

ESTUDO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS PARA APLICAÇÃO EM SERVOMOTORES

Sergio Deitos Bittencourt ^{1*}

Moisés de Mattos Dias ²

Monir Göethel Borba ³

José Carlos Krause de Verney ⁴

Eduardo Luis Schneider ⁵

Lirio Schaeffer ⁶

Resumo

Este trabalho tem por objetivo o estudo das propriedades de ligas ferromagnéticas obtidas por metalurgia do pó para a construção de núcleos de um servomotor, usualmente montados a partir de chapas de aço laminadas. A matéria prima utilizada foi o pó de ferro puro e ligas obtidas por mistura com diferentes percentuais de fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%). A caracterização dos materiais envolveu testes das principais propriedades magnéticas, elétrica e mecânicas. Os resultados encontrados para as propriedades magnéticas mostraram que as ligas sinterizadas possuem valores inferiores às dos núcleos de chapas. Entretanto, foi observado perdas menores por correntes de Foucault em decorrência do aumento da resistividade pela adição de fósforo, silício e níquel nas ligas de ferro. Nos ensaios de perdas magnéticas em núcleos, foi observado que em frequências baixas o material sinterizado apresenta perdas significativas e em frequências elevadas se comporta de forma similar aos núcleos de chapas laminadas.

Palavras-chave: Metalurgia do pó; Compactação; Sinterização; Servomotores.

STUDY OF SINTERIZED SOFT MAGNETIC MATERIALS FOR IMPLEMENTATION IN SERVOMOTORS

Abstract

This paper aims to study the properties of ferromagnetic alloys obtained by powder metallurgy for the construction of cores of a servomotor, usually assembled from rolled steel sheets. The raw material used was pure iron powder and alloys obtained by mixing with different percentages of phosphorus (1, 2 and 3%), silicon (1, 3 and 5%) and nickel (50%). The material characterization involved tests of the main magnetic, electrical and mechanical properties of these alloys. The results obtained for the magnetic properties showed that the sintered alloys have lower values than the cores of plates. However, smaller losses were observed due to the increase in resistivity for the addition of phosphorus, silicon and nickel in the iron alloys. In the tests of magnetic losses in cores, it was observed that in low frequencies the sintered material presented significant losses, already in high frequencies behaved in a similar way to the cores of plates.

Keywords: Powder metallurgy; Compression; Sintering; Servomotor.

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas possuem duas partes básicas que são o rotor e o estator. Cada uma possui um núcleo que, com raras exceções, é construído a partir de

finas lâminas metálicas com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. O processo de fabricação dos núcleos do rotor e do estator compreende as seguintes

¹ Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: sergio_deitos_bittencourt@hotmail.com

² Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

³ Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, RS, Brasil.

⁵ Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁶ Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.



etapas: laminação das chapas, puncionamento no formato requisitado para o estator e para o rotor, tratamento térmico para isolamento elétrico interlamelar por oxidação e empacotamento para posterior fixação. Estes processos geram custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras, em torno de 40%, no momento em que as chapas são puncionadas [1,2].

A busca por novos processos de fabricação que substitua o tradicional método de fabricação tem norteado inúmeras pesquisas. A metalurgia do pó é um processo que tem como característica o baixo impacto ambiental quando comparado com as tecnologias concorrentes e exige um menor consumo de energia de transformação, possibilitando um alto aproveitamento da matéria prima. Para a construção dos núcleos, a metalurgia do pó proporciona um melhor controle de propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas que influenciam no rendimento das máquinas, como por exemplo, permeabilidade magnética, indução de saturação, coercitividade, retentividade, resistividade elétrica, dureza, entre outras [1-3].

Os motores elétricos convencionais com núcleos de chapas laminadas apresentam rendimento significativamente maior quando comparados a motores elétricos com núcleos produzidos via metalurgia do pó. Este fator tem restringido a utilização da metalurgia do pó a casos especiais como máquinas elétricas onde o rendimento não é o critério mais importante ou em alguns servomotores onde os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada [3,4].

