

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS

Leonardo Campos¹
Henrique Marques Waldman²
Diana Márcia Wal Bieluczyk³
João Carlos Vernetti dos Santos⁴
Marília Amaral da Silveira⁵
José Carlos Krause de Verney⁶

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados parciais de um projeto cujo objetivo é produzir materiais compósitos magnéticos macios (*Soft Magnetic Composites* - SMC) e obter suas características magnéticas e elétricas. Os materiais compósitos magnéticos macios são produzidos a partir de pequenas partículas de pó de ferro recobertas com uma fina camada de dielétrico. Possuem alta resistividade e isotropia magnética tridimensional. Essas características fazem dos SMC um tipo de material ferromagnético adequado à construção de núcleos de dispositivos eletromagnéticos submetidos a campos magnéticos variáveis e com distribuição tridimensional. As amostras de SMC foram produzidas com diferentes teores de dielétrico e compactadas com pressões de 400 MPa e 600 MPa. Os compósitos magnéticos macios produzidos com pó de ferro e baquelita apresentaram resistividades entre 0,0048 Ωm e 0,0145 Ωm . A permeabilidade magnética relativa máxima das amostras variou de 88 a 223.

Palavras-chave: Compósitos magnéticos macios (SMC), caracterização de materiais magnéticos, metalurgia do pó, propriedades elétricas e magnéticas, dispositivos eletromagnéticos.

ABSTRACT

This work presents the partial results of a research whose aim is the production of soft magnetic composites (SMC) materials and obtaining their magnetic and electrical characteristics. Soft magnetic composites materials are obtained when powder particles of iron are bonded with a dielectric coating. They present high electrical resistivity and are magnetically isotropic. Those characteristics made the SMC suited to the construction of yokes of electromagnetic devices that

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica/ULBRA- Bolsista CNPq

² Acadêmico do curso de Engenharia Mecânica/ULBRA- Bolsista FAPERGS/ULBRA

³ Acadêmica do curso de Engenharia Elétrica/ULBRA

⁴ Professor do curso de Engenharia Elétrica e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis/ULBRA

⁵ Professora-Orientadora do curso de Engenharia Elétrica e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis/ULBRA

⁶ Professor-Orientador do curso de Engenharia Mecânica e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais e Processos Sustentáveis/ULBRA

operate under alternating magnetic field and with 3D distribution. The SMC samples were produced with different concentration of dielectric and were compacted with pressures of 400 MPa and 600 MPa. Samples produced with iron powder and Bakelite presented resistivity between 0.0048 Ωm and 0.0145 Ωm . The maximum relative magnetic permeability of the samples presented values between 88 and 223.

Keywords: Soft magnetic composites (SMC), characterization of magnetic materials, powder metallurgy, electrical and magnetic properties, electromagnetic devices.

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados de um projeto que está em andamento, cujo objetivo é produzir e caracterizar magneticamente materiais compósitos magnéticos macios (*Soft Magnetic Composites* - SMC). Os SMC's são um tipo de material adequado para ser aplicado à construção de núcleos de dispositivos eletromagnéticos submetidos a campo magnéticos variáveis e com distribuição tridimensional.

Os compósitos magnéticos macios são fabricados pela técnica da metalurgia do pó, que envolve, normalmente, as seguintes etapas: obtenção do pó de ferro, mistura do pó com uma resina dielétrica, compactação, cura térmica e análise do material (RODRIGUES et al., 2011). Os SMC's são produzidos a partir de pequenas partículas de pó de ferro recobertas com uma fina camada de dielétrico, que confere isolamento elétrica aos grãos (FLORES FILHO, 2007). O pó de ferro de alta pureza, com partículas de diâmetro da ordem de 15 a 150 μm , é misturado com material dielétrico, com teor em massa controlado, e com um lubrificante. A seguir, a mistura é colocada em uma matriz e é compactada para formar peças de material ferromagnético (HÖGANÄS AB, 2011). O método mais comum de compactação é a prensagem axial em uma matriz de aço. As prensas mecânicas ou hidráulicas geram as pressões necessárias, que variam de 400 a 800 MPa. Após, o material é submetido à cura térmica em um forno, para promover o aglutinamento dos grãos de ferro com o dielétrico.

