

Estudo e obtenção de ímãs de ferrita de bário e estrôncio isotrópicos e anisotrópicos

M. M. Dias^{1*}, R. M. Martins¹, L. Pelegrini², J. C. Lesina³, J. C. K. Verney³, L. Schaeffer⁴

¹Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas – ICET, Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais
Universidade FEEVALE, Novo Hamburgo – RS, Brasil

²Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis – GDER, Centro de Tecnologia, UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil

³Departamento de Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica e Mestrado em Engenharia de Materiais
ULBRA – Canoas – RS, Brasil

⁴Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Centro de Tecnologia, UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil

(Recebido em 29/08/2011; revisado em 01/01/2014; aceito em 02/01/2014)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Este trabalho teve por objetivo o estudo de pós para obtenção de ímãs de ferrita de bário e estrôncio. Inicialmente, houve a caracterização quanto à composição química, tamanho e forma de partícula e propriedades magnéticas a partir das curvas de histerese, da liga de ferrita de estrôncio H100. Foram obtidos corpos de prova compactados sem campo magnético (ímãs isotrópicos) e sob a ação de forte campo magnético (anisotrópicos). Pós da liga HM 239 foram submetidos a processos de moagem em moinho de bolas (liga HM 239) e moinho atritor (ligas HM 239 e H100). A análise comparativa se deu a partir da observação do magnetismo remanente na superfície dos corpos de prova, utilizando-se um gaussímetro. Observou-se que as ligas a partir de ferrita de estrôncio, quando compactadas sob campo, tiveram algum acréscimo de magnetismo remanente (HM 239 aumentou 31,7%), enquanto as ferritas de bário mantiveram o magnetismo remanente constante, sendo que, em algumas, houve um decréscimo como a Maniperm 850 S8, com redução de 31,4%.

Palavras-chave: Ferritas de bário e estrôncio; ímãs anisotrópicos; metalurgia do pó.

Abstract:

This work aimed to study some kind of powders in order to obtain barium and strontium ferrite magnets. Initially, the strontium ferrite alloy H 100 was characterized related to chemical composition, size and shape of the particles, as well as their magnetic properties obtained from the hysteresis curves. Specimens were compacted without magnetic field (isotropic magnets) and under the action of a strong magnetic field (anisotropic magnets). Some powders were submitted to milling process in a ball mill (HM 239) and in a attritor mill (HM 239 and H 100). The comparative analysis was carried out from the observation of the residual magnetism on the surface of the specimens, using a gaussmeter. It was observed that the strontium ferrite alloys, when compacted under a magnetic field, presented some additional residual magnetism (31.7% to HM 239) while the barium ferrite kept constant the remanent magnetism, and in some, there was a decrease as Maniperm 850 S8 with a reduction of 31.4%.

Keywords: Barium and strontium ferrites; anisotropic magnets; powder metallurgy.

1. Introdução

As ferritas são materiais cerâmicos, obtidos a partir de pós de óxidos complexos, e sua confecção produz ímãs permanentes com propriedades magnéticas intermediárias de retentividade e coercitividade, se comparadas a todos os ímãs existentes. Os ímãs de ferrita são fabricados a partir de um processo da metalurgia de transformação denominado de Metalurgia do Pó (M/P). Existem basicamente três tipos de ferritas produzidas atualmente: Ferritas Macias, Ferritas Duras (isotrópicas e anisotrópicas) e Ferritas Flexíveis [1-3].

As ferritas duras, também conhecidas por ferroxdure, possuem uma estrutura cristalina hexagonal simples. São representadas pela composição química $MO.6Fe_2O_3$, na qual M

representa os elementos químicos bário, estrôncio ou uma combinação de ambos. Alguns aditivos como SiO_2 , BiO_2 e Al_2O_3 são benéficos para aumentar a coercitividade, também possibilitando a diminuição da temperatura de sinterização. Os lubrificantes, outra classe de aditivos utilizados, são à base de estearatos [1-3].

A pressão de compactação varia de 150 a 200 MPa, e a sinterização é realizada na faixa de 1100 e 1300 °C. Na sinterização, a contração linear da peça varia linearmente entre 7 e 15% e esta contração depende, principalmente, da pressão de compactação.

A origem da alta força coercitiva de todas as ferritas duras é atribuída à sua alta anisotropia magnetocristalina. A magnetização deve ser realizada na mesma direção da compactação, o que resulta ímãs com maior magnetismo

*Email: moisesdias@feevale.br (M. M. Dias)

remanente. A sinterização deve ser executada de forma a serem obtidas peças magnéticas com a maior densidade possível. Assim, são obtidos valores maiores de retentividade, com um pequeno crescimento de grão. O tamanho de grão é inversamente proporcional à coercitividade [1-3].

