do efeito do meio externo, de menor permeabilidade, sobre os valores de densidades de fluxo magnético. Isto indica que com o aumento da espessura, o fluxo magnético passa a percorrer o material sem a influência do meio, para a intensidade de campo magnético aplicado.

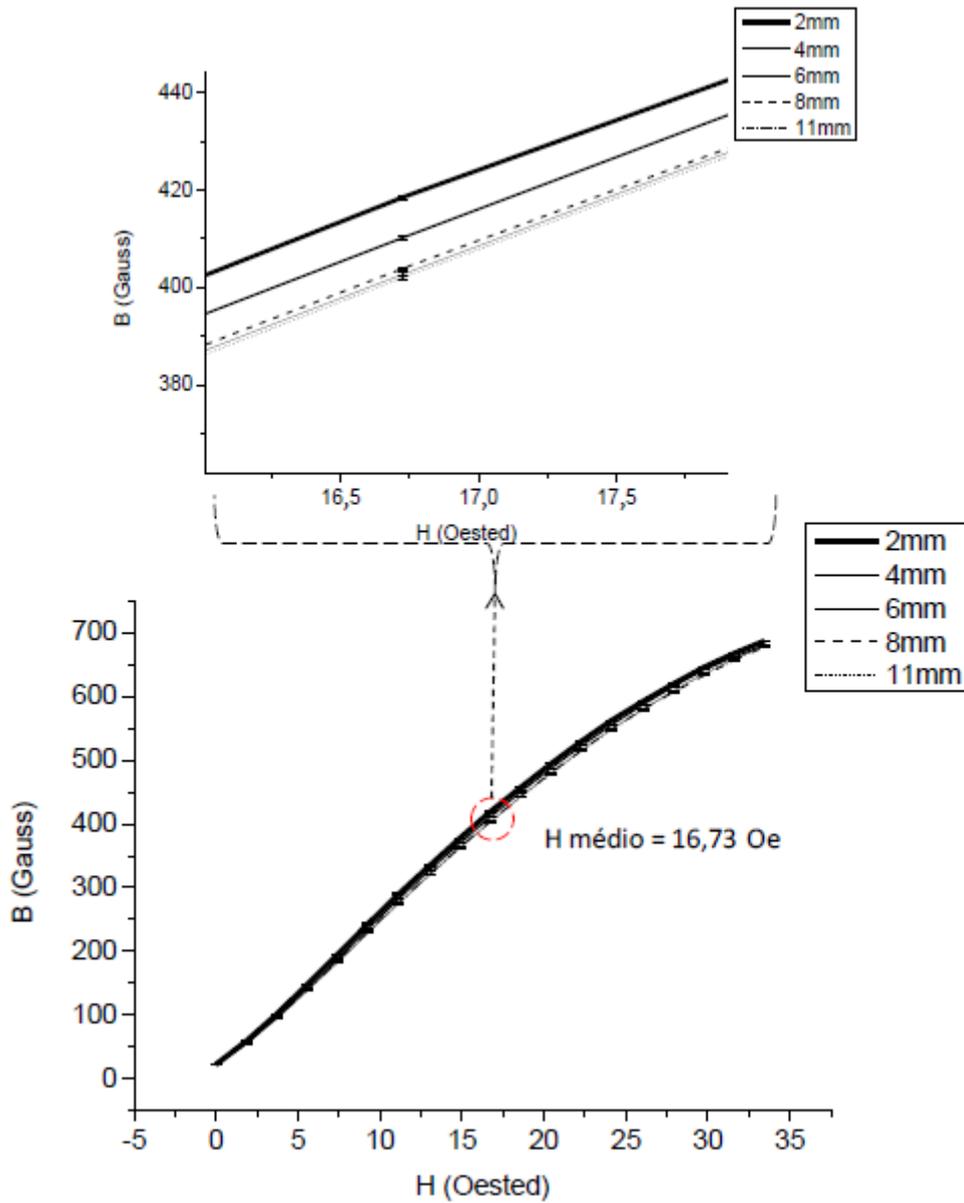
Figura 4- Curva de magnetização para o aço SAE 1045 em função da espessura



Fonte: LEITE, 2014.

Leite (2014) também estudou o efeito da variação da espessura para o alumínio ASTM 6261 que é uma liga paramagnética. Observa-se que no eixo horizontal os valores de  $H$  variam de 0 a 33,45 Oe e no eixo vertical os valores de  $B$  variam de 0 a 686,38 Gauss. A curva de magnetização deste estudo é apresentada na Figura 5.

Figura 5- Curva de magnetização para o alumínio ASTM 6261 em função da espessura



Fonte: LEITE, 2014.

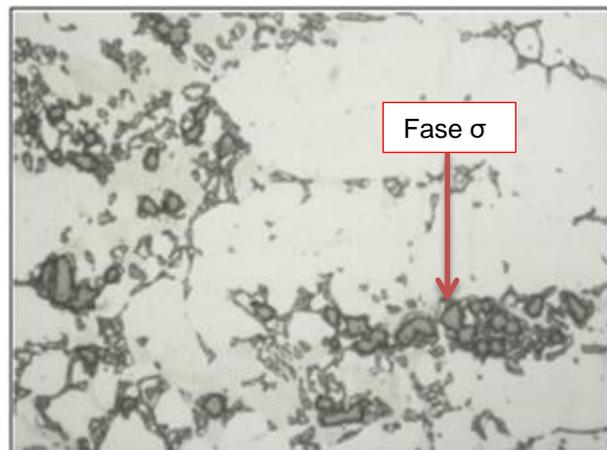
Observa-se da Figura 5, que mesmo com o valor de  $H$  máximo que a bobina pode fornecer, o valor de  $B$  não foi suficiente para a saturação do sensor *Hall* como aconteceu para o aço SAE 1045. Isso se deve à permeabilidade do alumínio ser menor que a permeabilidade do aço e, portanto, é necessário um valor de  $H$  maior para que haja a saturação do sensor.

A Figura 5 mostra uma redução dos valores de densidade de fluxo magnético, com o aumento da espessura do material. Neste caso, a permeabilidade do meio é

maior do que a do material estudado, ou seja, o aumento da espessura reduz o efeito do meio externo e tem-se uma redução nos valores de  $B$ .

Medidas de análise de permeabilidade na região de reversibilidade têm sido aplicadas para acompanhamento de fases prejudiciais à tenacidade de aços inoxidáveis duplex (AID). Estes aços são compostos pelas fases ferrita e austenita em sua microestrutura com proporções iguais e tem como características, elevadas resistências mecânicas e à corrosão. Entretanto, quando os AID são submetidos a processos de fabricação nos quais impõe aos materiais ciclos térmicos com temperatura acima de 600°C, ocorre o surgimento da fase fragilizantes  $\sigma$ . Esta possui elevada dureza que compromete a tenacidade e alto teor de cromo, que empobrece a matriz do material desse elemento e reduz a resistência à corrosão. Na Figura 6, é possível observar a microestrutura com a presença de fase  $\sigma$  obtida a partir da micrografia do AID SAF 2205 (FIALHO, 2015).

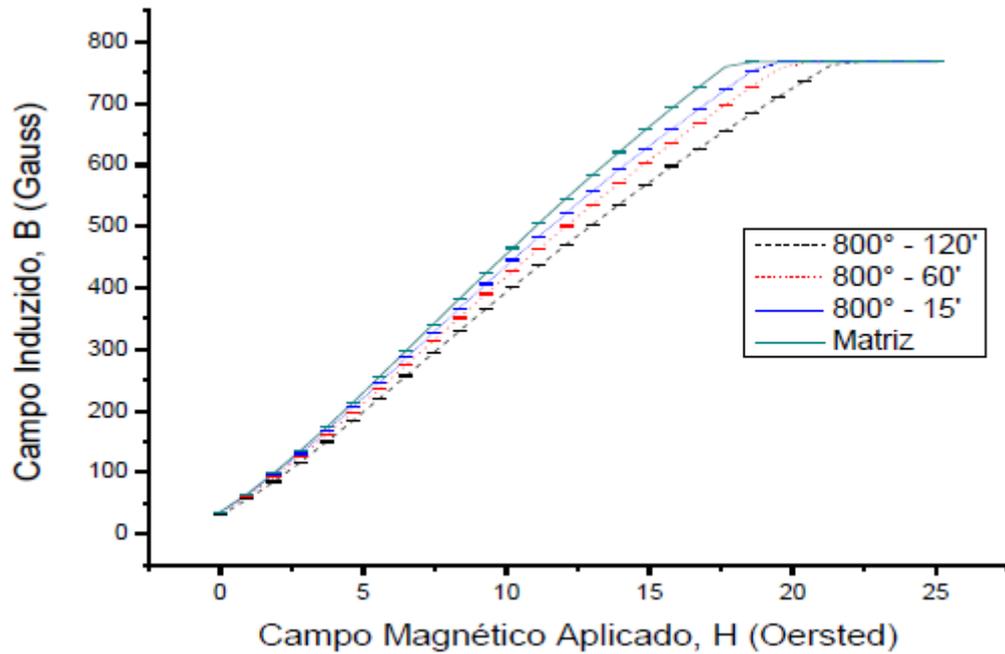
**Figura 6: Presença da fase sigma em um AID SAF 2205 tratada a 900°C por 120 min obtida por MO**



**Fonte: FIALHO, 2015.**

Fialho (2015) utilizou essa técnica de ensaio eletromagnético para verificar o comportamento da variação da permeabilidade magnética em função da precipitação da fase  $\sigma$  para um aço inoxidável duplex SAF 2205. Amostras com diferentes quantidades de fase  $\sigma$  foram obtidas pelo envelhecimento na temperatura de 800°C. Na Figura 7, são apresentados os valores de  $B \times H$  para a temperatura de 800°C e diferentes tempos de envelhecimentos (FIALHO, 2015).

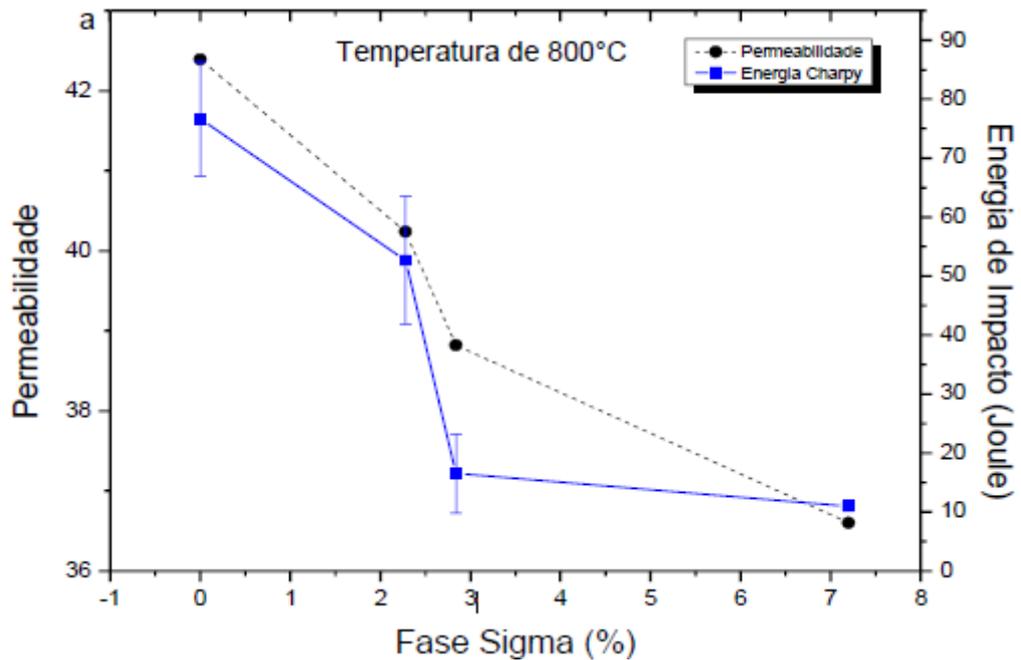
Figura 7- Curva de  $B \times H$  do AID SAF 2205 para a temperatura de 800°C e os tempos de envelhecimento de 15 minutos, 60 minutos e 120 minutos



Fonte: FIALHO, 2015.

A partir do valor da inclinação de cada uma das curvas de magnetização  $B \times H$  da Figura 7, foram calculadas as permeabilidades magnéticas para a temperatura de 800°C. A inclinação da curva de magnetização variou devido à nova fase formada ser paramagnética e reduzir o ferromagnetismo do material. Esses valores foram correlacionados com os teores de fase  $\sigma$  e com os valores de energia absorvida por impacto sendo representado na Figura 8.

Figura 8- Variação da permeabilidade e energia de impacto em função da quantidade de fase sigma

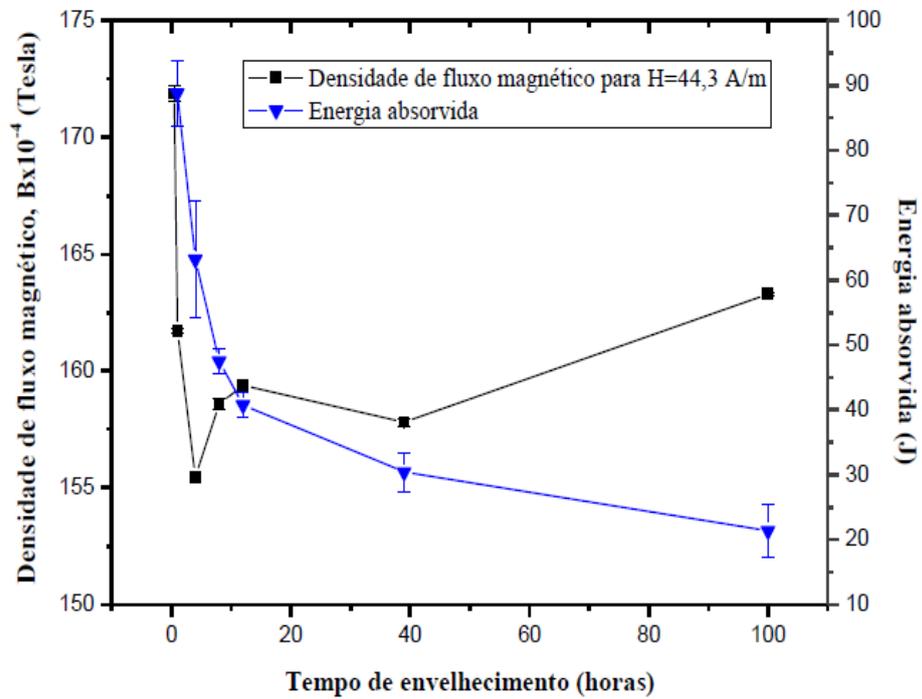


Fonte: FIALHO, 2015.

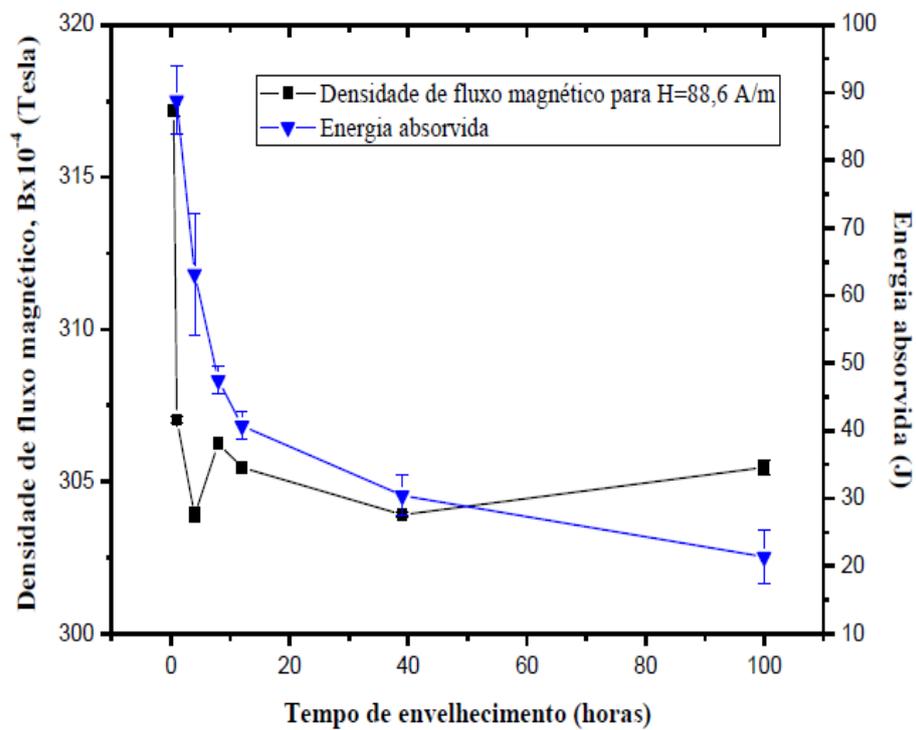
Observa-se da Figura 8 que os valores de permeabilidade magnética caíram com o aumento da fração volumétrica da fase  $\sigma$  e que os valores de energia Charpy acompanharam a mesma tendência. Fialho mostra que a técnica é capaz de acompanhar a formação da fase fragilizante  $\sigma$ , mesmo em quantidades inferiores a 5%, em que outros ensaios como de correntes parasitas, ultrassom e de medidas de ruído de Barkhausen não são precisas (FIALHO, 2015).

Barreto (2016) usou este ensaio eletromagnético para acompanhar a formação de fases fragilizantes em amostras de AID. Para isso utilizou a curva de energia absorvida por impacto para uma temperatura de 475° como referência para determinar a intensidade de campo magnético externo ideal a ser aplicado no ensaio magnético. O campo externo escolhido foi aquele cuja curva de campo magnético induzido contra tempo de envelhecimento melhor seguiu a curva de energia absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento (Figura 9).

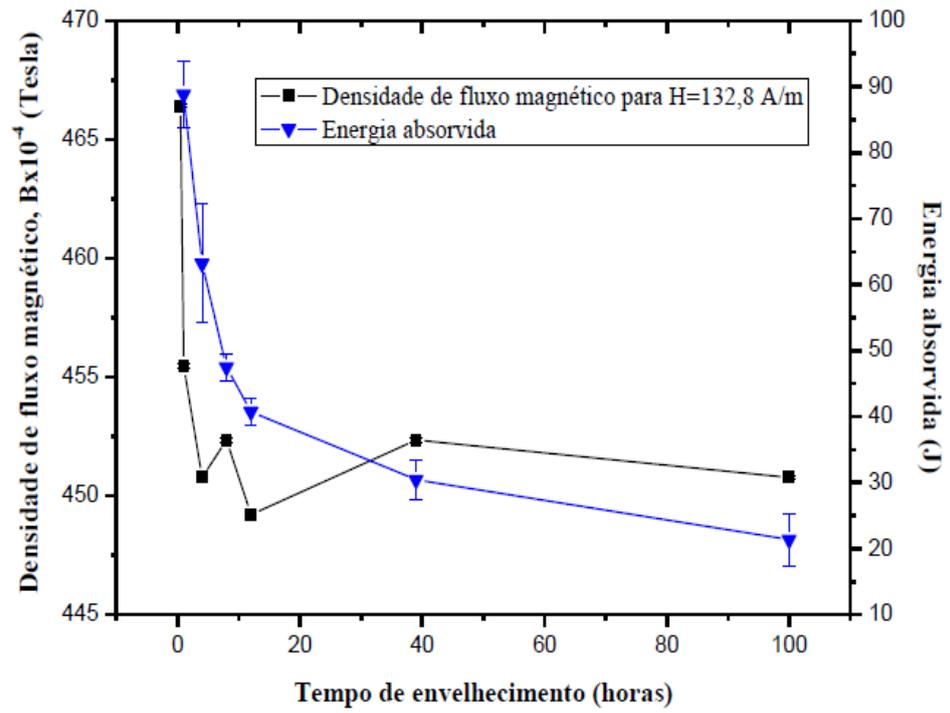
Figura 9- Campo magnético induzido e energia absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento para amostras com diferentes intensidades de campo magnético aplicado. (a) 44,3 A/m, (b) 88,6 A/m, (c) 132,8 A/m, (d) 177,1 A/m, (e) 221,4 A/m



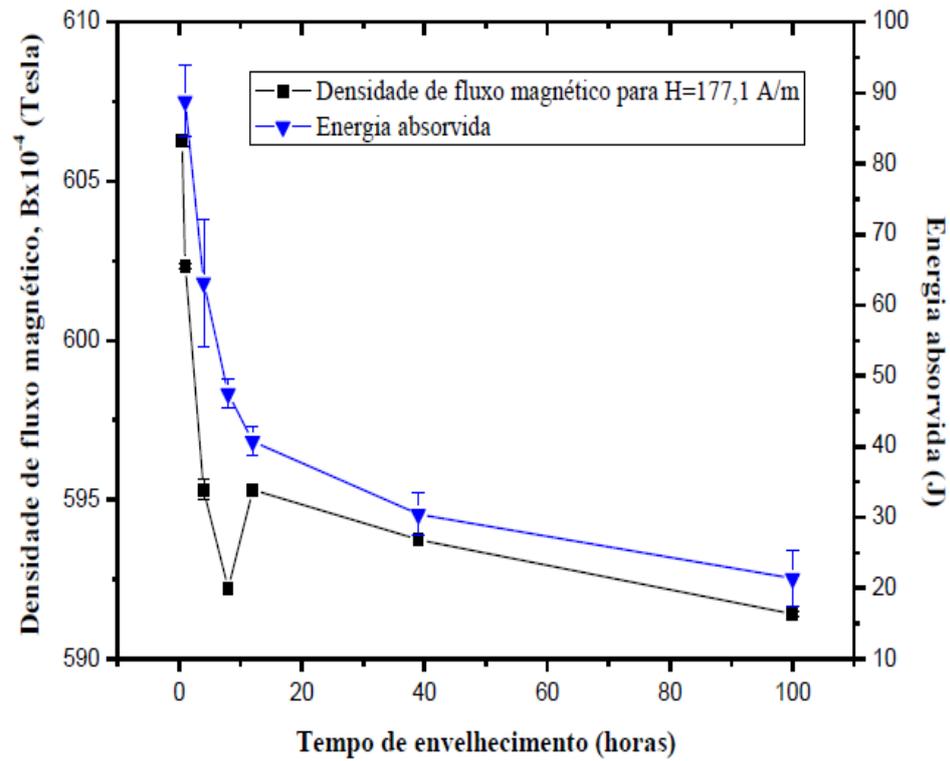
(a)



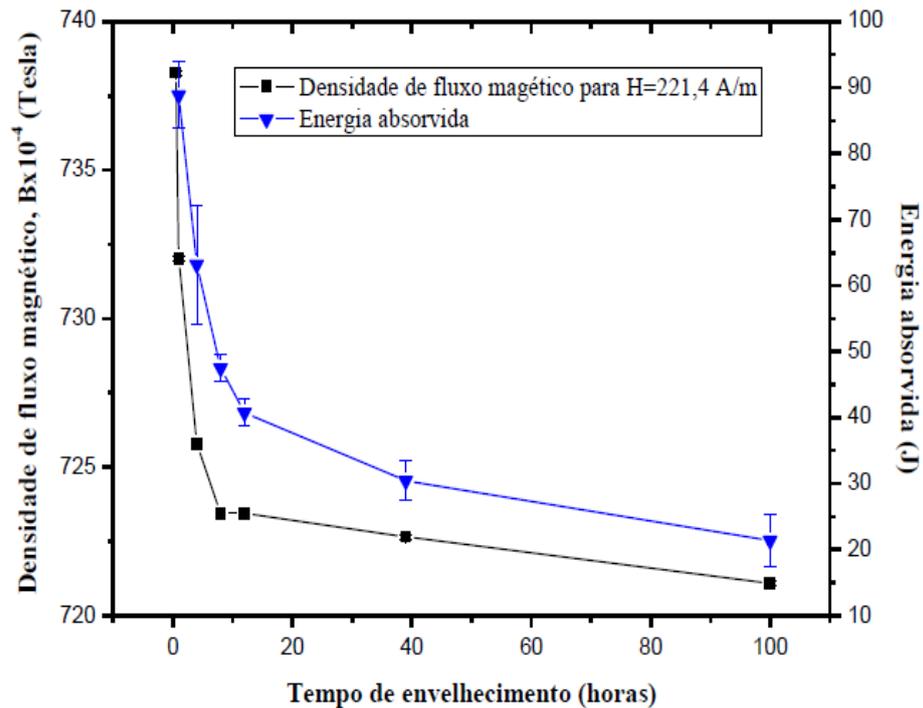
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: BARRETO, 2016.

