

## MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO COMO FERRAMENTA DE APRENDIZAGEM PARA O ESTUDO DA PERMEABILIDADE

**Edgard de Macedo Silva** – edgardmsilva@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)  
Av. Primeiro de Maio, 720  
58015-430 – João Pessoa – Paraíba

**Francisco Eduardo Mendes da Silva** – eduardomendess@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará  
Av. da Universidade, 2853  
60020-181 – Fortaleza – Ceará

**Amanda Medeiros Rodrigues** – mandsmr4@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)  
Av. Primeiro de Maio, 720  
58015-430 – João Pessoa – Paraíba

**Ana Paula Alves Pacheco** – anapaulapacheco00@hotmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)  
Av. Primeiro de Maio, 720  
58015-430 – João Pessoa – Paraíba

**Resumo:** *O entendimento do comportamento do fluxo magnético dentro de um material é necessário para que se faça uma melhor análise da interação entre campo magnético aplicado e material, durante o estudo de aplicações de materiais para fins elétricos. No presente trabalho é apresentada a simulação de uma bancada de análise de permeabilidade pelo método dos Elementos Finitos, com o objetivo de auxiliar a aprendizagem da influência da permeabilidade para materiais com permeabilidades superiores e inferiores ao meio externo, bem como o estudo de sua espessura na densidade de fluxo magnético. Esta irá permitir que o aluno possa variar os diversos valores de permeabilidades e observar o comportamento da densidade de fluxo magnético dentro do material. A simulação pelo método dos elementos finitos foi capaz de fornecer a visualização do fluxo dentro do material, de modo a facilitar a compreensão do efeito do meio. Materiais com permeabilidade superior à do meio apresentaram crescimento seguido de estabilização do fluxo magnético dentro do material e no caso contrário redução seguida de estabilização. Nos dois casos a simulação mostrou ser eficaz a visualização e análise desses comportamentos.*

**Palavras-chave:** *Elementos finitos, ensino de materiais elétricos, permeabilidade.*

## 1 INTRODUÇÃO

A análise por elementos finitos é um método numérico que pode ser destinado à resolução de problemas de engenharia, já que permite a solução sistemática de problemas com boa aproximação das soluções analíticas, juntamente com os resultados experimentalmente observados (LI et al., 2012; MARECHAL; RAMDANE, 2013; OLIVEIRA, 2010; TEDESCO; HOFFMANN, 2015).

A simulação computacional é amplamente utilizada devido à possibilidade de simular diferentes condições de operação, proporcionando análises capazes de gerar melhorias à qualidade dos projetos. Grande parte dessas análises é realizada por meio de *softwares* que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual é aplicado nas mais diversas áreas da engenharia. Com o método, pode-se, por exemplo, visualizar a distribuição térmica em transformadores ou o conjugado em máquinas rotativas sem a necessidade da construção de protótipos, bem como a variação de fluxo magnético dentro de um material (OLIVEIRA, 2010; PATIL; KUSHARE, 2016; TEDESCO; HOFFMANN, 2015).

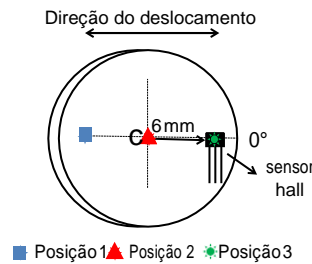
No presente trabalho utilizou-se o MEF como ferramenta didática capaz de fornecer ao estudante a possibilidade de visualização da densidade de fluxo magnético dentro do material, sendo este resultante da interação entre uma intensidade de campo magnético aplicado em materiais com permeabilidades superiores e inferiores à do meio externo. Além disso, foi realizado o estudo da espessura de um material com diâmetro fixo. O objetivo é fornecer uma ferramenta que facilite o entendimento do aluno, por meio da simulação do fluxo magnético resultante e assim possa consolidar o aprendizado sobre a permeabilidade magnética de materiais distintos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material

