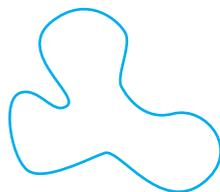


# 1. Lei de Ampère

## Integral de linha do campo magnético

Numa região onde há campo magnético, consideremos uma linha fechada de formato qualquer, mas que não tenha entrelaçamentos. Tal linha é chamada de **curva amperiana**. Por exemplo, nas figuras 1a e 1b as linhas são curvas amperianas, mas na figura 1c a curva não é amperiana.



(a) Curva amperiana.  
Figura 1.



(b) Curva amperiana.



(c) Curva não amperiana.

Não é necessário que a amperiana esteja totalmente contida num plano, mas aqui trataremos apenas do caso particular em que a amperiana é plana.

Dada uma amperiana, adotemos um sentido de percurso (horário ou anti-horário). A seguir, dividamos a curva em um número muito grande de pedaços (fig. 2) tais que:

- cada pedaço possa ser considerado retilíneo e tenha comprimento  $\Delta L$ ;
- o campo magnético  $\vec{B}$  possa ser considerado constante ao longo do pedaço.

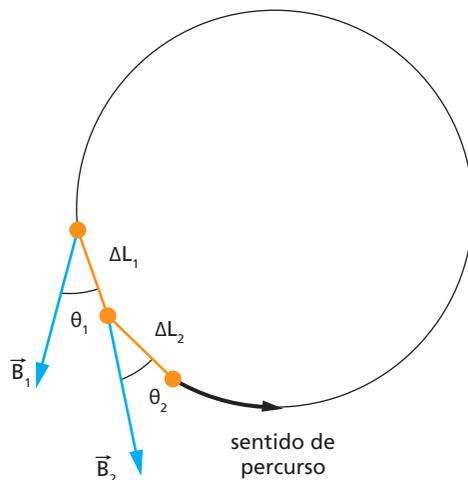


Figura 2.

A seguir consideremos a soma  $S$  de todos os produtos  $B \cdot \Delta L \cdot \cos \theta$ , sendo  $\theta$  o ângulo entre  $\vec{B}$  e  $\Delta L$ , isto é:

$$S = B_1 \cdot \Delta L_1 \cdot \cos \theta_1 + B_2 \cdot \Delta L_2 \cdot \cos \theta_2 + \dots$$

Quando os  $\Delta L$  são "muito pequenos" (com comprimentos tendendo a zero), a soma  $S$  é chamada integral de linha de  $\vec{B}$  ao longo da amperiana.

A Lei de Ampère é:

$$S = \mu_0 \cdot i_T \quad (1)$$

sendo  $i_T$  a soma das correntes elétricas que atravessam a superfície interna à amperiana. Para calcularmos  $i_T$  atribuímos sinais às correntes e a maneira de fazer essa atribuição está exemplificada na figura 3.

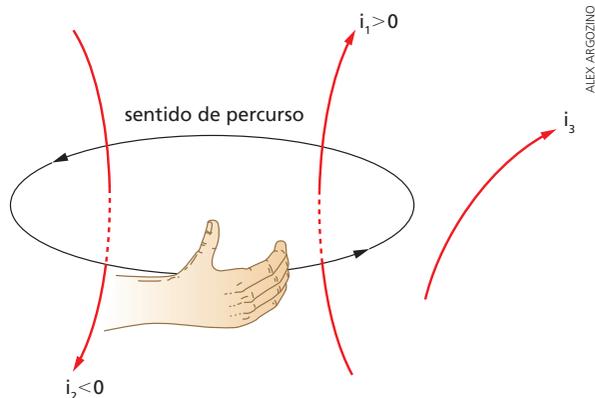


Figura 3. A corrente  $i_3$  não é considerada.

Encurvamos a mão direita no sentido de percurso adotado. As correntes que têm o sentido do polegar são positivas e as que têm sentido oposto são negativas. Na figura,  $i_1 > 0$  e  $i_2 < 0$ . A corrente  $i_3$ , que não atravessa a superfície interna à amperiana, não entra no cálculo de  $i_T$ .

Como veremos a seguir, a Lei de Ampère só é útil para calcular o campo magnético em situações em que há simetria.

## Campo magnético próximo de um fio reto

Experimentalmente verifica-se que, próximo de um fio reto e longo, conduzindo corrente elétrica  $i$ , as linhas do campo magnético são circunferências cujo centro  $C$  é o ponto onde o fio fura o plano que contém as circunferências (fig. 4). Pela simetria da figura podemos admitir que a intensidade de  $\vec{B}$  é a mesma em todos os pontos de uma linha de campo.

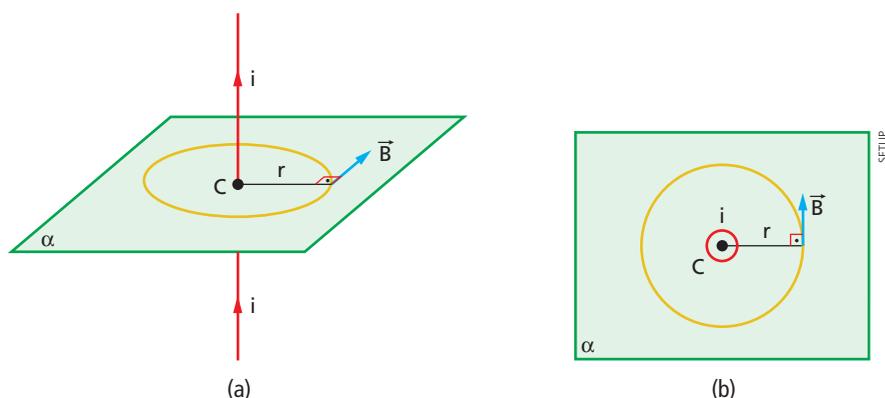


Figura 4.

Tomemos como amperiana a linha de campo representada na figura. Como  $\vec{B}$  é tangente à linha, se dividirmos esta em pedaços, o ângulo  $\theta$  formado entre cada pedaço e  $\vec{B}$  é nulo e, portanto,  $\cos \theta = 1$ .

