

EFEITO DAS CONDIÇÕES DE CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MAGNÉTICAS DE ÍMÃS AGLOMERADOS HÍBRIDOS DE NdFeB

B.F.A. da Silva^{1,3}, S.R. Janasi², D. Rodrigues², H. Takiishi¹

¹IPEN – Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais

Av. Lineu Prestes 2242 - Cidade Universitária

CEP 05508-000, São Paulo – SP BRASIL, e-mail: brunoferansi@gmail.com

²Brats Indústria e Comércio de Produtos Metálicos Especiais, ³IPT

RESUMO

Este trabalho discute a influência da temperatura e da atmosfera de cura nas propriedades magnéticas e na resistência à compressão de ímãs híbridos aglomerados produzidos a partir da mistura de pó de NdFeB pronto pra uso (Magnequench MQEP – obtido por melt spinning) e pó de ferrite de estrôncio. As amostras foram produzidas com diferentes quantidades de pó de ferrite adicionadas às bases de NdFeB e compactadas uniaxialmente. Os ímãs híbridos obtidos foram submetidos a tratamentos de cura em diferentes temperaturas e atmosferas (ao ar e sob vácuo). Correlações entre tratamentos de cura, resistência à compressão e propriedades magnéticas foram estabelecidas com base em resultados obtidos por histeresigrafia e ensaios de compressão. Ímãs curados sob vácuo apresentaram resistências à compressão inferiores às de ímãs curados ao ar, entretanto, as propriedades magnéticas dos ímãs curados sob vácuo foram superiores.

Palavras-chave: ímãs híbridos, NdFeB, ferrite de estrôncio, ímãs aglomerados

INTRODUÇÃO

Ímãs são muito utilizados na sociedade moderna. Atuando em dispositivos como motores, sensores, alto-falantes, equipamentos de automação, equipamentos de diagnósticos em laboratórios médicos e muitos outros. É estimado, por exemplo, que um automóvel típico use cerca de 100 ímãs permanentes por toda sua estrutura ^(1,2).

Cada material magnético possui propriedades particulares que o torna mais adequado para determinadas aplicações do que outros. Dentre os critérios de seleção estão: força magnética, custo, rendimento magnético sob temperaturas extremas, resistência à corrosão, resistência à desmagnetização e propriedades mecânicas como densidade, resistência física ou flexibilidade.

Na década de 1970, foram criados os ímãs aglomerados, ou “bondeds”, originalmente produzidos a partir de pós de ferrite e em forma flexível. Estes ímãs são fabricados com utilização de materiais plásticos como elemento de solidificação do pó em corpos rígidos ou flexíveis ^(3,4). Apesar de apresentarem propriedades magnéticas inferiores em relação às dos ímãs sinterizados, devido à presença de uma fase não magnética (resina), os ímãs aglomerados permitem a diminuição de custos de produção, pois eliminam a etapa da sinterização. Assim, considerando que inúmeras aplicações não necessitam de ímãs com propriedades magnéticas tão elevadas como as fornecidas por um ímã de NdFeB sinterizado, ímãs aglomerados produzidos com resinas e materiais poliméricos passaram a ser uma boa alternativa para o mercado consumidor de materiais magnéticos, sendo ideais para aplicações de baixo custo combinadas com formas precisas e complexas, sabendo-se que não há etapa de sinterização e que a matriz polimérica do material possibilita que os ímãs sejam moldados em seu formato final.

A preparação de ímãs híbridos, que consiste na mistura dos pós de NdFeB e de ferrite, de acordo com as proporções de seus constituintes, podem preencher lacunas intermediárias relativas a propriedades magnéticas existentes entre ímãs de ferrite de estrôncio e ímãs de NdFeB ⁽⁵⁾. Esta mistura pode proporcionar vantagens na produção de ímãs para atender requisitos especiais formando uma nova rede de ímãs com precisão em tolerâncias dimensionais e boas propriedades mecânicas e magnéticas, além de relativo baixo custo, características que não são facilmente obtidas com ímãs sinterizados ^(6,7).

A proposta deste trabalho é avaliar e discutir o efeito das condições de cura de ímãs híbridos aglomerados de NdFeB contendo diferentes proporções de ferrite de estrôncio, nas propriedades mecânicas e magnéticas dos ímãs obtidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ímãs foram preparados a partir de misturas com base em pós de NdFeB MQEP Magnequench (~22% em volume de resina) com adições de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% (em massa) de pós de ferrite de estrôncio ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). As misturas foram realizadas em almofariz de ágata sem compensação de resina para a quantidade de ferrite adicionada. Todos os corpos de prova foram compactados uniaxialmente com pressão de 700 MPa em prensa Emic DL10000 à temperatura ambiente, sob forma de cilindros com diâmetros de ~11,4 mm e alturas de ~6 mm.

