

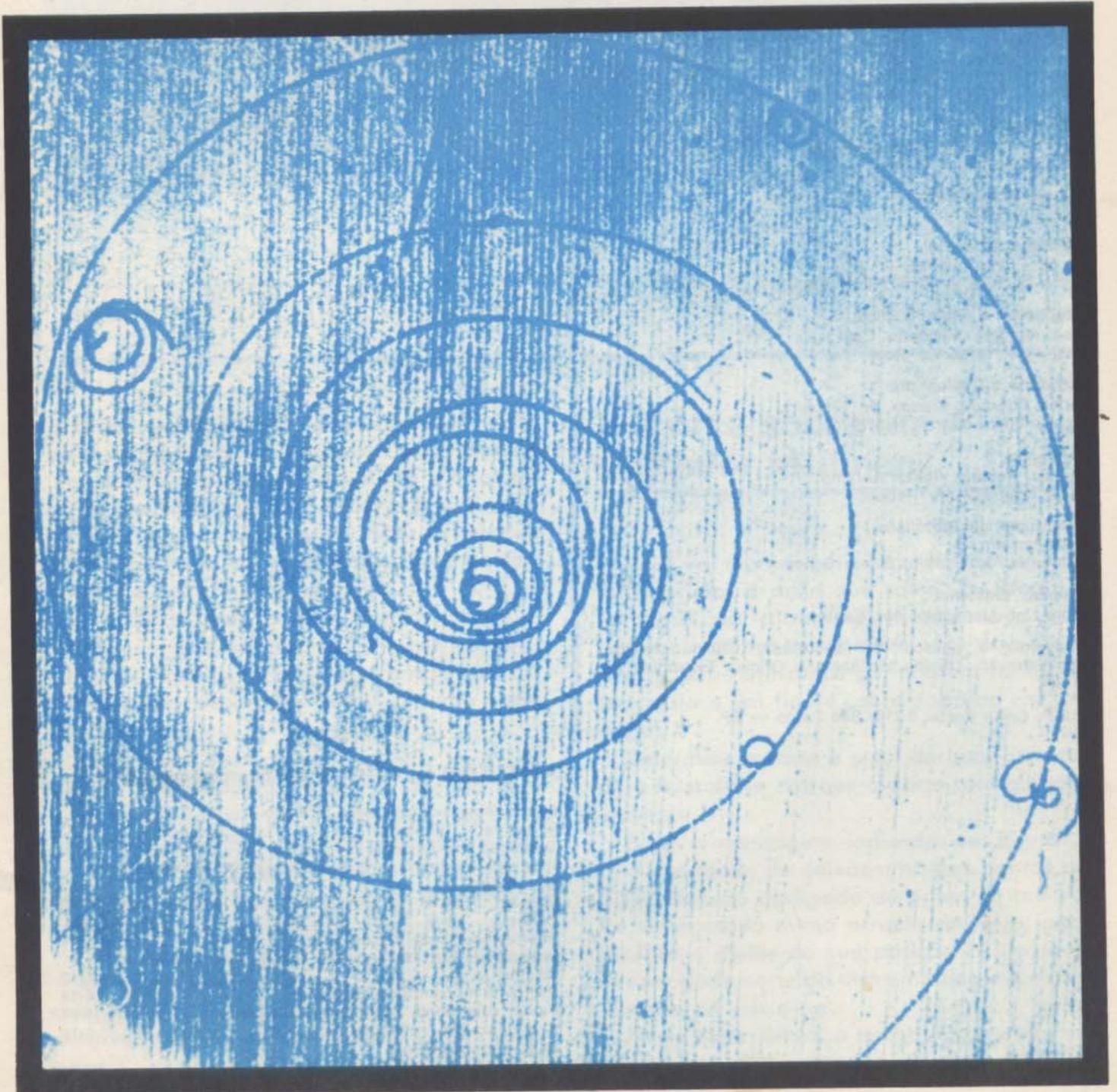
PROJETO  
DE ENSINO  
DE FÍSICA

IFUSP — Instituto de Física da Universidade de São Paulo  
MEC/FENAME/PREMEN

BIBLIOTECA  
INSTRUMENTAÇÃO PARA O EXT  
- IFUSP - SALA EP-311

4

# Corrente em campos magnéticos



# MEC/FENAME/PREMEN

PEF — PROJETO DE ENSINO DE FÍSICA, constituído de quatro conjuntos destinados ao Ensino de 2º Grau, foi planejado e elaborado pela equipe técnica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), mediante convênios com a FENAME e o PREMEN.

## Coordenação

Ernst Wolfgang Hamburger  
Giorgio Moscati

## Mecânica

Antonia Rodrigues  
Antonio Geraldo Violin  
Diomar da Rocha Santos Bittencourt  
Hideya Nakano  
Lulz Muryllo Mantovani  
Paulo Alves de Lima  
Plínio Ugo Meneghini dos Santos

## Elettricidade

Eliseu Gabriel de Pieri  
José de Pinho Alves Filho  
Judite Fernandes de Almeida

## Eletromagnetismo

Jesuina Lopes de Almeida Pacca  
João Evangelista Steiner

## Leitura Suplementar

José Goldemberg

## Programação Visual

Carlos Egidio Alonso  
Ettore Michele di San Fili Bottini

## Fotografias e Reproduções

José Augusto Machado Calil  
Washington Mazzola Racy

## Secretaria e Datilografia

Carlos Eduardo Franco de Siqueira  
Janete Vieira Garcia Novo

## Linguagem

Claudio Renato Weber Abramo  
Maria Nair Moreira Rebelo

## Construção de Protótipos

José Ferreira  
Voanerges do Espírito Santo Brites

## Desenho Industrial

Plínio Ugo Meneghini dos Santos

Colaboram o pessoal da Secretaria, Oficina Gráfica, Administração, Oficina Mecânica e Oficina Eletrônica do IFUSP.

IFUSP: Caixa Postal, 8 219, São Paulo — SP.

# CAPA

Fotografia tirada numa  
câmara de bolhas.

## ÍNDICE

### CAPÍTULO 4 — Corrente em campos magnéticos

1. Força sobre um condutor retilíneo .....	4-1
2. Intensidade da força $\rightarrow$ .....	4-5
3. Definição da unidade $B$ .....	4-6
4. Intensidade da força sobre condutores em função do ângulo .....	4-6
5. Cargas elétricas em movimento num campo magnético .....	4-8
6. Exercícios de aplicação I .....	4-10
7. Intensidade da força sobre cargas em função do ângulo .....	4-12
8. Espira num campo magnético .....	4-14
9. Força entre dois condutores paralelos .....	4-17
10. Exercícios de aplicação II .....	4-19
<b>Leitura Suplementar</b>	
Experiências de Ampère .....	4-20

