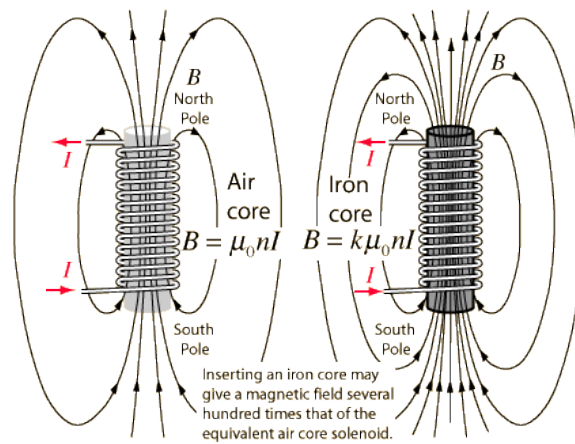


**Referências bibliográficas:**  
**H.** – 33-7, 34-2, 34-3, 34-6, 34-7, 34-8, 36-6  
**S.** – 29-9, 31-2, 32-7  
**T.** – 27-1, 27-2, 27-3, 27-4, 27-5

**Aula 26 – Materiais magnéticos**

Recordação: o campo magnético no interior de um solenóide com núcleo de ar, com  $n$  espiras por unidade de comprimento percorridas por uma corrente  $i$

$$B = \mu_0 n i$$


Se colocarmos um núcleo de ferro no interior do solenóide, o campo magnético é multiplicado por uma constante  $k$ , em relação ao valor obtido com núcleo de ar. A constante  $k$  é chamada de “permeabilidade relativa” e depende, em geral, do campo magnético gerado [a tabela abaixo refere-se a um campo magnético de 2 mT]. Os materiais para os quais  $k$  é muito maior do que 1 são ditos “ferromagnéticos” .

Material ferromagnético	Permeabilidade relativa (k)
Ferro	200-600
Níquel	100
Permalloy (78,5 % Ni, 21,5 % Fe )	8000
Mumetal (75 % Ni, 18 % Fe, 5 % Cu, 2 % Cr)	20000

Como  $B_{\text{ferro}} = k B_{\text{ar}}$ , podemos obter fórmulas para o campo magnético em qualquer material magnético substituindo a constante  $\mu_0$  por  $k \mu_0$

**Permeabilidade magnética do vácuo:**  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$

**Permeabilidade magnética do material:**  $\mu = k \mu_0$

Nas fórmulas que envolvem  $\mu_0$ , considerando o ar como meio, se considerarmos agora um material magnético, substituímos  $\mu_0$  por  $\mu$ . Por exemplo, a densidade de energia magnética dentro de um material magnético é

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu}$$

Os materiais magnéticos, em geral, são classificados segundo os valores assumidos pela sua permeabilidade relativa:

- Paramagnéticos:  $k$  é ligeiramente maior que 1,  $\mu$  é ligeiramente maior que  $\mu_0$ ;
- Diamagnéticos:  $k$  é ligeiramente menor que 1,  $\mu$  é ligeiramente menor que  $\mu_0$ ;
- Ferromagnéticos:  $k$  é muito maior que 1,  $\mu$  é muito maior que  $\mu_0$ ;

Usamos também a chamada “susceptibilidade magnética”:  $\chi = k - 1$

Se a susceptibilidade magnética é quase zero, o material responde muito pouco ao campo magnético externo. A susceptibilidade magnética da maioria dos sólidos e líquidos à temperatura ambiente é praticamente nula (incluindo o corpo humano!). Por esse motivo, observamos mais os efeitos magnéticos em materiais ferromagnéticos.

Material paramagnético	Susceptibilidade magnética	Material diamagnético	Susceptibilidade magnética
Oxigênio	0,19	Água	-0,91
Sódio	0,72	Cobre	-1,0
Magnésio	1,2	Grafite (carbono)	-1,6
Alumínio	2,2	Prata	-2,6
		Mercúrio	-2,9

**Problema resolvido:** Considere um solenóide com 40 cm de comprimento, área da seção reta de  $8,0 \text{ cm}^2$ , cujo enrolamento consiste de 300 voltas de fio com uma corrente de 1,2 A, e um núcleo de Ferro com  $k = 600$ . Calcule: (a) o campo magnético no seu interior; (b) a energia magnética no seu interior.

