

Desenvolvimento de um motor com ímãs permanentes e núcleo do rotor obtido a partir da metalurgia do pó para aeromodelos

Development of a motor with permanent magnets and rotor core obtained from powder metallurgy to be used in model airplanes

R. F. Niada^{a,*}, S. D. Bittencourt^a, R. M. de Martins^b, P. M. de Aquim^b, M. M. Dias^b, L. Schaeffer^c

^aGrupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

^bInstituto de Ciências Exatas e Tecnológicas – ICET, Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Universidade FEEVALE, Novo Hamburgo, RS, Brasil

^cLaboratório de Transformação Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um Motor Síncrono Trifásico com Ímãs Permanentes (mini motor), a ser utilizado em aeromodelos, no qual o núcleo do estator foi obtido a partir do processo de Metalurgia do Pó (M/P). Inicialmente, confeccionaram-se corpos de prova de ferro puro, mas também com outros elementos, como o Fe-P, Fe-Si e Fe-Ni. Estes materiais foram compactados em prensa hidráulica e sinterizados em fornos com temperaturas controladas. Foram analisadas as propriedades físicas que compreendem as grandezas magnéticas adquiridas em curvas de histerese, resistividade elétrica e propriedades mecânicas. Efetuaram-se ensaios de perdas de núcleos em forma de transformadores para observar os rendimentos em frequências variadas. Os resultados foram comparados entre si e também com os do motor com estator de chapas; optou-se então pela construção do núcleo a partir da liga sinterizada Fe1%P por apresentar boas características. Após o bobinamento, o estator de chapas foi substituído pelo estator sinterizado em bloco único de Fe1%P, para efetuar testes em bancada de acionamento em correntes variadas, onde pode ser analisada sua eficiência em comparação com o motor com núcleo do estator convencional de chapas. Nos ensaios em núcleos de transformadores, em frequências acima de 400 Hz, as perdas magnéticas com os compósitos tornam-se praticamente desprezíveis. No mini motor com estator sinterizado de Fe1%P, com o aumento da corrente e velocidade, que corresponde ao aumento de frequência, o rendimento máximo atingiu 73% em relação ao motor com estator de chapas.

© 2015 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos os direitos reservados.

Palavras chave: motor síncrono trifásico; metalurgia do pó; propriedades magnéticas.

Abstract

This work aims at developing a three-Phase Synchronous Motor with Permanent Magnets (small motor), for use in model airplanes, in which the stator core was obtained from Powder Metallurgy Process (P/M). Initially, sewed up pure iron specimens, also with other elements, such as Fe-P, Fe-Si and Fe-Ni. These materials were compacted and sintered in hydraulic press in ovens with controlled temperatures. The physical properties comprising the magnetic quantities acquired by hysteresis curves, electrical resistivity and mechanical properties were examined. Core loss tests were done in the form of transformers to observe income in varying frequencies. Results were compared with each other and with the motor with stator plates; was chosen then the construction of the core from the sintered alloy Fe1% P for present good characteristics. After winding, the stator plates was replaced by sintered in a single stator block Fe1% P for testing bench for various drive currents, which can be analyzed efficiency compared to the conventional motor with the stator core sheets. In tests in core processors, in frequencies above 400 Hz, the magnetic losses composite decreased becoming practically negligible. In the mini motor stator sintered Fe 1% P, with the current increase and speed, which corresponds to the frequency increase, the maximum yield reached 73% compared to the motor with stator plates.

© 2015 Portuguese Society of Materials (SPM). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Keywords: three-phase motor synchro; powder metallurgy; magnetic properties.

*Corresponding author.

E-mail address: rafael.niada@ufrgs.br (R F. Niada)

1. 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, atualmente, 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 maior rendimento, como os geradores, são construídos com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, isolamento elétrica, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste em um tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas; como consequência, há a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Alguns tipos de chapas de aço-silício são fornecidos pelos fabricantes com uma pintura a base de óxido de ferro sobre uma das superfícies [1,2].

Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas, nas quais circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos à ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de *Foucault*, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção dos referidos núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente tem como resultado a redução parcial das correntes parasitas [1,2].

Desde o surgimento dos motores elétricos, foi marcante seu desenvolvimento, no entanto encontra-se no limite do aprimoramento tecnológico, porém é possível o desenvolvimento de novos materiais na construção de máquinas elétricas que ainda não foram explorados [3].

Utilizando-se os processos da M/P (Metalurgia do Pó), é possível construir os referidos núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e maior resistividade elétrica, se comparadas ao aço convencional, o que reduz as correntes parasitas. No caso da aplicação deste processo na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas, poderá haver algumas vantagens sobre aquelas com núcleos convencionais. Assim, na medida em que for possível construir núcleos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes na construção das máquinas e, naturalmente, menos energia será consumida na fabricação das mesmas. Salienta-se também que, utilizando-se ligas magnéticas de maior resistividade na construção dos

núcleos do estator e do rotor, haverá uma redução nas perdas por correntes parasitas, maior rendimento, resultando, assim, em economia de energia elétrica [4,5].

Atualmente, a aplicação da M/P em núcleos de máquinas elétricas está restrita a motores elétricos especiais para os quais o rendimento não é o critério mais importante, como no caso de mini motores de geometria complexa, em alguns servo motores nos quais os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada e partes de máquinas nas quais não há variação de fluxo, como núcleos de rotores de máquinas síncronas. Entretanto, alguns estudos estão sendo realizados em outros tipos de máquinas obtidas a partir da M/P de maneira a se comprovar ou descartar a aplicação desta tecnologia nestas máquinas [5].

