

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS APLICADOS À CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

M. M. Dias(1), M. G. Borba(2), R. M. Martins (1), P. M. Aquim (1), S. D. Bittencourt(2),
R. F. Niada (2), F. A. Vechietti (2), J. L. César (3), J. C. K Verney (3), L. C. Gertz (1),
L. Schaeffer(2),

Universidade Feevale(1), Universidade Federal do Rio Grande do Sul(2),
Universidade Luterana do Brasil(3)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: monir.borba@ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo um estudo sobre a aplicação de materiais magnéticos macios compósitos em núcleos de rotores e estatores de máquinas elétricas rotativas. Tradicionalmente, os núcleos de máquinas elétricas são construídos a partir de chapas de aço laminadas. Os núcleos desenvolvidos foram obtidos através de um processo alternativo da Metalurgia do Pó, no qual pó de ferro é misturado a diferentes porcentagens de resinas fenólicas, compactados e curados. As simulações foram realizadas considerando núcleos de estator e rotor de material compósito ferro-resina, ferro puro sinterizado e chapas de aço laminadas para análise comparativa de torque e de entreferro. A máquina simulada construída com núcleos de chapas laminadas apresentou densidade de fluxo magnético de 2,02 T e torque de 34,49 N·m. A máquina com núcleos de ferro com 1% de resina apresentou valores de 2,02 T e 27,10 N·m respectivamente.

Palavras Chaves: materiais magnéticos macios, metalurgia do pó, núcleo de máquinas elétricas, simulação por elementos finitos.

INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador, e possuem duas partes básicas que são os núcleos do estator e rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de melhor desempenho, como os geradores, são construídas com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, um processo para isolação elétrica entre as chapas adjacentes, empacotamento e fixação [[1].

Atualmente, materiais compósitos magnéticos macios (SMCs), obtidos a partir de processos da metalurgia do pó, estão sendo utilizados para a substituição dos tradicionais pacotes de chapas de aço laminadas que constituem os núcleos de rotores e estatores de máquinas elétricas rotativas. O desenvolvimento de novos materiais SMCs tem por objetivo alcançar propriedades magnéticas mais competitivas. Como exemplo, citam-se alguns tipos de pequenos motores de geometria completa e servo motores que operam em altas frequências. Os núcleos de máquinas elétricas construídos a partir de partículas de pós de ferro isoladas eletricamente têm algumas vantagens sobre os núcleos de chapas de aço laminadas, principalmente no que se refere à natureza isotrópica combinada com possibilidades únicas de geometria, o que permite desenhos tridimensionais [[2, [3].

As propriedades físicas de materiais magnéticos compósitos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas rotativas compreendem: isotropia magnética e térmica, baixas perdas por correntes de Foucault quando alimentadas por corrente elétrica de altas frequências, perdas relativamente baixas por ciclo de histerese quando alimentadas por corrente elétrica de baixa e alta frequência, alta resistividade elétrica, baixa coercitividade, diminuição de dimensões e da massa dos núcleos do rotor e estator e conseqüente redução das dimensões das máquinas construídas a partir desses compósitos [[4, [5, [6]

MATERIAIS E MÉTODOS

A metalurgia do pó é um processo relativamente recente da metalurgia de transformação, onde as peças são obtidas a partir dos pós metálicos. Suas principais etapas são a mistura, compactação e sinterização. A partir da obtenção de corpos de prova em diferentes formatos é possível realizar a caracterização da liga desejada quanto as suas principais propriedades físicas de interesse. Após, foi realizada a análise de propriedades físicas, tais como indução de saturação, permeabilidade e coercitividade magnética, resistividade elétrica e perdas magnéticas em função da frequência. De posse dos resultados dos ensaios, realizou-se a simulação de uma máquina elétrica de ímãs permanentes com núcleos do rotor e estator a partir do compósito ferro-resina, obtendo-se dados de fluxo magnético de entreferro e torque máximo.