A última etapa na produção de ferritas é a magnetização, a qual confere o magnetismo remanente aos ímãs. Nesta etapa, os ímãs a serem magnetizados são colocados em circuitos magnéticos compostos por núcleos de ferro e bobinas. A corrente elétrica que circula nas bobinas é elevada, podendo atingir até milhares de ampères. Esta corrente elevada é fornecida por fontes de tensão contínua, sendo a descarga capacitiva a mais conhecida [2,3].

Os ímãs anisotrópicos de ferrita (compactados com campo magnético) atingem valores mais elevados de propriedades magnéticas do que os isotrópicos, principalmente a retentividade. Devido ao seu baixo custo, estes são utilizados em elementos de circuitos magnéticos e instrumentos, motores e geradores elétricos, alarmes e microfones. Atualmente, as ferritas são os ímãs permanentes mais produzidos mundialmente [4].

Para determinadas aplicações, atualmente existe 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 para aumentar a eficiência de motores elétricos utilizados em aparelhos elétricos como, por exemplo, condicionadores de ar [5].

A maioria dos ímãs comercializados na atualidade é obtida a partir de processos da metalurgia do pó (M/P), embora ainda podem ser encontrados ímãs fabricados a partir de processos metalúrgicos convencionais, como a fundição (liga de AlNiCo, por exemplo). A M/P é utilizada, pois, através deste processo, é possível obter a orientação magnética das partículas que constituem o material. Por este motivo, os ímãs obtidos por M/P possuem a retentividade magnética maior, quando comparados a ímãs obtidos pelo processo de fundição.

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. Este 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 deste campo magnético aplicado pode atingir até milhões de A/m e, por este motivo, são necessárias fontes de tensão elétrica capaz de fornecer corrente elétrica elevada [2,4,6].

Sob a ação de campo magnético, durante a compactação, as partículas tendem a girar para alinhar suas direções de fácil magnetização paralelamente na direção do campo magnético externo aplicado, ocorrendo também o alinhamento dos domínios na mesma direção e sentido, fazendo com que a peça apresente propriedades magnéticas. Na sinterização, como é ultrapassada a temperatura de Curie, os domínios adjacentes se orientam em sentidos opostos, e a peça perde a magnetização, porém os domínios continuam alinhados paralelamente nas suas direções de fácil magnetização. Quando as peças ficam sujeitas à

nova magnetização, estas magnetizam-se novamente e os domínios que já estavam alinhados na mesma direção alinham-se agora no mesmo sentido, não sendo necessária a rotação dos domínios, resultando uma peça magnética ou ímã com retentividade maior que o ímã isotrópico [6].

Quando as dimensões dos fragmentos do pó se aproximam do tamanho de grão, os ímãs obtidos tendem a apresentar características mais anisotrópicas, ou seja, com maior retentividade. Entretanto, mesmo com diâmetro médio de partículas maiores, como algumas dezenas de micrometros, os ímãs apresentam propriedades magnéticas intermediárias entre os ímãs isotrópicos e anisotrópicos. A razão disto é que em uma partícula policristalina com vários grãos, embora a direção de orientação dos domínios seja paralela em um mesmo grão, tal direção será aleatória de grão para grão, e mesmo com a rotação destas partículas, nem todos os domínios ficarão orientados no sentido do campo magnético aplicado na compactação, isto é, na sua direção de mais fácil magnetização [6].

Assim, este trabalho teve por objetivo o estudo de pós para obtenção de ímãs de ferrita de bário e estrôncio, isotrópicos e anisotrópicos.

