

# Desenvolvimento de ímãs quatro polos para sensor de velocidade de motocicletas

Development of four-pole magnets for motorcycle speed sensor

**Moisés de Mattos Dias<sup>1</sup>**

Universidade Feevale  
moisesdias@feevale.br

**Philippe Pauletti<sup>2</sup>**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
philippe.pauletti@ufrgs.br

**Ricardo Martins de Martins<sup>1</sup>**

Universidade Feevale  
ricardomartins@feevale.br

**Patrice Monteiro de Aquim<sup>1</sup>**

Universidade Feevale  
patrice@feevale.br

**Sérgio Deitos Bittencourt<sup>3</sup>**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
sergio.bittencourt@ufrgs.br

**Lírio Schaeffer<sup>4</sup>**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
schaefer@ufrgs.br

**José Lesina Cezar<sup>5</sup>**

Universidade Luterana do Brasil  
engmecanica.canoas@ulbra.br

**José Carlos Krause de Verney<sup>5</sup>**

Universidade Luterana do Brasil  
jcverney@ulbra.br

<sup>1</sup> Universidade Feevale, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Campus II. ERS 239, 2755, 93525-075, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Tecnologia. Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR). Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>5</sup> Universidade Luterana do Brasil. Rua Farroupilha, 8001, 92420-280, Canoas, RS, Brasil.

**Resumo.** Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de ímãs na forma de anel, quatro polos, para sensor de velocidade de motocicletas, a partir de ferrita de bário e estrôncio. O modelo dos ímãs desenvolvidos foi baseado em ímãs já fabricados para esse fim. Foram testadas diversas matérias-primas com variação de aditivos. As amostras foram confeccionadas e medidas, e os dados foram comparados a ímãs produzidos comercialmente. Finalmente, os ímãs foram montados nos sensores de velocidade e realizados testes de campo. Os ímãs desenvolvidos apresentaram excelentes resultados, tendo como o maior magnetismo remanente 500 Gauss para a liga ferrita de bário PFL com 4% de ácido esteárico e 1 ou 2% de sílica, ficando 20% acima do magnetismo solicitado.

**Palavras-chave:** ímãs de ferrita, metalurgia do pó, sensor de velocidade.

**Abstract.** The aim of this work was the development of magnets in a ring form, four poles, for speed sensor of motorcycles, from barium and strontium ferrites. The model of the magnets developed was based on magnets already manufactured for this purpose. Thus, several raw materials were tested with additive variation. The samples were prepared and measured, and the data were compared to commercially produced magnets. Finally, the magnets were mounted in the speed sensors and field tests were carried out. The magnets developed showed excellent results as having the highest remanent magnetism of 500 Gauss for the PFL barium ferrite alloy with 4% of stearic acid and 1 or 2% of silica, resulting 20% above the required magnetism.

**Keywords:** ferrite magnets, powder metallurgy, speed sensor.

## Introdução

Os materiais óxidos magnéticos, com destaque para as ferritas de estrutura hexagonal, contribuem, efetivamente, para o avanço tecnológico nos dias atuais, haja vista o grande número de aplicações desses materiais. Os primeiros estudos, porém, datam de 1925, com a descrição da magnetoplumbita, cuja estrutura só foi descrita em 1938, com a seguinte composição  $\text{PbFe}_{7,5}\text{Mn}_{3,5}\text{Al}_{0,5}\text{Ti}_{0,5}\text{O}_{19}$  (Pullar, 2012). Uma rápida pesquisa no portal *Web of Science* com o uso do termo “hexaferrite” retorna com 2.341 resultados, considerando-se os anos de 1945 a 2015, e 563 artigos, analisando-se somente o triênio 2013-2015, refletindo o grande interesse que a comunidade científica tem dado ao tema.

As ferritas hexagonais do tipo M,  $\text{MO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$  (M=Sr, Ba ou Pb) apresentam uma estrutura cristalina complexa, conduzindo a uma pronunciada anisotropia magnetocristalina, coercitividade e uma igualmente complexa estrutura magnética interna. A combinação dessas propriedades em conjunto à alta magnetização de saturação e à alta temperatura de transição de ordem ferromagnética (em torno de 450°C) torna as hexaferritas atrativas para várias aplicações, tais como armazenamento de dados em materiais, operação de componentes eletrônicos em frequência de micro-ondas, ímãs permanentes, entre outras (Kostishyn *et al.*, 2015).

Especificamente, no que concerne aos ímãs anisotrópicos de hexaferrita (compactados

com campo magnético), estes atingem valores mais elevados de propriedades magnéticas do que os isotrópicos, principalmente a retentividade. Devido ao seu baixo custo, os ímãs anisotrópicos são utilizados em elementos de circuitos magnéticos e instrumentos, motores e geradores elétricos, alarmes e microfones. Atualmente, as hexaferritas são os ímãs permanentes mais produzidos no mundo (Stabik *et al.*, 2011; Braga, 2014).