A Metalurgia do Pó é utilizada em substituição a outros processos de fabricação por apresentar excelentes benefícios como a otimização no uso de matéria prima, em torno de 95%, sendo de fácil automatização, baixo consumo energético, proporcionar a produção de peças em seu formato final ou bem próximo, eliminando etapas posteriores, além de misturar metais com não metais propiciando ainda homogeneidade em toda sua estrutura [6].

Os Motores com Ímã Permanente (MIP) se destacam por serem mais eficientes energeticamente que outras categorias de máquinas elétricas. O desenvolvimento da indústria de ímãs permanentes impulsionou sua fabricação e a de componentes eletrônicos permitiu um maior controle de velocidade e acionamento. No que tange aos motores, estes podem ser divididos em duas categorias: motor de corrente contínua sem escova; e motor síncrono de ímãs permanentes. O estator destas máquinas é trifásico e o rotor aloja os ímãs permanentes. No entanto, o motor síncrono de ímã permanente possui a distribuição da força contra eletromotriz de forma senoidal o qual requer um controle mais sofisticado e refinado. Por sua vez, o de corrente contínua sem escovas gera uma onda de força contra eletromotriz de forma trapezoidal, e seu controle é mais simples [1,2].

Os motores sem escovas são utilizados na indústria de eletrodomésticos, automotiva, aeroespacial, medicina, automação industrial e instrumentação. Eles possuem vantagens sobre motores com escovas de corrente contínua (CC) e motores de indução, tornando-se úteis para aplicações nos quais o espaço e o peso são fatores críticos. Assim, algumas de suas características são citadas a seguir [3]:

- Melhor velocidade *versus* características de torque;
- Alta resposta dinâmica;
- Alta eficiência;
- Longa vida útil;

- Operação silenciosa;
- Gama de velocidades mais elevadas;
- Razão elevada entre o torque e volume do motor.

Outro fator importante com o desenvolvimento de materiais de ímãs permanentes, de alta força coerciva baseados em terras raras como o Neodímio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B) ou o Samário-Cobalto (Sm-Co), é que não são desmagnetizados com facilidade quando submetidos a elevadas correntes [7].

Assim, este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um mini motor síncrono trifásico de doze polos para aeromodelos, no qual o núcleo do estator, usualmente construído a partir de chapas laminadas, foi substituído por um bloco maciço da liga Fe1%P sinterizada.

2. Materiais e Métodos

Inicialmente, foram confeccionados corpos de prova para análise das propriedades magnéticas, mecânicas e resistividade elétrica. Após a avaliação das propriedades, embora estas apresentassem valores intermediários àqueles citados na referência bibliográfica [5], optou-se pela liga sinterizada Fe1%P por apresentar as propriedades físicas adequadas para a construção do núcleo do estator do motor. Na sequência, o motor foi projetado e simulado a partir do programa de elementos FEMM 4.2 para melhor visualização de fluxo de entreferro, saturação e torque. Finalmente, o motor foi construído a partir de bloco maciço da liga sinterizada e testado em bancada. Os testes consistiram na determinação do rendimento do motor em função de variações de correntes aplicada e a velocidades de rotação atingidas.

2.1. Corpos de Prova

A definição da liga a ser utilizada na construção do estator da máquina foi realizada a partir do estudo das propriedades físicas de algumas ligas sinterizadas como FeP, FeSi e FeNi, e suas variações. Para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica, utilizou-se a matriz da Figura 1-a, para a qual foram obtidos corpos de prova na forma de anéis (Figura 1-b). Para análise da dureza e tensão de escoamento das ligas estudadas, utilizou-se a matriz da Figura 2-a, tendo sido obtidos corpos de prova na forma de cilindros (Figura 2-b) e suas dimensões (Figura 2-c).



Fig. 1. Amostras na forma de anel – (a) matriz – (b) corpo de prova.

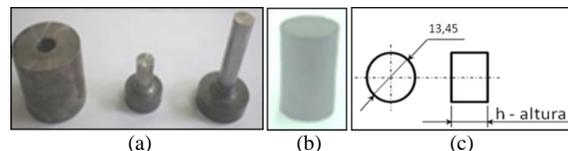


Fig. 2. Amostras na forma de cilindro – (a) matriz – (b) corpo de prova – (c) dimensões do corpo de prova.

Para análise das perdas em frequência, foram utilizadas as matrizes mostradas na Figura 3 (3-a e 3-b), a qual apresenta corpos de prova na forma de núcleos de transformadores (Figura 3-c).

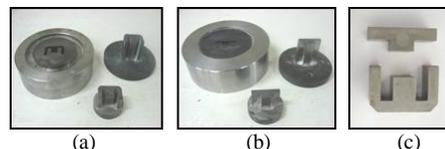


Fig. 3. Amostras na forma de núcleo de transformador – (a) matriz núcleo E – (b) matriz núcleo T – (c) corpos de prova.