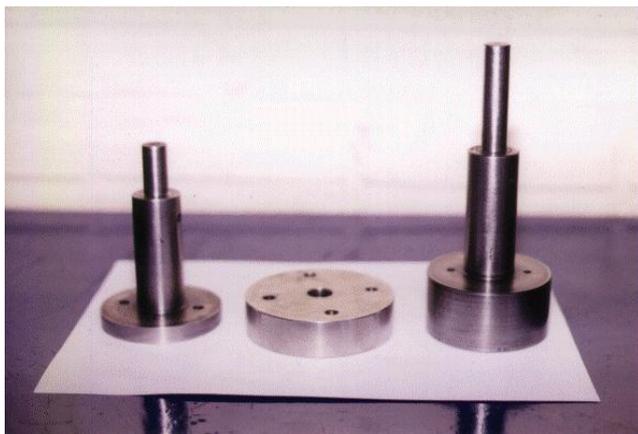
2. Materiais e Métodos

2.1. Matriz para Obtenção de Ímãs

A Figura 1a mostra uma matriz experimental de duplo efeito, na qual podem-se notar os punções inferior e superior, bem como a matriz propriamente dita (cavidade). Os punções foram construídos com aço 1045 (aço magnético) e a matriz (cavidade) foi construída com aço inoxidável austenítico (aço não magnético). O diâmetro dos punções e, conseqüentemente, da cavidade é 15 mm. Esta matriz pode ser utilizada para compactação de ímãs de ferrita isotrópicos e anisotrópicos. Para a compactação sob campo (ímãs anisotrópicos), são acopladas bobinas às matrizes, podendo ser colocadas de forma envolvente sobre a própria matriz (cavidade), ou sobre os punções, conforme mostra a Figura 1b. Cada bobina possui 500 espiras e a mesma foi confeccionada com fio AWG 19. A Figura 1c mostra a matriz experimental montada em uma prensa, na qual verifica-se que as bobinas dos punções inferior e superior estão conectadas por fios a uma fonte de tensão elétrica contínua, ajustável e de alta potência (à direita).

2.2. Matéria-Prima

Os materiais utilizados na realização deste trabalho compreenderam 5 tipos comerciais de ferrita de bário, bem como 5 amostras comerciais de ferrita de estrôncio, obtidas junto a fornecedores diversos. Tais compostos podem ser visualizados na Tabela 1. Do total de 10 ferritas, apenas aquela denominada H100 possui características dadas pelo fornecedor, como seguem: denominação: H100 – ferrita de estrôncio; densidade: 1,25 g / cm³; lubrificante: à base de estearato de zinco (faixa de 0,8% a 1,0%); aditivos: não informado; pressão de compactação: 180 MPa; patamares de sinterização (indicados na curva da Figura 2).



(a)



(b)



(c)

Figura 1. (a) Matriz para compactação sob campo magnético - (b) punções associados às bobinas - (c) matriz montada na prensa

O pó de ferrita de estrôncio H100 foi submetido a avaliações de estrutura cristalina, tamanho e forma de partícula. Com relação à caracterização da estrutura cristalina, empregou-se o equipamento de difração de raios X (modelo XRD-7000S, da Shimadzu), uma vez que as estruturas do reticulado de um determinado material podem ser

determinadas, experimentalmente, através da análise de difratometria de raios X [7,8]. A caracterização do tamanho médio de partícula do pó foi realizada através do método de *Difração a Laser* (Mastersizer 3000) [9,10]. Este pó de ferrita também foi analisado com o auxílio de um microscópio óptico (marca Union de platina invertida) através do embutimento do pó em resinas acrílicas.

Tabela 1. Especificação e composição química das ferritas estudadas

Tipo	Composição
Ba 821	Ferrita de Bário
Ba Tipo 2	Ferrita de Bário
Ba Tipo 7	Ferrita de Bário
Maniperm 850 – S8	Ferrita de Bário
Maniperm 850 – S9	Ferrita de Bário
H100	Ferrita de Estrôncio
Sr Tipo V2	Ferrita de Estrôncio
Sr Tipo 6	Ferrita de Estrôncio
Sr Tipo 9	Ferrita de Estrôncio
HM239	Ferrita de Estrôncio

Salienta-se que todos os pós relacionados na Tabela 1 possuíam 1% de lubrificante à base de estearato de zinco. A ferrita H100 teve um acréscimo de mais 1% de estearato totalizando 2%. A ferrita HM239 foi moída a úmido e a seco, conforme especificações a seguir:

- Moída à Úmido (M.U.): A matéria-prima (pó) foi umedecida com água e colocada em moinho de bolas em uma proporção de 3/1, ou seja, 3 partes de ferrita e 1 parte de esferas cerâmicas em massa, por três horas.

- Moída à Seco (M.S.): A matéria-prima (pó) foi colocada em moinho de bolas na proporção de 3/1 em massa, por três horas.

- Moída em moinho de alta energia (M.E.) A matéria-prima (pó) foi colocada em moinho atritor de alta energia com esferas de aço também na proporção de 1/3, ou seja, 1 parte de ferrita e 3 em esferas em massa, por ½ hora e 3 horas.

Deve-se salientar que o uso do moinho atritor em pós metálicos ou cerâmicos pode ser utilizado para mecânossíntese, mas também para redução do tamanho de partículas nos pós [1,12].

