

PROJETO E SELEÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS PERMANENTES

ÂNGELA P. FERREIRA

Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança
Campos de Santa Apolónia, Apartado 1134, 5301-857 Bragança, Portugal
Tel.: +351 273 303 105, Fax: +351 273 313 051, e-mail: apf@ipb.pt

ARTUR F. COSTA

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, FEUP
R. Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, e-mail: acosta@fe.up.pt
Faculdade de Ciências Naturais, Engenharias e Tecnologias, Universidade Lusófona do Porto
Rua Augusto Rosa, 24, 4000-098 Porto, Portugal, e-mail: arturfcosta@ulp.pt

RESUMO: Os materiais magnéticos permanentes têm sido utilizados em dispositivos eletromagnéticos há mais de 100 anos mas, devido aos progressos recentes das suas características magnéticas e a disponibilidade a custos acessíveis, a sua aplicação é atualmente transversal a uma vasta gama de áreas tecnológicas. A introdução dos ímanes de terras raras nos finais da década de 60 do século passado revolucionou a engenharia de projeto, conduzindo a uma reconfiguração dos dispositivos com fatores de escala anteriormente impraticáveis, elevando ainda o rendimento daqueles, ao eliminar as perdas associadas à criação de campos magnéticos baseados em densidades de correntes. Este trabalho descreve as principais classes dos materiais magnéticos permanentes com relevância comercial e fornece as linhas gerais do projeto magnético, com especial relevo para os materiais baseados em terras raras.

ABSTRACT: Permanent magnetic materials have been used in electromagnetic devices for over 100 years, but due to recent improvements in their magnetic properties and availability at affordable costs, the atual spectrum of electrical systems that employ permanent magnets is extremely broad. The newest and still growing family of rare earth magnets, introduced in the late 60s, has altered drastically engineering design, leading to a device reconfiguration with scale factors previously impractical and further improving the performance, by eliminating the losses associated with magnetic fields provided by current densities. This paper describes the main classes of commercial permanent magnetic materials, and states the outline of magnetic circuit design, with particular attention to permanent magnet materials based on rare earths.

Palavras-chave: Alnicos; Ferrites; Terras raras; Projeto de circuitos magnéticos

Keywords: Alnicos; Ferrites; Rare-earth; Magnetic Circuit Design

1. Introdução

O desenvolvimento e a progressiva melhoria dos materiais magnéticos baseados em terras raras nas últimas cinco décadas têm vindo a introduzir mudanças significativas nos dispositivos eletromecânicos e eletrônicos. Devido à elevada eficiência volumétrica dos ímanes permanentes de terras raras é possível explorar novas configurações e fatores de escala impraticáveis em sistemas baseados em campos magnéticos obtidos classicamente através de densidades de correntes.

O espectro de aplicação dos materiais magnéticos permanentes é transversal a uma variedade de áreas tecnológicas como a indústria automóvel, a tecnologia militar e aeroespacial, cujos requerimentos são mais severos que as aplicações industriais, aplicações médicas específicas, telecomunicações, entre outras. À medida que a procura dos materiais magnéticos baseados em terras raras aumenta, assiste-se a uma instabilidade quer no preço quer na disponibilidade das matérias-primas envolvidas. Desde 2006 que a procura excede a oferta dos metais de terras raras como o neodímio, o praseodímio, o disprósio e samário. Os setores propulsores da procura, identificados por alguns autores, são os veículos híbridos e elétricos, utilizando como indicador um consumo de 1,5 a 3 kg de ímanes baseados em terras raras por veículo (Constantinides, 2007).

No contexto económico e tecnológico atual, os princípios orientadores do projeto e seleção de materiais magnéticos permanentes assumem particular importância. O dimensionamento de um íman permanente para uma dada aplicação obedece, numa primeira fase, a um conjunto de considerações como a seleção do material magnético, as implicações das dimensões físicas no funcionamento reversível do íman e as implicações da temperatura a que o íman estará sujeito na característica de desmagnetização. As considerações sobre o projeto magnético aqui apresentadas têm por base uma abordagem analítica em função das características de desmagnetização do íman permanente, fornecidas pelo fabricante, útil para o projeto preliminar e para a realização de análises de sensibilidade. Os princípios orientadores do projeto magnético são precedidos de uma apresentação das propriedades básicas caracterizadoras dos materiais magnéticos permanentes e de uma discussão das principais classes de ímanes permanentes com relevância comercial.

2. Propriedades Básicas dos Materiais Magnéticos Permanentes

Os mecanismos básicos do magnetismo são determinados, ao nível atômico, pelos movimentos orbital e de spin de um elétron, com analogia ao momento de um dipolo magnético. Numa perspetiva multiatômica, se os momentos dos dipolos magnéticos não interagem de forma significativa, o material comporta-se como paramagnético. Se existir uma interação forte entre momentos magnéticos atômicos vizinhos, conducente a um alinhamento espontâneo dos mesmos, o material é ferromagnético abaixo da temperatura de Curie.

A magnetização espontânea intrínseca dos materiais ferromagnéticos está organizada em domínios, teoria proposta em 1907 por Pierre-Ernest Weiss, (Helleman, Bunch, 1991) nos quais os momentos magnéticos atômicos estão permanentemente alinhados até à saturação, embora domínios adjacentes estejam orientados em direções aleatórias o que resulta numa magnetização líquida nula do ponto de vista macroscópico. Quando sujeitos a um campo magnético externo, os materiais ferromagnéticos apresentam uma resposta imposta pela orientação dos seus domínios na direção e sentido do campo magnético aplicado descrita pela característica BH ou ciclo histerético. Os materiais magnéticos duros ou permanentes apresentam uma resposta caracterizada por uma elevada coercividade e por uma permeabilidade relativa próxima da unidade, em contraposição aos materiais ferromagnéticos macios, cujos ciclos histeréticos são caracterizados por uma permeabilidade elevada e por uma coercividade baixa.

A proposta mais simples da descrição de um material magnético permanente é um material ferromagnético com um ciclo histerético largo, cujos primeiro e segundo quadrantes são representados na Figura 1. Por uma questão de conveniência, o eixo do campo magnético está visualmente escalado pelo fator da permeabilidade do vácuo, μ_0 .

