



## **BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO MEIO EXTERNO SOBRE AS MEDIDAS DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO**

**Louise Gomes de Lima** – lousiegomes@gmail.com

**Edgard de Macedo Silva** – edgard@ifpb.edu.br

**Bruno Ribeiro de Araújo** – braraujo.ee@gmail.com

**Alysson Marques Rufino Paula Leite** – rufinoalysson@gmail.com

**Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins** – rayssasatlins@gmail.com

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

**Resumo:** *O conhecimento da permeabilidade de um material tem sido objeto de estudos para acompanhamento de fases que venham a reduzir propriedades importantes como a de resistência mecânica e a corrosão de matérias. Além disso, é um conhecimento básico obtido na disciplina de Materiais Elétricos. No presente trabalho uma bancada para o ensino da influência da permeabilidade do meio na densidade de fluxo magnético é desenvolvida. Esta consiste na aplicação de uma densidade de fluxo magnético com o auxílio de um solenóide e a determinação do valor resultante desta com o meio, através de um sensor de efeito Hall. Duas condições foram analisadas para o teste da eficácia da bancada, a interação entre um meio com permeabilidade maior do que o material de estudo e um meio com a permeabilidade menor. Foram utilizados um material comercial ferromagnético e um paramagnético e o meio sendo o ar. Foram analisadas amostras com diferentes espessuras dos materiais. Os resultados mostraram que a bancada é capaz de demonstrar o efeito da permeabilidade do meio.*

**Palavras-chave:** *Permeabilidade magnética, bancada de instrumentação, densidade de fluxo magnético.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os materiais apresentam uma maior ou menor resistência à indução magnética. A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) representa a facilidade de passagem de um fluxo magnético através de um material e é maior em materiais ferromagnéticos (NASCIMENTO, 2011). O entendimento da interação entre densidade de fluxo magnético e material faz parte do ensino da disciplina de Materiais Elétricos. Deste modo, o conhecimento da permeabilidade do meio irá fornecer informação para redução de perdas magnéticas em motores de modo a aumentar o rendimento desses.

Vários estudos têm se baseado no estudo da permeabilidade do material para acompanhar a formação de fases que possam vir a comprometer algumas propriedades importantes dos



materiais. Assim, ensaios são desenvolvidos para monitoramento de estruturas em serviço (NORMANDO 2010; SILVA 2009 e 2016).

TAVARES (2010) realizou um estudo com o objetivo de caracterizar a formação de fase de aços inoxidáveis superduplex, baseando-se na variação da permeabilidade magnética da ferrita, obtida através da leitura de um ferritoscópio. Desse estudo, TAVARES (2010) constatou que a variação percentual do teor de ferrita medido no ferritoscópio, está relacionada com a variação da permeabilidade magnética que é influenciada pela precipitação de  $\alpha'$  por decomposição espinodal, pois como a precipitação desta fase dificulta a movimentação dos domínios magnéticos, quando da aplicação de um campo externo, uma diminuição da permeabilidade magnética deverá existir. Contudo, a quantidade de fase obtida em um ferritoscópio depende de características geométricas e superficiais do material.

O estudo da formação da fase  $\alpha'$  e fase  $\sigma$  também foi realizado por medidas de susceptibilidade magnética. Observou-se uma redução de seus valores seguidos de estabilização para as duas fases estudadas. No caso da fase  $\alpha'$ , esse fenômeno ocorreu devido à formação de precipitados uniformemente distribuídos dessa fase dificultando a mobilidade dos domínios magnéticos e a posterior estabilização com o fim de sua formação (consolidação da fase  $\alpha'$ ). Quanto à fase  $\sigma$  sigma, o comportamento ocorreu devido à mesma não ser magnética e sua formação levar à redução da suscetibilidade do material (LO 2007, 2010).

No presente trabalho uma bancada experimental é desenvolvida para o estudo do efeito da permeabilidade magnética do meio, sendo útil tanto para aplicações de pesquisa, quanto para o ensino da disciplina Materiais Elétricos.