2.3. Metodologia

No intuito de estabelecer um comparativo com a matéria-prima H100, foram produzidas em laboratório diferentes rotas de produção de ímãs de ferrita de estrôncio e bário, a partir de pós de ferritas diversos. Uma vez compactadas, as amostras foram sinterizadas nas mesmas condições citadas para a liga de ferrita de estrôncio H100 (mesma pressão de compactação e mesmos patamares de sinterização).

No que concerne à ferrita de estrôncio H100, inicialmente, houve a caracterização quanto à composição química, tamanho e forma de partícula e propriedades magnéticas a partir das curvas de histerese (Figura 5) desta ferrita, por ser a liga estudada melhor caracterizada pelos fornecedores dos pós. Foram obtidos corpos de prova compactados sem campo

magnético (ímãs isotrópicos) e sob a ação de forte campo magnético (anisotrópicos). Todas as ligas tiveram um acréscimo de 1% de lubrificante à base de estearato de zinco. Alguns pós, como a liga HM 239, foram submetidos a processos de moagem a seco e úmido em moinho de bolas (liga HM 239) e moinho atritor (ligas HM 239 e H100), como anteriormente citado. A análise comparativa dos diversos tipos de ferrita estudados foi realizada a partir da observação do magnetismo remanente na superfície dos corpos de prova, utilizando-se um gaussímetro.

No que tange à confecção dos corpos de prova, estes foram realizados por compactação uniaxial em uma máquina universal de ensaios mecânicos com capacidade de 1000 kgf (98,1 kN). A velocidade de compactação foi de 50 mm/minuto, com uma pressão de 180 MPa, medida esta com uma imprecisão de aproximadamente 5%, considerando-se ultrapassagens da pressão devido à inércia e erros na indicação da pressão. Foram obtidas peças cilíndricas com diâmetro de 15 mm e altura aproximada de 5 mm. Na compactação, ocorreu uma redução média na altura da cavidade do pó de 67% ou redução de 3/1, o que está de acordo com a redução na compactação [1-3]

Foram compactados corpos de prova sem campo magnético (ímãs isotrópicos), ou seja, sem as bobinas acopladas à matriz, e sob campo magnético (ímãs anisotrópicos). É importante observar que, devido ao fato de que o campo magnético é gerado dentro da matriz, a medição do campo quando o pó está sendo compactado na cavidade pode ser realizado somente indiretamente. Portanto, a matriz da Figura 1 foi montada na prensa sem a cavidade, somente com os punções e as bobinas, com uma separação entre os punções de 10 mm (média da altura da cavidade, considerando-se a altura do pó 15 mm e altura da peça compactada 5 mm).

Um sensor Hall foi inserido entre os punções, variando-se a tensão elétrica da fonte e, em consequência, a corrente elétrica nas bobinas, até o sensor Hall registrar 10 kG, equivalente a um campo de 10 kOe (relação unitária no sistema CGS). A inserção da cavidade não altera o campo magnético na cavidade, pois a mesma é construída de aço inoxidável não magnético. Assim, considerando-se a mesma corrente nas bobinas na compactação dos corpos de prova, com uma mesma altura da cavidade (ou mesma separação entre os punções), existirá ali um campo magnético de 10 kOe, suficiente para saturar a indução do material. Uma vez que corrente e campo em circuitos magnéticos são proporcionais, um aumento na corrente das bobinas ocasionará um aumento no campo magnético aplicado. Assim, os campos magnéticos aplicados na compactação (indicados na Tabela 2) foram calculados em função da corrente nas bobinas.

As amostras foram sinterizadas em um forno tipo mufla de resistência de carvão de silício com capacidade máxima de temperatura de 1500°C. Este forno é controlado por tiristores, sendo o monitoramento de temperatura realizado através de termopar Pt-PtRh 10%. O tempo de sinterização foi de 3 horas, com período de 60 minutos para retirada do lubrificante. A taxa de aquecimento foi de 10°C por minuto, conforme patamares da Figura 2.

Na sinterização, devido à temperatura de Curie, os corpos de prova perdem seu magnetismo remanente. Por este motivo,

estes foram magnetizados, utilizando a própria matriz onde os ímãs foram compactados, uma vez que os campos magnetizantes originados no interior da cavidade eram suficientes para saturar as ligas estudadas, conforme dados bibliográficos das ferritas, considerando os valores máximos de campo [1-3].