Matéria-prima

As matérias-primas utilizadas nesta pesquisa foram o pó de ferro puro e resina fenólica. O pó de Fe puro é fabricado pela Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificados do fabricante, o pó de ferro utilizado foi do tipo ASC100.29, densidade aparente de 3,00 g/cm³, densidade a verde de 7,16 g/cm³ (a 600 MPa de compressibilidade) e granulometria: M # 180, 1,0%; M # 150, 7,6%; M # 106, 23,9%; M # 75, 22,5%; M # 45, 20,8; M # 0-44, 24,2%.

A resina empregada foi a HRJ-10236 do tipo Novolac, fabricada pelo SI Group Crios Ltda. Conforme o fabricante, a resina possui um tempo de cura de 50 a 90 s na temperatura de 154°C, densidade 0,350 g/cm³, teor de hexamina (%) entre 7,5 - 8,5 e granulometria (M#200) min. 97%.

Corpos de prova

A análise das propriedades físicas das ligas foi realizada a partir da confecção de corpos de prova específicos para cada ensaio. Para avaliação da resistividade elétrica foram obtidos corpos de prova na forma de barras, os ensaios das propriedades magnéticas foram realizados em corpos de prova no formato de um

toróide e para análise das perdas em frequência foram confeccionados corpos de prova na forma de núcleos de transformadores.

A nomenclatura utilizada neste trabalho seguiu a seguinte forma: FeHRJxx, na qual xx corresponde ao percentual em massa de resina de 1, 3, 5, 8 e 10%. O pó de ferro foi misturado com a resina em um misturador duplo cone, 60 rotações por minuto pelo tempo de 20 minutos para dispersão dos constituintes.

As compactações foram realizadas com uma pressão de 600 MPa, em uma prensa hidráulica. O processo de cura das resinas foi obtido em um forno tipo mufla, sem atmosfera controlada. Conforme dados do fabricante da resina, uma cura consistente das mesmas ocorre com uma cura inicial, a uma temperatura de 90 °C durante dois minutos, posteriormente a 155 °C por mais dois minutos e, finalmente, a 220 °C durante dois minutos. As amostras na forma de toróides foram usinadas no intuito de obter as dimensões indicadas para serem caracterizadas com relação às suas propriedades magnéticas e elétricas

Obtenção das propriedades eletromagnéticas

As propriedades magnéticas foram avaliadas a partir das curvas de magnetização e de histerese. Estas curvas relacionam o campo magnético aplicado ao material com a indução magnética resultante. Das curvas de magnetização foram obtidas a indução de saturação e a permeabilidade magnética e das curvas de histerese foram obtidas a coercitividade e a retentividade do material. Os ensaios foram realizados utilizando o dispositivo traçador de curvas de histerese modelo TLMP-TCH-14, fabricado pela empresa Globalmag e seguiu a norma ASTM A773/A 773M-01. Durante o ensaio foi utilizada uma corrente de 5 A e frequência de 0,05 Hz. [7]

A resistividade de um material pode ser determinada partir do cálculo da resistência elétrica medida diretamente nos corpos de prova. Utilizando um multímetro Minipa modelo ET 2930 a resistência elétrica foi medida e apresentou valores muito baixos para a escala do equipamento. Uma maneira alternativa para a aquisição do valor da resistência consiste na aplicação de uma corrente elétrica de valor conhecida e medição da tensão nos terminais do corpo de prova com o multímetro. A corrente elétrica foi aplicada a partir de uma fonte Vcc Jomed modelo OS-2403D. A partir destes valores foi utilizada a equação que relaciona a resistividade elétrica de um

material com a tensão, corrente aplicada, área da seção transversal e o comprimento do corpo de prova.