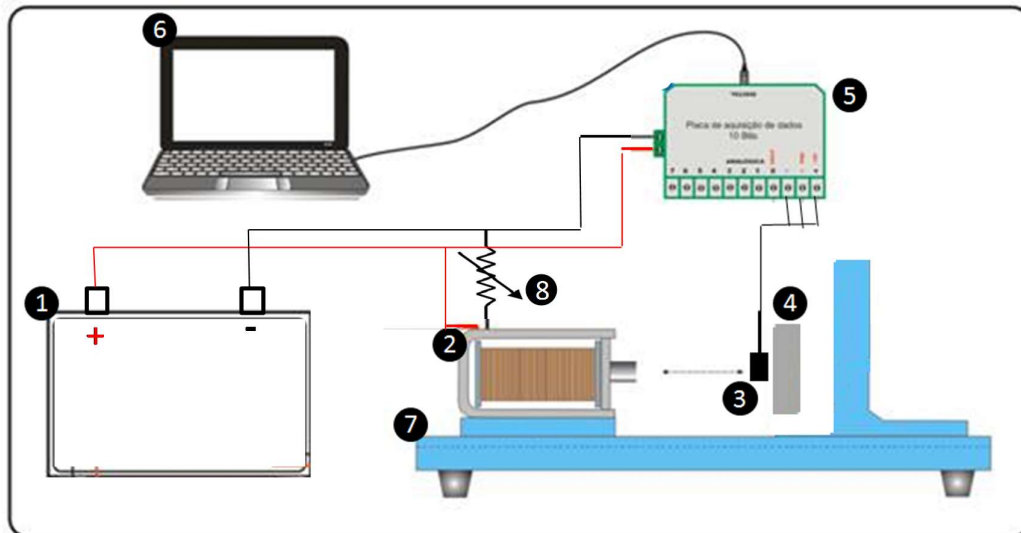
## 2. METODOLOGIA

Um aço e uma liga de alumínio foram escolhidos, como amostras para a bancada, por terem permeabilidades magnéticas bastante distintas. O primeiro é ferromagnético e o segundo paramagnético. A permeabilidade do meio de estudo era menor do que o material ferromagnético e maior do que o paramagnético. Os materiais foram recebidos na forma de vergalhões com diâmetros de 30mm para o aço SAE 1045 e 50mm para o alumínio ASTM 6261. Amostras de ambos os aços foram confeccionadas com diâmetro de 24mm e espessuras de 2, 4, 6, 8, e 11mm.

O equipamento de teste é apresentado na Figura 1. Nesta é apresentada uma representação esquemática do equipamento de teste onde (1) representa o sistema de alimentação, (2) o solenóide, (3) o sensor Hall, (4) a amostra, (5) a placa de aquisição de dados, (6) o computador, (7) a bancada e (8) o potenciômetro.



Figura 1 - Representação esquemática do equipamento de teste: (1) Sistema de alimentação; (2) solenóide; (3) sensor Hall; (4) amostra; (5) placa de aquisição de dados; (6) computador; (7) bancada; (8) potenciômetro.



O equipamento de teste representado na Figura 1 foi alimentado por uma bateria automotiva capaz de fornecer uma tensão contínua de 12 V e uma corrente de até 55 A. Foi utilizado um sensor de efeito Hall linear modelo SS495A, da *Allegro Microsystems*, com sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss, dimensões de 3,00 mm x 4,00 mm x 1,57 mm e tensão de alimentação podendo variar entre 0 e 10V, tendo sido escolhido operá-lo com uma tensão contínua de alimentação de 5 V. Foi utilizada uma placa de aquisição de dados multicanal com um conversor analógico-digital de 10 bits, uma entrada USB e uma saída regulada de tensão de 5 V, alimentada por uma tensão estabilizada de 12 V. A saída regulada foi utilizada na alimentação do sensor Hall. A bancada serviu como base para fixação do solenóide, do sensor e das amostras e foi confeccionada em Poliacetal, material com baixo coeficiente de atrito e baixo coeficiente de dilatação térmica.

A intensidade de campo magnético foi aplicada no centro das amostras circulares e deslocada de 6mm desta. O objetivo era observar o efeito do meio externo no centro, bem como o efeito de borda, ou seja, afastado do centro.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