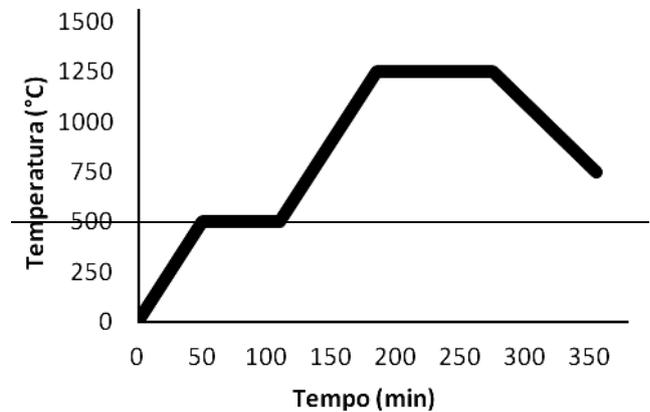


Figura 2. Patamares de sinterização das amostras

Foram confeccionados três corpos de prova para cada tipo de matéria-prima, e os dados relacionados na Tabela 2 representam a média aritmética dos resultados.

2.4. Medidas Magnéticas

Foram traçadas duas curvas de histerese somente da liga H100. A primeira curva foi obtida a partir da aplicação de um campo magnético ou magnetização na mesma direção ou paralelo ao campo aplicado na compactação, e a segunda curva foi obtida a partir da aplicação de um campo magnético ou magnetização na direção perpendicular ao campo aplicado na compactação. Para ser analisada, é retirado da amostra um fragmento, se possível cilíndrico, no qual o comprimento deve ser muito maior que o diâmetro no intuito de minimizar o fluxo disperso.

As curvas de histerese foram traçadas no Laboratório de Magnetismo do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a partir de um dispositivo denominado de Magnetômetro de Amostra Vibrante, dispositivo este adequado para curvas de histerese de materiais magnéticos duros (ímãs permanentes). A imprecisão das medidas resultantes é de 2% de acordo com os dados da UFRGS. O campo magnético máximo aplicado para geração das curvas de histerese foi de 8 kOe (637 kA/m). As curvas geradas indicam o campo em kOe (Oester – unidade de campo magnético para o sistema CGS) e a indução em emu/g (unidade de magnetização). O magnetismo remanente B_r em Gauss das amostras (unidade do sistema CGS) foi então calculado a partir da seguinte equação [1,2]:

$$B_r = 4\pi \frac{emu}{g} \rho \quad [1]$$

sendo ρ a densidade dos corpos de prova.

Salienta-se que, em muitos trabalhos e aplicações, as unidades de ímãs estão no sistema de medição de unidades CGS e não no sistema MKS; por este motivo, a Tabela 2 apresenta os dados de indução em Gauss e de campo em kOe. A conversão entre os sistemas estabelece que 1 Testa (MKS) = 10.000 Gauss (CGS) e 1 A/m (MKS) = 0,01256 Oe (CGS) [1,2].

Devido à impossibilidade de serem geradas curvas de histerese para todas as amostras estudadas, optou-se por uma medição indireta a partir de um gaussímetro. Assim, utilizou-se o dispositivo TLMP-HALL-XXk-T0 com sonda transversal 5 x 1,5mm produzido por GlobalMag. As medições foram realizadas no centro do polo positivo de uma das extremidades planas dos ímãs confeccionados na forma cilíndrica. Como os ímãs, após a sinterização resultaram em dimensões muito próximas, criou-se uma estrutura de encaixe dos ímãs e sensor Hall do gaussímetro de tal maneira que o magnetismo remanente sempre era medido no mesmo local. Uma série de considerações empíricas e medições experimentais, resultaram uma imprecisão de 5% para as medições, considerando imprecisão na medição do gaussímetro e dificuldades no posicionamento exato do sensor sobre o centro dos ímãs.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise da Ferrita de Estrôncio H100

A Figura 3 apresenta o difratograma de raios-X para a amostra de ferrita de estrôncio. Através da comparação com um difratograma padrão da mesma liga, comprovou-se ser ferrita de estrôncio [7,8].