Assim:

$$S = B_1 \cdot \Delta L_1 \cdot \cos \theta_1 + B_2 \cdot \Delta L_2 \cdot \cos \theta_2 + \dots$$

ou:

$$S = B\Delta L_1 + B\Delta L_2 + \dots = B(\Delta L_1 + \Delta L_2 + \dots) \quad (2)$$

Mas:

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 + \dots = 2\pi r \quad (3)$$

Substituindo (2) em (1):

$$S = B(2\pi r) \quad (4)$$

Pela Lei de Ampère, temos:

$$S = \mu_0 i \quad (5)$$

De (3) e (4) vem:

$$B(2\pi r) = \mu_0 i \Rightarrow B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (6)$$

## Campo magnético no interior de um solenoide

Quando temos um solenoide em que as espiras estão compactamente enroladas, verifica-se experimentalmente que o campo magnético no interior do solenoide é praticamente uniforme e no exterior, longe dos extremos, tem intensidade quase nula.

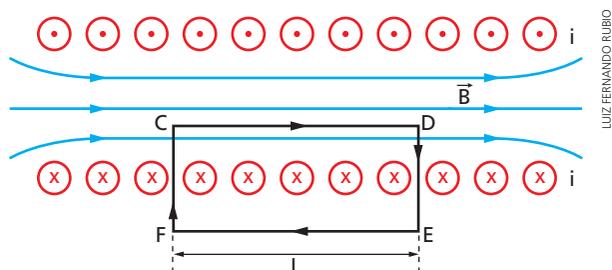


Figura 5.

Na figura 5 representamos uma secção transversal do solenoide, com as correntes saindo do plano do papel na parte de cima e entrando no plano do papel na parte de baixo. Assinalamos também na figura uma amperiana CDEF que é um retângulo.

No trecho CD o ângulo  $\theta$  formado entre CD e  $\vec{B}$  é nulo e, portanto,  $\cos \theta = 1$ . Os trechos FC e DE são perpendiculares ao campo na parte de dentro, o que acarreta  $\cos \theta = 0$ . Como na parte de fora temos  $B = 0$ , sendo  $L$  o comprimento do trecho CD, a integral de linha  $S$  é dada por:

$$S = BL \quad (7)$$

Pela Lei de Ampère temos:

$$S = \mu_0 i_T \quad (8)$$

De (1) e (2) obtemos:

$$BL = \mu_0 i_T \quad (9)$$

Mas, sendo  $N$  o número de espiras contidas no trecho CD, temos:

$$i_T = Ni \quad (10)$$

sendo  $i$  a intensidade de corrente que percorre o solenoide.

Introduzindo (10) em (9), obtemos:

$$BL = \mu_0 Ni \Rightarrow B = \mu_0 \frac{N}{L} i \quad (11)$$

Sendo  $n$  o número de espiras por unidade de comprimento, temos  $n = \frac{N}{L}$  e a equação (11) transforma-se em:

$$B = \mu_0 ni \quad (12)$$

## Campo magnético no interior de um solenoide toroidal

Na figura 6a representamos um **solenoide** (ou bobina) **toroidal**. Ele é construído enrolando um fio condutor em torno de um toro oco feito de material não condutor. Quando as espiras estão encostadas (enrolamento compacto), o campo magnético fora do solenoide é praticamente nulo e no interior as linhas de campo são (aproximadamente) circunferências concêntricas cujo centro é o centro  $C$  do toro (fig. 6b).

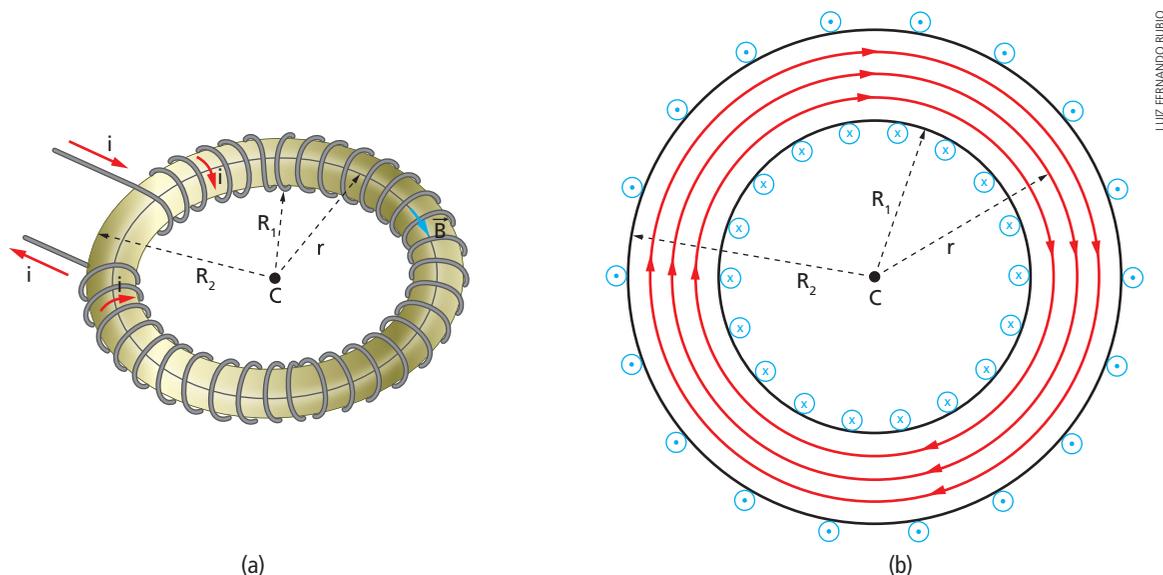


Figura 6. Solenoide toroidal.

Vamos calcular a intensidade do campo magnético a uma distância  $r$  (fig. 6b) do centro  $C$ . Considerando como amperiana a linha de campo de raio  $r$ , pela simetria da situação podemos admitir que o campo magnético tem a mesma intensidade em todos os pontos dessa amperiana.

