

RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS APLICADOS A NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

BARBOZA, Juliano Soares¹; ESSWEIN Jr, Jorge Alberto Lewis¹; CERVA, Luciano Lohmann²,
VECHIETTI, Fernanda Albrecht¹; DIAS, Moisés de Mattos³; SCHAEFFER, Lirio⁴

RESUMO

Este artigo visa a um comparativo das propriedades elétricas entre ferro sinterizado e materiais compósitos magnéticos macios, possíveis de serem utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas. Assim, o estudo se concentra na obtenção de núcleos maciços, obtidos a partir dos processos convencionais da metalurgia do pó. São estudados compósitos magnéticos de pó de ferro combinados com resina fenólica, analisando propriedades elétricas, como resistividade elétrica. Com os experimentos, obtém-se aumento da resistividade elétrica em função da adição de resina fenólica.

Palavras-Chave: Máquinas elétricas. Metalurgia do pó. Resina fenólica. Resistividade elétrica.

ABSTRACT

The present work aims to make a comparison study of the electrical properties between sinterized iron and soft magnetic composite materials that are possible to be used in making the cores of rotating electrical machines or electrical motors. Thus, this study is concentrated on getting solid cores, obtained through conventional powder metallurgy methods. The subjects of this study are iron powder magnetic composites with phenolic resins, analyzing the electrical properties such as electrical resistivity. With the experiments, the increase of the electrical property is obtained regarding the phenolic resin addition.

Keywords: Electrical machines. Powder metallurgy. Phenolic resin. Electrical resistivity.

¹ Mestre em Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Laboratório de Transformação Mecânica, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Mestre em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Laboratório de Transformação Mecânica, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Doutor em Engenharia Metalúrgica. Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Laboratório de Transformação Mecânica, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os núcleos magnéticos (rotores e estatores) das máquinas elétricas rotativas (motores e geradores), 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 desses núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, um processo para isolamento elétrica, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num tratamento térmico, em que os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um certo tempo, havendo, então, além do alívio de tensões, a oxidação da superfície das chapas e, em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Alguns tipos de chapas de aço-silício são fornecidas pelos fabricantes com uma pintura à base de óxido em uma das superfícies (NASAR, 1987 - FITZGERALD, 1990).

Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas (enrolamentos), onde circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por esse motivo, esses núcleos ficam sujeitos à ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nesses núcleos. A construção desses núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes parasitas, reduzindo as perdas por correntes de Foucault (NASAR, 1987 - FITZGERALD, 1990).

É consenso entre os pesquisadores e as empresas da área de máquinas elétricas rotativas (motores elétricos) que mudanças na forma e no acionamento de motores se encontram no limite do aprimoramento tecnológico, e somente mudanças drásticas nos materiais utilizados na construção dos núcleos dos motores irão ocasionar melhora de rendimento neles. Salienta-se que, através dos processos da M/P (Metalurgia do Pó), é possível se obter núcleos compostos por vários materiais, formados por ligas com propriedades físicas melhores, que por sua vez irão gerar motores de melhor desempenho.

A M/P é um processo de transformação mecânica, em que se obtêm peças (como metálicos e cerâmicos) a partir da compactação de pós constituintes e posterior aquecimento em fornos (processo de sinterização), onde adquirem consistência e resistência mecânica (JANSSON,

1992). Processos alternativos da M/P permitem a agregação dos pós a partir de resinas termofixas ou polímeros, caracterizando Materiais Compósitos.

O diferencial das propriedades de um Material Compósito Magnético Macio inclui isotropia magnética e térmica, baixas perdas por correntes de Foucault e baixas perdas por histerese (em baixas e em altas frequências), permeabilidade magnética média, alta resistividade, anisotropia constante e baixa coercitividade (SHOKROLLAHI, 2007; ASAKA, 2005).

Assim, ao se realizar mistura de pós de ligas ferromagnéticas (como pó de ferro por exemplo) com resinas termofixas para confecção de núcleo de máquinas elétricas, a resina serve como a aglomerante do pó de metal e também como isolamento elétrico entre as partículas de pó, ocorrendo efeito similar à construção de núcleos magnéticos com chapas laminadas. Os blocos ou núcleos resultantes desse processo possuem elevada resistividade elétrica, o que reduz as correntes parasitas, diminuindo consideravelmente as perdas nesses núcleos.