Para determinados propósitos, há a exigência, por parte do mercado, de ímãs de ferrita com melhores propriedades magnéticas de retentividade e coercitividade. Assim, busca-se diminuir as dimensões e a massa de motores elétricos usados em automóveis, como, por exemplo, limpador de para-brisa, bem como aumentar a eficiência de motores elétricos utilizados em aparelhos elétricos, como em condicionadores de ar (Ogata *et al.*, 1999; Stabik *et al.*, 2011).

## Obtenção de ímãs de ferrita

As ferritas duras, também conhecidas por ferroxdure, possuem composição química  $\text{MO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , como visto anteriormente, para a qual M representa bário, estrôncio, ou uma combinação de ambos. Alguns aditivos, como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{BiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , são benéficos para aumentar a coercitividade, também possibilitando a diminuição da temperatura de sinterização. Os lubrificantes utilizados são, geralmente, à base de estearatos (Cullity, 1967; Slick, 1980; Jiles, 1991; Dias *et al.*, 2007).

Uma típica ferrita dura é obtida pela mistura de SrO ou carbonatos (ferrita de estrôncio), ou BaO (ferrita de bário), com  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . A mistura é calcinada em temperatura acima de  $1.095^\circ\text{C}$ , para formar os compostos óxidos complexos. Posteriormente, é realizada a moagem a úmido para partículas finas em torno de alguns micrometros. Dependendo do fabricante, os pós de ferrita são fornecidos como pó bruto, ou já com os aditivos, que variam em composição e percentual, conforme o próprio fabricante (Cullity, 1967; Slick, 1980; Jiles, 1991; Dias *et al.*, 2007).

A pressão de compactação varia de 150 a 200 MPa, e a sinterização é realizada na faixa de  $1.100$  e  $1.300^\circ\text{C}$ . Na sinterização, a peça contrai linearmente entre 10 e 20%, e esta contração depende, principalmente, da pressão de compactação. Salienta-se que, quanto maior a pressão de compactação, menor será a contração na sinterização, e vice-versa (Cullity, 1967; Slick, 1980; Jiles, 1991; Dias *et al.*, 2007).

As variações de temperatura, pressão e contração são extensas, devido à enorme diversidade de tipos de pós de ferrita disponibilizada por fornecedores. A presença de impurezas, tamanho de grão, tamanho médio das partículas do pó e a composição e percentual dos aditivos resultam em diversos valores de pressão e temperatura para as ferritas. Cita-se, por exemplo, que a fabricação de uma peça de bom acabamento superficial deve ter a adição de ácido esteárico, porém, este reduz o magnetismo remanente superficial, alterando também os parâmetros anteriormente citados de pressão e temperatura (Cullity, 1967; Slick, 1980; Jiles, 1991; Dias *et al.*, 2007).

A origem da alta força coercitiva de todas as ferritas duras é em razão de sua alta anisotropia magnetocristalina. A magnetização deve ser realizada na mesma direção da compactação, o que resulta em ímãs com maior magnetismo remanente. A sinterização deve ser executada de forma a serem obtidas peças magnéticas com a maior densidade possível. Assim, são alcançados valores maiores de retentividade, com um pequeno crescimento de grão, sendo que o tamanho deste é inversamente proporcional à coercitividade (Ogata *et al.*, 1999; Kwon e Bae, 2003; Stabik *et al.*, 2011).

A última etapa na produção de ferritas é a magnetização, a qual confere o magnetismo remanente aos ímãs. Nessa etapa, os ímãs a serem magnetizados são colocados em circuitos magnéticos compostos por núcleos de ferro e bobinas. A corrente elétrica que circu-

la nas bobinas é elevada, podendo atingir até milhares de ampères. Essa corrente elevada é fornecida por fontes de tensão contínua, sendo a descarga capacitiva a mais conhecida (Dias *et al.*, 2014).

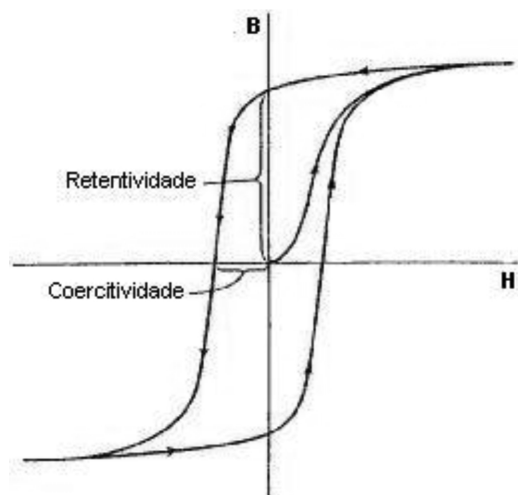
### Propriedades magnéticas

As propriedades magnéticas de retentividade e coercitividade são a base para a análise de materiais magnéticos, como os ímãs permanentes de ferrita, e são obtidas a partir da curva de histerese. Essa curva relaciona campo magnético  $\mathbf{H}$  aplicado a um material com indução magnética  $\mathbf{B}$  resultante. Para os materiais magnéticos duros ou ímãs permanentes, a relação  $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$  tem as características mostradas na Figura 1 (Kraus e Carver, 1978; Jiles, 1991; Dias *et al.*, 2007).