Os materiais classificados como SMC possuem isotropia magnética e elevada resistividade elétrica em comparação aos aços elétricos tradicionais (BAGGIO FILHO, 2008). A alta resistividade elétrica reduz o estabelecimento de correntes parasitas e, conseqüentemente, seus efeitos indesejáveis. A grande maioria dos dispositivos eletromagnéticos, tais como indutores, transformadores, atuadores, motores e geradores elétricos, opera com campos magnéticos variáveis. Como resultado, são estabelecidas correntes parasitas nos núcleos ferromagnéticos desses dispositivos. Tradicionalmente, os núcleos são confeccionados com material ferromagnético macio laminado. Também são utilizados materiais ferromagnéticos sinterizados (CYR et al., 2009). O estabelecimento dessas correntes parasitas depende da geometria dos núcleos ferromagnéticos e da frequência de variação da densidade de fluxo magnético. Também depende da resistividade elétrica e da permeabilidade magnética do material ferromagnético (LALL, 1992). Quanto menor a resistividade do material, maior será o estabelecimento dessas correntes (CALLISTER Jr., 2002). É possível produzir compósitos magnéticos macios adequados à determinada faixa de frequência de variação da densidade de fluxo magnético, através

do controle dos componentes químicos presentes na mistura de pó de ferro (HÖGANÄS AB, 2011). A permeabilidade magnética máxima dos SMC's é limitada pela presença das partículas de dielétrico que recobrem os grãos de ferro e por cavidades formadas durante o processo de produção do material.

No caso de núcleos laminados empregados na construção de máquinas elétricas, a complexidade da geometria de rotores e estatores faz com que uma grande quantidade de material ferromagnético laminado seja perdida durante a etapa de estampagem das chapas. O estudo para o desenvolvimento de novas ligas de SMC e de um processo de produção econômico contribui para a produção de dispositivos eletromagnéticos de maior desempenho, com menores perdas de potência e para a redução da produção de sucata proveniente da construção de núcleos.

O projeto que está em andamento tem como objetivo estudar os compósitos magnéticos macios, o que inclui o desenvolvimento de uma estrutura de produção desse material na Universidade Luterana do Brasil e a caracterização de suas propriedades mecânicas, elétricas e magnéticas. O projeto tem como objetivos específicos: desenvolver uma estrutura para produção de compósitos magnéticos macios; produzir amostras de material compósito magnético macio, realizar ensaios com as amostras para caracterização de suas propriedades mecânicas (dureza), elétricas (resistividade) e magnéticas (permeabilidade magnética, curva de magnetização e perdas magnéticas). Como objetivo complementar, tem-se, ainda a aplicação do SMC na construção de dispositivos eletromagnéticos, para avaliação do seu desempenho em relação a outros materiais ferromagnéticos macios.

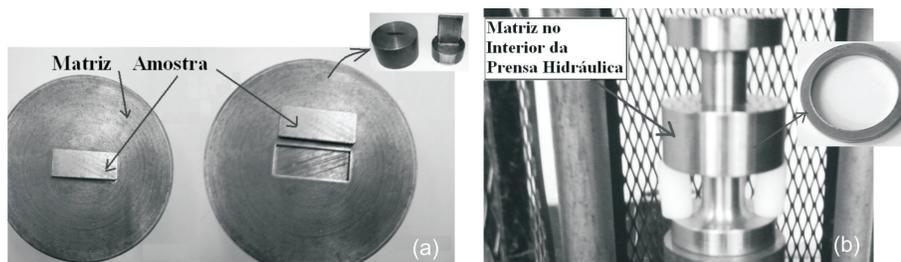
MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, foi estudada uma metodologia para a aplicação de técnicas da metalurgia do pó na fabricação das amostras de compósitos magnéticos macios. O processo de desenvolvimento da metodologia incluiu as etapas de mistura de pó de ferro de elevada pureza com material dielétrico e lubrificante, para produzir uma mistura homogênea, a colocação da mistura em uma matriz de forma geométrica adequada à realização de ensaios posteriores, compactação do material em uma forma definida, cura térmica e ensaios das amostras.