Analisando-se as curvas da Figura 9, nota-se que as curvas (a), (b), (c) e (d), onde os campos magnéticos aplicados são inferiores a 221,4 A/m, não seguem a curva de energia absorvida por impacto tomada como referência, principalmente para os tempos de envelhecimento em que os precipitados ainda estão em formação. Isso ocorre porque a densidade de fluxo magnético é insuficiente para detectar os precipitados que ainda estão se formando, ou que ainda são pequenos e difíceis de serem detectados por baixas intensidades de campo magnético externo. No entanto, ao se fazer a análise da curva com campo magnético externo aplicado de 221,4 A/m, representada na Figura 9 (e), observa-se que o seu comportamento foi o que melhor seguiu o da curva de energia absorvida por impacto, no sentido de melhor acompanhar a fragilização do material estudado decorrente das alterações microestruturais ocorridas ao longo de todo o processo de envelhecimento térmico. Isto mostra que este campo externo produziu uma densidade de linhas de campo magnético que foi capaz de detectar com maior precisão, em relação aos outros campos externos aplicados, tanto os precipitados já consolidados como aqueles que ainda estavam se formando, dependendo do tempo de envelhecimento. Em virtude

disso, o campo magnético externo escolhido como o adequado entre os estudados, para ser aplicado no ensaio magnético visando realizar o acompanhamento da formação de fases fragilizantes no aço estudado, foi o de 221,4 A/m.

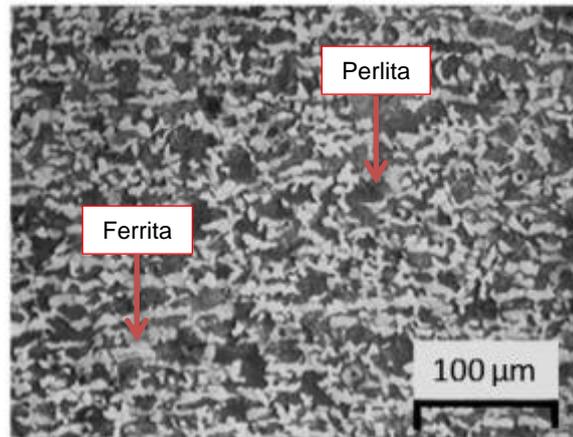
Cabe ainda destacar que a fragilização devido à formação da fase  $\alpha'$ , que tem dimensões nanométricas é difícil de analisar por meio de técnicas comuns de ensaios destrutivos, como a microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, e não destrutivos como as técnicas de ultrassom e correntes parasitas, devido às nanoestruturas formadas serem pequenas e finas (SILVA et al., 2016a), (SILVA et al., 2016b), (TAVARES et al., 2010), (SILVA et al., 2009).

Ainda da curva de energia absorvida da Figura 9 (e), percebe-se duas regiões de fragilização do material bem evidentes, tal que a primeira região ocorre em um período de envelhecimento até 8 horas seguido de um patamar acima deste tempo (SILVA et al., 2016a). Essa redução dos valores da energia absorvida por impacto do material, observada na temperatura estudada, ocorre em razão da formação dos precipitados da fase  $\alpha'$ , com dimensões nanométricas, que dificultam a movimentação das discordâncias na microestrutura do material, fragilizando-o (SILVA et al., 2016a), (SILVA et al., 2016b), (TAVARES et al., 2010).

Baseando-se nos resultados das análises de energia absorvida por impacto e campo magnético induzido, para a temperatura 475°C, pode-se concluir que os valores de campo magnéticos induzidos foram diretamente proporcionais às variações da energia absorvida por impacto, demonstrando serem sensíveis à precipitação da fase  $\alpha'$  e, por conseguinte, à fragilização do material estudado. A formação de precipitados finos dificulta a movimentação das paredes dos domínios magnéticos e reduz assim as medidas do campo magnético (MACEDO, 2018).

Outra aplicação deste ensaio de permeabilidade tem sido no estudo de anisotropia magnética. Processos de fabricação como a laminação deixam texturas nos materiais, mesmo depois de serem submetidos a tratamentos térmicos. Estes quando submetidos à aplicação de intensidades de campos magnéticos externos apresentam direções de fácil magnetização. Andrade (2016) estudou a anisotropia magnética em um aço SAE 1045 laminado e recozido na qual sua microestrutura é representada na Figura 10.

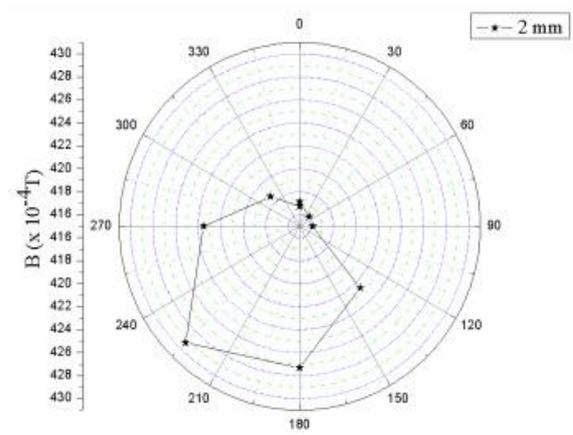
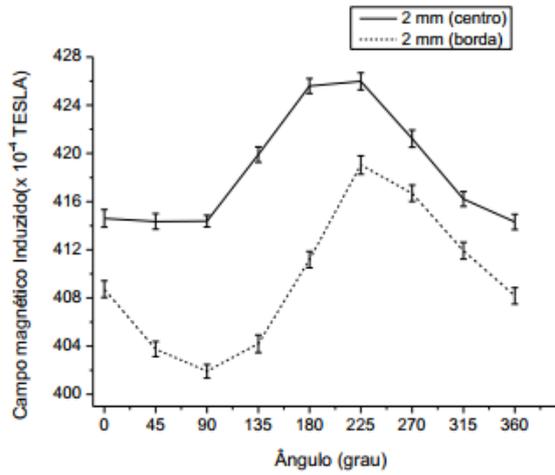
**Figura 10- Micrografia da superfície estudada do aço SAE 1045**



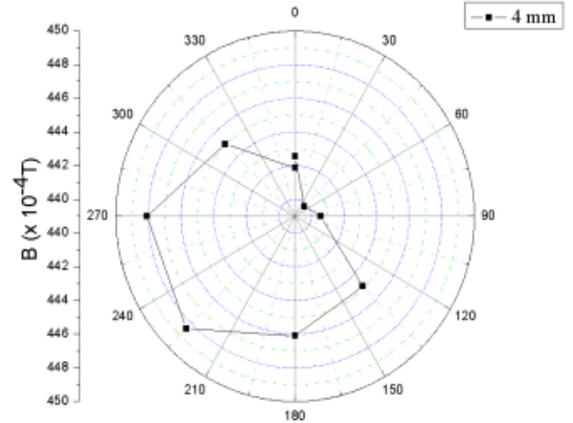
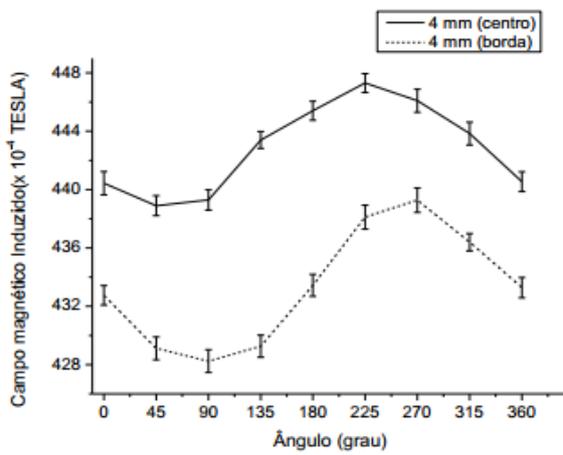
**Fonte: ANDRADE, 2016.**

A Figura 10 mostra a micrografia da superfície estudada que é transversal ao sentido de laminação. A imagem mostra os grãos de fases ferrita (fase  $\alpha$ ) e perlita (cementita lamelar + ferrita). Amostras com o diâmetro de 24 mm e diferentes espessuras foram submetidas à aplicação de intensidade de campo magnético no seu centro e na borda. Essas foram rotacionadas de  $0^\circ$  até  $360^\circ$  com incremento de  $45^\circ$ . Os resultados obtidos são apresentados na Figura 11. Observa-se da Figura 11, que os valores de campo magnético induzido foram maiores no centro e reduziram quando se aproximam da borda, isso acontece devido à permeabilidade magnética do meio (ar) interferir a permeabilidade resultante e conseqüentemente reduzir os valores medidos (ANDRADE, 2016).

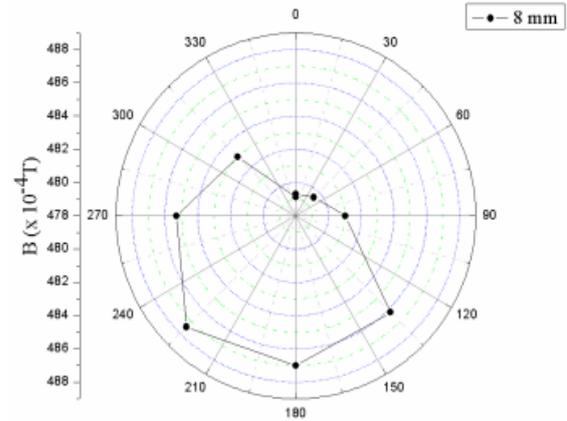
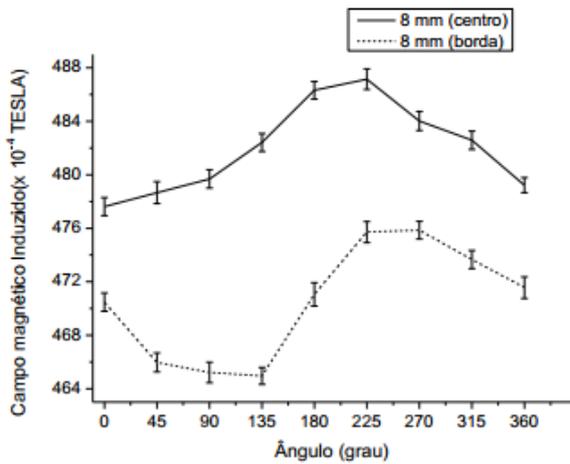
Figura 11- Variação do campo magnético induzido em função do ângulo de rotação das amostras e gráfico polar para amostras com diferentes espessuras. a) 2 mm, b) 4 mm, c) 8 mm, d) 12 mm



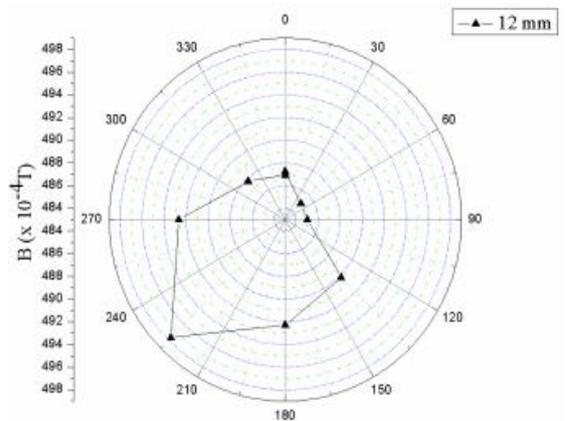
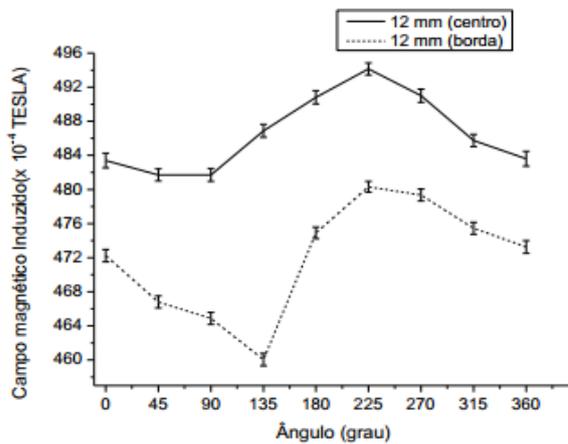
a) Espessura de 2 mm



b) Espessura de 4 mm



c) Espessura de 8 mm



d) Espessura de 12 mm

Fonte: Adaptado de ANDRADE, 2016.

Sabendo que a anisotropia é a característica que uma substância possui, no caso o aço em estudo, em que certa propriedade física (campo magnético induzido) varia com a direção. A Figura 11, mostra esse comportamento anisotrópico, ou seja, existe uma relação entre campo magnético induzido ( $B$ ) e o ângulo de incidência, pois o campo magnético induzido varia em função da variação do posicionamento da amostra relativamente ao campo magnético incidente e também devido a rotação da amostra.

Ainda da Figura 11 observa-se que as medidas realizadas no centro apresentam um pico em torno do ângulo de  $225^\circ$  que corresponde ao ângulo de

45°, isso se deve ao sensor *Hall* está com o fluxo magnético apontado para o polo sul. Esse fenômeno é observado tanto nas Figuras das medições feitas no centro quanto nos seus gráficos polares. Este ângulo de 225° é justamente o ângulo que corresponde ao de fácil magnetização por apresentar maiores valores de campos induzidos, mostrando que as perdas magnéticas são menores nesta direção (ANDRADE, 2016).

## 2.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO AO ELETROMAGNETISMO

O desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos (MEF) teve sua origem no final do século XVIII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos. Durante mais de um século, diversos matemáticos desenvolveram teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas, entretanto, pouco se evoluiu devido à dificuldade e à limitação existente no processamento prático de equações algébricas. O desenvolvimento prático dessa análise ocorreu somente muito mais tarde em consequência dos avanços tecnológicos, por volta de 1950, com o advento da computação. Isso permitiu a elaboração e a resolução de sistemas de equações complexas (LOTTI et al., 2006).

A utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) é muito importante na pesquisa e no desenvolvimento de produtos e é aplicado nas mais diversas áreas da engenharia. Com o método pode-se, por exemplo, calcular a distribuição térmica em transformadores ou o conjugado em máquinas girantes sem a necessidade da construção de protótipos (TEDESCO; HOFFMANN, 2015).

A distribuição de campos eletromagnéticos em quaisquer dispositivos, bem como efeitos da física mecânica obedecem a equações diferenciais de segunda ordem. A resposta analítica para essas equações, muitas vezes, é de difícil obtenção. Dessa forma, engenheiros e projetistas utilizavam métodos empíricos para resolver boa parte dos problemas. Em particular, com o fim da segunda guerra mundial, várias áreas, como a de criação de estruturas, a aeronáutica e pesquisa

espacial, necessitavam de um método preciso. Com o surgimento do método na década de 1950, na aeronáutica, esse se difundiu, mas somente por volta de 1970 que o Método dos Elementos Finitos (MEF) passou a ser empregado ao eletromagnetismo de forma ampla (TEDESCO; HOFFMANN, 2015).

A solução de campos magnéticos é uma importante etapa no projeto de dispositivos eletromagnéticos. O MEF é atualmente uma ferramenta de cálculo que permite a introdução de técnicas CAD (projeto assistido por computador) na concepção de um dispositivo ou estrutura a partir de modelos teóricos matemáticos representativos de seu funcionamento (SILVA, 1991).

Uma consideração a se levar em conta sobre o método (MEF) é a limitação do espaço computacional. Obviamente, nenhum computador tem a capacidade de armazenar dados ilimitados, por isso, deve-se limitar ao domínio computacional, que deve ser grande o suficiente para absorver toda estrutura a ser analisada, e uma condição de contorno deve ser utilizada para simular a sua extensão ao infinito (OLIVEIRA, 2010).

Quando se fala em termos de simulação utilizada, pode-se dizer que independentemente do programa, de modo geral essa é composta por três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento, que em cada etapa é definida por um grupo de ações necessárias à execução da referida etapa. A seguir, são apresentadas as definições de cada etapa.

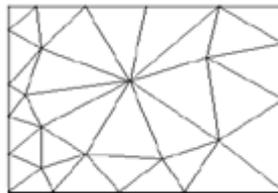
### **2.3.1. Pré-processamento**

Esta etapa é responsável pela preparação dos dados. Inicialmente é feita a definição da geometria de trabalho, que tem como objetivo a representação computacional de suas formas e dimensões. Depois são fornecidas as características físicas dessas regiões, na qual o operador fornece as informações relativas ao comportamento físico do domínio como, condutividade, permeabilidade, descrição de fontes (fontes de calor, de corrente, etc.), condições de contorno e condições iniciais. A seguir é feita a discretização do domínio, que corresponde à passagem do meio contínuo a sua representação discretizada. Para o MEF, a discretização resulta em dividir o domínio em um conjunto de subdomínios

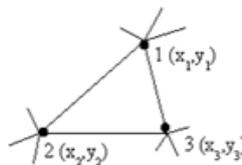
(elementos finitos) respeitando as fronteiras e interfaces do domínio inicial (SILVA, 1991).

A geração da discretização ou malha de elementos finitos geralmente é feita apenas com elementos triangulares, pois é um elemento de 1° ordem. Neste, o potencial elétrico/magnético varia linearmente dentro do triângulo. Isto permite modelar as grandezas elétricas dentro do elemento triangular através de um sistema de 3 equações (OLIVEIRA, 2010). A Figura 12, mostra um exemplo de malha incluindo somente elementos triangulares, assim como um elemento triangular isolado.

**Figura 12- Exemplo de malha de Elementos Finitos, incluindo somente elementos triangulares (a), elemento triangular isolado (b)**



**(a)**



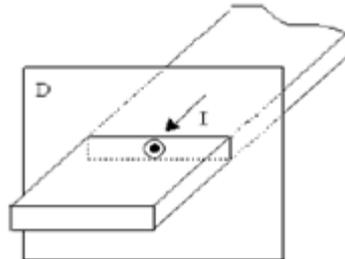
**(b)**

**Fonte: OLIVEIRA, 2010.**

Além dessas funções já citadas, podemos elencar mais um ponto importante a ser definido nesta etapa, ou seja, o tipo de simetria do problema. A simetria de um problema pode ser planar ou axissimétrica. Uma simetria é planar quando o eixo de simetria do problema é uma reta perpendicular ao plano que contém a geometria do problema. A simetria pode ser axissimétrica quando se utilizam problemas em 3D,

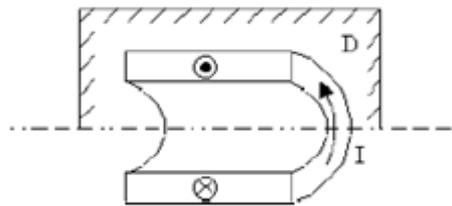
que são representados em 2D e que envolvem uma simetria rotacional em relação a um eixo reto contido na área do plano que contém o problema (OLIVEIRA, 2010). A Figura 13 ilustra um problema com simetria planar, enquanto que as Figuras 14 e 15 mostram um problema com simetria axissimétrica.

**Figura 13- Problema com simetria planar**



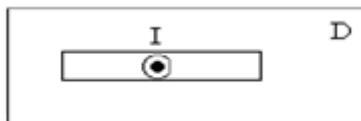
Fonte: OLIVEIRA, 2010.

**Figura 14- Problema real com representação em 3D**



Fonte: OLIVEIRA, 2010.

**Figura 15- Representação do mesmo problema da Figura 9 em um plano, usando simetria axissimétrica**



Fonte: OLIVEIRA, 2010.

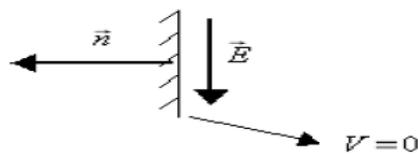
### **2.3.2. Processamento**

Processamento ou também chamado de módulo de cálculo, procede à aplicação do MEF propriamente dito, isto é, a resolução do sistema de equações

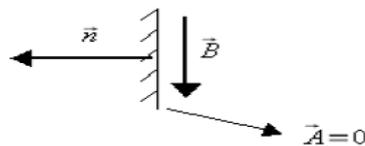
linear ou não-linear que provem da formulação matemática do problema. Ele recebe como entrada a discretização do domínio, as características físicas e as condições de contorno. Na saída, fornece os valores das grandezas procuradas e as variáveis de estado em cada nó da malha de elementos finitos (SILVA, 1991).

As duas principais condições de contorno utilizadas são as condições de contorno de Dirichlet e de Neumann. A primeira condição é utilizada quando se quer definir um mesmo valor de potencial elétrico/magnético ao longo da parte da fronteira do domínio do problema. A segunda condição é empregada nas partes da fronteira do domínio do problema, nos quais o potencial elétrico/magnético não apresenta variação na direção ortogonal a estas partes da fronteira (OLIVEIRA, 2010). As condições de contorno de Dirichlet e Neumann para problemas de eletrostática e magnetostáticas são ilustradas nas Figuras 16 e 17.

**Figura 16- Condições de contorno de Dirichlet, para problemas de eletrostática (a) e para problemas de magnetostática (b)**



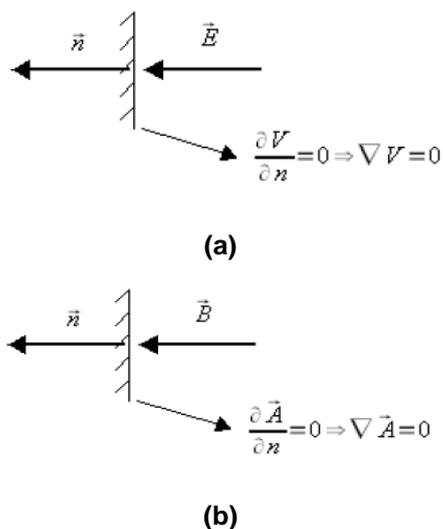
(a)



(b)

Fonte: OLIVEIRA, 2010.

**Figura 17- Condições de contorno de Neumann, para problemas de eletrostática (a) e para problemas de magnetostática (b)**



Fonte: OLIVEIRA, 2010.

No geral, as condições de contorno de problemas de eletrostática analisados em 2D, só são definidas para a fronteira do domínio do problema, e, a partir destes valores, o vetor campo elétrico em cada um dos subdomínios do problema pode ser definido através das equações de contorno para problemas de eletrostática (OLIVEIRA, 2010).

### 2.3.3. Pós-processamento

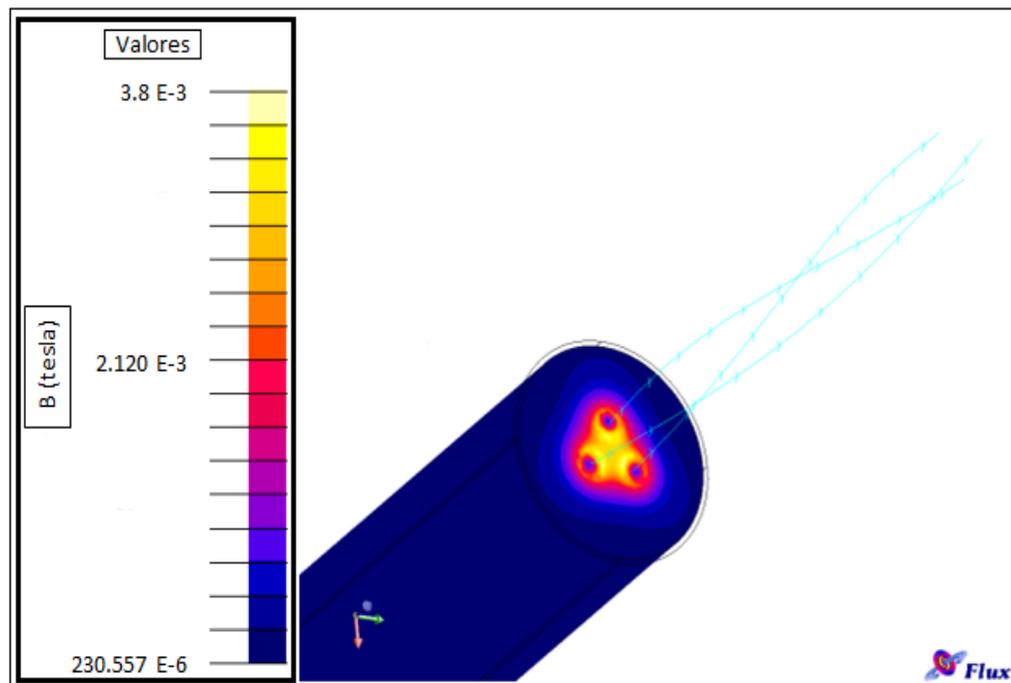
Esta etapa consiste na apresentação dos resultados simulados, que são informações significativas, tais como, grandezas locais (indução magnética, etc.), ou grandezas globais resultantes de uma interação (fluxo, forças, torques eletromagnéticos, etc.). Estas informações podem ser apresentadas sob forma de gráficos para facilitar a interpretação do operador, tais como de linhas equipotenciais, curva de evolução do campo magnético, densidade de fluxo magnético, entre outros (SILVA, 1991).

Atualmente, existem alguns trabalhos utilizando o MEF com o intuito de analisar os diversos problemas correntes na engenharia. Tratando-se

particularmente de problemas envolvendo o eletromagnetismo, serão citados alguns trabalhos com diferentes abordagens.