Além disso, como o campo é tangente à amperiana, em todos os pontos o ângulo  $\theta$  formado entre  $\vec{B}$  e  $\Delta L$  é nulo, isto é,  $\cos \theta = 1$ . Assim, a integral de linha  $S$ , de  $\vec{B}$  ao longo da amperiana, é:

$$S = B(2\pi r) \quad (13)$$

Pela Lei de Ampère temos:

$$S = \mu_0 \cdot i_T \quad (14)$$

De (13) e (14) concluímos:

$$B(2\pi r) = \mu_0 \cdot i_T \quad (15)$$

Se a corrente que passa pelo fio tem intensidade  $i$  e o número de espiras é  $N$ , a corrente total  $i_T$  é dada por:

$$i_T = Ni \quad (16)$$

Introduzindo (16) em (15), obtemos:

$$B(2\pi r) = \mu_0 Ni \Rightarrow B = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi r} \quad (17)$$

Observamos então que o valor de  $B$  depende de  $r$ .

## Solenoide toroidal fino

Suponhamos que o diâmetro do solenoide seja pequeno em comparação com  $R_1$  e  $R_2$  (veja a fig. 6a), isto é:

$$R_1 \cong R_2 \cong r$$

Nesse caso, pela equação (17) concluímos que o campo magnético terá praticamente a mesma intensidade em todos os pontos do interior do solenoide. Assim, sendo  $n$  o número de espiras por unidade de comprimento, da equação (17) tiramos:

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi r} = \mu_0 \underbrace{\left(\frac{N}{2\pi r}\right)}_n i \Rightarrow B = \mu_0 n i \quad (18)$$

Podemos observar que a equação (18) é idêntica à equação (12), isto é, o campo no interior de um solenoide toroidal fino tem a mesma intensidade do campo no interior de um solenoide reto (desde que  $n$  e  $i$  sejam os mesmos).



## 2. Algumas aplicações do magnetismo

### Trens maglev

A palavra **maglev** é um acrônimo para *magnetic levitation* (levitação magnética). Os trens maglev, por meio de forças magnéticas, ficam levitando alguns centímetros acima dos trilhos e são também movimentados por forças magnéticas. Assim, eles não usam rodas para se movimentar.

Na realidade eles têm rodas, mas elas servem apenas para o caso de haver falha no sistema magnético. Em condições normais, as rodas não têm contato com o trilho.

Os trens que usam o processo convencional, de apoio e propulsão com rodas, conseguem chegar a uma velocidade máxima de cerca de 300 km/h, enquanto os trens maglev chegam a cerca de 500 km/h.

Atualmente há dois processos para se obter a levitação. Um deles é conhecido pela sigla SEM, que significa: **Sistema Eletromagnético** (EMS, em inglês) e foi desenvolvido na Alemanha, tendo o trem recebido o nome **transrápido**. O outro é conhecido pela sigla SED, que significa: **Sistema Eletrodinâmico** (EDS, em inglês) e foi desenvolvido no Japão.

Neste capítulo descreveremos o sistema eletromagnético e no próximo descreveremos o sistema eletrodinâmico, pois este usa um fenômeno que será estudado no capítulo seguinte.

Quanto à propulsão e à frenagem, nos dois casos são usados os mesmos processos, que serão descritos no próximo capítulo.

### O sistema eletromagnético

Na figura 7 apresentamos um corte transversal do trem maglev alemão, o transrápido, que usa o sistema eletromagnético.

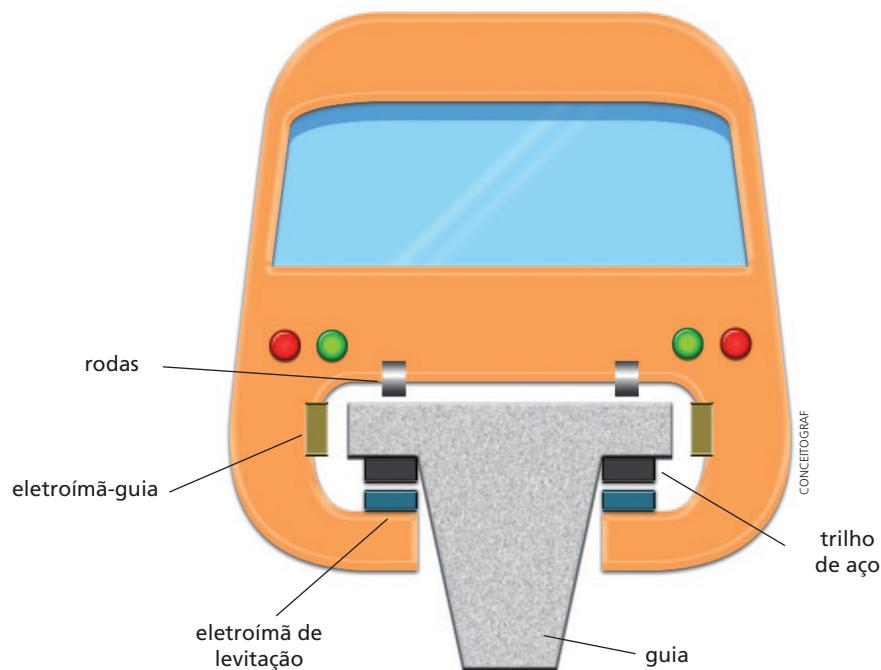


Figura 7. Corte transversal do transrápido alemão.

O eletroímã de levitação, que está preso ao trem, atrai o trilho de aço, e com isso o trem sobe um pouco, ficando cerca de 1 cm acima da guia. Os eletroímãs-guia fazem com que o trem tenha estabilidade lateral e conduzem o trem ao longo da guia.



## Campainha de corrente contínua

A figura 8 apresenta o esquema básico de funcionamento de uma campainha de corrente contínua.

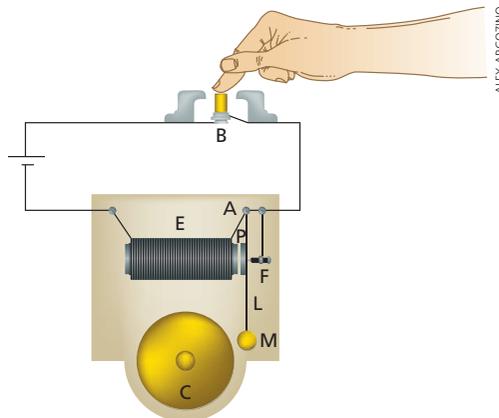


Figura 8. Campainha de corrente contínua.