O ponto em que a curva intercepta o eixo  $\mathbf{B}$ , no quadrante superior esquerdo, é denominado de magnetismo remanente, ou retentividade  $\mathbf{B}_r$ , e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ( $\mathbf{H} = 0$ ). No sistema CGS de unidades (mais utilizado para caracterização de materiais magnéticos),  $\mathbf{B}$  é dado em Gauss [ $\mathbf{G}$ ]. Por sua vez, o ponto em que a curva corta o eixo de  $\mathbf{H}$  no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva, ou coercitividade  $\mathbf{H}_c$ , e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ( $\mathbf{B} = 0$ ). No sistema CGS,  $\mathbf{H}$  tem como unidade o Oersted [ $\mathbf{Oe}$ ]. Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético  $\mathbf{BH}_{\max}$ , cuja unidade no sistema CGS é Mega Gauss Oersted [ $\mathbf{MG.Oe}$ ] e está associado à densidade de energia armazenada em um material magnético (Kraus e Carver, 1978; Jiles, 1991; Dias *et al.*, 2007).

### Metalurgia do pó

Entre as tecnologias de fabricação mais utilizadas na obtenção de materiais magnéticos através de processos metalúrgicos, cita-se a fundição e um ramo mais recente da metalurgia de transformação, denominada Metalurgia do Pó (M/P). Deve-se salientar que uma ampla gama de materiais (metálicos, não metálicos e cerâmicos) pode ser processada, utilizando-se a tecnologia da M/P. No que tange aos materiais magnéticos, referidos anteriormente, tal técnica é empregada, haja vista que se consegue a orientação magnética das partículas que constituem o material trabalhado. Assim, é possível obter



**Figura 1.** Ciclo de histerese para um material magnético.

**Figure 1.** Hysteresis loop for a magnetic material.

propriedades magnéticas de retentividade muito superiores àquelas cuja origem é atribuída a processos metalúrgicos convencionais como a fundição. Acrescenta-se a isso que pós de diferentes naturezas químicas apresentam fácil obtenção, bastando que os mesmos sejam misturados homogeneamente (German, 1984; Bradbury, 1986; Chiaverini, 1992).

Os quatro processos básicos da M/P são: obtenção dos pós, mistura, compactação e sinterização. Às vezes, é necessária uma quinta etapa, como a retificação. Na M/P, os pós, depois de serem misturados, sofrem o processo de compactação. Neste, os mesmos, por intermédio de punções e aplicação de pressão, são compactados no interior de matrizes onde adquirem, normalmente, a forma e dimensões das peças finais. Especificamente, no que concerne ao processo de compactação de ímãs anisotrópicos, este ocorre sob a ação de um forte campo magnético gerado a partir de bobinas acopladas à matriz. Esse processo é necessário para orientação das partículas do pó antes da consolidação. Ímãs compactados sem campo (compactação convencional) são denominados de ímãs isotrópicos. A magnitude desse campo magnético aplicado pode atingir até milhões de A/m e, por esse motivo, são necessárias fontes de tensão elétrica capazes de fornecer corrente elétrica elevada (Niada *et al.*, 2015). Na sequência, são colocados em fornos especiais para a etapa de sinterização – em temperaturas que variam entre 70% e 80% da temperatura de fusão do metal ou da liga

considerada, sob condições controladas de ambiente, tempo e, naturalmente, temperatura – onde adquirem consistência e resistência mecânica, entre outras propriedades (German, 1984; Bradbury, 1986; Chiaverini, 1992).

A Figura 2a mostra o desenho esquemático, e a Figura 2b, a fotografia de uma matriz de duplo efeito, utilizada para compactação de pós metálicos e cerâmicos.

### **Sensor de velocidade**

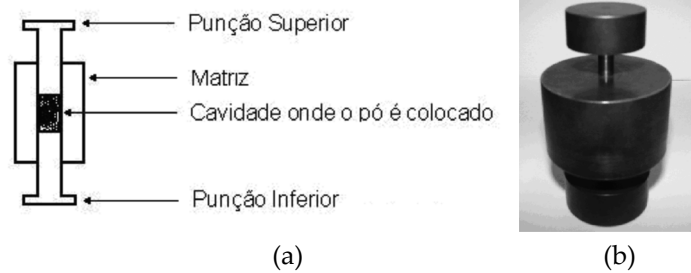
Um sensor de velocidade com as características exigidas neste trabalho é construído com ímãs toroidais multipolares acoplados às engrenagens do veículo. Desta forma, o anel gira de acordo com a velocidade de giro do motor ou velocidade do referido veículo. Um sensor de efeito Hall linear é colocado na periferia do ímã – um sensor Hall gera uma tensão elétrica proporcional à indução magnética que o atravessa. À medida que o anel multipolar gira próximo ao sensor Hall, a indução originada de cada polo faz com que seja produzida uma tensão elétrica em seus terminais, isto é, uma tensão elétrica positiva para um polo norte e uma tensão negativa para um polo sul. Assim, o sensor Hall gera uma onda retangular, com frequência proporcional à velocidade de giro do anel multipolar, conforme pode ser visualizado a partir do digrama esquemático da Figura 3. Salienta-se que o esquema da citada figura ilustra um sensor de velocidade com ímãs magnetizados radialmente (Sinova *et al.*, 2015).