Marzo (2010) apresentou metodologias de análises de tensões induzidas em cabos de sinal umbilical a partir da utilização do Método dos Elementos Finitos. A aplicação consiste na avaliação de tensões induzidas nos condutores de sinal, a partir do acoplamento mútuo do fluxo magnético originado das correntes dos circuitos de potência do cabo umbilical (MARZO, 2010). A Figura 18 apresenta a simulação feita para o cabo.

**Figura 18- Distribuição equipotencial de indução magnética no material isolante do cabo umbilical para a simulação tridimensional**

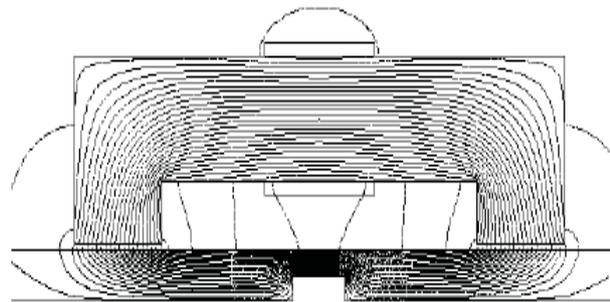


Fonte: Adaptado de MARZO, 2010.

Utilizando a técnica de condutores não malhados foram obtidos resultados satisfatórios para uma configuração simples de cabo umbilical, pois foi possível identificar a atenuação da tensão induzida quando realizado o trançamento dos condutores. Estes resultados serviram de subsídio para o desenvolvimento das metodologias de fatiamento e transposição baseadas no MEF 2D.

Li (2012) utilizou modelos de elementos finitos para investigar uma técnica eletromagnética de baixa frequência (LFET) na detecção de defeito de tubulação. As simulações tridimensionais foram feitas no programa ANSYS com uso do Parametric Desing Language (APDL). Os sinais de vazamento de fluxo de diferentes defeitos foram obtidos a partir dos modelos estabelecidos. A partir de resultados experimentais comprovou-se a viabilidade do tubo baseado na técnica eletromagnética de baixa frequência. A detecção de defeitos foi demonstrada e a técnica foi recomendada para aplicações em testes não destrutivos de encanamentos de caldeira de água (LI et al., 2012). Na Figura 19 são representadas as linhas de fluxo magnético mostrando os vazamentos desses nas regiões próximas aos defeitos.

**Figura 19- Linhas de fluxo magnético**



**Fonte: LI, 2012.**

Praxedes (2012) sabendo que as propriedades dos materiais ferromagnéticos são bastante influenciadas pelo estado microestrutural e o estado de tensões, percebeu que o monitoramento do comportamento magnético dos materiais estruturais pode ser utilizado para a caracterização de seu estado interno. A partir disso, ele desenvolveu um sistema de medição experimental para a realização de ensaios não destrutivos baseados na avaliação das características magnéticas do material e sua correlação com o estado de tensão e de microestrutura. O sistema foi aplicado na avaliação da degradação microestrutural causada pelo processo de laminação. Foi projetado e construído um sensor para realizar simultaneamente a magnetização e o monitoramento do comportamento magnético do material

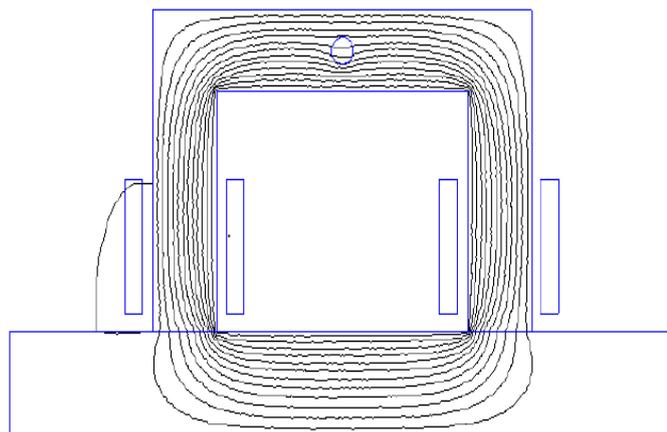
inspecionado, este pode ser observado na Figura 20. Os parâmetros operacionais do sensor como frequência, corrente e espessura da camada de ar entre o sensor e a superfície do material foram estudados através da simulação com o Método dos Elementos Finitos. Os ensaios apresentaram resultados coerentes com o estado final provocado pelo processo de laminação a frio e com a literatura, caracterizando satisfatoriamente o estado do material estudado (PRAXEDES, 2012). A Figura 21 representa a simulação feita pelo Método dos Elementos Finitos.

**Figura 20- Esquema do sensor usado na simulação**



Fonte: Adaptado de PRAXEDES, 2012.

**Figura 21- Representação da simulação por MEF**



Fonte: PRAXEDES, 2012.

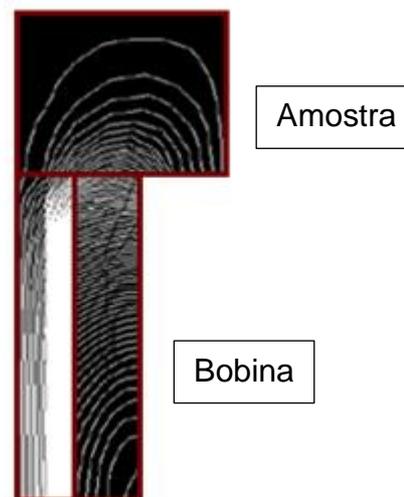
A simulação representada na Figura 21, mostra as linhas de campo do circuito magnético para uma corrente de 0,1 A. Praxedes chegou à conclusão que as

linhas de campo se tornam menos espaçadas com o aumento da corrente, o que significa aumento da densidade de fluxo magnético.

Cavalcante (2013) estudou a potencialidade de utilização de sensores de efeito *Hall* para a análise do comportamento da densidade do fluxo magnético e sua interação com um material ferromagnético. Amostras de um aço SAE 1045 com diferentes geometrias foram utilizadas para a determinação do efeito das dimensões em relação ao campo magnético aplicado na peça ensaiada. O efeito da espessura também foi estudado por meio de simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos. Cavalcante, mostrou com resultados experimentais e simulados (Figura 22), que com a geometria estudada, existe um valor de espessura a partir da qual as medidas de densidade de linhas de campo passam a independer da mesma. O campo aplicado no material foi de 270 Gauss e para uma espessura de 11 mm, pode-se perceber na Figura 22 que as linhas de campo percorrem toda espessura sem a interferência do meio externo, o que representa que existe uma espessura na qual as linhas de campo passam a independer da mesma (CAVALCANTE, 2013).

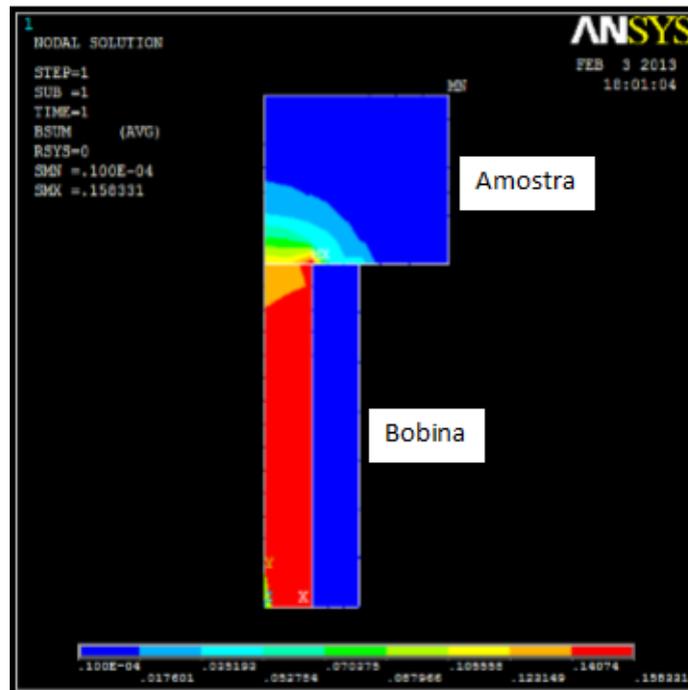
**Figura 22- Efeito da espessura. a) Linhas de fluxo magnético, b) Densidade de fluxo magnético**

**a) Linhas de fluxo magnético**



**Fonte: Adaptado de CAVALCANTE, 2013.**

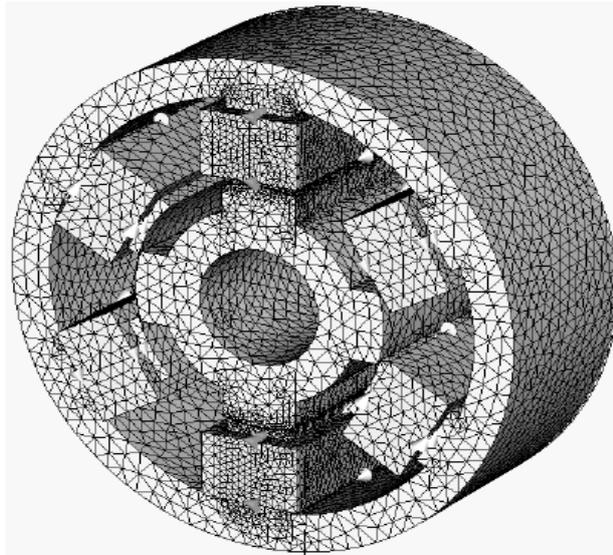
## b) Densidade de fluxo magnético



Fonte: Adaptado de CAVALCANTE, 2013.

Oliveira (2013) apresentou um estudo sobre as características de magnetização estática de um MRRV – Motor Rotativo de Relutância Variável de 1 CV, com base na simulação do projeto da máquina utilizando análise por Elementos Finitos 3D com malhas tetraédricas e hexaédricas. O objetivo era investigar que tipo de malha mais se adequava a esse estudo. Neste trabalho, verificou-se a aproximação e coerência dos resultados a partir da simulação estática do modelo do MRRV pelo MEF. Na Figura 23, é ilustrado o modelo MRRV após a geração da malha tetraédrica.

**Figura 23- Modelo MRRV com malha tetraédrica**



**Fonte: OLIVEIRA, 2010.**

Após a simulação verificou-se que dentre as malhas analisadas, a tetraédrica apresentou resultados mais próximos dos experimentais, portanto foi escolhida como ferramenta para a validação do projeto do MRRV (OLIVEIRA, 2013).

Esta seção mostrou o princípio do ensaio eletromagnético que faz parte do estudo do presente trabalho. Foram apresentadas aplicações desse e o quanto o Método dos Elementos Finitos pode auxiliar no melhor entendimento do comportamento da interação campo magnético e material. A seguir será apresentada a metodologia empregada no estudo.

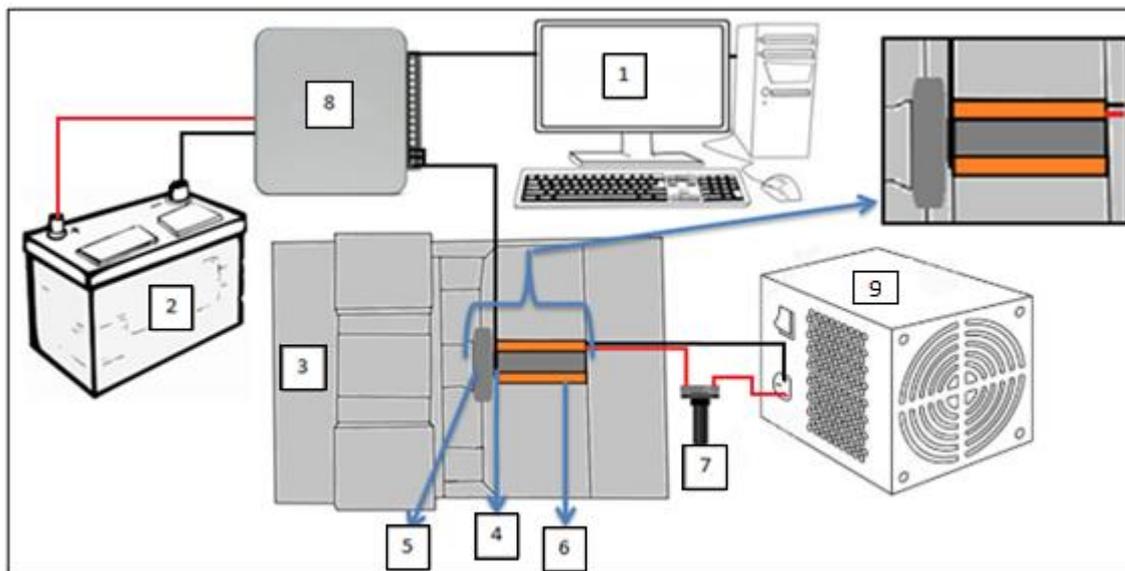
### **3. METODOLOGIA**

A seguir, é apresentada a metodologia utilizada para a simulação da bancada de ensaio eletromagnético baseado em medidas de permeabilidade dos materiais. Inicialmente, será mostrada a definição das regiões dessa bancada, necessária para a simulação, bem como o levantamento de seus parâmetros. Os ensaios experimentais necessários para calibração são definidos, bem como serão extrapolados os resultados. Além disso, o procedimento para estudo de descontinuidades será apresentado.

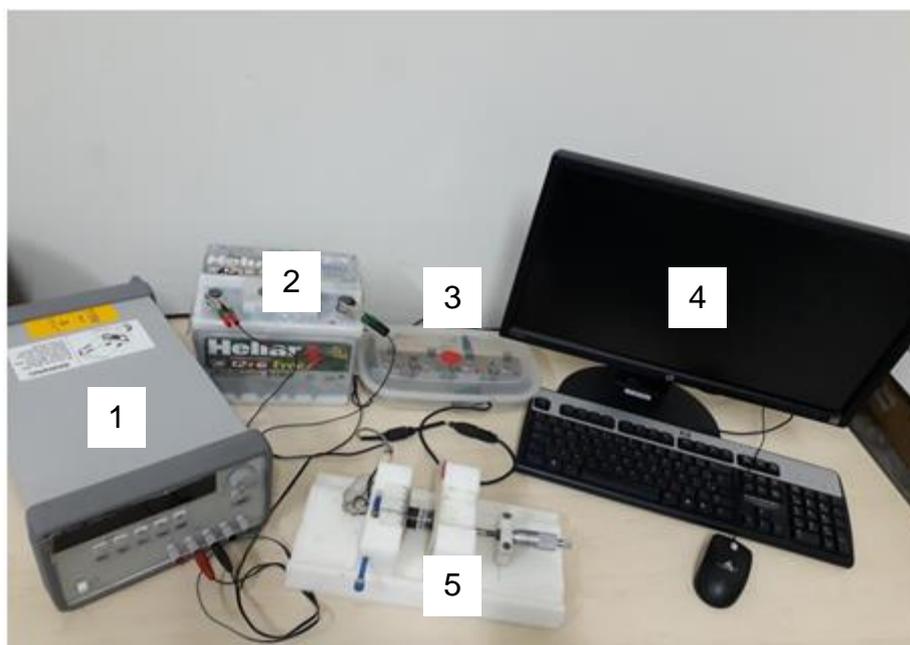
#### **3.1. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE**

Desenvolvido no laboratório do Grupo de Simulação e Comportamento de Materiais (GSCMat) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). A configuração experimental pode ser melhor compreendida através da Figura 24 (a) e a foto experimental está representada na Figura 24 (b).

Figura 24- a) Configuração experimental: (1) computador; (2) sistema de alimentação; (3) bancada; (4) sensor *Hall*; (5) amostra; (6) bobina; (7) potenciômetro ; (8) placa de aquisição de dados e (9) Fonte de alimentação. b) Configuração real: (1) Fonte, (2) Bateria, (3) Placa de aquisição de dados, (4) Computador, (5) Bancada



a)



b)

Fonte: Própria.

O equipamento experimental de teste da Figura 24 (a) é uma bancada (3), onde a mesma é constituída por uma bobina (6) que tem suas especificações apresentadas na Tabela 1 e é alimentada por uma fonte de modelo Agilent E3634A. Um potenciômetro (7) é utilizado para ajustar a alimentação de entrada da bobina. Um sensor de efeito *Hall* (4) linear modelo SS495A da Allegro Micros Systems com sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss é utilizado para medir a densidade de fluxo magnético resultante da interação da intensidade de campo magnético aplicado e a amostra (6). Para aquisição dos dados foi utilizada uma placa multicanal (8) com um conversor analógico-digital de 10 bits, uma saída regulada de 5 V, alimentada por uma tensão estabilizada de 12 V, uma bateria automotiva (2) capaz de fornecer uma tensão contínua de 12 V e corrente de 55 A foi utilizada para a alimentação da mesma, além de um computador (1) para análise dos dados. A Figura 24 (b) mostra a configuração real.

**Tabela 1: Especificações da bobina**

<b>Permeabilidade magnética (<math>\mu_r</math>)</b>	<b>21,2567</b>
<b>Resistência elétrica (R)</b>	<b>72 <math>\Omega</math></b>
<b>Relação N/L (N=N° de espiras, L= Comprimento da bobina)</b>	<b>133,8</b>
<b>Comprimento da bobina</b>	<b>42 mm</b>

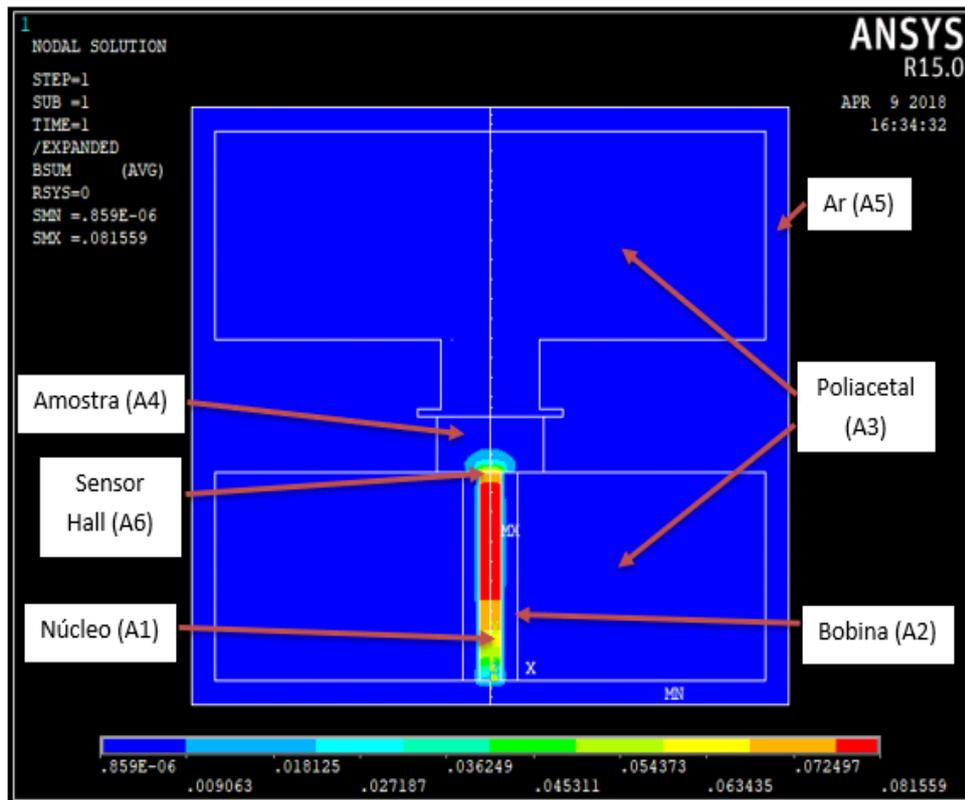
Fonte: Adaptado de LEITE, 2014.

### 3.2. DEFINIÇÃO DAS REGIÕES E PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA A SIMULAÇÃO

A bancada (Figura 25) foi simulada em simetria axissimétrica com o programa ANSYS baseado no Método dos Elementos Finitos. Esta foi confeccionada em duas partes de material poliacetal. Na parte inferior dessa é posicionada uma bobina com núcleo ferrítico, enquanto que na parte superior temos a amostra fixada. O ar ao redor da amostra e da bancada também está sendo considerado nas simulações. As

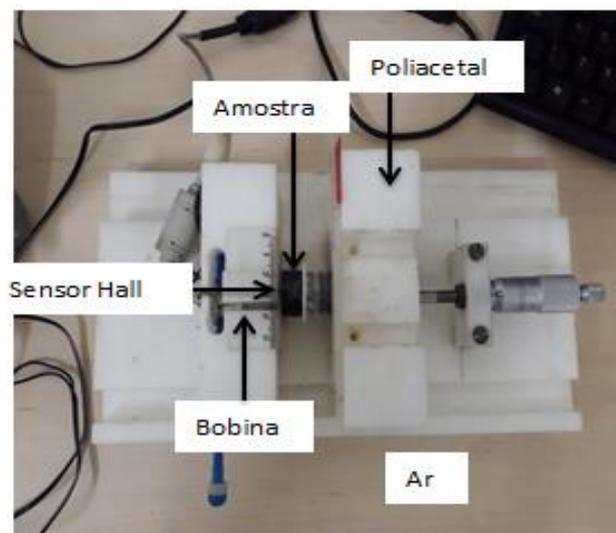
dimensões de cada área da Figura 25 foram levantadas a partir da bancada experimental (Figura 26).

**Figura 25- Bancada simulada com dimensões mantendo proporcionalidades**



Fonte: Própria.

**Figura 26-Área da bancada experimental a ser simulada**



Fonte: Própria.

Os parâmetros necessários para a simulação são divididos por regiões nas quais serão detalhados a seguir.

A região A1 representa o núcleo da bobina. Este é responsável por direcionar o campo magnético em apenas uma região da amostra. Um dado importante no ato da simulação é o valor da permeabilidade relativa do mesmo que é de 21,2567.

A região A2 representa o enrolamento da bobina. Esta é responsável por aplicar uma intensidade de campo magnético externo na amostra e o seu valor de permeabilidade relativa é 1.

A região A3 é constituída por poliacetal e abrange boa parte da bancada e tem permeabilidade relativa de 2,3. Esta é responsável pela fixação da bobina e da amostra. Esse material é utilizado em várias aplicações e foi escolhido por ter baixa permeabilidade e facilidade de usinagem.

A região A4 corresponde à amostra a ser estudada. A sua permeabilidade relativa e geometria irão variar de acordo com os valores da Tabela 2, na qual os valores 2, 4, 6 e 8 mm de espessura são referentes aos valores reais e simulados, os demais valores são apenas para medidas simuladas. Com relação ao diâmetro, também da Tabela 2, o diâmetro de 24 mm corresponde a medidas reais e simuladas, os demais diâmetros corresponde a medidas simuladas.

**Tabela 2- Valores referentes à amostra**

<b>Permeabilidades relativa</b>	<b>Espessuras</b>	<b>Diâmetros</b>
<b>De 1 (Paramagnético) até 51,667 (Aço SAE 1045, Ferromagnético) com incremento de 10.</b>	2, 4, 6, 8, 11, 14, 17 e 20 mm	6, 12, 16, 20, 24, 30, 40 e 50 mm

A região A5 representa o ar. Este é considerado nas simulações por estar diretamente ligado à amostra e conseqüentemente influenciando nos resultados. O valor de permeabilidade relativa do ar é 1.

A região A6 é referente ao sensor *Hall* e corresponde ao ponto onde serão realizadas as medições da simulação, que corresponde ao valor da densidade de campo magnético ao penetrar na peça.

### 3.3. DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO NECESSÁRIA PARA SIMULAÇÃO

A intensidade de campo magnético externo necessário para a calibração da simulação é um parâmetro importante. Entretanto, como os detalhes utilizados da bobina como, dimensões e material do carretel da bobina não são exatamente conhecidos, a intensidade aplicada experimentalmente não pode ser empregada diretamente para a calibração da simulação. Deste modo, será determinado inicialmente o  $H$  experimental ideal para medições para um material ferromagnético e paramagnético. De posse desse  $H$  e os campos magnéticos induzidos por ele nas amostras, será determinada por simulação a intensidade de campo magnético equivalente no programa a ser utilizado.

#### 3.3.1. Determinação do $H$ ideal experimental

Para determinar o  $H$  ideal experimental foram utilizados os resultados da tese de LEITE, (2014). Amostras de um aço SAE 1045 e alumínio ASTM 6261, de 24 mm de diâmetro e espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, e 11 mm, foram submetidas à aplicação de campo magnético ( $H$ ) no centro e na borda da amostra, para se verificar o comportamento da curva de magnetização  $B \times H$ . O valor de 14,9 Oe foi determinado como  $H$  ideal experimental.