O estudo foi realizado com base em ligas sinterizadas, obtidas a partir de pós de ferro misturados ao fósforo, silício e níquel, adquiridos da Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificado do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 μm e 150 μm . O pó Fe3%P (84% de Fe, 16% de P) apresenta 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 μm . O pó FeSi 45 (55% de Fe e 45% de Si) tem 87% de seu conteúdo entre 45 μm e 250 μm e o pó de níquel apresenta granulometria mínima de 3 μm e máxima de 7 μm . O pó de ferro foi misturado com fósforo (1, 2, 3%), silício (1, 3, 5%) e níquel (50%) em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes. Também foi adicionado às misturas 1% de lubrificante sólido à base de estearato de zinco. Salienta-se que, por exemplo, para a obtenção de corpos de prova a partir da liga Fe1%P, parte-se do pó Fe3%P, e mistura-se pó de ferro puro até que a relação entre os elementos seja atingida.

Considerando os dados da referência bibliográfica [8], as ligas a partir do ferro têm pressão de compactação média de 600 MPa. Assim, os corpos de prova e as peças do estator foram compactados com esta pressão. A sinterização dos corpos de prova e da peça do estator foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera inerte (pressão atmosférica) e gás verde (5% de hidrogênio e o restante de nitrogênio). Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}$ or minuto, até a temperatura de 550 $^{\circ}\text{C}$, na qual as peças permaneceram por 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150 $^{\circ}\text{C}$, ocorrendo a sinterização, permanecendo nesta temperatura por 60 minutos (patamares segundo dados bibliográfico [8]).

Após, as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente. A Figura 4 mostra os patamares de sinterização utilizados.

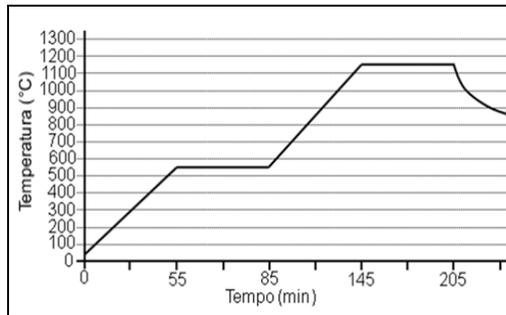


Fig. 4. Patamares de sinterização utilizados para as ligas sinterizadas.

2.2. Obtenção das propriedades físicas

As propriedades magnéticas foram obtidas das curvas magnéticas (laço de histerese e curva de magnetização), que relacionam campo magnético H aplicado a um material, com a indução magnética B resultante. A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade. Com a curva de magnetização, foram adquiridas a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) [9]. A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) que segue a norma ASTM A773 [10]. As curvas magnéticas foram obtidas a partir de um Traçador de Curva de Histerese fabricado por Global Mag, modelo TLMP-TCH-14. A permeabilidade é obtida a partir da curva de magnetização, através da razão entre a indução magnética e o campo magnético aplicado, ou a declividade da reta tangente, conforme a Equação 1 [9].

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (1)$$

Sendo B a indução magnética [T], H o campo magnético [A/m], μ a permeabilidade magnética [H/m], μ_r a permeabilidade relativa, μ_o a permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m). Para aplicação deste método de análise é necessária a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Rowland. O procedimento fundamenta-se em isolar o anel com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado (Figura 5-a), enrolamento de espiras secundárias (Figura 5-b) e novo isolamento (Figura 5-c) seguido do enrolamento das espiras primárias (Figura 5-d).

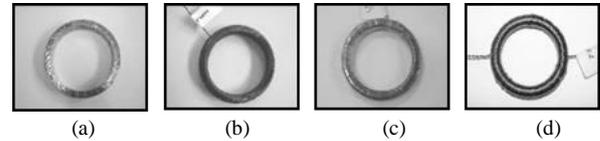


Fig. 5. Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário.

A resistividade elétrica das ligas estudadas foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica dos corpos de prova. Para medição de resistência elétrica, utilizou-se um multímetro ou multiteste da marca APPA modelo 305. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de um anel, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal. A lei de Ohm estabelece que [11]:

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow \rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad (2)$$

Para a qual ρ a resistividade elétrica [$\mu\Omega\text{m}$], R a resistência elétrica [Ω], V a tensão elétrica aplicada [V], I a corrente elétrica aplicada [A], A , a área da seção transversal da barra [m^2] e l o comprimento da barra (ou segmento de um anel) [m].

A Figura 6 mostra um segmento de um anel com fios de cobre ou terminais soldados com estanho nas extremidades, para medida da resistividade elétrica.



Fig. 6. Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica.

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa, também foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova. Os ensaios de dureza (*Brinell* – HB) foram realizados em um durômetro *Precision-England* com indentador de esferas de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf, segundo a norma ASTM E10 [12]. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000 na qual se utilizaram velocidades de 2,0 mm/min, segundo a norma ASTM E9 [13].

2.3. Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas nos materiais estudados foram determinadas a partir de corpos de prova na forma de núcleos E e T idênticos a núcleos de transformadores de tensão elétrica convencionais de mesmas dimensões e mesmos enrolamentos. Assim, as perdas magnéticas foram determinadas de forma similar a perdas em um transformador convencional com núcleo de chapas laminadas [1, 2].

Os núcleos nas geometrias E e T foram submetidos a processos de retificação (Figura 7-a a esquerda), de tal maneira a ficarem com as mesmas dimensões de um núcleo de um transformador elétrico convencional (Figura 7-a a direita). A seguir, os núcleos foram bobinados na forma típica de transformadores de tensão elétrica, com bobinas do enrolamento primário e secundário. A Figura 7-b mostra os transformadores montados, obtido a partir da M/P (direita) e a partir de chapas (esquerda).