Um exemplo são servomotores desenvolvidos pela Siemens Motores Elétricos, em que os núcleos magnéticos dessa máquina são construídos em blocos maciços utilizando-se um compósito desenvolvido pela Höganäs, empresa fabricante de pós para uso em M/P. Esse tipo de pó, também conhecido como microencapsulado, emprega uma tecnologia um pouco diferente. As partículas de pós das ligas metálicas são revestidas por uma película tipicamente polimérica que também serve de cola e isolamento elétrico entre as partículas de pó metálico. Entretanto, o servomotor desenvolvido pela Siemens / Höganäs emprega partículas microencapsuladas, recobertas por um material não identificado, não polimérico, cuja composição é considerada sigilosa (dados revelados por representante da Höganäs em Seminário sobre Aplicação de M/P na Construção de Máquinas Elétricas realizado no Centro de Tecnologia da UFRGS).

2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

O estudo foi realizado a partir de dois tipos diferentes de compósitos, sendo cada um composto de ferro puro misturado a uma resina fenólica. O que diferencia um compósito do outro é o tipo de resina fenólica. Assim, foi possível uma comparação de desempenho em relação à resistividade elétrica entre esses dois tipos de materiais. O processo de obtenção das amostras consistiu da mistura dos pós, compactação e posterior cura. Após, foi avaliada a resistividade elétrica de cada tipo de liga e posterior comparação entre elas.

O ferro em pó foi fornecido por Höganäs do Brasil Ltda., e as Resinas por SI Group Crios Ltda. Foram utilizadas Resinas Fenólicas de nome comercial HRJ-10236 e SBP-128, do tipo Novolaca. A nomenclatura segue Fe-HRJxx e Fe-SBPxx, em que xx corresponde ao percentual em peso de resina, sendo 0,5%; 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5% e 3,0%.

Os corpos de prova foram confeccionados na forma de barras, utilizando-se a matriz da Figura 1-(a), compactadas em uma Máquina Universal de Ensaio Mecânico marca KRATOS, com capacidade de 100 kN (1.000 kgf), conforme mostra Figura 1-(b), onde é possível visualizar a matriz montada na prensa. Essa prensa possui indicação de força sensorizada a partir de uma célula de carga conectada na prensa.

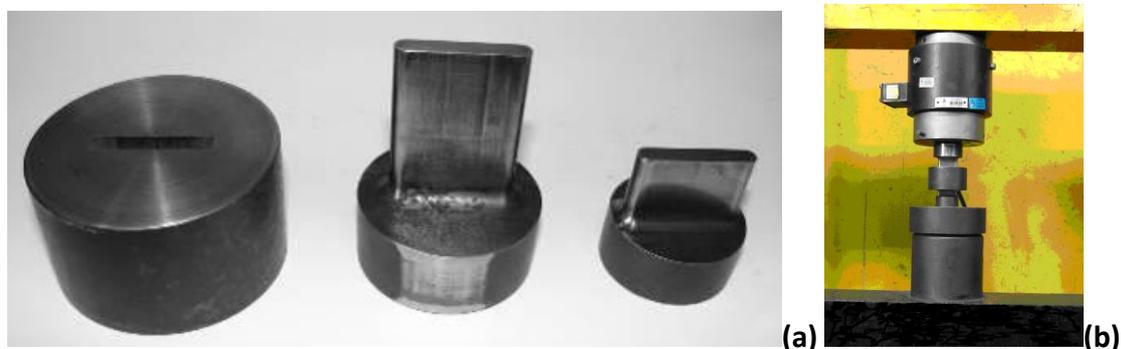


Figura 1 – Fotografia da Matriz utilizada para confecção dos corpos de prova
– (a) vista em partes – (b) montada na prensa

Os corpos de prova foram compactados a uma pressão de 600 MPa. Considerando que 1 ton (tonelada) é aproximadamente 10.000 N, resulta:

$$600MPa = 6 \times 10^8 \frac{N}{m^2} = 6 \times 10^4 \frac{ton}{m^2} = 6 \frac{ton}{cm^2} \quad (1)$$

Considerando a área da matriz de 1,45 cm², obtêm-se 8,7 toneladas.