O processo de obtenção da mistura de pó com o material dielétrico e com lubrificantes deve ser controlado, pois os percentuais de cada um desses componentes na mistura influenciam as características das amostras a serem produzidas. Foram produzidas amostras de SMC com dois tipos de dielétrico diferentes. Na primeira etapa do projeto, o material isolante (dielétrico) utilizado foi a baquelita. Na segunda etapa, o material isolante utilizado foi uma resina fenólica. Nas duas etapas, o material dielétrico foi adicionado com diferentes percentuais em massa em relação ao pó de ferro, para avaliação de sua influência sobre as características mecânicas, elétricas e magnéticas do SMC. A mistura de pó de ferro com dielétrico foi então colocada em uma matriz e, a seguir, foi submetida à compactação. Uma prensa hidráulica gerou as pressões necessárias.

As amostras foram produzidas no formato toroidal e em barra. O formato toroidal foi utilizado nos ensaios para a caracterização magnética das amostras. O formato em barra foi utilizado para a realização dos ensaios mecânicos e de resistividade elétrica. A figura 1(a) mostra a matriz de aço utilizada para a produção de amostras em barra, e a figura 1(b), a matriz para a produção de amostras no formato toroidal.

Figura 1: Matrizes utilizadas para a produção de amostras: (a) em barra, (b) no formato toroidal, com detalhe da amostra produzida.



Após a compactação, foi feita uma cura térmica das amostras, sem atmosfera controlada. Inicialmente, foi realizada uma pré-cura a 90 °C, com patamar de 2 minutos e, a seguir, uma cura a 155 °C e a 220 °C, cada uma destas também com patamar de 2 minutos. A cura das amostras promove o aglutinamento do pó de ferro com o material dielétrico, fazendo com que as partículas de ferro sejam recobertas por este último. A tabela I apresenta os tipos de amostras produzidas, de acordo com o teor em massa do dielétrico, o tipo de dielétrico e a pressão de compactação.

Tabela 1. Tipos de amostras de SMC produzidas, de acordo com o teor em massa do dielétrico, o tipo de dielétrico e a pressão de compactação.

Material Dielétrico	Pressão de Compactação (MPa)	Teor (%)		
Baquelita	400	1,0	3,0	5,0
Baquelita	600	1,0	3,0	5,0
Resina Fenólica	400	1,0	3,0	5,0
Resina Fenólica	600	1,0	3,0	5,0

As amostras em forma de barra apresentam, em média, as dimensões de 34,13 mm x 13,81 mm x 5,43 mm. As amostras no formato toroidal foram produzidas em duas matrizes com diâmetros diferentes. Uma das matrizes produz amostras com diâmetro interno igual a 25 mm, diâmetro externo de 35 mm e altura de 5 mm, a outra produz amostras com diâmetro interno igual a 45 mm, diâmetro externo de 55 mm e altura de 5 mm. Foram, também, produzidas amostras contendo apenas pó de ferro, compactas com pressões de 400 MPa e 600 MPa. O método de obtenção foi idêntico àquele utilizado para a produção das amostras de SMC, com exceção da cura térmica, que não foi realizada, porque as

amostras não continham dielétrico. O objetivo foi avaliar e comparar as características das amostras produzidas apenas com pó de ferro com aquelas produzidas com pó de ferro e dielétrico. As amostras produzidas na primeira etapa foram ensaiadas para a determinação das suas características elétricas e magnéticas.

Uma das propriedades elétricas mais importantes de um material está relacionada à sua maior ou menor facilidade em conduzir corrente elétrica. A condutividade, σ , é usada para especificar a natureza elétrica de um material. Ela é um indicativo da facilidade com que um material é capaz de conduzir corrente elétrica, independe da geometria e é uma característica própria de cada material. A resistividade, ρ , é igual ao inverso da condutividade, ou seja, $\rho = 1/\sigma$.

