

## Respostas dos Problemas Práticos

27-1  $\vec{B} = 0, \vec{B} = 3,2 \times 10^{-14} \text{ T } \hat{k}$

27-2 25 A

27-4  $1,48 \times 10^{-2} \text{ T}$ . Isto é aproximadamente 2 por cento menor que o resultado do passo 3.27-5  $B$  no centro é aproximadamente 10 por cento maior para o círculo.

27-6  $R = 4,0 \text{ cm}$

27-7 0

27-8  $\vec{B} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ T } \hat{j}$

27-9  $M/M_s = 1,12 \times 10^{-3}$

## Problemas

Em alguns problemas, você recebe mais dados do que necessita; em alguns outros, você deve acrescentar dados de seus conhecimentos gerais, fontes externas ou estimativas bem fundamentadas.

Interprete como significativos todos os algarismos de valores numéricos que possuem zeros em seqüência sem vírgulas decimais.

- Um só conceito, um só passo, relativamente simples
  - Nível intermediário, pode requerer síntese de conceitos
  - Desafiante, para estudantes avançados
- Problemas consecutivos sombreados são problemas pareados.

## PROBLEMAS CONCEITUAIS

1 • Esboce as linhas de campo para o dipolo elétrico e para o dipolo magnético mostrados na Figura 27-47. Como a aparência das linhas de campo difere próximo ao centro de cada dipolo?



FIGURA 27-47 Problema 1

2 • Dois fios estão no plano da página e conduzem correntes em sentidos opostos, como mostrado na Figura 27-48. Em um ponto na metade da distância entre os fios, o campo magnético é (a) zero, (b) para dentro da página, (c) para fora da página, (d) em direção ao topo ou à base da página, (e) em direção a um dos dois fios.



FIGURA 27-48 Problema 2

3 • Fios paralelos 1 e 2 conduzem correntes  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente, onde  $I_2 = 2I_1$ . As duas correntes estão no mesmo sentido. As magnitudes da força magnética pela corrente 1 no fio 2 e pela corrente 2 no fio 1 são  $F_{12}$  e  $F_{21}$ , respectivamente. Estas magnitudes estão relacionadas por (a)  $F_{21} = F_{12}$ , (b)  $F_{21} = 2F_{12}$ , (c)  $2F_{21} = F_{12}$ , (d)  $F_{21} = 4F_{12}$ , (e)  $4F_{21} = F_{12}$ .

4 • Faça um esboço das linhas de campo do campo magnético devido às correntes no par de anéis coaxiais idênticos mostrado na Figura 27-49. Considere dois casos: (a) as correntes nos anéis têm

a mesma magnitude e o mesmo sentido, e (b) as correntes nos anéis têm a mesma magnitude e sentidos contrários.



FIGURA 27-49 Problema 4

- 5 • Discuta as diferenças e as semelhanças entre a lei de Gauss para o magnetismo e a lei de Gauss para a eletricidade.
- 6 • Explique como você modificaria a lei de Gauss se os cientistas descobrissem que pólos magnéticos isolados, sozinhos, de fato existissem.
- 7 • Você está olhando diretamente para uma das extremidades de um longo solenóide e o campo magnético no interior do solenóide aponta no sentido contrário ao seu. De sua perspectiva, o sentido da corrente nos anéis do solenóide é horário ou anti-horário? Explique sua resposta.
- 8 • As extremidades opostas de uma mola metálica helicoidal estão conectadas aos terminais de uma bateria. O espaçamento entre os anéis da mola tende a aumentar, diminuir ou permanecer o mesmo quando a bateria é conectada? Explique sua resposta.
- 9 • A densidade de corrente é constante e uniforme em um fio longo e retilíneo que tem seção transversal circular. Verdadeiro ou falso:  
(a) A magnitude do campo magnético produzido pelo fio é máxima na superfície do fio.  
(b) A intensidade do campo magnético na região que circunda o fio varia inversamente com o quadrado da distância ao eixo central do fio.  
(c) O campo magnético é zero em todos os pontos no eixo central do fio.  
(d) A magnitude do campo magnético no interior do fio aumenta linearmente com a distância ao eixo central do fio.
- 10 • Se a suscetibilidade de um material é positiva, (a) efeitos paramagnéticos ou efeitos ferromagnéticos devem ser maiores que efeitos diamagnéticos, (b) efeitos diamagnéticos devem ser maiores que efeitos paramagnéticos, (c) efeitos diamagnéticos devem ser maiores que efeitos ferromagnéticos, (d) efeitos ferromagnéticos de-

vem ser maiores que efeitos paramagnéticos, (e) efeitos paramagnéticos devem ser maiores que efeitos ferromagnéticos.

- 11 • Dos quatro gases listados na Tabela 27-1, quais são diamagnéticos e quais são paramagnéticos?
- 12 • Quando uma corrente passa pelo fio da Figura 27-50, o fio tenderá a se agrupar ainda mais ou tenderá a formar um círculo? Explique sua resposta.



FIGURA 27-50 Problema 12

## O CAMPO MAGNÉTICO DE CARGAS PUNTIFORMES EM MOVIMENTO

- 13 • No instante  $t = 0$ , uma partícula tem carga de  $12 \mu\text{C}$ , está localizada no plano  $z = 0$  em  $x = 0$ ,  $y = 2,0$  m, e tem uma velocidade igual a  $30 \text{ m/s } \hat{i}$ . Determine o campo magnético no plano  $z = 0$  (a) na origem, (b)  $x = 0$ ,  $y = 1,0$  m, (c)  $x = 0$ ,  $y = 3,0$  m, e (d)  $x = 0$ ,  $y = 4,0$  m.
- 14 • No instante  $t = 0$ , uma partícula tem carga de  $12 \mu\text{C}$ , está localizada no plano  $z = 0$  em  $x = 0$ ,  $y = 2,0$  m, e tem uma velocidade igual a  $30 \text{ m/s } \hat{i}$ . Determine o campo magnético no plano  $z = 0$  (a)  $x = 1,0$  m,  $y = 3,0$  m (b)  $x = 2,0$  m,  $y = 2,0$  m e (c)  $x = 2,0$  m,  $y = 3,0$  m.
- 15 • Um próton tem uma velocidade de  $1,0 \times 10^2 \text{ m/s } \hat{i} + 2,0 \times 10^2 \text{ m/s } \hat{j}$  e está localizada no plano  $z = 0$  em  $x = 3,0$  m,  $y = 4,0$  m em um instante  $t = T$ . Determine o campo magnético no plano  $z = 0$  em (a)  $x = 2,0$  m,  $y = 2,0$  m (b)  $x = 6,0$  m,  $y = 4,0$  m e (c)  $x = 3,0$  m,  $y = 6,0$  m.
- 16 •• Em um modelo pré-mecânica quântica para o átomo de hidrogênio, um elétron orbita em torno de um próton a um raio de  $5,29 \times 10^{-11}$  m. De acordo com este modelo, qual é a magnitude do campo magnético no próton devido ao movimento orbital do elétron? Despreze qualquer movimento do próton.
- 17 •• Duas cargas puntiformes iguais estão, em algum instante, localizadas em  $(0, 0, 0)$  e em  $(0, b, 0)$ . Ambas estão se movendo com rapidez  $v$  na direção  $+x$  (considere  $v \ll c$ ). Determine a razão entre a magnitude da força magnética e a magnitude da força elétrica em cada carga.