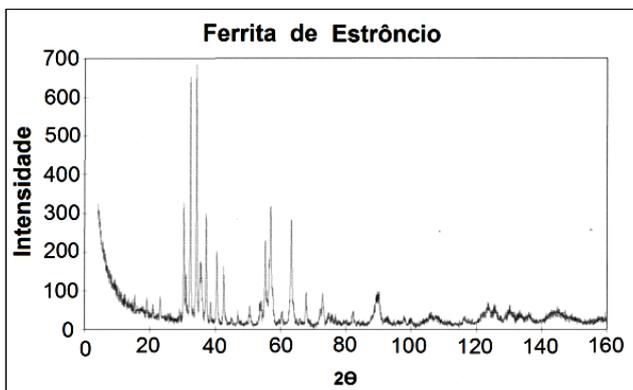


Figura 3. Relação de intensidade em função do ângulo de incidência 2θ do pó de ferrita de estrôncio H100 para a faixa de 0 a 180°

A análise granulométrica foi realizada em meio aquoso, após condicionamento da amostra em ultrassom e agitação mecânica. Observou-se que as partículas se aglomeravam com facilidade, principalmente em água. Infere-se, a partir deste resultado, que tais partículas apresentam caráter hidrofóbico. A partir do histograma (Figura 4), representando a distribuição dos

tamanhos de partículas por fração, constatou-se que o diâmetro médio das partículas era de, aproximadamente $20 \mu\text{m}$ [9,10].

Através de exame ao microscópio, observou-se que as partículas apresentavam-se aglomeradas, devido ao efeito dos aditivos utilizados, semelhante ao efeito da adição do ácido esteárico em outros tipos de ferritas analisadas. Não foram tiradas fotografias com dados dimensionais, uma vez que os aditivos alteram estes dados. O que se percebe perfeitamente é a existência de um material composto de partículas de ferritas e outras substâncias que não reagem quimicamente [1-3].

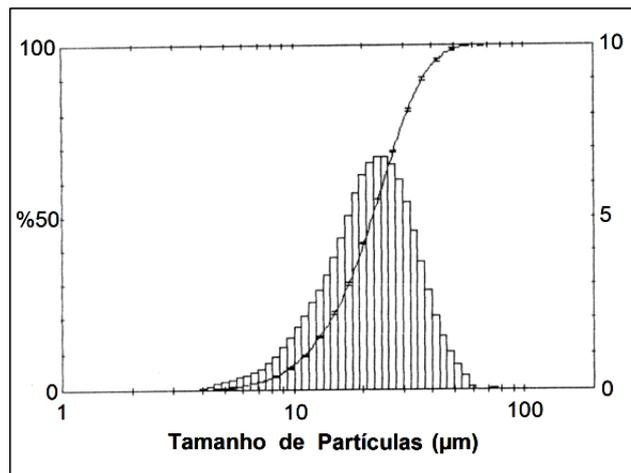


Figura 4. Histograma representando a distribuição dos tamanhos de partículas por fração do pó de ferrita de estrôncio H100

A liga H100 foi compactada e sinterizada. Na compactação houve redução de 67% na altura dos corpos de prova, e na sinterização, as peças tiveram uma contração linear de aproximadamente 12,5%. A densidade resultou em $4,7 \text{ g/cm}^3$. A seguir foram traçadas as curvas de histerese, para as quais a Figura 5-a apresenta a curva de histerese obtida com magnetização paralela à direção de compactação, e a Figura 5-b exibe a curva de histerese da mesma amostra, porém com magnetização perpendicular. Considerando-se a magnetização paralela, a qual forneceu melhores resultados, constatou-se uma coercitividade de aproximadamente 4,1 kOe. A retentividade resultou 1,95 kG e foi calculada através da equação 1.

3.2. Outros Tipos de Ferritas Isotrópicas e Anisotrópicas

A Tabela 2 apresenta, além da H100, outros tipos de ferritas, compactadas com e sem campo magnético, sendo que algumas foram submetidas a processos de moagem. Por sua vez, nesta mesma tabela, a contração média refere-se à contração linear na sinterização, Br Med é o magnetismo remanente superficial medido com o gaussímetro para os ímãs compactados sem campo magnético, e *Br Med refere-se à medição dos ímãs compactados com campo magnético (Campo H em kOe). A variação refere-se ao acréscimo ou

decréscimo no magnetismo remanente, considerando a magnetização com ou sem campo magnético.

Da Tabela 2, pode-se observar com relação às ferritas de estrôncio que a liga H100 (já fornecida com os aditivos, pronta para compactação), na compactação sob campo, apresentou um acréscimo de aproximadamente 10% no

magnetismo remanente. O aumento no percentual de lubrificante para 2% e a moagem em moinho atritor ocasionaram inclusive uma redução no magnetismo remanente final, embora na compactação sob campo tenha ocorrido um aumento.