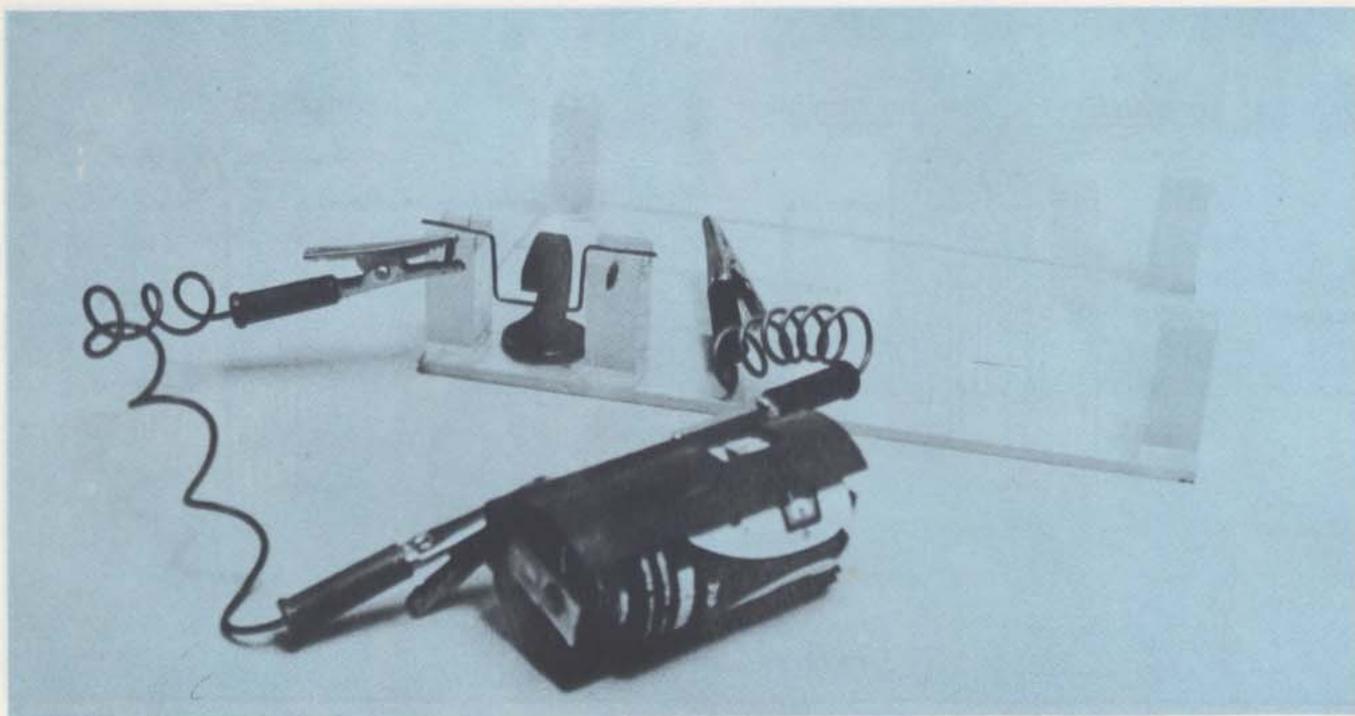


figura 1

# Corrente em campos magnéticos

Uma corrente elétrica produz um campo magnético capaz de desviar a agulha de uma bússola; portanto, seu efeito é análogo ao de um ímã. De outro lado, a bússola nada mais é que um ímã. Portanto, a bússola equivale a uma corrente elétrica que percorre um fio de forma conveniente.

A ação de uma corrente elétrica sobre um ímã sugere que, se tivermos um ímã nas proximidades de um condutor percorrido por corrente, o condutor deve sofrer alguma ação por parte do ímã.

Com base nisso, neste capítulo você vai estudar experimentalmente a forma pela qual se dá a ação de um campo magnético sobre um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica. Depois você estudará esse mesmo fenômeno em termos da ação do campo magnético sobre cargas em movimento.

O entendimento desses fatos permitirá compreender o funcionamento de vários dispositivos, como, por exemplo, os motores elétricos.

## 1. Força sobre um condutor retilíneo

Você vai montar uma experiência que permite estudar a ação que sofre um condutor percorrido por corrente elétrica, quando colocado num campo magnético; para essa experiência serão utilizados um ímã em forma de ferradura e um fio de cobre dobrado em forma de U.

Determine o norte e o sul do ímã, utilizando a bússola, e marque o norte com giz, por exemplo.

Faça a montagem indicada na figura 1 com o cuidado de deixar uma das pontas do fio de ligação desligada da pilha. O ímã deve ser apoiado numa arruela de ferro, para facilitar o ajuste da sua posição. Coloque a extremidade norte do ímã embaixo e a extremidade sul em cima.

Nesta experiência, o trecho do condutor retilíneo está representado pelo trecho AB (fi-

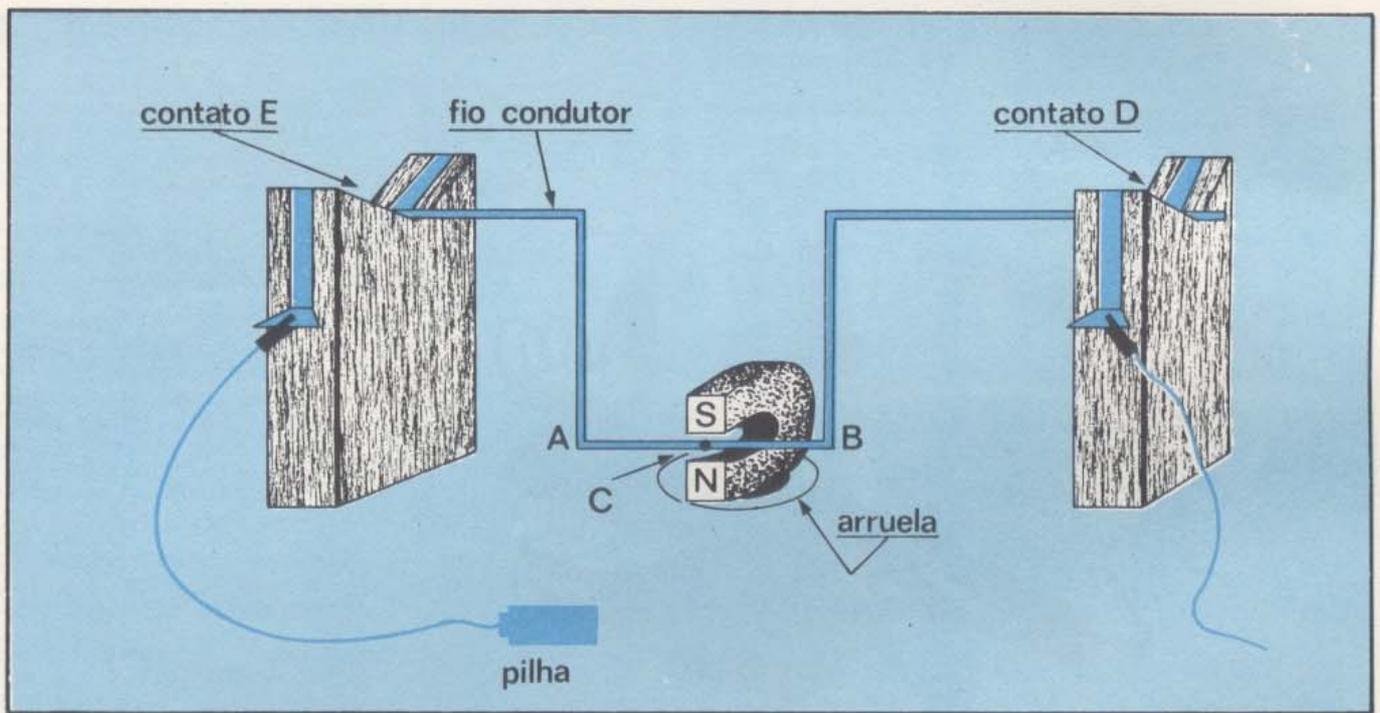


figura 2

gura 2); o campo magnético é o campo criado entre os pólos do ímã.

Para obter melhores resultados, observe os seguintes cuidados:

Verifique se, na montagem da sua experiência, o fio condutor **AB** fica perpendicular à face lateral do ímã. Faça ainda com que o fio **AB** passe entre os pólos do ímã, onde o campo magnético é mais intenso.

Realizados esses ajustes, você está em condições de fazer observações experimentais que lhe permitirão chegar a conclusões importantes.

Estabeleça algumas vezes uma ligação rápida da pilha com o fio. Enquanto o circuito está ligado à pilha, o trecho **AB** é percorrido por uma corrente.

**Q1** — Descreva o que ocorre com o condutor.

Você deve ter observado que o condutor tende a se deslocar para dentro ou para fora do ímã. Se o deslocamento que obteve for para dentro do ímã, inverta a polaridade da pilha, pois iniciaremos a análise do fenômeno para o caso em que o fio tende a se deslocar para fora.

O resultado da experiência mostra que uma força age sobre o condutor e que essa força depende tanto da existência do campo magnético como da existência da corrente elétrica no condutor.

4-2

**Q2** — Indique no esquema da figura 2 a direção da força que tende a deslocar o condutor.

Você não deve manter a ligação com a pilha por muito tempo, para não gastá-la. No entanto, se a ligação fosse mantida por mais tempo, o condutor **AB** ficaria numa nova posição de equilíbrio, deslocada em relação a sua posição de equilíbrio inicial.

Vamos agora analisar o campo magnético na região do condutor, para compreender melhor o que se passa.

Na figura 3 estão representadas as linhas de campo do ímã num plano. Nesse esquema você pode notar que há uma reta de simetria para as linhas de campo.

**Q3** — Esquematize, na figura 3, o vetor  $\vec{B}$  para alguns pontos pertencentes à reta de simetria.

**Q4** — Indique na mesma figura a direção e o sentido do vetor  $\vec{B}$  no ponto C, que representa a posição do condutor na experiência que você montou.