O botão  $B$  é um interruptor que, quando apertado, faz circular uma corrente elétrica que passa pelo eletroímã  $E$ . Este atrai uma peça de ferro  $P$ , chamada **armadura**, que está presa a uma lâmina elástica  $L$ , isto é, na articulação  $A$  há um sistema elástico que tende a manter a lâmina  $L$  na mesma posição. Quando a lâmina  $L$  é atraída ocorrem dois fatos: o martelo  $M$  bate na campânula  $C$  e é desfeito o contato com o parafuso  $F$ , interrompendo a corrente e desmagnetizando o eletroímã. Com isso a lâmina volta à posição inicial e o processo vai se repetindo produzindo o som característico de uma campainha. A frequência  $f$  com que  $M$  bate em  $C$  depende da constante elástica  $k$  da articulação  $A$ . Quanto maior o valor de  $k$ , maior será o valor de  $f$ .

## O amperímetro-licate

No estudo da corrente elétrica (capítulos 2 a 4) nós afirmamos que um amperímetro deve ser inserido no circuito de modo a ficar em série com o trecho onde passa a corrente que queremos medir. Porém, isso nem sempre é fácil.



Figura 9. Amperímetro-licate.

Na figura 9 mostramos um tipo de amperímetro, o **amperímetro-licate**, que pode medir a intensidade da corrente que passa por um fio sem cortá-lo. Esse amperímetro pode medir tanto correntes contínuas quanto alternadas. O caso da corrente alternada será comentado no próximo capítulo.

No caso de uma corrente contínua, o aparelho mede o campo magnético criado pela corrente e a medida desse campo pode ser feita de dois modos.

Um modo é usar a deflexão provocada em um dipolo magnético (dispositivo semelhante a uma agulha de bússola) pelo campo magnético.

Outro modo é usar o **Efeito Hall**, medindo a tensão produzida por esse efeito.

### 3. Propriedades magnéticas da matéria

A explicação para as propriedades magnéticas da matéria exige a aplicação da Mecânica Quântica, num nível que só é estudado em cursos universitários (no capítulo 21 apresentaremos algumas noções elementares dessa mecânica). Assim, na apresentação das propriedades magnéticas da matéria, vamos nos limitar a relatar alguns resultados, recorrendo às vezes a um modelo de átomo que, embora já tenha sido superado pela Mecânica Quântica, apresenta previsões em boa concordância com os dados experimentais. Nesse modelo antigo, denominado **modelo clássico**, supomos os elétrons girando em trajetórias circulares ao redor dos núcleos dos átomos.

#### Paramagnetismo

Se supusermos o elétron em movimento circular (fig. 10) em torno do núcleo (movimento orbital), teremos o caso de uma espira circular de corrente que produz um campo magnético  $\vec{B}_{or}$ , o qual, no centro da espira, é perpendicular ao plano dela. Assim, cada elétron comporta-se como uma espira que produz campo magnético. Porém, em uma amostra de um material qualquer em que há um número grande de elétrons, existem campos em todas as direções, os quais, em média, se cancelam, e assim o campo magnético produzido pela amostra é nulo ou desprezível.

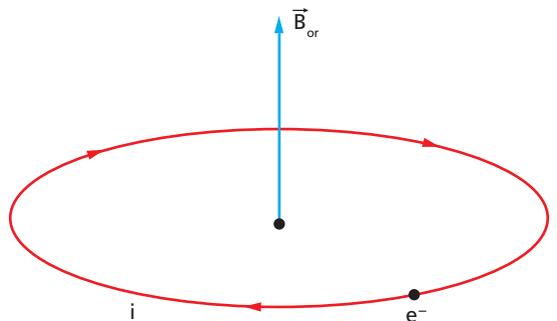


Figura 10. Campo magnético orbital do elétron.

Além do campo magnético orbital, o elétron produz outro campo magnético ( $\vec{B}_s$ ), que pode ser imaginado (clássicamente) como resultado da rotação do elétron em torno de si mesmo (fig. 11). Esse campo é denominado **campo magnético de spin** (em inglês, *to spin* significa "girar"). Em átomos, íons ou moléculas, em geral, por um mecanismo só explicado pela Mecânica Quântica, os elétrons se distribuem em pares (fig. 12), de modo que, em cada par, um dos elétrons produz campo em sentido oposto ao do outro, e desse modo ambos se anulam.

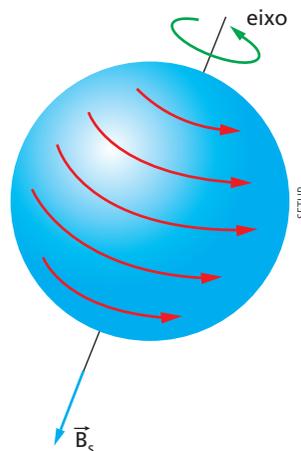


Figura 11. Campo magnético de spin do elétron.

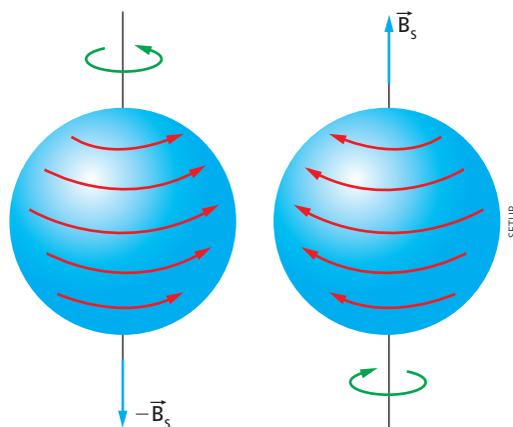


Figura 12. Elétrons emparelhados com *spins* opostos. O campo resultante é nulo.