O processo de cura de todos os ímãs foi feito em forno tubular Combustol com controlador Therma e bomba de vácuo mecânico (da ordem de 10^{-2} Torr). Os ímãs foram curados “ao ar” e “sob vácuo” e as temperaturas utilizadas foram 160°C, 180°C e 200°C.

A caracterização magnética foi feita em Histeresígrafo KJS HG500 calibrado com padrão de níquel com 99,995% de pureza. As propriedades magnéticas foram obtidas a partir do valor médio de quatro leituras por amostra (uma medição por corpo de prova), sendo que cada amostra era constituída por quatro espécimes.

Os limites de resistência à compressão foram obtidos a partir do valor médio de três leituras por amostra. As medições foram realizadas em prensa Instron 4400 com célula de carga com capacidade para 10 Toneladas (1000 MPa).

Todos os testes de caracterização magnética e de resistência à compressão foram realizados à temperatura ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos para densidade geométrica e resistência à compressão dos ímãs 100% MQEP (Tabela 1) indicam que as variações de temperatura e atmosfera de cura não promoveram diferenças consideráveis para estas propriedades nos ímãs que foram curados sob vácuo.

Tabela 1. Densidade geométrica e resistência à compressão de ímãs 100% MQEP curados ao ar e sob vácuo.

Temperatura de cura (°C)	ρ (g/cm ³)		Resistência à compressão (MPa)	
	ar	vácuo	ar	vácuo
160	5,83	5,85	160,6	163,3
180	5,85	5,85	169,5	166,4
200	5,86	5,85	178,2	165,3

Observa-se na Figura 1 que para ímãs curados ao ar, ocorreu um pequeno aumento da densidade e uma melhora de cerca de 12% na resistência à compressão com o aumento da temperatura de cura (160° a 200°C). Outra observação interessante é que os ímãs curados em temperatura de 200°C sob vácuo são menos resistentes à compressão do que os ímãs curados nesta mesma temperatura ao ar.

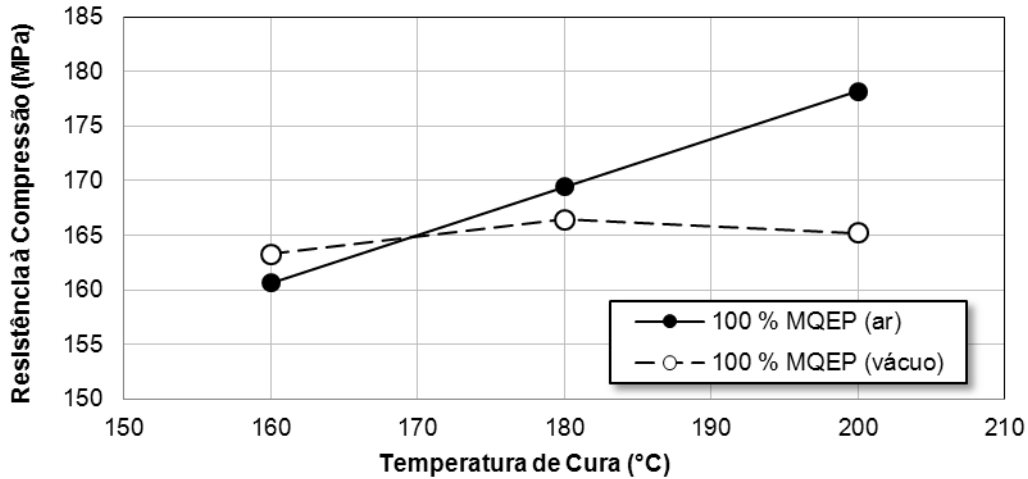


Figura 1. Variação da resistência à compressão em função da temperatura de cura ao ar e sob vácuo em ímãs 100% MQEP.

Não foram observadas variações significativas da remanência (J_r) dos ímãs 100% MQEP (Tabela 2) em função da temperatura e atmosfera de cura, com uma pequena diminuição entre ímãs curados ao ar e sendo reprodutivo entre os ímãs curados sob vácuo (0,698 T).

A coercividade intrínseca (H_{ci}) aumentou em ambos os casos (ao ar e sob vácuo) com o aumento da temperatura de cura. Valores mais altos de H_{ci} foram obtidos para os ímãs curados ao ar, porém a maior variação de H_{ci} em função da temperatura de cura ocorreu para os ímãs curados sob vácuo.

Tabela 2. Propriedades magnéticas dos ímãs 100% MQEP curados ao ar e sob vácuo.