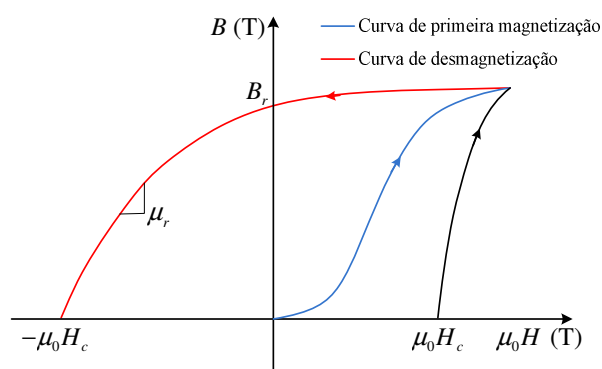


Figura 1: Primeiro e segundo quadrantes do ciclo histerético de um ímã permanente.

A formação do ciclo histerético é obtida por aplicação de um campo magnético elevado a um material desmagnetizado, até à saturação de todos os domínios magnéticos, definindo a curva da primeira magnetização. Quando retirado o campo magnético externo, a resposta do material descreve a curva superior, denominada por curva de desmagnetização. A posição final nesta curva, ou seja, o ponto de funcionamento do íman, depende da envolvente magnética no qual o material se encontra.

Se as duas extremidades do material magnético forem curto-circuitadas através de um material infinitamente permeável ($\mu = \infty$), o íman encontra-se a trabalhar na sua remanência com o ponto de funcionamento definido por $H = 0$ e $B = B_r$. A indução de remanência, B_r , mede a densidade de fluxo magnético máxima que o íman é capaz de produzir. Se por outro lado, o material magnético estiver numa envolvente cuja permeabilidade seja nula, o fluxo magnético que flui do íman é nulo, sendo o ponto de funcionamento o correspondente a $B = 0$ da curva de desmagnetização. Neste ponto, a amplitude do campo magnético através do íman é denominado de campo coercivo, representada por H_c . Para permeabilidades do meio em que se insere o íman entre ∞ e 0, o ponto de funcionamento encontra-se no segundo quadrante, ou seja, entre a sua remanência e a sua coercividade.

Além do campo coercivo, da indução de remanência e da curva de desmagnetização no segundo quadrante, outra especificação relevante na seleção dos ímanes permanentes e projeto de circuitos magnéticos é o produto energético máximo, $(BH)_{max}$. Os pontos (B, H) da curva de desmagnetização definem o produto energético BH com um máximo para um ponto no intervalo $-H_c < H < 0$, de acordo com a Figura 2.

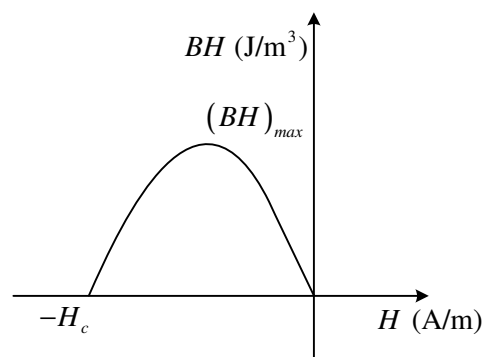


Figura 2: Produto energético *versus* campo magnético.

O produto energético máximo é uma medida qualitativa do desempenho de um íman num circuito magnético dado que não quantifica a energia acumulada no íman. O projeto magnético que estabeleça o ponto de funcionamento correspondente ao ponto de produto energético máximo minimiza o volume de material magnético e conseqüentemente reduz o seu custo. Apesar deste facto, geralmente os ímanes permanentes não são projetados para trabalhar neste ponto, para prevenir possíveis alterações irreversíveis.

3. Principais Classes de Ímanes Permanentes

Distinguem-se três grupos de materiais magnéticos permanentes: os alnicos, as ferrites e os materiais magnéticos baseados em terras raras (TR), identificando-se neste último três subgrupos os ímanes de TR de (1) primeira, (2) segunda e (3) terceira geração, assim definidas de acordo com a composição estequiométrica nominal (Strnat, 1990):

- (1) “1-5”, incluindo os ímanes de samário e cobalto SmCo_5 ,
- (2) “2-17”, $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{17}$, em que o cobalto (Co) associado aos ímanes de primeira geração é parcialmente substituído pelo ferro (Fe) até 25%, e por último,
- (3) as ligas ternárias “2-14-1” nos quais a TR mais frequente é o neodímio (Nd), embora seja frequente a substituição parcial desta por praseodímio (Pr) ou disprósio (Dy) (Tokunaga, *et al.*, 1988), sendo os outros elementos o ferro e o boro, na composição básica $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

Dentro destes subgrupos, as combinações possíveis baseadas em substituições parciais dos elementos de base são quase infinitas. De salientar ainda a existência de materiais magnéticos duros híbridos, que resultam da combinação de ferrites com uma pequena quantidade de TR, obtida por mistura das matérias-primas em pó (Plusa, *et al.*, 2008). Estas combinações são ditadas pela disponibilidade comercial das matérias-primas envolvidas e por modificações específicas nas propriedades mecânicas e magnéticas.

3.1 Alnicos

Os alnicos surgiram no início da década de 30 do século passado e são ligas baseadas em ferro, alumínio (Al), níquel (Ni) e cobalto (Co). As induções de remanência atingem valores particularmente elevados, até 1,24 T, produtos energéticos máximos até 42 kJ/m³, mas apresentam campos coercivos extremamente baixos, pelo que são muito suscetíveis à desmagnetização. Embora as propriedades magnéticas destas ligas no contexto atual sejam desfavoráveis à sua utilização num espectro alargado, é de salientar a

estabilidade com a temperatura, com variações da indução remanente e do campo coercivo inferiores a qualquer outro material magnético; a temperatura de Curie dos alnicos é também reportada como a mais elevada de entre os materiais magnéticos duros, atingindo valores de 900 °C para algumas ligas sinterizadas (Petrie, 1995). As fracas propriedades mecânicas constituem outro fator desfavorável, os alnicos são muito quebradiços, o que encarece o processo de maquinação na obtenção de peças com tolerâncias apertadas.