Porém, há casos em que os átomos (ou íons ou moléculas) possuem elétrons que não formam pares; consequentemente, o átomo produz um campo total não nulo, comportando-se como um minúsculo ímã (ímã elementar). As substâncias formadas por átomos (ou íons ou moléculas) e que são ímãs elementares denominam-se substâncias **paramagnéticas**. Como exemplos, podemos citar: alumínio, cálcio, magnésio, cromo, oxigênio, platina.

Em uma amostra de uma substância paramagnética, há grande número de ímãs elementares orientados em todos os sentidos (fig. 13); dessa maneira, no total há anulamento do campo. Porém, se essa amostra for colocada próximo de um polo de um potente ímã (fig. 14), o campo do ímã ( $\vec{B}_0$ ) provocará um alinhamento parcial dos ímãs elementares, levando a amostra a se magnetizar, sendo **atraída** pelo ímã.

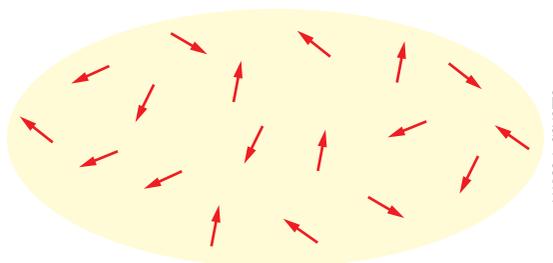


Figura 13.

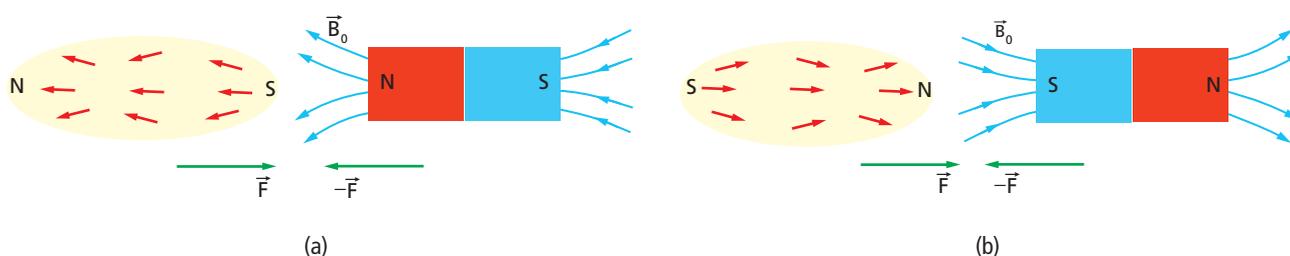


Figura 14.

Um fator que dificulta o alinhamento dos ímãs elementares é a agitação térmica. À medida que aumenta a temperatura, diminui o grau de alinhamento. Assim, para aumentar o grau de alinhamento, podemos diminuir a temperatura ou aumentar  $\vec{B}_0$ .

Depois de o ímã ser afastado, a amostra se desmagnetiza, pois os ímãs elementares voltam à situação aleatória da figura 13.

A atração que um ímã exerce sobre uma substância paramagnética é muito menor do que a atração que esse mesmo ímã exerceria sobre um pedaço de ferro. É por esse motivo que essas forças são de difícil observação. Só conseguimos percebê-las utilizando ímãs muito potentes.

Por exemplo, com um pequeno ímã, capaz de atrair facilmente alfinetes e pregos de aço, você não conseguirá atrair um pedaço de alumínio, que é uma substância paramagnética. O ferro constitui realmente um caso especial, analisado no próximo item.

Uma outra maneira de interpretar as situações apresentadas na figura 14 é afirmar que:

Se uma amostra de substância paramagnética for colocada em uma região onde há um campo magnético não uniforme  $\vec{B}_0$ , ela sofrerá a ação de uma força magnética que a deslocará para pontos onde  $\vec{B}_0$  é mais intenso.

Se uma amostra de substância paramagnética for colocada em uma região onde há um campo magnético uniforme ( $\vec{B}_0$ ) (fig. 15), ela ficará magnetizada, mas não sofrerá a ação de forças.

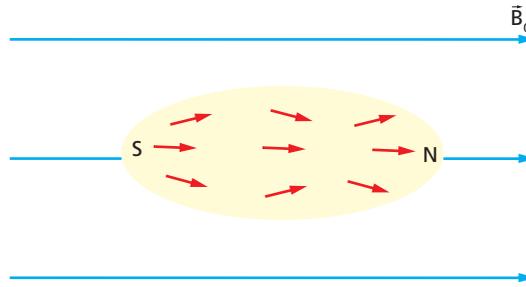


Figura 15.

## O ferromagnetismo

Inicialmente percebeu-se que os ímãs atraem com facilidade pedaços de ferro ou aço. Porém, com o passar do tempo, observou-se que há outras substâncias de comportamento semelhante ao do ferro, como, por exemplo, o cobalto, o níquel, o gadolínio e o disprósio. Essas substâncias foram chamadas então de **ferromagnéticas**.

O ferromagnetismo é um fenômeno semelhante ao paramagnetismo. A diferença é que nos materiais paramagnéticos, na ausência de um campo magnético externo, os ímãs elementares estão orientados em todos os sentidos, enquanto nos materiais ferromagnéticos há um alinhamento **espontâneo** dos ímãs elementares num dado sentido.

Dizer que o alinhamento é espontâneo significa afirmar que ele ocorre mesmo na ausência de um campo externo. Assim, por exemplo, pode-se escolher uma pequena amostra de um cristal de ferro, de modo que os ímãs elementares tenham a orientação da figura 16.

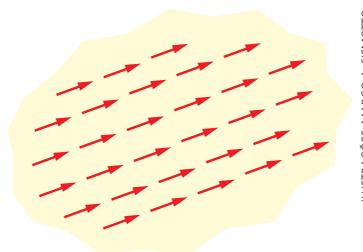


Figura 16.

Mas você poderia então perguntar: Se os ímãs elementares estão espontaneamente alinhados, como explicar o fato de podermos encontrar pedaços de ferro (ou de outras substâncias ferromagnéticas) que não produzem campo magnético?