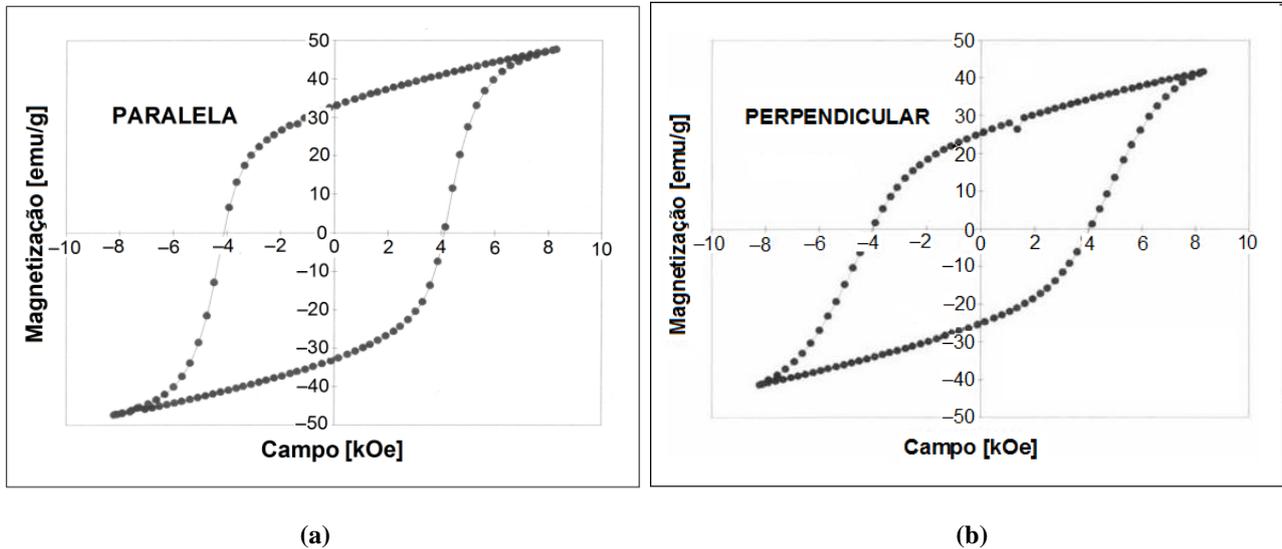


Figura 5. Curva de histerese dos ímãs de ferrita de estrôncio para o pó de ferrita H100 – (a) Magnetização Paralela – (b) Magnetização Perpendicular

Tabela 2. Contração e Magnetismo Remanente para as amostras estudadas

Tipo	Contração media (%)	Br Med.(Gauss)	*Br Med. (Gauss)	Campo H (kOe)	Varição Br (%)
H100	12,5	520	575	28,0	+ 10,6
H100 (2% Lub.)	11,7	500	505	32,5	+ 1,0
H100 (M.A. ½ h)	10,9	495	537	35,3	+ 8,5
Sr Tipo V2	13,3	550	-	37,3	-
Sr Tipo 6	7,7	350	347	36,2	- 0,9
Sr Tipo 9	8,2	405	490	35,1	+ 21,0
HM239 (M.U.3 h)	8,8	420	490	30,0	+ 16,7
HM239 (M.S. 3 h)	10,2	410	540	38,0	+ 31,7
HM239 (M.A. ½ h)	11,9	505	-	-	-
HM239 (M.A. 3 h)	9,2	450	-	-	-
Ba 821	14,5	510	527	31,5	+ 3,3
Ba Tipo 2	9,5	400	415	39,2	+ 3,8
Ba Tipo 7	9,8	417	408	36,5	- 2,0
Maniperm 850 – S8	12,3	510	350	31,6	- 31,4
Maniperm 850 – S9	7,1	415	400	36,7	- 3,6

A liga Sr Tipo V2 apresentou resultados inconclusivos, pois houve grandes diferenças no magnetismo remanente nos três corpos de prova, sendo, portanto, os resultados descartados. A liga Sr Tipo 6 manteve os mesmos valores de magnetismo com e sem campo magnético, e a liga Sr Tipo 9 apresentou um aumento no magnetismo remanente de 21% quando compactada sob campo, indo ao encontro dos resultados obtidos por Kwon e Bae [11].