3.2 Ferrites

Na década de 50, foram introduzidas as ferrites, materiais magnéticos duros com propriedades ferrimagnéticas, também denominados por ímanes cerâmicos, obtidos por mistura de óxido de ferro com bário, estrôncio ou chumbo (Roozee, 2002). Dos materiais magnéticos duros comercializados, as ferrites representam a maior parcela na base da tonelagem e constituem a solução mas barata, devido à abundância e o baixo custo das matérias-primas envolvidas (Constantinides, 2003; Deshpande, 2003). As propriedades magnéticas das ferrites são caracterizadas pelas baixas induções de remanência, até 0,4 T, campo coercivos moderados (~ 223 kA/m) e baixos produtos energéticos máximos, tipicamente até 32 kJ/m³. As propriedades magnéticas são muito instáveis com a temperatura, com a particularidade única entre os materiais magnéticos duros comerciais de apresentarem um coeficiente de temperatura reversível do campo coercivo positivo, significando que este aumenta quando a temperatura aumenta.

Enquanto os outros materiais magnéticos duros tendem a ser moderadamente condutivos, as ferrites são caracterizadas por uma elevada resistividade elétrica, o que lhes confere especial relevo em aplicações a frequências elevadas.

Embora as propriedades magnéticas das ferrites sejam desfavoráveis, o diferencial entre a oferta e a procura dos materiais magnéticos duros baseados em TR atual motiva a substituição destes pelas ferrites em aplicações que tolerem o maior volume de material necessário.

3.3 Samário-Cobalto (SmCo)

Nos finais da década de 60 assistiu-se à introdução dos materiais magnéticos duros baseados em TR. O desenvolvimento das ligas de SmCo resultou da investigação direcionada para a formação de ligas de elementos de TR com elementos de transição ferromagnéticos, como o Fe, o Co e o Ni. Os ímanes de primeira geração SmCo5

sinterizados apresentam produtos energéticos da ordem de 128 kJ/m³ e forças coercivas muito elevadas. A particularidade dominante das propriedades magnéticas destes ímanes é a elevada temperatura de Curie, ~ 750 °C, quase tão elevada como a dos alnicos; em contrapartida, com o aumento da temperatura, o campo coercivo baixa drasticamente, o que limita a utilização dos ímanes de TR de primeira geração a 250 °C.

Os ímanes contêm 66% de Co e 34% de Sm, constituindo a solução mais dispendiosa dos materiais magnéticos permanentes. A baixa disponibilidade e o consequente custo elevado do cobalto motivaram a sua substituição pelo ferro, tendo sido introduzidos na década de 80 os ímanes designados comercialmente por Sm₂Co₁₇; nestas ligas as percentagens de samário e de cobalto são inferiores às utilizadas nos ímanes de primeira geração, 18 a 27% para o Sm e 40 a 50% para o Co, parcialmente substituído por Fe em 10 a 20% (Strnat, 1990). Além da redução do custo associado às matérias-primas, as propriedades magnéticas são melhores que as dos ímanes de TR de primeira geração (produtos energéticos até 214 kJ/m³), com uma estabilidade com a temperatura notável e atualmente graduados para aplicações até 350 °C. O processamento destas ligas requer tratamentos térmicos complexos e prolongados na formação da microestrutura apropriada (Zhang, et al., 1999), o que conduz a um custo final mais elevado que as economias nas matérias-primas sugerem.

3.4 Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB)

As ligas ternárias de NdFeB foram propostas em 1983 pela General Motors, nos Estados Unidos (Croat, et al., 1984), e pela Sumitomo Special Metals, no Japão, (Sagawa, et al., 1984), utilizando técnicas de processamento distintas e o seu sucesso comercial é enorme. A razão principal é económica: estas ligas oferecem características magnéticas equivalentes (e em alguns aspectos melhores) às de SmCo, mas recorrem a matérias-primas mais abundantes, o que resulta num custo por unidade de peso (e também por unidade de produto energético) inferior. Estima-se que o neodímio seja dez a vinte vezes mais abundante que o samário e a oferta de ferro a preços acessíveis é virtualmente ilimitada. Os ímanes de NdFeB apresentam uma indução de remanência superior aos ímanes de segunda geração e a sua densidade, variável entre 6000 a 7700 kg/m³ é inferior em, aproximadamente 10% à dos ímanes de SmCo. O produto energético máximo reportado em laboratório atinge valores da ordem de 470 kJ/m³ (HitachiMetals, 2010).

Todavia, os ímanes de NdFeB apresentam uma desvantagem considerável que restringe a substituição dos ímanes de segunda geração em todo a sua extensão: a

temperatura de Curie é baixa, aproximadamente 300 °C, e os coeficientes de temperatura reversíveis da indução remanente e do campo coercivo intrínseco são aproximadamente 5 e 2 vezes, respetivamente, superiores aos ímanes Sm₂Co₁₇, o que limita a sua utilização a aplicações sujeitas a temperaturas baixas, tipicamente menores que 150 °C (Mahadi, et al., 2004). Existem várias modificações destas ligas numa tentativa de melhorar as propriedades térmicas (Vial, et al., 2002). É comum substituir parcialmente o ferro por cobalto para melhorar as propriedades magnéticas a temperaturas elevadas, mas, em contrapartida, o campo coercivo é reduzido (Hirosawa, Sagawa, 1988); este, por sua vez, pode ser melhorado com a substituição do Nd por uma terra rara mais pesada, sendo o Dy o elemento mais vulgar (Groot, et al., 1998; Li, et al., 2009). As ligas baseadas em disprósio oferecem uma anisotropia magnetocristalina mais elevada que as ligas baseadas em neodímio, mas o primeiro apresenta um acoplamento antiferromagnético com o cobalto, o que reduz a magnetização de saturação e também o produto energético máximo. Outros compostos têm vindo a ser desenvolvidos para reduzir a sensibilidade destas ligas com a temperatura, como por exemplo ligas com a adição de gálio, nióbio, vanádio e ou alumínio.