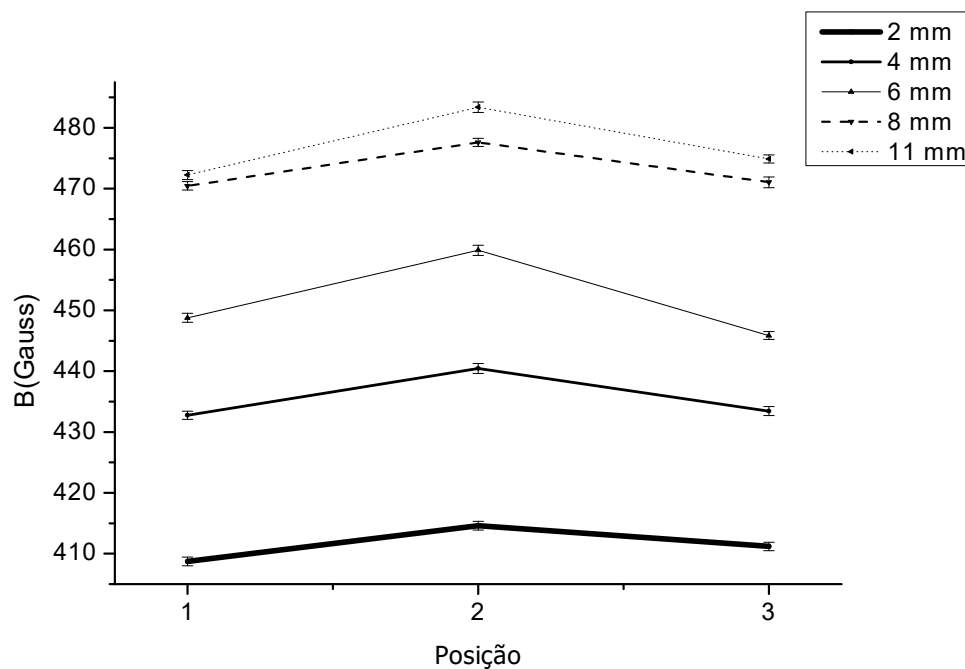
Na Figura 2 temos o estudo do efeito da permeabilidade do meio, quando a permeabilidade no material é maior do que a do meio. Neste caso o material é ferromagnético e o meio o ar. Amostras de um aço SAE 1020 de 24 mm de diâmetro e espessuras variando de 2, 4, 6, 8, e 11 mm foram submetidas a uma intensidade de campo magnético de 2,5 Oe. O comportamento das curvas de B com a distância do centro para essas amostras do aço SAE 1045 submetidas ao valor de H é apresentado na Figura 2. No eixo das abscissas são apresentadas as posições onde H foi aplicado e B medido, sendo a posição 1 a 6 mm à esquerda do centro da amostra; a posição 2 exatamente no centro da amostra; e a posição 3 a 6 mm à direita do centro das amostras. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada uma das espessuras analisadas. Pela análise da Figura 2, pode-se observar que para todas as posições (posição 1, posição 2 e posição 3) ocorreu o aumento do valor de B com o aumento da espessura e este



valor tendeu a se estabilizar a partir da espessura de 8 mm, mostrando que a partir de determinada espessura, B não mais variará, se tornando independente dela para o H aplicado.

Sabe-se, de acordo com a Lei de Faraday, que o valor de B é proporcional à quantidade de linhas de indução que atravessam o material e que seu valor é máximo quando elas o cruzam perpendicularmente (PURCELL, 2013). Dessa maneira pode-se concluir que com o aumento da espessura houve uma maior penetração das linhas de campo magnético no material, tornando-as cada vez mais concentradas e perpendiculares ao elemento Hall do sensor. Ao se utilizar espessuras acima de 8 mm, a maioria das linhas de campo já estavam concentradas e orientadas o bastante para não influenciarem mais significativamente no valor de B.

Figura 2 - Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do aço SAE 1045 para H de 7,43 Oe (posição 1: 6mm à esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm à dir. do centro).



O aço SAE 1020 é um material ferromagnético e tem alta permeabilidade em relação ao meio que é o ar. Na Figura 2, à medida que aumentamos a espessura, distanciamos o meio do ponto de penetração das linhas de campo e estas passam a sentir menos o efeito do meio externo. Isto facilita a penetração das linhas de campo e os valores de B aumentam até não termos mais influência desse meio.

Com relação ao efeito de borda, pode-se, ainda da análise da Figura 2, observar que os valores de B medidos no centro e a 6 mm do centro das amostras variaram, tendo os valores de B no centro sido em todos os casos maiores. Isso ocorreu para todas as espessuras. O deslocamento do centro em direção a borda faz com que a proximidade do meio externo influencie nos valores de B. Estes são reduzidos pela aproximação do meio de menor permeabilidade. A perturbação no ângulo de incidência das linhas de campo se deu porque na proximidade da borda o ar, que tem permeabilidade magnética menor que o aço, passou a interferir no trajeto das linhas de campo magnético, reduzindo a permeabilidade.