O estudo da permeabilidade magnética e a influência do meio na interação entre densidade de fluxo magnético e material tem sido objeto de ensino da disciplina de materiais elétricos. O conhecimento do comportamento da densidade de fluxo magnético em meios com diferentes permeabilidades é necessário para um maior entendimento desse assunto. Contudo, a falta de visualização do fluxo magnético dificulta o entendimento. A simulação pelo Método dos Elementos Finitos foi empregada no presente trabalho para fornecer uma ferramenta em que o aluno possa avaliar a influência do meio em duas condições distintas: meio com permeabilidade maior e menor do que o material a ser analisado. Uma bancada experimental, desenvolvida pelo presente grupo com o objetivo do ensino de permeabilidade magnética, foi simulada para o melhor entendimento desse assunto. Nesta bancada são utilizados dois materiais com permeabilidades diferentes, um ferromagnético (Aço SAE 1045) e um paramagnético (alumínio ASTM 6261). As amostras estudadas possuem 24 mm de diâmetro e espessuras de 2, 4, 6, 8 e 11 mm, as quais são submetidas a um campo magnético de 7,25 Oe. As medidas são realizadas no centro das amostras, assim como deslocadas 6 mm em relação ao centro, à esquerda e à direita, conforme a Figura 1. Este deslocamento serve para avaliar o efeito da permeabilidade do meio ao deslocarmos na direção da extremidade do material a ser estudado. A variação de espessura tem como objetivo melhorar a compreensão da capacidade de penetração das linhas de campo.

Figura 1 - Posição de aplicação do campo externo nas amostras.

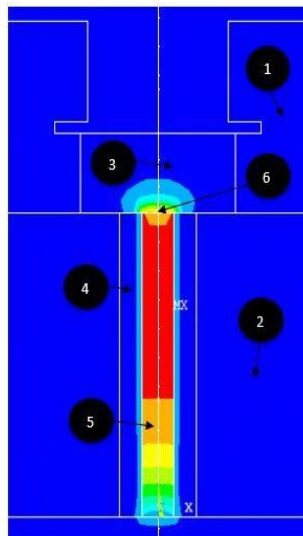


■ Posição 1 ▲ Posição 2 ★ Posição 3

Fonte: Autoria própria.

O experimento simulado pelo Método dos Elementos Finitos pode ser entendido a partir da Figura 2. Nesse, um solenoide (4) com núcleo de aço (5) foi posicionado no centro da peça (3) estudada. Entre a peça e o solenoide um sensor de efeito Hall modelo SS495A (6) foi posicionado para determinar a densidade de fluxo magnético resultante da interação. A Figura 2 mostra o modelo de bancada simulada desenvolvido com a identificação de cada uma das regiões e a localização dos componentes considerados na simulação.

Figura 2 - Bancada simulada: (1) ar; (2) poliacetal; (3) amostra; (4) solenoide; (5) núcleo; (6) sensor Hall.



Fonte: Autoria própria.

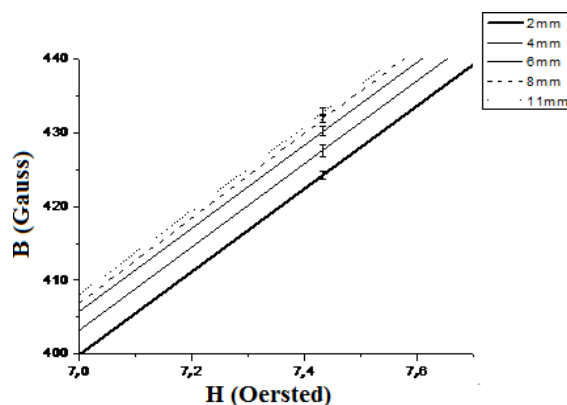
As medidas realizadas nas amostras dos materiais ferromagnéticos e paramagnéticos foram utilizadas para a calibração da simulação pelo Método dos Elementos Finitos. Desse modo, com o programa calibrado o aluno passará a ter uma plataforma em que pode estudar materiais com diferentes permeabilidades e geometrias, além de poder estudar o efeito do meio nas densidades de fluxo magnético.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A curva de magnetização do aço SAE 1045 pode ser dividida em três regiões, só apresentando um comportamento linear em sua primeira região, onde os valores de densidade de fluxo magnético (B) são pequenos, da ordem de centenas de Gauss. Essa região corresponde à região de reversibilidade da movimentação das paredes dos domínios (DE