Temperatura de cura (°C)	J_r (T)		H_{ci} (kA/m)		$BH_{máx}$ (kJ/m ³)	
	ar	vácuo	ar	vácuo	ar	vácuo
160	0,694	0,698	783,9	777,7	77,9	78,0
180	0,691	0,698	786,6	784,2	76,9	80,2
200	0,688	0,698	788,4	789,5	76,2	80,5

A Figura 2 mostra a influência da atmosfera nos valores de $BH_{máx}$ em função da temperatura de cura. O $BH_{máx}$ diminui nos ímãs curados ao ar e aumenta nos ímãs curados sob vácuo com o aumento da temperatura de cura. Uma possível razão para esse fato é que a oxidação das partículas de NdFeB ocorre em diferentes proporções de acordo com a atmosfera de cura, ou seja, obviamente ocorrerá menor oxidação na cura feita sob vácuo. A oxidação dessas partículas piora as propriedades magnéticas dos ímãs de NdFeB.

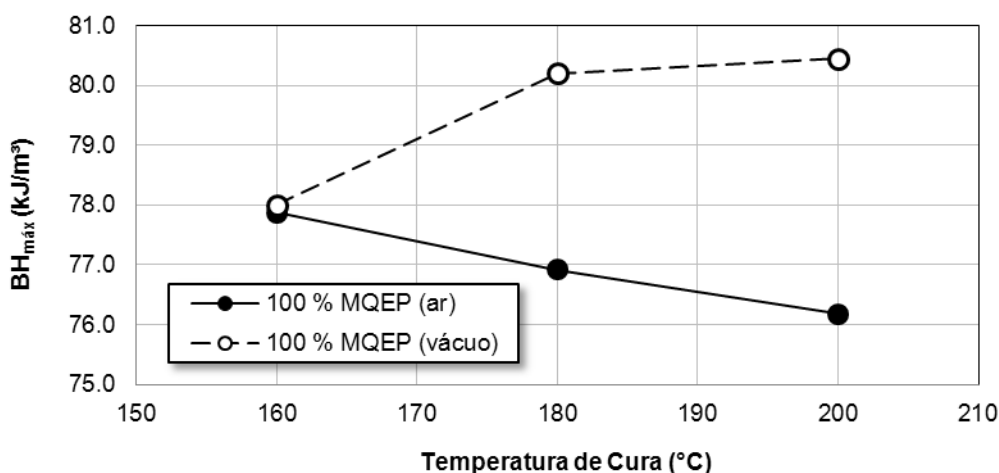


Figura 2. Variação do $BH_{máx}$ em função da temperatura de cura ao ar e sob vácuo em ímãs 100% MQEP.

A temperatura escolhida para a cura dos ímãs híbridos foi a de 200°C, pois apresentou maior valor e maior variação de $BH_{máx}$ entre curas ao ar e sob vácuo.

As densidades dos ímãs híbridos não apresentaram diferenças significativas com a variação da atmosfera, como mostram os valores apresentados na Tabela 3. Entretanto, como a densidade do ferrite é menor que a densidade do NdFeB, obteve-se uma diminuição das densidades dos ímãs híbridos de acordo com o aumento da percentagem de ferrite nas misturas.

Tabela 3. Densidade geométrica e resistência à compressão de ímãs híbridos curados a 200°C ao ar e sob vácuo.

% de aditivo em massa	ρ (g/cm³)		Resistência à compressão (MPa)	
	ar	vácuo	ar	vácuo
5%	5,76	5,76	157,3	144,0
10%	5,64	5,65	139,6	133,2
15%	5,54	5,52	128,3	122,9
20%	5,40	5,39	124,0	111,4
25%	5,28	5,26	110,6	106,5

Os valores de resistência à compressão também diminuíram com o aumento do teor de ferrite (Fig. 3). A principal razão para isso é a não compensação de resina nas misturas, indicando que, com o aumento da quantidade de ferrite no corpo do ímã híbrido, diminui-se a quantidade de pó MQEP e conseqüentemente de resina, enfraquecendo a estrutura do ímã. Além disso, observa-se que os ímãs curados ao

ar apresentaram maior resistência à compressão, evidenciando que a resina adquire maior resistência se curada ao ar.