Obtenção das perdas magnéticas

A determinação das perdas magnéticas no núcleo das máquinas elétricas representa um fator importante na escolha do material. A variação do campo magnético no tempo ao atravessar os núcleos causa perdas energéticas associadas à histerese e às correntes induzidas, diminuindo o rendimento da máquina.

Em virtude da equivalência de funcionamento entre as máquinas elétricas rotativas e transformadores, é possível determinar as perdas magnéticas a partir de ensaios realizados em núcleos de transformadores. As perdas no material estudado foram determinadas a partir de corpos de prova na forma de núcleos E e T, idênticos aos núcleos de transformadores de tensão elétrica convencionais, de mesmas dimensões e enrolamentos. Isto permitiu que os ensaios fossem realizados de forma similar aos testes para análise das perdas em um transformador convencional com núcleo de chapas laminadas [[1, [8].

O enrolamento no lado de alta tensão foi dimensionado para operar com tensão de 127 Vrms e o enrolamento de baixa tensão com 12 Vrms, considerando o núcleo de chapas convencionais. Os ensaios foram realizados utilizando uma fonte de tensão elétrica alternada com variação de amplitude e frequência, que foi de 50 Hz a 1 kHz. O enrolamento do lado de baixa tensão foi alimentado com uma tensão próxima dos 6 Vrms (metade da tensão nominal do enrolamento), mantendo o enrolamento do lado de alta tensão em aberto e variando a amplitude do lado de baixa tensão até o lado de alta tensão atingir 75 Vrms. A seguir, a potência fornecida pela fonte foi medida e descontada as perdas no enrolamento. A potência resultante está relacionada diretamente com as perdas nos núcleos por correntes parasitas e ciclo de histerese. Posteriormente, foi colocada uma carga na saída do transformador nesta configuração. Para determinar as perdas magnéticas nos núcleos, deve-se descontar a potência dissipada na carga e a perda no enrolamento do secundário. [[1, [8, [9].

Simulação da máquina elétrica

Os resultados das iterações eletromagnéticas de uma máquina elétrica rotativa podem ser obtidos através de simulações em software de elementos finitos FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas.

A simulação foi realizada tomando como base uma máquina síncrona trifásica com ímãs de NdFeB, de 4 polos e 10 CV. A topologia e as dimensões do núcleo do rotor foram fundamentadas no projeto clássico de máquinas de relutâncias convencionais e máquinas síncronas de polos salientes com ímãs permanentes [[1, [8, [9, [10]. Utilizou-se a metodologia de bobinamento em série para uma máquina de 4 polos, sendo 12 espiras com fio 12 AWG por ranhura do estator. A corrente nominal utilizada, conforme dados do motor de indução tomado como referência para o projeto da máquina, foi de 14,2 A, para uma tensão de 380 V para uma ligação Y.

Para a simulação da máquina, foram inseridos no software as curvas de magnetização obtidas, com o objetivo de inserir no programa as propriedades magnéticas dos materiais com diferentes percentuais da resina HRJ misturados ao ferro e foram realizadas simulações para núcleos do estator e rotor de aço baixo carbono laminado, núcleos de ferro puro sinterizado, e núcleos de material compósito ferro-resina com diferentes percentuais de resina fenólica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos a partir dos ensaios para determinação das propriedades físicas de interesse permitiram realizar a caracterização do comportamento da liga FeHRJxx em relação a variação do percentual de resina. Todos os ensaios foram realizados em três corpos de prova distintos para que um valor médio fosse encontrado.

Propriedades eletromagnéticas

As curvas de histerese forneceram informações a respeito da coercitividade e retentividade das ligas analisadas. O gráfico da Figura 1 mostra os laços de histerese do ferro puro sinterizado e dos materiais compósitos com diferentes porcentagens de resina fenólica.