MACEDO SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2016). Essa região foi escolhida para estudo, pois apresenta comportamento linear, de modo que a permeabilidade é dada pela inclinação da reta. Na região estudada, a intensidade de campo magnético aplicada (H) foi variada entre 7 Oe e 7,7 Oe, conforme resultados apresentados na Figura 3. Esta curva de magnetização experimental de B em função de H é linear para todas as espessuras de amostras utilizadas (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 11 mm), de onde se pode concluir estar operando na região de reversibilidade. Além disso, o aluno pode notar a partir do gráfico que ao se variar a espessura tem-se a formação de retas paralelas para cada espessura de amostra, visto que a permeabilidade é constante.

Figura 3 – Curva de magnetização para o material ferromagnético com diâmetro de 24 mm e diferentes espessuras (Aço SAE 1045).

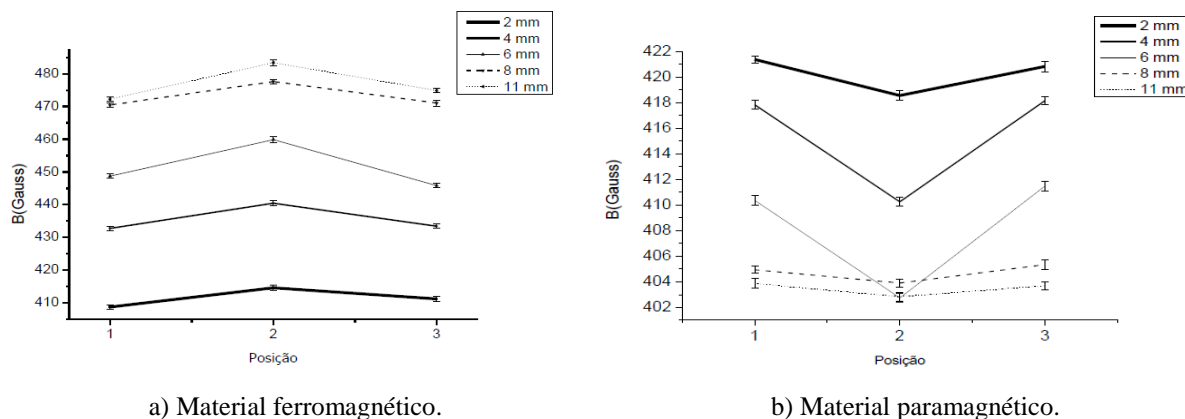


Fonte: Autoria própria.

Também é possível observar analisando-se a Figura 3, a partir de um ponto específico, como por exemplo, o valor de H de 7,43 Oe, que os valores de B variaram com a espessura, aumentado com ela, porém em taxas cada vez menores, até que a partir da espessura de 8 mm o acréscimo do valor de B com o aumento da espessura já foi insignificante. Isto indica que o aumento da espessura para uma intensidade de campo magnético fixo, reduz o efeito da permeabilidade do meio externo. O melhor entendimento disto será realizado a partir da visualização da densidade de fluxo magnético da bancada simulada.

A fim de se estudar a influência da permeabilidade do meio sobre as densidades de fluxo magnético, duas condições foram definidas: na primeira considerou-se o material possuir permeabilidade maior do que o meio; na segunda o meio possuir permeabilidade maior que a do material estudado. Para isso, foram escolhidos dois materiais, um ferromagnético e um paramagnético, sendo eles um aço SAE 1045 e uma liga de alumínio ASTM 6261, respectivamente. Nas Figuras 4a e 4b, os comportamentos das curvas de B para a posição no centro (posição 2) e com distância de 6 mm para a esquerda (posição 1) e 6 mm a direita do centro da amostra (posição 3), para ambos os materiais, são apresentados. O deslocamento do centro serve para analisar o efeito da permeabilidade do meio externo ao aproximarmos dele.