### **Objetivos deste trabalho**

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de ímãs de ferrita de bário e estrôncio na forma de anel, quatro polos, para sensor de velocidade de motocicletas. As principais etapas na realização deste trabalho foram:

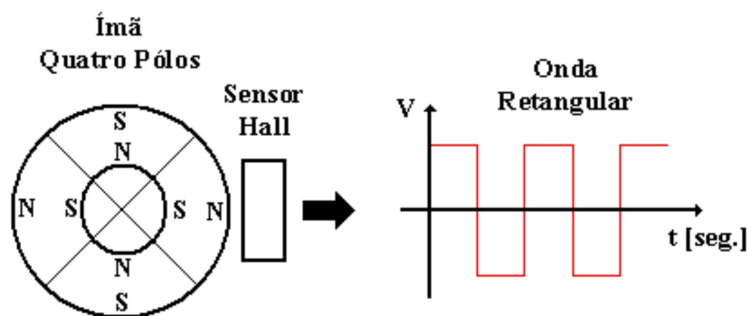
- desenvolvimento de ligas a partir de ferrita de bário e estrôncio; e
- projeto e construção de um magnetizador para anéis de quatro polos.

O desenvolvimento ocorreu em parceria com uma empresa fabricante do sensor, empresas fabricantes de ímãs permanentes e empresas atuantes na área de Metalurgia do Pó. O modelo dos ímãs desenvolvidos foi baseado em ímãs já fabricados para esse fim, e as dimensões foram determinadas pela empresa



**Figura 2.** Matriz de duplo efeito utilizada para compactação de materiais magnéticos: (a) desenho esquemático, (b) fotografia.

**Figure 2.** Double effect matrix used for compaction of magnetic materials: (a) schematic drawing, (b) photograph.



**Figura 3.** Diagrama esquemático do sensor de velocidade.

**Figure 3.** Schematic diagram of the speed sensor.

fabricante do sensor. Foram testadas diversas matérias-primas, bem como variação de aditivos. Na sequência, foram confeccionadas as amostras e realizada a medição do magnetismo remanente superficial destas. Finalmente, os dados foram comparados aos ímãs existentes no mercado.

## Materiais e métodos

### Condições do experimento

O desenvolvimento proposto neste trabalho foi realizado considerando-se uma futura produção industrial em alta escala desse tipo de ímã. Por esse motivo, os testes para compactação ocorreram em prensas excêntricas. Uma vez que já se conheciam as características básicas da matéria-prima e aditivos, pressão e temperatura de sinterização a serem utilizadas, iniciou-se o desenvolvimento da matriz, tendo sido testadas composições das ligas e aditivos. Assim, a regulação da pressão de compactação ocorreu a partir da variação da altura da cavidade de enchimento de pó na

matriz, antes e após a compactação, por medições indiretas e comparativas, realizadas em corpos de prova compactados em prensas controladas e sensorizadas.

Testes preliminares e dados bibliográficos definem como pressão de compactação das ferritas um valor entre 150 a 200 MPa. Dependendo do tipo de ferrita e dos aditivos utilizados, essa pressão pode causar uma redução de 1/3 no volume, aproximadamente (Dias *et al.*, 1999).

Devido à natureza de óxido das ferritas, a sinterização foi realizada em um forno resistivo, com atmosfera ambiente, sem a necessidade, portanto, da utilização de gases inertes ou atmosfera controlada. De acordo com testes preliminares e dados bibliográficos, a temperatura de sinterização foi definida entre 1.100 a 1.250°C, permanecendo assim por 2 horas, com uma taxa de aquecimento entre 2 a 5°C/min. Com essa baixa taxa de aquecimento, não é necessário patamar intermediário de temperatura para retirada dos aditivos como o lubrificante e o ligante. Conforme o tipo de ferrita e dos aditivos utilizados, a contração volumétrica variou de 10 a 12% (Kwon e Bae, 2003; Stabik *et al.*, 2011).

## Matéria-prima

Para confecção dos espécimes, foram utilizados 5 tipos de pós, relacionados na Tabela 1, com suas respectivas propriedades magnéticas.

É importante salientar que os dados relacionados na Tabela 1 são dados dos fabricantes. Embora os catálogos não sejam claros, deduz-se que alguns pós são utilizados para compactações isotrópicas e outras, anisotrópicas (maior **Br**).

Os aditivos utilizados compreendiam as seguintes substâncias, para as quais foi designada uma sigla, para melhor identificação das ligas testadas:

- estearato de zinco (lubrificante) - [lub];
- ácido esteárico (ligante) - [Ac];
- sílica (densificador) - [Sil].