*Solução:* (a)  $B = k (\mu_0 N i / \ell) = 600 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 300 \times 1,2 / 0,40 = 1,13 \times 10^{-3} \text{ T}$

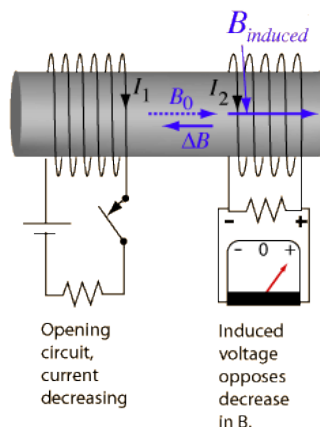
(b) a densidade de energia magnética no núcleo de Ferro é

$u = B^2 / 2\mu = B^2 / 2k \mu_0 = (1,13 \times 10^{-3})^2 / 2 \times 600 \times 4\pi \times 10^{-7} = 2,66 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$

tal que a energia seja a densidade multiplicada pelo volume do núcleo de Ferro

$U_B = u \times \text{vol} = u A \ell = 2,66 \times 10^{-3} \times 8,0 \times (10^{-2})^2 \times 0,40 = 8,51 \times 10^{-7} \text{ J}$

**Problema proposto:** O fluxo magnético em um toróide aumenta de 0,65 mWb para 0,91 mWb quando colocamos um núcleo ferromagnético. Qual a permeabilidade relativa desse material? Resposta: 1,40.

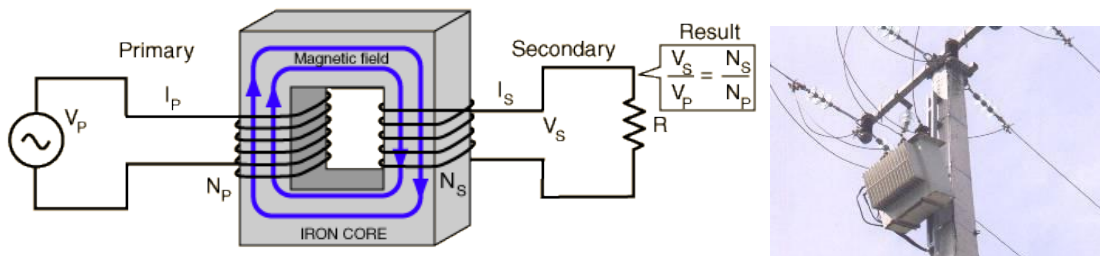


**Indução mútua:** quando a mudança na corrente em uma bobina provoca uma fem induzida em outra bobina, usualmente acoplada à primeira por meio de um núcleo

ferromagnético. A fem induzida em uma bobina provoca, pela lei de Lenz, um campo magnético que tende a se opor à causa que o produziu. Ex.: corrente em 1 diminui, a corrente em 2 provoca um campo induzido que reforça o campo produzido pela corrente em 1 (no mesmo sentido deste). O núcleo favorece a indução mútua pois concentra as linhas de força e aumenta o acoplamento entre as bobinas (enrolamentos).

**Transformador:** possui dois enrolamentos ligados por um núcleo de Ferro, o primário com  $N_P$  voltas de fio e o secundário com  $N_S$  voltas. No primário estabelece-se uma tensão  $V_P$  que é, em geral, variável com o tempo. Se for uma tensão alternada (como a da rede elétrica) então  $V_P = V_0 \cos(\omega t)$ , onde  $\omega = 60 \text{ Hz}$  é a frequência da rede, e  $V_0$  é a amplitude. A corrente elétrica no primário,  $I_P$ , provoca um campo magnético dentro do enrolamento. Como a corrente (assim como a tensão) varia com o tempo, haverá um fluxo magnético  $\Phi$  também variável. Pela lei de Faraday, o módulo da tensão no primário será

$$V_P = N_P \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



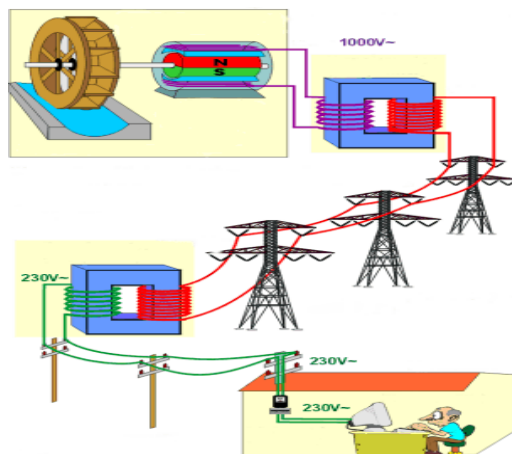
Por outro lado, a função do núcleo de ferro é concentrar o fluxo magnético e transmiti-lo ao enrolamento secundário, onde a tensão é  $V_S$ , cujo módulo também é dado pela Lei de Faraday

