

# INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE RESINA NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS APLICADOS A NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

J. S. Barboza<sup>1</sup>, L. Schaeffer<sup>1</sup>, J. A. L. Jr. Esswein<sup>1</sup>, L. L. Cerva<sup>1</sup>, M. M. Dias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Tecnologia, Caixa Postal 15021 - Campus do Vale, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil -  
juliano.barboza@ufrgs.br

<sup>2</sup>Centro Universitário Feevale, Caixa Postal 3004, 93510-250, Novo Hamburgo, RS, Brasil

## RESUMO

*Os núcleos magnéticos de máquinas elétricas, usualmente, são construídos a partir de chapas laminadas. Contudo, utilizando-se os processos da metalurgia do pó é possível construir estes núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e pode resultar em motores com várias vantagens sobre aqueles com núcleos convencionais, como motores mais leves, menor consumo de energia e maior rendimento. Este trabalho tem por objetivo um estudo comparativo das propriedades magnéticas entre alguns materiais compósitos magnéticos macios, possíveis de serem utilizados na construção de núcleos de máquinas ou motores elétricos. Assim, este se concentra na obtenção de núcleos maciços, sendo estudados compósitos magnéticos macios de pó de ferro combinado com resina fenólica, analisando a influência da variação do teor de resina nas propriedades magnéticas como permeabilidade magnética, indução de saturação, retentividade e coercitividade. Com os experimentos obtêm-se resultados satisfatórios de acordo com os requisitos para aplicação como núcleo de máquinas elétricas.*

*Palavras-chave: Máquinas Elétricas, Metalurgia do Pó, Compósito Magnético Macio, Propriedades Magnéticas.*

## INTRODUÇÃO

É consenso entre os pesquisadores e empresas da área de motores elétricos que, mudanças na forma e acionamento de motores, encontram-se no limite do aprimoramento tecnológico e somente mudanças drásticas nos materiais utilizados

na construção dos núcleos dos motores, irão ocasionar melhora de rendimento nos mesmos. Assim, através dos processos da M/P é possível construir núcleos compostos por vários materiais, gerando ligas com propriedades físicas melhores, que por sua vez irão gerar motores de melhor performance.

A M/P é um processo de transformação mecânica onde se obtém 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. Processos alternativos permitem a agregação dos pós a partir de resinas ou polímeros<sup>(1)(2)</sup>.

Assim, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e testes de materiais magnéticos compósitos a partir da M/P, aplicados a núcleos de máquinas elétricas, usualmente construídas com chapas de aço laminadas. Os núcleos obtidos a partir destes compósitos são compostos de pó de ferro combinado com resina fenólica. Neste processo as ligas são misturadas, compactadas e curadas. Após são avaliadas propriedades magnéticas como permeabilidade magnética, coercitividade, retentividade e indução de saturação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Propriedades físicas de interesse

As características de um material magnético macio compósito que pode ser utilizado em núcleos de máquinas elétricas rotativas, compreendem<sup>(3)(4)</sup>:

- Baixas perdas por correntes de Foucault
- Relativamente baixas perdas por ciclo de histerese em núcleos eletromagnéticos alimentados a partir de correntes de baixas a altas freqüências
- Alta permeabilidade magnética
- Alta resistividade elétrica
- Anisotropia constante
- Baixa coercitividade
- Redução em tamanho e peso

### Preparação de amostras

O estudo foi realizado a partir de compósitos, que consistiam de Fe com dois tipos de resina fenólica. Assim foi possível uma comparação de desempenho e propriedades físicas entre estes dois tipos de materiais. O processo de obtenção das amostras consistiu da mistura dos pós, compactação, e posterior cura. Após, são avaliadas as propriedades magnéticas de interesse.

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 onde xx corresponde ao percentual em peso de resina, sendo 0,5%; 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5% e 3,0%.

As propriedades magnéticas foram avaliadas a partir de amostras na forma de anel. A compactação foi realizada em uma prensa mecânica de marca EKA com capacidade de 40 toneladas. Utilizou-se pressão de compactação de 600 MPa, onde  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ . Considerando que 1 ton é aproximadamente 10.000 N, resulta:  $600 \text{ MPa} = 6 \times 10^8 \text{ N/m}^2 = 6 \times 10^4 \text{ ton/m}^2 = 6 \text{ ton/cm}^2$ . Considerando a área da matriz, obtém-se 23,58 ton para  $3,93 \text{ cm}^2$ .