Servomotores são máquinas elétricas síncronas rotativas que possuem controles de velocidade e de posição angular a partir de sensores como o encoder e o resolver. Esta categoria de máquinas possui enrolamentos no estator alimentados com corrente alternada e ímãs permanentes no rotor. Atualmente são muito utilizados em aplicações industriais onde elevada dinâmica, controle de torque, precisão de velocidade e posicionamento são fatores decisivos para o aumento da qualidade e produtividade. Possuem todas estas características aliadas a um baixo custo, elevada performance e robustez [5].

2 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. Peças com requisitos específicos podem necessitar de uma etapa posterior de acabamento como retificação ou tratamento superficial. 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. Para o uso de um determinado material na confecção do núcleo de máquinas elétricas é desejado que a liga possua elevadas permeabilidade magnética

relativa, resistividade elétrica e indução de saturação, baixa coercitividade magnética e dureza compatível com as vibrações as quais a máquina será submetida. Além disto, é importante conhecer as perdas magnéticas que ocorrem com a variação da frequência para avaliação do comportamento da liga.

2.1 Matérias-primas Utilizadas

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas como matérias-primas quatro pós metálicos diferentes: Fe puro, Fe₃P, FeSi e Ni puro. Todos estes pós foram adquiridos da empresa Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificados do fabricante, o pó de ferro utilizado foi do tipo ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 μ m e 150 μ m. O pó Fe₃P é composto por 84% de Fe e 16% de P, apresentando 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 μ m. O pó FeSi 45 é composto por 55% de Fe e 45% de Si e possui 87% de seu conteúdo entre 45 μ m e 250 μ m. O pó de níquel puro apresenta granulometria entre 3 μ m e máxima de 7 μ m.

O pó de ferro puro foi utilizado como pó base, sendo misturado com os demais pós para formar as ligas de FeP (1, 2 e 3% de fósforo), FeSi (1, 3 e 5% de silício) e FeNi (50% de níquel). Para a mistura dos pós foi utilizado um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, buscando a homogeneização dos componentes. Também foi adicionado as misturas 1% em peso de lubrificante sólido a base de estearato de zinco.

2.2 Obtenção dos Corpos de Prova

A análise das principais propriedades físicas das ligas foi realizada a partir da confecção de corpos de prova específicos para cada ensaio. Foram utilizados os corpos de prova na forma de cilindro para análise das propriedades mecânicas e estruturais, na forma de toróide para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica e na forma de núcleos de transformadores para avaliação das perdas magnéticas em função da frequência. A Figura 1 mostra os corpos de prova compactados: (a) cilindro, (b) anel e (c) núcleo de transformador.

A compactação dos corpos de prova foi realizada em uma prensa hidráulica de marca EKA com capacidade de 40 toneladas. Foi utilizada uma pressão de compactação

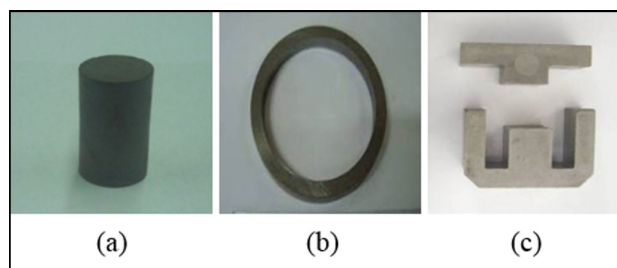


Figura 1. Corpos de prova; (a) cilindro, (b) anel e (c) núcleo de transformador.

de 600 Mpa em todos os corpos de prova. A sinterização foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera de gás verde (95% nitrogênio e 5% hidrogênio), taxa de aquecimento de 15 °C/min até a temperatura de 500 °C onde as peças permanecem por 30 minutos para que ocorresse a extração térmica do lubrificante. Terminado este tempo, a temperatura foi elevada para 1.150 °C por 30 minutos. Concluído este patamar, as peças permanecem no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente.

2.3 Obtenção das Propriedades Físicas

As propriedades magnéticas foram avaliadas a partir das curvas de histerese (laço de histerese e curva de magnetização) que relacionam um campo magnético aplicado ao material com a indução magnética resultante. A partir do laço de histerese foram avaliadas a retentividade e a coercitividade do material. Da curva de magnetização foram obtidas a permeabilidade magnética e a indução de saturação. 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 [6].