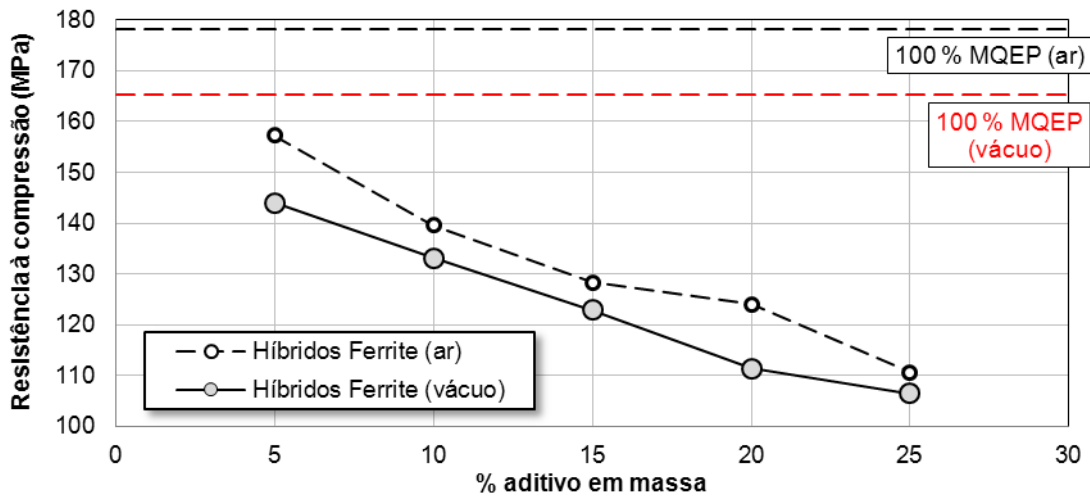


Figura 3. Variação da resistência à compressão em função da porcentagem de aditivo em massa dos ímãs híbridos curados a 200°C ao ar e sob vácuo em comparação com os valores obtidos para os ímãs 100% MQEP curados nas mesmas condições.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de J_r , H_{ci} e $BH_{máx}$ dos ímãs híbridos em função do teor de aditivo e da atmosfera de cura. Verifica-se que para as mesmas condições de cura (atmosfera), J_r , H_{ci} e $BH_{máx}$ diminuem com o aumento do teor de ferrite nas misturas, como já observado em trabalhos anteriores ^(6,8). Para todas as porcentagens de adições de ferrite, os valores de H_{ci} das amostras curadas ao ar foram superiores aos das amostras curadas sob vácuo. Para J_r o efeito da atmosfera de cura não foi significativo.

Tabela 4. Propriedades magnéticas dos ímãs híbridos curados a 200°C ao ar e sob vácuo.

% de aditivo em massa	J_r (T)		H_{ci} (kA/m)		$BH_{máx}$ (kJ/m ³)	
	ar	vácuo	ar	vácuo	ar	vácuo
5%	0,661	0,670	780,7	776,4	69,0	73,2
10%	0,633	0,642	777,2	771,4	63,6	65,4
15%	0,598	0,609	770,9	765,9	56,1	58,4
20%	0,565	0,574	760,6	759,2	49,4	51,1
25%	0,542	0,530	750,9	745,6	45,1	43,8

Com exceção dos ímãs com 25% de ferrite, os ímãs híbridos curados sob vácuo apresentaram uma sutil melhora em $BH_{máx}$ em comparação com os ímãs

curados ao ar (Fig. 4). Observa-se também que o híbrido com 5% de ferrite curado sob vácuo, possui $BH_{\text{máx}}$ 6% superior em relação ao mesmo híbrido curado ao ar, e 4% inferior em relação ao ímã 100% MQEP curado ao ar.