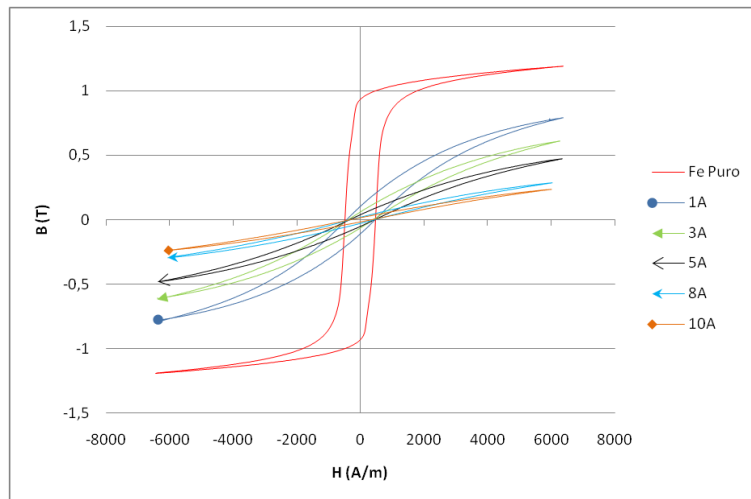


Figura 1 - Laço de histerese com os diferentes percentuais de resina

Os materiais compósitos resinados apresentam laços de histereses diferentes do ferro puro sinterizado. A curva de histerese do Fe puro tem características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico utilizado em pacotes de chapas laminadas utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas convencionais [[11, [12]. A indução máxima é inferior nos materiais resinados, onde o compósito com menor percentual de resina, é aquele material que apresenta indução máxima mais próxima do Fe puro. A baixa indução máxima indica que os núcleos das máquinas elétricas construídas a partir destes compósitos, apresentará fluxo de entreferro menor, quando comparado a núcleos com Fe puro e núcleos de chapas. No entanto, como as áreas dos laços de histerese dos materiais com resina são menores, quando comparados ao Fe puro e chapas de aço baixo carbono, as perdas por laço de histereses nestes compósitos são inferiores. A Tabela 1 mostra os resultados da resistividade elétrica, calculadas a partir da resistência elétrica e as características magnéticas obtidas a partir dos gráficos da Figura 1.

Tabela 1 - Características magnéticas e elétricas do compósito FeHRJxx e Fe puro sinterizado

Liga	Resistividade elétrica ($\mu\text{m}\cdot\Omega$)	Remanência (T)	Campo magnetizante (A/m)	Campo coercivo (Oe)	Permeabilidade relativa
Fe puro	0,14	1,180	127	1,6	3.700
FeHRJ01	490	0,105	410	5,2	134
FeHRJ03	774	0,057	400	5,0	96
FeHRJ05	1.665	0,046	390	4,9	70

FeHRJ08	-	0,023	345	4,3	47
FeHRJ10	-	0,015	310	3,9	33

Da Tabela 1 é possível notar que, quanto maior o percentual de resina nos materiais compósitos, maior a resistividade elétrica e menor a coercitividade. Este fato é desejável para o uso de materiais em núcleo de máquinas elétricas rotativas pois colabora na redução das correntes parasitas e as perdas por laço de histerese. Por outro lado, a permeabilidade magnética relativa e a indução de saturação são baixas, o que não é desejável [[1, [8, [11].

Considerando-se a pouca variação dos resultados de indução máxima, é possível selecionar compósitos com elevado teor de resina, uma vez que a elevada resistividade elétrica do material preenche os requisitos para a sua aplicação. Este tipo de material, frequentemente, é o mais isotrópico magneticamente, devido à sua natureza porosa, sendo favorável para dispositivos eletromagnéticos [[3].

Perdas magnéticas

O ensaio para avaliação das perdas magnéticas decorrentes da corrente de Foucault e histerese foi realizado em transformadores com núcleos de chapas e de compósitos com 1, 3 e 5% de resina HRJ. Os núcleos de compósitos com 8 e 10% de resina não foram avaliados pois se deformaram durante o processo de cura da resina. De uma maneira geral os compósitos com estes percentuais foram descartados para o uso em núcleos de máquinas elétricas devido ao decréscimo das propriedades magnéticas. A Figura 2 mostra os gráficos das perdas em Watts para frequências de 50 Hz a 1 kHz.