O processo de cura foi realizado em um forno sem atmosfera controlada. De acordo com o fabricante das resinas, o processo de cura consiste em: pré-cura até 90°C com patamar por dois minutos e posteriores aquecimentos a 155 °C e 220 °C, ambos com patamar de dois minutos.

As amostras possuem a forma da cavidade da matriz e resultaram em peças na forma de barras, porém com extremidades arredondadas, devido a limitações que existem para construção de matrizes com cantos vivos. O arredondamento dos cantos vivos evita fraturas nesses pontos da

matriz. Entretanto, para ensaios da resistividade elétrica dos materiais estudados, as barras foram usinadas posteriormente para a forma de um paralelepípedo. A Figura 2-(a) mostra a fotografia dos corpos de prova confeccionados, onde se pode observar a peça com extremidades arredondadas e com acabamento (usinadas). A Figura 2-(b) mostra o desenho dimensional das barras, onde as cotas foram somente indicadas por letras. As Tabelas subsequentes indicam as dimensões das cotas das barras confeccionadas.

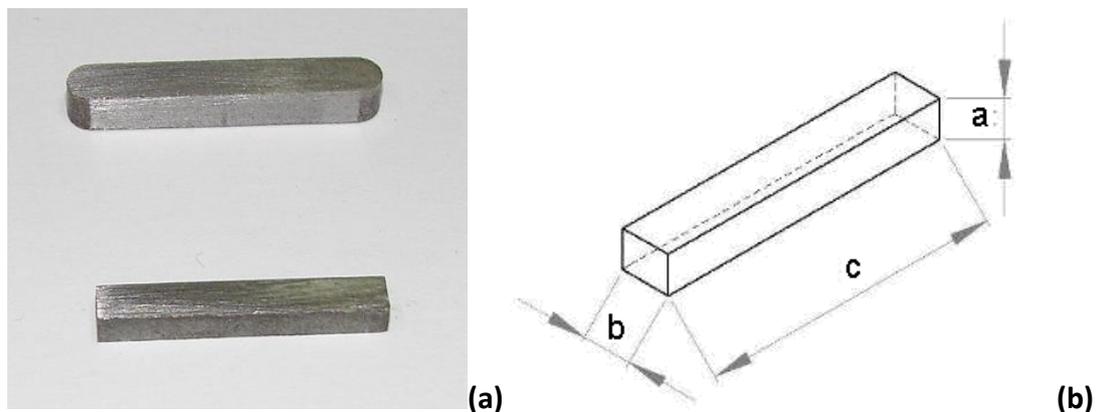


Figura 2 – Corpo de prova na forma de barra – (a) com extremidades arredondadas e posterior usinagem – (b) desenho dimensional

3 DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A determinação da resistividade dos materiais (corpos de prova) das ligas foi feita a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição de materiais com resistência elétrica muito baixa ou materiais cujo comportamento resistivo é desconhecido, utiliza-se um artifício. Aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. O inverso, porém, é mais prático, ou seja, aplica-se uma corrente e mede-se a tensão. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. A lei de ohm estabelece que:

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

Onde **R** : Resistência Elétrica[Ω]

V : Tensão Elétrica Aplicada [V]

I : Corrente Elétrica Aplicada [A]

A : Área da Seção Transversal da Barra [m²]

l : Comprimento da Barra [m]

A Figura 3 mostra o desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade. Uma fonte de tensão contínua V fornece uma corrente contínua I , e um voltímetro de precisão indica a tensão sobre a barra. Observa-se, neste desenho, a existência de contatos de cobre e garras, tornando possível a aplicação de uma pressão sobre os contatos de cobre, diminuindo a resistência de contato.

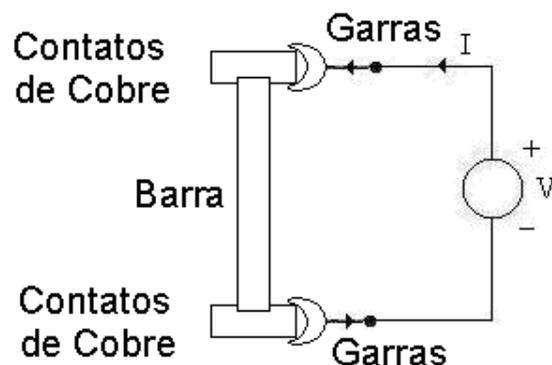


Figura 3 – Desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade das ligas resinadas

A partir do dispositivo mostrado na Figura 3, foi determinada a resistência elétrica dos corpos de prova (barras) para as ligas com resinas HRJ e SBP, com variação do percentual de resina, conforme mostram as Tabelas 1 e 2. Para cada liga, foram confeccionados três corpos de prova, e os valores presentes nas Tabelas 1 e 2 são a média aritmética das três medições de resistência elétrica.