A liga HM 239 apresentou melhores resultados de magnetismo remanente (540 G) quando compactada sob campo, contudo, somente após ser moída a seco por 3 horas em moinho de bolas. Com relação à moagem em moinho atritor da liga HM 239, observou-se visualmente que o tamanho de partículas não sofreu redução significativa. Uma vez que neste caso a utilização do moinho atritor seria para redução do tamanho de partícula, optou-se por não realizar a

compactação sob campo. Contudo, para compactações sem campo, houve um aumento no magnetismo remanente de 23,2% para a liga com meia hora em moinho atritor, em comparação com a moagem a seco em moinho de bolas. Entretanto, para um tempo maior em atritor (3 horas), ocorreu um decréscimo do magnetismo remanente. Tal fenômeno é atribuído ao fato de as ferritas serem óxidos complexos e, a partir de determinados tempos em moinhos de alta energia, ocorre novamente um desdobramento da ferrita em óxidos de ferro e estrôncio [1,12].

As ferritas de bário mantiveram o magnetismo remanente constante e em algumas houve um decréscimo como a Maniperm850 S8 com redução de 31,4%. Na inspeção visual, verificou-se que em algumas ferritas de bário, a matéria-prima era composta de pequenas esferas com diâmetro médio de 1 mm, caracterizando o uso de aglomerantes, enquanto as ferritas de estrôncio tinham o aspecto de talcos, ou seja, eram partículas de pós extremamente pequenas, na ordem de alguns micrômetros. Assim, a compactação sob campo das ligas de ferrita de bário, já preparadas na forma de pequenas esferas, não altera a direção de mais fácil magnetização, uma vez que tais esferas não são monocristalinas. Acrescenta-se a isto que, se a preparação de tais ligas na forma de esfera são realizadas sob campo, as próprias esferas já apresentam uma orientação anisotrópica. Como resultado, a compactação sob campo inclusive irá alterar a pré-orientação das pequenas esferas, ocorrendo então uma desorientação magnética das partículas [1,11]. Tal efeito explica o fato de que, houve uma redução no magnetismo remanente da ferrita Maniperm850 S8.

4. Conclusões

Os valores de retentividade, coercitividade e magnetismo remanente superficial das ferritas estudadas estão dentro das especificações comerciais, variando de 347 G para a ferrita Sr Tipo 6 até 575 G para a ferrita de estrôncio H100.

Com relação a compactação sob campo, as ligas a partir de ferrita de estrôncio tiveram algum acréscimo de magnetismo remanente (HM 239 moída a seco aumentou 31,7%). As ferritas de bário mantiveram o magnetismo remanente constante e em algumas houve um decréscimo como a Maniperm 850 S8 com redução de 31,4%.

Com relação a ferrita de estrôncio H100, o aumento de lubrificante para 2%, bem como o uso do moinho atritor, ocasionaram um decréscimo na retentividade. A moagem da ferrita HM 239 em moinho atritor (½ h) aumentou a retentividade voltando a diminuir com o aumento do tempo de moagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pela bolsa e financiamento do projeto.

Referências

- [1] Cullity, B. D. Introduction to magnetic materials. Massachusetts: Adison-Wesley Publishing Company, 1967.
- [2] Jiles, D. Introduction to magnetism and magnetic materials. London: Chapman and Hall, 1991.
- [3] Slick, P. L. Ferromagnetic materials. Amsterdam.:North - Holland Publishing Company, 1980.
- [4] Stabik, J., Chrobak, A., Haneczok, G., Dybowski, A. Magnetic properties of polymer matrix composites filled with ferrite powders; Archives of Materials Science and Engineering, 48 (2), 97-102, 2011.
- [5] Ogata, Y., Kubota, Y., Takami, T., Tokunaga, M., Shinokara, T. Improvements of magnetic properties of Sr ferrite magnets by substitutions of La and Co, IEEE Transactions on Magnetics, 35 (5), 3334-3336, 1999.
- [6] Dias, M. M., Schaefer, L., Rodrigues, D., Landgraf, F. J. G. Materiais magnéticos produzidos por metalurgia do pó. Metalurgia e Materiais, 55 (483), 625-625, 1999.
- [7] ASTM Index - American Society for Testing and Materials - Catálogo de Índices de Refração para Substâncias Cristalinas.
- [8] Borges, F. S. Elementos de Cristalografia. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1980.
- [9] Malvern Instruments. Laser Diffraction Droplet & Particle Size Analyzers. séries 2600 & 3601.
- [10] Williams, R. Particle size analysis: classification and sedimentation methods, Minerals Engineering, 8 (3), 337-338, 1995.
- [11] Kwon, H. W., Bae, J. W. Magnetic properties of Sr-ferrite powder prepared by intensive mechanical milling technique, Journal of Magnetics, 8 (3), 118-123, 2003.
- [12] German, R. M. Powder Metallurgy Science. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1984.