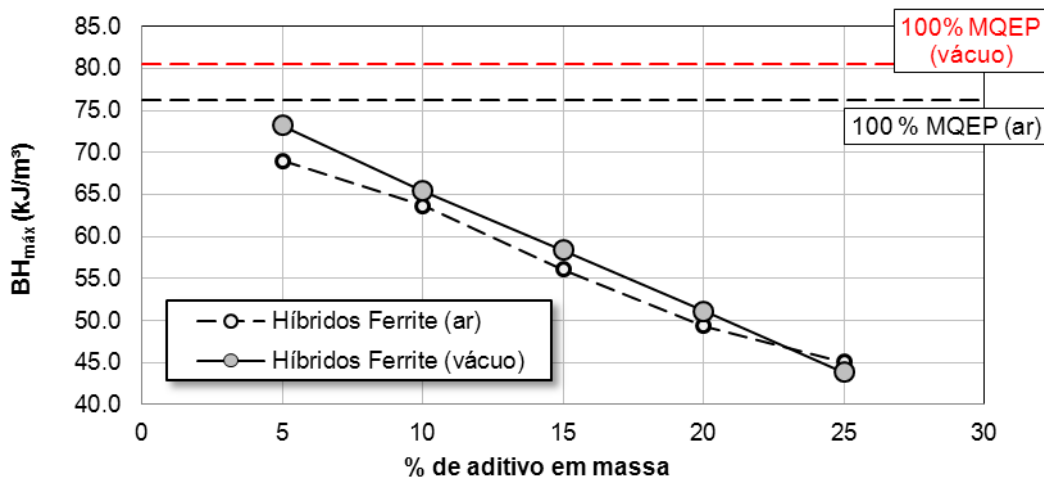


Figura 4. Variação do $BH_{\text{máx}}$ em função da porcentagem de aditivo em massa dos ímãs híbridos curados a 200°C ao ar e sob vácuo em comparação com os valores obtidos para os ímãs 100% MQEP curados nas mesmas condições.

CONCLUSÕES

Os ímãs curados ao ar apresentaram maior resistência à compressão devido ao melhor desempenho da resina quando curada nessa condição. Entretanto as propriedades magnéticas dos ímãs curados sob vácuo foram superiores.

Os ímãs curados em vácuo apresentaram melhores propriedades magnéticas, provavelmente devido à redução da oxidação das partículas magnéticas durante a cura.

Observando a possibilidade de redução nos custos de fabricação de ímãs aglomerados puramente de NdFeB, ainda que apresentem propriedades magnéticas inferiores, a preparação de ímãs híbridos de NdFeB com ferrite é uma boa alternativa pois possibilita a obtenção de uma gama de ímãs com propriedades magnéticas intermediárias entre ímãs puramente de NdFeB e ímãs sinterizados de ferrite, adequadas para diversas aplicações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPESP, ao IPT/SP e ao IPEN-CNEN/SP pelo apoio financeiro e pela infraestrutura disponibilizada para esta investigação.

REFERÊNCIAS

1. ORMEROD, J.; CONSTANTINIDES, S. Bonded permanent magnets: Current status and future opportunities (invited). *Journal of Applied Physics*, v. 81, n. 8, p. 4816-4820, 1997.
2. CROAT, J.J. Current status and future outlook for bonded neodymium permanent magnets (invited). *Journal of Applied Physics*, v. 81, n. 8, p. 4804-4809, 1997.
3. PFEIFFER, J.; EBELING, R.; EVRENS, W. Plastic-bonded permanent magnets. *Advanced Ceramics, pmi*, v. 24, n. 3, p.180-185, 1992.
4. HOPSTOCK, D.M. Current status of thermoplastic and elastomer bonded neodymium-iron-boron magnets. In: 9th INTERNATIONAL WORKSHOP ON RARE-EARTH MAGNETS AND THEIR APPLICATIONS, p. 667-674, august 31 - september 2, 1987, Bad Soden, FRG.
5. SILVA, B.F.A.; JANASI, S.R.; SANTOS, P.B.; RODRIGUES, D.; TAKIISHI, H. Use of strontium ferrite powders in the production of hybrid rare-earth bonded magnets. In: EIGHT INTERNATIONAL LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON POWDER TECHNOLOGY, novembro 6-9, 2011, Florianópolis, SC, Brasil. Submetido para publicação.
6. WANG, X.F.; LEE D.; JIANG, Z.L. Magnetic properties of hybrid polymer bonded Nd-Fe-B/ferrite magnets. *Journal of Applied Physics*, v. 99, n. 08B513, p. 1-3, 2006.
7. SUGIMOTO, S. Current status and recent topics of rare-earth permanent magnets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 44, n. 064001, p. 1-11, 2011.
8. RODRIGUES, D.; SILVA, B. F. A.; JANASI, S. R.; de CAMPOS, M. F. Rare-earth bonded hybrid magnets produced with the addition of strontium ferrite powders, In: *Proceedings of the EURO PM Congress & Exhibition*, Basiléia, Suíça, 2012.

EFFECT OF CURING CONDITIONS ON MECHANICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF NdFeB HYBRID BONDED MAGNETS

ABSTRACT

This paper discusses the influence of temperature and atmosphere curing in the magnetic properties and the compression strength of bonded hybrid magnets produced from the mixture of NdFeB powder ready to use (Magnequench MQEP - obtained by melt spinning) and strontium ferrite powder. The samples were produced with different amounts of ferrite powder and pressed uniaxially. The hybrid magnets obtained were subjected to curing treatments at different temperatures and atmospheres (air and in vacuum). Correlations between curing treatments, compression strength and magnetic properties were based on results obtained by hysteresigraphy and compression tests. Magnets cured under vacuum had compressive strengths less than the magnet cured under air, however, the magnetic properties of magnets cured under vacuum were superior.

Key-words: hybrid magnets, NdFeB, strontium ferrite, bonded