#### 3.3.2. Definição da região a ser simulada

Para a definição da região a ser simulada foram feitas simulações com as medidas reais e com medidas reduzidas da bancada, desta maneira foi possível definir o modelo ideal para a continuação das simulações, tendo em vista reduzir o tempo de processamento das simulações. O ensaio com uma amostra de 11 mm de espessura e diâmetro de 24 mm foi simulada para determinar a região a ser

estudada. O valor de densidade de fluxo magnético experimental de 753,25 Oe foi utilizado com referência na região do sensor.

### **3.3.3. Definição da malha**

A partir da definição da região a ser simulada é possível definir a malha do modelo para as simulações. A malha representa a divisão dos elementos do modelo por meio de equações que garantem a criação de vários nós (GIL, 2014). Foram utilizadas duas malhas para definir qual malha será utilizada. Uma com densidade de razão igual a 1 e outra com densidade de razão igual a 2. O objetivo é determinar a malha que melhor simulasse a amostra de 11 mm do item anterior.

### **3.3.4. Determinação da intensidade de campo magnético induzido equivalente para simulação (Curva de Calibração)**

Os valores de campo magnéticos induzidos obtidos pela aplicação do  $H$  ideal para os materiais ferromagnéticos e paramagnéticos serão utilizados para calibração da simulação. Será determinado através de simulações o valor  $H$  do Ansys necessário a produzir os mesmos valores de campos magnéticos induzidos obtidos experimentalmente. Esse será utilizado como o equivalente ao experimental.

## **3.4. SIMULAÇÃO DO ENSAIO ELETROMAGNÉTICO**

### **3.4.1. Estudo do efeito da espessura para diferentes permeabilidades**

A partir do  $H$  ideal simulado serão feitas as simulações de amostras com diferentes espessuras, ou seja, de 2 a 20 mm (Tabela 2) e diferentes permeabilidades, sendo os valores de permeabilidades variando de paramagnética à ferromagnética. O objetivo será obter as limitações do ensaio em função desses parâmetros.

### **3.4.2. Estudo do efeito do diâmetro para diferentes permeabilidades**

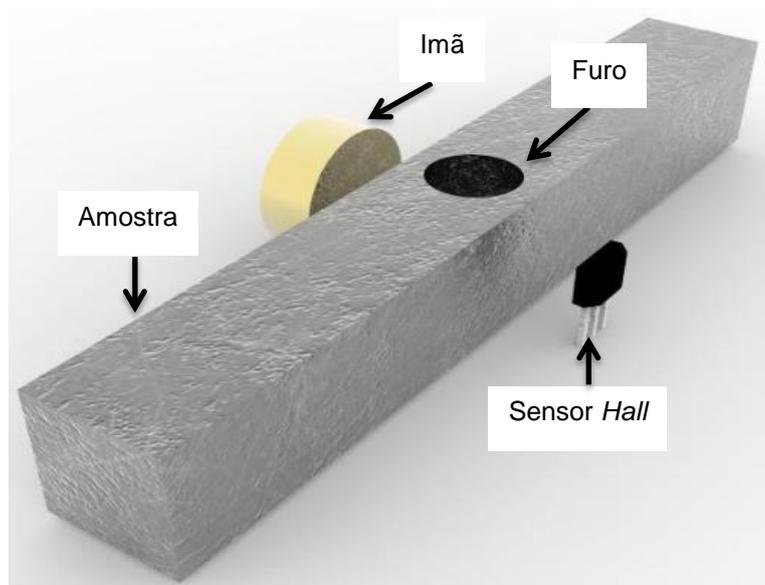
O estudo do efeito do diâmetro para diferentes permeabilidades será feito para definir até que diâmetro o valor de  $B$  independe do mesmo, bem como o menor diâmetro capaz de ser utilizado em medições. Serão feitas simulações com medições de densidade de fluxo magnético para diâmetros de 6 a 50 mm (Tabela 2). As espessuras utilizadas nas simulações são de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm.

### **3.4.3. Estudo do uso do ensaio eletromagnético para detecção de descontinuidades, um estudo de caso**

Ensaio não destrutivo como o de ultrassom e correntes parasitas são empregados para análise tanto de variações microestruturais como de descontinuidades. Esta se caracteriza por formação de regiões como porosidades e trincas no interior do material. No presente trabalho, furos de 2 mm e 6 mm de diâmetro representaram descontinuidades no interior de uma amostra de aço SAE 1045 com 63 mm de comprimento, 9 mm de largura e 9 mm de altura e foram simuladas pelo Método dos Elementos Finitos com o objetivo de ver a potencialidade do ensaio em detectá-las. Para comparação, uma outra amostra sem furo do mesmo material foi utilizada como referência.

Um ímã foi posicionado nas amostras de aço com furo e sem furo para a aplicação do campo magnético. Para fazer a medição de densidade de fluxo magnético e observar a interação material / campo magnético foi utilizado o mesmo sensor *Hall* da bancada do ensaio eletromagnético. A Figura 27, mostra o esquema de medição.

**Figura 27- Esquema de medição de descontinuidades em uma amostra de aço**



**Fonte: Própria.**

As medidas de fluxo magnético foram realizadas no centro de cada amostra e deslocadas de 8 mm, 16 mm e 24 mm, em relação ao centro.

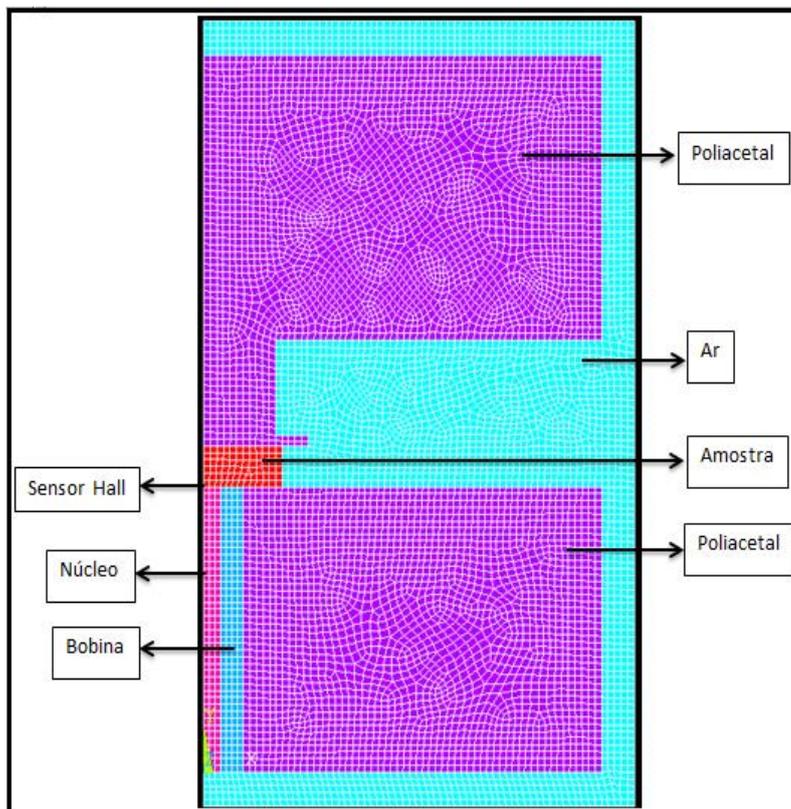
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta inicialmente a definição da região a ser simulada apresentando qual a melhor malha a ser utilizada nas simulações, a qual é de grande importância nesse tipo de simulação pelo Método dos Elementos Finitos, pois interfere diretamente nos resultados (GIL, 2014). Na segunda parte, temos a determinação da curva de calibração que define o valor de  $H$  a ser utilizado nas simulações que corresponde ao valor de  $H$  usado experimentalmente. Em seguida, é realizado o estudo da influência da espessura, diâmetro e permeabilidade do material no ensaio eletromagnético analisado. Este estudo é feito com o auxílio da simulação da variação da densidade de fluxo magnético pelo Método dos Elementos Finitos. Por último, um estudo de caso é realizado para determinação de descontinuidades em um aço 1045.

### 4. 1. DEFINIÇÃO DA REGIÃO A SER SIMULADA

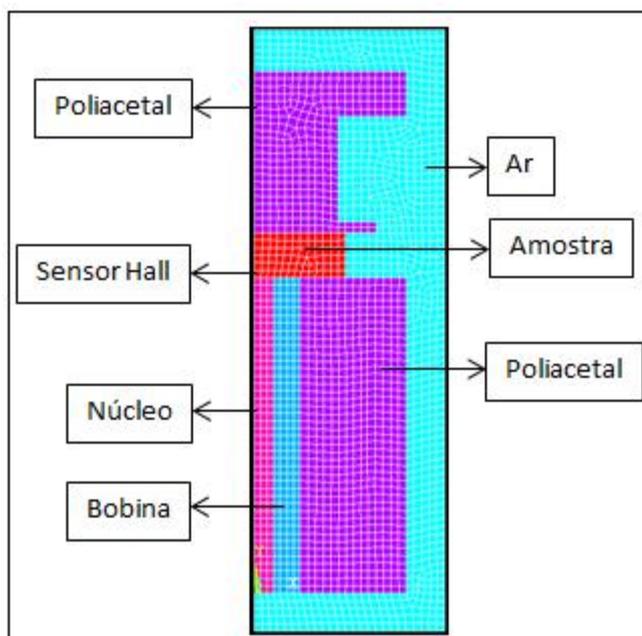
Para a definição da região a ser simulada foram feitas inicialmente simulações com as medidas reais da bancada representada na Figura 28, e em uma região menor com medidas reduzidas representada na Figura 29.

Figura 28- Modelo com medidas reais



Fonte: Própria.

Figura 29- Modelo com a redução da região de poliacetal e ar



Fonte: Própria.

Observa-se da Figura 28, que o conjunto formado por bobina, núcleo, sensor e amostra, que correspondem à região de medição do ensaio eletromagnético, está contido numa região de poliacetal e ar. Contudo, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento da simulação, as partes formadas pelo poliacetal e ar foram reduzidas por apresentarem permeabilidades próximas. Esta nova configuração é apresentada na Figura 29. Esse procedimento foi feito para determinar qual o melhor modelo para dar continuidade as simulações. Com a redução das duas regiões citadas acima apresentadas na Figura 29, houve uma redução de apenas 0,48% do valor da densidade de fluxo magnético. Este valor, foi calculado a partir do número de nós encontrado em cada amostra, que para ambas as simulações foram 14. O valor da densidade de fluxo magnético foi de 756,71 Gauss para a simulação da Figura 28 e 753,06 Gauss para a simulação da Figura 29.

Para prosseguimento das simulações, optou-se pela simulação da Figura 29, pois diminuindo o tamanho do modelo, conseqüentemente diminuirá o tempo de processamento no ato da simulação.

Todas as simulações feitas para definir os parâmetros necessários para as simulações futuras são baseadas nas medições experimentais feitas por LEITE (2014), na qual o único parâmetro que temos como afirmar para levar em conta nas simulações é o valor da densidade de fluxo magnético, ou seja, o valor de  $B$  na entrada do sensor, pois os valores referentes a bobina especificada na Tabela 1 usada no experimento podem ter perdas que não serão consideradas. Portanto, o valor de densidade de fluxo magnético experimental usado como parâmetro inicial de simulação é de 753,25 Gauss, valor definido por ser encontrado na espessura de 11 mm e não sofrer influência da densidade do meio externo.

Nas simulações, o valor de intensidade de campo magnético ( $H$ ) simulado, considerado para a definição da região a ser simulada foi de 111,6 Oe que equivale ao valor de intensidade de campo magnético experimental de 14,9 Oe. Outros parâmetros utilizados para as simulações foram os valores de permeabilidade de cada região considerada no modelo a ser simulado, esses valores podem ser visualizados na Tabela 3.

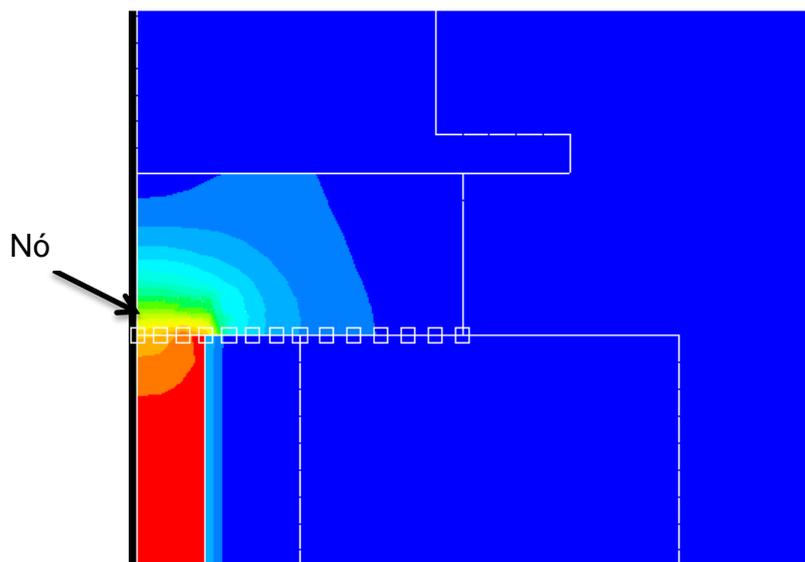
**Tabela 3- Valores de permeabilidades das regiões consideradas nas simulações**

<b>Região</b>	<b>Permeabilidade</b>
<b>Ar</b>	1
<b>Poliacetel</b>	2,3
<b>Bobina (cobre)</b>	1
<b>Núcleo do bobina</b>	21,2567
<b>Amostras (paramagnética e ferromagnética)</b>	1 (paramagnética) – 51,667 (ferromagnética)

## 4.2. DEFINIÇÃO DA MALHA

A malha representa a divisão dos elementos do modelo por meio de equações que garantem a criação de vários nós. Com isso, um dos fatores para uma melhor qualidade da malha é o modelamento e a geração dela. O refinamento adequado define a qualidade da malha. A densidade do refinamento dependerá de cada nó utilizado e gerado para a análise. Essa densidade deve apresentar razão menor ou igual a 1. Existem vários tipos de parâmetros de qualidade da malha, dentre eles o método Element Quality que por definição segundo GIL (2014, p. 18 apud SOUZA, 2011) é a “razão entre o volume dividido pelo comprimento de uma aresta do elemento, assim irá obter valor entre 0 e 1, o valor 1 refere-se a um quadrado ou cubo perfeito e o valor 0 indica um elemento ruim como volume negativo ou zero”, caso contrário apresentará erros de estimativa inicial. Foram utilizadas duas densidades de malha para a definição da mesma, com  $H= 111,6$  Oe e todos os outros parâmetros necessários para a simulação foram fixados de acordo com a Tabela 3. A representação destas malhas são mostradas nas Figuras 30 e 31.

Figura 30- Simulação com densidade de malha com razão igual a 1



Fonte: Própria.

Para a simulação com a densidade de malha com razão 1 existem 27 nós na amostra. Como a simulação é axissimétrica temos 14 nós distribuídos ao longo do raio de 12 mm. A medida do sensor *Hall* é de 2,5 mm x 2,5 mm, considerando a simulação axissimétrica, tem-se 1,25 mm, logo a região de medição do sensor é de 1,25 mm. Para saber quantos nós são necessários para cobrir toda região de medição do sensor, divide-se o tamanho da amostra pela quantidade de nós que compõem o diâmetro da amostra e assim é calculado o tamanho do elemento finito. Esse cálculo é representado pela Equação 1.

$$\text{Tamanho do elemento finito} = \frac{\text{Tamanho da amostra}}{\text{Quantidade de nós que compõem a amostra}} \quad (1)$$

$$\text{Tamanho do elemento finito} = \frac{12 \text{ mm}}{14} = 0,86 \text{ mm}$$

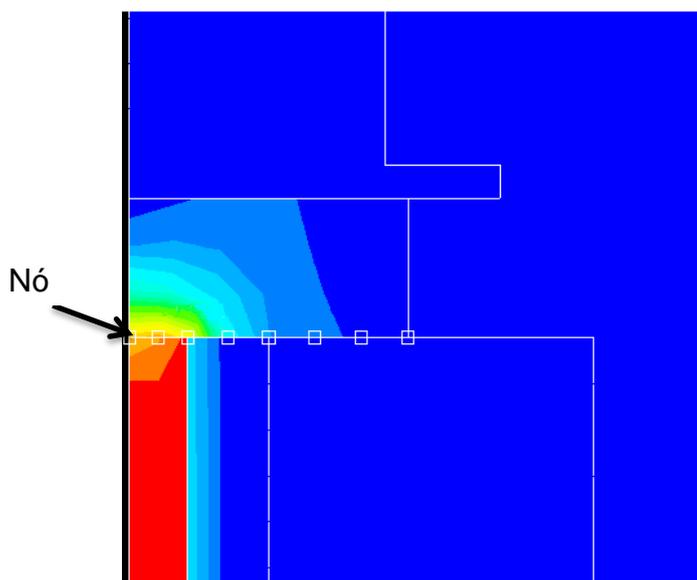
Logo, cada elemento finito tem 0,86 mm e como o tamanho do sensor na Figura 30 é de 1,25 mm, para cobrir toda região do sensor faz-se necessário considerar dois elementos finitos, ou seja, 3 nós. A Tabela 4 mostra esses resultados.

**Tabela 4- Valores de densidade de fluxo magnético para simulação com razão 1 obtidas na simulação da Figura 30**

<b>Nós</b>	<b>Densidade (Gauss)</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	713,33	<b>753,06 (Gauss)</b>
<b>2</b>	728	
<b>3</b>	817,85	

Foram considerados 3 nós e a média da densidade de fluxo magnética para a simulação com a densidade de malha de razão 1 é de 753,06 Gauss, valor próximo do experimental. A Figura 31, apresenta a simulação com densidade de malha com razão igual a 2.

**Figura 31- Simulação com densidade de malha com razão igual a 2**



**Fonte: Própria.**

Analisando-se a Figura 31, percebe-se que existem 8 nós e ao fazer o mesmo cálculo da Equação 1 tem-se:

$$\text{Tamanho do elemento finito} = \frac{12 \text{ mm}}{8} = 1,5 \text{ mm}$$

Logo, cada elemento finito tem 1,5 mm e como o tamanho do sensor na Figura 31 é de 1,25 mm, apenas um elemento finito cobre toda região sensora, logo, faz-se necessário considerar apenas um elemento finito, ou seja, 2 nós. A tabela 5 mostra o resultado.

**Tabela 5- Valores de densidade de fluxo magnético para simulação com razão 2 obtidas na simulação da Figura 31, região definida para simulação**

<b>Nós</b>	<b>Densidade (Gauss)</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	626,48	<b>640,9 (Gauss)</b>
<b>2</b>	655,31	

O valor da média da densidade de fluxo magnético que representa a região sensora para a simulação com densidade de malha de razão 2 é de 640,9 Gauss.

Podemos observar que existe uma diferença de 17,5% da simulação de razão 1 em relação a simulação com razão 2. A simulação de razão 1 é mais refinada, contém mais nós e nos traz mais confiança com relação as medidas de densidade de fluxo magnético, sendo a malha escolhida para a continuação das simulações.

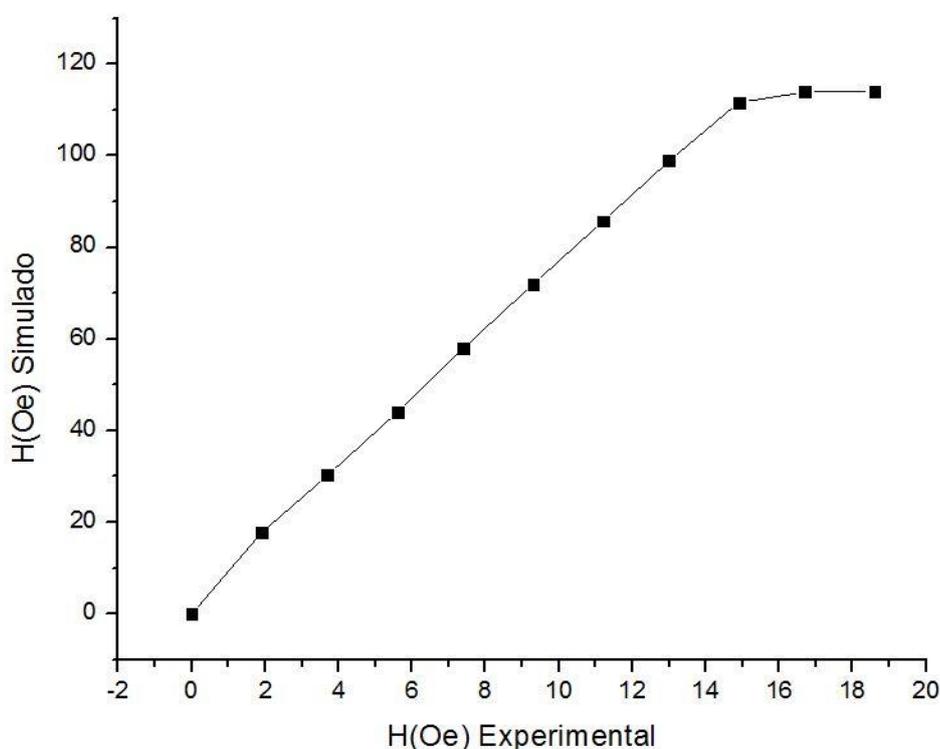
Além da simulação com as razões 1 e 2, foram feitas simulações para densidade de malha com razão 0,5. Observou-se como resultado um tempo de processamento de 8 minutos, um tempo significativo quando comparado com a malha de razão 1, ou seja, tempo de processamento em torno de 2 segundos. Outro ponto a se destacar é um elevado número de elementos finitos, conseqüentemente um grande número de nós dificultando ao operador fazer as medidas de densidade de fluxo magnético.

### 4.3. CURVA DE CALIBRAÇÃO

A curva de calibração representada na Figura 32, mostra no eixo das abscissas, os valores da intensidade de campo magnético aplicado experimental ( $H$

experimental), no eixo das ordenadas mostra os valores de campo magnético aplicado simulado ( $H$  simulado). Os valores de  $H$  experimental foram gerados a partir da variação da tensão na bobina aplicado em uma amostra de aço de 11 mm. As medidas foram feitas de 0 até 10 V, em decorrência da saturação nos valores de campo magnético induzido ( $B$ ) do sensor. A amostra de 11 mm foi utilizada na calibração por não sofrer o efeito do meio externo (LEITE, 2014).

**Figura 32- Curva de calibração. Variação da intensidade de campo magnético aplicado simulado, em função da intensidade de campo magnético experimental**



**Fonte: Própria.**

Os valores de  $H$  simulado foram gerados a partir dos valores de  $B$  experimental. Para cada valor de  $H$  experimental existe um valor de  $B$  simulado equivalente, ou seja, nas simulações é aplicado um valor de  $H$  que seja capaz de produzir na amostra um valor de  $B$  igual ao valor de  $B$  experimental. Assim, o valor de  $H$  simulado equivalente ao valor de  $H$  experimental é definido. Na sequência são mostrados na Tabela 6 os valores utilizados para obtenção da curva de calibração.

**Tabela 6- Valores de intensidade de campo magnético e densidade de fluxo magnético experimentais e simulados referentes a calibração, bem como tensão aplicada na bobina**

<b>Tensão (V)</b>	<b>H(Exp) (Oe)</b>	<b>B(Exp) (Gauss)</b>	<b>H(Sim) (Oe)</b>	<b>B(Sim) (Gauss)</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	1,9	119,03	17,7	119,43	0,11
<b>2</b>	3,7	204,18	30,3	204,45	-0,24
<b>3</b>	5,6	296,18	44	296,9	0,11
<b>4</b>	7,4	391,72	57,98	391,27	-0,03
<b>5</b>	9,3	485,65	72	485,84	-0,05
<b>6</b>	11,2	578	85,7	578,3	0,06
<b>7</b>	13,0	667,78	98,9	667,36	0,02
<b>8</b>	14,9	753,25	111,6	753,06	0,02
<b>9</b>	16,7	768,75	113,9	768,57	0,02
<b>10</b>	18,6	768,75	113,9	768,57	0,02

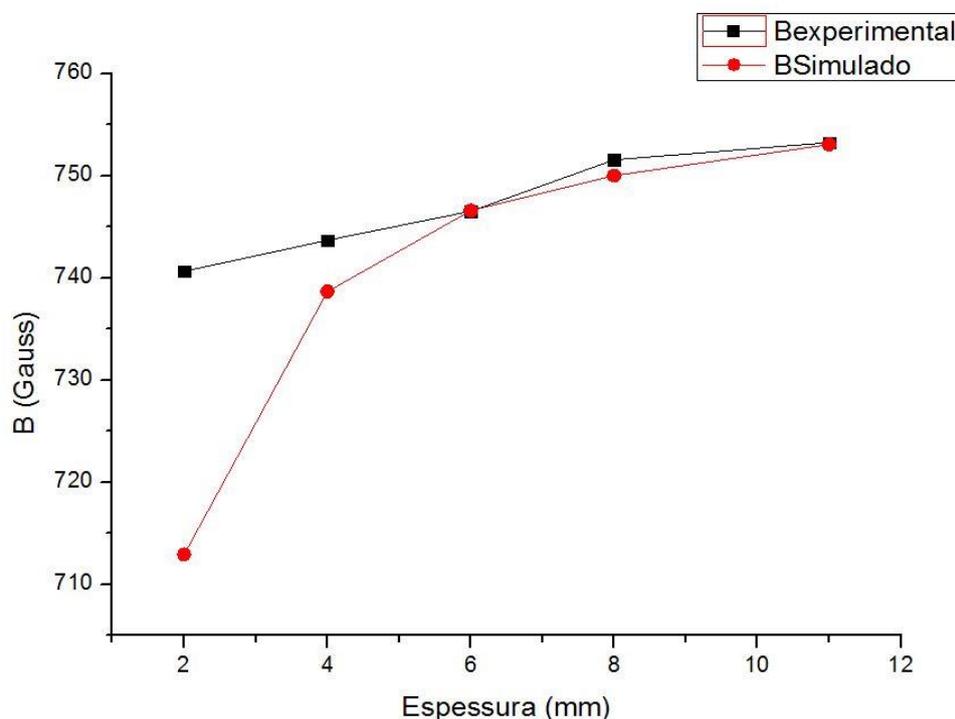
A Tabela 6, mostra os valores de intensidade campo magnético aplicado e densidade de fluxo magnético tanto para o ensaio experimental quanto para as simulações. Os valores de tensão aplicados na bobina equivalentes aos valores de  $H$  experimental também se encontram na Tabela 6. Na última coluna, são apresentados os valores da diferença em porcentagem resultantes da densidade de fluxo magnético experimentais e simulados, podendo-se observar igualdade entre os mesmos.