O pó era preparado da seguinte maneira:

- O óxido de silício (sílica) era obtido na forma de pequenas pelotas e era moído em um moinho atritor de alta velocidade, até tornar-se um pó semelhante a um talco.
- A ferrita, o ácido esteárico e a sílica eram misturados nas devidas proporções, em um misturador convencional, por 30 minutos, e, na sequência, colocados em um forno a uma temperatura aproximada de 180°C por 20 min. Nessa temperatura, o ácido esteárico funde, ocasionando uma aglomeração das partículas de pó da ferrita. O uso do ácido esteárico melhora significativamente o acabamento superficial e reduz a temperatura de sinterização.
- Subsequente à etapa de resfriamento da ferrita, o lubrificante à base de estearato de zinco era adicionado à ferrita, e esta era novamente colocada no misturador convencional por mais 30 minutos.

Visualmente, após a concretização das etapas relacionadas anteriormente, percebia-se

que o pó puro passava de um aspecto semelhante a um talco para o de areia fina, ou seja, tamanhos de partículas de pó maiores e de fácil fluidez.

## Desenvolvimento dos ímãs

A partir das dimensões e das propriedades magnéticas dos ímãs solicitados pela empresa fabricante do sensor, e considerando-se a redução de altura na compactação e contração na sinterização, a matriz foi dimensionada. Esta foi usinada em aço ferramenta D6, temperada, revenida e retificada. Devido às disparidades nas dimensões da peça sinterizada (acabada) e da peça verde (somente compactada, não sinterizada), existe uma diferença de aproximadamente 10% entre o diâmetro da peça sinterizada e o diâmetro da cavidade e punções da matriz.

A Tabela 2 mostra as características que deve apresentar o ímã desenvolvido, tendo como base os dados solicitados pelo fabricante do sensor:

- **sinterizado**: dimensões finais do ímã solicitado;
- **compactado**: dimensões do ímã não sinterizado e, consequentemente, dimensões da matriz, considerando-se uma contração linear e perda de massa de 10 % na sinterização;
- **m**: massa dada em gramas;
- **h**, **d<sub>int</sub>** e **d<sub>ext</sub>**: altura, diâmetro interno e externo, respectivamente, dados em milímetros;
- **M**: magnetismo remanente superficial medido na lateral no anel, sobre qualquer polo.

A matriz foi desenvolvida para ser utilizada em uma prensa excêntrica, tendo, por esse motivo, uma geometria específica para encaixe da cavidade e punções. A Figura 4 mostra a fotografia da vista lateral da matriz na qual são

**Tabela 1.** Relação dos pós e suas propriedades magnéticas.

**Table 1.** Powders and their properties.

Nome	Tipo	Br [Gauss]	Hc (Hci) [Oersted]
Pulverox PLF	Ferrita de Ba	1.450	2.800
Pulverox PO2	Ferrita de Ba	1.380	2.350
Pulverox PO7	Ferrita de Sr	3.950	3.300
H 100	Ferrita de Sr	2.000	4.100
HM 239	Ferrita de Sr	4.000	3.200

**Tabela 2.** Características do ímã solicitado.**Table 2.** Characteristics of the requested magnet.

Modelo	Sinterizado				Compactado				M [Gauss]
	m [g]	h [mm]	d <sub>int</sub> [mm]	d <sub>ext</sub> [mm]	m [g]	h [mm]	d <sub>int</sub> [mm]	d <sub>ext</sub> [mm]	
ímã toroidal	2,5	6,0	6,5	14,5	2,8	6,7	7,2	16,1	400

**Figura 4.** Fotografia da vista lateral da matriz para anel multipolar.**Figure 4.** Side view photograph of the matrix for a multipolar ring.

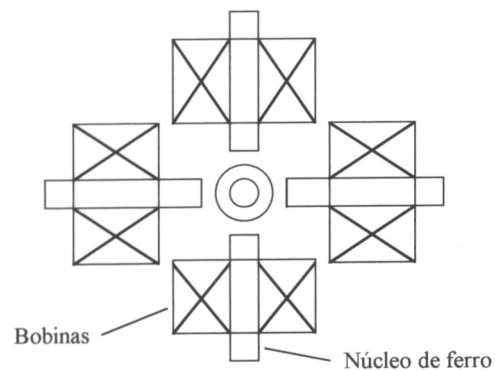
observados, da direita para esquerda, o punção inferior, a cavidade, o punção superior e o pino macho.

A matriz possui pequenas saliências nas bordas externas e internas dos punções, que causarão nos anéis pequenos chanfros nas extremidades. Essa característica acrescenta uma maior resistência mecânica à fratura nas extremidades dos anéis.