## O CAMPO MAGNÉTICO USANDO A LEI DE BIOT-SAVART

- 18 • Um pequeno elemento de corrente na origem tem comprimento de  $2,0$  mm e conduz uma corrente de  $2,0$  A na direção  $+z$ . Determine o campo magnético devido ao elemento de corrente (a) no eixo  $x$  em  $x = 3,0$  m, (b) no eixo  $x$  em  $x = -6,0$  m, (c) no eixo  $z$  em  $z = 3,0$  m, e (d) no eixo  $y$  em  $y = 3,0$  m.
- 19 • Um pequeno elemento de corrente na origem tem comprimento de  $2,0$  mm e conduz uma corrente de  $2,0$  A na direção  $+z$ . Determine a magnitude, a direção e o sentido do campo magnético devido a este elemento de corrente no ponto  $(0, 3,0 \text{ m}, 4,0 \text{ m})$ .
- 20 • Um pequeno elemento de corrente na origem tem comprimento de  $2,0$  mm e conduz uma corrente de  $2,0$  A na direção  $+z$ . Determine a magnitude do campo magnético devido a este elemento de corrente e indique sua direção e sentido em um diagrama em (a)  $x = 2,0$  m,  $y = 4,0$  m,  $z = 0$ , e (b)  $x = 2,0$  m,  $y = 0$ ,  $z = 4,0$  m.

## O CAMPO MAGNÉTICO DEVIDO A ANÉIS DE CORRENTE E BOBINAS

- 21 • Um único anel condutor tem raio igual a  $3,0$  cm e conduz corrente igual a  $2,6$  A. Qual é a magnitude do campo magnético na linha que passa pelo centro do anel e é perpendicular ao plano do anel (a) no centro do anel, (b) a  $1,0$  cm do centro, (c) a  $2,0$  cm do centro e (d) a  $35$  cm do centro?
- 22 ••• **PLANILHA ELETRÔNICA** Um par de bobinas idênticas, cada uma com raio de  $30$  cm, está separado por uma distância igual aos seus raios, que é  $30$  cm. Denominadas *bobinas de Helmholtz*, elas são coaxiais e conduzem correntes iguais em sentidos tais que seus campos axiais estão na mesma direção e sentido. Uma característica das bobinas de Helmholtz é que o campo magnético resultante na região entre as bobinas é bastante uniforme. Considere que a corrente em cada uma seja  $15$  A e que há  $250$  voltas para cada bobina. Usando uma planilha eletrônica, calcule e faça um gráfico do campo magnético como função de  $z$ , a distância ao centro das bobinas ao longo do eixo comum, para  $-30 \text{ cm} < z < +30 \text{ cm}$ . Em que intervalo de  $z$  o campo varia menos que  $20\%$ ?
- 23 ••• Um par de bobinas de Helmholtz com raios  $R$  tem seus eixos ao longo do eixo  $z$  (veja o Problema 22). Uma das bobinas está no plano  $z = -\frac{1}{2}R$  e a segunda bobina está em  $z = +\frac{1}{2}R$ . Mostre que, no eixo  $z$  em  $z = 0$ ,  $dB/dz = 0$ ,  $d^2B/dz^2 = 0$  e  $d^3B/dz^3 = 0$ . (Nota: Estes resultados mostram que a magnitude e a direção do campo magnético na região de cada lado do ponto médio são aproximadamente iguais à magnitude e à direção do campo magnético no ponto médio.)
- 24 ••• **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Bobinas *anti-Helmholtz* são usadas em muitas aplicações físicas, tais como o resfriamento e confinamento a laser, onde um campo com um gradiente uniforme é desejado. Estas bobinas têm a mesma construção que as bobinas de Helmholtz, exceto que as correntes têm sentidos opostos para que os campos axiais tenham sentidos opostos e a separação entre as bobinas é  $\sqrt{3}R$  no lugar de  $R$ . Faça um gráfico do campo magnético como função de  $z$ , a distância axial do centro das bobinas, para as bobinas anti-Helmholtz usando os mesmos parâmetros que no Problema 22. Em que intervalo do eixo  $z$   $dB/dz$  está dentro de  $1$  por cento de seu valor no ponto médio entre as bobinas?

## O CAMPO MAGNÉTICO DEVIDO A CORRENTES EM FIOS RETILÍNEOS

Os Problemas 25 a 30 referem-se à Figura 27-51, que mostra dois fios longos e retilíneos no plano  $xy$  e paralelos ao eixo  $x$ . Um fio está em  $y = -6,0$  cm e o outro está em  $y = +6,0$  cm. A corrente em cada fio é  $20$  A.

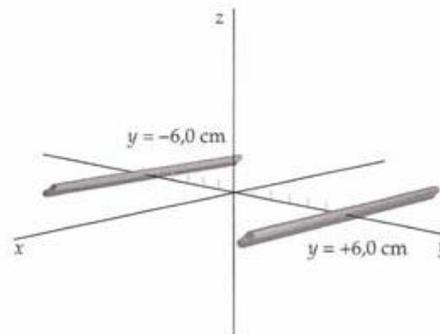


FIGURA 27-51 Problemas 25-30

- 25 •• Se ambas as correntes estão na direção  $-x$ , determine o campo magnético nos seguintes pontos no eixo  $y$ : (a)  $y = -3,0$  cm, (b)  $y = 0$ , (c)  $y = +3,0$  cm e (d)  $y = +9,0$  cm.