O processo de cura foi realizado em um forno sem atmosfera controlada. De acordo com o fabricante das resinas, para uma boa cura das resinas, esta deve consistir de pré-cura até  $90^\circ\text{C}$  com patamar por 2 minutos, e posteriores aquecimentos a  $155^\circ\text{C}$  e  $220^\circ\text{C}$ , ambos com patamar de 2 minutos. As amostras foram usinadas para obtenção de um acabamento dimensional necessário para realização dos ensaios.

### Propriedades magnéticas do material

As propriedades magnéticas de retentividade, coercitividade, indução de saturação e permeabilidade relativa, são analisadas a partir da curva de histerese. Esta curva relaciona campo magnético H aplicado a um material com indução magnética B resultante. Para os materiais magnéticos de interesse deste trabalho, a relação BxH tem as características mostradas na Fig. 1<sup>(5)</sup>.

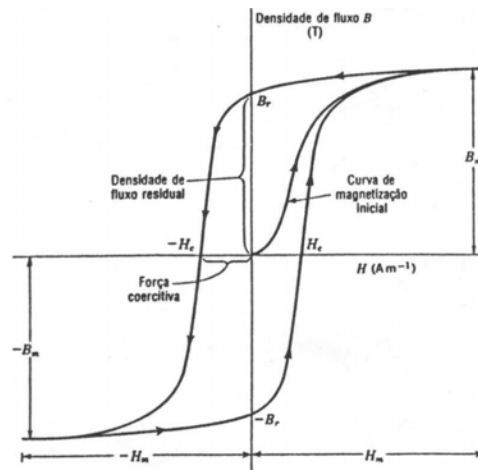


Fig. 1 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético.

O ponto em que a curva corta o eixo de B, no quadrante superior esquerdo, é denominado de magnetismo remanente ou retentividade ( $B_r$ ) e representa a indução magnética residual que permanece no espécime após a retirada do campo magnético aplicado ( $H = 0$ ). No sistema MKS de unidades, a indução B é dada em Tesla [T] e no sistema CGS de unidades (mais utilizados para caracterização de materiais magnéticos), B é dado em Gauss [G]. O ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva ou coercitividade ( $H_c$ ) e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ( $B = 0$ ). No sistema MKS de unidades, o campo H é dado em Ampère/metro [A/m] e no sistema CGS H tem como unidade o Oersted [Oe]. A permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) está relacionada com o ponto de maior declividade da curva de histerese. A indução de saturação ( $B_{max}$ ) pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula<sup>(5)</sup>.

A curva de histerese foi determinada a partir das amostras na forma de anel onde foi feito um enrolamento (Fig. 2). O campo magnético aplicado foi observado a partir da medição da corrente aplicada em uma resistência, e a indução magnética resultante foi observada a partir da medição da tensão em um sensor Hall. Dispositivos de configuração semelhantes também são denominados de Anel de Roland.

A Fig. 2 ilustra o desenho esquemático de um dispositivo que possibilita o traçado de uma curva de histerese elementar. Uma fonte de tensão contínua ajustável alimenta os enrolamentos do anel ou indutor. Assim, uma variação da tensão da fonte, ocasiona numa variação da corrente nos enrolamentos e em

conseqüência uma variação no campo magnético no núcleo do indutor. Observa-se que, uma resistência elétrica deve ser introduzida entre a saída da fonte de tensão e os enrolamentos do indutor. Esta resistência tem duas funções, primeiro, limitar a corrente nos enrolamentos, evitando que a fonte seja curto-circuitada pelo enrolamento. Segundo, possibilitar uma leitura de tensão sobre ela, ou seja, é possível medir a corrente de um circuito elétrico, medindo-se a tensão sobre uma resistência e dividindo-se a tensão lida pela própria resistência. Uma simplificação seria adicionar uma resistência de 1 Ohm. Assim, obtém-se uma relação unitária entre a tensão medida e a corrente do circuito. A indução é obtida a partir de um sensor de efeito Hall linear, inserido no entreferro do núcleo do indutor. Um sensor Hall é dispositivo que gera uma tensão elétrica, proporcional a indução magnética que o atravessa. Portanto, a indução pode ser relacionada a tensão na saída do sensor Hall. Em resumo, o dispositivo permite traçar uma curva de histerese elementar, onde a indução magnética (medida a partir do sensor Hall) é função do campo magnético aplicado (medido a partir da queda de tensão na resistência). Importante observar que, o método empregado para obtenção da curva de histerese, ou seja, anel de Roland modificado (Fig. 2) é um método comparativo, onde os resultados entre diferentes materiais somente podem ser comparados aos valores obtidos pelo mesmo método, e não por curvas de histerese obtidas a partir de outros procedimentos, como o anel de Roland clássico, o Squid ou o Magnetômetro de Amostra Vibrante. Este método do anel de Roland alternativo foi utilizado, por se tratar de um método relativamente simples, e permite curvas de histerese elementares de uma grande quantidade de materiais, sem a necessidade de se recorrer a dispositivos de acesso mais restrito como o Magnetômetro de Amostra Vibrante por exemplo.