Figura 4 – Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras de aço SAE 1045 (a) e alumínio ASTM 6261 (b).



Fonte: Autoria própria.

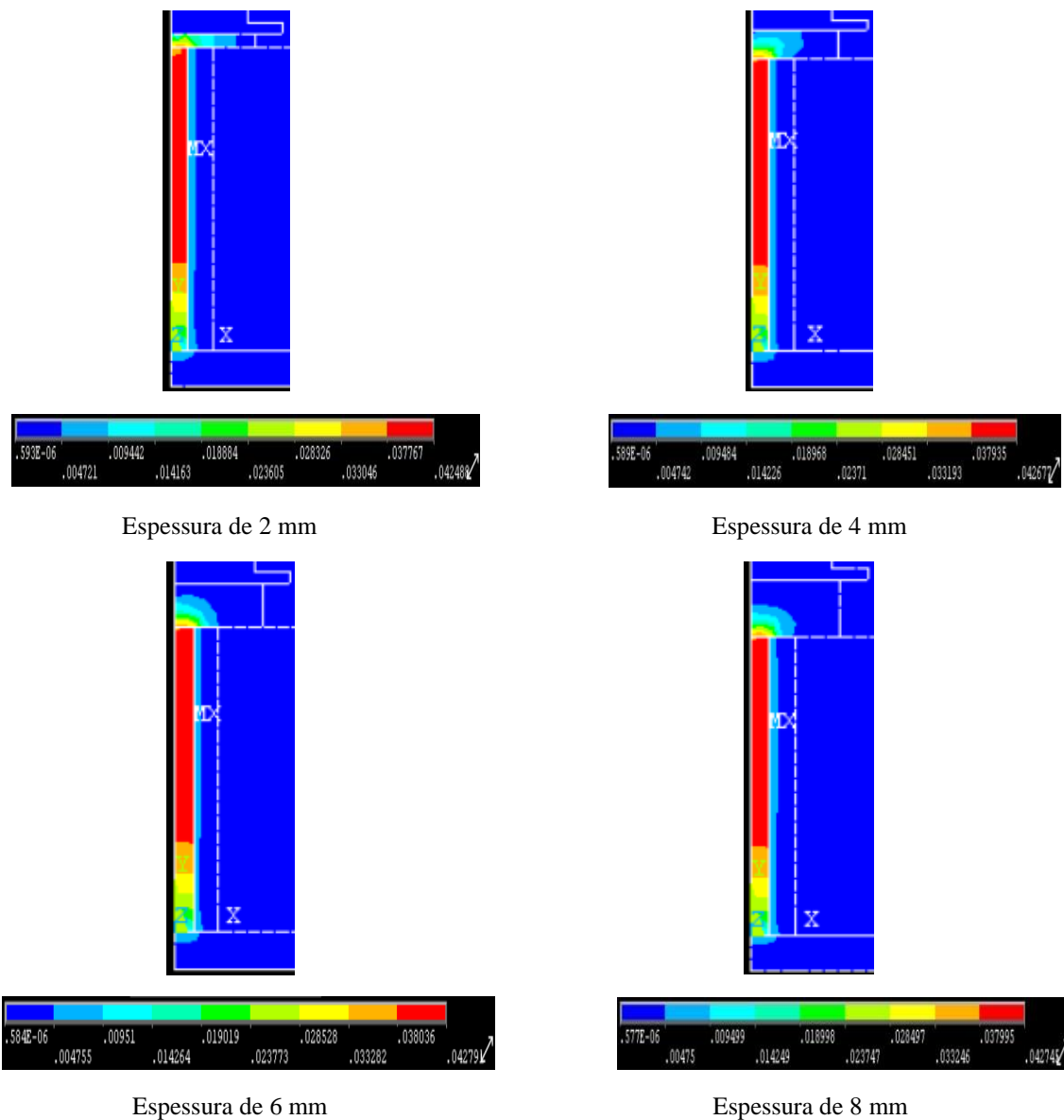
Analisando-se a Figura 4a, para o material ferromagnético, nota-se que para todas as posições os valores de B aumentaram com o aumento da espessura e esse valor tendeu a estabilizar a partir da espessura de 8 mm, mostrando que a partir de determinada espessura B não mais varia, se tornando independente dela. Além disso, ao se deslocar do centro, todas as medidas tiveram redução devido se caminhar em direção ao meio de menor permeabilidade.