- 26 •• **PLANILHA ELETRÔNICA** Usando uma planilha eletrônica ou uma calculadora gráfica faça um gráfico de  $B_z$  versus  $y$  quando ambas as correntes estão na direção  $-x$ .
- 27 •• A corrente no fio em  $y = -6,0$  cm está na direção  $-x$  e a corrente no fio em  $y = +6,0$  cm está na direção  $+x$ . Determine o campo magnético nos seguintes pontos no eixo  $y$ : (a)  $y = -3,0$  cm, (b)  $y = 0$ , (c)  $y = +3,0$  cm e (d)  $y = +9,0$  cm.
- 28 •• **PLANILHA ELETRÔNICA** A corrente no fio em  $y = -6,0$  cm está na direção  $+x$  e a corrente no fio em  $y = +6,0$  cm está na direção  $-x$ . Usando uma planilha eletrônica ou uma calculadora gráfica, faça um gráfico de  $B_z$  versus  $y$ .
- 29 • Determine o campo magnético no eixo  $z$  em  $z = +8,0$  cm se (a) ambas as correntes estão na direção  $-x$  e (b) a corrente no fio em  $y = -6,0$  cm está na direção  $-x$  e a corrente no fio em  $y = +6,0$  cm está na direção  $+x$ .
- 30 • Determine a magnitude da força por unidade de comprimento exercida por um fio sobre o outro.
- 31 • Dois fios longos, retilíneos e paralelos, separados por 8,6 cm, conduzem correntes iguais. Os fios se repelem com uma força de 3,6 nN/m por unidade de comprimento. (a) As correntes são paralelas ou antiparalelas? Explique sua resposta. (b) Determine a corrente em cada fio.
- 32 •• A corrente no fio mostrado na Figura 27-52 é 8,0 A. Determine o campo magnético no ponto  $P$ .

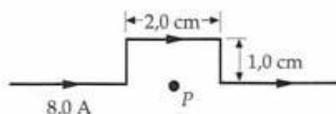


FIGURA 27-52 Problema 32

- 33 •• Como um estudante técnico, você está preparando uma aula de demonstração sobre "suspensão magnética". Você tem um fio rígido, retilíneo, de 16 cm de comprimento, que será suspenso por guias flexíveis, condutoras e leves, sobre um fio longo e retilíneo. Correntes que são iguais, mas em sentidos opostos, passarão nos dois fios para que o fio de 16 cm "flutue" a uma distância  $h$  acima do fio longo sem nenhuma tensão sobre as guias de suspensão. Se a massa do fio de 16 cm é 14 g e se  $h$  (a distância entre os eixos centrais dos dois fios) é 1,5 mm, qual deveria ser o valor da corrente comum aos dois fios?
- 34 •• Três fios longos, retilíneos e paralelos passam pelos vértices de um triângulo equilátero que tem lados iguais a 10 cm, como mostrado na Figura 27-53. Um ponto indica que o sentido da corrente é para fora da página e uma cruz indica que o sentido da corrente é para dentro da página. Se cada corrente é 15 A, determine (a) o campo magnético na posição do fio superior devido às correntes nos dois fios inferiores e (b) a força por unidade de comprimento no fio superior.

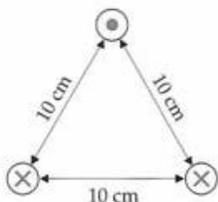


FIGURA 27-53 Problemas 34 e 35

- 35 •• Refaça o Problema 34 com a corrente invertida no canto inferior direito da Figura 27-53.
- 36 •• Um fio infinitamente longo está ao longo do eixo  $x$  e conduz uma corrente  $I$  na direção  $+x$ . Um segundo fio infinitamente longo está ao longo do eixo  $y$  e conduz corrente  $I$  na direção  $+y$ . Em que pontos no plano  $z = 0$  o campo magnético resultante é zero?

- 37 •• Um fio infinitamente longo está ao longo do eixo  $z$  e conduz uma corrente de 20 A na direção  $+z$ . Um segundo fio infinitamente longo é paralelo ao eixo  $z$  e intercepta o eixo  $x$  em  $x = 10,0$  cm. (a) Determine a corrente no segundo fio se o campo magnético é zero em  $(2,0$  cm,  $0, 0)$ . (b) Qual é o campo magnético em  $(5,0$  cm,  $0, 0)$ ?

- 38 •• Três fios longos e paralelos estão nos vértices de um quadrado, como mostrado na Figura 27-54. Cada fio conduz uma corrente  $I$ . Determine o campo magnético no vértice não ocupado do quadrado quando (a) todas as correntes estão entrando na página, (b)  $I_1$  e  $I_3$  estão para dentro da página e  $I_2$  está saindo, e (c)  $I_1$  e  $I_2$  estão para dentro da página e  $I_3$  está saindo. Suas respostas devem estar em termos de  $I$  e  $L$ .

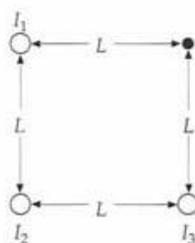


FIGURA 27-54 Problema 38

- 39 •• Quatro fios longos, retilíneos e paralelos, conduzem corrente  $I$ . Em um plano perpendicular aos fios, eles estão nos vértices de um quadrado de lado  $a$ . Determine a magnitude da força por unidade de comprimento em um dos fios se (a) todas as correntes estão no mesmo sentido e (b) as correntes nos fios em vértices adjacentes têm sentidos opostos.

- 40 •• Cinco fios longos, retilíneos e condutores são paralelos ao eixo  $z$  e cada um conduz corrente  $I$  na direção  $+z$ . Cada um dos fios está a uma distância  $R$  do eixo  $z$ . Dois dos fios interceptam o eixo  $x$ , um em  $x = R$  e o outro em  $x = -R$ . Outro fio intercepta o eixo  $y$  em  $y = R$ . Um dos fios restantes intercepta o plano  $z = 0$  no ponto  $(R/\sqrt{2}, R/\sqrt{2})$  e o último fio intercepta o plano  $z = 0$  no ponto  $(-R/\sqrt{2}, R/\sqrt{2})$ . Determine o campo magnético no eixo  $z$ .