Tabela 1 – Resistência elétrica das amostras Fe-HRJ

Composição	R [Ω]
Fe-HRJ 0,5%	3,4
Fe-HRJ 1,0%	2,6
Fe-HRJ 1,5%	3,6
Fe-HRJ 2,0%	8,1
Fe-HRJ 2,5%	7,6
Fe-HRJ 3,0%	16,8

Tabela 2 – Medidas da resistência elétrica das amostras Fe-SBP

Composição	R [Ω]
Fe-SBP 0,5%	-
Fe-SBP 1,0%	2,3
Fe-SBP 1,5%	6,0
Fe-SBP 2,0%	5,8
Fe-SBP 2,5%	9,5
Fe-SBP 3,0%	13,7

Como pode ser observado na Tabela 2, não existe valor para liga Fe-SBP, com 0,5% de resina. Isso ocorreu porque esses corpos de prova fraturaram ao serem usinados para a forma final da barra. Constatou-se também que o pequeno percentual para esse tipo de resina (SBP) torna os corpos de prova frágeis.

A partir da determinação da resistência elétrica das barras (Tabelas 1 e 2), e considerando o desenho esquemático da Figura 2-(b), utilizando-se a Equação 2, foi possível obter a resistividade elétrica ρ [$\mu\Omega.m$] de cada liga, conforme mostram as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Valores dimensionais e de resistência elétrica para cálculo da resistividade da liga Fe-HRJ

Composição	Resistência R [Ω]	Altura a [mm]	Largura b [mm]	Comprimento c [mm]	Resistividade ρ [$\mu\Omega.m$]
Fe-HRJ 0,5%	3,4	3,0	4,0	25,0	1632
Fe-HRJ 1,0%	2,6	3,0	4,0	25,0	1248
Fe-HRJ 1,5%	3,6	3,0	4,0	25,0	1728
Fe-HRJ 2,0%	8,1	3,0	4,0	25,0	3888
Fe-HRJ 2,5%	7,6	3,0	4,0	25,0	3648
Fe-HRJ 3,0%	16,8	3,0	4,0	25,0	8064

Tabela 4 – Valores dimensionais e de resistência elétrica para cálculo da resistividade da liga Fe-SBP

Composição	Resistência R [Ω]	Altura a [mm]	Largura b [mm]	Comprimento c [mm]	Resistividade ρ [μΩ.m]
Fe-SBP 0,5%	-	-	-	-	-
Fe-SBP 1,0%	2,3	3,0	4,0	25,0	1104
Fe-SBP 1,5%	6,0	3,0	4,0	25,0	2880
Fé-SBP 2,0%	5,8	3,0	4,0	25,0	2784
Fé-SBP 2,5%	9,5	3,0	4,0	25,0	4560
Fé-SBP 3,0%	13,7	3,0	4,0	25,0	6576

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 mostra as propriedades eletromagnéticas de interesse do ferro puro sinterizado (JANSSON, 1992), onde se podem observar, além da resistividade elétrica, as grandezas magnéticas. O autor relacionou três valores para cada grandeza física, com os valores mínimos e máximos de pesquisas bibliográficas mais minuciosas, sendo a linha do meio uma média dos diversos valores encontrados na literatura pelo autor (JANSSON, 1992). A resistividade elétrica ρ do ferro puro sinterizado foi tomada como referência na avaliação dos materiais compósitos estudados, uma vez que existe muita disparidade nas poucas referências bibliográficas sobre propriedades eletromagnéticas de materiais compósitos resinados.