Na Figura 4b, para as amostras paramagnéticas, considerando o mesmo valor do campo aplicado no aço SAE 1045, pode-se perceber que para todas as posições o comportamento de B foi diferente do seu comportamento na Figura 4a. Observa-se que ocorreu uma redução do valor de B com o aumento da espessura e esse valor tendeu a se estabilizar a partir da espessura de 6 mm, mostrando que a partir de determinada espessura, B não varia mais, se tornando independente desta. Isso se deve à redução da influência do meio externo à medida que a espessura aumenta, predominando a região de menor permeabilidade. Quando houve deslocamento do centro todas as medidas passaram a ter aumento. O deslocamento para as bordas leva à aproximação do meio de maior permeabilidade, o que justifica os resultados obtidos (DE MACEDO SILVA et al., 2016; LO; LAI, 2011).

O ensaio apresentado foi simulado pelo Método dos Elementos Finitos utilizando o software APDL ANSYS. A simulação permite a visualização do fluxo magnético dentro do material e um melhor entendimento do efeito do meio nesse (MARECHAL; RAMDANE, 2013; OLIVEIRA, 2010). As Figuras 5 e 6 apresentam as variações da densidade de fluxo magnético para a situação onde a permeabilidade do material é superior à do meio e a condição onde o meio tem maior permeabilidade que a do material estudado, respectivamente.

A Figura 5 mostra o perfil da densidade de linhas de campo magnético dentro do material. As regiões vermelhas correspondem as de maior concentração de fluxo magnético. Nota-se que essa região se concentra no núcleo da bobina na qual é gerada o campo magnético. Essa não é concentrada ao longo de todo o núcleo da bobina e sim na parte onde o material ferromagnético a ser analisado é posicionado. A maior permeabilidade do material em relação à outra extremidade do núcleo faz com que o fluxo magnético seja concentrado mais próximo dessa região. Esse comportamento não é o observado na Figura 6 onde a região vermelha se concentra no centro do núcleo. Isso se deve aos valores de permeabilidade nas extremidades desse serem pequenas em relação ao núcleo ferromagnético. Nessa situação se tem em uma extremidade um material paramagnético e na outra o ar. A visualização desse comportamento somente é possível através da simulação da bancada.

Figura 5 – Simulação da variação da densidade de fluxo em função da espessura para um aço SAE 1045.