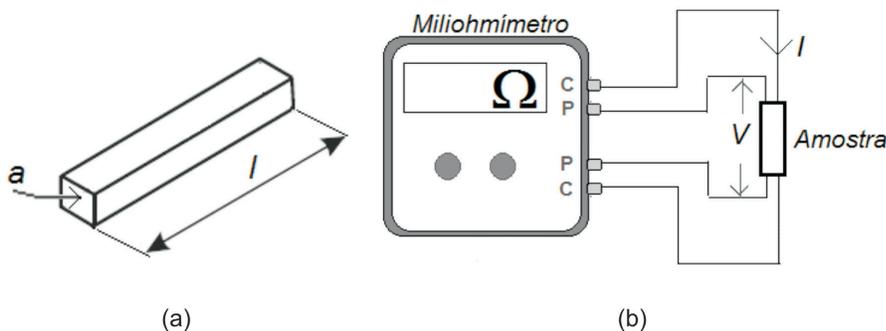
A resistência elétrica de um material depende da geometria e das propriedades elétricas desse material. A resistividade pode ser determinada através da medição da resistência elétrica de uma amostra e das dimensões dessa amostra. A medição da resistência elétrica das amostras de compósito magnético macio foi realizada por meio de um miliohmímetro, com medição de resistência baseada no método de Kelvin, conforme mostra a figura 2(b). No método de Kelvin, a resistência é medida com o emprego de quatro condutores, através dos quais a amostra é conectada. A resistividade pode ser obtida através da resistência pela equação (1):

$$\rho = Ra / l. \quad (1)$$

Onde R é a resistência elétrica em ohms, l é o comprimento da amostra no sentido da corrente, em metro, e a é a área transversal ao sentido de circulação da corrente em metro quadrado, figura (2a).

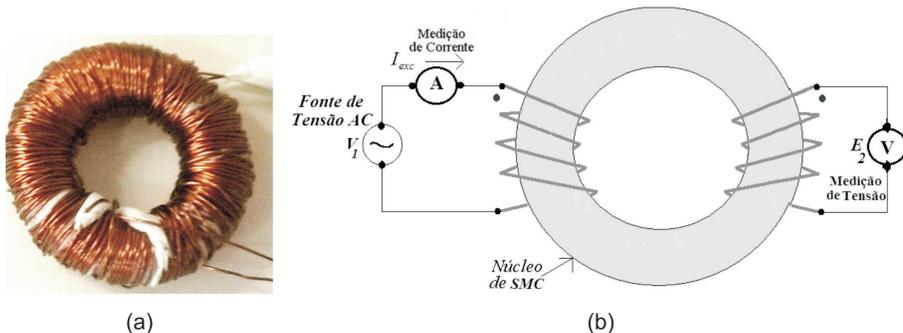
Testes foram realizados com o objetivo de obter-se a curva de magnetização de cada uma das amostras produzidas. Anéis de Rowland foram montados e ensaiados. O anel de Rowland é construído a partir de um núcleo toroidal, em torno do qual são montadas duas bobinas de mesmo número de espiras; uma corresponde ao enrolamento primário, e a outra, ao enrolamento secundário. Ambas são distribuídas uniformemente através do comprimento do toroide.

Figura 2: Medição de resistência elétrica: (a) amostra em forma de barra, (b) ligação dos terminais do miliohmímetro para medição de resistência.



A figura 3(a) apresenta uma fotografia de um anel de Rowland produzido com uma das amostras em estudo. A figura 3(b) apresenta um desenho do circuito com o anel de Rowland para os ensaios para obtenção da curva de magnetização das amostras de SMC.

Figura 3: (a) Fotografia de um anel de Rowland, (b) desenho do circuito com o anel de Rowland para os testes para obtenção da curva de magnetização das amostras de SMC.



Na figura 3(b), o amperímetro mede o valor eficaz da corrente de excitação, $I_{exc\ ef}$, e o voltímetro, o valor eficaz da força eletromotriz induzida no enrolamento secundário, $E_{2\ ef}$. Quando são conhecidos a frequência da tensão aplicada à bobina primária, f , o número de espiras do enrolamento secundário, N_2 , e a área da seção do núcleo, S_{fe} , é possível determinar a amplitude da densidade de fluxo magnético estabelecida no SMC, B_{pico} , através da equação (2):

$$B_{pico} = \frac{E_{2\ ef}}{\sqrt{2}\pi f N_2 S_{fe}} \quad (2)$$

A relação entre o valor eficaz da corrente de excitação, $I_{exc\ ef}$ e o valor eficaz do campo magnético, H_{ef} , pode ser obtida pela equação (3) (KRAUS, 1978):