Salienta-se que este estudo baseou-se em um transformador convencional, de baixa tensão e potência. Para o estudo comparativo, optou-se por construir os núcleos dos transformadores com geometria e dimensões próximas do convencional. Assim, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos enrolamentos do transformador convencional, sendo este desmontado e retirado o carretel onde se encontravam as bobinas. Este procedimento foi utilizado para que fosse possível uma análise comparativa do transformador convencional e os desenvolvidos.

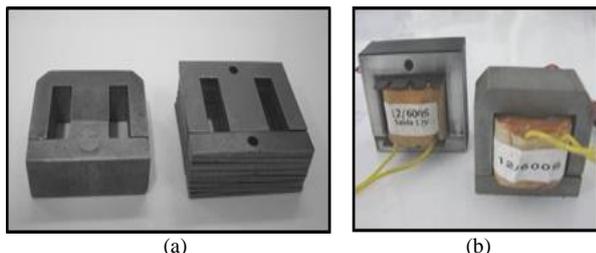


Fig. 7. Transformadores – (a) núcleos por M/P (esquerda) de chapas (direita) – (b) bobinados e montados por M/P (direita) de chapas (esquerda).

O enrolamento no lado de alta tensão foi dimensionado para operar com tensão de $127 V_{rms}$, e o enrolamento de baixa tensão foi dimensionado para operar com tensão de $12 V_{rms}$, considerando o núcleo de chapas convencionais. Os ensaios foram realizados utilizando-se uma fonte de tensão elétrica alternada com variação de amplitude e frequência. Foi utilizada uma faixa de frequência de 50 Hz a 1 kHz Os enrolamentos do lado de baixa tensão foram

alimentados com uma tensão próxima dos $6 V_{rms}$ (metade da tensão nominal do enrolamento), mantendo-se o enrolamento do lado de alta tensão em aberto, e variou-se a amplitude do lado de baixa tensão até o lado de alta tensão atingir $75 V_{rms}$. Desta forma, garante-se que a tensão induzida no secundário (lado de alta tensão) permanece constante para os núcleos estudados. Após, mediu-se a potência fornecida pela fonte e descontaram-se 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 e, portanto, nesta configuração para a determinação das perdas magnéticas nos núcleos, deve-se descontar a potência dissipada na carga e a perda nos enrolamentos do secundário. Devido à analogia intrínseca entre o funcionamento de máquinas elétricas rotativas e transformadores, os mesmos ensaios podem ser estendidos a núcleos de motores elétricos.

2.4. Micrografia

A análise da microestrutura da superfície do corpo de prova, Figura 14, foi observada a partir dos segmentos retirado do anel da Figura 2. As amostras foram embutidas, lixadas e polidas, esta última etapa com o auxílio de uma pasta de alumina de $1 \mu m$. Realizou-se o ataque químico empregando Nital 2% por, aproximadamente, 15 segundos. O microscópio utilizado foi o modelo Gx 51, marca Olympus.

2.5. Densidade

A densidade dos corpos de prova foi calculada com o auxílio da balança de precisão Marte modelo AL 500 e paquímetro Mitutoyo, precisão de 0,01 mm, obtendo-se a densidade aparente em g/cm^3 .

2.6. Especificações e Montagem do Motor

A Figura 8-a mostra a vista lateral do motor utilizado e a Figura 8-b mostra a vista em perspectiva do motor expandido. A Tabela 1 relaciona suas especificações.

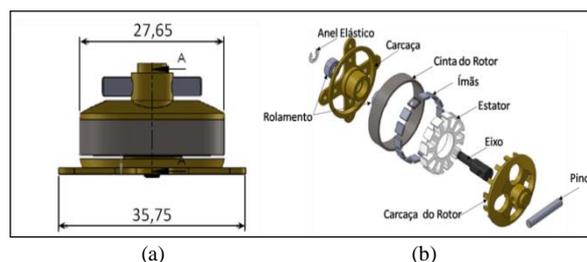


Fig. 8. Motor utilizado – (a) vista lateral – (b) vista em perspectiva expandida.

Todas as ligas estudadas apresentaram propriedades magnéticas e mecânicas compatíveis para a construção de um motor elétrico, no entanto, os núcleos convencionais de chapas apresentam fluxo magnético em duas direções, pois as finas camadas laminadas isoladas entre si propiciam a este fenômeno. A fabricação de núcleo sinterizado de motores em blocos únicos possui fluxo magnético em três direções, podendo apresentar características de funcionamento diferentes [14,15].

O mini motor foi projetado para trabalhar em corrente contínua, e de acordo com a referência bibliográfica [16], a liga Fe50%Ni é mais indicada para aplicações em corrente alternada de alto desempenho. Por sua vez, a liga FeSi aumenta muito o custo de produção, em razão de sua abrasividade e baixa compressibilidade.

A liga de Fe1%P foi utilizada para construção do mini motor por apresentar propriedades mecânicas que facilitam a usinagem, barateando o custo de fabricação já que não foi viável fazer uma matriz com o dimensionamento específico do estator deste mini motor, tendo em vista que as propriedades físicas medidas nas curvas de histerese atendem às necessidades de operação, bem como o fluxo magnético e torque.