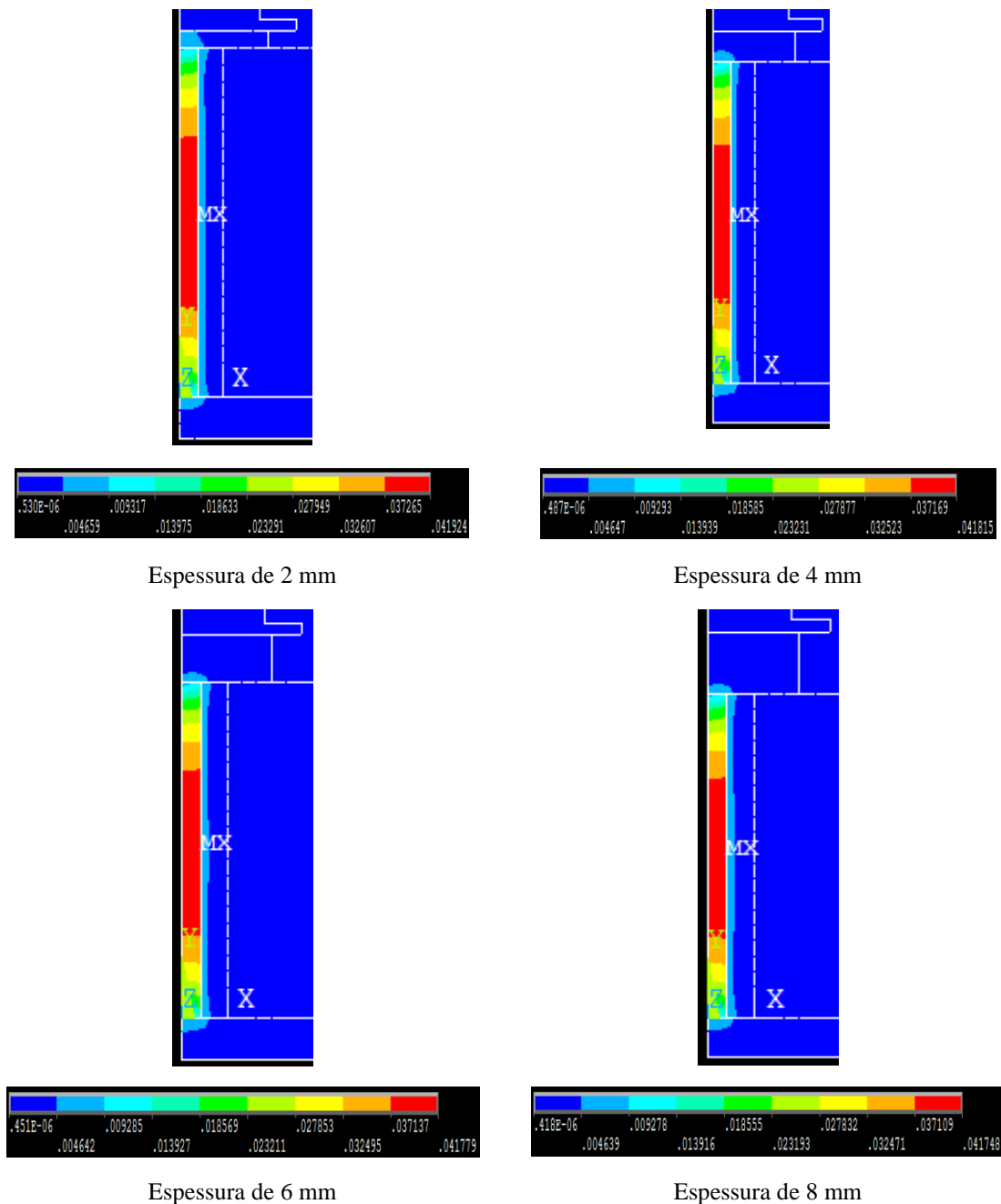


Fonte: Autoria própria.

As Figuras 5 e 6 também mostram a influência da espessura do material na densidade de fluxo gerada da interação. Na condição em que a permeabilidade do material é maior que a do meio (Figura 5) observa-se que para a espessura de 2 mm o fluxo magnético tendeu a percorrer a espessura do material de maior permeabilidade radialmente. Entretanto, à medida que a espessura aumentou, o fluxo tendeu a penetrar no material até se estabilizar a partir da espessura de 6 mm, para a intensidade de campo magnético empregada.

Na figura 6 o material simulado é paramagnético e, portanto, sua permeabilidade é inferior à do meio ambiente. Nessa condição o fluxo magnético para a espessura de 2 mm tendeu a penetrar a região oposta da peça que tem maior permeabilidade. Contudo, à medida que a espessura aumentou o fluxo na saída do solenoide passou a ter cada vez mais dificuldade de penetrar no material de menor permeabilidade e se concentrou na saída desse.

Figura 6 - Simulação da variação da densidade de fluxo em função da espessura para o Alumínio ASTM 6261.