**Q5** — A corrente elétrica percorre o condutor no sentido de **A** para **B** ou de **B** para **A** (figura 1)?

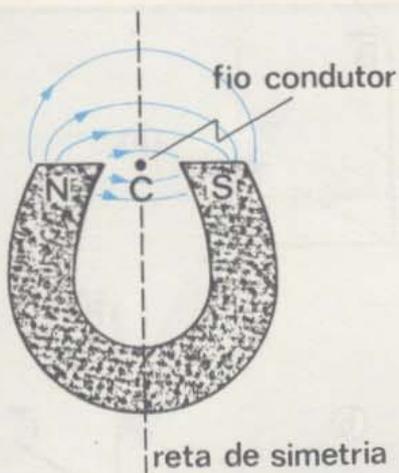


figura 3

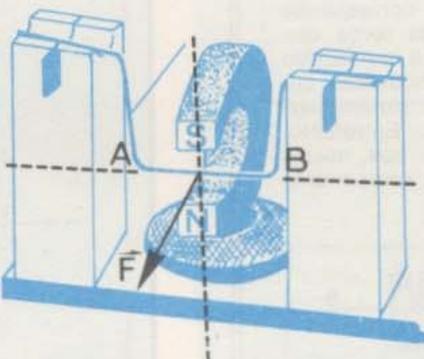


figura 4

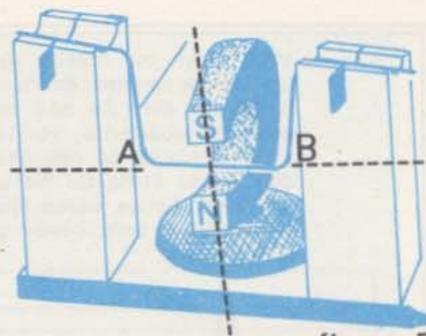


figura 5

A figura 4 representa, em três dimensões, um trecho do condutor da figura 1 e a força  $\vec{F}$  sobre ele no ponto C.

Note que o condutor tem forma de U, mas o trecho que está sendo considerado é retilíneo.

**Q6** — Indique na figura 4 o sentido da corrente no condutor e o sentido do campo  $\vec{B}$ .

Inverta, agora, com relação à experiência anterior, o sentido da corrente elétrica que atravessa o condutor. Faça a ligação, rápida, com a pilha e observe o novo deslocamento do condutor.

**Q7** — Represente, na figura 5, o sentido da corrente, do campo  $\vec{B}$  e da força.

Considere, nos esquemas das figuras 4 e 5, o plano formado pela direção do vetor  $\vec{B}$  e pela corrente que percorre o condutor.

**Q8** — Qual a posição do vetor  $\vec{F}$  com relação a esse plano?

**Q9** — O sentido do vetor  $\vec{F}$  é o mesmo nas figuras 4 e 5?

## RESPOSTAS

**R<sub>1</sub>** -

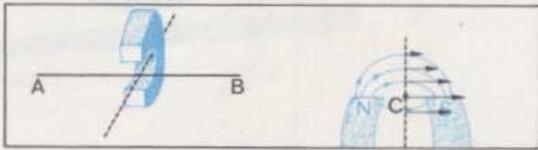
**R<sub>2</sub>** -

**R<sub>5</sub>** -

**R<sub>8</sub>** -

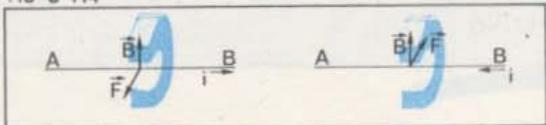
**R<sub>9</sub>** -

R1 — Você deve ter notado que o fio sofre um deslocamento enquanto passa corrente por ele. Se não conseguiu obter esse deslocamento, verifique se não há maus contatos no seu circuito ou se há demasiado atrito do fio com os apoios da base. Feitos esses ajustes, tudo deve funcionar bem, desde que a pilha não esteja gasta.



R2 — A força indicada na figura corresponde a uma das componentes da força que age no condutor, quando é percorrido pela corrente elétrica. Se houvesse outras componentes, elas não seriam percebidas nessa experiência. Entretanto, outras experiências mostram que, nestas condições, essa é a única componente que existe.

R3 e R4 —



R5 — De acordo com a montagem feita, a corrente passa de A para B.

R6 e R7 —

R8 — O vetor  $\vec{F}$  é perpendicular ao plano formado pelas direções de  $\vec{B}$  e de  $\vec{i}$ .

R9 — Não, depende do sentido da corrente.

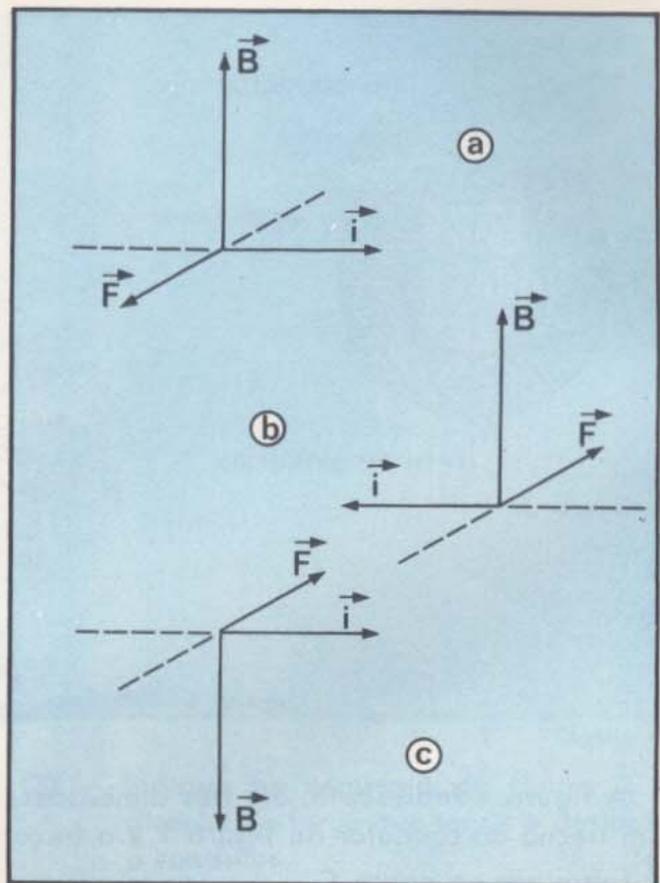


figura 6

A figura 6 mostra em (a) e (b) os dois resultados obtidos, correspondentes às figuras 4 e 5, respectivamente.

Se invertermos o sentido da corrente, o sentido da força que age sobre o condutor também se inverte, passando do caso (a) para o caso (b) da figura 6. Você também poderia ter mantido constante o sentido de  $\vec{i}$  e variado o sentido de  $\vec{B}$  (invertendo as posições dos pólos do ímã). Da mesma forma notar-se-ia uma inversão no sentido de  $\vec{F}$ : passar-se-ia do caso (a) ao caso (c) da figura 6.

As três situações (a), (b) e (c), que podem parecer distintas, correspondem na verdade a uma única posição relativa dos três vetores  $\vec{F}$ ,  $\vec{i}$  e  $\vec{B}$ .

Q10 — Em torno de que eixo os vetores devem ser girados, para passar do caso (b) para o (c) da figura 6?

Da experiência podemos extrair uma regra prática para a determinação do sentido da força  $\vec{F}$  que aparece no condutor.

4-4

Imagine que você coloca três dedos da mão direita (polegar, indicador e médio) indicando três direções, como mostra a figura 7.

Faça o indicador apontar na direção e sentido da corrente  $\vec{i}$  e o médio apontar na direção e sentido do campo magnético  $\vec{B}$ . O polegar representará a direção e o sentido do vetor  $\vec{F}$ .

Q11 — Utilize essa regra prática para determinar o vetor força  $\vec{F}$  na figura 7. Indique esse vetor na figura.

Verifique que a regra se aplica aos três casos da figura 6.

Refaça a experiência, invertendo a posição dos pólos do ímã, para verificar como variam os resultados.