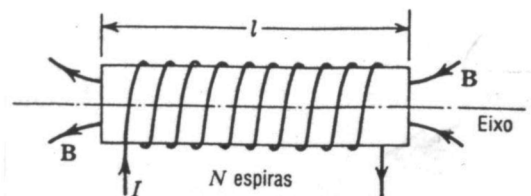
### Desenvolvimento do magnetizador

A Figura 5a mostra um dispositivo para magnetização radial de ímãs toroidais com 4 polos. O sentido das linhas de campo alterna-se em cada bobina para produzir polos norte e sul. As bobinas são alimentadas com corrente contínua, sendo que duas bobinas são alimentadas com corrente em um sentido, para produzir polos norte, e as outras duas, alimentadas com corrente em outro sentido, gerando polos sul (Sinova, 2015). Por sua vez, a Figura 5b mostra a polarização e a direção das linhas de fluxo em cada bobina em função do sentido da corrente elétrica nas espiras.

Já a Figura 6 mostra o magnetizador 4 polos desenvolvido, na qual podem ser observados diodos retificadores e um contator para controlar a corrente nas bobinas.



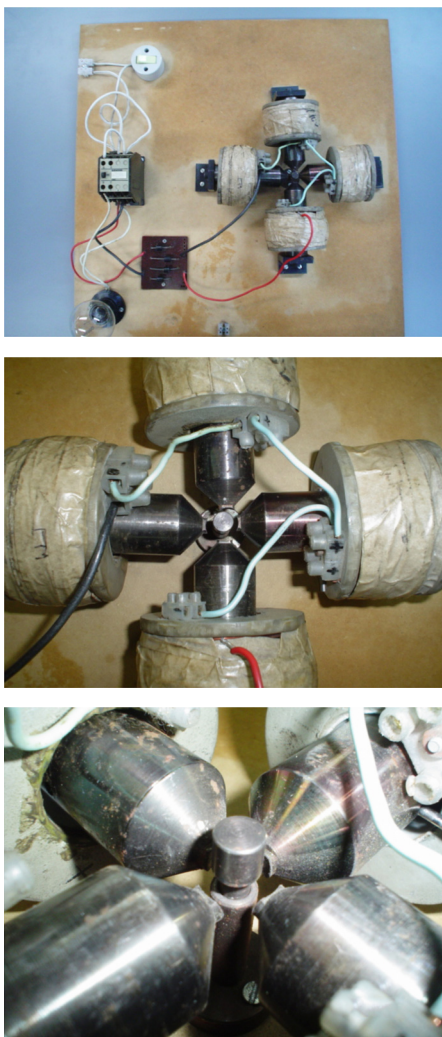
(a)



(b)

**Figura 5.** (a) Esquema do magnetizador multipolar radial, (b) direção das linhas de fluxo magnético em cada bobina.**Figure 5.** (a) Scheme of the radial multipolar magnetizer, (b) direction of the magnetic flux lines in each coil.





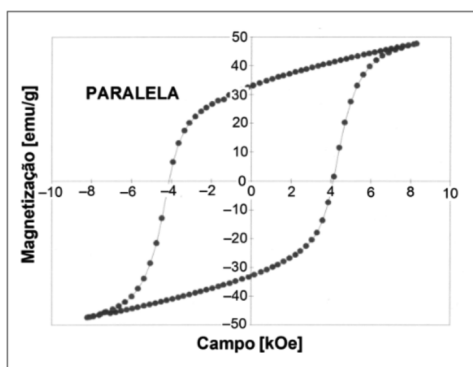
**Figura 6.** Magnetizador desenvolvido.  
**Figure 6.** Developed magnetizer.

Para a magnetização dos ímãs, considera-se um campo de aproximadamente duas vezes o campo desmagnetizante (coercitividade  $H_C$ ). Nessa condição de campo magnético igual a  $2 \times H_C$ , garante-se um campo capaz de magnetizar o ímã até valores próximos à saturação. A medição e o ajuste do campo magnético no entreferro do magnetizador são realizados a partir de um gaussímetro, inserindo-se o sensor deste no entreferro do magnetizador e ajustando-se a corrente elétrica que alimenta as bobinas até ser gerado o campo magnético necessário para a magnetização dos ímãs. Na sequência, retira-se o sensor e coloca-se o ímã, ajustando a mesma corrente medida previamente (Jiles, 1991; Sinova, 2015).

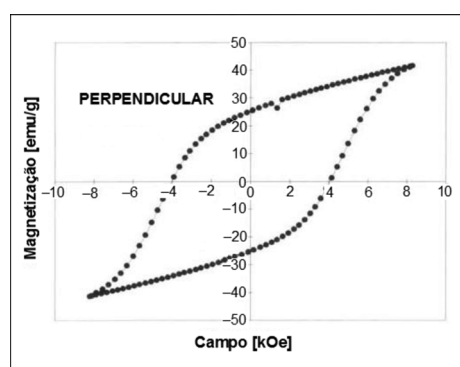
A leitura do magnetismo remanente tangencial dos ímãs foi realizada com o mesmo gaussímetro citado no parágrafo anterior. É importante salientar que esse dispositivo, construído a partir de sensor de efeito Hall linear, é capaz de medir campo magnético e indução magnética no sistema GCS de unidades. Nesse sistema de unidades, a relação entre campo e indução no vácuo ou ar é unitária, ou seja  $\mu_0 = 1$  (Jiles, 1991; Sinova, 2015).