Tabela 1. Características do mini motor estudado

Parâmetro	Característica	Unidade
Torque	$2,1 \times 10^{-3}$	Nm
Polos	12	-
Potência	90	W
Tensão	12	V
Corrente Nominal	0,3	A
Corrente Máxima	7,5	A
Espiras	13	-
Diâmetro do rotor	22,5	mm
Comprimento	4	mm
Fio do Estator (cobre)	TR32AWG	-
Entreferro	0,2	mm
Ímãs de Ne-Fe-B	4x4x1,3	mm
Ligação	Estrela	-
Chapas do estator (espessura)	0,4	mm
Rendimento	74	%

Assim, foi compactado e sinterizado um bloco cilíndrico da liga Fe1%P e posteriormente usinado nas dimensões (Figura 9-a), do núcleo do estator utilizado neste estudo (Figura 9-b), resultando no núcleo da Figura 9-c.

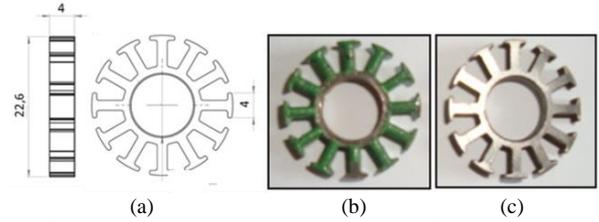


Fig. 9. Estator do mini motor - (a) dimensões - (b) chapas convencional - (c) bloco único produzido a partir da liga sinterizada Fe1%P.

O bobinamento do estator de Fe1%P sinterizado em bloco único foi feito com o mesmo número de espiras do convencional de chapas, utilizando-se o fio 32 AWG, conforme mostra a Figura 10 à esquerda (à direita, o esquema elétrico do bobinamento).

A Figura 11 mostra a ligação em estrela entre as fases R, S e T, nas quais R1, S1 e T1 estão conectadas.

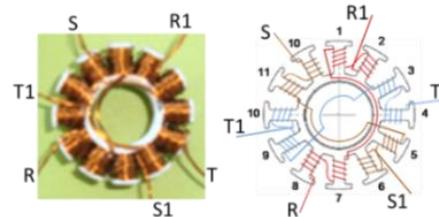


Fig. 10. Bobinagem das fases do estator do mini motor.

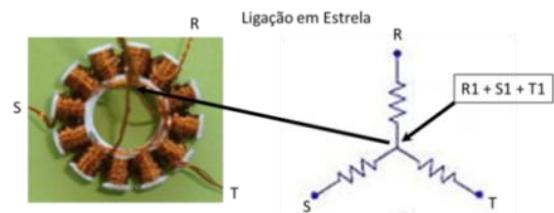


Fig. 11. Ligação das fases do mini motor em estrela.

A Figura 12 mostra o estator de Fe1%P sinterizado em bloco único instalado na carcaça do mini motor.



Fig. 12. Estator do mini motor instalado na carcaça.

2.7. Ensaios do Motor

Na maioria das aplicações, as máquinas síncronas trifásicas são alimentadas com tensão alternada de características senoidais desfasadas de 120 graus. Contudo, em algumas aplicações mais simples, as ondas de tensão podem ser quadradas ou retangulares, e o próprio bobinamento do motor funciona como

filtro aproximando a corrente nos enrolamentos para as formas senoidais. Tal simplificação reduz em muito a complexidade, bem como os custos do acionamento do motor. Este é o caso de alguns sistemas de acionamento para motores de aeromodelos.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Eletrotécnica da Universidade FEEVALE, com a utilização dos seguintes equipamentos:

- Fonte de marca Instrutherm e modelo DC Power Suply FA 1030.
- Multímetro da marca Minipa ET-1002.
- Tacômetro digital da marca Turnigy, referência 10783 com medição máxima de 99999 rpm.
- Gerador de potência da marca Turnigy CCPM *servo consistency master*.
- Controlador eletrônico de velocidade de marca Turnigy Plush 10A de CC 5,6V a 16,8V.
- Hélice de marca GWS referência EP-3040.

A corrente, medida com o multímetro, necessária para o funcionamento do mini motor, foi fornecida por uma fonte de 12 V acoplada no controlador eletrônico de velocidade e este nas três fases do motor (R, S, T). A corrente e a velocidade foram variadas através do gerador de potência. Para os ensaios, utilizou-se uma hélice instalada no motor, e, com o incremento da rotação, medida com o tacômetro, ocorreu o aumento no empuxo, exigindo, desta forma, maior esforço do motor.

3. Resultados e discussão

3.1. Propriedades físicas obtidas da liga sinterizada

Os corpos de prova obtidos da liga Fe-1%P (Figuras 1 e 2) apresentaram densidade do compactado verde, considerando a média de três corpos de prova de cada geometria de 6,46 g/cm³. Após a sinterização, a densidade média resultou em 6,71 g/cm³, apresentando valor abaixo das especificações do material indicado na literatura (entre 7,0 a 7,4 – valor típico de 7,2 g/cm³) [3], conforme pode ser observado na Tabela 2. A Figura 13-a apresenta a curva de histerese (para um dos três corpos de prova), e a Figura 13-b mostra a curva de magnetização. As propriedades magnéticas de retentividade e coercitividade foram observadas a partir da curva de histerese. A permeabilidade magnética relativa foi obtida a partir das curvas de magnetização, utilizando-se a Equação 1. A indução máxima foi observada a partir das curvas de magnetização para um campo magnético de 6 kA/m. A resistividade elétrica foi medida com base nos corpos de prova na forma de anéis (Figura 1) com o corte de um segmento de 10 mm, utilizando-se a

Equação 2. A Tabela 2 mostra os resultados da densidade, resistividade elétrica e das propriedades magnéticas, a partir dos valores médios de três corpos de prova.