Das experiências que você realizou e de outras realizadas em laboratório, podemos dizer que, sobre um condutor retilíneo colocado num campo magnético, perpendicularmente às linhas de campo, age uma força. A direção dessa força é perpendicular às di-

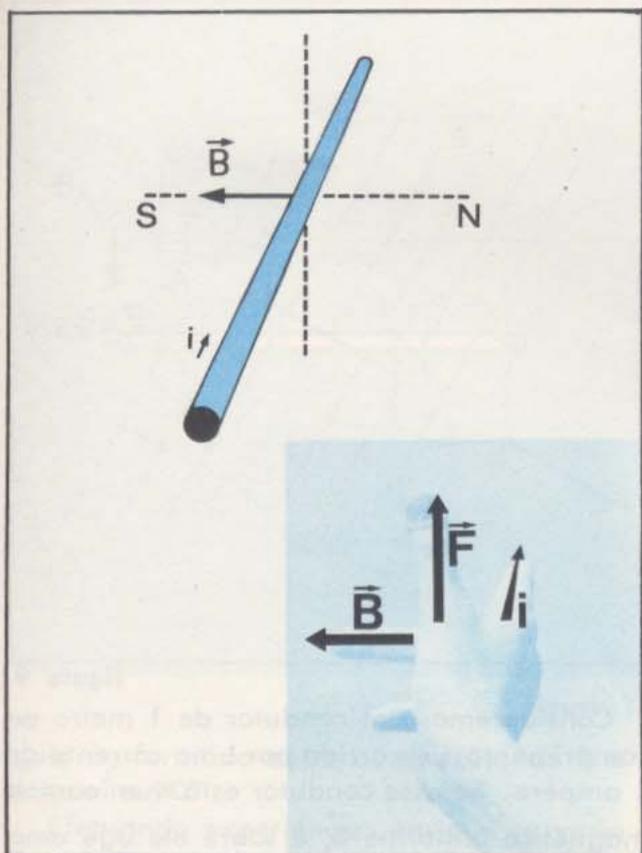


figura 7

reções de  $\vec{B}$  e de  $\vec{i}$ . O sentido depende do sentido de  $\vec{B}$  e de  $\vec{i}$ , e pode ser determinado pela regra da mão direita.

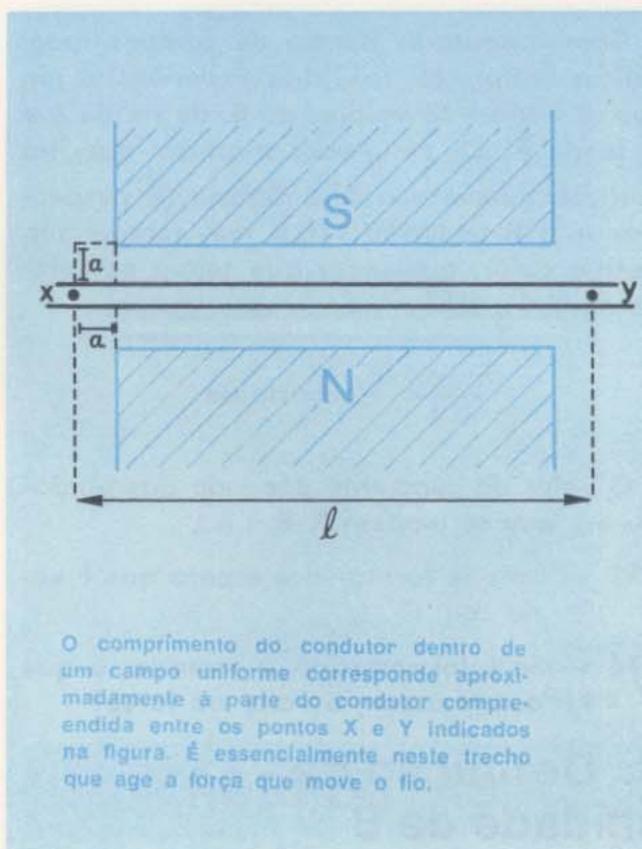


figura 8

O comprimento do condutor dentro de um campo uniforme corresponde aproximadamente à parte do condutor compreendida entre os pontos X e Y indicados na figura. É essencialmente neste trecho que age a força que move o fio.

## 2. Intensidade da força

A força, cuja existência você pode notar na experiência, depende de uma forma bem definida das outras grandezas físicas envolvidas. Estas grandezas são: a corrente  $i$ , o vetor magnético  $\vec{B}$  e o comprimento  $l$  do condutor (trecho do condutor dentro do campo magnético).

Vamos considerar um trecho reto do condutor de comprimento  $l$  situado numa região em que o campo magnético é uniforme. Veja a figura 8.

Dizemos que o campo magnético é uniforme numa certa região, se nesta o vetor  $\vec{B}$  for constante, isto é, se  $\vec{B}$  tiver o mesmo valor (módulo, direção e sentido) em todos os pontos da região.

**Q12** — Como devem ser as linhas de campo numa região em que o campo é uniforme?

## RESPOSTAS

**R<sub>10</sub>** -

**R<sub>12</sub>** -

Com condutores dentro de campos magnéticos uniformes, fazem-se experiências em que se variam os valores de  $B$ , de  $i$  e de  $\ell$  e se mede  $F$ . Os resultados mostram que, na situação geométrica considerada ( $\vec{B}$  perpendicular a  $i$ ), a razão  $F/i\ell B$  tem sempre um mesmo valor, quaisquer que sejam os valores de  $B$ ,  $i$  e  $\ell$ .

$$\frac{F}{i\ell B} = \text{constante}$$

O valor da constante depende das unidades em que se medem  $F$ ,  $B$ ,  $i$  e  $\ell$ .

**Q13** — De que forma você espera que  $F$  varie com  $i$ ?

**Q14** — Se  $i$  foi reduzida à metade, o que ocorrerá com o valor da força?

### 3. Definição da unidade de $\vec{B}$

No capítulo anterior, o campo magnético foi caracterizado por um vetor com direção e sentido bem definidos. O módulo de  $\vec{B}$  foi definido em unidades arbitrárias, que dependiam da escolha de um determinado campo magnético tomado como padrão. Também se adiantou que a unidade do vetor indução magnética, no sistema internacional de unidades, chama-se **tesla**.

Estamos agora em condições de definir esta unidade.

Você já sabe que  $F$ ,  $i$  e  $\ell$  podem ser medidos respectivamente em newton, ampère e metro.

A unidade de  $\vec{B}$  é escolhida, no sistema internacional, de forma que a constante tome o valor 1. Assim, a relação

$$\frac{F}{i\ell B} = \text{constante} \quad (1)$$

toma a forma

$$F = i\ell B \quad (2)$$

ou

$$B = \frac{F}{i\ell} \text{ (Tesla)}$$

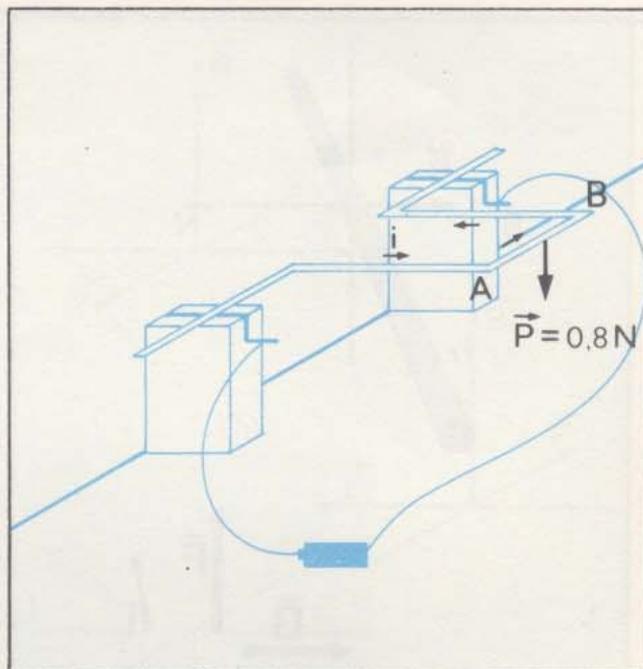


figura 9

Consideremos um condutor de 1 metro de comprimento, percorrido por uma corrente de 1 ampère. Se esse condutor está num campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , e sobre ele age uma força de 1 newton, a intensidade de  $\vec{B}$  é igual a 1T, isto é,  $1 \text{ N/Am} = 1\text{T}$ .

**Q15** — Determine a força que age sobre um condutor de 0,2 m, pelo qual flui uma corrente de 0,3A, quando colocado num campo magnético uniforme de intensidade igual a 2T, perpendicularmente às linhas de campo.

**Q16** — Determine a intensidade do campo magnético necessário para equilibrar o condutor AB da figura 9. Seu comprimento é 0,1 m e ele é percorrido por uma corrente igual a 1,5A. O campo gravitacional produz em AB uma força de 0,8N. Em que posição deve ser colocado um ímã em forma de ferradura para que se obtenha esse equilíbrio?