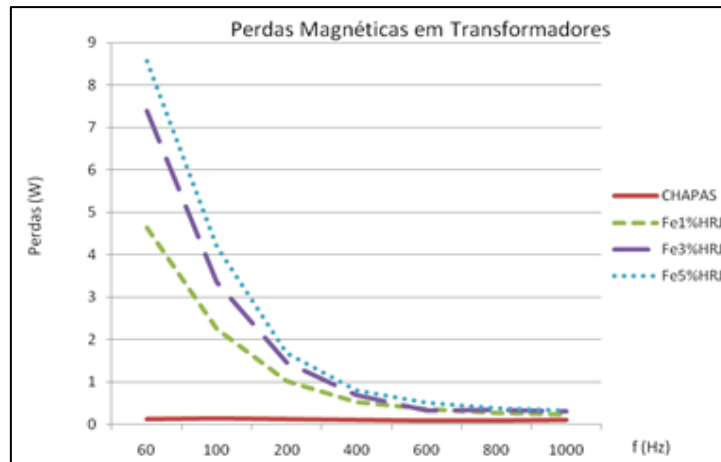


Figura 2 - Perdas magnéticas em transformadores com núcleo de chapas e Fe-Resina

As perdas em núcleos de chapas permaneceram aproximadamente constantes em função da frequência. Já as perdas em núcleos dos materiais compósitos decaem exponencialmente até os 400 Hz, o que está de acordo com as referências bibliográficas, o mesmo ocorrendo para materiais sinterizados, como o ferro puro ou ligas FeP, FeSi e FeNi. Na avaliação das perdas observadas, com o acréscimo da frequência a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e, desta maneira, as perdas seriam menores para os núcleos construídos com chapas laminadas. No entanto, para frequências acima de 400 Hz, o efeito da construção do núcleo de chapas laminadas não reduz as correntes parasitas, comparativamente ao núcleo maciço, ou seja, a tensão induzida aumenta e a corrente de magnetização diminui, mas as correntes parasitas aumentam. Em núcleos maciços tanto de materiais compósitos ferro-resinas quanto os sinterizados, somente a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e as correntes parasitas não sofrem acréscimo em seu valor [[4, [11]

Simulação computacional

Em uma máquina elétrica rotativa o torque na ponta de eixo é função do fluxo magnético de entreferro (indução máxima). A conversão de energia elétrica para mecânica e vice-versa, ocorre a partir do campo magnético e o fluxo magnético de entreferro (ou indução máxima). [[1, [8, [9] Em razão disso, analisando os resultados da simulação, consideram-se como melhores resultados as máquinas que operam com maior fluxo magnético de entreferro e os maiores torque final. A Tabela 2 mostra

o torque e a densidade de fluxo máxima nas simulações realizadas com as chapas de aço laminadas e com os materiais obtidos pelos processos da metalurgia do pó.

Tabela 2 - Torque e densidade de fluxo máximo

Material	Torque (N·m)	Densidade de fluxo máximo (T)
Chapas laminadas	34,49	2,02
Fe puro	29,66	1,93
FeHRJ01	27,10	2,02
FeHRJ03	25,85	2,01
FeHRJ05	26,56	2,28
FeHRJ08	20,71	1,66
FeHRJ10	19,36	1,58

O aumento do percentual de resina, via de regra, aumenta a relutância do circuito magnético da máquina, diminuindo também a densidade de fluxo magnético de entreferro. Assim, uma vez que o torque desenvolvido pela máquina é proporcional a densidade de fluxo, diminui também o torque [[1, [8, [9]. Observa-se também na Tabela 2 que enquanto a máquina com núcleos de chapas apresentou um torque de 34,49 N·m, a máquina com núcleo de ferro puro sinterizado apresentou um torque de 29,66 N·m e a máquina com núcleo de ferro-resina 1% apresentou um torque de 27,10 N·m, ou seja, 80% da máquina com núcleo de chapas laminadas.