A resistividade elétrica dos corpos de prova foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Como a resistência elétrica apresentava valores muito baixos, foi aplicada uma corrente elétrica a partir de uma fonte Vcc Jomed modelo OS-2403D no corpo de prova e medido o valor de tensão resultante com um multímetro modelo ET 2930 da Minipa. De posse destes valores utilizou-se 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.

As propriedades de dureza e tensão de escoamento das ligas estudadas foram avaliadas através dos ensaios mecânicos nos corpos de prova. Os ensaios de dureza seguiram orientações da norma ASTM E10 e foi realizado em um durômetro Precision - England, medição em dureza Brinell (HB), utilizando indentador tipo esfera de 2,5mm de diâmetro e força de 187,5 Kgf [7]. Os ensaios de compressão seguiram a norma ASTM E9, em foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000 com capacidade de 200 kN e velocidade de 2 mm/min [8].

2.4 Perdas Magnéticas

Em razão 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

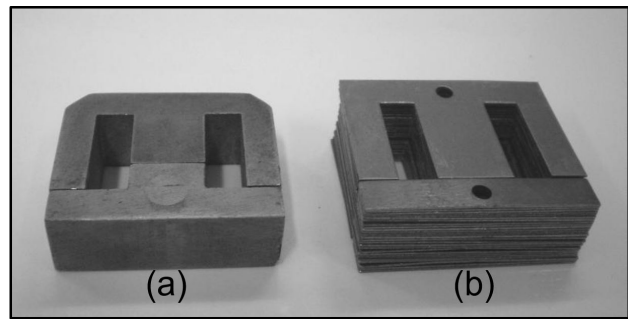


Figura 2. Núcleos de transformadores (a) sinterizados e (b) convencional.

com núcleo de chapas laminadas [1,2]. A Figura 2 mostra um comparativo entre os núcleos (a) E e T sinterizados e o (b) tradicional feito de chapas.

Após a compactação e sinterização, os núcleos nas geometrias E e T foram submetidos a processos de retificação para que ficassem com as mesmas dimensões de um núcleo de um transformador elétrico convencional. A seguir, os núcleos foram bobinados na forma típica de transformadores de tensão elétrica, com bobinas do enrolamento primário e secundário. Por utilizar como base um transformador comercial convencional de baixa tensão e potência, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos do transformador convencional. Este procedimento permitiu a realização de uma análise comparativa entre o transformador convencional e os desenvolvidos.

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 60 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. Este valor de tensão foi estabelecido para que não ocorresse saturação. A seguir, a potência fornecida pela fonte foi medida e descontada as perdas no enrolamento. Ao se estabelecer uma tensão fixa no secundário e variar a tensão do primário, uma vez que a tensão induzida no secundário é proporcional ao fluxo magnético, todos os núcleos magnéticos apresentam o mesmo fluxo magnético e como possuem a mesma geometria, apresentarão a mesma indução magnética. Como o valor foi limitado baixo e de acordo com as curvas de histerese e magnetização, não há saturação do núcleo.

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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As informações coletadas durante os ensaios indicam o comportamento das ligas em relação as suas propriedades físicas e perdas magnéticas. Os dados obtidos foram comparados com as referências bibliográficas e permitiram realizar a caracterização do comportamento da liga. Todos os ensaios foram realizados em três corpos de prova distintos para que um valor médio fosse encontrado.

3.1 Propriedades Magnéticas

A partir do levantamento das curvas de magnetização foram calculadas a indução de saturação e a permeabilidade relativa máxima do material. A Figura 3 mostra as curvas de magnetização do ferro puro sinterizado e das ligas misturadas com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%).

A partir da curva de histerese foi possível obter os valores de retentividade e coercitividade do material. O Fe puro apresentou características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico utilizado em pacotes de chapas laminadas utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas convencionais. O Fe1%P apresentou maior indução máxima, menores perdas por histerese e coercitividade em relação ao Fe puro. A Tabela 1 apresenta os valores encontrados para retentividade (B_r), coercitividade (H_c), permeabilidade magnética relativa (μ_r) e indução de saturação a 6 KA/m (B_{sat}) das ligas estudadas.