Outro problema inerente aos ímanes de TR de terceira geração é a sua elevada sensibilidade à corrosão; as camadas superficiais do material reagem com o oxigénio, o que conduz a uma variação metalúrgica na sua superfície. Como consequência, a camada superficial apresenta valores reduzidos do campo coercivo, o que facilita a desmagnetização destas partes dos ímanes. Em ambientes húmidos, estes compostos também reagem com o hidrogénio, levando a uma decomposição da superfície que se manifesta em camadas superficiais porosas e na atenuação das propriedades magnéticas (El-Moneim, et al., 2002). A resistência à corrosão é obtida através da adição de elementos específicos às ligas (como por exemplo o gálio) ou através da utilização de revestimentos baseados em zinco, crómio, níquel ou resinas epoxy (Saliba-Silva, et al., 2004; Yu, Chen, 2006). As espessuras dos revestimentos são muito finas, tipicamente 10 a 30 µm, para reduzir o impacto nas dimensões finais e nas tolerâncias.

3.5 Ímanes permanentes sinterizados e obtidos por ligação

As propriedades magnéticas e mecânicas dos materiais magnéticos duros, além da sua composição estequiométrica, são também função das tecnologias de processamento. Os materiais magnéticos baseados em TR e as ferrites podem ser obtidos por sinterização ou com recurso a agentes ligantes (bonded magnets) (Taylor, et al., 2002). O processamento dos ímanes sinterizados não recorre a nenhum efeito de diluição a partir do

seu estado não magnético puro, sendo por isso expectável que os materiais assim obtidos apresentem o produto energético mais elevado por unidade de volume e peso. O seu processamento está limitado a geometrias simples e regulares, pois os compostos obtidos tendem a ser quebradiços e duros, e conseqüentemente difíceis de maquinar (Zhu, et al., 2000). Sempre que a flexibilidade geométrica é um requerimento da aplicação, quer na realização de formas geométricas e esquemas de magnetização complexos, quer na obtenção de dimensões com tolerâncias não realizáveis com os ímanes sinterizados, recorre-se ao processamento das ligas com agentes ligantes (Grönfeld, 2003). Nestes casos, os materiais magnéticos resultantes apresentam propriedades magnéticas inferiores aos dos ímanes baseados nos mesmos materiais mas sinterizados, resultado da diluição dos elementos nos agentes ligantes e função da percentagem utilizada (Buelow, et al., 2005). As frações volumétricas típicas de agentes ligantes utilizados são 15 a 20% para o processamento através de compressão, 35 a 40% para os ímanes obtidos por injeção e 40 a 45% para os obtidos através de extrusão e/ou calandragem (Campbell, 1994). A expressão do produto final pode ser flexível ou rígida, dependendo do agente ligante e do processo utilizado (Tabela 1).

Tabela 1 - Processos de fabrico dos ímanes permanentes obtidos por ligação (Tabela adaptada de Arnold Magnetic Technologies Corp., com autorização).

Agente ligante	Termoendurecido	Termoplástico		Elastómero
	Époxi Acrílico Composto fenólico	Poliamida Poliéster PVC		Borracha nitrílica Vinilo
Processo	Compressão	Injeção	Extrusão	Calandragem
Produto final	Rígido	Rígido	Rígido	Flexível
	NdFeB	NdFeB	NdFeB	NdFeB
	SmCo	SmCo	Ferrite	Ferrite
	Híbrido	Híbrido	Alnico	Híbrido

A Tabela 2 resume numericamente as principais propriedades magnéticas das classes de ímanes permanentes com relevância comercial e o custo aproximado. Os valores apresentados são meramente indicativos e só têm validade para efeitos comparativos, dado que dentro de cada classe, a diversidade de graduações das ligas é considerável e variável

dependendo do fabricante. Os valores apresentados das propriedades magnéticas resultam de uma média dos valores máximos propostos por três fabricantes (Arnold, 2010; ChenYang-Engineering, 2004; HitachiMetals, 2010) e validados através dos apresentados em (Furlani, 2001), dizendo sempre respeito a ligas obtidas por sinterização.

Tabela 2 – Principais propriedades das classes de ímanes permanentes.

Material	B_r (T)	H_c (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	T_c (°C)	Custo (€/kg)	Densidade (kg/m ³)	Energia potencial/ unidade de custo ⁽¹⁾ (J/€)
Alnico	1,24	50	42	900	32,4	7300	0,17
Ferrite	0,4	223	32	450	4,86	4500	1,46
SmCo	1,07	1400	214	750	162	8500	0,16
NdFeB	1,35	1200	350	310	81	7700	0,56

(1) $\frac{\text{Energia potencial}}{\text{Unidade de custo}} = \frac{1}{\text{Custo}} \frac{1}{\text{Densidade}} (BH)_{max}$

4. Projeto magnético

Recuperam-se agora as curvas de desmagnetização dos ímanes permanentes, introduzidas no ponto 2, para avaliação do seu funcionamento estático e dinâmico. Esta discussão é limitada aos ímanes permanentes de TR, que apresentam curvas de desmagnetização lineares no segundo quadrante à temperatura ambiente. Com o aumento da temperatura, os ímanes sofrem uma “desclassificação” que é traduzida por ciclos histeréticos interiores ao que se obtém à temperatura ambiente, como representado na Figura 3.

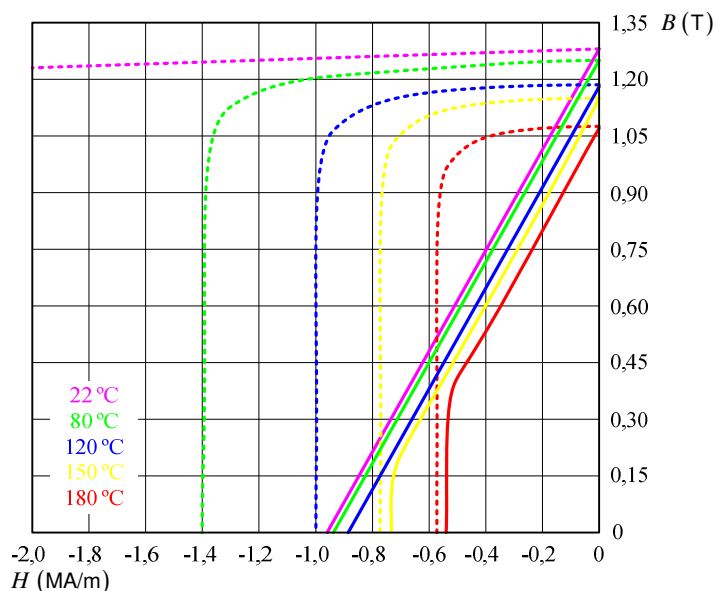


Figura 3: Características de desmagnetização e características intrínsecas do material magnético N40UH (NdFeB) (ChenYang-Engineering, 2004)