### 4. Intensidade da força sobre condutores em função do ângulo

Até agora, estudamos somente o caso em que as linhas do campo magnético são perpendiculares à corrente  $i$ , isto é, em que o ân-

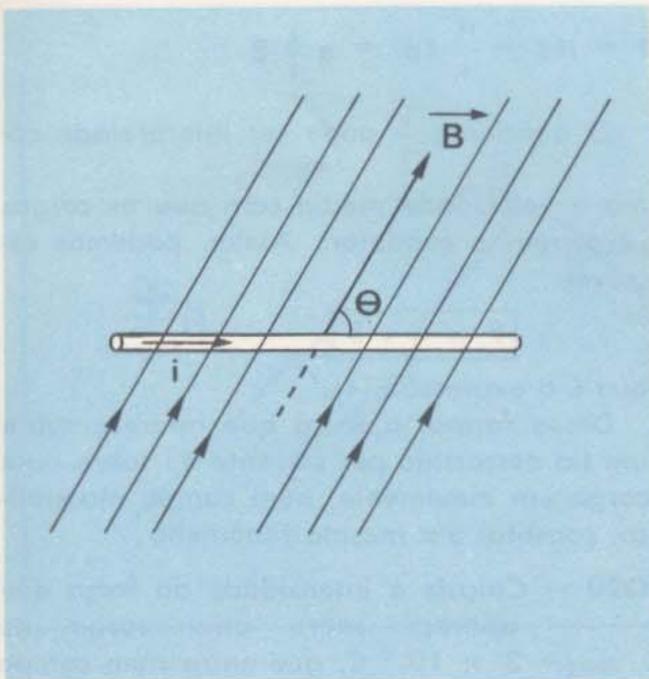


figura 10

gulo  $\theta$ , formado entre as direções de  $\vec{B}$  e  $i$ , é igual a  $90^\circ$ .

Efetuada experiências em que se varia o ângulo  $\theta$ , concluiu-se que  $F$  depende de  $B$ ,  $i$  e  $\theta$ , de acordo com a relação

$$F = i\ell B \text{ sen } \theta \quad (3)$$

Esta relação (3) é mais geral do que a relação (2).

A direção da força é sempre perpendicular a  $B$  e a  $i$  e o sentido dado pela regra já vista.

**Q17** — Por que a relação (3) é mais geral do que a relação (2)?

**Q18** — Qual a direção e o sentido da força que aparece sobre o condutor esquematizado na figura 10?

**Q19** — Qual o valor da força que age sobre um condutor pelo qual flui uma corrente  $i$ , quando este está colocado num campo magnético paralelamente às linhas de campo?

A expressão (3) pode ser interpretada, dando a forma  $F = i\ell(B \text{ sen } \theta)$ .

O termo  $B \text{ sen } \theta$  corresponde à componente do vetor  $\vec{B}$  que é perpendicular à corrente. Somente esta componente contribui para a força. A componente  $B \text{ cos } \theta$  é paralela a  $i$ , e assim a força correspondente é nula. Veja a figura 11.

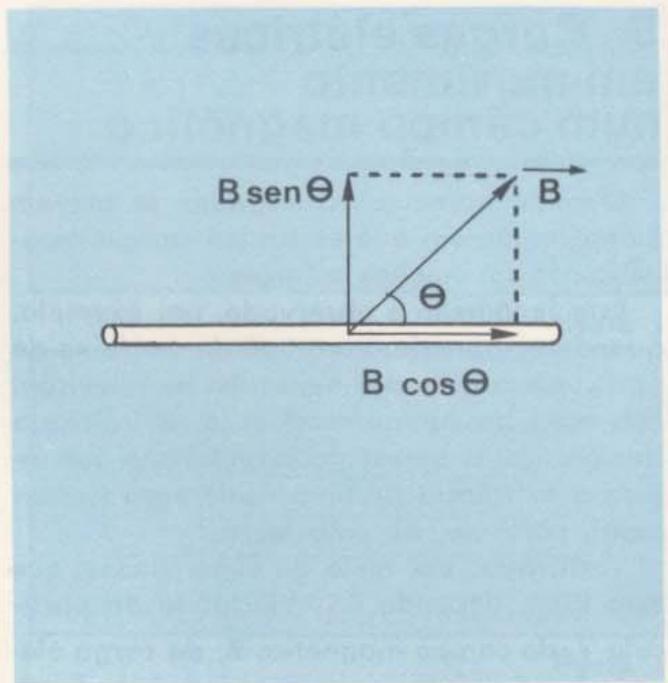


figura 11

## RESPOSTAS

**R<sub>13</sub>** -

**R<sub>14</sub>** -

**R<sub>15</sub>** -

**R<sub>16</sub>** -

**R<sub>17</sub>** -

**R<sub>18</sub>** -

**R<sub>19</sub>** -

## 5. Cargas elétricas em movimento num campo magnético

Quando partículas carregadas se movem numa região em que existe um campo magnético, ficam sujeitas a forças.

Este fenômeno é observado, por exemplo, quando se aproxima um ímã de um feixe de partículas carregadas num tubo de televisão. Sob ação do campo magnético, a trajetória das partículas apresenta curvatura, o que indica a existência de uma aceleração (centrípetas), portanto, de uma força.

Verifica-se, por meio de experiências, que esta força depende da velocidade da partícula  $\vec{v}$ , do campo magnético  $\vec{B}$ , da carga elétrica  $q$  e do ângulo entre as direções de  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ . Essa força é sempre perpendicular à direção da velocidade e, no caso em que  $\vec{v}$  é perpendicular a  $\vec{B}$ , a intensidade da força é dada pela expressão

$$F = q v B \quad (4)$$

Esta expressão só se aplica no caso em que a direção da velocidade e a do campo magnético são perpendiculares e você verá mais adiante o caso em que elas não são perpendiculares.

Este fenômeno, talvez novo para você, está relacionado com o que estudou a respeito da força que age sobre um condutor percorrido por corrente elétrica, quando está num campo magnético.

Você já conhece a estrutura de um material condutor e sabe que a corrente elétrica é constituída por um movimento ordenado de cargas elétricas.

Você já estudou também que a intensidade da corrente elétrica está relacionada com a quantidade de carga  $q$ , que atravessa uma seção do condutor por unidade de tempo, através da relação

$$i = \frac{q}{t} \quad (\text{ampère} = \frac{\text{coulomb}}{\text{segundo}})$$

Substituindo  $i$  por  $\frac{q}{t}$  na expressão da força

sobre um condutor, teremos:

4-8

$$F = i \ell B = \frac{q}{t} \ell B = q \frac{\ell}{t} B$$

O quociente  $\frac{\ell}{t}$  pode ser interpretado como

a velocidade média com que as cargas percorrem o condutor. Assim, podemos escrever

$$F = q v B$$

que é a expressão (4).

Dessa forma, a força que aparece sobre um fio percorrido por corrente ou sobre uma carga em movimento, num campo magnético, constitui um mesmo fenômeno.

**Q20** — Calcule a intensidade da força que aparece sobre uma carga de  $3 \times 10^{-15}$  C, que entra num campo magnético de  $5 \times 10^1$  T com velocidade de  $10^7$  m/s. As direções do campo magnético e da velocidade são perpendiculares.

A direção e o sentido de  $\vec{F}$  são determinados pela regra da mão direita, de forma semelhante à que você viu no caso de uma corrente elétrica através de um condutor.

Imagine que uma carga  $q = +2 \times 10^{-18}$  C se desloca no plano representado na figura 12, com velocidade  $\vec{v}$ . Um campo magnético atua nessa região, com direção perpendicular ao plano da figura, "entrando" no papel. O campo magnético  $\vec{B}$  está indicado na figura pelo sinal  $\otimes$ . Esse sinal é usado quando se quer indicar o sentido de um vetor que é perpendicular à folha de papel e está entrando nela. Para indicar um vetor que está saindo da folha o sinal usado é  $\odot$ .

**Q21** — Indique, na figura 12, a direção e o sentido da força que age sobre a carga  $q$ .

**Q22** — Qual o ângulo formado entre as direções de  $\vec{F}$  e  $\vec{v}$ ? E entre as direções de  $\vec{F}$  e  $\vec{B}$ ?