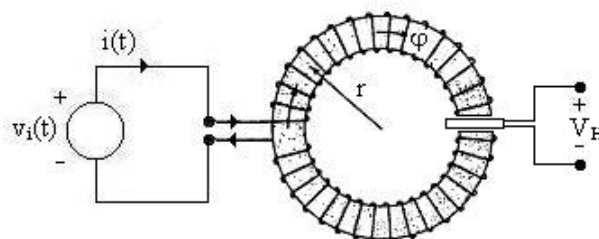


Fig. 2 - Desenho esquemático do dispositivo para obtenção da curva de histerese.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A viabilidade de aplicação dos materiais compósitos estudados neste trabalho foi baseada na curva de histerese. Como foi utilizado um anel de Roland modificado, inicialmente foi utilizado como referência, um material perfeitamente conhecido e caracterizado, no caso, o ferro puro sinterizado, cuja curva de histerese é conhecida pela literatura. Assim, utilizando o anel de Roland modificado foram traçadas curvas de histerese do ferro puro sinterizado e dos outros materiais estudados, possibilitando uma análise comparativa entre eles. Portanto, os dados relacionados a seguir, sempre têm como referência o ferro puro sinterizado e os outros materiais têm os dados de suas propriedades físicas em percentuais.

As tabelas 1 e 2 mostram a relação das respectivas ligas resinadas e os valores da permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ); da indução para máxima permeabilidade magnética relativa ( $B[\mu_r(\text{máx})]$ ); da indução máxima ( $B_{\text{máx}}$ ); da permeabilidade para indução máxima ( $\mu_r[B_{\text{máx}}]$ ); da retentividade ( $B_r$ ) e coercitividade ( $H_c$ ). A referência é Ferro Sinterizado e comparou este em percentual com as outras ligas. Por este motivo, estas propriedades não têm unidades e o valor do Ferro Sinterizado possui valor igual a 1.

Tabela 1 - Resultados comparativos das propriedades magnéticas da liga Fe-HRJ.

Amostras	$\mu_r$	%	$B[\mu_r(\text{máx})]$	%	$B_{\text{máx}}$	%	$\mu_r[B_{\text{máx}}]$	%	$B_r$	%	$H_c$	%
Fe	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00
Fe-HRJ 0,5	1,415	41,52	0,693	-44,25	1,061	6,09	1,049	4,89	1,419	41,89	0,851	-17,44
Fe-HRJ 1,0	1,449	44,93	0,763	-31,07	1,156	15,57	1,137	13,72	1,590	59,01	0,919	-8,79
Fe-HRJ 1,5	1,454	45,42	0,689	-45,16	0,989	1,16	0,992	-0,81	1,302	30,18	0,788	-26,84
Fe-HRJ 2,0	1,367	36,74	0,689	-45,22	1,024	2,40	1,014	1,40	1,374	37,39	0,851	-17,53
Fe-HRJ 2,5	1,398	39,77	0,663	-50,79	1,026	2,62	1,020	1,98	1,338	33,78	0,818	-22,21
Fe-HRJ 3,0	1,065	6,53	0,663	-50,76	0,901	-10,94	0,887	-12,80	1,126	12,61	0,868	-15,26

Tabela 2 - Resultados comparativos das propriedades magnéticas da liga Fe-SBP.