$$V_S = N_S \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Isolando a taxa de variação do fluxo em ambas as expressões temos a relação

$$\frac{V_P}{N_P} = \frac{V_S}{N_S}$$

Na rede de distribuição de eletricidade, para minimizar perdas de energia na transmissão, esta é feita sob alta tensão (da ordem de kV). Para utilização doméstica e industrial, no entanto, é necessário rebaixar a tensão, o que se consegue com o uso de transformadores convenientemente projetados.



**Problema resolvido:** Um transformador ideal (que não dissipa energia) tem 100 espiras no primário e 50 no secundário, é percorrido por uma corrente de 1,0 A, sob 110 V. Qual a corrente e a tensão no secundário?

*Solução: a tensão no secundário é dada por*

$$V_S = V_P (N_S / N_P) = 110 (50/100) = 55 \text{ V}$$

*Como o transformador por hipótese não dissipa energia, a potência elétrica no primário deve ser igual à potência elétrica no secundário:*

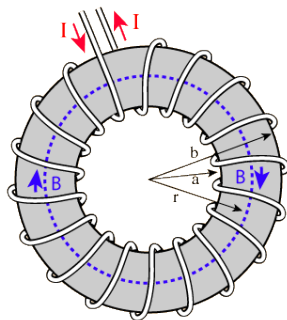
$$P = V_P i_P = V_S i_S$$

*Logo a corrente no secundário é dada por*

$$i_S = i_P (V_P / V_S) = 1,0 (110/55) = 2,0 \text{ A}$$

**Problema proposto:** Um transformador ideal rebaixador de tensão opera numa linha de alta tensão da Copel de 2,5 kV e fornece uma corrente de 80 A. O enrolamento primário tem 20 vezes mais espiras que o enrolamento secundário. Ache (a) a tensão no secundário; (b) a corrente no primário; (c) a potência no secundário. Respostas: (a) 0,13 kV; (b) 4,0 A; (c) 10 kW.

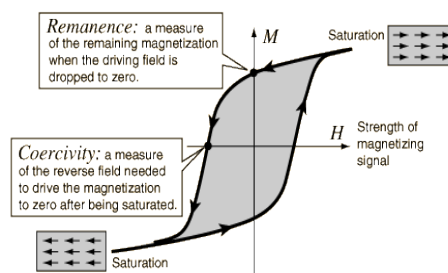
### Histerese magnética no anel de Rowland



Vimos na aula passada que, na ausência do núcleo de Ferro, o campo magnético no interior do toróide com N espiras e corrente elétrica i é dado, aproximadamente, por

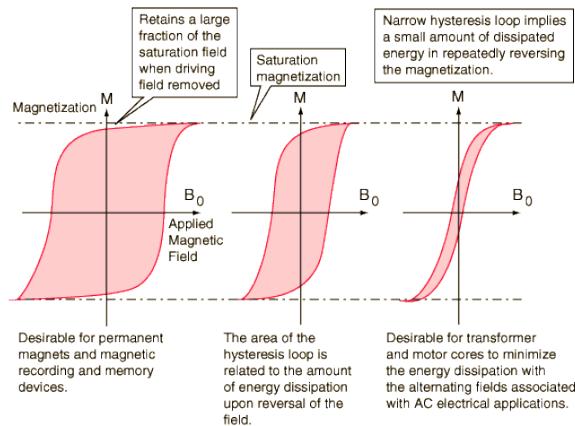
$$B_0 \approx \frac{\mu_0 N i}{2\pi r}$$

para um ponto situado à distância média r do eixo do toróide. Introduzindo um núcleo de material ferromagnético o campo é aumentado de um fator (grande) igual à permeabilidade relativa do material e denotado por B, o qual pode ser medido por meio de uma bobina secundária envolvendo uma parte do toróide. A contribuição do núcleo será, portanto  $B_M = B - B_0$ . Ao variar a corrente no toróide desde zero até um valor máximo (saturação positiva) e depois diminuindo até um valor mínimo (saturação negativa) nós alteramos o campo  $B_0$  e podemos medir a contribuição do núcleo  $B_M$ . O gráfico resultante tem o seguinte aspecto:



$B_0$  é denotado por H, e  $B_M$  por M nessa figura.