#### 4.4. ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DO MATERIAL

Leite (2014), definiu como valor ótimo 14,9 Oe para medidas experimentais e, a partir da curva de calibração da Figura 32, determinou-se o valor de  $H$  ideal simulado que foi de 111,6 Oe. A partir deste valor, foi traçado o gráfico da curva  $B \times$  *Espessura* para o aço SAE 1045 representado na Figura 33.

A Figura 33 mostra a variação da densidade de fluxo magnético experimental para amostras de um aço SAE 1045 com espessura de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm, para o diâmetro de 24 mm. O mesmo gráfico mostra a variação da densidade de fluxo magnético simulado em função das mesmas espessuras usadas experimentalmente. O valor de intensidade de campo magnético simulado foi de 111,6 Oe que equivale ao valor de 14,9 Oe experimental.

**Figura 33- Variação da densidade de fluxo magnético experimental e simulado para amostras de um aço SAE 1045 com diferentes espessuras**



Fonte: Própria.

Analisando a Figura 33, existe uma diferença de 3,88% nos valores de densidade de fluxo magnético para a espessura de 2 mm. Isso provavelmente está associado à influência da permeabilidade do meio sobre as medições, que fica acentuada na simulação. As curvas mantêm o mesmo comportamento na qual existe o aumento do valor de  $B$  com o aumento da espessura, chegando a obter uma pequena diferença por não existir influência do meio para amostras com espessuras maiores que 2 mm. Os valores utilizados para obtenção da Figura 33 estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7- Valores de densidade de fluxo magnético experimental e simulado, em função da espessura para um aço SAE 1045

<b>Espessura (mm)</b>	<b>B (Experimental Oe)</b>	<b>B (Simulado Oe)</b>	<b>Diferença</b>	<b>%</b>
<b>2</b>	<b>740,65</b>	<b>712,95</b>	<b>27,70</b>	<b>3,8</b>
<b>4</b>	<b>743,68</b>	<b>738,68</b>	<b>5</b>	<b>0,67</b>
<b>6</b>	<b>746,53</b>	<b>746,59</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,01</b>
<b>8</b>	<b>751,56</b>	<b>750</b>	<b>1,55</b>	<b>0,20</b>
<b>11</b>	<b>753,25</b>	<b>753,06</b>	<b>0,19</b>	<b>0,02</b>

Nota-se da Tabela 7, que os valores de densidade de fluxo magnético para a espessura de 2 e 11 mm apresentam uma diferença de apenas 1,6 %, podendo ser consideradas iguais. Esta diferença está associada à forma de medição do sensor *Hall*, que mede a densidade de fluxo magnético resultante como o produto da corrente e campo magnético aplicado pelo seno do ângulo entre eles. Isto significa que quando diminuimos a espessura do material, para uma intensidade de campo magnético fixa, as linhas de campo tendem a percorrer o material ferromagnético e reduzem o ângulo entre a corrente e o campo, reduzindo os valores da densidade de fluxo magnético resultante.

A Equação 2 representa a tensão *Hall* medida pelo sensor:

$$V_{Hall} = i \times B \times \sin \theta \quad (2)$$

Onde:  $V_{Hall}$  -> Tensão de efeito Hall;

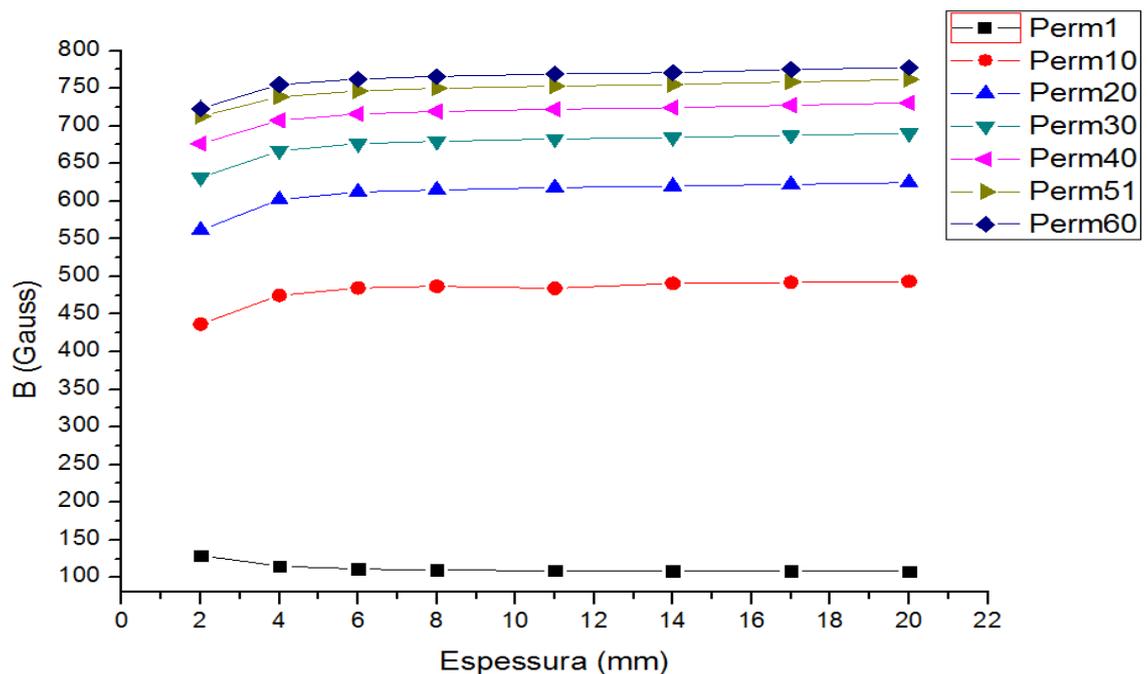
$i$  -> Corrente aplicada no sensor;

$B$  -> Densidade de fluxo magnético;

$\theta$  -> Ângulo entre  $i$  e  $B$ .

A Figura 34, mostra a extrapolação dos resultados obtidos pelo MEF para materiais com diferentes permeabilidades. Nessa, tem-se a variação da densidade de fluxo magnético em função da espessura. Observa-se que quanto menor a espessura maior é a redução nos valores  $B$  para materiais com permeabilidade superior a do meio, ou seja, maior é o efeito do meio externo.

**Figura 34- Variação da densidade de fluxo magnético em função da espessura, para materiais com diferentes permeabilidades**



Fonte: Própria.

Os resultados da Figura 34 indicam que para espessuras acima de 2 mm, pode-se considerar que os resultados são independentes da espessura. Contudo, para melhor entendermos o efeito do meio sobre as medições, na próxima seção será realizado o estudo da influência da permeabilidade do meio.

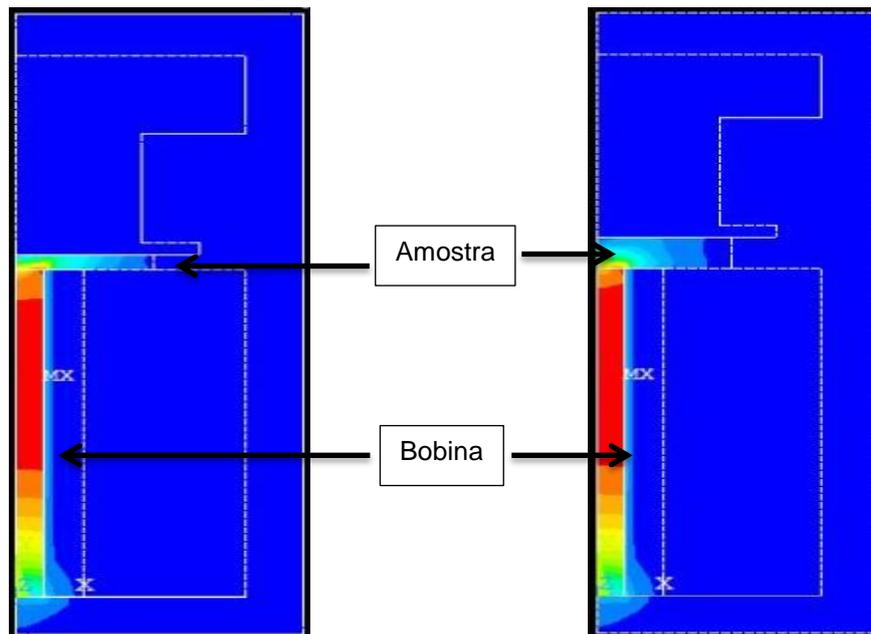
#### 4.5. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE DO MEIO SOBRE AS MEDIDAS DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA

A seguir será apresentado o estudo da influência da permeabilidade do meio externo sobre as medidas de densidade de fluxo magnético para duas condições consideradas distintas. Na primeira, utilizou-se um material ferromagnético e na segunda um paramagnético, que são as condições extremas do gráfico da Figura 34.

A Figura 35, representa simulações para materiais com espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm com 24 mm de diâmetro para um aço SAE 1045. Estas simulações mostram como a densidade de fluxo magnético é influenciada pela espessura do material. O efeito da permeabilidade do meio externo é maior à medida que se reduz a espessura. Caso contrário, haverá uma medida a partir da qual o efeito do meio externo passa a ser desprezível para a intensidade de campo magnético aplicado. Nota-se também da Figura 35, que com o distanciamento do centro da amostra para a extremidade, ocorre uma redução nos valores de campo magnético induzido. Isso ocorre devido à aproximação da borda do material e como nessa região o meio é menos permeável, esse reduz os valores medidos (SILVA et al., 2016a; SILVA et al., 2016b).

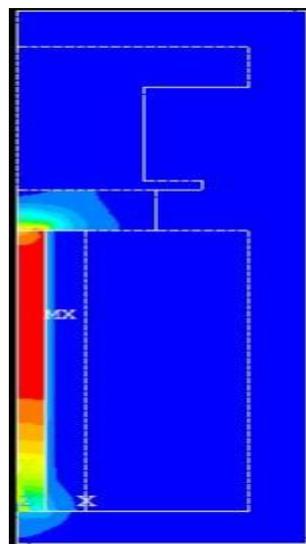
Ainda da análise da Figura 35, pode-se notar que a densidade de fluxo magnético passa a percorrer o material sem a interferência do meio externo para espessuras a partir de 6 mm (MENDES et al., 2018).

**Figura 35- Variação da densidade de fluxo magnético em função da espessura para um aço SAE 1045-Simulação pelo Método dos Elementos Finitos**

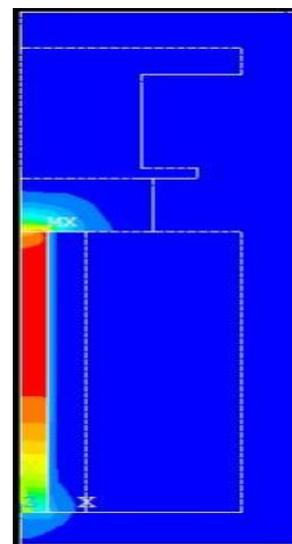


(a) Espessura de 2 mm

(b) Espessura de 4 mm



(c) Espessura de 6 mm

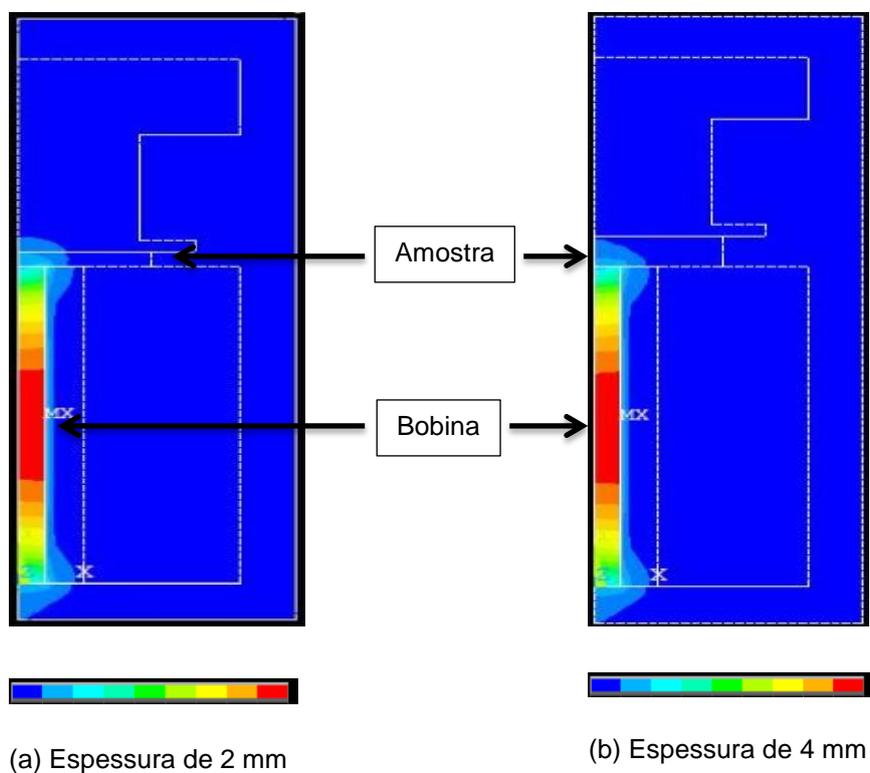


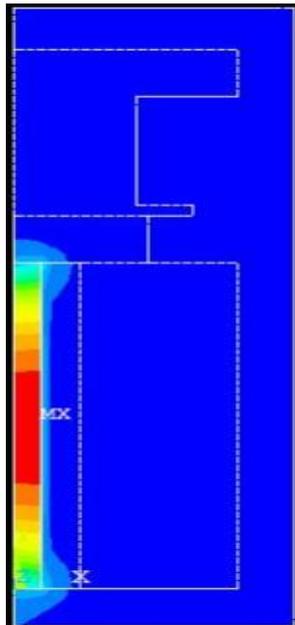
(d) Espessura de 8 mm

Fonte: Própria.

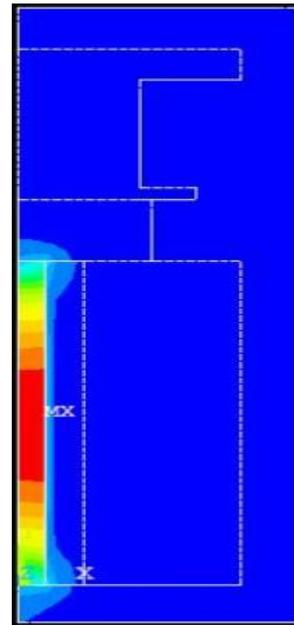
A Figura 36, representa simulações para as espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm com 24 mm de diâmetro de um material paramagnético. Nestas simulações são mostrados através da densidade de fluxo magnético como o meio externo influencia nas medidas em amostras de alumínio ASTM 6261. Nas simulações o meio externo apresenta uma permeabilidade maior do que a do material estudado.

**Figura 36 - Variação da densidade de fluxo magnético em função da espessura para o Alumínio ASTM 6261**





(c) Espessura de 6 mm



(d) Espessura de 8 mm

Fonte: Própria.

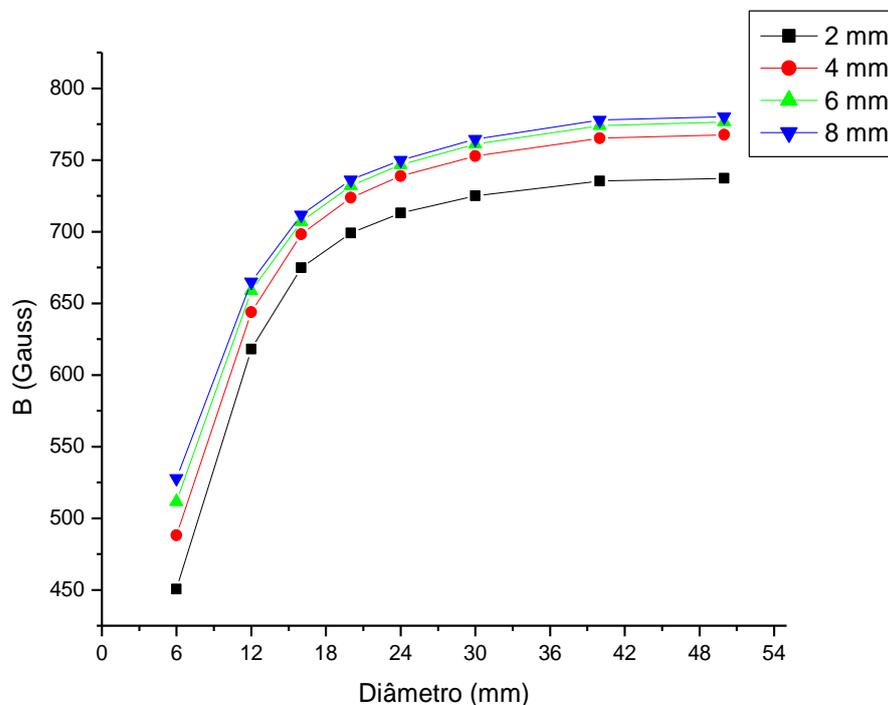
Diferentemente do que aconteceu com as medidas experimentais e as simulações para o aço SAE 1045, nas medidas realizadas para o alumínio ASTM 6261 houve uma interferência diferente do meio externo devido à permeabilidade do material ser menor que a do meio. Como foi observado nas medidas experimentais, ocorreu uma redução dos valores de B com o aumento da espessura.

#### 4.6. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE DO MEIO SOBRE AS MEDIDAS DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO

Nesta seção, será apresentado o estudo da influência da permeabilidade do meio externo sobre as medidas de fluxo magnético em função da variação do diâmetro. Esse estudo foi feito para as duas condições, sendo para um material

ferromagnético e outro paramagnético. O gráfico para um material ferromagnético é mostrado na Figura 37.

**Figura 37- Gráfico da variação da densidade de fluxo magnético em função do diâmetro, para materiais ferromagnéticos com espessuras de até 8 mm**

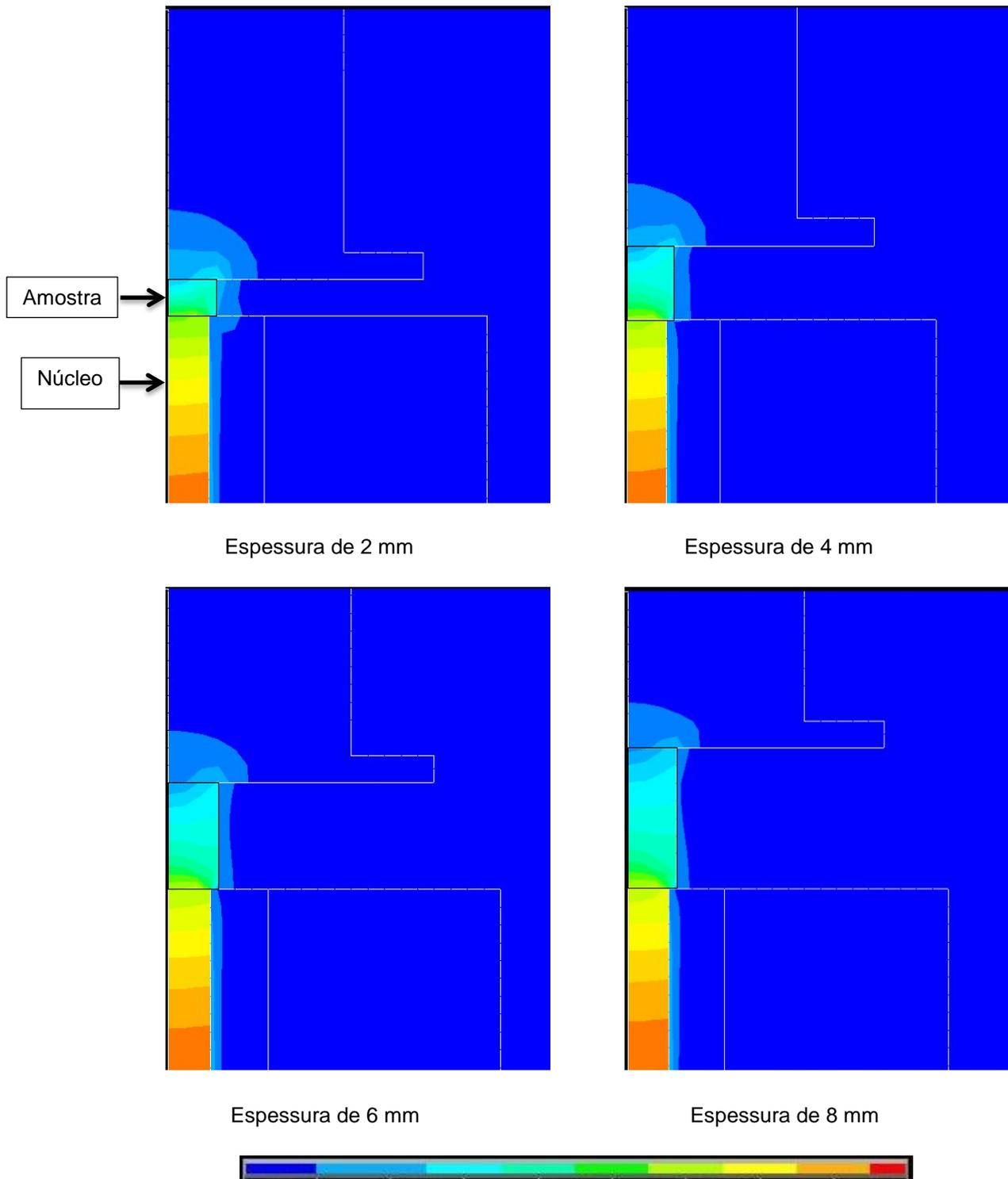


**Fonte: Própria.**

Nota-se do gráfico da Figura 37, que permanece o efeito da espessura, mostrando que com espessuras acima de 4 mm o valor de  $B$  fica independente do mesmo. Nota-se também do gráfico que existe um valor do qual o valor de  $B$  fica independente do diâmetro, ou seja, em torno de 24 mm.