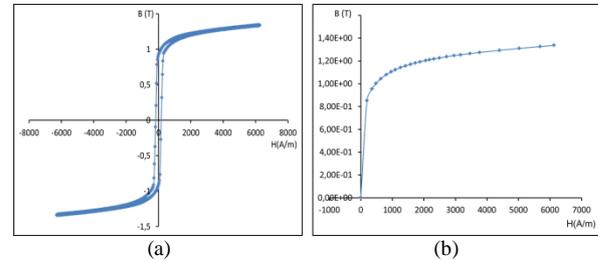


Fig. 13. Gráficos magnéticos – (a) curvas de histerese – (b) curva de magnetização.

Tabela 2. Propriedades físicas da liga sinterizada Fe1%P

Material	ρ_m [g/cm ³]	ρ_e [$\mu\Omega\cdot m$]	B_r [T]	H_c [A/m]	B_{max} [T]	μ_r [H/m]
Fe-1%P (*)	7,20	0,38	1,15	64,0	1,38	-
Fe-1%P (**)	6,71	0,20	0,96	215,8	1,25	2.766,1

(*) Valores obtidos a partir de referência bibliográfica [3]

(**) Valores obtidos experimentalmente

Sendo que ρ_m é a densidade, ρ_e a resistividade elétrica, B_r a retentividade, H_c a coercitividade, B_{max} a indução máxima (observada para campo de 6 kA/m), μ_r a permeabilidade magnética relativa.

Da Tabela 2, observa-se que a média (três corpos de prova) da retentividade resultou em 0,96 T, e a coercitividade em 215,8 A/m, sendo que a referência bibliográfica [3] apresenta valores de 1,15 T e 64 A/m respectivamente. A permeabilidade magnética (máxima) resultou em 2.766,1 e a indução máxima em 1,25. A resistividade elétrica resultou em 0,20 $\mu\Omega m$ (referência bibliográfica apresenta valor de 0,38 $\mu\Omega m$) [3].

As grandes diferenças entre as propriedades indicadas nas literaturas [3, 16, 17] e aquelas obtidas a partir dos corpos de prova devem-se a dois aspectos:

- Algumas referências não indicam as pressões de compactação utilizadas para materiais magnéticos macios por M/P, e em alguns estudos utilizam-se pressões até 800 MPa para materiais compósitos por M/P, e tal pressão tende a alterar as propriedades físicas obtidas [5, 8, 18].
- Estudos preliminares constataram que as ligas Fe-50%Ni obtidas a partir da simples mistura de pós elementares de Fe e Ni jamais resultaram valores sequer próximos daqueles citados na literatura [3]. Isto pode ser atribuído ao fato de que os dados literários referem-se a corpos de prova obtidos a partir de pós pré-ligados, seja por atomização ou mecânico-síntese. De fato, dados experimentais realizados no LdTM / UFRGS (Laboratório de Transformação Mecânica / Universidade Federal

do Rio Grande do Sul) com pré-ligados por mecâno-síntese como Fe-Si e Fe-P resultaram melhores propriedades magnéticas destas ligas, aproximando-se dos dados bibliográficos, o que não ocorre em ligas obtidas pela simples mistura dos pós constituintes. Tal fato ocorre uma vez que, em pós de ligas a partir da mistura simples como o Fe-1%P, na sinterização, não ocorre uma completa interdifusão dos elementos de ligas, resultando então em regiões do material com aglomerados heterogêneos de ferro e ferro-fósforo [8]. Assim, a formação da liga ocorre somente nos limites das partículas dos pós constituintes. Por este motivo, há grandes diferenças nas propriedades da liga Fe-1%P obtida pela simples mistura dos pós constituintes quando comparada às ligas a partir de pós pré-ligados.

Os núcleos das máquinas elétricas rotativas são construídos a partir de chapas laminadas isoladas entre si no intuito de reduzir as correntes parasitas [1,2]. Outra alternativa é a construção de núcleos a partir de materiais de alta resistividade elétrica, sem prejuízo das propriedades magnéticas [3]. Embora a liga Fe1%P apresenta resistividade maior que o aço SAE 1008 [3, 20], tal acréscimo não é suficiente para a redução das correntes parasitas (o aço SAE 1008 laminado e outras ligas aço baixo carbono são utilizados na construção dos núcleos da grande maioria das máquinas elétricas rotativas convencionais [1, 2]). Contudo, é importante salientar que o motor para aeromodelo deste estudo é alimentado a partir de ondas retangulares que, além de serem de alta frequência, também possuem harmônicos de frequências mais altas ainda [1, 2, 6]. Entretanto, ligas sinterizadas apresentam alto desempenho em altas frequências, tendo seu desempenho similar ao tradicional pacote de chapas para frequências acima dos 400 Hz [4, 19].

A tensão de escoamento resultou em 147,9 MPa, considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes. O aço SAE 1008 apresenta tensão de escoamento média de 170 MPa. A dureza média obtida foi de 124,5 HB. O aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB [20]. Portanto com relação às propriedades mecânicas, a liga Fe-1%P apresenta valores bem próximos ao aço SAE 1008.

A Figura 14 mostra a micrografia do Fe1%P onde se pode observar nos pontos escuros a porosidade do material e tamanho médio dos grãos de 60 μm . Salienta-se que os materiais sinterizados sempre apresentarão poros em sua estrutura e sua proporção depende principalmente da pressão de compactação, assim como do tempo de sinterização [8].