Tabela 5 – Propriedades eletromagnéticas de interesse do ferro puro sinterizado

Composição	B_{max} [T]	B_r [T]	H_c [A/m]	μ_r	ρ [μΩ.m]
Ferro sinterizado	1,14	0,96	131	2.900	0,14
	1,36	1,18	127	3.700	0,12
	1,47	1,29	119	4.700	0,11

B_{max} : Densidade de fluxo magnético da saturação máxima [T]

B_r : Retentividade magnética [T]

H_c : Coercitividade magnética [A/m]

μ_r : Permeabilidade magnética

ρ : Resistividade elétrica [μΩ.m]

A Figura 4 mostra um gráfico comparativo dos valores da resistividade elétrica para as ligas resinadas em comparação com ferro sinterizado.

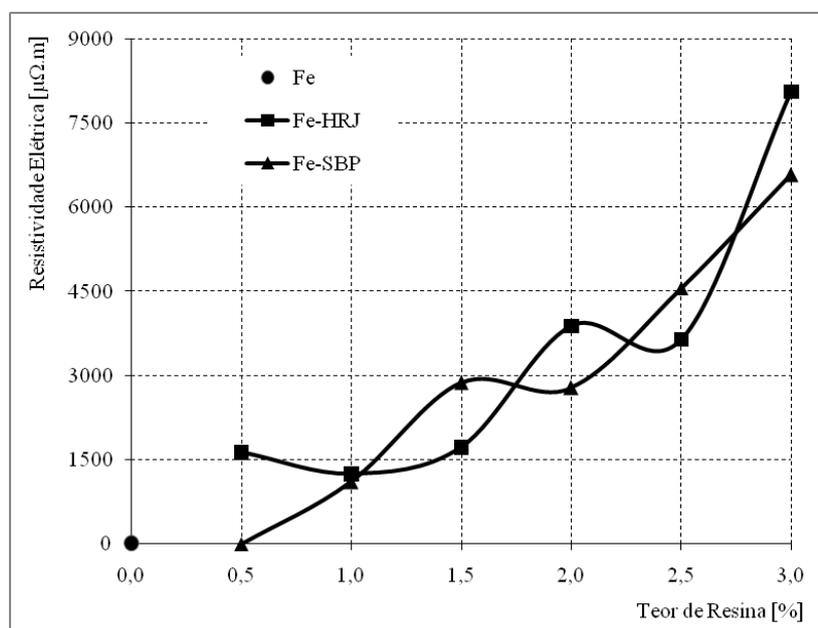


Figura 4 – Gráfico comparativo da resistividade elétrica para as ligas resinadas em comparação com ferro sinterizado.

Os resultados da resistividade elétrica das ligas de compósitos estudadas são comparados com as características do ferro puro sinterizado, uma vez que as propriedades eletromagnéticas deste são bastante conhecidas, havendo algumas variações, conforme mostra a Tabela 5. Salienta-se que as propriedades eletromagnéticas descritas na Tabela 5 também foram obtidas em experimentos preliminares, ficando na faixa intermediária dos valores mostrados nessa tabela. A resistividade elétrica do ferro puro foi determinada a partir do mesmo dispositivo mostrado na Figura 3. Dessa maneira, o processo pôde ser verificado, considerando que os valores encontrados experimentalmente para o ferro puro sinterizado permaneceram na faixa dos valores relacionados na Tabela 5.

Considerando o ferro puro sinterizado, observa-se que a resistividade elétrica tem um valor aproximado de $0,12 \mu\Omega.m$. Adicionando 0,5% de resina HRJ e consolidando o material a partir da cura da resina (o que difere radicalmente do material sujeito à ação de sinterização), a resistividade elétrica aumentou para $1,632 \mu\Omega.m$. Adicionando 3% de resina HRJ, a resistividade elétrica aumentou para $8,064 \mu\Omega.m$. Este último valor representa um aumento de 67.200 vezes na

resistividade elétrica do material. Isso caracteriza praticamente um circuito aberto, e as correntes parasitas nesse caso tendem a valores muito baixos.

Esse material resinado tem função de revestimento orgânico nas partículas de pó de ferro, que produz também elevada resistividade elétrica. Esse tipo de material é em geral magneticamente isotrópico, devido a sua natureza porosa, e isso é crucial no projeto de dispositivos eletromagnéticos. O circuito magnético pode ter uma distribuição tridimensional de fluxo, e topologias diversas podem ser exploradas para adquirir máquinas de alta *performance*, pois o fluxo magnético não tem de ser limitado no plano como em aços laminados, que são comumente usados em máquinas elétricas e transformadores (JACK, 1998; GUO, 2003).