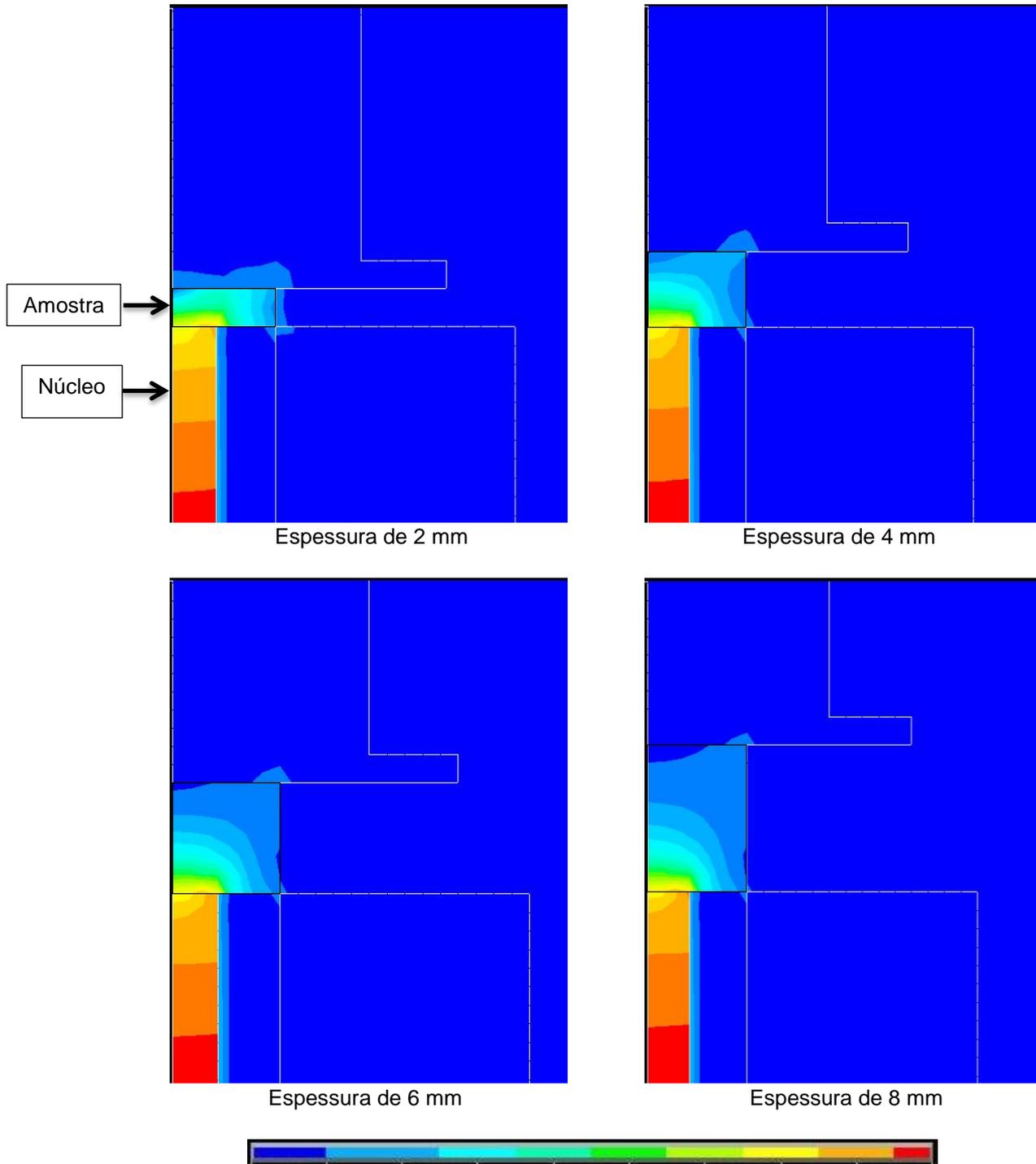
Das simulações anteriores, observou-se que existia uma espessura na qual o valor de  $B$  ficaria independente da espessura, ou seja, 4 mm. Nestas simulações é mostrado o comportamento da densidade de fluxo magnético dentro do material com a variação do diâmetro para 6 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm, 24 mm e 30 mm e variação da espessura até 8 mm, valor na qual  $B$  fica independente do tamanho da espessura. As Figuras 38 a 43, mostram simulações evidenciando o efeito da variação do diâmetro e da espessura de um aço.

Figura 38- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 6 mm para o material ferromagnético



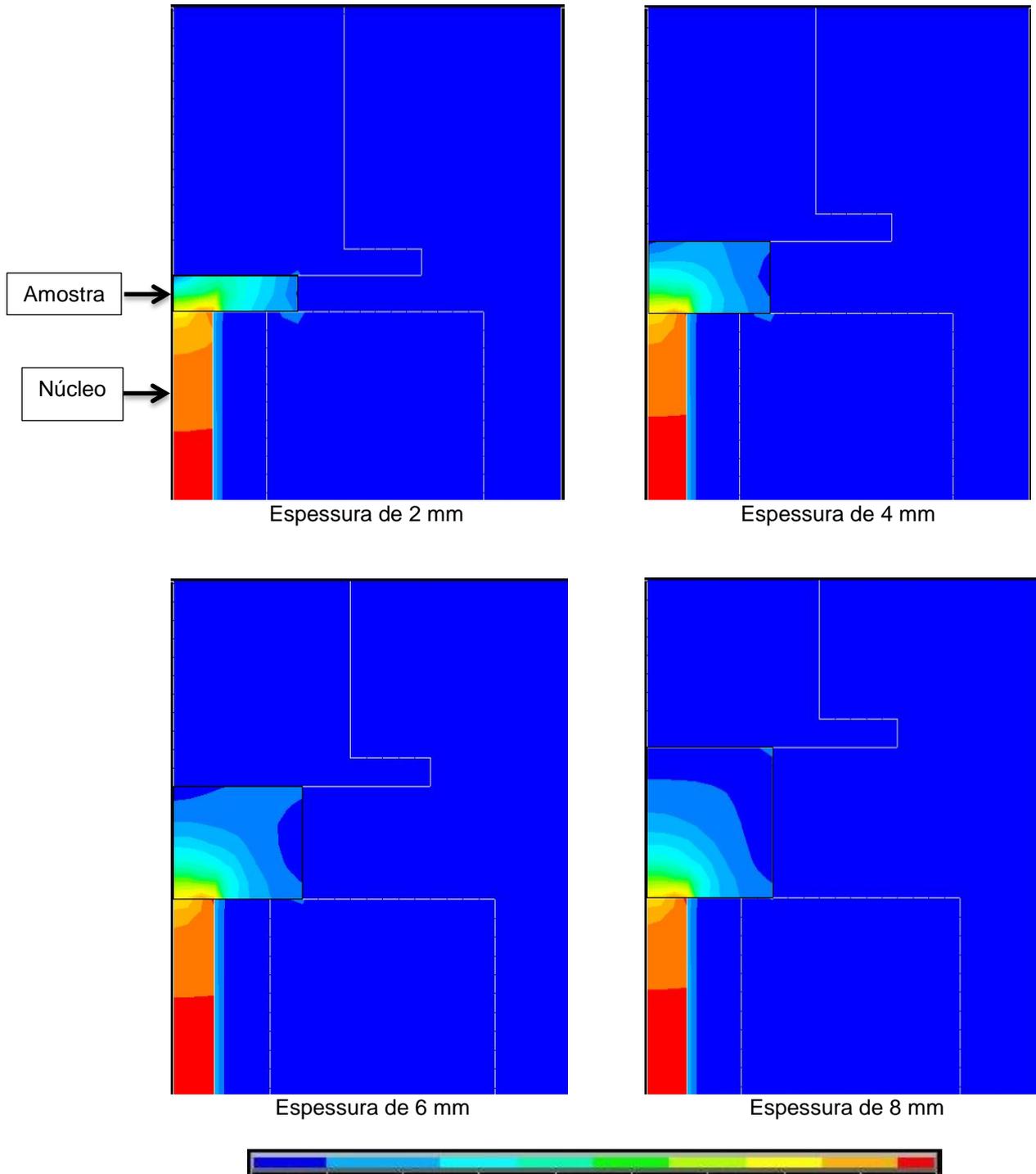
Fonte: Própria.

Figura 39- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 12 mm para o material ferromagnético



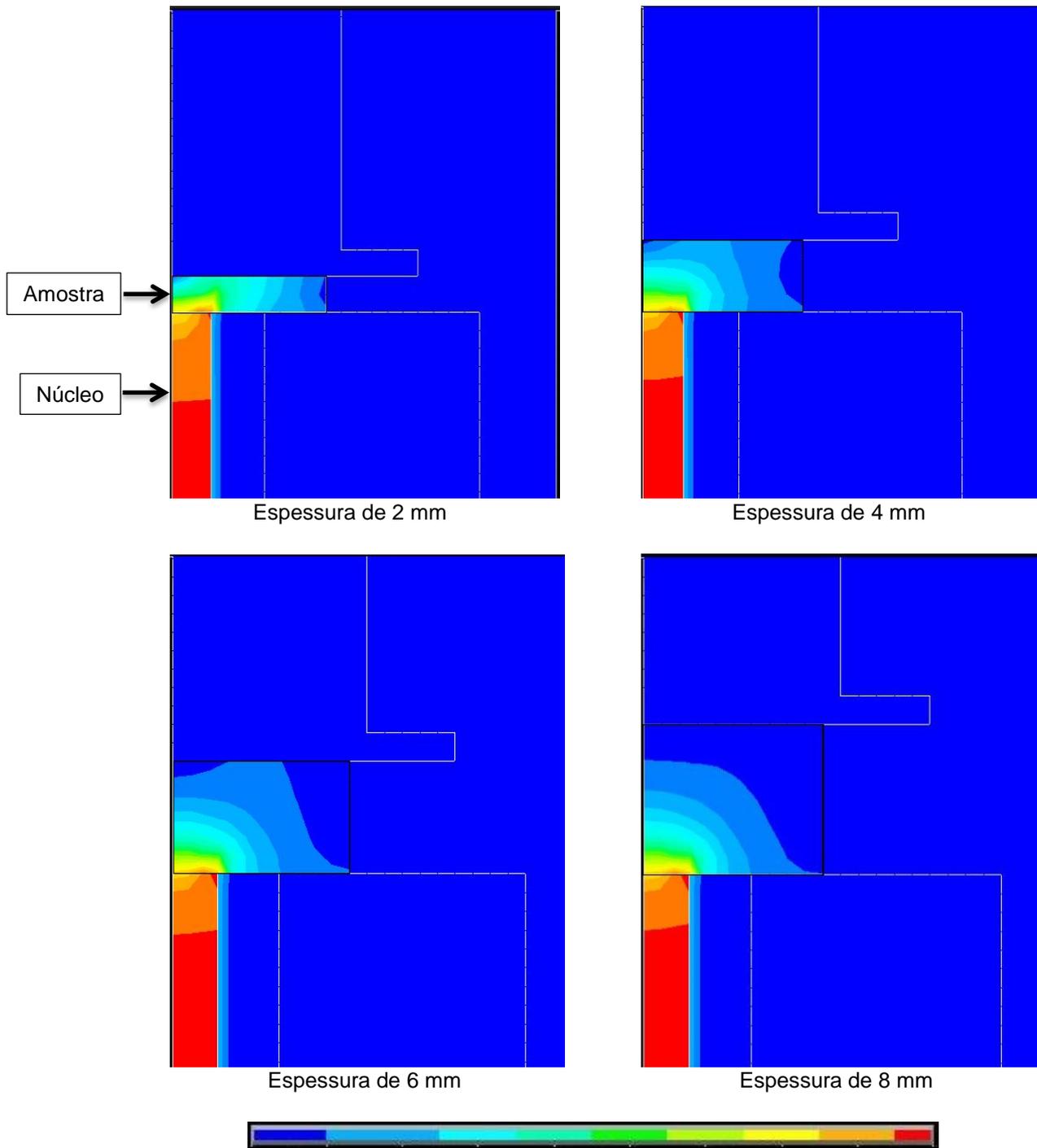
Fonte: Própria.

Figura 40- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 16 mm para o material ferromagnético



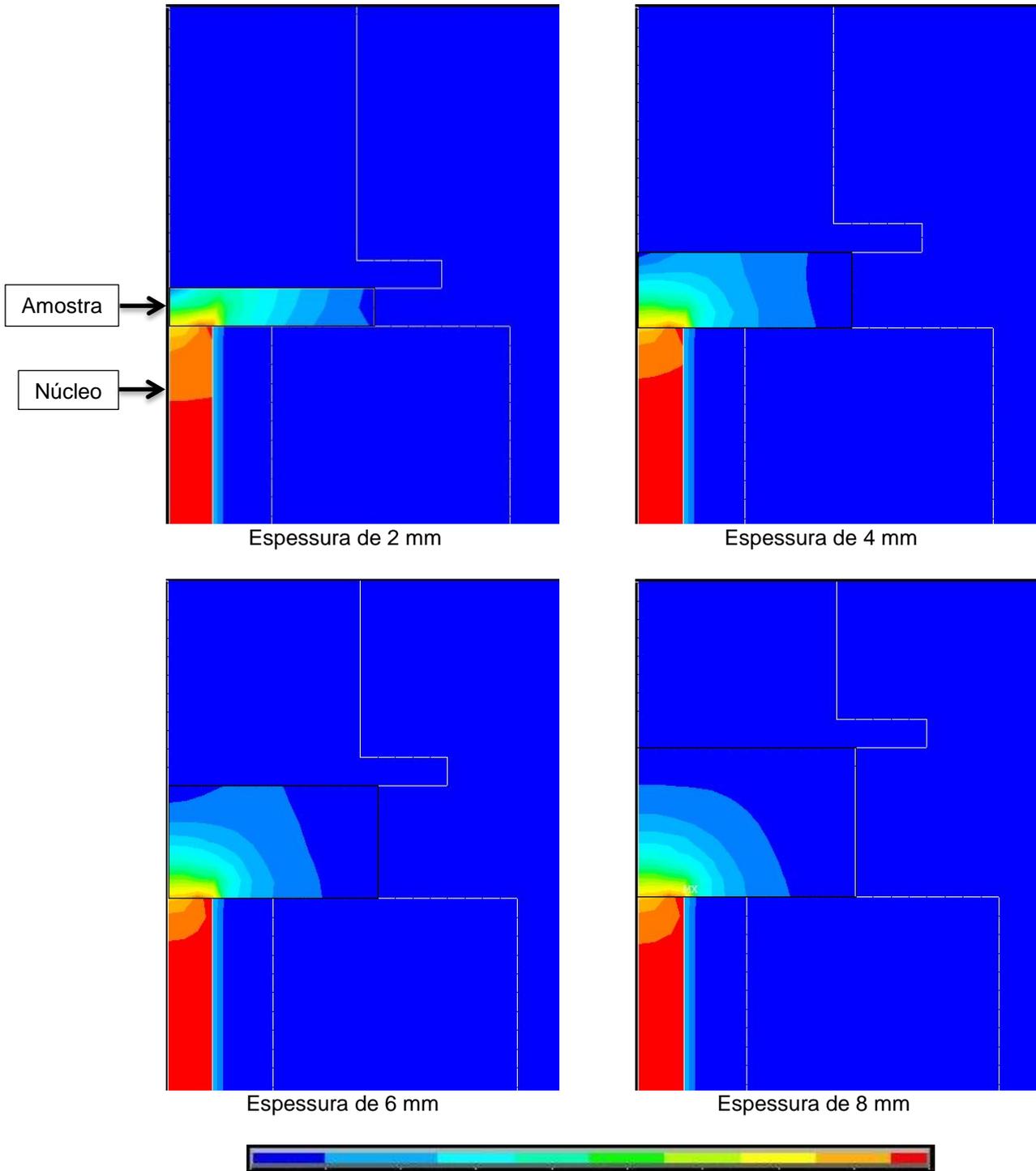
Fonte: Própria.

Figura 41- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 20 mm para o material ferromagnético



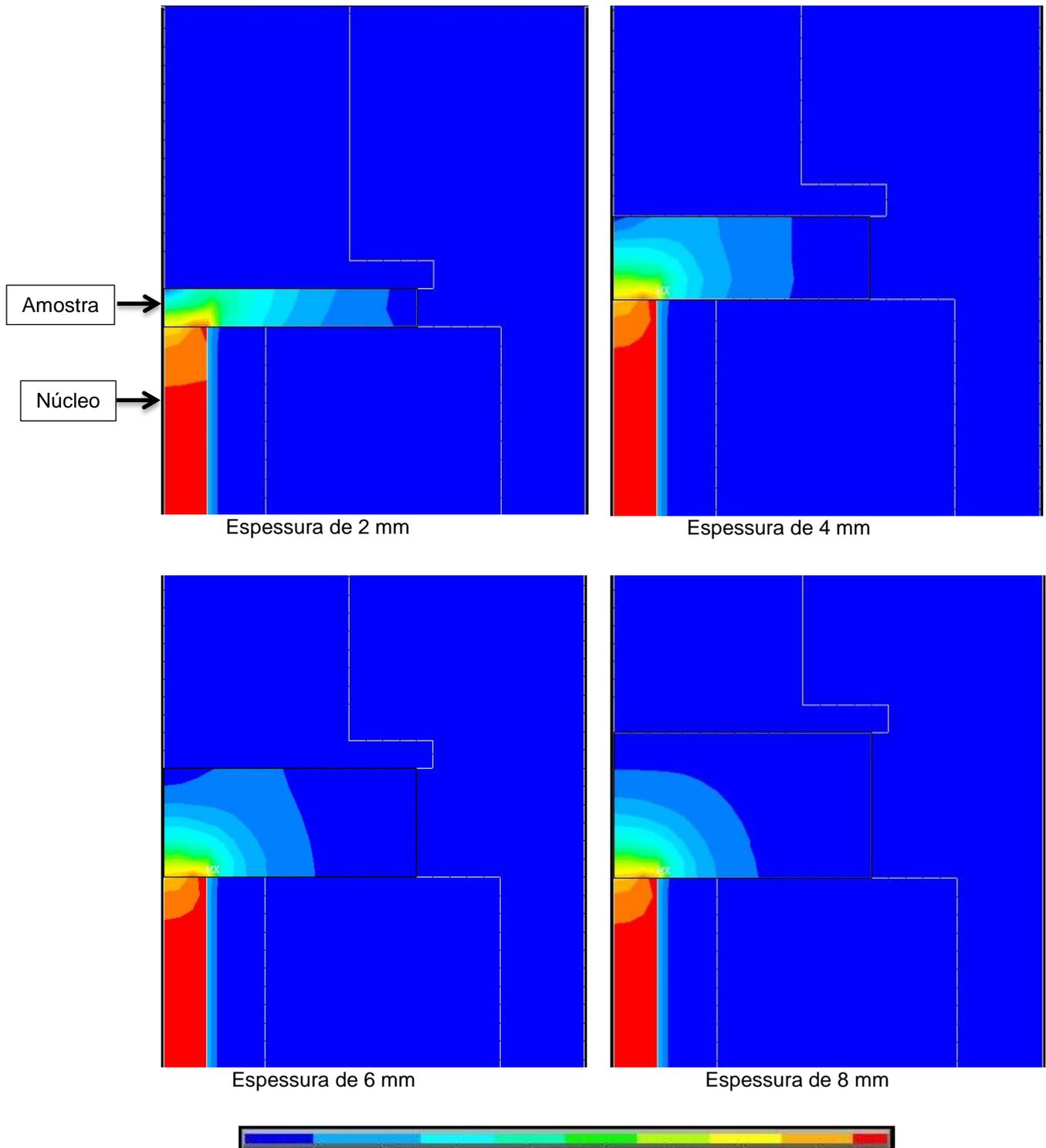
Fonte: Própria.

Figura 42- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 24 mm para o material ferromagnético



Fonte: Própria.

Figura 43- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 30 mm para o material ferromagnético



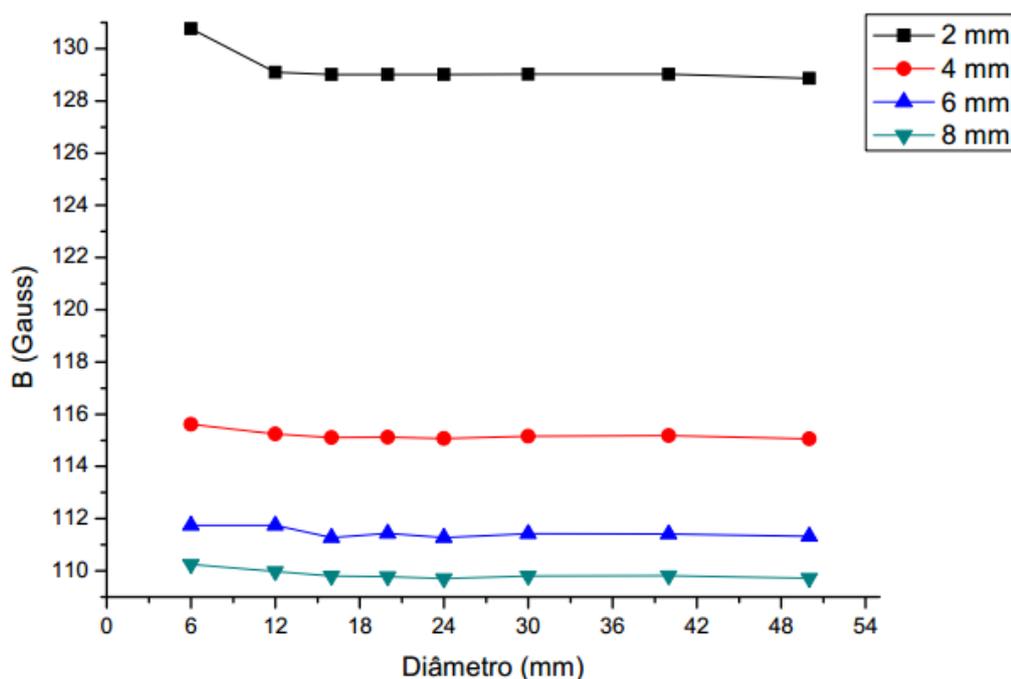
Fonte: Própria.

Algumas análises foram feitas com relação à densidade de fluxo magnético em amostras de aço, estas análises estão elencadas a seguir:

Nota-se que para amostras com diâmetros de 6 e 12 mm, e para todas as espessuras a densidade de fluxo magnético percorre todo o material da amostra sem nenhuma interferência do meio, já para amostras com diâmetro de 16 mm e espessura de 8 mm, a densidade de fluxo magnético já não percorre mais todo o material.

Percebe-se que há o mesmo comportamento com relação à densidade de fluxo magnético para todos os diâmetros e espessuras menores, ou seja, 2 mm. Porém nota-se que de acordo com o aumento do diâmetro, a densidade de fluxo magnético vai diminuindo, ou seja, não consegue percorrer todo o material da amostra. Outro ponto a se destacar é a influência do meio externo que deixa de afetar nas medidas de densidade de fluxo magnético devido a permeabilidade do material ser inferior a permeabilidade do meio externo. A Figura 44 mostra o gráfico da variação da densidade de fluxo magnético em função da variação do diâmetro para materiais paramagnéticos com espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm.

**Figura 44- Variação da densidade de fluxo magnético em função do diâmetro para materiais paramagnéticos com espessuras de até 8 mm**

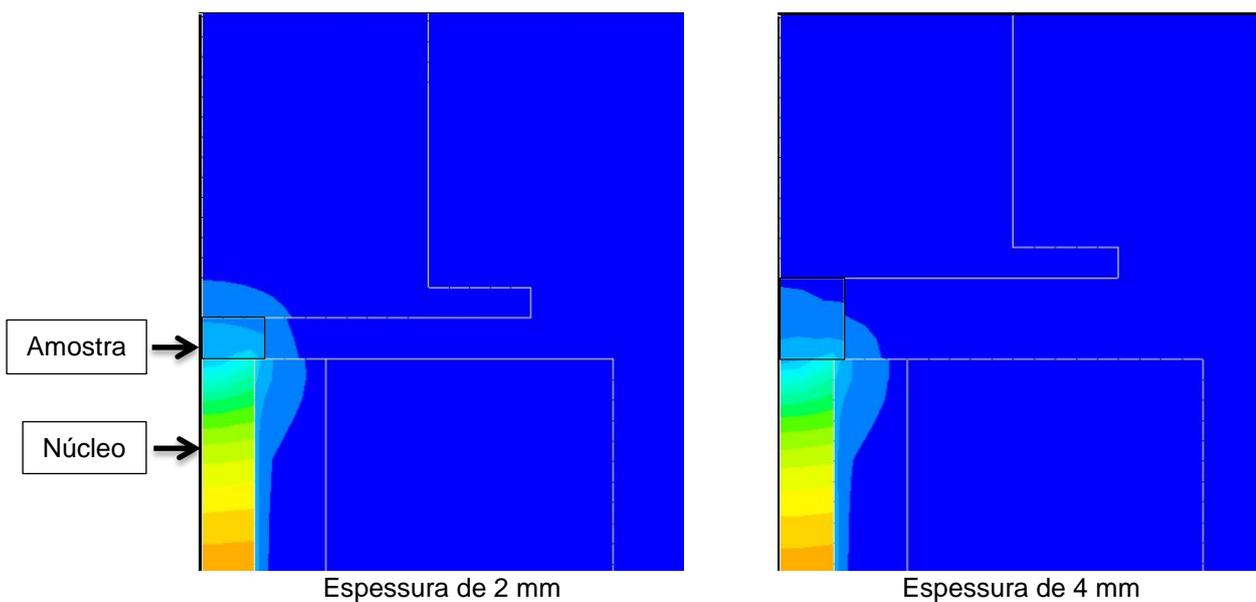


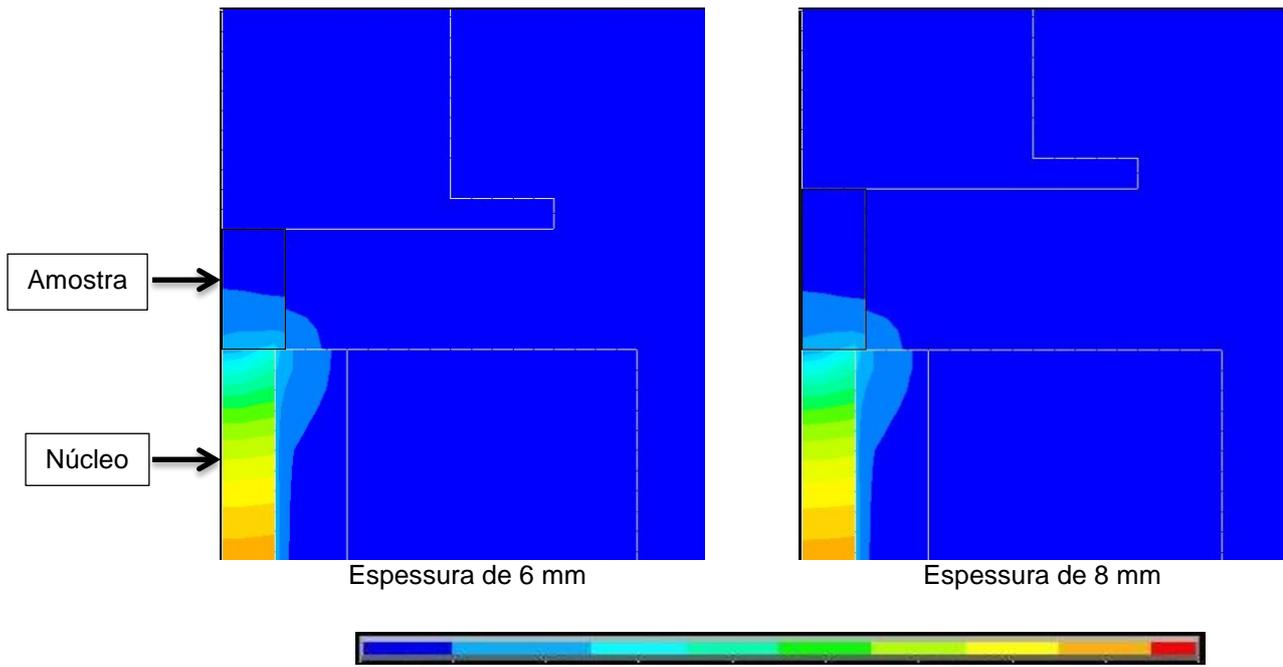
Fonte: Própria.