3.2 Propriedade Elétrica dos Corpos de Prova

O ensaio para avaliação da resistividade elétrica dos corpos de prova mostrou que a adição de P, Si, e Ni no Fe fez elevar os valores de resistividade. Isto se deve em função destes acréscimos provocam distorções no reticulado cristalino. O maior valor foi obtido na liga Fe5%Si em razão do silício durante o processo de sinterização não se densifica homogeneamente no ferro e a substituição dos grãos de ferrita pelo Si aumenta a imperfeição na rede cristalina, aumentando assim a resistividade [9]. A Tabela 2 apresenta os resultados encontrados para a resistividade dos corpos de prova.

3.3 Propriedades Mecânicas dos Corpos de Prova

O resultado da análise das propriedades mecânicas mostrou que os de prova após a sinterização apresentaram aumento na densidade. As amostras com maior variação foram as de Fe3%P, que antes da sinterização possuía média de 6,33 g/cm³ e após 7,0 g/cm³. As amostras de Fe50%Ni demonstraram valores de 6,63 e 7,25 g/cm³, (aumento de 8,55%). Estas alterações são ocasionadas, no caso das ligas FeP, em razão do fósforo promover uma fase líquida na sinterização favorecendo o processo de densificação. No caso da liga FeNi, o aumento da densidade se deve em decorrência do níquel possuir alta taxa de densificação no ferro e da granulometria do pó de níquel utilizada (3 μ m a 7 μ m).

O ensaio para avaliação da tensão de escoamento das ligas forneceu o valor máximo de tensão que o material suporta ainda no regime elástico de deformação. Somente as ligas de Fe2%P e Fe3%P apresentaram valores inferiores de tensão do que o Fe puro, que ficou em 137 MPa. Para efeitos de comparação, o aço AISI 1008 utilizado na confecção de máquinas elétricas possui uma tensão de escoamento média de 170 Mpa [9]. O ensaio para avaliação da dureza das ligas sinterizadas mostrou que a adição de P, Si e Ni no ferro promoveu o aumento da dureza em todas as amostras estudadas. A dureza média obtida para o Fe puro foi de 52,07 HB, considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes. Este valor fica acima da dureza do aço AISI 1008 que é em torno de 48 HB [10]. A produção de um núcleo de máquina elétrica via metalurgia do pó pode requerer um processo posterior de usinagem para adequação de dimensões. Portanto, materiais com

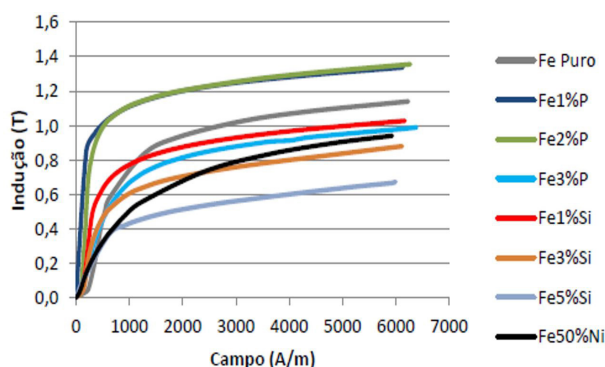


Figura 3. Curvas de magnetização das ligas sinterizadas.

Tabela 1. Propriedades elétricas e magnéticas

Liga	B_r [T]	H_c [A/m]	μ_{rmax}	B_{sat} [T]
Fe Puro	0,90	448,2	1.852	1,19
Fe1%P	0,96	215,8	2.766	1,25
Fe2%P	1,00	207,9	4.198	1,36
Fe3%P	0,50	210,7	919	0,98
Fe1%Si	0,71	246,3	1.959	1,03
Fe3%Si	0,48	225,4	1.258	0,85
Fe5%Si	0,30	216,3	493	0,67
Fe50%Ni	0,22	112,1	945	0,93