Na Figura 3 temos o estudo do efeito da permeabilidade do meio, quando a permeabilidade do material é menor que desse. Neste caso, utilizou-se um material paramagnético e o meio

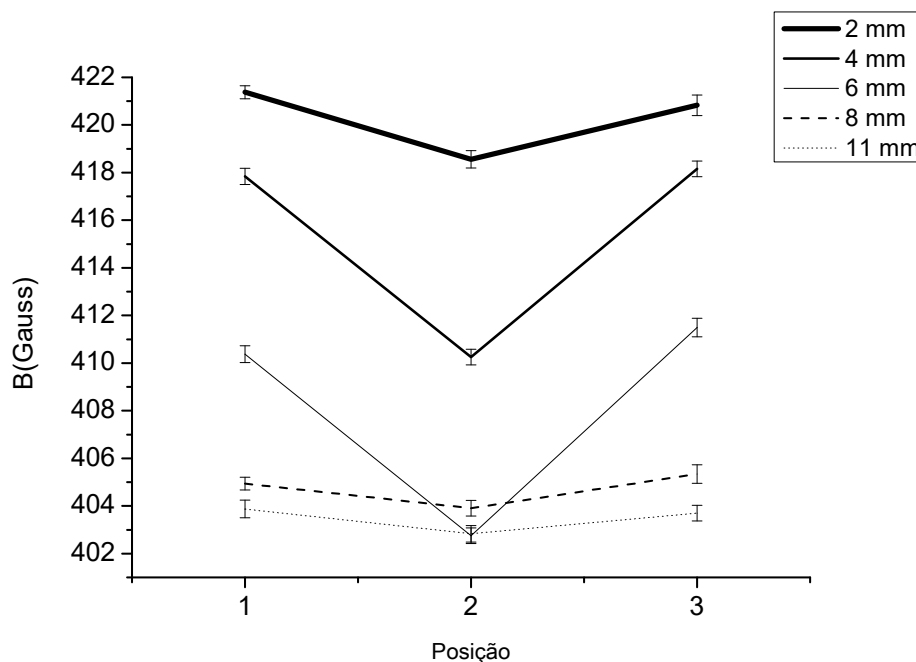


sendo o ar. Uma liga de alumínio ASTM 6261 de 24 mm de diâmetro e espessuras de 2, 4, 6, 8 e 11 mm foram utilizadas. O comportamento das curvas de B com a distância do centro para as amostras do alumínio submetidas ao valor de H de 2,5 Oe é apresentado na Figura 3. No eixo das abscissas são apresentadas as posições onde H foi aplicado e B medido, sendo a posição 1 a 6 mm à esquerda do centro da amostra; a posição 2 exatamente ao centro da amostra; e a posição 3 a 6 mm à direita do centro das amostras. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B obtidos para cada uma das espessuras analisadas.

Pela análise da Figura 3, pode-se observar que ocorreu a redução do valor de B com o aumento da espessura e este valor tendeu a se estabilizar a partir da espessura de 6 mm, mostrando que a partir de determinada espessura, B não mais variará, se tornando independente desta. Com relação ao efeito de borda, pode-se, ainda da análise da Figura 3, observar que os valores de B medidos no centro e a 6 mm do centro das amostras variaram, tendo seus valores na borda sido em todos os casos maiores. Isso ocorreu para todas as espessuras.

A variação dos valores de B entre a borda e o centro das amostras do alumínio pode ser explicada pelo mesmo princípio utilizado para explicar essa ocorrência no aço, ou seja, ocorreu uma perturbação no ângulo de incidência das linhas de campo, porém, no caso do alumínio, ao contrário do que ocorreu no aço, B foi maior na borda das amostras, onde havia uma maior interferência do ar. Esse comportamento diferente é possível devido às características magnéticas do aço e do alumínio serem diferentes. O alumínio é um material paramagnético e tem permeabilidade magnética muito baixa, próxima a do ar, enquanto que o aço é um material ferromagnético com permeabilidade magnética muito superior à do ar. O ar ambiente apresentou uma permeabilidade menor do que a do alumínio.