Amostras	$\mu_r$	%	$B[\mu_r(\text{máx})]$	%	$B_{\text{máx}}$	%	$\mu_r[B_{\text{máx}}]$	%	$B_r$	%	$H_c$	%
Fe	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00
Fe-SBP 0,5	1,782	78,17	0,780	-28,18	1,281	28,11	1,273	27,33	1,716	71,62	0,822	-21,69
Fe-SBP 1,0	1,674	67,35	0,720	-38,83	1,158	15,84	1,119	11,86	1,509	50,90	0,788	-26,98
Fe-SBP 1,5	1,494	49,42	0,708	-41,17	1,060	6,01	1,051	5,12	1,410	40,99	0,806	-24,01
Fe-SBP 2,0	1,656	65,59	0,714	-40,05	1,166	16,64	1,150	15,00	1,527	52,70	0,787	-27,13
Fe-SBP 2,5	1,431	43,08	0,680	-47,05	0,966	-3,47	0,943	-6,05	1,392	39,19	0,821	-21,74
Fe-SBP 3,0	1,386	38,60	0,667	-49,88	1,050	5,02	1,043	4,30	1,275	27,48	0,800	-25,00

Da figura 3 a 8, observamos gráficos comparativos dos valores das propriedades magnéticas para as ligas resinadas estudadas em comparação ao Ferro Sinterizado.

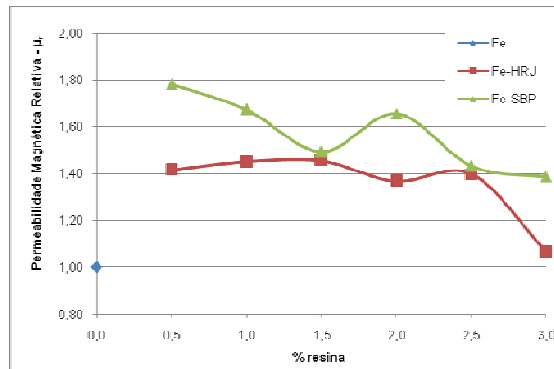


Fig. 3 - Gráfico comparativo da permeabilidade magnética das ligas resinadas.

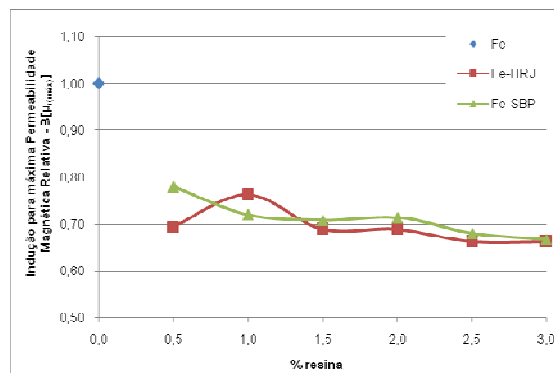


Fig. 4 - Gráfico comparativo da indução para máxima permeabilidade magnética relativa das ligas resinadas.

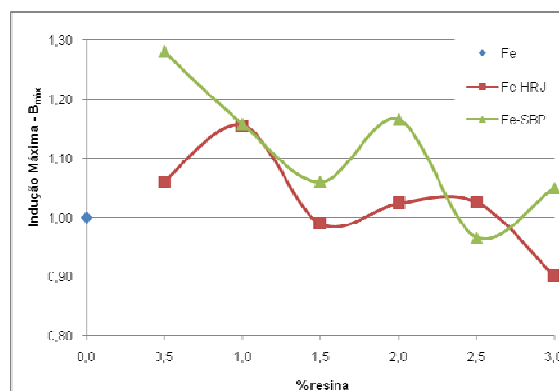


Fig. 5 - Gráfico comparativo da indução máxima das ligas resinadas.

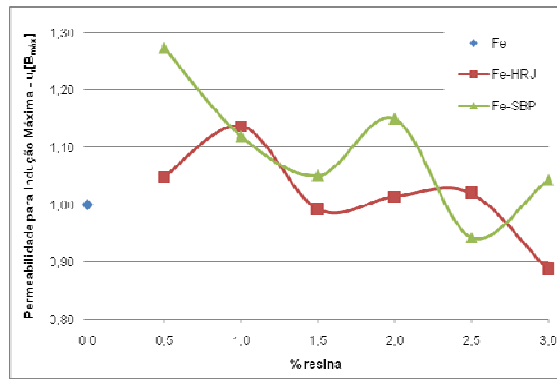


Fig. 6 - Gráfico comparativo da permeabilidade para indução máxima das ligas resinadas.

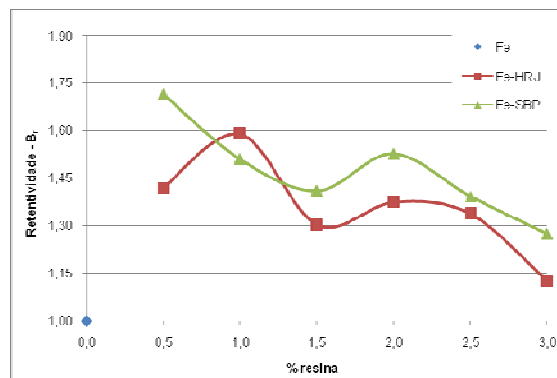


Fig. 7 - Gráfico comparativo da retentividade magnética das ligas resinadas.