O fato é que uma amostra macroscópica de substância ferromagnética se subdivide em regiões microscópicas denominadas **domínios**, de modo que, dentro de cada domínio, todos os ímãs elementares alinham-se num mesmo sentido, embora a orientação de cada domínio seja diferente da orientação dos domínios vizinhos (fig. 17).

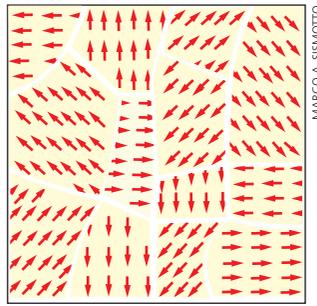


Figura 17. Exemplo de estrutura de domínios ferromagnéticos.

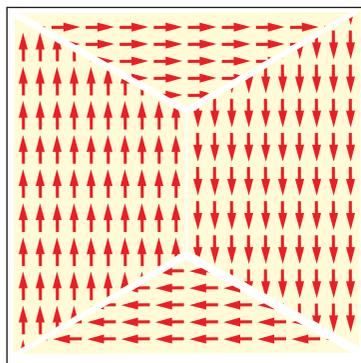
Assim, numa amostra macroscópica que não esteja produzindo campo magnético, há um número muito grande de domínios orientados em várias direções e sentidos; dessa forma, macroscopicamente há anulamento dos campos. Cada domínio tem dimensões lineares que vão de 0,1 mm a 1 mm, e dentro de cada domínio há um número de átomos, variando de  $10^{17}$  a  $10^{21}$ .

Consideremos agora uma amostra de material ferromagnético inicialmente não magnetizado (do ponto de vista macroscópico) (fig. 18a). Se colocarmos essa amostra numa região onde há um campo magnético  $\vec{B}_0$ , ela se magnetizará. Essa magnetização pode ocorrer por meio de dois processos:

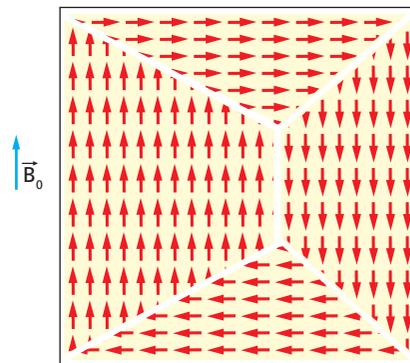
- **Magnetização por aumento de volume dos domínios orientados favoravelmente em relação ao campo externo  $\vec{B}_0$** , à custa dos domínios orientados desfavoravelmente (fig. 18b).

Isso significa que alguns ímãs elementares orientados desfavoravelmente mudaram sua orientação, de modo a fazê-la coincidir com a do domínio favorável. Dizemos que houve deslocamento das fronteiras dos domínios.

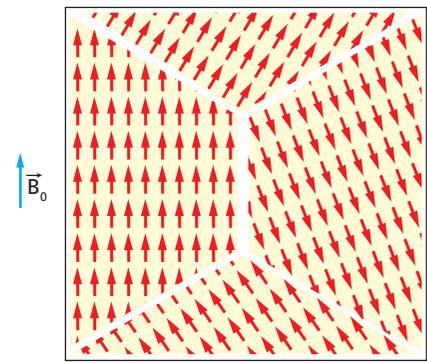
- **Magnetização por rotação de domínios.** Os domínios que não têm o mesmo sentido de  $\vec{B}_0$  "giram", aproximando-se da orientação paralela a  $\vec{B}_0$ , como ilustra a figura 18c.



(a) Material inicialmente não magnetizado.



(b) Material magnetizado por aumento de volume do domínio cuja orientação é favorável ao campo externo  $\vec{B}_0$ . Ocorre um deslocamento das fronteiras dos domínios.



(c) Material magnetizado por rotação dos domínios cujas orientações são desfavoráveis ao campo externo.

Figura 18.

Quando a intensidade do campo externo  $\vec{B}_0$  é "pequena", a magnetização se dá por aumento de volume dos domínios (deslocamento das fronteiras). Se a intensidade de  $\vec{B}_0$  é "grande", além do deslocamento das fronteiras, ocorre a rotação de domínios. Se a intensidade de  $\vec{B}_0$  é muito "pequena", ao anularmos  $\vec{B}_0$ , as fronteiras voltam praticamente à situação inicial (dizemos que o deslocamento das fronteiras é reversível) e a substância fica macroscopicamente desmagnetizada. Mas, se  $\vec{B}_0$  for mais intenso, o deslocamento das fronteiras se tornará irreversível, isto é, ao retirarmos o campo externo  $\vec{B}_0$ , as fronteiras não voltarão exatamente à posição inicial, e os domínios que eventualmente tenham sofrido rotação também não voltarão à situação inicial; nesse caso, a amostra permanecerá magnetizada após a retirada de  $\vec{B}_0$ . Essa irreversibilidade é conhecida pelo nome de **histerese**.

## Curva de magnetização

Consideremos uma amostra de material ferromagnético, inicialmente desmagnetizada, e vamos submetê-la a um campo externo  $\vec{B}_0$ , cuja intensidade aumente com o tempo (isso pode ser feito, por exemplo, colocando-se a amostra no interior de um solenoide cuja corrente vai aumentando). O campo magnético  $\vec{B}$  no interior da amostra é dado por:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$$

onde  $\vec{B}_M$  é o campo produzido pela amostra (campo de magnetização). Se fizermos um gráfico de  $B_M$  em função de  $B_0$  obteremos uma curva semelhante à da figura 19.

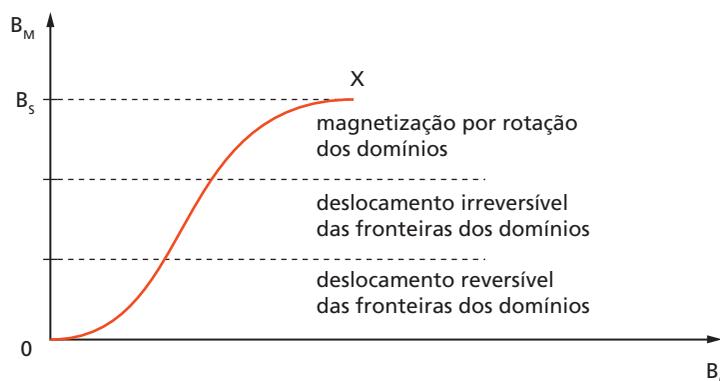


Figura 19. Curva de magnetização de um material ferromagnético inicialmente desmagnetizado, submetido a um campo externo  $\vec{B}_0$ , cuja intensidade aumenta a partir de zero.