- **Remanência:** quando o campo volta a ser zero, há uma magnetização residual;
- **Coercividade:** é o valor do campo reverso que deve ser aplicado para que a magnetização caia a zero ;
- **Histerese:** quando o campo aplicado aumenta ou diminui, a contribuição do núcleo ferromagnético muda de forma diferente (A área da curva de histerese é proporcional à energia dissipada no processo de magnetização.)



- Materiais ferromagnéticos de baixos valores da remanência e coercividade (da ordem de 2  $\mu\text{T}$ ) são adequados para núcleos de solenóides, toróides, etc. (são ditos materiais “soft”, vide tabela na pg. 1): as curvas de histerese são “magras”, de modo a haver pouca dissipação de energia.
- Materiais ferromagnéticos de altos valores de remanência e coercividade são adequados para a produção de ímãs permanentes: as curvas de histerese são “gordas” para que haja uma magnetização residual alta.

Material ferromagnético	Remanência (T)	Coercitividade (T)
Alnico (Al + Ni + Co)	0,6	0,07
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	1,2	1,2
Óxido de Bário-Ferro	0,36	0,36
$\text{Sm}_2\text{Co}_5$	0,83	1,0

**Teoria microscópica do magnetismo:** Os dipolos magnéticos são as estruturas magnéticas mais simples na Natureza. Há dois tipos de dipolos magnéticos na matéria:

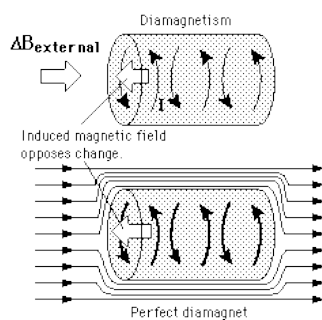
(a) **momentos de dipolo orbitais** - os elétrons (no modelo de Bohr) têm órbitas circulares de raio  $r$  em torno do núcleo, gerando uma corrente elétrica  $i = e/T$ , onde  $e$  é a carga elétrica elementar e  $T = 1/f$  é o inverso da giro-frequência. O momento de dipolo magnético orbital é  $\mu = i A = (ef)(\pi R^2)$ , onde  $R$  é o raio da órbita do elétron.

(b) **momentos de dipolo de spin:** além do momento orbital, os elétrons também têm um momento de dipolo magnético intrínseco devido ao seu spin. Classicamente, se o elétron fosse uma esfera, o spin seria equivalente à rotação do elétron em torno de um eixo. No entanto, como o elétron é uma partícula puntiforme, o spin deve ser entendido como uma propriedade intrínseca do mesmo.

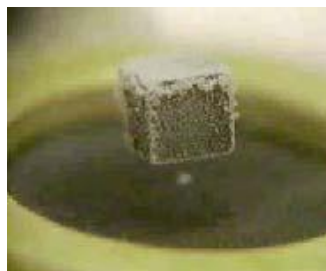
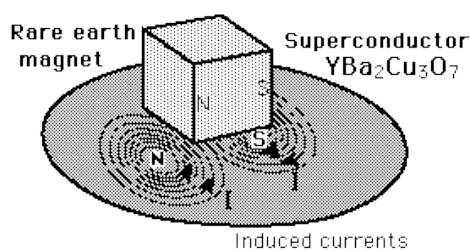
Os momentos de dipolo são grandezas vetoriais. A sua resultante (superposição de um grande número de contribuições microscópicas) determina as propriedades magnéticas macroscópicas dos materiais.



