

# INTRODUÇÃO AO MAGNETISMO

## 18.2 • Ferromagnetismo

18.7. Os dados a seguir são obtidos para uma liga de ferro armco durante a geração do ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário:

$H$ (ampères/m)	$B$ (weber/m <sup>2</sup> )
56	0,50
30	0,46
10	0,40
0	0,36
-10	0,28
-20	0,12
-25	0
-40	-0,28
-56	-0,50

- (a) Faça o gráfico dos dados.  
(b) Qual é a indução remanescente?  
(c) Qual é o campo coercivo?

18.8. Para o ferro armco do Problema 18.7, determine (a) a indução de saturação e (b) a magnetização de saturação.

18.9. Os dados a seguir são obtidos para uma liga de níquel-ferro durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário:

$H$ (ampères/m)	$B$ (weber/m <sup>2</sup> )
50	0,95
25	0,94
0	0,92
-10	0,90
-15	0,75
-20	-0,55
-25	-0,87
-50	-0,95

- (a) Desenhe o gráfico dos dados.  
(b) Qual é a indução remanescente?  
(c) Qual é o campo coercivo?

18.10. Para a liga de níquel-ferro do Problema 18.9, determine (a) a indução de saturação e (b) a magnetização de saturação.

18.11. Ilustre a estrutura eletrônica e os momentos magnéticos resultantes para os elementos pesados No e Lw, que envolvem um orbital  $6d$  não-preenchido.

18.12. Vamos explorar um pouco mais a diferença entre indução, que não satura verdadeiramente, e magnetização, que satura. (a) Para o ímã tratado no Problema Prático 18.3, qual seria a indução em uma intensidade de campo de  $60 \times 10^4$  ampères/m, 10 vezes maior que a associada à indução de saturação? (b) Esboce quantitativamente o ciclo de histerese para o caso de se alternar a intensidade do campo magnético entre  $-60 \times 10^4$  e  $+60 \times 10^4$  ampères/m.

## 18.3 • Ferrimagnetismo

18.13. (a) Calcule o momento magnético de uma célula unitária de ferrita de manganês. (b) Calcule a magnetização de saturação correspondente, dado um parâmetro de rede de 0,850 nm.

18.14. Tire uma fotocópia da Figura 3.15. Rotule novamente os íons de modo que a célula unitária represente a estrutura inversa à do espinélio,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . (Não tente rotular cada sítio.)

18.15. Calcule o momento magnético da célula unitária gerada no Problema 18.14.

18.16. Estime a magnetização de saturação da célula unitária gerada no Problema 18.14.

18.17. O aspecto principal da estrutura cristalina da ferrita baseada no espinélio,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (Figura 3.15), é a tendência em direção à coordenação tetraédrica ou octaédrica dos íons metálicos por  $\text{O}^{2-}$ . Calcule a razão entre os raios para (a)  $\text{Mg}^{2+}$  e (b)  $\text{Al}^{3+}$ . Em cada caso, comente o número de coordenação correspondente. (Lembre-se de que a relação da razão entre os raios e o número de coordenação foi apresentada na Seção 2.2.)

18.18. Em relação à discussão do Problema 18.17, calcule a razão entre os raios para (a)  $\text{Fe}^{2+}$  e (b)  $\text{Fe}^{3+}$ . Em cada caso, comente sobre o número de coordenação correspondente na estrutura inversa à do espinélio da magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