Tabela 2. Resistividade elétrica dos corpos de prova

Liga	ρ [$\mu\Omega.m$]
Fe Puro	0,157
Fe1%P	0,197
Fe2%P	0,358
Fe3%P	0,421
Fe1%Si	0,276
Fe3%Si	0,444
Fe5%Si	0,482
Fe50%Ni	0,371

Tabela 3. Propriedades mecânicas dos corpos de prova

Liga	d_{vm} [g/cm ³]	d_m [g/cm ³]	F [kN]	σ_e [MPa]	D [HB]
Fe Puro	6,58	6,63	19,49	137,2	52,07
Fe1%P	6,46	6,71	20,61	145,0	124,5
Fe2%P	6,49	6,87	17,61	123,9	202,4
Fe3%P	6,33	7,00	16,71	117,6	242,9
Fe1%Si	6,55	6,69	20,80	146,4	64,5
Fe3%Si	6,48	6,73	22,28	156,8	73,2
Fe5%Si	6,46	6,76	24,02	169,1	101,9
Fe50%Ni	6,63	7,25	22,98	161,7	101

alta dureza não são recomendados. A Tabela 3 apresenta os valores de densidade dos corpos de prova a verde (d_{vm}), sinterizados (d_m), força (F), tensão de escoamento (σ_e) e dureza (D) encontrados nas ligas sinterizadas.

3.4 Perdas Magnéticas

A partir dos resultados do ensaio de perdas em frequência para os núcleos de transformadores construídos via metalurgia do pó é possível observar que as perdas magnéticas por corrente de Foucault e histerese, em núcleos sinterizados diminuem drasticamente até aproximadamente 400 Hz. Após este valor de frequência ocorreu uma tendência das perdas se manterem estabilizadas conforme aumento de frequência. Para núcleos de chapas, as perdas se mantiveram constantes em função da frequência.

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. Nos núcleos sinterizados, somente a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e as correntes parasitas não sofrem acréscimo em seu valor [11].

A Figura 4 mostra os gráficos das perdas em watts para frequências de 60 Hz a 1 kHz para corpos de prova na forma de transformador com núcleo de chapas e para os núcleos sinterizados.

4 CONCLUSÕES

O estudo das principais propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas das ligas de FeP, FeSi e FeNi obtidas por metalurgia do pó foi realizado. A caracterização das ligas a partir de ensaios realizados em corpos de prova constatou que elas apresentam valores inferiores as tradicionais chapas laminadas, não justificando assim a sua utilização para confecção do núcleo de máquinas elétricas, a não ser em casos especiais.

Os resultados mostraram que as ligas sinterizadas possuem propriedades magnéticas inferiores quando

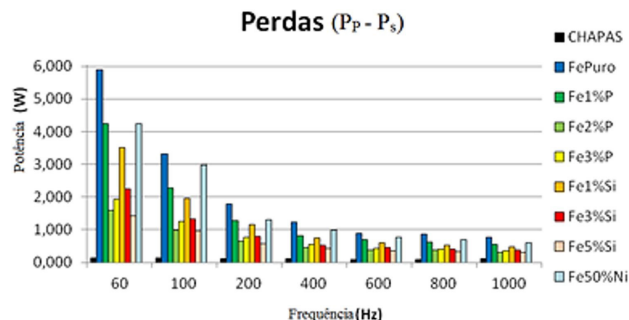


Figura 4. Perdas magnéticas em corpos de prova na forma de transformadores com diferentes núcleos.

comparadas as tradicionais chapas laminadas. A liga Fe50%Ni apresentou um ciclo de histerese relativamente estreito, com baixos valores de indução magnética de retentividade e de campo magnético coercitivo, demonstrando ter promissoras aplicações em núcleos de máquinas elétricas rotativas.

A adição de fósforo, silício e níquel ao ferro puro ajudou na redução de perdas magnéticas, pois as ligas apresentaram um aumento considerável da resistividade elétrica. A redução das correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do corpo, uma vez que são grandezas fisicamente inversamente proporcionais. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menores serão as correntes induzidas e as perdas por correntes parasitas.