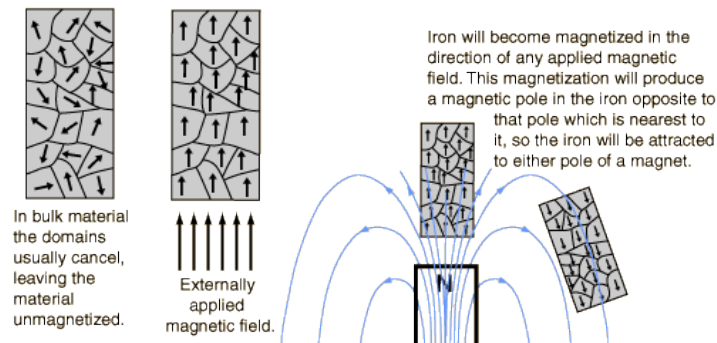
**1. Paramagnetismo:** Na ausência de campo magnético externo, os momentos de dipolo magnético (tanto orbitais como de spin) estão apontando em direções aleatórias de modo que sua resultante é praticamente nula (“porco espinho vetorial”). No entanto, ao ser aplicado um campo magnético externo, os momentos de dipolo magnético tendem a se alinhar ao longo das linhas de força e temos um momento magnético resultante por unidade de volume, que chamamos de “magnetização” do material. Ela é diretamente proporcional ao campo magnético externo  $B$  e inversamente proporcional à temperatura do material  $T$  (lei de Curie). Como o alinhamento dos momentos é parcial devido à agitação térmica, a magnetização do material contribui pouco e o campo externo é apenas ligeiramente reforçado, donde a susceptibilidade magnética é ligeiramente superior a um nos materiais paramagnéticos.



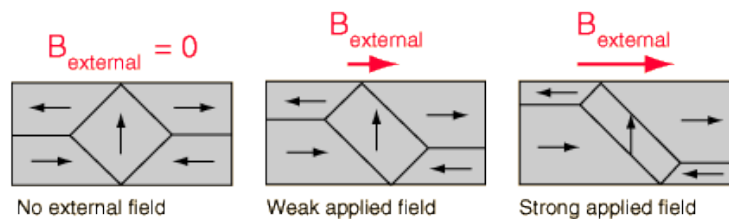
**2. Diamagnetismo:** É uma consequência, na escala atômica, da Lei de Lenz. Os momentos de dipolo magnético são induzidos por um campo magnético externo, de modo que o campo magnético resultante desses dipolos induzidos deve ser opor ao campo externo. Logo, a magnetização é oposta à direção do campo externo e enfraquece sua ação, e consequentemente a susceptibilidade magnética é ligeiramente inferior a um. Macroscopicamente amostras diamagnéticas são repelidas pelo campo magnético (não-uniforme) de um ímã, o que tem aplicações práticas importantes (levitação magnética). Um supercondutor (como cerâmicas com base de Ítrio) é um material diamagnético perfeito, pois todo o fluxo magnético é expulso do seu interior (efeito Meissner): se tentamos magnetizá-lo por um campo externo as correntes internas geram um campo que anula o campo externo e  $\mathbf{B} = \mathbf{0}$  no seu interior. A levitação ocorre pois os pólos em contacto tem os mesmos nomes (Norte-Norte ou Sul-Sul) e se repelem mutuamente.



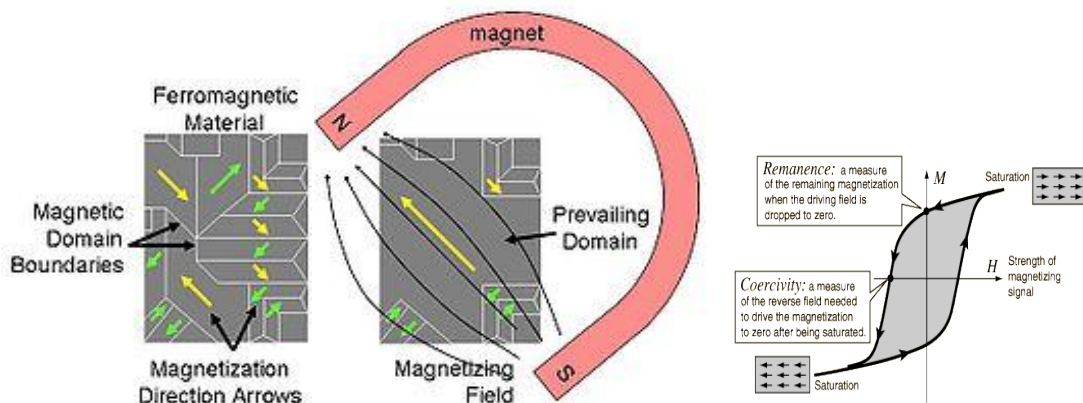
**3. Ferromagnetismo.** Num material ferromagnético há uma magnetização (momento de dipolo magnético resultante, basicamente devido ao spin) residual, mesmo na ausência do campo magnético externo. Esse efeito decorre de uma interação entre os momentos de dipolo magnético (“acoplamento de troca”) que tende a mantê-los alinhados, fazendo com que o campo magnético seja substancialmente reforçado pela grande magnetização obtida. A susceptibilidade magnética será muito maior do que um.