Fonte: Autoria própria.

O presente trabalho mostrou o uso da simulação pelo Método dos Elementos Finitos para estudo do efeito da permeabilidade do meio na densidade de fluxo magnético de um material

ferromagnético e um paramagnético. Este estudo mostrou a importância da técnica para o entendimento desse fluxo dentro do material, de modo a fornecer ao aluno da disciplina de Materiais Elétricos uma visualização desse e facilitar o entendimento da situação abordada.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o uso da simulação pelo Método dos Elementos Finitos para auxiliar na aprendizagem do fluxo magnético em situações em que a permeabilidade do meio o influencia. As seguintes conclusões foram obtidas:

O entendimento da influência do meio sobre o comportamento do fluxo magnético dentro do material é importante para formação do engenheiro electricista. Ter acesso a ferramentas com este objetivo ajuda no aprendizado da permeabilidade magnética dos materiais. A simulação pelo Método dos Elementos Finitos detalhou o comportamento do fluxo magnético dentro do material e sua variação em função das permeabilidades do material e do meio. Ela se mostrou útil para a visualização do fluxo dentro do material e para o entendimento do efeito do meio sobre esse. Assim, mostrou poder fornecer informações úteis ao engenheiro para o entendimento dos conceitos relacionados com a permeabilidade dos materiais.

O estudo do efeito da espessura do material sobre o fluxo magnético foi apresentado. Este é útil para o engenheiro ter entendimento dos conceitos de amplificadores de campos magnéticos. O Método foi útil para análise de duas situações distintas em que o efeito da espessura do material sobre o fluxo magnético foi analisado. A primeira em que o fluxo crescia com o aumento da espessura até se estabilizar e a segunda em que havia a redução seguida da estabilização. As simulações mostraram o comportamento de forma clara do fluxo nos dois casos e facilitou o entendimento do comportamento.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao IFPB pelo suporte financeiro, bem como pelas bolsas de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

DE MACEDO SILVA, E. et al. Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 3, p. 20130313, 2016.

LI, J. et al. 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.

LO, K. H.; LAI, J. K. L. Microstructural characterisation and change in a.c. magnetic susceptibility of duplex stainless steel during spinodal decomposition. **Journal of Nuclear Materials**, v. 401, n. 1–3, p. 143–148, 2011.

MARECHAL, Y.; RAMDANE, B. Natural element method applied to electromagnetic problems. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 49, n. 5, p. 1713–1716, 2013.

OLIVEIRA, E. A. Método Dos Elementos Finitos Como Ferramenta Didática Para O Ensino De Eletrostática E. 2010.

PATIL, R.; KUSHARE, B. E. Analysis of layer insulation of cast resin transformer using FEM technique. **International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization**



**Techniques, ICEEOT 2016**, p. 96–99, 2016.

SILVA, E. et al. Classification of Induced Magnetic Field Signals for the Microstructural Characterization of Sigma Phase in Duplex Stainless Steels. **Metals**, v. 6, n. 7, p. 164, 2016.

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

## **FINITE ELEMENTS METHOD APPLIED AS A TOOL TO THE PERMEABILITY STUDY**

***Abstract:** The understanding of the behavior of magnetic flux within a material is necessary to make a better analysis of the interaction between the applied magnetic field and material during the study of applications for electrical purposes. In the present work, a study is presented the simulation of a permeability analysis bench by the Finite Element method, with the purpose of helping to learn the influence of permeability to materials with higher and lower permeability than the external one, as well as the study of their thickness in magnetic flux density. This will allow the student to vary the various permeability values and observe the behavior of the magnetic flux density within the material. The simulation by the finite element method was able to provide the visualization of the flow within the material, in order to facilitate the understanding of the effect of the medium. Materials with permeability higher than the medium showed growth followed by stabilization of the magnetic flux inside the material and otherwise reduction followed by stabilization. In both cases the simulation showed to be effective to the visualization and analysis of these behaviors.*

**Key-words:** Finite elements, teaching of electrical materials, permeability.