CONCLUSÃO

Na comparação com o compósito FeHRJ01, os resultados obtidos nas simulações de ferro com maiores teores de resina foram inferiores, possivelmente pela saturação do material resinado. Esta saturação resultou na diminuição das propriedades magnéticas. Mecanicamente os compósitos têm seu comportamento regido pela resina, onde, além de atuar como isolante entre as partículas de ferro é o agente que dá estabilidade mecânica ao material. A peça obtida, após a cura, apresenta estrutura frágil devido a não difusão atômica (que ocorre em peças sinterizadas). Os materiais desenvolvidos, apesar de algumas propriedades não serem benéficas, podem ser aplicados em máquinas elétricas específicas, como em motores operando com corrente elétrica de elevada frequência, em servo motores, em geradores com elevado número de polos e em mini e micromotores de geometria complexa, onde o rendimento não fator importante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FINEP, CAPES, FAPERGS e SDECT / RS pelo auxílio financiamento na pesquisas e concessão de bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S. D. *Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill Inc, 1990.
- [2] HAMLER, A.; GORICAN, V.; SUSTARSIC, B.; SIRC, A. The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 304, i. 2, p. 816-819, 2007.
- [3] GUO, Y.G.; ZHU, J.G.; LIN, Z.W.; ZHONG, J.J. 3D Vector magnetic properties of soft magnetic composite material, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 302, i. 2, p. 511-516, 2006.
- [4] JANSSON, P. *Soft Magnetic Materials for AC Applications*. Hoeganes A.B., Hoeganes Sweden, *Powder Metallurgy*, v.35, n.1, 1992.
- [5] ASAKA, K.; ISHIHARA, C. Technical trends in soft magnetic parts and materials. *Hitachi Powdered Metals Technical Report*, v. 4 p. 3–9, 2005.
- [6] SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K. Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, v. 189, i. 1–3, p. 1-12, 2007.
- [7] ASTM A773 / A773M – 01. Standard test method for DC magnetic properties of materials using ring and permeameter procedures with dc electronic hysteresigraphs, *American Society for Testing and Materials*, 2009.
- [8] NASAR, S. A. *Handbook of Electric Machines*. New York: McGraw-Hill, 1987.

[9] KOSOW, I.L. Electric machinery and transformers. Prentice Hall, 1991.

[10] BOLDEA, I. Reluctance synchronous machines and drives. New York: Oxford University Press Inc., 1996.

[11] KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 6, n. 6, p. 710-71, 1997.

[12] LALL, C.; BAUM L.W. High performance soft magnetic components by powder metallurgy and metal injection molding. Modern developments in P/M, v.18, p. 363-389, 1998.

TITLE

**STUDY AND CHARACTERIZATION OF SOFT MAGNETIC COMPOSITE
MATERIALS APPLIED FOR ELETRICAL MACHINES**

ABSTRACT

This work aimed at a study on the application of soft magnetic composite materials in rotor cores and stators of rotary electric machines. Traditionally, the cores of electric machines are constructed from rolled steel sheets. The developed cores were obtained through an alternative process of powder metallurgy, in which iron powder is mixed with different percentages of phenolic resins, compacted and cured. The simulations were performed considering stator and rotor cores of composite iron-resin, sintered pure iron and rolled steel plates for comparative analysis of torque and air gap. The simulated machine built with laminated sheet cores had a magnetic flux density of 2.02 T and a torque of 34.49 N·m. The machine with iron cores with 1% of resin had values of 2.02 T and 27.10 N·m respectively.

Keywords: Soft magnetic materials; Powder metallurgy; Electric machine core; Finite element simulation