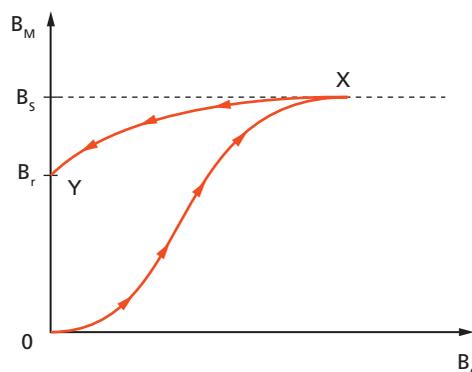


Figura 20. Curva de histerese.

Esse gráfico mostra primeiramente os processos dominantes de magnetização em cada região da curva. Ele indica também que há um valor máximo para  $B_M$ , denominado campo de **saturação** e representado por  $B_S$ . Atingindo o valor  $B_S$ , podemos aumentar indefinidamente o valor de  $B_0$  sem que o valor de  $B_M$  aumente. Isso significa que os domínios atingiram o maior grau possível de alinhamentos com o campo externo  $\vec{B}_0$ . Suponhamos agora que a intensidade de  $\vec{B}_0$  seja diminuída até anular-se. A figura 20 representa novamente a curva de magnetização (OX) e a curva corresponde à diminuição de  $\vec{B}_0$  (XY). Podemos notar então que a curva "de volta" não coincide com a curva "de ida".

Quando  $B_0$  se anula, o material ainda se mantém magnetizado, sendo  $B_r$  o valor de  $B_M$ . Denominamos  $B_r$  **remanência** do material.

O gráfico completo, de "ida e volta" (fig. 20), é chamado **curva de histerese**.

Há casos em que a histerese é útil, como, por exemplo, na construção de ímãs permanentes. Naturalmente, para construir tal ímã, procuramos usar um material de alta remanência. É também graças à histerese que conseguimos armazenar informações em fitas magnéticas (por exemplo, as fitas utilizadas para gravações musicais e fitas de videocassete) e na memória dos computadores. No entanto, há casos em que a histerese revela-se indesejável. Por exemplo, nos transformadores de corrente alternada, ela causa muita perda de energia. Assim, na construção de tais transformadores procura-se usar materiais de baixa remanência, como, por exemplo, o ferro doce.

## Magnetização por atrito

Às vezes conseguimos magnetizar uma amostra de material ferromagnético, atritando várias vezes um dos polos de um ímã permanente sobre a amostra, sempre no mesmo sentido, como ilustra a figura 21a. No entanto, as magnetizações obtidas por esse processo em geral são fracas. Tendo em vista a situação ilustrada na figura 21a, a amostra magnetiza-se como indica a figura 21b.

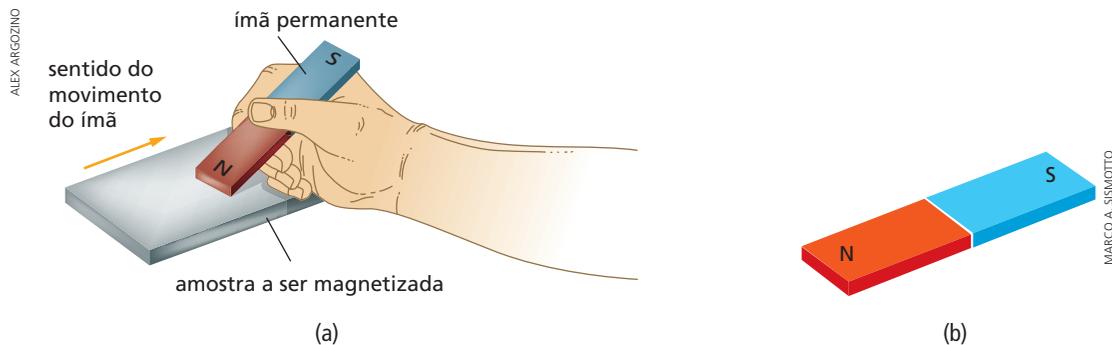


Figura 21.

## Ponto Curie

À medida que a temperatura aumenta, torna-se cada vez mais difícil magnetizar uma substância ferromagnética. Para cada substância ferromagnética há uma temperatura específica acima da qual a substância perde sua propriedade ferromagnética, tornando-se paramagnética. Essa temperatura é denominada **ponto Curie**, em homenagem ao químico e físico francês Pierre Curie (1859-1906), que fez importantes trabalhos na área de Magnetismo e Física Nuclear (e do qual falaremos mais no capítulo 22). Para o ferro puro, por exemplo, o ponto Curie é  $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Processos de desmagnetização

Para desmagnetizar uma amostra de material ferromagnético, pode-se utilizar o seguinte processo: aquecer a amostra até que sua temperatura supere o ponto Curie e depois resfriá-la novamente.

Outra forma de obter esse resultado consiste em colocar a amostra no interior de um solenoide percorrido por uma corrente cujo sentido é invertido várias vezes, diminuindo-se a sua intensidade a cada inversão.

Se a magnetização da amostra não é muito intensa, pode-se conseguir desmagnetizá-la martelando-a várias vezes (fig. 22). As vibrações provocadas pelas marteladas é que provocam a desmagnetização.

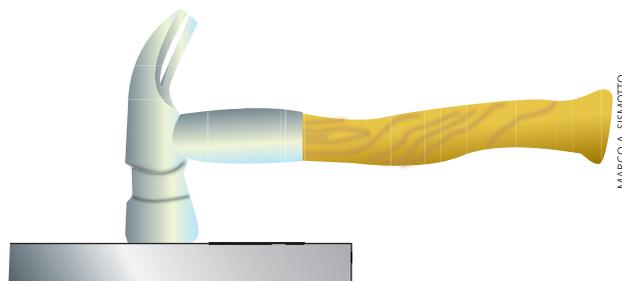


Figura 22. Amostra a ser desmagnetizada.