### EXEMPLO DE PROBLEMA 18.3

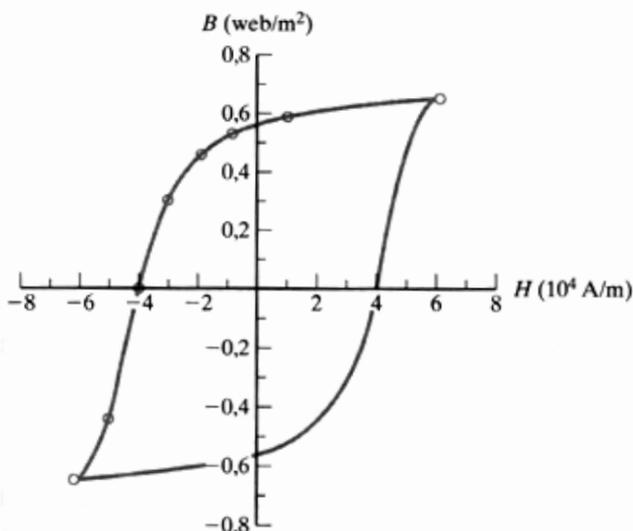
Os dados a seguir são obtidos para uma liga cunife (cobre-níquel-ferro) durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário, como aquele mostrado na Figura 18.5:

$H$ (ampères/m)	$B$ (weber/m <sup>2</sup> )
$6 \times 10^4$	0,65 (ponto de saturação)
$1 \times 10^4$	0,58
0	0,56
$-1 \times 10^4$	0,53
$-2 \times 10^4$	0,46
$-3 \times 10^4$	0,30
$-4 \times 10^4$	0
$-5 \times 10^4$	-0,44
$-6 \times 10^4$	-0,65

- (a) Desenhe o gráfico dos dados.  
 (b) Qual é a indução remanescente?  
 (c) Qual é o campo coercivo?

#### SOLUÇÃO

- (a) Um gráfico dos dados revela metade do ciclo de histerese. A metade restante pode ser desenhada como uma imagem espelho:



- (b)  $B_r = 0,56$  weber/m<sup>2</sup> (em  $H = 0$ ).  
 (c)  $H_c = -4 \times 10^4$  ampères/m (em  $B = 0$ ).

**Nota:** O uso do sinal negativo para  $H_c$  é um pouco arbitrário devido à simetria do ciclo de histerese.

### PROBLEMA PRÁTICO 18.2

No Exemplo de Problema 18.2, ilustramos a estrutura eletrônica e os momentos magnéticos resultantes para os orbitais  $4d$  de uma série de metais de transição. Produza uma ilustração semelhante para os orbitais  $5d$  da série Lu até Au.

### PROBLEMA PRÁTICO 18.3

Conforme indicado no início da Seção 18.2, a magnetização, em vez da indução, é a quantidade que se satura durante a histerese ferromagnética. (a) Para o caso dado no Exemplo de Problema 18.3, qual é a indução de saturação? (b) Qual é a magnetização de saturação nesse ponto?

### 18.3 Ferrimagnetismo

Ferromagnetismo é a base da maioria dos ímãs metálicos úteis a serem discutidos na Seção 18.4. Para os ímãs cerâmicos (Seção 18.5), um mecanismo ligeiramente diferente está envolvido. O comportamento de histerese, como mostra a Figura 18.5, é basicamente o mesmo. No entanto, a estrutura cristalina das cerâmicas magnéticas mais comuns leva a algum **emparelhamento de spins antiparalelos** (onde antiparalelo é definido como paralelo, mas em direção oposta), reduzindo, assim, o momento magnético líquido abaixo do que é possível nos metais. Esse fenômeno semelhante é diferenciado do ferromagnetismo por uma grafia ligeiramente diferente, **ferrimagnetismo**. Como a natureza da estrutura e do movimento de domínios (associada à histerese, como mostra a Figura 18.11) não é diferente, vamos passar para a distinção que ocorre em escala atômica. Os ímãs cerâmicos mais importantes comercialmente estão associados à estrutura cristalina do *espinélio* ( $MgAl_2O_4$ ), que foi ilustrada na Figura 3.15. Essa foi uma das estruturas cristalinas mais complexas explicadas no Capítulo 3. A célula unitária cúbica contém 56 íons, dos quais 32 são ânions  $O^{2-}$ . O comportamento magnético está associado às 24 posições dos cátions restantes. Naturalmente, o próprio espinélio é não-magnético, pois nem o  $Mg^{2+}$  nem o  $Al^{3+}$  são íons de metais de transição. Contudo, alguns compostos que contêm íons de metais de transição se cristalizam nessa estrutura. Um número ainda maior se cristaliza na estrutura, intimamente relacionada, inversa à do *espinélio*, também discutida na Seção 3.3. Para a estrutura do espinélio 'normal', os íons divalentes ( $M_I^{2+}$ ) são tetraedricamente (quatro vezes) coordenados por íons  $O^{2-}$ , e os íons trivalentes ( $M_{II}^{3+}$ ) são octaédricamente coordenados (seis vezes). Essa estrutura corresponde a 8 íons divalentes e 16 trivalentes por célula unitária. Para a estrutura inversa à do espinélio, os íons trivalentes ocupam os sítios tetraédricos e metade dos sítios octaédricos. Os íons divalentes ocupam a metade restante dos sítios octaédricos. Essa estrutura corresponde aos 16 íons trivalentes sendo igualmente divididos entre sítios tetraédricos e octaédricos. Todos os 8 íons divalentes estão, localizados em sítios octaédricos.