## CAMPO MAGNÉTICO DEVIDO A UM SOLENÓIDE CONDUZINDO CORRENTE

- 41 •• Um solenóide de comprimento 30 cm, raio 1,2 cm e 300 voltas, conduz corrente de 2,6 A. Determine a magnitude do campo magnético no eixo do solenóide (a) no centro do solenóide e (b) em uma extremidade do solenóide.
- 42 • Um solenóide tem 2,7 m de comprimento, raio de 0,85 cm e 600 voltas. Ele conduz uma corrente  $I$  de 2,5 A. Qual é a magnitude do campo magnético  $B$  no interior do solenóide e distante das bordas?
- 43 •• Um solenóide tem  $n$  voltas por unidade de comprimento, raio  $R$  e conduz uma corrente  $I$ . Seu eixo coincide com o eixo  $z$  — uma extremidade em  $z = -\frac{1}{2}\ell$  e a outra em  $z = +\frac{1}{2}\ell$ . Mostre que a magnitude do campo magnético em um ponto no eixo  $z$  é dada por  $B = \frac{1}{2}\mu_0 n I (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$ , onde os ângulos estão relacionados pela geometria através de  $\cos \theta_1 = (z + \frac{1}{2}\ell) / \sqrt{(z + \frac{1}{2}\ell)^2 + R^2}$  e  $\cos \theta_2 = (z - \frac{1}{2}\ell) / \sqrt{(z - \frac{1}{2}\ell)^2 + R^2}$ .
- 44 ••• No Problema 43, é dada uma expressão para a magnitude do campo magnético ao longo do eixo de um solenóide. Para  $z \gg \ell$  e  $z \gg R$ , os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são muito pequenos e as aproximações  $\cos \approx -\frac{1}{2}\theta^2$  e  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx 0$  são válidas com alta precisão. (a) Desenhe um diagrama e use-o para mostrar que, para estas condições, os ângulos podem ser aproximados por  $\theta_1 \approx R/(z + \frac{1}{2}\ell)$  e  $\theta_2 \approx R/(z - \frac{1}{2}\ell)$ . (b) Usando estas aproximações, mostre que o campo magnético nos pontos do eixo  $z$  onde  $z \gg \ell$  pode ser escrito como

$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{q_m}{r_2^2} - \frac{q_m}{r_1^2} \right)$  onde  $r_2 = z - \frac{1}{2}\ell$  é a distância à extremidade mais próxima do solenóide,  $r_1 = z + \frac{1}{2}\ell$  é a distância até a extremidade mais distante, e a quantidade  $q_m$  é definida por  $q_m = nI\pi R^2 = \mu/\ell$ , onde  $\mu = NI\pi R^2$  é a magnitude do momento magnético do solenóide.

## USANDO A LEI DE AMPÈRE

45 • Uma casca longa cilíndrica, retilínea e com paredes finas, tem raio  $R$  e conduz uma corrente  $I$  paralela ao seu eixo central. Determine o campo magnético (incluindo direção e sentido) no lado de dentro e de fora da casca.

46 • Na Figura 27-55, uma corrente é 8,0 A para dentro da página, a outra corrente é 8,0 A para fora da página e cada curva é uma trajetória circular. (a) Determine  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$  para cada trajetória considerando que cada integral deve ser calculada no sentido anti-horário. (b) Qual trajetória, se houver alguma, pode ser usada para determinar o campo magnético combinado das correntes?

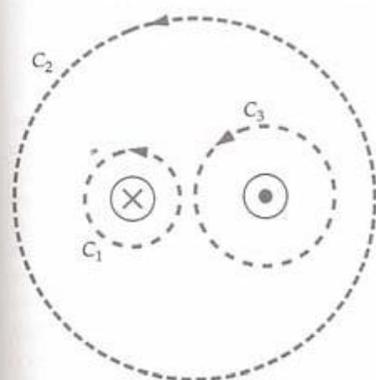


FIGURA 27-55  
Problema 46

47 •• Mostre que um campo magnético uniforme, tal como o mostrado na Figura 27-56, é impossível porque ele viola a lei de Ampère. Faça este cálculo aplicando a lei de Ampère para a curva retangular mostrada pelas linhas tracejadas.

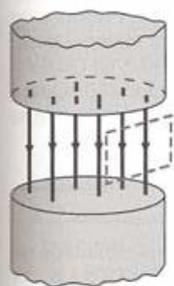


FIGURA 27-56 Problema 47

48 •• **PLANILHA ELETRÔNICA** Um cabo coaxial consiste em um cilindro sólido condutor que tem raio igual a 1,00 mm e uma casca condutora cilíndrica com raio interno igual a 2,00 mm e raio externo igual a 3,00 mm. O cilindro sólido conduz uma corrente de 15,0 A paralela ao eixo central. A casca cilíndrica conduz uma corrente de 15,0 A no sentido oposto. Considere que as densidades de corrente estão uniformemente distribuídas em ambos os condutores. (a) Usando uma planilha eletrônica ou uma calculadora gráfica, faça um gráfico da magnitude do campo magnético como uma função da distância radial  $r$  ao eixo central para  $0 < r < 3,00$  mm. (b) Qual é a magnitude do campo para  $r > 3,00$  mm?

49 •• Uma longa casca cilíndrica tem raio interno  $a$ , raio externo  $b$  e conduz corrente  $I$  paralela ao eixo central. Considere que, no interior do material da casca, a densidade de corrente está unifor-

memente distribuída. Determine uma expressão para a magnitude do campo magnético para (a)  $0 < r < a$ , (b)  $a < r < b$  e (c)  $r > b$ .

50 •• A Figura 27-57 mostra um solenóide que tem  $n$  voltas por unidade de comprimento e conduz uma corrente  $I$ . Aplique a lei de Ampère para a curva retangular mostrada na figura para deduzir uma expressão para o campo magnético. Considere que, no interior do solenóide, o campo magnético é uniforme e paralelo ao eixo central, e que no lado de fora do solenóide, não há campo magnético.

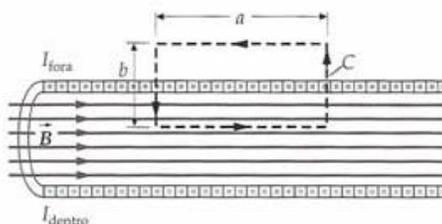


FIGURA 27-57 Problema 50

51 •• Um toróide firmemente enrolado com 1000 voltas tem raio interno de 1,00 cm, raio externo de 2,00 cm e conduz uma corrente de 1,50 A. O toróide está centrado na origem com os centros das voltas individuais no plano  $z = 0$ . No plano  $z = 0$ : (a) Qual é a intensidade do campo magnético a uma distância de 1,10 cm da origem? (b) Qual é a intensidade do campo magnético a uma distância de 1,50 cm da origem?