## Resultados e discussão

A Figura 7a apresenta uma das curvas de histerese para os corpos de prova da amostra H 100, obtida com magnetização paralela à direção de compactação. Já Figura 7b mostra uma das curvas de histerese da mesma amostra, porém, com magnetização perpendicular.



(a)



(b)

**Figura 7.** Curvas de histerese com magnetização paralela (a) e com magnetização perpendicular (b) dos ímãs de ferrita de estrôncio para o pó H 100.

**Figure 7.** Hysteresis loop with parallel magnetization (a) and perpendicular magnetization concerning the strontium ferrite magnets for H 100 powder.



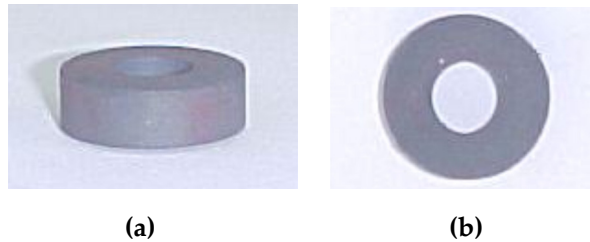
Considerando-se a magnetização paralela, a qual forneceu melhores resultados, constatou-se uma coercitividade de aproximadamente 4,1 kOe (326 kA/m). A retentividade foi de aproximadamente 1,95 kG (0,195 T) e foi calculada através da equação 1 (Cullity, 1967):

$$B_r = 4\pi \frac{emu}{g} \rho \quad (1)$$

na qual  $\rho$  é a densidade dos corpos de prova.

Por sua vez, as Figuras 8a e 8b mostram as fotografias da vista lateral e superior, respectivamente, do anel confeccionado.

A Tabela 3 mostra as características medidas considerando cada tipo de liga, para os ímãs na forma de anel multipolar.



**Figura 8.** Fotografias do anel multipolar.  
**Figure 8.** Multipolar ring photographs.

**Tabela 3.** Características medidas dos ímãs na forma de anel multipolar.  
**Table 3.** Characteristics related to the multipolar magnets ring shape.

Liga	Compactado				Sinterizado				Contração (%)				M [G]
	m gr	h mm	d <sub>int</sub> mm	d <sub>ext</sub> mm	m gr	h mm	d <sub>int</sub> mm	d <sub>ext</sub> mm	m	h	d <sub>int</sub>	d <sub>ext</sub>	
PFL 1% Sil + 8% Ac.	2,47	5,50	7,25	16,1	2,27	5,00	6,70	15,5	8,81	10,0	8,21	5,92	450
PFL 2% Sil + 8% Ac.	2,43	5,37	7,25	16,1	2,23	4,97	6,67	15,2	8,97	8,05	8,70	5,92	450
PFL 1% Sil + 4% Ac.	2,30	5,13	7,75	16,1	2,10	4,90	6,70	15,2	9,52	4,69	8,21	5,92	500
PFL 2% Sil + 4% Ac.	2,27	5,13	7,25	16,1	2,17	4,77	6,70	15,2	4,61	7,55	8,21	5,71	500
PO2 1% Sil + 8% Ac.	2,93	6,07	7,25	16,1	2,70	5,47	6,83	15,6	8,52	10,9	6,15	3,20	400
PO2 2% Sil + 8% Ac.	3,00	6,13	7,25	16,1	2,73	5,73	6,80	15,5	9,89	6,98	6,62	4,07	400
PO2 1% Sil + 4% Ac.	2,83	5,57	7,25	16,1	2,60	5,30	6,80	15,5	8,85	5,09	6,62	4,08	450
PO2 2% Sil + 4% Ac.	2,70	5,53	7,25	16,1	2,50	5,10	6,83	15,5	8,00	8,43	5,86	4,07	450
pO7 1% Sil + 8% Ac.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pO7 2% Sil + 8% Ac.	2,83	6,00	7,25	16,1	2,57	5,63	6,87	15,7	10,1	6,57	5,53	2,35	350
pO7 1% Sil + 4% Ac.	2,63	5,50	7,25	16,1	2,50	5,23	7,00	15,9	5,20	5,16	3,57	1,26	400
pO7 2% Sil + 4% Ac.	2,50	5,30	7,25	16,1	2,40	5,20	6,87	15,7	4,17	1,92	5,53	2,35	400
HM 239 1% Sil + 8% Ac.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HM 239 2% Sil + 8% Ac.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H 100	2,90	6,13	7,25	16,1	2,81	5,39	6,34	14,3	3,00	12,0	12,5	11,5	550

Notas: (1) O percentual de lubrificante foi de 1% para todas as ligas. (2) O material H100 é uma ferrita já preparada com todos os aditivos (conforme dados do produto). (3) As ligas onde não constam valores foram desconsideradas em alguma parte da confecção dos ímãs, devido a problemas diversos.

## Conclusões

Os dados relevantes a serem considerados para as análises dos resultados e as conclusões estão, em ordem de importância, relacionadas a seguir:

- (a) dimensões;
- (b) rachaduras ou fraturas;
- (c) magnetismo remanente superficial;
- (d) acabamento superficial.