$$H_{ef} = \frac{N_1 I_{exc\ ef}}{l_{fe}} \quad (3)$$

Assim, conhecendo-se o comprimento médio do núcleo de SMC, l_{fe} , e o número de espiras da bobina primária, N_1 , é possível determinar o valor eficaz da intensidade de campo magnético. Se as bobinas tiverem o mesmo número de espiras, o valor da força eletromotriz induzida no enrolamento primário, $E_{1\ ef}$, será igual a $E_{2\ ef}$, uma vez que ambas são induzidas pelo mesmo fluxo magnético estabelecido no núcleo de material composto magnético macio. Para cada valor eficaz de corrente que percorre o enrolamento primário, o material ferromagnético do núcleo passa por um ciclo completo de magnetização a cada ciclo de variação da corrente em função do tempo (FITZGERALD, KINGSLEY Jr, UMANS, 2006).

Cada anel de Rowland produzido com uma amostra de SMC foi ensaiado com tensão de frequência igual a 60 Hz aplicada ao enrolamento primário. Durante o ensaio de uma amostra, a corrente de excitação, inicialmente ajustada para ser igual a zero, sofreu aumentos em seu valor. Para cada valor de corrente, foi medida a respectiva força eletromotriz induzida no enrolamento secundário. Através da equação (3), foram calculados os valores da intensidade de campo magnético produzidos pelos diferentes valores de corrente de excitação medidos na bobina, e, através da equação (2), obtiveram-se os valores da densidade de fluxo magnético no núcleo de SMC. Para cada amostra ensaiada, foi obtida a curva de magnetização, que representa o comportamento da densidade de fluxo magnético estabelecida no núcleo de SMC em função da intensidade de campo magnético produzida pela corrente no enrolamento primário. Também foi obtida a curva da permeabilidade magnética realtiva em função da intensidade de campo magnético. A permeabilidade magnética, μ quantifica a receptividade de um material ao estabelecimento do fluxo magnético. Ela é calculada através da equação (4):

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

A permeabilidade magnética relativa, μ_r é calculada através da equação (5):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

RESULTADOS

A tabela 2 mostra os resultados da medição de resistividade obtidos para as amostras produzidas com baquelita. Para cada teor de baquelita, foram produzidas quatro amostras em forma de barra com a mesma pressão de compactação. Os valores da tabela 2 representam a média da resistividade calculada para quatro amostras com os mesmos teores de dielétrico e mesma pressão de compactação. As amostras contendo apenas pó de ferro, compactadas a 400 MPa apresentaram resistividade média igual a 0,0012 Ω m.

Tabela 2. Valores de resistividade obtidos para amostras produzidas com baquelita e pó de ferro.

Teor %	Pressão (MPa)	Resistividade (Ω m)
1	400	0,0048
3	400	0,0121
5	400	0,0346
1	600	0,0044
3	600	0,0106
5	600	0,0145

A tabela 3 apresenta os valores de permeabilidade magnética relativa máxima e da correspondente densidade de fluxo magnético obtidos através dos ensaios de caracterização magnética das amostras realizados a 60 Hz. Com relação às amostras toroidais, para cada

teor de baquelita, foram produzidas duas amostras com a mesma pressão de compactação, uma através da matriz maior, e a outra, através da matriz menor. Os valores da tabela 3 representam as médias dos valores de permeabilidade relativa máxima e dos valores da densidade de fluxo magnético correspondente, obtidas para duas amostras com os mesmos teores de dielétrico e mesma pressão de compactação.

Tabela 3. Valores médios da permeabilidade magnética relativa máxima e da correspondente densidade de fluxo magnético, para uma frequência de 60 Hz.

Teor (%)	Pressão (MPa)	Permeabilidade Relativa Máxima	Densidade de Fluxo Magnético Correspondente (T)
1	400	168	0,31
3	400	151	0,27
5	400	88	0,20
1	600	223	0,49
3	600	148	0,34
5	600	121	0,34

Os valores de permeabilidade magnética relativa máxima foram considerados baixos quando comparados com valores apresentados por compósitos magnéticos macios fabricados comercialmente. Conforme pode ser verificado pela tabela, amostras produzidas com 1% de baquelita, compactadas a 400 MPa, apresentam permeabilidade magnética relativa máxima de 168, a 60 Hz. Quando o material opera com esse valor de permeabilidade, a densidade do fluxo magnético estabelecida no núcleo de SMC é igual a 0,31 T. Para amostras compactadas a 600 MPa, com 1% de baquelita, a permeabilidade máxima é de 223, com uma densidade de fluxo magnético correspondente igual a 0,49 T.