52 ••• Uma lâmina fina e condutora no plano  $z = 0$  conduz corrente na direção  $-x$  (Figura 27-58a). A lâmina se estende indefinidamente em todas as direções e a corrente está uniformemente distribuída. Para determinar a direção do campo magnético no ponto  $P$  considere o campo devido apenas às correntes  $I_1$  e  $I_2$  nas duas faixas estreitas mostradas. As faixas são idênticas e  $I_1 = I_2$ . (a) Quais são a direção e o sentido do campo magnético no ponto  $P$  devido a apenas  $I_1$  e  $I_2$ ? Explique sua resposta através de um esboço. (b) Quais são a direção e o sentido do campo magnético no ponto  $P$  devido à lâmina inteira? Explique sua resposta. (c) Quais são a direção e o sentido do campo em um ponto à direita do ponto  $P$  (onde  $y \neq 0$ )? Explique sua resposta. (d) Quais são a direção e o sentido do campo em um ponto abaixo da lâmina (onde  $z < 0$ )? Explique sua resposta usando um esboço. (e) Aplique a lei de Ampère na curva retangular (Figura 27-58b) para mostrar que a intensidade do campo magnético no ponto  $P$  é dada por  $B = \frac{1}{2}\mu_0\lambda$ , onde  $\lambda = dl/dy$  é a corrente por unidade de comprimento ao longo do eixo  $y$ .

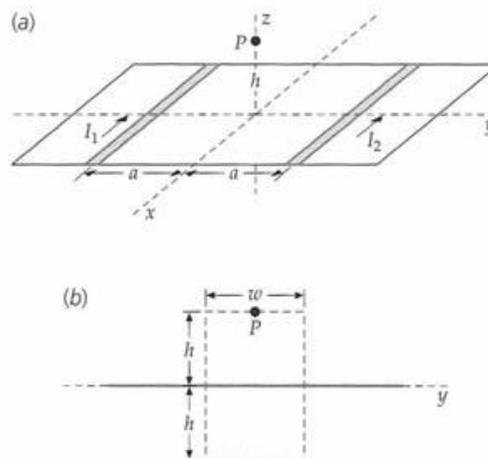


FIGURA 27-58 Problema 52

## MAGNETIZAÇÃO E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA

53 • Um solenóide firmemente enrolado tem 20,0 cm de comprimento, 400 voltas, conduz uma corrente de 4,00 A e seu campo axial está na direção +z. Determine  $B$  e  $B_{\text{apl}}$  no centro quando (a) não há núcleo no solenóide e (b) há um núcleo de ferro macio com magnetização de  $1,2 \times 10^6$  A/m.

54 • Um longo solenóide com núcleo de tungstênio conduz corrente. (a) Se o núcleo é removido enquanto a corrente é mantida constante, a intensidade do campo magnético na região do interior do solenóide diminui ou aumenta? (b) Calcule a porcentagem de diminuição ou aumento da intensidade do campo magnético na região no interior do solenóide.

55 • Enquanto um líquido preenche o volume no interior de um solenóide que conduz uma corrente constante, o campo magnético no interior dele *diminui* por 0,0040 por cento. Determine a suscetibilidade magnética do líquido.

56 • Um solenóide longo e fino conduz uma corrente de 10 A e tem 50 voltas por centímetro de comprimento. Qual é a intensidade do campo magnético na região do interior do solenóide quando ela está (a) em vácuo, (b) preenchida com alumínio e (c) preenchida com prata?

57 •• Um cilindro de ferro, inicialmente não magnetizado, é refrigerado a 4,00 K. Qual é a magnetização do cilindro a esta temperatura devido à influência do campo magnético da Terra, de 0,300 G? Considere um momento magnético de 2,00 magnétons de Bohr por átomo.

58 •• Um cilindro de prata a uma temperatura de 77 K tem uma magnetização igual a 0,075% de sua magnetização de saturação. Considere um momento magnético de um magnéton de Bohr por átomo. A massa específica da prata é  $1,05 \times 10^4$  kg/m<sup>3</sup>. (a) Qual o valor de campo magnético aplicado paralelamente ao eixo central do cilindro, necessário para atingir esta magnetização? (b) Qual é a intensidade do campo magnético no centro do cilindro?

59 •• Durante um laboratório de física do estado sólido, você está segurando uma amostra com formato cilíndrico de um material magnético desconhecido. Você e seus colegas de laboratório colocam a amostra em um longo solenóide que tem  $n$  voltas por unidade de comprimento e uma corrente  $I$ . Os valores para o campo magnético  $B$  dentro do material *versus*  $nI$  são dados a seguir. Use estes valores para fazer um gráfico de  $B$  *versus*  $B_{\text{apl}}$  e  $K_m$  *versus*  $nI$ , onde  $B_{\text{apl}}$  é o campo devido à corrente  $I$  e  $K_m$  é a permeabilidade relativa da amostra.

$nI$ , A/m	0	50	100	150	200	500	1000	10 000
$B$ , T	0	0,04	0,67	1,00	1,2	1,4	1,6	1,7

## MOMENTOS MAGNÉTICOS ATÔMICOS

60 •• O níquel tem uma massa específica de 8,70 g/cm<sup>3</sup> e uma massa molar de 58,7 g/mol. A magnetização de saturação do níquel é 0,610 T. Calcule o momento magnético de um átomo de níquel em magnétons de Bohr.

61 •• Repita o Problema 60 para o cobalto, que tem massa específica de 8,90 g/cm<sup>3</sup>, massa molar de 58,9 g/mol e magnetização de saturação de 1,79 T.

## \*PARAMAGNETISMO

62 • Mostre que a lei de Curie prediz que a suscetibilidade magnética de uma substância paramagnética é dada por  $\chi_m = \mu_0 M_s / (3kT)$ .