O modelo histórico de um material magnético é a **magnetita** ( $\text{Fe}_3\text{O}_4 = \text{FeFe}_2\text{O}_4$ ), com os íons  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  sendo distribuídos na configuração inversa à do espinélio. Nossa necessidade de realizar um inventário detalhado da distribuição de cátions entre os sítios disponíveis é devida a um fato importante: os momentos magnéticos dos cátions nos sítios tetraédricos e octaédricos são antiparalelos. Portanto, a distribuição uniforme dos íons trivalentes entre esses dois sítios na estrutura inversa à do espinélio leva ao cancelamento de sua contribuição para o momento magnético líquido para o cristal. O momento líquido, portanto, é fornecido pelos íons divalentes. O número de magnétons de Bohr fornecido por vários íons de metais de transição é resumido na Tabela 18.1. O momento magnético líquido para uma célula unitária de magnetita pode ser previsto pelo uso dessa tabela como sendo oito vezes o momento magnético do  $\text{Fe}^{2+}$  divalente ( $= 8 \times 4 \mu_B = 32 \mu_B$ ), que está em bom acordo com o valor medido de  $32,8 \mu_B$  baseado na indução de saturação para a magnetita.

#### EXEMPLO DE PROBLEMA 18.4

No texto, o momento magnético calculado para uma célula unitária de magnetita ( $32 \mu_B$ ) estava próximo do valor medido de  $32,8 \mu_B$ . Faça um cálculo semelhante para a ferrita de níquel, que tem um valor medido de  $18,4 \mu_B$ .

#### SOLUÇÃO

Assim como no caso da magnetita, existe um número igual de íons de  $\text{Fe}^{2+}$  nos sítios tetraédricos e octaédricos (antiparalelos). O momento magnético líquido é determinado unicamente pelos íons B divalentes ( $\text{Ni}^{2+}$ ). Usando a Tabela 18.1, obtemos

$$\begin{aligned} & \text{momento magnético/célula unitária} \\ &= (\text{n}^\circ \text{Ni}^{2+}/\text{célula unitária})(\text{momento Ni}^{2+}) \\ &= 8 \times 2\mu_B = 16\mu_B \end{aligned}$$

Tabela 18.1 Momento magnético de diversos íons de metais de transição

Íon	Momento ( $\mu_B$ ) <sup>a</sup>
Mn <sup>2+</sup>	5
Fe <sup>2+</sup>	4
Fe <sup>3+</sup>	5
Co <sup>2+</sup>	3
Ni <sup>2+</sup>	2
Cu <sup>2+</sup>	1

<sup>a</sup>  $\mu_B = 1$  magnéton de Bohr  
 $= 9,27 \times 10^{-24}$  ampère · m<sup>2</sup>.