As figuras 4(a), 4(c) e 4(e) apresentam as curvas de magnetização obtidas através do ensaio de amostras de SMC com teores de dielétrico de 1%, 3% e 5%, respectivamente. A curva de magnetização mostra o comportamento da densidade de fluxo magnético estabelecida no núcleo de SMC em função da intensidade de campo magnético produzida pela corrente elétrica no enrolamento primário. As figuras 4(b), 4(d) e 4(f) apresentam as curvas com o comportamento da permeabilidade magnética relativa em função da intensidade de campo magnético, obtidas através do ensaio de amostras de SMC com teores de dielétrico de 1%, 3% e 5%, respectivamente. Todos os gráficos da figura 4 foram obtidos através de ensaios com amostras compactadas a 400 MPa. Os gráficos apresentados nas figuras 5(a), 5(b), 5(c), 5(d) 5(e) e 5(f) são equivalentes aos gráficos da figura 4, para amostras compactadas a 600 MPa. Todos os gráficos foram obtidos com frequência igual a 60 Hz.

Figura 4: Gráficos resultantes dos ensaios das amostras de SMC compactadas a 400 MPa: (a), (c) e (e) curvas de magnetização, (b), (d) e (f) curvas da permeabilidade magnética relativa em função da intensidade de campo magnético.