63 •• Em um modelo simples para o paramagnetismo, consideramos que uma fração  $f$  de átomos tem seus momentos magnéticos alinhados com o campo magnético externo e que o restante dos átomos está aleatoriamente orientado, não contribuindo, portanto, para o campo magnético. (a) Use este modelo e a lei de Curie para mostrar que na temperatura  $T$  e em um campo magnético externo  $B$ , a fração de átomos alinhados  $f$  é dada por  $\mu B / (3kT)$ . (b) Calcule esta fração para uma amostra a uma temperatura de 300 K e um campo externo de 1,00 T. Considere que  $\mu$  tenha o valor de 1,00 magnéton de Bohr.

64 •• Considere que o momento magnético de um átomo de alumínio é 1,00 magnéton de Bohr. A massa específica do alumínio é 2,70 g/cm<sup>3</sup> e sua massa molar é 27,0 g/mol. (a) Calcule o valor da magnetização de saturação e o campo magnético de saturação para o alumínio. (b) Use o resultado do Problema 62 para calcular a suscetibilidade magnética a 300 K. (c) Explique por que o resultado da Parte (b) é maior que o valor listado na Tabela 27-1.

65 •• Um toróide tem  $N$  voltas, conduz uma corrente  $I$ , tem um raio médio  $R$  e uma seção transversal de raio  $r$ , onde  $r \ll R$  (Figura 27-59). Quando o toróide é preenchido com material, ele é chamado de *anel de Rowland*. Determine  $B_{\text{apl}}$  e  $B$  neste anel, considerando que a magnetização seja paralela a  $\vec{B}_{\text{apl}}$  em todos os pontos.

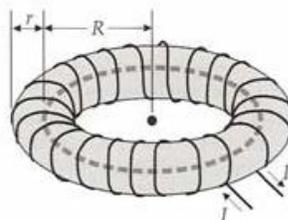


FIGURA 27-59  
Problemas 65 e 73

66 •• Um toróide é preenchido com oxigênio líquido que tem uma suscetibilidade magnética de  $4,00 \times 10^{-3}$ . O toróide tem 2000 voltas e conduz uma corrente de 15,0 A. Seu raio médio é 20,0 cm e o raio de sua seção transversal é 8,00 mm. (a) Qual é a magnetização? (b) Qual é o campo magnético? (c) Qual é a variação percentual no campo magnético produzida pelo oxigênio líquido?

67 •• Os centros das voltas de um toróide formam um círculo com 14,0 cm de raio. A área da seção transversal de cada volta é 3,00 cm<sup>2</sup>. Ele é enrolado com 5278 voltas de fio fino que conduz uma corrente de 4,00 A. O núcleo é preenchido com um material paramagnético de suscetibilidade magnética de  $2,90 \times 10^{-4}$ . (a) Qual é a magnitude do campo magnético no interior da substância? (b) Qual é a magnitude da magnetização? (c) Qual seria a magnitude do campo magnético se não houvesse o núcleo paramagnético presente?

## \*FERROMAGNETISMO

68 • Para o ferro tratado termicamente, a permeabilidade relativa  $K_m$  tem seu valor máximo de aproximadamente 5500 a  $B_{\text{apl}} = 1,57 \times 10^{-4}$  T. Determine a magnitude da magnetização e do campo magnético no ferro tratado termicamente quando  $K_m$  é máxima.

69 •• A magnetização de saturação para o ferro tratado termicamente ocorre quando  $B_{\text{apl}} = 0,201$  T. Determine a permeabilidade e a permeabilidade relativa do ferro tratado termicamente na saturação. (Veja a Tabela 27-2.)

70 •• A *força coerciva* (o que é uma denominação incorreta, pois na verdade, trata-se de um valor de campo magnético) é definida como o campo magnético aplicado necessário para trazer o campo magnético de volta a zero ao longo da curva de histerese (que é o ponto  $c$  na Figura 27-44). Para um dado ímã permanente em barra, sabe-se que a força coerciva é  $5,53 \times 10^{-2}$  T. O ímã em barra deve ser desmagnetizado colocando-o no interior de um solenóide de 15,0 cm de comprimento que tem 600 voltas. Qual a corrente mínima necessária no solenóide para desmagnetizar o ímã?

71 •• Um solenóide longo e fino tem 50 voltas/cm e conduz uma corrente de 2,00 A. O solenóide está preenchido com ferro e o campo magnético medido é 1,72 T. (a) Desprezando os efeitos de borda, qual é a magnitude do campo magnético aplicado? (b) Qual é a magnetização? (c) Qual é a permeabilidade relativa?

72 •• Quando a corrente no Problema 71 é 0,200 A, o campo magnético medido é 1,58 T. (a) Desprezando os efeitos de borda, qual é o campo magnético aplicado? (b) Qual é a magnetização? (c) Qual é a permeabilidade relativa?

73 •• Um toróide tem  $N$  voltas, conduz uma corrente  $I$ , tem um raio médio  $R$  e uma seção transversal com raio  $r$ , onde  $r \ll R$  (Figura 27-59). O núcleo do toróide é preenchido com ferro. Quando a corrente é 10,0 A, o campo magnético na região onde o ferro está tem magnitude de 1,80 T. (a) Qual é a magnetização? (b) Determine os valores da permeabilidade relativa, da permeabilidade e da suscetibilidade magnética para esta amostra de ferro.

74 • Os centros das voltas de um toróide formam um círculo com 14,0 cm de raio. A área da seção transversal de cada volta é 3,00 cm<sup>2</sup>. Ela é enrolada com 5278 voltas de fio fino que conduz uma corrente de 0,200 A. O núcleo é preenchido com ferro macio, que tem uma permeabilidade relativa de 500. Qual é a intensidade do campo magnético no núcleo?

75 ••• Um fio retilíneo longo de raio igual a 1,00 mm está encapado com um material ferromagnético isolante com espessura de 3,00 mm e permeabilidade magnética relativa de 400. O fio encapado está no ar e o fio não é magnético. O fio conduz uma corrente de 40, A. (a) Determine o campo magnético na região ocupada pelo interior do fio como uma função da distância perpendicular,  $r$ , desde o eixo central do fio. (b) Determine o campo magnético na região ocupada pelo interior do material ferromagnético como uma função da distância perpendicular,  $r$ , desde o eixo central do fio. (c) Determine o campo magnético na região em torno do fio encapado como uma função da distância perpendicular,  $r$ , desde o eixo central do fio. (d) Quais devem ser as magnitudes e sentidos das correntes amperianas nas superfícies do material ferromagnético para explicar os campos magnéticos observados?