Quando se trata de cargas negativas (por exemplo, elétrons) em movimento, é preciso tomar cuidado com o sentido apontado pelo indicador. Isso porque o sentido convencional para a corrente elétrica num condutor é oposto ao sentido em que os elétrons se deslocam.

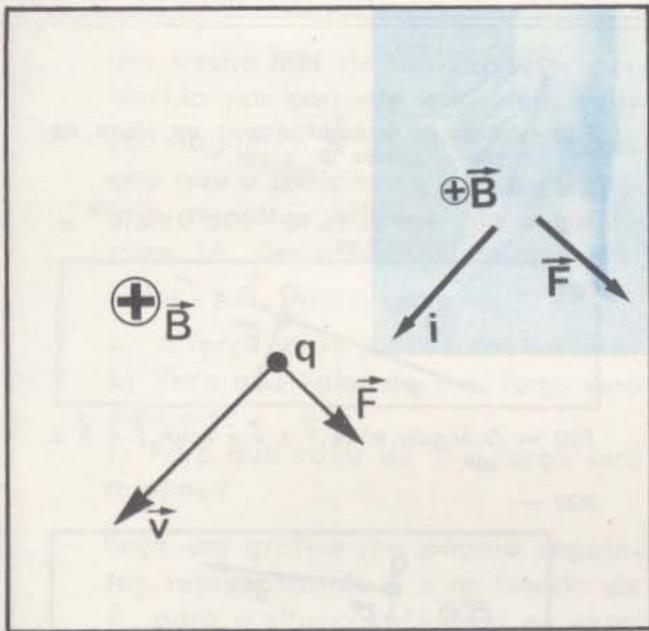


figura 12

Assim, para o movimento de uma carga negativa, você deve aplicar a regra fazendo com que o indicador aponte o sentido oposto ao de  $\vec{v}$  (velocidade da carga negativa).

Suponha que um elétron está-se deslocando no plano da figura 13 e nessa região existe um campo magnético  $\vec{B}$  perpendicular ao plano da figura.

**Q23** — Indique na figura 13 o sentido da força que aparece sobre o elétron.

**Q24** — Determine a intensidade, a direção e o sentido da força sobre uma carga  $q$  negativa que entra num campo magnético  $\vec{B}$ , com velocidade  $\vec{v}$ , representados na figura 14.

Concluindo, podemos dizer que, sobre uma carga elétrica que se movimenta numa região em que há um campo magnético perpendicular a  $\vec{v}$ , aparece uma força. Essa força pode ser calculada, a partir do valor da velocidade, da carga e da intensidade de campo magnético, pela expressão

$$F = q v B$$

A direção de  $\vec{F}$  é perpendicular às direções de  $\vec{B}$  e de  $\vec{v}$ , e o sentido é determinado pela regra da mão direita, em que o indicador aponta no sentido da velocidade, se a carga for positiva, e no sentido oposto à velocidade, se a carga for negativa.

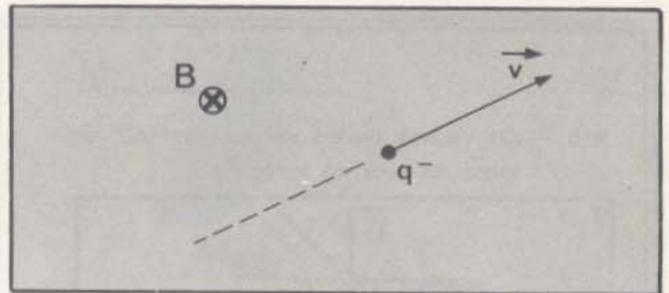


figura 13

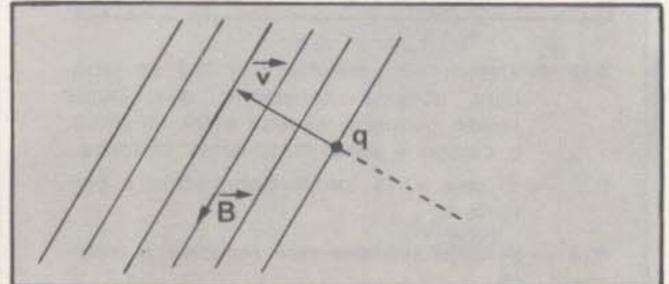


figura 14

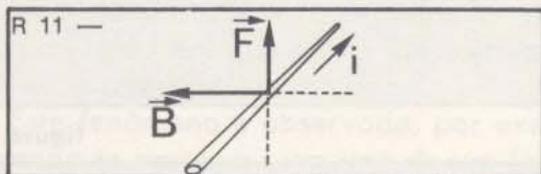
## RESPOSTAS

**R<sub>20</sub>** -

**R<sub>22</sub>** -

**R<sub>24</sub>** -

R10 — Os vetores devem ser girados  $180^\circ$  em torno do eixo do vetor  $\vec{F}$ .



R12 — Devem ser paralelas. No ímã de ferradura pode-se considerar que, numa região pequena, situada entre os pólos, o campo é aproximadamente uniforme.

R13 —  $F$  deve variar proporcionalmente à corrente  $i$ .

R14 — A força também será reduzida à metade.

R15 —  $F = Bi\ell$

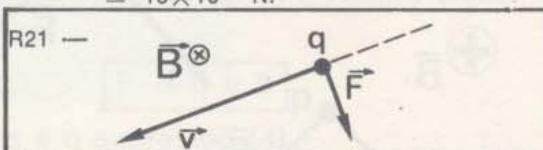
R16 —  $F = 2 \times 0,3 \times 0,2T \times A \times m = 0,12N$ .

R17 — A relação (2) é mais geral, porque se aplica para qualquer valor de  $\theta$ . Note que a relação (1) é um caso particular da (2), que corresponde ao valor  $\theta = 90^\circ$ .

R18 — A força é perpendicular ao plano da figura, saindo do papel.

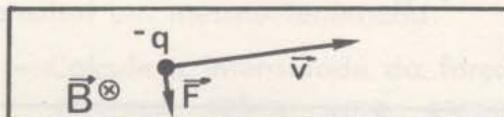
R19 —  $F = 0$ .

R20 —  $F = qvB = 3 \times 10^{-15} \times 10^7 \times 5 \times 10^{14} = 15 \times 10^{-4} N$ .



R22 — O ângulo entre  $\vec{F}$  e  $\vec{v}$  e entre  $\vec{F}$  e  $\vec{B}$  é  $90^\circ$ .

R23 —



R24 — A intensidade de  $\vec{F}$  é igual ao produto  $q.v.B$ ; a direção é perpendicular a  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ ; portanto, perpendicular ao plano da figura. O sentido  $\vec{F}$  é o de um vetor que entra na folha de papel.

## 6. Exercícios de aplicação I

- E1** — Um fio, percorrido por corrente, quando colocado numa região onde há campo magnético, sofre a ação de uma força. De que grandezas físicas depende o valor da força?
- E2** — Um fio de cobre é colocado entre os pólos de um ímã em forma de ferradura, conforme a figura 15(a). Ao se fechar o circuito elétrico, aparece sobre o fio uma força  $\vec{F}$  apontando para dentro do ímã. Indique a polaridade da pilha. Se for mantida a mesma ligação com a pilha e a posição do ímã for a (b) da figura 15, indique na figura o sentido da força sobre o fio.
- E3** — Coloca-se um condutor que tem uma parte retilínea de 1cm de comprimento numa região em que há um campo magnético uniforme que é perpendicular ao condutor e tem módu-

lo  $B = 2 \times 10^{-1} T$  (este é o valor aproximado do campo produzido pelo seu ímã). Faz-se uma corrente de 1A atravessar este condutor. Calcule a intensidade da força que aparece sobre o condutor.

Para você ter uma idéia do tamanho dessa força, pode compará-la com o peso de um objeto. Calcule a massa que deve ter esse objeto, considerando a aceleração da gravidade igual a  $9,8m/s^2$ . Cite um objeto comum com massa semelhante.

- E4** — O condutor do problema anterior sofre um deslocamento por influência da força que age sobre ele. Com isso, ele passa para uma região em que o campo magnético tem metade da intensidade anterior. A que força o condutor está sujeito agora? Para que a força fique igual à anterior, qual deve ser o valor da corrente nessa nova posição?

**E5** — Um trecho  $MN$  de um condutor percorrido por corrente está num campo magnético  $\vec{B}$  (figura 16). Suponha que a posição do trecho  $MN$  esteja mudando sobre o plano da figura 16. Desta forma, o ângulo  $\theta$ , entre  $i$  e  $\vec{B}$ , estará variando.