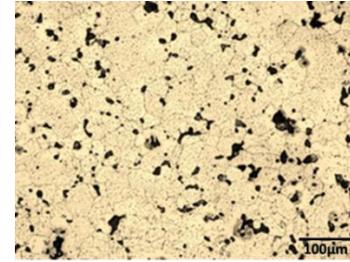


Fig. 14. Micrografia Fe1%P.

3.2. Perdas em Função da Frequência

A Figura 15 mostra o gráfico das perdas magnéticas em Watt / kg para frequências de 60 Hz a 1 kHz para núcleos na forma de transformadores com chapas e para núcleos dos materiais sinterizados. Nesta figura, pode-se observar que, enquanto as perdas magnéticas no núcleo de chapas permanecem praticamente constantes, as perdas nos núcleos sinterizados decaem exponencialmente até 400 Hz, permanecendo praticamente constante a partir desta frequência. Tal característica permite a utilização destes materiais sinterizados em máquinas com corrente elétrica de elevada frequência, indo ao encontro de dados da literatura [19]. Como exemplo, cita-se que para um motor girar a 15.000 rpm, a frequência das correntes de armadura deve ser de 500 Hz [1, 2]. Tal frequência estaria na faixa em que núcleos de motores com materiais sinterizados possuem perdas próximas aos motores com núcleos de chapas.

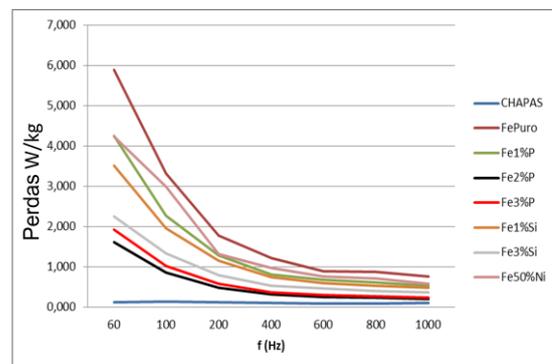


Fig. 15. Perdas magnéticas em núcleos na forma de transformadores com chapas e Fe com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%).

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. Nos núcleos sinterizados, somente a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e as correntes parasitas não sofrem acréscimo em seu valor [1, 2, 4, 21].

3.3. Resultados dos Ensaios do Motor

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de rotação do eixo em rpm (rotação por minutos) com correntes variadas para o motor convencional (com estator de chapas) e para o motor com estator a partir da liga sinterizada Fe1%P.

Tabela 3. Rotação do motor convencional e sinterizado a partir da corrente da fonte de tensão contínua

Corrente [A]	Rotação Chapas [rpm]	Corrente [A]	Rotação Fe1%P [rpm]
0,34	2820	0,36	1290
0,61	3640	0,61	1830
0,82	4210	0,82	2340
1,09	4790	1,09	2820
1,49	5430	1,49	3250
1,72	5760	1,72	3570
2,13	6100	2,15	3870
2,8	6590	2,8	4460
3,13	6920	3,13	4730
3,55	7090	3,55	4970
4,24	7380	4,24	5340
4,49	7630	4,49	5540
5,00	7870	5,00	5720

Deve-se mencionar que as correntes indicadas na Tabela 3 referem-se à corrente contínua gerada a partir da fonte que alimenta o inversor.

A Figura 16 mostra o rendimento do motor com estator de Fe1%P em comparação ao motor convencional de chapas para o qual, de acordo com a corrente, a rotação pode ser relacionada entre as colunas 2 e 4 da Tabela 2, e os dados tratados de acordo com a Equação 3.

$$\text{Rendimento relativo} = \frac{\text{Rotação motor com estator Fe1\%P}}{\text{Rotação motor com estator de chapas}} \times 100 \quad (3)$$

Com o aumento da corrente e, conseqüentemente, da velocidade dos motores, observa-se um acréscimo no rendimento do motor com estator sinterizado de Fe1%P. No entanto, tal rendimento atingiu somente 73% de eficiência em relação ao motor convencional de chapas.

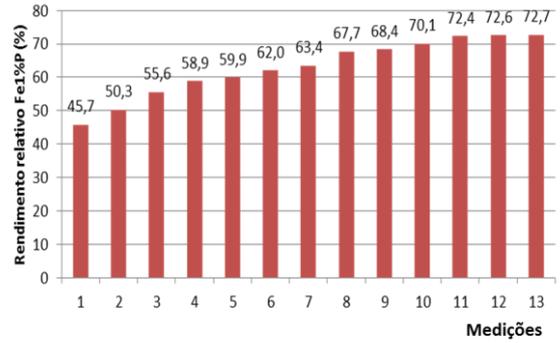


Fig. 16. Rendimento do motor com Fe1%P em relação ao motor convencional de chapas.

Apesar do aumento na resistividade dos materiais sinterizados, o rendimento do motor com estator de Fe1%P foi menor, em relação ao motor com estator de chapas convencional, tendo em vista que já haviam sido observadas as perdas nos ensaios em transformadores (Figura 15).

A Figura 17 mostra o rendimento real do motor com estator de Fe1%P, tendo sido os dados obtidos a partir do rendimento relativo multiplicado pelo rendimento máximo do motor convencional de chapas (74%) especificado pelo fabricante.

Durante sua operação, houve aumento na temperatura do estator, evidenciando perdas por correntes parasitas, justificando desta forma seu rendimento inferior ao de chapas. Essas perdas também foram evidenciadas nos ensaios de perdas em núcleos em forma de transformadores (Figura 15).