**PROBLEMAS GERAIS**

76 • Determine o campo magnético no ponto  $P$  da Figura 27-60.

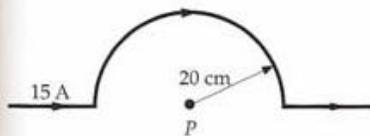


FIGURA 27-60 Problema 76

77 • Usando a Figura 27-61, determine o campo magnético (em termos dos parâmetros dados na figura) no ponto  $P$ , o centro comum dos dois arcos.

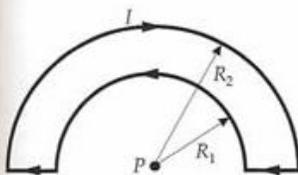


FIGURA 27-61 Problema 77

78 •• Um fio de comprimento  $\ell$  é enrolado em uma bobina de  $N$  voltas e conduz uma corrente  $I$ . Mostre que a intensidade do campo magnético na região ocupada pelo centro da bobina é dada por  $\mu_0 \pi N^2 I / \ell$ .

79 •• Um fio muito longo conduzindo uma corrente  $I$  é curvado no formato da Figura 27-62. Determine o campo magnético no ponto  $P$ .

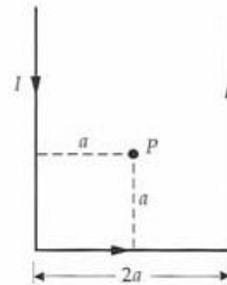


FIGURA 27-62 Problema 79

80 •• Um cabo de energia conduzindo 50 A está a 2,0 m abaixo da superfície da Terra, mas a direção e a posição precisas do cabo são desconhecidas. Explique como você poderia localizar o campo usando uma bússola. Considere que você esteja no equador, onde o campo magnético da Terra é horizontal e 0,700 G para o norte.

81 •• Um fio longo e retilíneo conduz uma corrente de 20,0 A, como mostrado na Figura 27-63. Uma bobina retangular com dois lados paralelos ao fio retilíneo tem lados de 5,00 cm de comprimento e 10,0 cm de comprimento. O lado mais próximo ao fio está a 2,00 cm do fio. A bobina conduz uma corrente de 5,00 A. (a) Determine a força em cada segmento da bobina retangular devido à corrente no fio longo e retilíneo. (b) Qual é a força resultante na bobina?

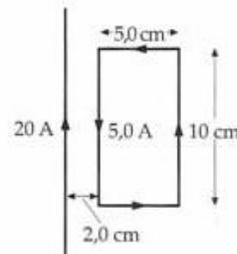


FIGURA 27-63 Problema 81

82 •• O anel fechado mostrado na Figura 27-64 conduz uma corrente de 8,0 A no sentido anti-horário. O raio do arco externo é 0,60 m e o do arco interno é 0,40 m. Determine o campo magnético no ponto  $P$ .

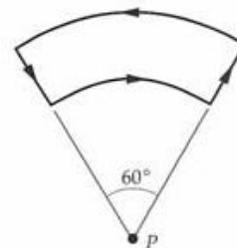


FIGURA 27-64 Problema 82

83 •• Um circuito fechado consiste em dois semicírculos de raios 40 cm e 20 cm, conectados por segmentos retilíneos como mostrado na Figura 27-65. Uma corrente de 3,0 A existe neste circuito e está no sentido horário. Determine o campo magnético no ponto  $P$ .

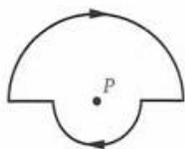


FIGURA 27-65 Problema 83

84 •• Um fio retilíneo muito longo conduz uma corrente de 20,0 A. Um elétron no lado de fora do fio está a 1,00 cm do eixo central do fio e está se movendo com uma rapidez de  $5,00 \times 10^6$  m/s. Determine a força no elétron quando ele se move (a) se afastando do fio, (b) paralelamente ao fio e no sentido da corrente e (c) perpendicularmente ao eixo central do fio e tangente ao círculo que é coaxial ao fio.

85 •• **PLANILHA ELETRÔNICA** Uma corrente de 5,00 A está uniformemente distribuída na seção transversal de um fio longo e retilíneo de raio  $R_0 = 2,55$  mm. Usando uma planilha eletrônica, faça um gráfico da intensidade do campo magnético como uma função de  $R$  (a distância ao eixo central do fio) para  $0 \leq R \leq R_0$ .

86 •• Uma bobina com 50 voltas de raio 10,0 cm conduz uma corrente de 4,00 A e uma bobina concêntrica de 20 voltas de raio 0,500 cm conduz uma corrente de 1,00 A. Os planos das duas bobinas são perpendiculares. Determine a magnitude do torque exercido pela bobina maior na menor. (Despreze qualquer variação no campo magnético devido à corrente na bobina maior na região ocupada pela bobina menor.)

87 •• A agulha magnética de uma bússola é um bastão uniforme com comprimento de 3,00 cm, raio de 0,850 mm e massa específica de  $7,96 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. A agulha está livre para girar em um plano horizontal, onde a componente horizontal do campo magnético da Terra é 0,600 G. Quando levemente perturbada, a bússola executa um movimento harmônico simples em torno de seu ponto intermediário com uma frequência de 1,40 Hz. (a) Qual é o momento de dipolo magnético da agulha? (b) Qual é a magnetização da agulha? (c) Qual é a corrente amperiana na superfície da agulha?

88 •• Um amperímetro relativamente barato, chamado de *galvanômetro tangencial*, pode ser feito usando o campo magnético da Terra. Uma bobina plana circular que tem  $N$  voltas e raio  $R$  é orientada de forma que o campo magnético  $B_c$  que ela produz no seu centro aponta ou para o leste ou para o oeste. Uma agulha é colocada no centro da bobina. Quando não há corrente na bobina, considere que a agulha da bússola aponte para o norte. Quando há uma corrente na bobina ( $I$ ), a agulha aponta na direção do campo magnético resultante a um ângulo  $\theta$  para o norte. Mostre que a corrente  $I$  está relacionada a  $\theta$  e à componente horizontal do campo magnético da Terra  $B_T$  por  $I = \frac{2RB_T}{\mu_0 N} \tan \theta$ .