**Nota:** Esse cálculo representa um erro de

$$\frac{18,4 - 16}{18,4} \times 100\% = 13\%$$

Essa discrepância é em grande parte devida a uma falta de estequiometria perfeita para a ferrita comercial, fornecendo alguma contribuição para o momento magnético líquido pelo  $\text{Fe}^{3+}$ .

#### EXEMPLO DE PROBLEMA 18.5

Qual seria a magnetização de saturação,  $|M_s|$ , para a ferrita de níquel descrita no Exemplo de Problema 18.4? (O parâmetro de rede para a ferrita de níquel é  $0,833 \text{ nm}$ .)

#### SOLUÇÃO

A magnetização é definida em relação à Equação 18.4 como a densidade volumétrica dos momentos de dipolo magnético. O momento magnético por célula unitária, assumindo a saturação (ou seja, o alinhamento paralelo de oito momentos do  $\text{Ni}^{2+}$ ), é dado no Exemplo de Problema 18.4 como  $18,4 \mu_B$ . Portanto, a magnetização de saturação é

$$\begin{aligned} |M_s| &= \frac{18,4 \mu_B}{\text{vol. da cél. unit.}} \\ &= \frac{(18,4)(9,274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2)}{(0,833 \times 10^{-9} \text{ m})^3} \\ &= 2,95 \times 10^5 \text{ A/m.} \end{aligned}$$

#### PROBLEMA PRÁTICO 18.4

Calcule o momento magnético de uma célula unitária de ferrita de cobre. (Veja o Exemplo de Problema 18.4.)

#### PROBLEMA PRÁTICO 18.5

Calcule a magnetização de saturação para a ferrita de cobre descrita no Problema Prático 18.4. (O parâmetro de rede para a ferrita de cobre é  $0,838 \text{ nm}$ .) (Veja o Exemplo de Problema 18.5.)

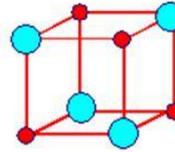
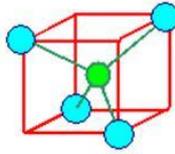
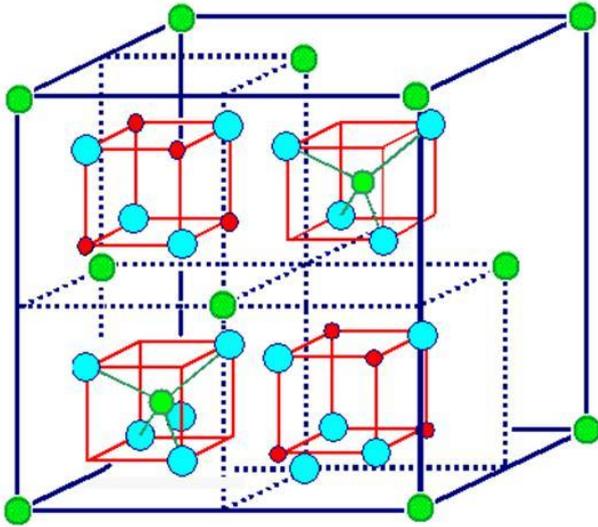
## 18.4 Ímãs metálicos

Os **ímãs metálicos** importantes comercialmente são ferromagnéticos. Em geral, esses materiais são classificados como magneticamente moles ou duros. Os materiais ferromagnéticos com paredes de domínio facilmente movidas pelos campos aplicados são chamados de **magneticamente moles**. Aqueles com paredes de

## ESTRUTURA ESPINÉLIO

32 Sítios octaédricos – 16 ocupados

64 Sítios tetraédricos – 8 ocupados



● Oxigênio

● Átomos B - Sítios octaédricos

● Átomos A - Sítios tetraédricos

Spinel:  $AB_2O_4 = BO-(AB)O_3$

Íons dos sítios tetraédricos e octaédricos têm spin contrários

$MgAl_2O_4$

$Fe-Fe_2O_4$  ( $Fe_3O_4$  – ferrita magnética – “magnetita” para os Eng. de Materiais)