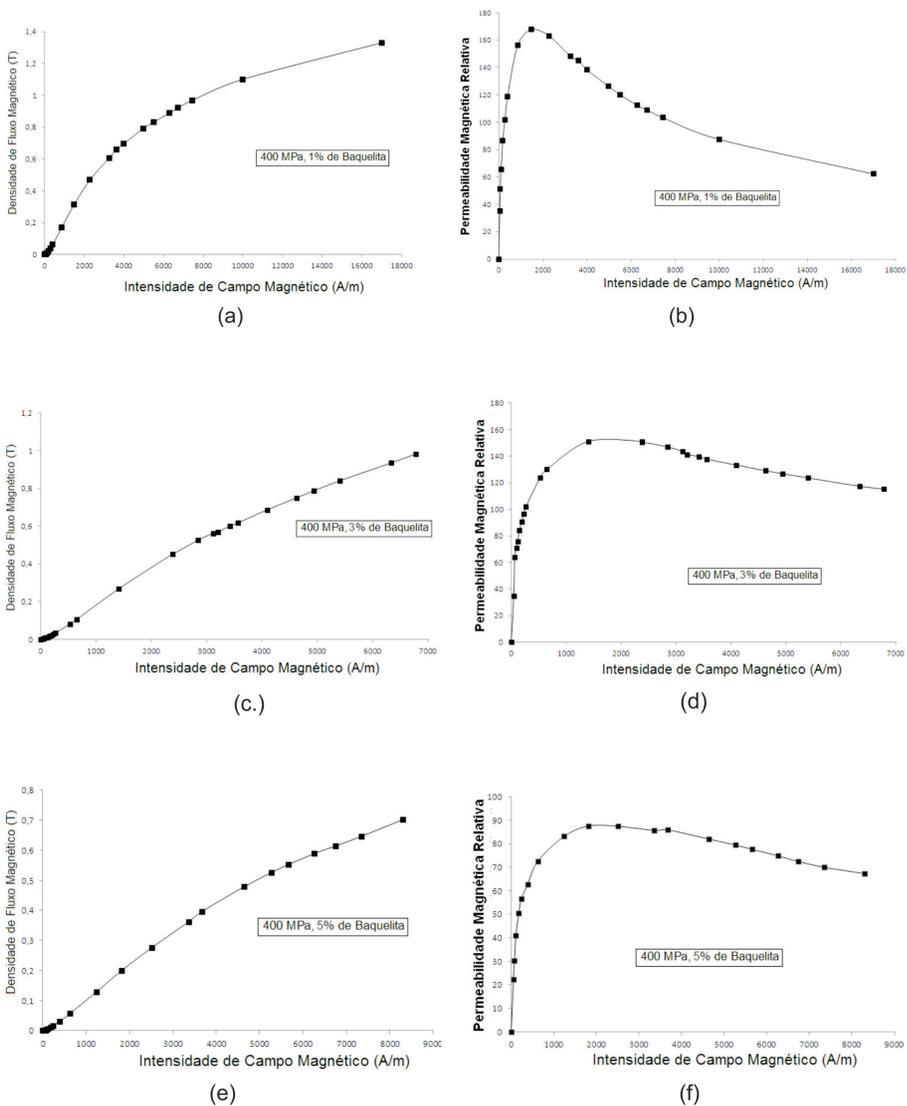
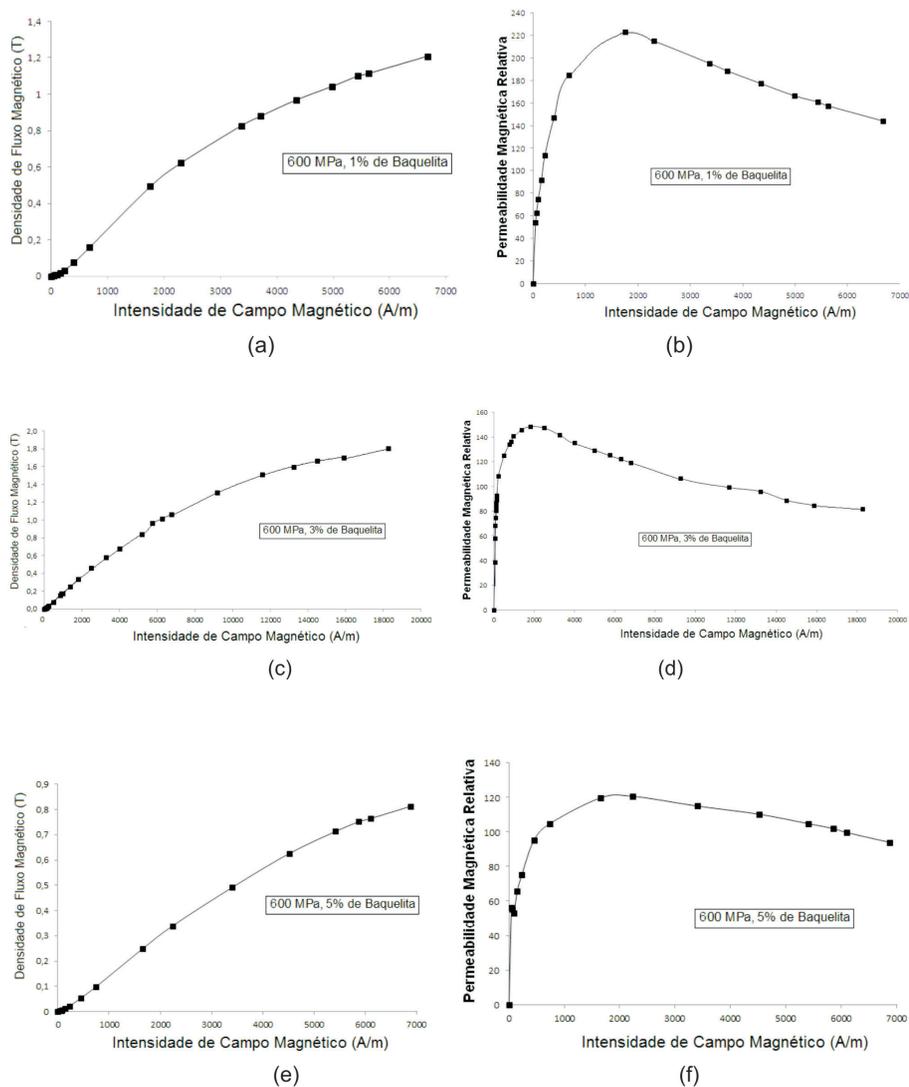


Figura 5 – Gráficos resultantes dos ensaios das amostras de SMC compactadas a 600 MPa: (a), (c) e (e) curvas de magnetização, (b), (d) e (f) curvas da permeabilidade magnética em função da intensidade de campo magnético.