Os desvios do ciclo histerético relativamente ao que se obtém à temperatura ambiente traduzem-se numa redução da indução magnética disponível e do campo coercivo, assim como a transferência do joelho da curva de magnetização do terceiro para o segundo quadrante. As curvas de desmagnetização representadas a traço contínuo são denominadas de características de desmagnetização normais. Adicionalmente são também representadas as curvas de desmagnetização intrínsecas (representadas no padrão tracejado) que descrevem as características de desmagnetização inerentes ao material magnético, independentemente do meio envolvente. No projeto magnético, em que se determina como o íman permanente se comporta num determinado circuito, são utilizadas as curvas de desmagnetização normais.

4.1 Funcionamento estático

O ponto de funcionamento estático de um íman permanente é ditado pela permeância externa equivalente do circuito em que aquele se insere. A sua determinação é aqui ilustrada recorrendo a um circuito magnético simples, representado na Figura 4, composto por um íman de secção quadrada s_m e comprimento na direção de magnetização l_m , peças polares de ferro macio, com permeabilidade suposta infinita, que conduzem o fluxo para um entreferro de secção s_g e comprimento l_g .

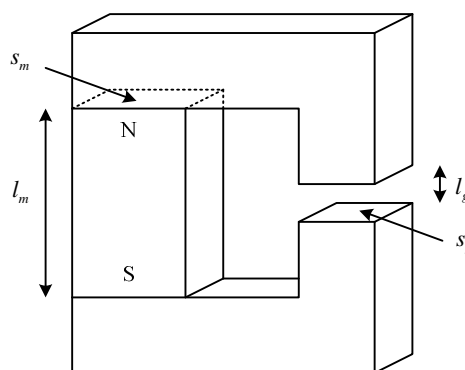


Figura 4: Circuito magnético simples, com um íman permanente e um entreferro; a permeabilidade do ferro magnético macio é suposta infinita.

No circuito magnético proposto, sujeito à hipótese simplificativa de o fluxo de fugas ser nulo, recorrendo à lei de Gauss para campos magnéticos, o fluxo que o íman fornece é

$$B_m s_m = B_g s_g \quad (1)$$

em que B_i e B_g são as induções magnéticas no íman e no entreferro, respetivamente.

Aplicando a lei de Ampère ao longo da trajetória fechada constituída pelo eixo do íman na direção de magnetização, pelo entreferro e pelas peças polares de ferro macio, nas quais se admite $H = 0$ (hipótese de permeabilidade infinita), obtém-se

$$H_m l_m + H_g l_g = 0, \quad (2)$$

em que os primeiro e segundo termos constituem as forças magnetomotrizes (fmm) no íman e no entreferro, respetivamente.

Dado que no entreferro $B_g = \mu_0 H_g$, eliminando B_g e H_g nas equações (1) e (2), obtém-se a linha de carga do circuito, que é função das dimensões do circuito:

$$\frac{B_m}{\mu_0 H_m} = -\frac{s_g l_m}{s_m l_g}. \quad (3)$$

A intersecção da linha de carga com a curva de desmagnetização do íman, modelada pela equação

$$B_m = B_r + \mu_0 \mu_r H_m \quad (4)$$

define o ponto de funcionamento estático do íman, no 2.º quadrante, tal como representado na Figura 5.

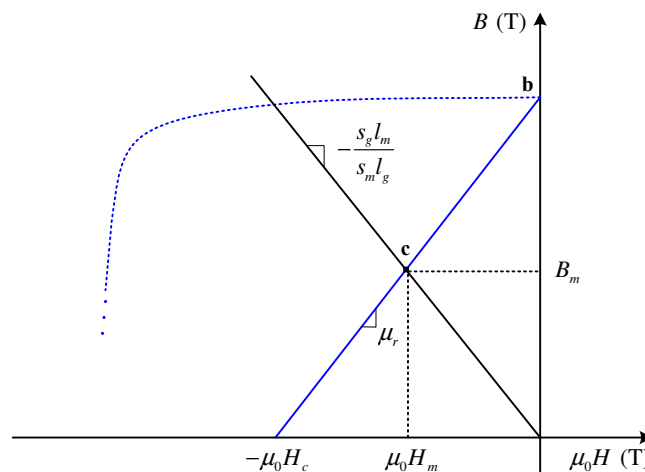


Figura 5: Ponto de funcionamento estático de um íman permanente, definido pela intersecção da linha de carga do circuito magnético e da curva de desmagnetização normal do íman.

A consideração do fluxo de fugas do íman e de uma permeabilidade finita das peças polares pode ser ponderada através de fatores de correção, definidos através

$$k_1 = \frac{\text{fluxo magnético}}{\text{fluxo útil}} > 1 \text{ e} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{\text{fmm do íman}}{\text{fmm útil}} > 1. \quad (6)$$

O efeito destes fatores no ponto de funcionamento do íman é traduzido na modificação das equações (1) e (2) para

$$B_m s_m = k_1 B_g s_g \text{ e} \quad (7)$$

$$H_m l_m + k_2 H_g l_g = 0. \quad (8)$$

A linha de carga correspondente é

$$\frac{B_m}{\mu_0 H_m} = -\frac{k_1 s_g l_m}{k_2 s_m l_g}. \quad (9)$$

De acordo com a equação (7), a redução do fluxo magnético devido ao fluxo de fugas pode ser compensado aumentando a área do íman, o que mantém o ponto de funcionamento. De forma similar, através da equação (8), verifica-se que uma queda significativa da fmm através das peças polares pode ser compensada aumentando o comprimento do íman na direção de magnetização. Dependendo das geometrias envolvidas, a determinação exata dos fatores de correção pode ser uma tarefa complexa, sendo frequente o recurso a ferramentas numéricas.