Observa-se do gráfico da Figura 44 que as medidas de densidade de fluxo magnético do alumínio ASTM 6162 são menores que as medidas de densidade de fluxo magnético do aço SAE 1045 mesmo utilizando o mesmo valor de intensidade de campo magnético  $H$ , isso se deve ao valor da permeabilidade do aço ser maior do que o valor da permeabilidade do alumínio, e conseqüentemente amplificar o valor da densidade de fluxo magnético do aço. Ainda do gráfico da Figura 44, observa-se que o valor da densidade de fluxo magnético fica praticamente constante com o aumento do diâmetro, essas conclusões também podem ser visualizadas através das Figuras 45 a 49.

As Figuras 45 a 49 mostram as simulações para amostras de alumínio variando a espessura em função da variação do diâmetro.

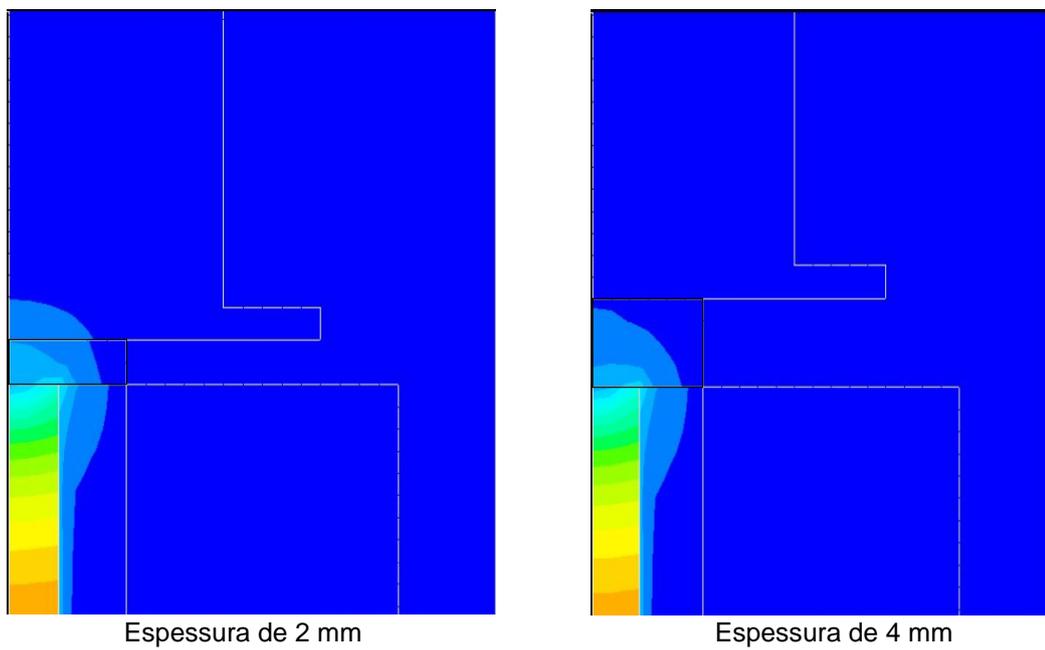
**Figura 45- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 6 mm para o material paramagnético**

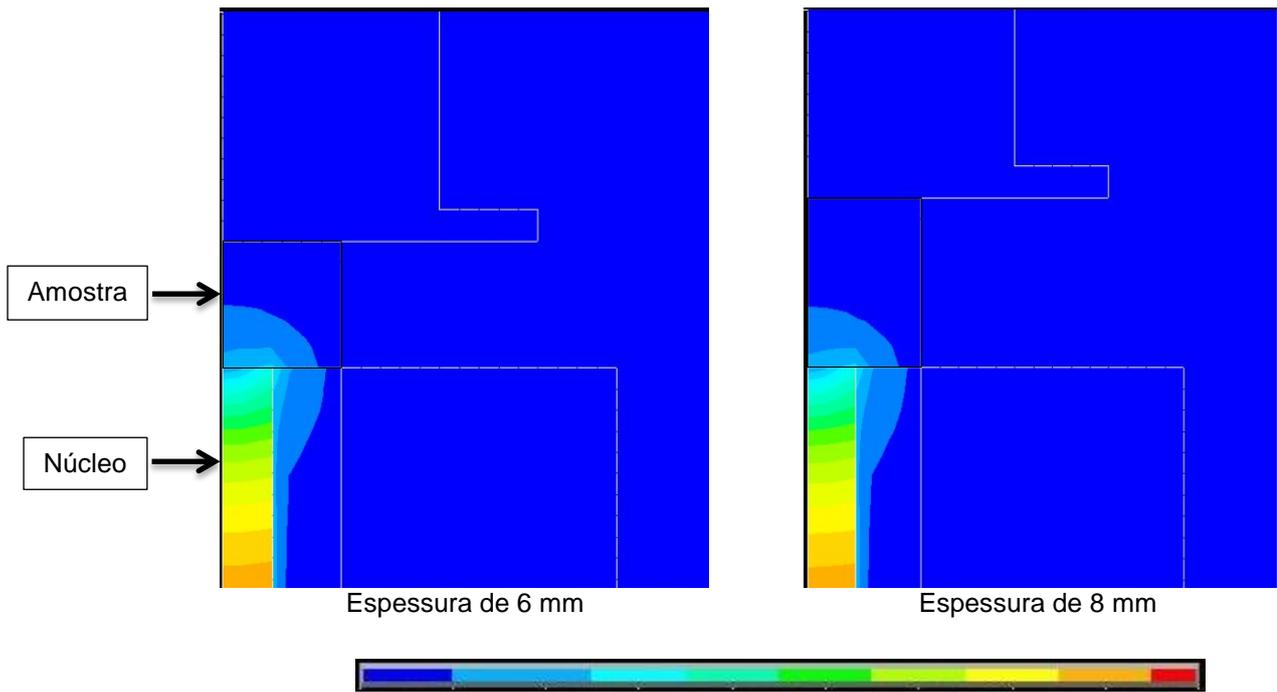




Fonte: Própria.

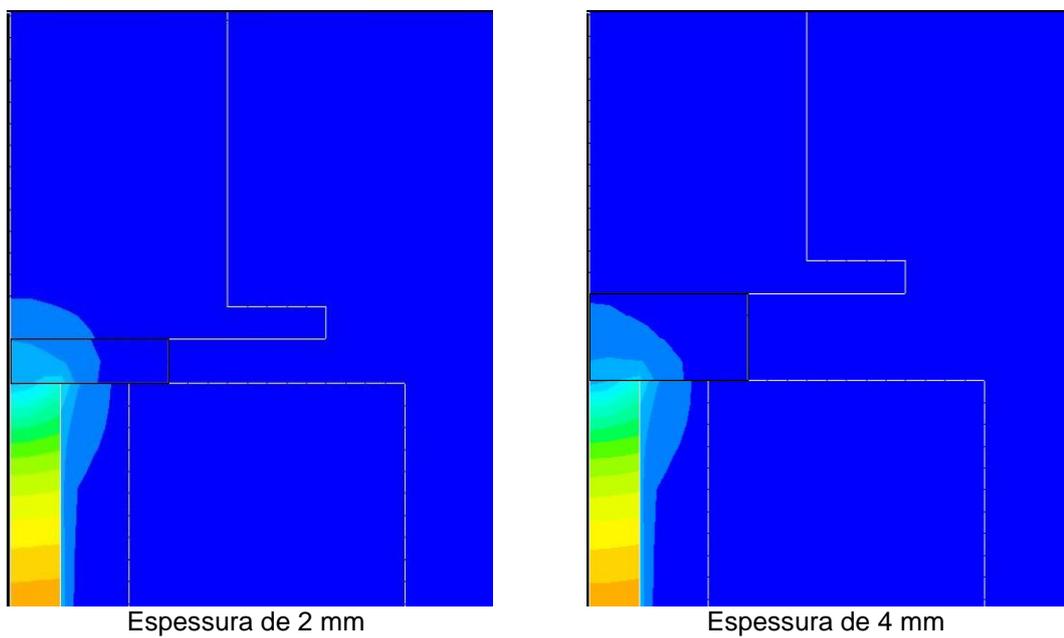
**Figura 46- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 12 mm para o material paramagnético**

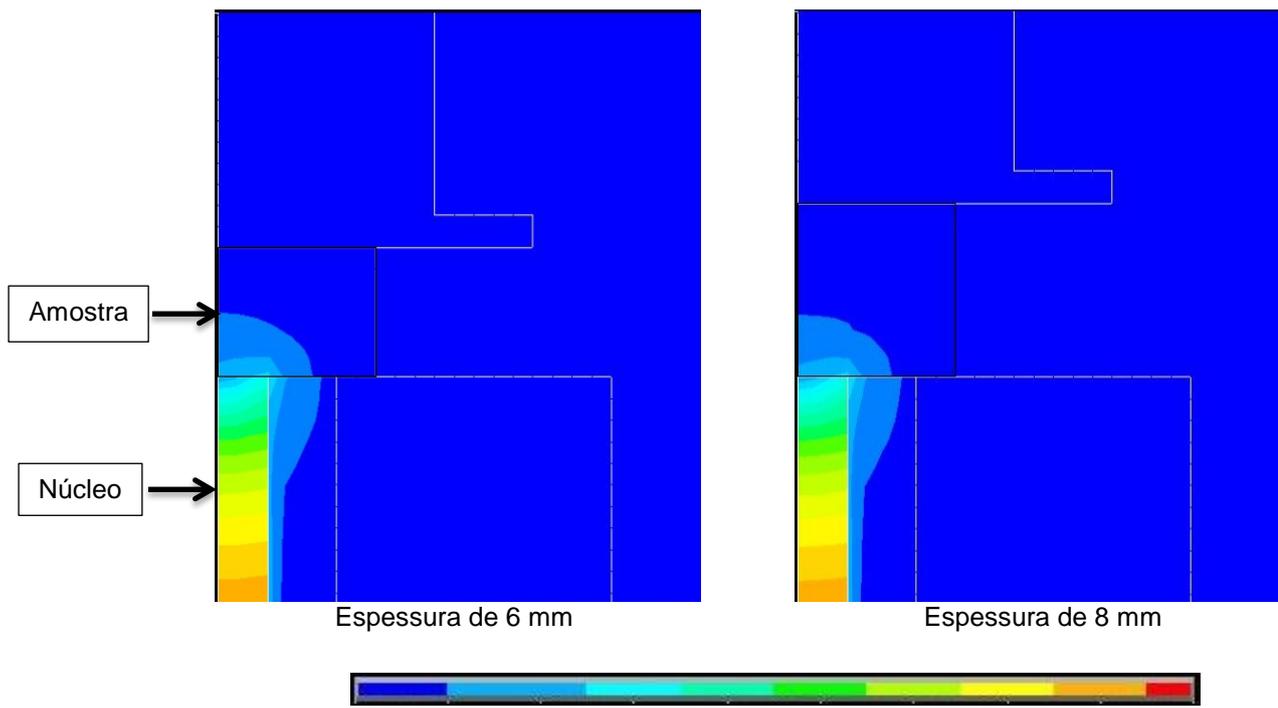




Fonte: Própria.

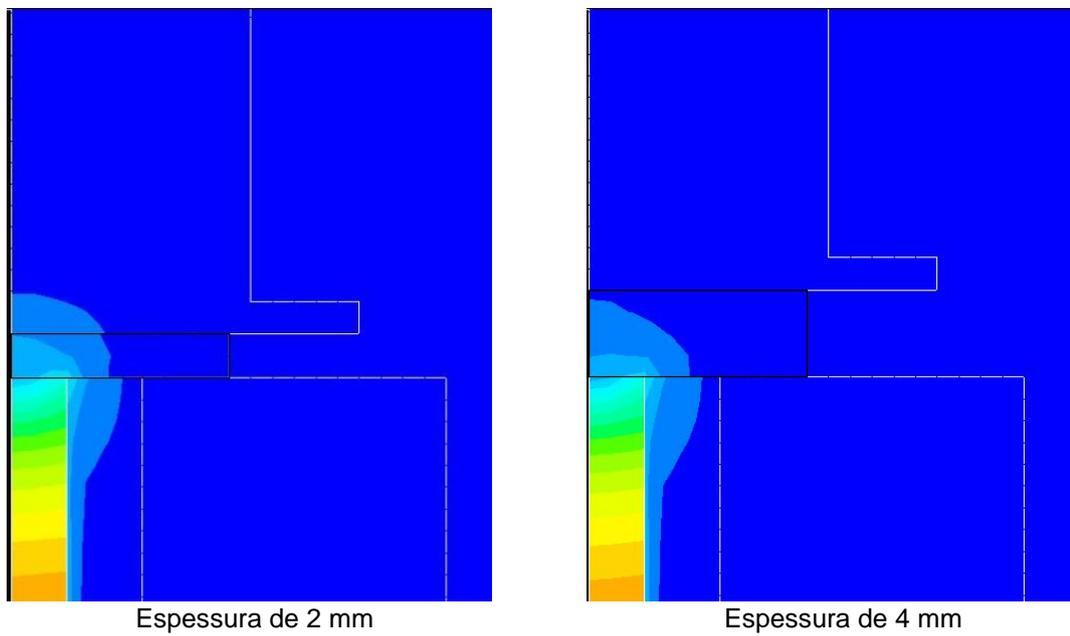
**Figura 47- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 16 mm para o material paramagnético**

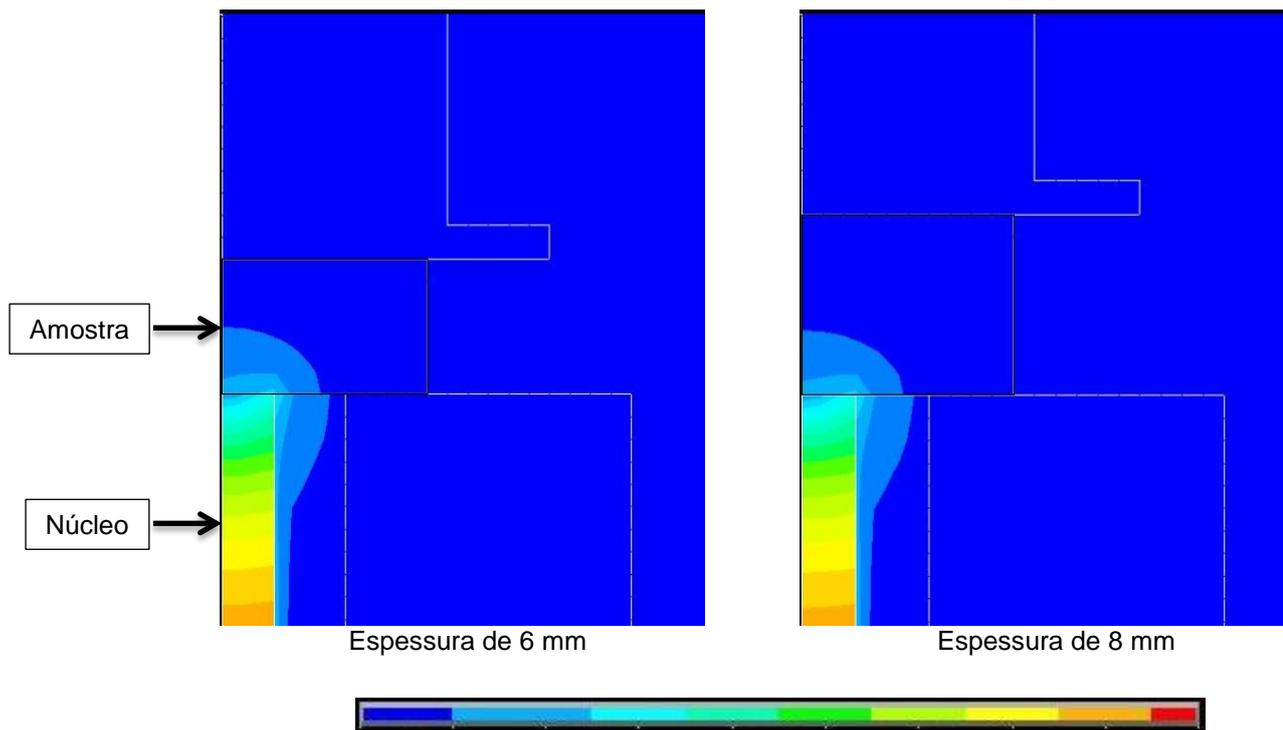




Fonte: Própria.

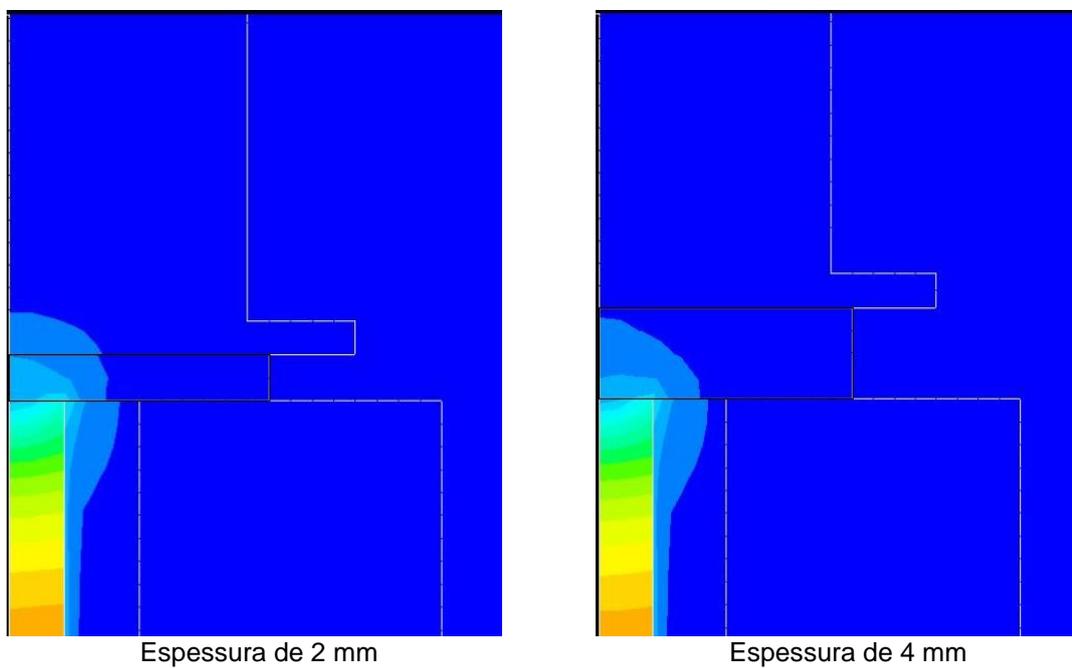
**Figura 48- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 20 mm para o material paramagnético**

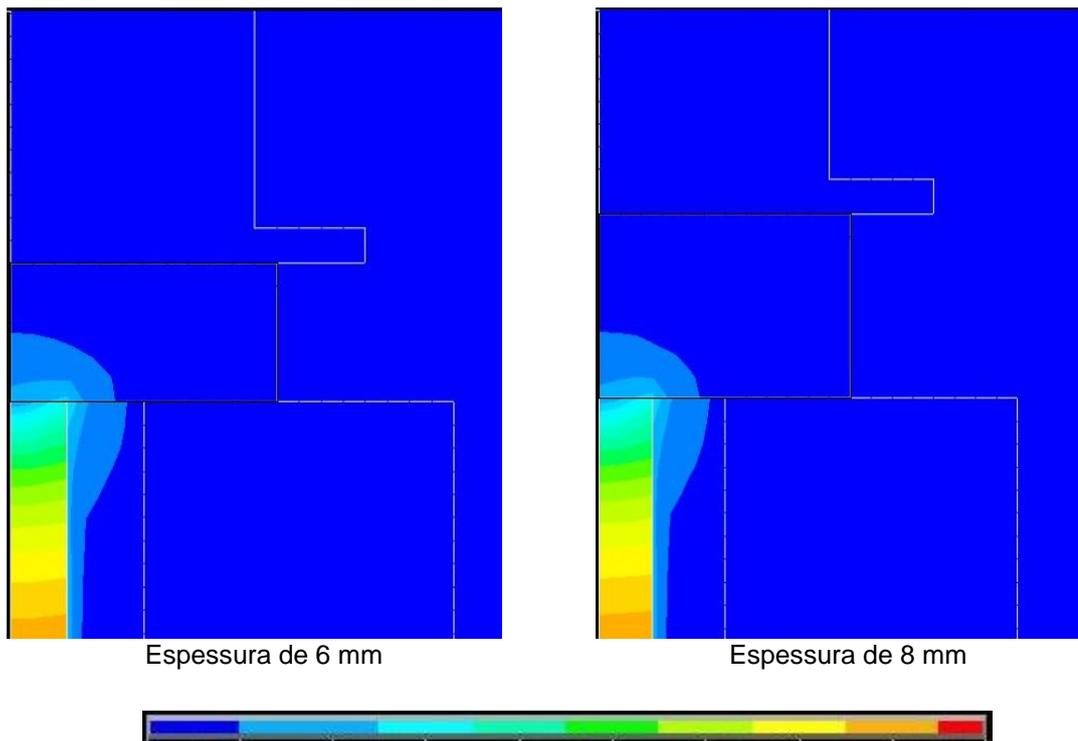




Fonte: Própria.

**Figura 49- Densidade de fluxo magnético em função do diâmetro de 24 mm para o material paramagnético**





Fonte: Própria.

Da análise das Figuras 45 a 49 pode-se concluir que:

Existe um diâmetro na qual a densidade de fluxo magnético fica independente do mesmo, igualmente acontece com a espessura, na qual a densidade de fluxo magnético fica independente da mesma. A intensidade da densidade de fluxo magnético é muito baixa com relação às simulações feitas para o aço, isso se deve ao valor da permeabilidade do material ser basicamente igual ao valor da permeabilidade do meio externo.

Observou-se a partir das simulações e medidas experimentais de densidade de fluxo magnético que a faixa de aplicação em função da espessura é de 12 mm de diâmetro e 4 mm de espessura.