- a) A força sobre o condutor variará?
- b) Para que valor de  $\theta$  a força será máxima?
- c) Para que valor de  $\theta$  a força será mínima?

**E6** — Faça um gráfico (na página seguinte), representando  $F$  e  $m$  função de  $\theta$ , para a situação descrita no exercício anterior. Tome para  $\theta$  os valores  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$ . O que acontece com a direção e com o sentido da força?

**E7** — Em que condições aparece força sobre uma carga elétrica numa região em que há campo magnético?

**E8** — Uma partícula com carga elétrica positiva  $q$  e massa  $m$  é lançada com uma velocidade de módulo  $v$  perpendicularmente às linhas de campo de um campo magnético, uniforme,  $\vec{B}$  (figura 17). Determine a força que aparece sobre a partícula e sua aceleração quando entra na região do campo magnético e represente-as na figura. Desenhe a trajetória aproximada que a partícula terá nessa região e indique na figura um ponto  $Y$  em que ela sai do campo magnético.

**E9** — Suponha agora que a mesma carga do problema anterior entra pelo ponto  $Y$  com velocidade igual à de saída, mas de sentido oposto. É possível seguir a mesma trajetória voltando a passar por  $X$ ?

**E10** — Responda ao exercício 9 supondo que a carga elétrica que entra pelo ponto  $Y$  é negativa.

**E11** — Refaça o exercício 8 supondo que a carga elétrica é negativa.

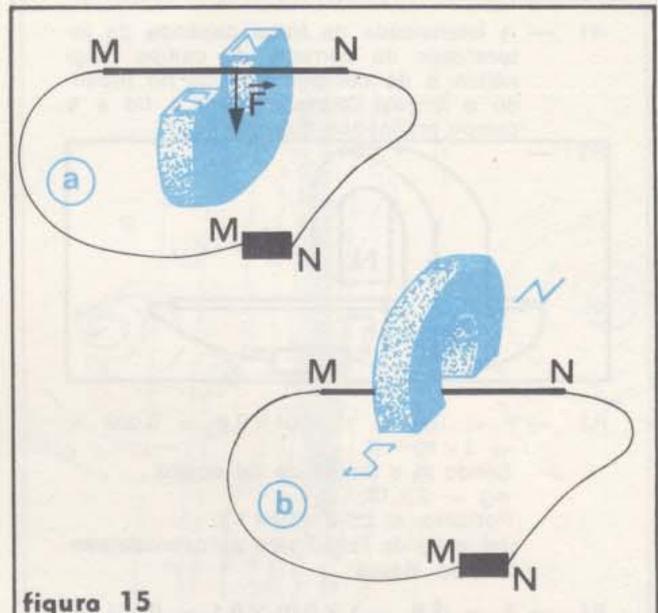


figura 15

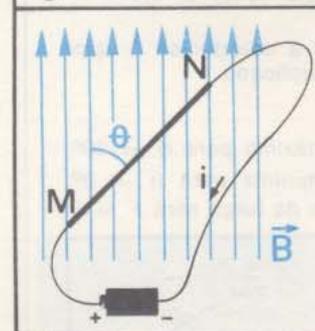


figura 16

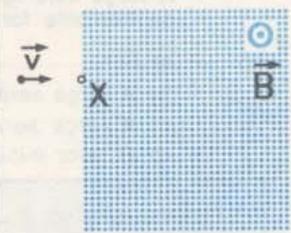
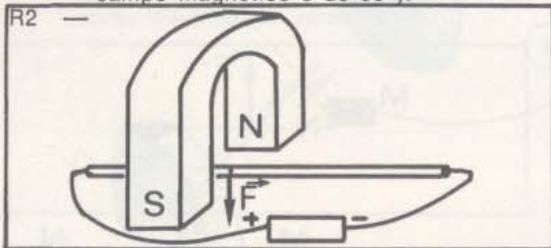


figura 17

## RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

**R**<sub>1</sub> -  
**R**<sub>3</sub> -  
**R**<sub>4</sub> -  
**R**<sub>5</sub> -  
**R**<sub>6</sub> -  
**R**<sub>7</sub> -  
**R**<sub>8</sub> -  
**R**<sub>9</sub> -  
**R**<sub>10</sub> -  
**R**<sub>11</sub> -

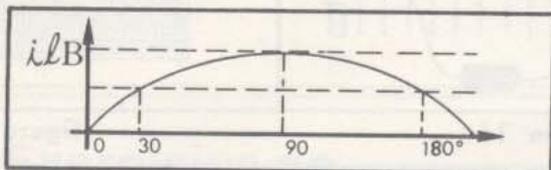
R1 — A intensidade da força depende da intensidade da corrente do campo magnético e do comprimento do fio (quando o ângulo formado entre o fio e o campo magnético é de  $90^\circ$ ).



R3 —  $F = i\ell B = 1 \times 0,01 \times 0,2 = 0,002 = 2 \times 10^{-3} \text{ N}$ .  
 Sendo  $m$  a massa de tal objeto,  
 $mg = 2 \times 10^{-3}$ .  
 Portanto,  $m \approx 2 \times 10^{-4} \text{ kg}$ .  
 Um grão de feijão tem aproximadamente essa massa.

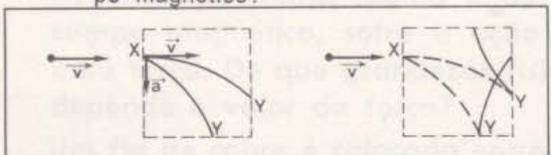
R4 —  $F = i\ell B = 1 \times 0,01 \times 0,1 = 0,001 = 10^{-3} \text{ N}$ .  
 A força será igual à anterior se o valor da corrente for duplicado.

R5 — a) Sim;  
 b) A força será máxima para  $\theta = 90^\circ$ ;  
 c) A força será mínima para  $\theta = 0^\circ$ ;  
 d) O valor mínimo da força será  $F = 0$ .



R6 — A direção e o sentido da força não se alteram. Somente o módulo varia.

R7 — Quando a partícula está em movimento e a direção da velocidade não forma um ângulo nulo com a direção do campo magnético.

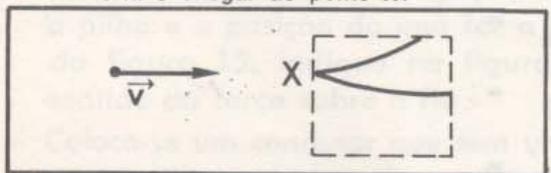


R8 —  $F = qvB = ma$  logo,  $a = \frac{qvB}{m}$ .

A trajetória é semelhante a algumas dessas representadas.

R9 — Não. A trajetória será semelhante às representadas na figura.

R10 — Se uma carga negativa entrar pelo ponto Y, ela poderá seguir a mesma trajetória e chegar ao ponto X.



R11 —  $ma = -qvB$ .  
 A trajetória é semelhante a algumas dessas representadas.

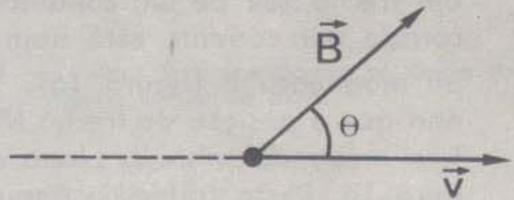


figura 18

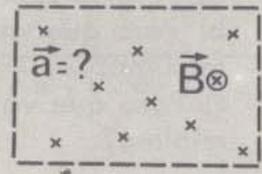
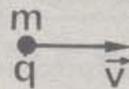


figura 19

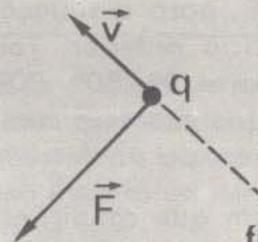


figura 20

## 7. Intensidade da força sobre cargas em função do ângulo

Estudamos somente o caso em que o campo magnético e a velocidade das cargas têm direções perpendiculares; experiências realizadas mostram que, se  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$  formam um ângulo  $\theta$  (figura 18), a força  $\vec{F}$  pode ser calculada pela expressão:

$$F = q v B \text{ sen}\theta \quad (5)$$

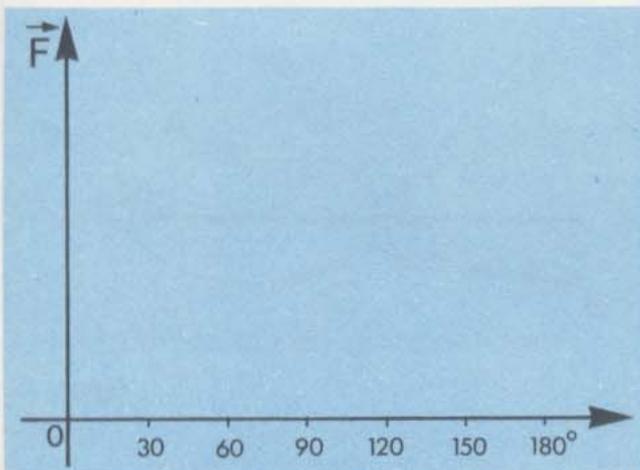
**Q25** — Calcule o valor da força que age sobre a carga  $q = +2 \times 10^{-18} \text{ C}$ , que se move com velocidade  $5 \times 10^7 \text{ m/s}$ , ao entrar num campo magnético de intensidade  $10^4 \text{ T}$  (figura 18); o ângulo  $\theta$  vale  $30^\circ$ .