A análise analítica da distribuição do fluxo magnético nos diversos percursos oferecidos por um circuito é realizada recorrendo ao circuito magnético equivalente. O modelo de um íman permanente pode ser obtido utilizando as equações (1) e (4). O fluxo que o íman está a fornecer a um circuito é

$$\phi = B_m s_m = B_r s_m + \mu_0 \mu_r s_m H_m \quad (10)$$

Esta equação pode ser reescrita como

$$\phi = \phi_r + P_m F_m, \quad (11)$$

Onde $\phi_r = B_r s_m$ é a fonte de fluxo constante e $P_m = \frac{1}{R_m} = \mu_0 \mu_r \frac{s_m}{l_m}$ é a permeância de fugas do íman.

A equação (11) sugere como modelo para o íman uma fonte de corrente em paralelo com uma permeância, de acordo com a Figura 6 (a) ou no seu equivalente de Thévenin (Figura 6 (b)).

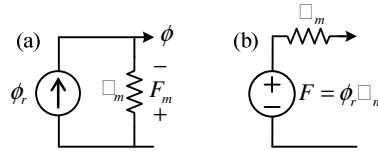


Figura 6: Modelo de um íman permanente; (a) equivalente de Norton, (b) equivalente de Thévenin.

O circuito simples proposto na Figura 4 e a Figura 5 podem ainda ser utilizados para esclarecer a transferência de energia num circuito magnético quando este passa da remanência, ponto **b**, para o ponto de funcionamento no segundo quadrante, o ponto **c**. A variação de energia é expressa por (Campbell, 1994)

$$-\int_b^c B dH = \int_b^c H dB - (BH)_b^c, \quad (12)$$

ou seja, o trabalho realizado pelo campo magnético desmagnetizante $\int B dH$ é igual à soma da variação da energia potencial (BH) e da energia libertada pelo íman, $\int H dB$, por unidade de volume, de acordo com a Figura 7.

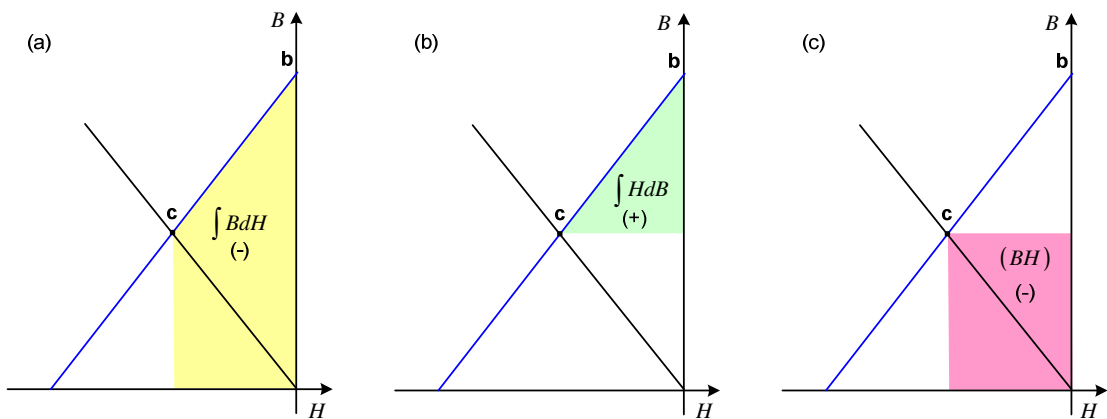


Figura 7: Variação por unidade de volume da (a) energia associada ao campo magnético, (b) energia interna e (c) da energia potencial.

A energia libertada pelo íman de volume $l_m s_m$, que está a funcionar num ponto **c**, é $l_m s_m \int H dB$. Este resultado é generalizável ao campo magnético em qualquer volume; no entreferro do circuito magnético simplificado considerado, com volume $l_g s_g$, a energia magnética é

$$W_g = l_g s_g \int \frac{B_g}{\mu_0} dB_g = \frac{1}{2} l_g s_g B_g H_g . \quad (13)$$

Substituindo em (13) as equações (1) e (2), demonstra-se que a energia libertada pelo íman e entregue ao entreferro corresponde a metade do produto energético associado ao ponto de funcionamento do íman permanente:

$$W_g = \frac{1}{2} l_g s_g B_g H_g = -\frac{1}{2} l_m s_m B_m H_m . \quad (14)$$

A energia libertada é função do produto energético, o que justifica o interesse de se trabalhar no ponto correspondente a $(BH)_{max}$.

Redesenhando a Figura 7, demonstra-se que o trabalho realizado pelo campo magnético desmagnetizante imposto pelo circuito externo ao íman é passível de ser representado como a soma da energia libertada para o entreferro por unidade de volume e a área restante, definida pela linha de carga, modela a variação de energia no íman, também por unidade de volume (Figura 8).

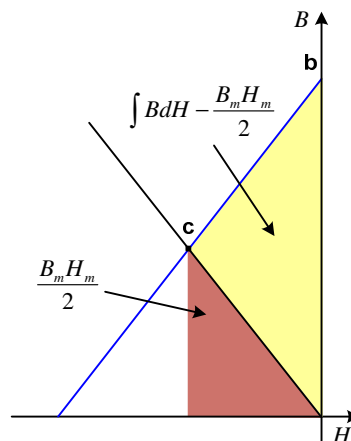


Figura 8: Variação por unidade de volume da energia aplicada ao íman permanente pelo campo magnético.

4.2 Funcionamento dinâmico

Alterações da linha de carga do circuito magnético, quer por variação do declive, quer por variação da abcissa na origem, impõem ao íman permanente um regime de funcionamento dinâmico, no qual o ponto de funcionamento percorre ciclos histeréticos menores, entre **a** e **b**, em torno do ponto de funcionamento estático, de acordo com a Figura 9.