Uma vez que esses ímãs são usados em um dispositivo giratório, as dimensões tornam-se o fator crítico, seguido de rachaduras. O magnetismo remanente não é o fator mais importante, visto que o referido parâmetro solicitado para o sensor de velocidade está muito acima da indução de excitação do sensor Hall.

Comparando-se os dados da Tabela 3 (ímãs desenvolvidos) com aqueles da Tabela 1 (ímãs solicitados), foram possíveis as seguintes conclusões:

- as ligas a partir da ferrita de bário PFL com 4% de ácido esteárico mais 1 ou 2% de sílica apresentaram o maior magnetismo remanente (500 Gauss), ficando 20% acima do magnetismo solicitado;
- as ligas com 8% de ácido esteárico mais 1 ou 2% de sílica apresentaram menor magnetismo remanente (450 Gauss), ficando 10% acima do magnetismo solicitado. Entretanto, visualmente, apresentavam melhor acabamento superficial. Essas duas características devem-se ao aumento na quantidade de ácido esteárico na liga;
- a ferrita H239, mesmo com 8% de ligante, apresentou um aspecto muito ruim, e foi descartada.

A empresa fabricante do sensor montou protótipos desses ímãs, tendo sido realizadas medições preliminares e testes de campo, nos quais o ímã desenvolvido foi aprovado plenamente, tanto no aspecto das propriedades magnéticas quanto da óptica das propriedades mecânicas e acabamento.

## Referência

- BRADBURY, S. 1986. *Powder Metallurgy Equipment Manual*. New Jersey, MPIF, 199 p.
- BRAGA, R.G. 2014. *Síntese Hidrotérmica de Nanopartículas de Ferrita de Bário*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 103 p.
- CHIAVERINI, V. 1992. *Metalurgia do Pó*. São Paulo, Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 352 p.
- CULLITY, B.D. 1967. *Introduction to Magnetic Materials*. Adison, Wesley Publishing Company, 514 p.
- DIAS, M.M.; SCHAEFER, L.; DIAS, A.M.; CEZAR, J.C.; VERNEY, J.C.K. 2007. Desenvolvimento de ímãs para palmilhas de calçados. *Revista Tecnologia e Tendências*, 6(2):67-82.
- DIAS, M.M.; SCHAEFER, L.; RODRIGUES, D.; LANDGRAF, F.J.G. 1999. Materiais magnéticos produzidos por metalurgia do pó. *Metalurgia & Materiais*, 55(483):625-625.
- DIAS, M.M.; MARTINS, R.M.; PELEGRINI, L.; LESINA, J.C.; VERNEY, J.C.K.; SCHAEFFER, L. 2014. Estudo e Obtenção de Ímãs de Ferrita de Bário e Estrôncio Isotrópicos e Anisotrópicos. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 9(2):74-80.
- GERMAN, R.M. 1984. *Powder Metallurgy Science*. New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 279 p.
- JILES, D. 1991. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. London, Chapman and Hall, 440 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-3868-4>
- KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. 1978. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro, Guanabara, 780 p.
- KOSTISHYN, V.G.; PANINA, L.V.; KOZHITOV, L.V.; TIMOFEEV, A.V.; KOVALEV, A.N. 2015. Synthesis and multiferroic properties of M-type  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  hexaferrites ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 645(5):297-300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.024>
- KWON, H.W.; BAE, J.W. 2003. Magnetic properties of Sr-ferrite powder prepared by intensive mechanical milling technique. *Journal of Magnetism*, 8(3):118-123. <http://dx.doi.org/10.4283/JMAG.2003.8.3.118>
- NIADA, R.F.; BITTENCOURT, S.D.; MARTINS, R.M.; AQUIM, P.M.; DIAS, M.M.; SCHAEFFER, L. 2015. Desenvolvimento de um motor com ímãs permanentes e núcleo do rotor obtido a partir da metalurgia do pó para aeromodelos. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 27:53-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ctmat.2015.04.005>
- OGATA, Y.; KUBOTA, Y.; TAKAMI, T.; TOKUNAGA, M.; SHINOKARA, T. 1999. Improvements of magnetic properties of Sr ferrite magnets by substitutions of La and Co. *IEEE Transactions on Magnetism*, 35(5):3334-3336. <http://dx.doi.org/10.1109/20.800516>
- PULLAR, R.C. 2012. Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, 52(7):1191-1334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>
- SINOVA, J.; VALENZUELA, S.O.; WUNDERLICH, J.; BACK, C.H.; JUNGWIRTH, T. 2015. Spin Hall Effects. *Reviews of Modern Physics*, 87(4):1213-1260. <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.87.1213>
- SLICK, P.I. 1980. *Ferromagnetic Materials*. Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 239 p.
- STABIK, J.; CHROBAK, A.; HANECZOK, G.; DYBOWASKA, A. 2011. Magnetic properties of polymer matrix composites filled with ferrite powders. *Archives of Materials Science and Engineering*, 48(2):97-102.

Submetido: 21/06/2012

Aceito: 09/10/2015