Os momentos de dipolo alinham-se em regiões chamadas “domínios”. Na ausência de campo externo esses domínios estão aleatoriamente alinhados e a magnetização resultante é nula. Para um campo magnético aplicado os momentos dentro de cada domínio se alinham ao campo, provocando a intensa magnetização resultante, o que pode ser acompanhado também de uma alteração no tamanho dos domínios, como ilustrado pela figura abaixo:



**Como se faz um ímã?** Num objeto de ferro (ou outro material ferromagnético) os momentos de dipolo magnético nos domínios apontam na mesma direção. Mas como os domínios estão aleatoriamente distribuídos, o campo magnético resultante é pequeno ou mesmo quase nulo. No entanto, imergindo o objeto num campo magnético, os momentos de dipolo sofrem torques magnéticos e tendem a se alinhar com o campo externo, empurrando as paredes de domínio e levando a uma magnetização líquida. Mesmo com campo externo nulo há uma magnetização residual (“remanência”), levando a um ímã permanente.



Algumas características importantes dos ímãs permanentes são: (a) Resistência mecânica a choques; (b) Efeito do Calor: acima de uma certa temperatura (dita “temperatura de Curie”), a interação de longo alcance que caracteriza os materiais ferromagnéticos é perdida). Para o ferro, por exemplo, a Temp. de Curie é de 1043 K, ou 770 °C; (c) Efeito da Umidade: corrosão; (d) Efeito de campos desmagnetizantes: assim como magnetizamos um material colocando-o em um campo externo, podemos desmagnetizá-lo se o campo externo for oposto. Vimos na aula passada que essa propriedade é chamada “coercitividade” do ímã ( o campo que desmagnetiza o material). Esse efeito é particularmente importante na hora de armazenar os ímãs (deve-se evitar, por exemplo, guardar ímãs com pólos de mesmo nome perto um do outro)

### Tipos de ímãs permanentes:



**1. Ímãs de cerâmica e ferrite:** são encontrados em ímãs de geladeira, auto-falantes, etc. Seu campo não é muito intenso pois têm baixa remanência (0,39 T) e são mecanicamente frágeis, pois quebram-se com facilidade. Os seus pólos dependem do tipo de geometria: nas barras retas ou em forma de “U” os pólos estão nas extremidades; nos anelares estão nas faces opostas; nos ímãs de geladeira estão em faixas justapostas (NSNSNS....). As temperaturas de Curie são da ordem de 460 °C, acima dos regimes de trabalho em que esses ímãs são empregados. São resistentes à corrosão e a campos desmagnetizantes (sua coercividade é 0,32 T).



**2. Ímãs de Alnico** (liga metálica formada de 10 % de Alumínio, 20 % de Níquel, e 15% de Cobalto, mais Ferro, Cobre e um pouco de Titânio): são os ímãs mais comuns em laboratórios didáticos, pois têm alta remanência (1,25 T). Têm a vantagem de não serem mecanicamente frágeis (resistem bem a impactos). Sua temperatura de Curie é da ordem de 860 °C. Como defeito são extremamente fáceis de desmagnetizar (coercividade de apenas 0,064 T). Para evitar isso, deve-se evitar colocá-los próximos a ímãs de ferrite-cerâmica, e deve-se guardá-los com pólos de nomes diferentes próximos um do outro. Ímãs na forma de ferraduras devem ter um pedaço de metal unindo os pólos.

**3. Ímãs de Samário-Cobalto:** usados em pequenos motores para vídeo-cassete ou reprodutores de CD e DVD, pois seu campo é intenso (remanência de 1,05 T). São frágeis a impactos, com baixa temperatura de Curie (750 °C). Ao contrário do Alnico não são facilmente desmagnetizáveis (coercitividade de 0,92 T).

**4. Ímãs de Neodímio-Ferro-Boro:** são ímãs com campo magnético extremamente alto (remanência de 1,28 T), usados em fones de ouvido, drives de disco e mesmo brinquedos! Por outro lado são frágeis, sofrem facilmente corrosão e têm temperatura de Curie muito baixa (310 °C): por isso mesmo não podem ser usados em motores. No entanto, são muito resistentes à desmagnetização (coercitividade de 0,32 T). Como regra geral, no armazenamento de ímãs, devemos colocar classes diferentes bem afastadas umas das outras.