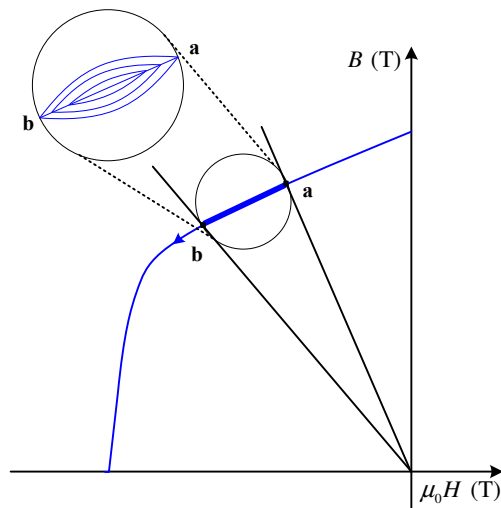


Figura 9: Funcionamento dinâmico de um ímã permanente em torno de um ponto de funcionamento na zona linear da característica de desmagnetização.

Estes ciclos são muito estreitos, desde que durante o funcionamento dinâmico o ponto de funcionamento se mantenha na zona linear da característica e o declive associado é muito próximo do da curva de desmagnetização.

A aplicação de campos magnéticos externos que levem a uma excursão do ponto de funcionamento para o primeiro quadrante normalmente não tem consequências nefastas para o ímã, pois o campo é aplicado na direção de magnetização. Todavia, variações na linha de carga que transfiram o ponto de funcionamento para além da zona linear da característica de desmagnetização, provocam alterações irreversíveis no ímã permanente e o funcionamento na curva de desmagnetização original só é possível por remagnetização do material, o que não é praticável na maioria das aplicações.

Na Figura 10, o ímã permanente está inicialmente a trabalhar no ponto **a**; admitindo uma variação da linha de carga por variação da geometria do circuito (linha 1) ou pela presença de um campo magnético desmagnetizante (linha 2), tal que o ponto de funcionamento se desloque para **b**, abaixo do joelho na curva de desmagnetização, o ímã sofre uma alteração irreversível, pois quando se restauram as condições de funcionamento originais, o ponto de funcionamento não regressa a **a**, mas sim a **c**, num ciclo histerético interior ao original, no qual o ímã funcionará reversivelmente, desde que as variações da linha de carga não imponham um ponto de funcionamento para além de **b**.

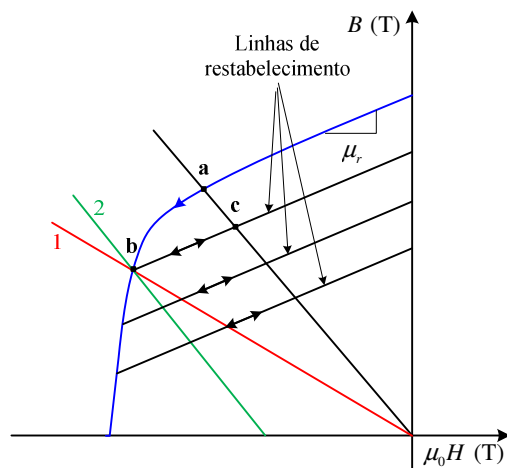


Figura 10: Funcionamento dinâmico de um ímã permanente com alterações irreversíveis.

Para cada ponto de funcionamento abaixo do joelho da curva de desmagnetização, define-se um ciclo histerético interior, com induções de remanência inferiores à original; as porções destes ciclos que pertencem ao 2.º quadrante definem as linhas de restabelecimento, consideradas lineares e com o mesmo declive que a curva de desmagnetização na zona linear, independentemente da sua ordenada na origem. O declive das linhas de restabelecimento é uma característica fundamental de um ímã permanente, explicitado pela permeabilidade magnética de restabelecimento relativa, μ_r , com valores típicos entre 1 e 3,5 (Gieras, Wing, 2002).

As alterações nas propriedades magnéticas de um ímã permanente após este ter sido completamente magnetizado podem ser provocadas, além das variações da linha de carga impostas pelo circuito magnético em que aquele se insere, por variação da temperatura, como apresentado na Figura 3, por alterações metalúrgicas na estrutura (corrosão e/ou pressão) e pelo tempo de exposição às condições adversas.

O projeto magnético de um ímã permanente deve envolver a quantificação das perdas irreversíveis e o seu funcionamento deve ser confinado à zona linear da sua característica de desmagnetização, na qual as alterações são reversíveis e o desempenho (fluxo produzido, eg) não desça abaixo dos níveis aceitáveis. Como já foi referido, as dimensões do ímã podem ser utilizadas para controlar as excursões do ponto de funcionamento com a temperatura, por variação do declive da linha de carga. Para qualquer material magnético permanente, há uma razão comprimento/secção crítica, abaixo da qual

as alterações reversíveis para uma determinada gama de temperaturas passam a ser irreversíveis.

5. Conclusão

No contexto tecnológico atual, os materiais magnéticos permanentes desempenham um papel preponderante em diversas vertentes da engenharia. Este trabalho expõe os principais critérios para a seleção de materiais magnéticos permanentes e as bases do projeto de circuitos magnéticos, com recurso às características de desmagnetização na avaliação do funcionamento de um íman. A seleção dos materiais magnéticos obedece, obviamente, às propriedades magnéticas, mecânicas e térmicas dos materiais magnéticos duros, em função da aplicação, sempre associada a uma análise custo - benefício.

A abordagem ao projeto magnético aqui enunciada constitui uma solução preliminar no projeto magnético, efetuada numa base de parâmetros concentrados. A jusante desta abordagem analítica e simplificativa, deverá ser efetuada uma análise mais detalhada da distribuição do fluxo magnético, para investigar a validade de hipóteses simplificativas assumidas a montante e também para considerar efeitos como a saturação, efeito pelicular, indução de correntes de Foucault, etc. Nestes requisitos, e com geometrias complexas, os problemas em análise são formulados através de equações diferenciais parciais, resolúveis numericamente. Estas metodologias são atualmente simplificadas em virtude da generalização dos softwares comerciais propostos para o efeito. Não obstante, o projeto por recurso a estas ferramentas tem que ser sempre precedido de uma abordagem preliminar, solucionando o problema numa macro-perspetiva enquanto as soluções numéricas complementam aquela, numa micro-perspetiva.