## O diamagnetismo

Um elétron, ao executar seu movimento orbital em torno do núcleo, produz campo magnético. No entanto, numa amostra de material qualquer, em geral há um número muito grande de elétrons produzindo campos em todos os sentidos, o que resulta em cancelamento dos campos. Mas, quando a amostra é colocada numa região onde há

um campo magnético  $\vec{B}_0$ , esse campo atua sobre os elétrons, aumentando a velocidade daqueles que giram num dado sentido e diminuindo a velocidade dos que giram em sentido oposto; conseqüentemente, o efeito final é que a amostra passa a produzir um campo magnético  $\vec{B}_M$  de sentido oposto ao do campo externo  $\vec{B}_0$  (fig. 23). Esse é o efeito diamagnético, que ocorre em **todas as substâncias** (mesmo nas paramagnéticas e ferromagnéticas); porém, em algumas delas, esse efeito é superado pelos efeitos paramagnético e ferromagnético.

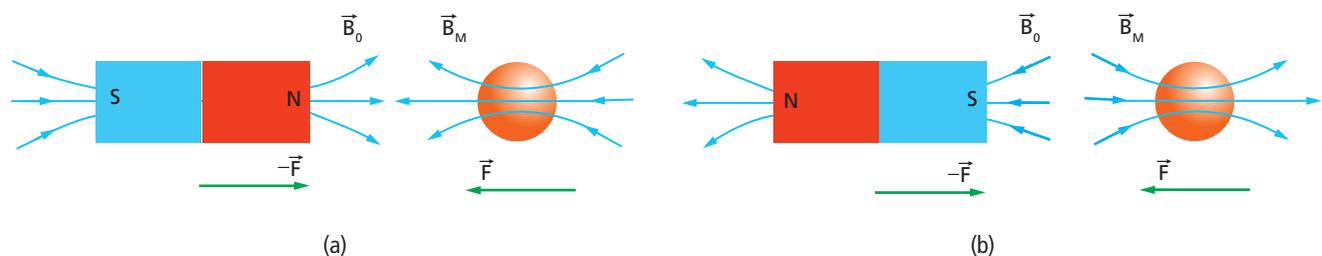


Figura 23.

As substâncias que não apresentam os efeitos paramagnético e ferromagnético apresentam apenas o efeito diamagnético, e, assim, são chamadas de **substâncias diamagnéticas**. Como exemplo, podemos citar: água, cobre, prata, bismuto.

Pelo fato de o campo produzido ( $\vec{B}_M$ ) ser oposto ao campo externo ( $\vec{B}_0$ ), as substâncias diamagnéticas são repelidas pelos ímãs (fig. 23). Um outro modo de expressar esse fato é dizer que:

Se uma amostra de uma substância diamagnética for colocada em uma região onde há um campo magnético não uniforme  $\vec{B}_0$ , ela sofrerá a ação de uma força que a deslocará para pontos onde  $\vec{B}_0$  é menos intenso.

Se a amostra de substância diamagnética for colocada em uma região em que há um campo  $\vec{B}_0$  uniforme (fig. 24), ela se magnetizará mas não sofrerá a ação de força magnética.

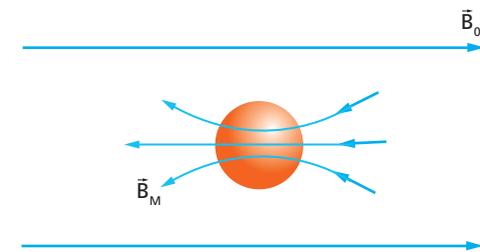
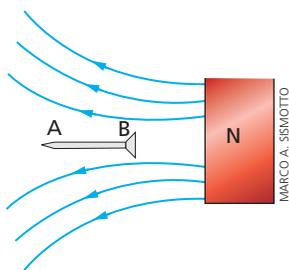


Figura 24.

## Exercícios

- (Mackenzie-SP) Qual dos grupos abaixo pode ser classificado como de substâncias ferromagnéticas?
  - prata, níquel
  - níquel, cobalto
  - ferro, cobre
  - ouro, chumbo
  - alumínio, cromo
- (U. F. Santa Maria-RS) Um eletroímã tem seu núcleo formado por um material que apresenta propriedades magnéticas após ser desligado. Logo, esse núcleo é composto por substâncias:
  - paramagnéticas.
  - paramagnéticas e diamagnéticas.
  - diamagnéticas.
  - ferromagnéticas.
  - paramagnéticas e ferromagnéticas.

3. (U. F. Pelotas-RS) O eletroímã é um dispositivo usado em inúmeros aparelhos como campainhas e telefones. É constituído de uma peça de ferro doce (núcleo) em torno da qual é enrolado um fio que forma uma bobina (solenóide). Que efeito causa o núcleo no campo do solenoide?
4. (UF-BA) Qual é a alternativa correta?
- Um elétron que penetra num campo magnético, paralelamente às linhas de indução, descreve uma trajetória circular.
  - O cobalto, o níquel e o gadolínio são considerados substâncias paramagnéticas.
  - Ponto Curie é a temperatura acima da qual um material perde suas propriedades ferromagnéticas.
  - Materiais diamagnéticos são atraídos pelos polos de um ímã.
5. (Fund. Carlos Chagas-SP) O prego de ferro AB, inicialmente não imantado, é aproximado do polo norte  $N$  de um ímã, como mostra a figura.



A respeito dessa situação, são feitas três afirmações.

- O campo magnético do ímã magnetiza o prego.
- Em  $A$  se forma um polo norte e em  $B$  um polo sul.
- O ímã atrai o prego.

Dessas informações, está(ão) correta(s):

- apenas I.
  - apenas III.
  - apenas I e II.
  - apenas II e III.
  - I, II e III.
6. O polo norte de um ímã é atritado várias vezes sobre um prego de ferro (que não é ímã), sempre no sentido da cabeça para a ponta do prego. No final da operação o prego fica imantado. Qual a polaridade da cabeça do prego?