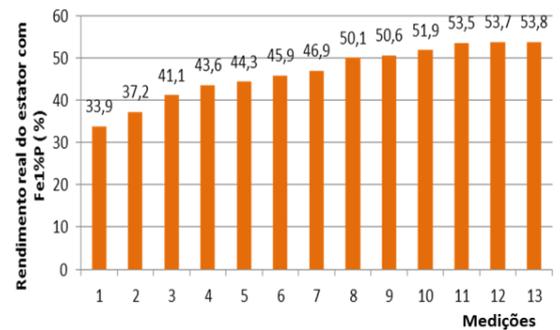


Fig. 17. Rendimento do motor com estator sinterizado de Fe1%P.

Contudo, a partir do estudo de outras ligas sinterizadas, como o Fe2%P, percebe-se que a resistividade aumenta, com melhora das propriedades magnéticas, como maior permeabilidade. Assim, com maior resistividade, as correntes parasitas diminuem e com maior permeabilidade, maior é a indução de entreferro aumentando assim o torque do motor. Neste

trabalho, esta liga deveria ter sido utilizada, entretanto, devido à altíssima dureza, a posterior usinagem dos blocos para a forma final do estator seria bastante difícil. No caso, se fosse construída uma matriz para o núcleo do estator, já na forma final da peça, seria relativamente fácil obterem-se tais núcleos com maior teor de fósforo, porém tal matriz teria um custo elevado.

Salienta-se que é tradição em empresas que desenvolvem peças por M/P, a compactação e sinterização de tarugos e posterior usinagem para a forma final das peças em desenvolvimento. Após os testes, caso a peça apresente as propriedades desejadas e sendo viável comercialmente, parte-se então para o desenvolvimento das matrizes.

4. Conclusões

O mini motor para aeromodelo utilizado neste trabalho com núcleo do estator produzido por processo de metalurgia do pó em bloco único possui rendimento menor que o com estator convencional de chapas, tendo em vista que não se alterou o dimensionamento do projeto original.

Com o aumento da corrente e, conseqüentemente, da velocidade, o rendimento do mini motor com núcleo de Fe1%P aumentou, tendendo a permanecer constante em rotações superiores. Ainda assim, não houve desempenho superior àquele relacionado ao motor convencional de chapas.

A diminuição do rendimento se deve às perdas por correntes parasita, observado pelo aumento de temperatura durante a operação do motor com núcleo do estator em bloco único da liga sinterizada Fe1%P.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, Fapergs e FINEP pelas bolsas e financiamento do projeto.

Referências

- [1] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., S.D. Umans, *Electric Machinery*. 6th ed., McGraw-Hill Inc, New York, 2003.
- [2] S.A. Nasar, *Handbook of Electric Machines*. McGraw-Hill, New York, 1987.
- [3] M. Sens, Avanços Tecnológicos nos Motores Elétricos, WEG em Revista, Janeiro – Fev. (2001).
- [4] P. Jansson, *Soft Magnetic Materials for A. C. Applications*. Powder Metallurgy, Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, **35**, 63 (1992).
- [5] R.F. Krause, J.H. Bularzik, H.R. Kokal, *New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications*. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **6**, 710 (1997).
- [6] F. Iervolino, Quando Aplicar A metalurgia do Pó, A Metalurgia do Pó. Grupo Setorial de Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental, 1st ed., São Paulo, 2009, pp. 37-84.
- [7] T. Jahns, W.D. Novotny, R.D. Lorenz, W.L. Soong, *Permanent Magnet Machines and Drives: Principles, Design and Applications*. Course, Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin-Madison, 2009.
- [8] R.M. German, *Powder Metallurgy Science*. Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 1984.
- [9] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. Boca Raton, Chapman and Hall, 1998.
- [10] ASTM A773/A773M *American Standard Test Method for DC Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with DC Electronic Hysteresigraphs*.
- [11] R.L. Boylestad, L. Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*. Prentice Hall, New Jersey, 2009.
- [12] ASTM E10 - *Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials*.
- [13] ASTM E9 - *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*.
- [14] A. Hamler, V. Gorican, B. Sustarsic, A. Sirc, *The use of Soft Magnetic Composite Materials in Synchronous Electric Motor*, *J. Magn. Magn. Mater.* **304**, 816, (2006).
- [15] Y.G. Gou, J.G. Zhu, Z.W. Lin, J.J. Zhong, *3D Vector magnetic properties of soft magnetic composite material*, *J. Magn. Magn. Mater.* **302**, 511 (2006).
- [16] C. Lall, *Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding*, Princeton. Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 1992.
- [17] F.V. Lenel, *Magnetic Applications*. Metals Handbook, **7**, 638 (1984).
- [18] E. Enescu, E. Soptea, S. Gavrilu, E. Cristescu, *New Composite Materials Based on Iron for Soft Magnetic Cores*. *Cercet. Metal. Mater. Metall. New Mater. Res.*, **3**, 69 (1998).
- [19] J. A. Bas, J. Puing, C. B. Molins, *Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. Modern Developments in Powder Metallurgy*, Princeton. Metal Powder Industries Federation, **18**, 745, (1988).
- [20] F. B. Fletcher, *Carbon and Low-Alloy Steel Plate in: ASM Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1st ed., Materials Park, OH, 1995.
- [21] F. G. Hanejko, G. W. Ellis, T. J. Hale, *Application of High Performance Material Processing: Electromagnetic Products*. Hoeganaes Corporation, Presented at PM2TEC, Las Vegas, 1998.