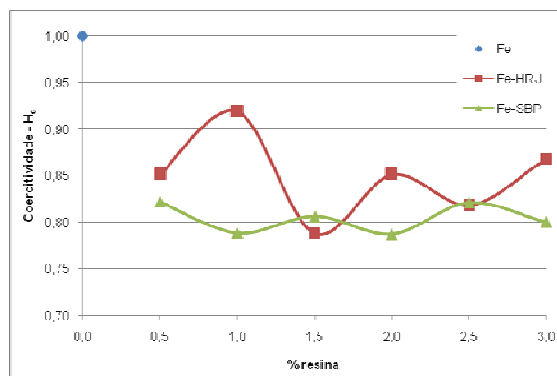


Fig. 8 - Gráfico comparativo da coercitividade magnética das ligas resinadas.

Como o objetivo principal deste estudo é a obtenção de um material adequado para uso como material magnético macio aplicado em máquinas elétricas, portanto, é essencial a medição das propriedades magnéticas. Estas propriedades magnéticas foram medidas com diferentes proporções de material resinado em cada material estudado, comparando o comportamento destas propriedades em função da adição de material resinado. A tabela 3 mostra as propriedades magnéticas de interesse da liga de Ferro Sinterizado<sup>(1)</sup>.



Tabela 3 - Propriedades magnéticas de interesse de Ferro Sinterizado.

Composição	$B_{max}$ [T]	$B_{max}$ [kG]	$B_r$ [T]	$B_r$ [kG]	$H_c$ [A/m]	$H_c$ [Oe]	$\mu_r$
Fe sinterizado	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2.900
	1,36	13,6	1,18	11,8	127	1,6	3.700
	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,5	4.700

Através dos resultados obtidos observa-se o comportamento das propriedades em função da quantidade de resina, ou seja, o comportamento da propriedade magnética é relacionado com o aumento do teor de resina.

O material resinado apresenta maiores permeabilidade magnética e indução de saturação em função da referência (Ferro Sinterizado). Observa-se que a amostra Fe-SBP com 0,5% em peso de resina apresenta os melhores resultados, ou seja, maior permeabilidade magnética e indução de saturação. Quanto maior o fluxo de entreferro maior é o torque desenvolvido na ponta de eixo da máquina elétrica utilizada como motor. Por este motivo as máquinas trabalham com alta indução no entreferro. No caso a liga citada apresenta elevada indução de saturação.

Em oposição às boas características de um material compósito magnético macio, obtivemos resultados insatisfatórios para retentividade, ou seja, ao invés de ter baixa retentividade os testes resultaram em valores elevados em relação à referência. Mas o comportamento da coercitividade é satisfatório. Com baixa coercitividade menor serão as perdas por ciclo de histerese do dispositivo magnético, ou seja, a coercitividade define a largura da curva de histerese (Fig. 9). Quanto mais larga é a curva maior é a perda por ciclo de histerese em materiais magnéticos.

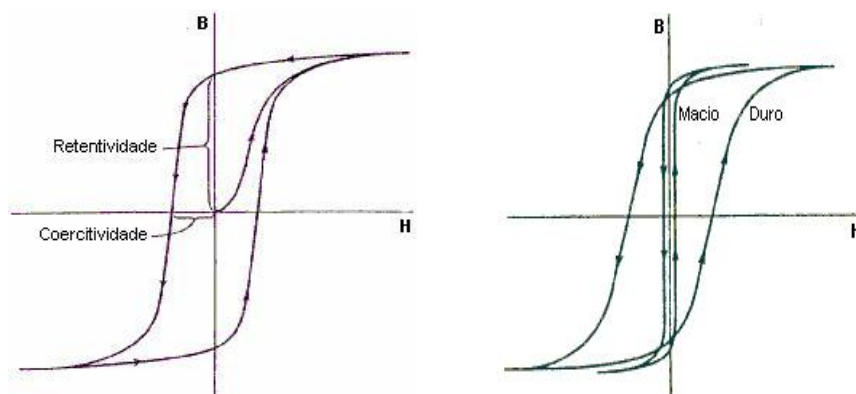


Fig. 9 - Ciclo de histerese: (a) para um material duro e (b) comparação entre materiais magnéticos macio e duro.