CONCLUSÕES

As amostras de compósitos magnéticos macios produzidas com pó de ferro e baquelita apresentaram resistividades entre 0,0048 Ωm e 0,0145 Ωm . As amostras contendo apenas pó de ferro, compactadas a 400 MPa apresentaram resistividade média

igual a $0,0012 \Omega\text{m}$. Esses valores são muito superiores à resistividade de aços laminados tradicionalmente utilizados nas construção de dispositivos eletromagnéticos que operam em corrente alternada. O aço-silício laminado M-36, por exemplo, tem resistividade igual a $5 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$. O ferro puro apresenta resistividade aproximadamente igual a $1,0 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$.

A adição de baquelita aumentou a resistividade das amostras produzidas. Quanto maior o teor de baquelita, maior será a resistividade do material produzido. A compactação com pressão de 400 MPa produz amostras de maior resistividade. Todavia, há um espaçamento maior entre os grãos ferro, ocupado pelo material dielétrico e pelo ar. Isto reduz a permeabilidade magnética do material produzido.

A permeabilidade magnética relativa máxima apresentada pelas amostras ensaiadas, compactadas a 600 MPa, apresentam maior permeabilidade relativa em relação às amostras compactadas a 400 MPa, em função de haver um menor espaçamento entre as partículas de ferro. A permeabilidade magnética relativa máxima das amostras ensaiadas apresentou baixos valores em relação aos apresentados por compósitos magnéticos macios fabricados comercialmente. Para aplicações em corrente alternada, com frequência acima de 50 Hz, há compósitos desenvolvidos para operarem com permeabilidade relativa máxima acima de 300 (GKN SINTER METALS, 2014).

A próxima etapa envolverá os ensaios com as amostras produzidas com resina fenólica. Será feito um comparativo dos valores de resistividade e permeabilidade magnética relativa máxima apresentados por essas amostras com aqueles obtidos com amostras com baquelita e com compósitos magnéticos macios produzidos comercialmente.

REFERÊNCIAS

- BAGGIO FILHO, N. F. **Estudo e desenvolvimento de um atuador planar com enrolamentos planejados e núcleo de material ferromagnético compósito**. 2008.. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2008
- CYR, C. et al. Methodology to Study the Influence of the Microscopic Structure of Soft Magnetic Composites on Their Global Magnetization Curve. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 45, n. 3, p. 1178-1181, mar. 2009.
- CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- FLORES FILHO, A. F. **Investigation of a double armature homopolar brushless d. c. linear motor**. Cardiff, 1996. Ph. D. Thesis, University of Wales.

FLORES FILHO, A. F., BAGGIO FILHO, N. F., SILVEIRA, M. A. Dynamic Analysis of XY - Actuator Applying Soft Magnetic Composite (SMC) in the Armature Core. In: Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 52., 2007. **Abstracts of the MMM 2007**. v.1, p. 420, GG05 – 420, 2007.

GKN SINTER METALS. **Soft magnetic composite products**. Disponível em <[HTTP://WWW.GKN.COM/SINTERMETALS/CAPABILITIES/SOFT-MAGNETIC-PM/PROCESS/PAGES/SOFT-MAGNETIC-COMPOSITE-PRODUCTS.ASPX](http://WWW.GKN.COM/SINTERMETALS/CAPABILITIES/SOFT-MAGNETIC-PM/PROCESS/PAGES/SOFT-MAGNETIC-COMPOSITE-PRODUCTS.ASPX)>. Acesso em: 17 maio 2014.

HÖGANÄS, A. B. **Compostos Magnéticos Macios (Soft Magnetic Composites - SMC)**. Disponível em: <<http://www.hoganas.com/pt-br/Countries/Brasil/O-Grupo/A-Tecnologia-do-Po-/Componentes/Compostos-Magneticos-Macios-Soft-Magnetic-Composites---SMC-/>>. Acesso em: 29 dez. 2011.

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R.. **Eletromagnetismo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

LALL, C. **Soft magnetism** - fundamentals for powder metallurgy and metal injection molding. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1992.

RODRIGUES, V. I. S. et al. Elaboração e Caracterização de Compósitos Magnéticos. **Revista da Escola de Minas**, v. 64, n. 4, p. 453-462, 2011.