A avaliação das ligas perante as suas propriedades mecânicas demonstrou que a adição de elementos de liga atua bloqueando os deslocamentos da rede cristalina impedindo seu deslizamento, processo mediante o qual o material se deforma plasticamente. O acréscimo de fósforo ocasionou em um aumento da resistência mecânica utilizando temperaturas de sinterização menores, devido à formação de fase líquida transiente. Percentuais acima de 1% provocaram decréscimo no valor do limite de escoamento, pela formação de fase líquida persistente na sinterização.

Os ensaios de perdas magnéticas nos materiais sinterizados apresentaram resultados equivalentes aos das chapas laminadas em frequências elevadas. A partir dos 500 Hz de frequência para a corrente elétrica, mantendo-se constante a tensão induzida, as perdas nos núcleos dos materiais sinterizados estudados aproximam-se das perdas em núcleos de chapas laminadas. Enquanto as perdas em

núcleos de chapas permanecem constantes com o aumento da frequência, as perdas nos núcleos de materiais magnéticos macios decaem exponencialmente até os 400 Hz. Esta característica, importante de núcleos sinterizados, permite sua aplicação em determinados tipos de máquinas elétricas rotativas como alguns servomotores que são acionados por correntes elétricas de frequências próximas ou superiores aos 400 Hz. A liga Fe50%Ni apresentou os menores valores de perdas para frequências acima dos 400 Hz.

De todas as ligas estudadas, a que melhor apresentou um conjunto de propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas foi a Fe 1 %P. Desta forma, pode ser aplicada em casos específicos, como em motores de elevada frequência, mini motores e em servomotores, demonstrando, assim, a capacidade da metalurgia do pó como alternativa aos processos atuais de fabricação de núcleos magnéticos de motores elétricos, com obtenção de menores custos e redução de etapas de fabricação.

REFERÊNCIAS

- 1 Nasar SA. Handbook of electric machines. New York: McGraw-Hill; 1987.
- 2 Fitzgerald AE, Kingsley C Jr, Umans SD. Electric machinery. 6th ed. New York: Bookman; 2008.
- 3 Jansson P. Soft magnetic materials for AC applications. Powder Metallurgy. 1992;35(1):63-66.
- 4 Krause RF, Bularzik JH, Kokal HR. New soft magnetic material for AC and DC motor applications. Journal of Materials Engineering and Performance. 1997;6(6):710-712.
- 5 Servoconversor SCA06 [página da internet]. Caxias do Sul: WEG; 2012 [atualizada em 23 abr. 2017; acesso em 12 nov. 2017]. Disponível em: <http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Servoacionamentos/Servoconversor-SCA06>.
- 6 American Society for Testing and Materials. ASTM A773/A773M-14: standard test method for direct current magnetic properties of low coercivity magnetic materials using hysteresigraphs. West Conshohocken: ASTM International; 2014. http://dx.doi.org/10.1520/A0773_A0773M-14.
- 7 American Society for Testing and Materials. ASTM E10-17: standard test method for brinell hardness of metallic materials. West Conshohocken: ASTM International; 2017. <http://dx.doi.org/10.1520/E0010-17>.
- 8 American Society for Testing and Materials. ASTM E9-09: standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. West Conshohocken: ASTM International; 2009. <http://dx.doi.org/10.1520/E0009-09>.
- 9 Asaka K, Ishihara C. Technical trends in soft magnetic parts and materials. 2005. (Hitachi Powdered Metals Technical Report; no. 4). p. 3-9 [acesso em 30 jun. 2017]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287661000_Technical_trends_in_soft_magnetic_parts_and_materials
- 10 Narasimham K, Hanejko F, Marucci L. Growth opportunities with soft magnetic materials. In: Proceedings of the 2008 Powder Metal World Congress & Exhibition; 2008; Washington, United States. AMPM; 2008.
- 11 Martins V. Utilização do processo de moldagem por injeção de pós metálicos nanométricos (MIM) para o desenvolvimento de rotor e estator em servomotor aplicado à área médica [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2015.

Recebido em: 13 Mar. 2018

Aceito em: 08 Nov. 2018