De acordo com estes resultados o material em teste com melhor comportamento é a amostra Fe-SBP com pouca variação da propriedade em função do percentual em peso de resina adicionado.

As ligas resinadas apresentam permeabilidade magnética elevada em comparação ao Ferro Sinterizado. Quanto maior a permeabilidade magnética relativa dos núcleos (rotor e estator), menor é o campo no ferro e maior é o campo magnético do entreferro.

Este material resinado tem função de revestimento orgânico nas partículas de pó de ferro, que produz também elevada resistividade elétrica. Este tipo de material é geralmente magneticamente isotrópico devido a sua natureza porosa, sendo benéfico para dispositivos eletromagnéticos. Os circuitos magnéticos podem ser intencionados com rota de fluxo tridimensional e diferentes topologias podem ser exploradas para desenvolver máquinas de alto rendimento pelo fato de o fluxo magnético não ser forçado no plano, assim como em chapas laminadas, que são usualmente utilizadas na confecção de máquinas elétricas e transformadores<sup>(6)</sup>.

É importante salientar que parâmetros de preparação das amostras influenciam nos resultados em questão, como granulometria das matérias-primas, pressão de compactação e ciclo de cura.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho é estudado o desenvolvimento de um material compósito magnético macio, caracterizando as propriedades magnéticas de interesse como permeabilidade magnética, indução de saturação, coercitividade e retentividade. É observado que com uma combinação de Fe com material resinado é possível obter resultados satisfatórios para utilização deste material como núcleo magnético de máquinas elétricas.

Em comparação com Ferro Sinterizado foram obtidos resultados satisfatórios como alta permeabilidade magnética e indução de saturação e baixa coercitividade. Mas o comportamento dos resultados de retentividade não satisfaz as necessidades em questão.

O material magnético macio é uma média isotrópica com alta permeabilidade magnética, baixa coercitividade e alta indução de saturação. Portanto, das amostras estudadas é possível afirmar que a amostra Fe-SBP1,5 seria o material possível de utilizar para esta determinada aplicação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERGS e ao CNPq por financiar este trabalho, à EPI Energia Projetos e Investimentos Ltda pelo apoio no projeto e à Höganäs do Brasil Ltda e SI Group Crios Ltda pelo fornecimento de matérias-primas.

## REFERÊNCIAS

1. JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, p.63-66, 1992.
2. KRAUSE, R.F., BULARZIK, J.H., KOKAL, H.R. New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. Journal of Materials Engineering and Performance, v.6, n.6, p.710-712, 1997.
3. H. Shokrollahi, K. Janghorban. Soft Magnetic Composite Materials (SMCs). Mater. Process. Technol. 189, p.1-12, 2007.
4. K. Asaka, C. Ishihara, Technical trends in soft magnetic parts and materials, Hitachi Powdered Metals Technical Report, No. 4, 3-9, 2005.
5. D. JILES. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. Boca Raton, Chapman and Hall, 568p, 1998.
6. Y.G. Guo, J.G. Zhu, P.A. Watterson, W. Wu, Comparative study of 3D flux electrical machines with soft magnetic composite core, IEEE Trans. Ind. Appl. 39 (2003) 1696–1703.

## THE INFLUENCE OF RESIN CONTENT VARIATION IN MAGNETIC PROPERTIES OF SOFT MAGNETIC COMPOSITE MATERIALS APPLIED TO ELECTRICAL MACHINES' CORE

### ABSTRACT

*The magnetic cores of electrical machines are usually built from rolled sheets. However, when powder metallurgy processes are used, it is possible to build these cores in unique massive block, with high magnetic permeability and may result in motors with more advantages than the ones with conventional cores. Some of the advantages are lighter motors, less energy consumption and better performance. This paper brings a comparative study on the magnetic properties of some soft magnetic composite materials, which are likely to be used in the manufacturing of machines' cores and electrical motors. Thus, the present study focuses on the obtention of massive cores, where soft magnetic composites of iron powder*

*combined with phenolic resin are analyzed regarding the influence of the resin content variation in magnetic properties such as magnetic permeability, saturation induction, retentivity and coercivity. The experiments show satisfactory results according to the requirements for the electrical machines' cores applications.*

*Key-words: Electrical Machines, Powder Metallurgy, Soft Magnetic Composite, Magnetic Properties.*