89 •• O campo magnético da Terra é aproximadamente 0,600 G nos pólos magnéticos e aponta verticalmente para baixo no pólo magnético no hemisfério norte. Se o campo magnético fosse devido a uma corrente elétrica circulando em um anel com raio igual ao núcleo de ferro interno da Terra (aproximadamente 1300 km), (a) qual seria a magnitude da corrente necessária? (b) Que sentido teria esta corrente — o mesmo do movimento de rotação da Terra ou o oposto? Explique sua resposta.

90 •• Um ímã em barra longo e estreito tem seu momento magnético  $\vec{\mu}$  paralelo ao seu eixo mais longo e está suspenso pelo seu centro — tornando-se, em essência, uma agulha de bússola sem atrito. Quando o ímã é colocado em um campo magnético  $\vec{B}$ , ele se alinha com o campo. Se ele é deslocado por um pequeno ângulo e liberado, mostre que o ímã oscila em torno de sua posição de equilíbrio com uma frequência dada por  $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu B}{I}}$ , onde  $I$  é o momento de inércia em torno do ponto de suspensão.

91 •• Um fio infinitamente longo e retilíneo é dobrado, como mostrado na Figura 27-66. A porção circular tem raio de 10,0 cm e seu centro está a uma distância  $r$  da parte retilínea. Determine  $r$  para

o qual o campo magnético na região ocupada pelo centro da porção circular é zero.

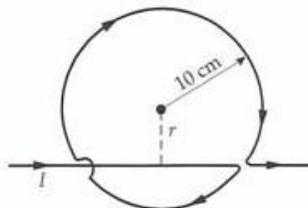


FIGURA 27-66 Problema 91

92 •• (a) Determine a intensidade do campo magnético no ponto  $P$  na bissetriz de um segmento de fio conduzindo corrente  $I$ , como mostra a Figura 27-67. (b) Use seu resultado da Parte (a) para determinar a intensidade do campo magnético no centro de um polígono regular de  $N$  lados. (c) Mostre que, quando  $N$  é muito grande, seu resultado tende à intensidade do campo magnético no centro de um círculo.

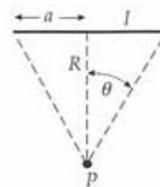


FIGURA 27-67 Problema 92

93 •• A corrente em um longo condutor cilíndrico com 10 cm de raio varia com a distância ao eixo do cilindro de acordo com a relação  $I(r) = (50 \text{ A/m})r$ . Determine o campo magnético nas seguintes distâncias perpendiculares ao eixo central do fio: (a) 5,0 cm, (b) 10 cm e (c) 20 cm.

94 •• A Figura 27-68 mostra um anel quadrado que tem 20 cm de lado e está no plano  $z = 0$  com seu centro na origem. O anel conduz uma corrente de 5,0 A. Um fio infinitamente longo que é paralelo ao eixo  $x$  e conduz uma corrente de 10 A intercepta o eixo  $z$  em  $z = 10$  cm. Os sentidos das correntes são mostrados na figura. (a) Determine o torque resultante no anel. (b) Determine a força resultante no anel.

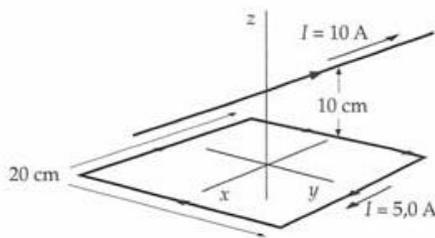


FIGURA 27-68 Problema 94

95 •• Uma balança de corrente é construída da seguinte maneira: Uma seção retilínea de fio com 10,0 cm de comprimento é colocada no topo da bandeja de uma balança eletrônica (Figura 27-69). Esta seção de fio é conectada em série com uma fonte de energia e com uma seção horizontal de fio longo e retilíneo que é paralela ao primeiro e está posicionada diretamente acima dele. A distância entre os eixos centrais dos dois fios é 2,00 cm. A fonte de energia gera uma corrente nos fios. Quando a fonte é ligada, a leitura na balança aumenta por 5,00 mg. Qual é a corrente no fio?

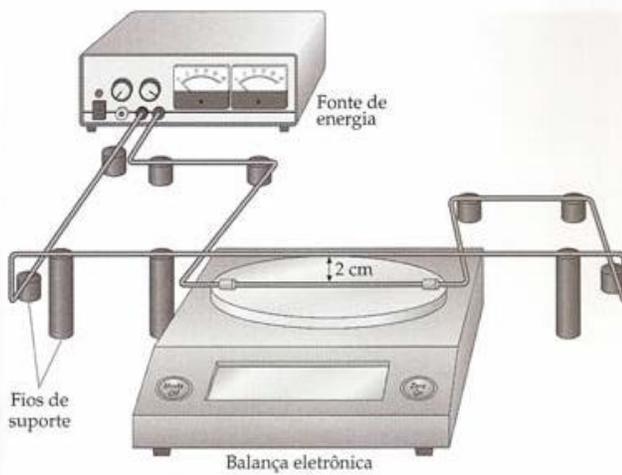


FIGURA 27-69 Problema 95

96 •• Considere a balança de corrente do Problema 95. Se a sensibilidade da balança é 0,100 mg, qual é a corrente mínima detectável usando esta balança de corrente?

97 ••• Um disco não-condutor de raio  $R$  possui uma densidade superficial uniforme de carga  $\sigma$  e gira com uma rapidez angular  $\omega$ . (a) Considere uma faixa anular de raio  $r$ , espessura  $dr$  e carga  $dq$ . Mostre que a corrente ( $dI$ ) produzida por esta faixa girando é dada por  $\omega r dr$ . (b) Use seu resultado da Parte (a) para mostrar que a intensidade do campo magnético no centro do disco é dada pela expressão  $\frac{1}{2} \mu_0 \sigma \omega R$ . (c) Use seu resultado da Parte (a) para determinar uma expressão para a intensidade do campo magnético em um ponto no eixo central do disco a uma distância  $z$  de seu centro.

98 ••• Um anel quadrado tem lados de comprimento  $\ell$  e está no plano  $z = 0$  com seu centro na origem. O anel conduz uma corrente  $I$ . (a) Derive uma expressão para a intensidade do campo magnético em qualquer ponto no eixo  $z$ . (b) Mostre que para  $z$  muito maior que  $\ell$ , seu resultado da Parte (a) torna-se  $B \approx \mu \mu_0 / (2\pi z^3)$ , onde  $\mu$  é a magnitude do momento magnético do anel.