#### 4.7. ESTUDO DE CASO

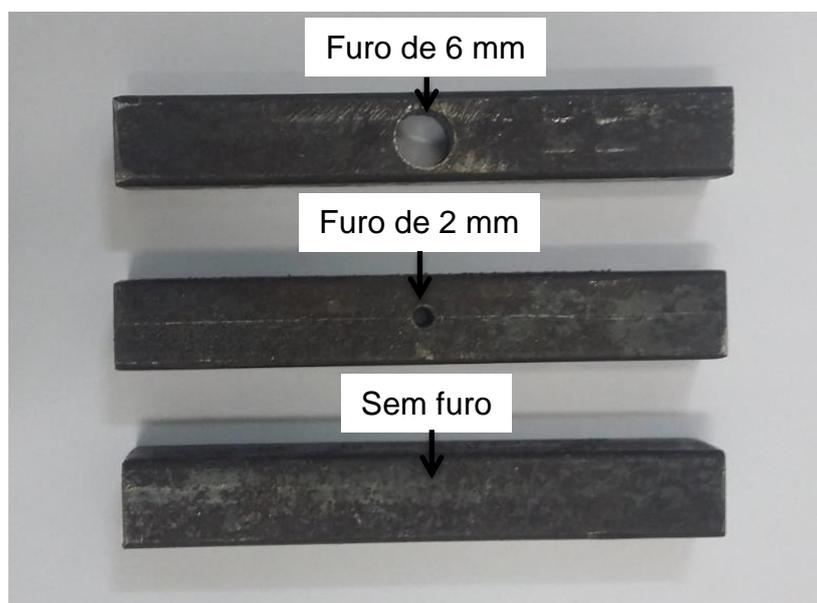
Na área de materiais é muito comum fazer a inspeção em peças, seja ela acabada ou semiacabada. Uma das intenções para esta inspeção é encontrar descontinuidades nestas peças, e para isso é utilizado diversas técnicas sendo, uma

delas a de ultrassom, que se caracteriza como uma ferramenta indispensável para garantia da qualidade de peças com grandes espessuras e com geometrias complexas (ANDREUCCI, 2014).

Descontinuidade segundo a N-1738 “é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Não é necessariamente um defeito. A descontinuidade só deve ser considerada defeito, quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado, tornar a peça inaceitável, por não satisfazer os requisitos mínimos da norma técnica aplicável” (PETROBRAS, 2003).

Neste trabalho é feita uma inspeção para detectar descontinuidades em materiais ferromagnéticos, para isso faz-se necessário construir novas amostras de aço com furos representando uma descontinuidade na qual pode ser visto na Figura 50. Essas são amostras retangulares com comprimento de 63 mm, largura e altura de 9 mm, os furos têm respectivamente 2 e 6 mm sendo passantes. A terceira amostra representa uma peça sem descontinuidade, ou seja, sem furo.

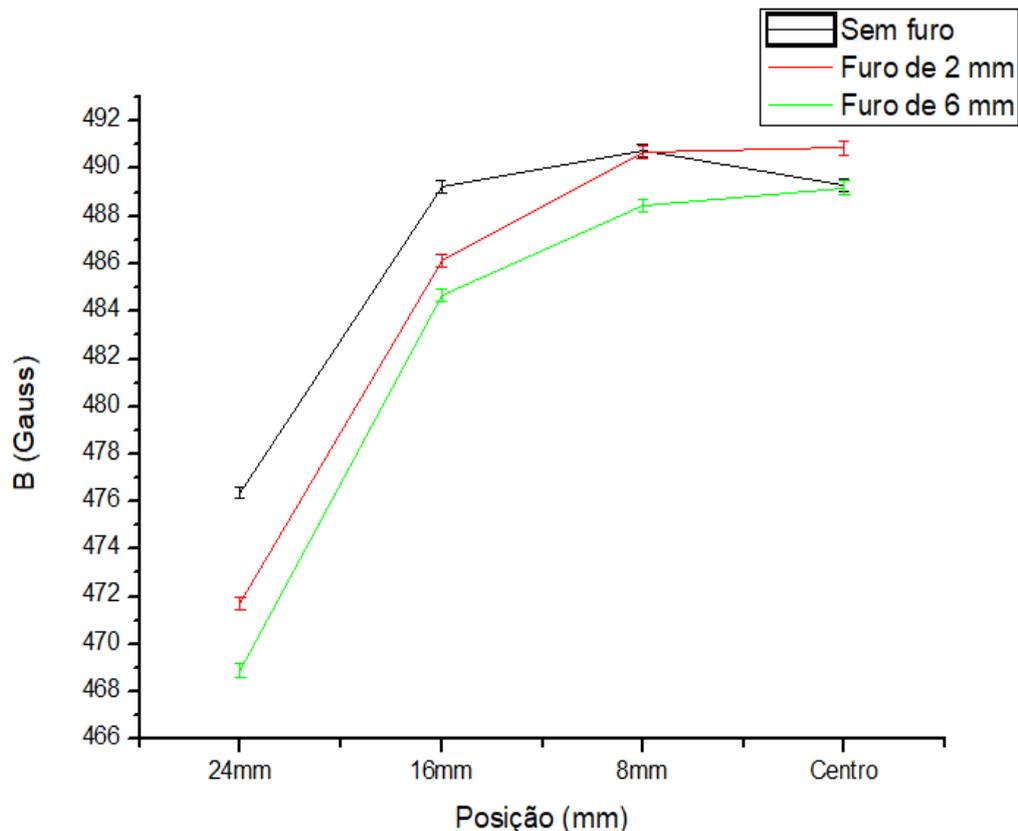
**Figura 50- Amostras experimentais, com furo passante representando a descontinuidade e amostra sem furo**



Fonte: Própria.

Uma intensidade de campo magnético foi aplicado na superfície da amostra e as medidas de densidade de fluxo magnético foram feitas através do sensor *Hall* na outra superfície da amostra. Para a aplicação da intensidade de campo magnético na amostra foi utilizado um ímã com valor de intensidade de fluxo magnético de 1000 Gauss, valor medido através de um equipamento medidor de campo magnético (gaussímetro). As medidas foram feitas no centro da amostra onde se encontra a descontinuidade e também a 8 mm, 16 mm e 24 mm do centro da amostra. O mesmo ensaio foi feito para a amostra sem descontinuidade. O gráfico da Figura 51 mostra os resultados do ensaio.

**Figura 51- Medidas experimentais de densidade de fluxo magnético em função da posição para amostras de aço**

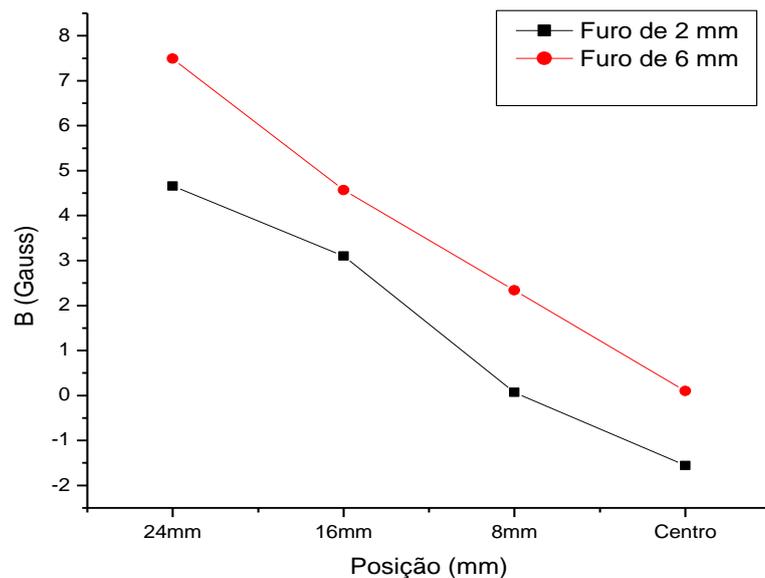


Fonte: Própria.

Da Figura 51, observam-se 4 medidas de densidade de fluxo magnético, uma se encontra no centro da amostra, onde se encontra o furo, e as outras três se

encontram em distâncias diferentes do centro do furo. Observa-se do gráfico que à medida que o campo magnético aplicado vai se distanciando do centro, vai ocorrendo uma diferença do valor de  $B$  com relação a amostra sem furo, que é a referência, para as outras amostras com furo. Isso também é observado para a amostra com o furo de 2 mm com relação à amostra do furo de 6 mm, ou seja, o valor de  $B$  vai caindo de acordo com o aumento do tamanho da espessura do furo, mostrando que a técnica também é eficaz para a detecção de descontinuidades em materiais ferromagnéticos. A Figura 52, mostra o gráfico da diferença dos valores de densidade de fluxo magnético em função da posição para os furos de 2 e 6 mm de espessuras com relação a referência.

**Figura 52- Diferença das medidas de densidade de fluxo magnético para os furos de 2 e 6 mm**

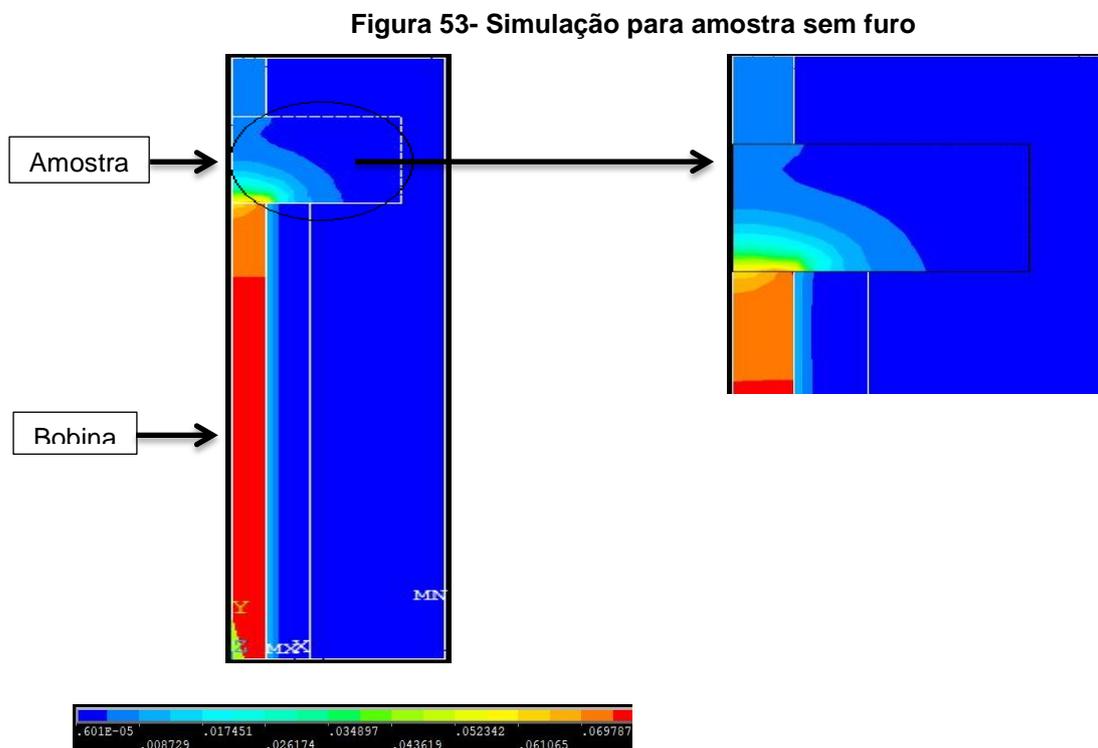


**Fonte: Própria.**

O gráfico da Figura 52, representa as curvas de diferença para amostras de furos de 2 e 6 mm com relação a amostra sem furo em função da posição da medida de densidade de fluxo magnético. Observa-se que à medida que o sensor vai se distanciando do centro fazendo as medidas, o valor da densidade de fluxo

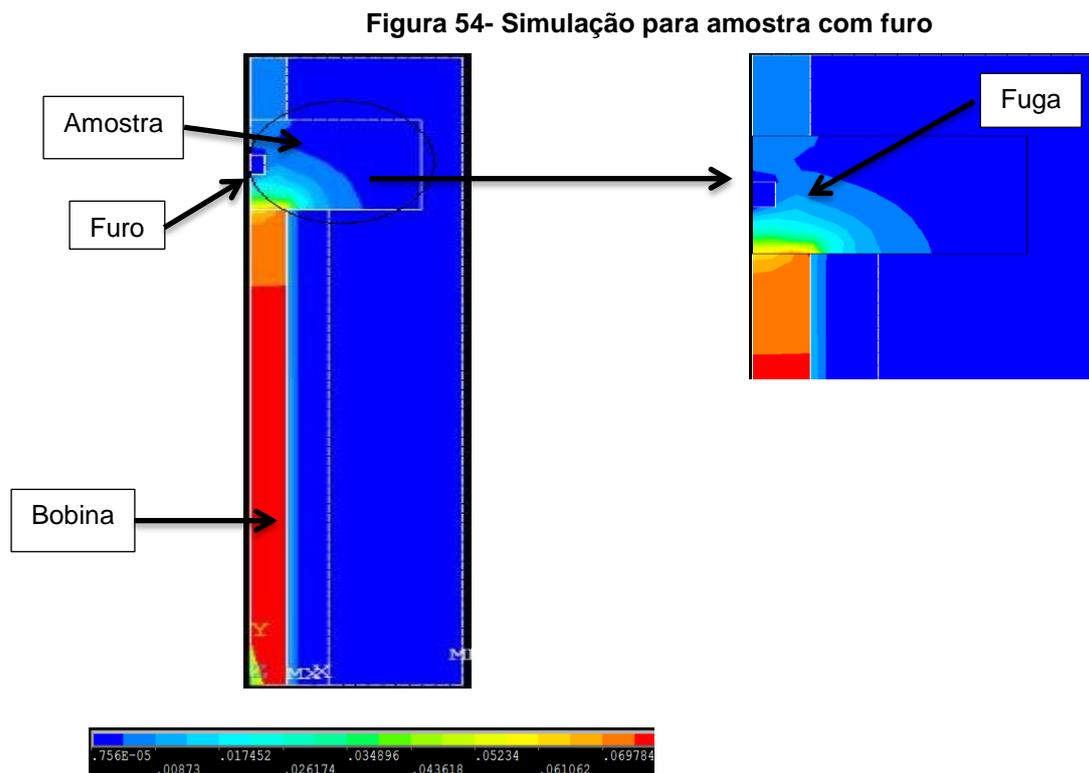
magnético vai variando fazendo com que possa detectar a descontinuidade pela variação do valor de  $B$ . Um ponto importante que vale destacar é que a amostra na qual foi feita as medidas, tem 9 mm de largura por 9 mm de altura, e uma das descontinuidades tem 6 mm de diâmetro feita no centro da amostra, ou seja, resta 1,5 mm de espessura de material para chegar na superfície da mesma, este tipo de descontinuidade não pode ser detectada em ensaio por ultrassom devido à limitação da largura do feixe ultrassônico, gerando uma região na qual nenhuma falha pode ser identificada, conhecida como zona morta. Logo, se houver uma descontinuidade presente na zona morta, à mesma não será detectada, comprometendo a confiabilidade da inspeção (MAYWORM, 2016), (KIRCHHOF et al., 2017).

Com a possibilidade de fazer simulações eletromagnéticas a partir do programa ANSYS, na qual permite afirmar que a técnica é capaz de detectar a presença dessas descontinuidades, simulações foram feitas com esse intuito. As Figuras 53 e 54 mostram o comportamento das medidas de campo induzido através da interação entre um campo magnético e material para a detecção de descontinuidades em um material ferromagnético.



Fonte: Própria.

A Figura 53, mostra a simulação para a amostra sem furo. Para a aplicação do campo magnético na amostra foi utilizado o mesmo modelo de bobina utilizado nas simulações anteriores, porém com o valor de campo magnético induzido de 1000 Gauss, simulando assim, o imã utilizado nas medidas experimentais. Pode-se perceber que a densidade de fluxo magnético percorre o material sem nenhuma dificuldade. A Figura 54 mostra a mesma simulação para uma amostra com furo.



**Fonte: Própria.**

Observa-se que existe uma fuga da densidade de fluxo magnético dentro do material reduzindo a intensidade da densidade de fluxo magnético.

A partir dos experimentos práticos e simulações pelo Método dos Elementos Finitos podemos perceber que a técnica é capaz de detectar discontinuidades a partir 2 mm. Porém estudos com espessuras menores que 2 mm ainda são necessários.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho utiliza as simulações através do Método dos Elementos Finitos (MEF) para extrapolação de resultados experimentais de um ensaio eletromagnético e analisa suas limitações e regiões de aplicações. Os resultados obtidos chegaram as seguintes conclusões:

- A técnica apresentada foi capaz de analisar materiais com diferentes permeabilidades na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. O ensaio eletromagnético mostra ser capaz de realizar medições tanto em materiais ferromagnéticos, quanto em materiais paramagnéticos.
- Foi comprovada, a partir das medidas de densidade de fluxo magnético experimentais e simuladas, que o meio externo influenciou nas medidas realizadas no material, sendo mais sensível para materiais com espessuras de 2 mm.
- O ensaio eletromagnético mostra ser capaz de medições não destrutivas para materiais com espessuras a partir de 4 mm, sendo necessário a correção do efeito do meio, para espessuras inferiores. Neste caso será necessária a utilização do gráfico da correção do efeito do meio (Figura 34).
- O ensaio pode realizar inspeções em áreas pontuais de diâmetro de 24 mm, sendo necessária correção para regiões de dimensões inferiores (Figura 37).
- A simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) é capaz de simular a bancada de testes e facilitar o entendimento da interação da densidade de fluxo magnético com o meio para diferentes permeabilidades.
- No estudo de caso foi observado que o ensaio eletromagnético proposto foi capaz de detectar discontinuidades de 2 e 6 mm, através de medidas de densidade de fluxo magnético. Além de detectar a presença de discontinuidades a 1,5 mm da superfície. Este aponta

como ensaio complementar à técnica de ultrassom, pois poderá ser empregado na detecção de defeito na zona morta desta técnica.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar o efeito de geometrias diferentes da circular através de simulações pelo Método dos Elementos Finitos, de modo, a obtermos curvas de correções para realização de ensaios.
- Estudo mais detalhado para definir a descontinuidade mínima e o quão próximo o ensaio eletromagnético pode detectar descontinuidades perto da superfície da amostra.
- Introduzir um sinal AC e verificar se é possível aumentar a sensibilidade.

## **7. TRABALHOS PUBLICADOS**

**Ensaio Eletromagnético para Acompanhamento da Formação de Fase Fragilizante em um Aço Inoxidável Duplex- 73° Congresso Anual- ABM WEEK 2018.**

**Aplicação do Método dos Elementos Finitos no Desenvolvimento de um Ensaio Eletromagnético para análise microestrutural. 23° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais- CBECIMAT 2018.**

**Influência do Tratamento Térmico na Superelasticidade dos arcos ortodônticos de NiTi. 23° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais- CBECIMAT 2018.**

**Análise Harmônica para Acompanhamento de Microestrutura Paramagnética Fragilizante em um Aço. 18° SBMO- Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13° CBMAG- Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 2018.**

**Ensaio Eletromagnético para Acompanhamento de Microestruturas Fragilizantes. XIII Semana de Educação, Ciência e Tecnologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB) 2018.**

**Análise Harmônica para Acompanhamento de Microestrutura Fragilizante em um Aço Inoxidável Duplex SAF 2205. XIII Semana de Educação, Ciência e Tecnologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB) 2018.**

**Utilização de Simulações pelo Método dos Elementos Finitos para Acompanhamento de Medidas de Permeabilidade de um Ensaio Eletromagnético. XIII Semana de Educação, Ciência e Tecnologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB) 2018.**

**Filtragem de Sinal de Voz Coletado em Tempo Real e Determinação da Função de Transferência do Sistema Utilizando Ferramenta Matlab. XIII Semana de Educação, Ciência e Tecnologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB) 2018.**

## REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, R. "Ensaio não destrutivo por ultrassom," Associação Brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção – ABENDI, São Paulo, Edição de Maio / 2014.

ANDRADE, A. L. S. S. **Ensaio eletromagnético não destrutivo para detecção de anisotropia.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB, João Pessoa, 2016.

BARRETO, J. H. B. **Ensaio eletromagnético para acompanhamento da fragilização a 475°C em aços inoxidáveis duplex.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba- IFPB, João Pessoa, 2016.

CAVALCANTE, D. C. O. **Estudo da interação das linhas de campo sobre uma amostra de aço SAE 1020 por meio de medidas de tensão Hall.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2013.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. "Introduction to Magnetic Materials," **Wiley-IEEE Press.** USA. 2009.

FIALHO, W. M. L. **Medidas de campo magnético para acompanhamento da formação da fase sigma em um Aço Inoxidável Duplex.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, 2015.

GIL, F. S. L. **Análise da qualidade de malha de elementos finitos e validação de situação de caso real de viga biapoiada.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)- Universidade Tecnológica do Paraná - UTFPR, Ponta Grossa, 2014.

KIRCHHOF, J. KRIEG, F. RÖMER, F. IHLOW, A. OSMAN, A. GALDO, G. D. "Sparse Signal Recovery for ultrasonic detection and reconstruction of shadowed

flaws," *Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE International Conference on, p. 816-820, 2017.

LEITE, J. P. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, 2014.

LI, J.; ZHONG, S.; YANG, X.; GONG, L.; GUO, J.; CHEN, S.; CHEN, X.; LIN, T.; YE, F.; WEN, Z.; YANG, T. "Finite element modelling and experimental investigation of low frequency electromagnetic technique in pipeline defect detection," *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)*, v. 2, n. c, p. 1057–1060, 2012.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; JÚNIOR, J. L. "Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos," **R Dental Press Ortodon Ortop Facial**, v. 11, n. 2, p. 35–43, 2006.

MACEDO, E. S.; SANTOS, N. C.; SILVA, F. E. M.; RODRIGUES, A. M.; BARRETO, J. H. B.; LEITE, J. P.; LEITE, J. Pereira. "Ensaio Eletromagnético para Acompanhamento da Formação de fase Fragilizante em um Aço Inoxidável Duplex," 73º Congresso Anual da ABM, p. 1458-1469, 2018.

MARZO, G. R. DI. **Aplicação do método dos elementos finitos na análise de tensões induzidas em cabos umbilicais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2010.

MAYWORM, R. C.; FÉLIX, R. P. B. C.; ALVARENGA, A. V. "Aspectos Metrológicos da Técnica Tempo de Voo da Onda Difrata (ToFD) para Utilização em Ensaios Não Destrutivos (ENDs) por Ultrassom," *Soldagem & Inspeção*, p. 406-416. 2016.

MENDES, F. E. S.; RODRIGUES, A. M.; SILVA, E. M.; SILVA, N. C.; FIALHO, W. M. L.; PACHECO, A. P. A.; LEITE, J. P.; ELOY, M. S. "Aplicação do Método dos Elementos Finitos no Desenvolvimento de um Ensaio Eletromagnético para Análise Microestrutural," 23º CBECIMAT, 12f, 2018.

OLIVEIRA, D. N.; FERREIRA, G. B.; PONTES, R. S. T. "Método dos Elementos Finitos como ferramenta didática para o ensino de eletrostática e magnetostática," COBENGE, XXXVIII, ABENGE, 10 f., 2010.

OLIVEIRA, V. S. **Aplicação do Método dos Elementos Finitos 3D na Caracterização Eletromagnética Estática de Motores de Relutância Variável com Validação Experimental**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2013.

PETROBRAS, C. N. T. n-1738: Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados, p 25. 2003.

PINHO, L. C. A. B. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. 2009. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores)- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto, 2009.

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

SILVA, E.; MARINHO, L.; FILHO, P.; LEITE, J.; LEITE, J. P.; FIALHO, W.; ALBUQUERQUE, V.; TAVARES, J. "Classification of Induced Magnetic Field Signals for the Microstructural Characterization of Sigma Phase in Duplex Stainless Steels," *Metals (Basel)*., vol. 6, no. 7, p. 164, 2016a.

SILVA, E. M.; LEITE, J. P.; NETO, F. A.; PEREIRA, J. L.; FIALHO, W. M. L.; ALBUQUERQUE, V. H. C. "Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel," *J. Test. Eval.*, vol. 44, no. 3, p. 20130313, 2016b.

SILVA, E. S.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; LEITE, J. P.; VARELA, A. C. G.; MOURA, E. P.; TAVARES, J. M. R. S. "Phase transformations evaluation on a UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 516, no. 1–2, pp. 126– 130, 2009.

SILVA, V. C. **Um pós-processador para o Método dos Elementos Finitos**

**aplicado ao eletromagnetismo.** 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade de São Paulo, Escola Politécnica - USP, São Paulo, 1991.

SOUZA, J. M. A. **Estudo Hidrodinâmico da Estaca Torpedo Através do Software Ansys CFX®.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química)- Universidade Federal do Pernambuco - UFPE, Recife, 2011.

TAVARES, S. S. M.; PARDAL, J. M.; GUERREIRO, J. L. GOMES, A. M.; SILVA, M. R. "Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803." J Magn. Magn. Mater. vol. 322, no. 17, pp. L29–L33, 2010.

TEDESCO, D.; HOFFMANN, K. "Introdução ao método de elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo para estudantes de engenharia elétrica," p. 75–82, 2015.