Figura 3 - Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do alumínio ASTM 6261 para H de 14,9 Oe (posição 1: 6mm à esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm à dir. do centro)





#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi desenvolvida uma bancada experimental para estudo da influência da permeabilidade com o meio externo chegando às seguintes conclusões:

No experimento em que a permeabilidade do material era maior do que a do meio houve um aumento da densidade de fluxo magnético com o aumento da espessura. Isto se deve ao fato do aumento da espessura reduzir o efeito do meio externo. Este comportamento foi contrário ao observado na condição em que o meio tinha permeabilidade magnética maior. O efeito de borda também foi observado pela bancada, sendo observada uma redução da densidade de fluxo magnético no primeiro caso e uma redução no segundo. A bancada desenvolvida mostrou ser eficaz para estudo, e permitiu ao aluno entender o efeito da permeabilidade do meio nas medidas de densidade de fluxo magnético de diferentes materiais. Deste modo, foi possível correlacionar os conceitos da teoria com a prática, sendo uma ferramenta importante para dar suporte ao estudo da disciplina de Materiais Elétricos.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao Instituto Federal da Paraíba pelas bolsas de pesquisas envolvidas e ao suporte financeiro de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LO, K.H., LAI, J.K.L., SHEK, C.H. e LI, D.J., Magnetic and transformation behavior of duplex stainless steels under non-isothermal conditions and temperature-fluctuation monitoring, **Materials Science and Engineering A**, 452-453, p. 149-160, 2007.

LO, K.H., e LAI, J.K.L., Microstructural characterization and change in a.c. magnetic susceptibility of duplex stainless during spinodal decomposition, **Journal of Nuclear Materials**, v. 401, p. 143-148, 2010.

NASCIMENTO JR, Geraldo Carvalho. **Máquinas Elétricas: teoria e ensaios**. 4. Ed. São Paulo: Érica, 2011.

NORMANDO, P. G., MOURA, E. P., SOUZA, J. A., TAVARES, S. S. M., PADOVESE, L. R., Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel, **Mater. Sci. Eng. A**, v.527, p. 2886–2891, 2010.

PURCELL. **Electromagnetism**. Lecture 14. Harvard University, USA, 2013.

SILVA, E. M. ; ALBUQUERQUE, V. H. C., LEITE, J. P., VARELA, A. C. G., MOURA, E. P., TAVARES, J. M. R. S., Phase transformations evaluation on an UNS S31803 duplex stainless steel based on Nondestructive Testing. **Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: properties, microstructure and processing**, v. 516, p. 126-130, 2009.

SILVA, E.M., LEITE, J.P., FRANÇA NETO, F.A., LEITE, J.P., FIALHO, W.M.L., ALBUQUEQUE, V.H.C., TAVARES, J.M.R.S., Evaluation of the magnetic permeability for the microstructural characterization of a duplex stainless steel., **Journal of Testing and Evaluation**, DOI: 10.1520/JTE20130313, ISSN: 0090-3973, ASTM (in press), v. 44, issue 3,

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção





maio, 2016.

TAVARES, S.S.M., PARDAL, J.M., GUERREIRO, J.L., GOMES, A.M., DA SILVA, M.R.,  
Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803, **J. Magn. Magn. Mater.**, v. 322, p. 129-133, 2010.

## **EXPERIMENTAL BENCH FOR STUDY OF THE INFLUENCE OF THE EXTERNAL MEAN'S MAGNETIC PERMEABILITY OVER THE MAGNETIC FLUX DENSITY MEASUREMENTS**

**Abstract:** *The knowledge of a material permeability has been object of studies for monitoring phases that might come to reduce important properties such as mechanical resistance and corrosion of materials. In addition, it is a basic knowledge obtained in the subject of Electric Materials. In the present work, a bench is developed for teaching the influence of the permeability of the medium in the magnetic flux. It consists in the application of a magnetic flux density with the support of a solenoid and the determination of the its resulting value with the medium, through a Hall effect sensor. Two conditions were analyzed for testing the efficiency of the bench, the interaction between one medium of higher permeability than the studied material and with one medium of lower permeability. A commercial ferromagnetic material and a paramagnetic material were used, where the medium was the air. Samples with different thicknesses were analyzed. The results proved that the bench is capable of demonstrating the effect of the medium permeability.*

**Key-words:** *Magnetic permeability, instrumentation bench, magnetic flux density.*

Organização



Promoção