Importante salientar que, em outros ensaios realizados e que não foram objeto de estudo deste trabalho, constatou-se que o aumento de percentual de resina interfere nas propriedades magnéticas de interesse para o uso desse material em núcleos de máquinas elétricas, principalmente a permeabilidade magnética relativa, que tende a diminuir. Isso ocorre porque a resina se deposita nos interstícios das partículas de pó de ferro, age como cola e isolamento elétricas entre elas. Uma vez que as resinas não são materiais ferromagnéticos, estas também agem como entreferros em núcleos magnéticos de máquinas elétricas construídas a partir desses compósitos.

Entretanto, também é importante salientar que ensaios de perdas em núcleos magnéticos confeccionados a partir de materiais sinterizados (como o ferro puro sinterizado) demonstraram serem maiores do que as perdas magnéticas em núcleos confeccionados a partir dos materiais compósitos estudados neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo e o desenvolvimento de materiais compósitos magnéticos macios, com caracterização da sua resistividade elétrica. É observado que, com uma combinação de ferro com material resinado, é possível obter resultados satisfatórios para utilização desse material como núcleo magnético de máquinas elétricas.

Em comparação com ferro sinterizado, foram obtidos resultados relevantes para a aplicação desse material como núcleo de máquinas elétricas, visto que há um grande aumento da resistividade elétrica com a adição de resina combinada com ferro, atingindo um valor até 67.200 vezes maior para a liga com 3% da resina HRJ.

Os núcleos magneticamente ativos das máquinas elétricas rotativas, como o estator e o rotor, com raras exceções, são construídos com chapas de aço laminadas e isoladas eletricamente entre si, uma vez que esse isolamento entre chapas restringe a circulação de correntes parasitas, reduzindo as perdas por correntes de Foucault. Por esse motivo, com raras exceções, esses núcleos não são construídos em blocos maciços. Porém, utilizando os processos da M/P como o desenvolvimento de materiais compósitos citados neste trabalho, os núcleos de estator e rotor podem ser construídos em blocos maciços com resistividade elétrica extremamente elevada, o que restringe as correntes parasitas, reduzindo assim as perdas por correntes de Foucault. Observa-se que as correntes elétricas em qualquer corpo são inversamente proporcionais à resistividade elétrica deste.

Sem considerar o desempenho, a construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas realizadas a partir desses materiais compósitos em blocos maciços iria reduzir as etapas no processo de fabricação das máquinas. Na construção de núcleos de máquinas elétricas convencionais, o aço é laminado, estampado, empilhado na forma de pacote de chapas e submetido a um tratamento térmico.

Devido ao declínio das propriedades magnéticas de interesse para o desenvolvimento de núcleos de máquinas elétricas a partir dos materiais estudados neste trabalho, apenas uma pequena fração de núcleos está sendo construída a partir dessa tecnologia, concentrando-se mais em servomotores que operam em frequências maiores que os 60 Hz da rede convencional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, por financiar este trabalho, à Höganäs do Brasil Ltda. e SI Group Crios Ltda. pelo fornecimento de matérias-primas.

REFERÊNCIAS

- ASAKA, K.; ISHIHARA, C. Technical trends in soft magnetic parts and materials. **Hitachi Powdered Metals Technical Report**, n. 4, p. 3-9, 2005.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. C; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. New York: McGraw-Hill Inc, 1990. p. 599.

GUO, Y. G. et al. Comparative study of 3D flux electrical machines with soft magnetic composite core, **IEEE Trans. Ind. Appl.** 39. p. 1696–1703, 2003.

JACK, A. G. Experience with the use of soft magnetic composites in electrical machines. In: **Proceedings of the International Conference on Electrical Machines**, Istanbul: Turkey, p. 1441–1448, 1998.

JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. **Powder Metallurgy**, Hoeganes A. B., Hoeganes Swed, v. 35, n.1, p. 63-66, 1992.

NASAR, S. A. **Handbook of Electric Machines**. New York: McGraw-Hill, 1987.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K. Soft Magnetic Composite Materials (SMCs). **Mater. Process. Technol.** v. 189. p. 1-12. 2007.