Referências

- Arnold; 2010. Arnold Magnetic Technologies Corp. <http://www.arnoldmagnetics.com/> (Cited 29 June, 2010).
- Buelow, N. L., *et al.*; 2005. Properties of Polymer Bonded Permanent Magnets Made with Melt-Spun Mixed Rare Earth Iron Boron. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*. pp. 308-319.
- Campbell, P.; 1994. Permanent Magnet Materials and their Application. Cambridge University Press. p. 207.
- ChenYang-Engineering; 2004. Neodymium Iron Boron Magnets. <http://www.cy-magnetics.com/CY-Mag-NdFeB.pdf> (Cited June, 2004).
- Constantinides, S.; 2003. Magnet Selection. Arnold Magnetic Technologies Corp. Available from <http://www.arnoldmagnetics.com/Content1.aspx?id=4828>.
- Constantinides, S.; 2007. Status of the Chinese Magnet Industries and its Likely Impact on Western Magnet Users. In *SMMA Fall Technical Conference*. October, 2007.
- Croat, J. J., *et al.*; 1984. Pr-Fe and Nd-Fe-Based Materials: A New Class of High-Performance Permanent Magnets. *Journal of Applied Physics*. Vol. 55, n.º 6 (March, 1984). pp. 2078-2082.
- Deshpande, U. S.; 2003. Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines - A Review. In *IEEE Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*. Madison, Estados Unidos, 1-4 June, 2003. Vol.1, pp. 509-515.
- El-Moneim, A. A., *et al.*; 2002. The influence of Co and Ga Additions on the Corrosion Behavior of Nanocrystalline NdFeB magnets. *Corrosion Science*. Vol. 44, n.º 8. pp. 1857-1874.
- Furlani, E. P.; 2001. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Academic Press. p. 518.
- Gieras, J. F.; Wing, M.; 2002. Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications, 2nd Edition. Marcel Dekker. p. 590.
- Grönfeld, M.; 2003. Review on Bonded Magnets. Kluwer Academic Publishers. Available from. p. 1-12.

Groot, C. H. de, *et al.*; 1998. Two-Powder Nd₂Fe₁₄B Magnets with DyGa-Addition. *Journal of Applied Physics*. Vol. 83, n.^o 1. pp. 388-393.

Hellemans, A.; Bunch, B.; 1991. *The Timetables of Science*. Simon and Schuster. p. 660.

Hirosawa, S.; Sagawa, M.; 1988. Effects of Co Addition on the Temperature Dependence of the Intrinsic Coercivity in Pr-Fe-B Sintered Magnets. *Journal of Applied Physics*. Vol. 64, n.^o 10. pp. 5553-5555.

HitachiMetals; 2010. NEOMAX® High Energy Neodymium-Iron-Boron Permanent Magnets. <http://www.hitachi-metals.co.jp/e/index.html> (Cited 29 June, 2010).

Li, W. F., *et al.*; 2009. The Origin of Coercivity Decrease in Fine Grained Nd-Fe-B Sintered Magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 321, n.^o 8. pp. 1100-1105.

Mahadi, W. N.; Adi, S. R.; Nor, K. M.; 2004. Thermal Analysis Of Neodymium Iron Boron (NdFeB) Magnet in the Linear Generator Design. In *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004)*. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004).

Petrie, R.; 1995. Permanent Magnet Material from Loadstone to Rare Earth Cobalt. In *Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*. Rosemont, USA, 18-21 September, 1995. pp. 63-64.

Plusa, D., *et al.*; 2008. On the Magnetic Properties of Bonded Magnets Made From a Mixture of Nd(Fe,Co)B and Strontium Ferrite or Alnico Powder. *Reviews on Advanced Materials Science (RAMS)*. Vol. 18, n.^o 6. pp. 541-544.

Roozee, J.; 2002. How to Select the Appropriate Permanent Magnet Material. Arnold Magnetic Technologies Corp., TN 0205. Available from http://www.arnoldmagnetics.com/mtc/tech_notes.htm.

Sagawa, M., *et al.*; 1984. New Material for Permanent Magnets on a Base of Nd and Fe. *Journal of Applied Physics*. Vol. 55, n.^o 6 (March, 1984). pp. 2083-2087.

Saliba-Silva, A., *et al.*; 2004. Improving the Corrosion Resistance of NdFeB Magnets: an Electrochemical and Surface Analytical Study. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 185, n.^o 2-3. pp. 321-328.

Strnat, K. J.; 1990. Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 78, n.º 6 (June, 1990). pp. 923-946.

Taylor, M. G.; Davies, B. E.; Harris, I. R.; 2002. A comparative Study of the Sintering Behaviour of NdFeB and PrFeB for Permanent Magnet Applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 242-245, n.º 2. pp. 1375-1377.

Tokunaga, M., *et al.*; 1988. Magnetizability of Nd-Fe-B-type Magnets with Dy Additions. *Journal of Applied Physics*. Vol. 63, n.º 8. pp. 3510-3512.

Vial, F., *et al.*; 2002. Improvement of Coercivity of Sintered NdFeB Permanent Magnets by Heat Treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 242-245, n.º 2. pp. 1329-1334.

Yu, S.; Chen, L.; 2006. Preparation Technology and Performances of Zn-Cr Coating on Sintered NdFeB Permanent Magnet. *Journal of Rare Earths*. Vol. 24, n.º 2. pp. 223-226.

Zhang, S.-Y., *et al.*; 1999. Hard Magnetic Properties and Microstructure of Melt-Spun $\text{Sm}_2\text{Fe}_{15-x}\text{Cu}_x\text{Ga}_2\text{C}$ ($x=0$ and 0.5) Ribbons. *Journal of Applied Physics*. Vol. 85, n.º 5. pp. 2763-2767.

Zhu, Z. Q., *et al.*; 2000. Powder Alignment System for Anisotropic Bonded NdFeB Halbach Cylinders. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 36, n.º 5 (September, 2000). pp. 3349-3352.

Bibliografia

Buschow, K. H.; 2008. Handbook of Magnetic Materials, Volume 17. North-Holland, Elsevier. p. 587.

Furlani, E. P.; 2001. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Academic Press. p. 518.

McCaig, Malcolm; Clegg, Alan; 1987. Permanent Magnets in Theory and Practice, 2nd Edition. New York: Wiley. p. 415.

Moskowitz, L. R.; 1995. Permanent magnet design and application handbook, 2nd Edition. Krieger. p. 961.

Parker, R. J.; 1990. Advances in Permanent Magnetism. John Wiley & Sons. p. 334.