**Q26** — Qual a direção e o sentido dessa força?

**Q27** — Qual deve ser o valor de  $\theta$ , para que a força sobre a carga seja igual a zero?

**Q28** — Para que valor do ângulo  $\theta$  a força sobre a carga tem valor máximo?

**Q29** — Suponha que na **Q25** a carga é negativa. Qual será a força, em módulo, direção e sentido?



A foto mostra duas espirais que correspondem às trajetórias de um elétron e de um pósitron (o pósitron é uma partícula semelhante ao elétron, mas com carga positiva). As duas partículas têm origem em P e descrevem espirais opostas na presença de um campo magnético, que é perpendicular ao plano da fotografia. O evento ocorreu numa câmara de bolhas no laboratório de Brookhaven (EUA). As espirais menores representam elétrons de baixa energia. Alguns dos traços têm tão pouca curvatura que parecem retas.

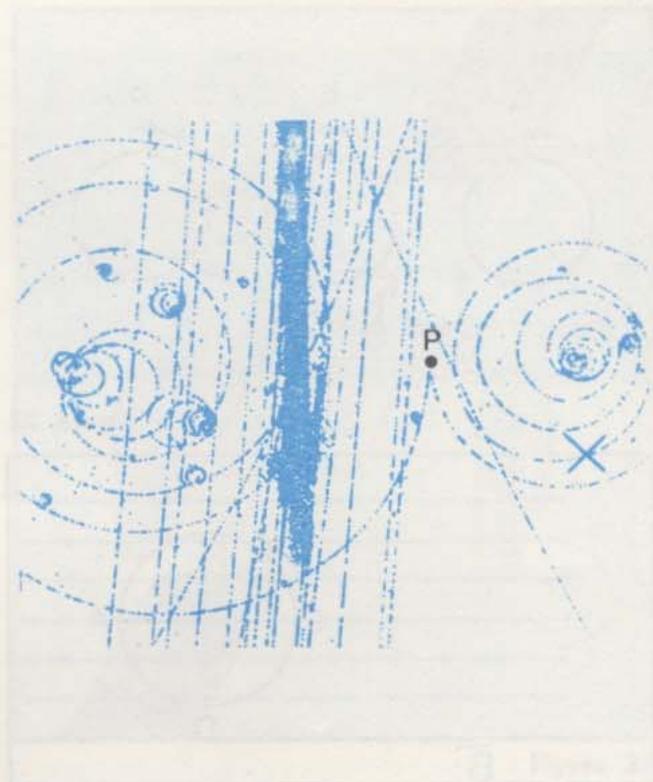


figura 21

Vejamos agora qual o efeito da força que age sobre uma carga que se movimenta num campo magnético, isto é, vamos estudar o movimento de uma carga elétrica que se movimenta numa região em que existe um campo magnético.

Você já sabe que, nessas condições, aparece uma força sobre a carga (essa força é nula, quando  $\theta = 0$  ou  $\theta = \pi$ ). Logo, a carga elétrica ficará sujeita a uma aceleração, cujo valor depende de sua massa.

**Q30** — Se a partícula de carga  $q$  e velocidade  $\vec{v}$  tem massa  $m$ , como você poderá calcular a aceleração que a partícula adquirirá quando entrar num campo magnético  $\vec{B}$ , cuja direção é perpendicular a  $\vec{v}$ ? (figura 19)

**Q31** — Indique, nas figuras 19 e 20, a direção e o sentido da aceleração correspondente.

Ora, a aceleração de uma partícula corresponde a uma variação de sua velocidade. Assim, se a aceleração tem direção diferente da direção da velocidade, há modificação na trajetória da partícula.

**Q32** — Indique no esquema da figura 20 a trajetória aproximada que a carga  $q$  deverá seguir.

A figura 21 mostra as trajetórias de partículas carregadas que se deslocam num campo magnético. Você pode notar que essas trajetórias não são retilíneas.

## RESPOSTAS

R 25 -

R 26 -

R 27 -

R 28 -

R 29 -

R 30 -

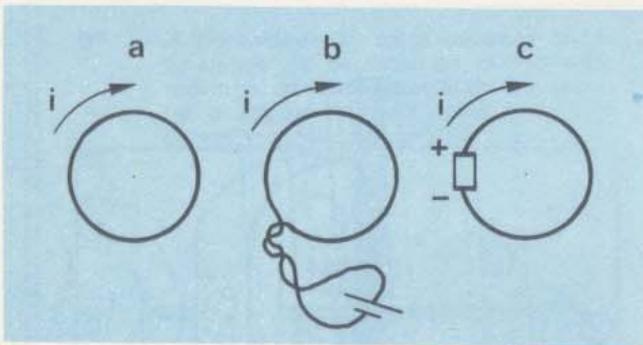


figura 22

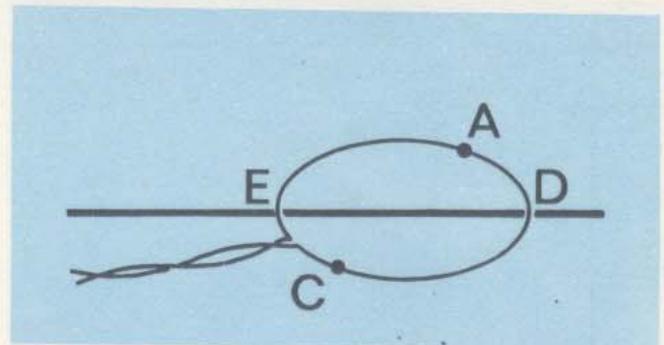


figura 24

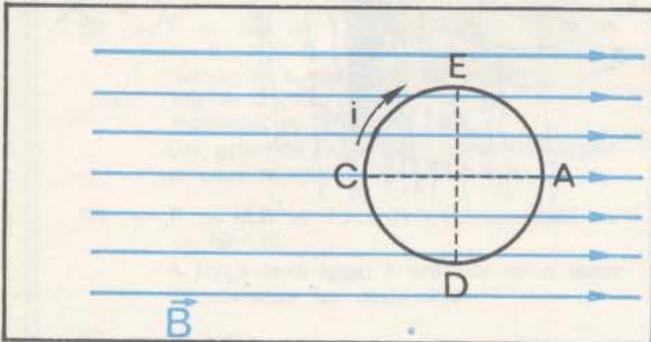


figura 23

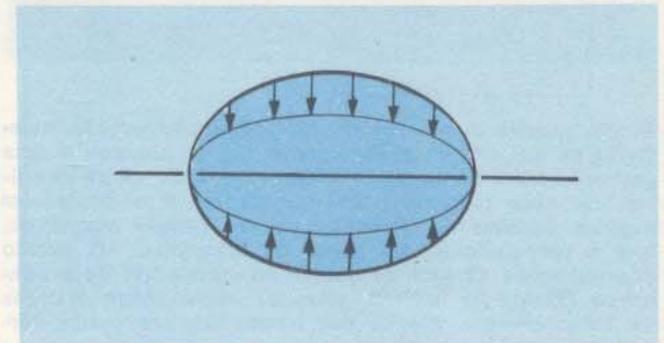


figura 25

Outro resultado importante sobre o movimento da partícula pode ser obtido da equação  $F = q v B$ . Se a partícula estiver parada, isto é, se  $v = 0$ , a força que age sobre a partícula será nula. Ou seja, o campo magnético externo  $\vec{B}$  não interage com a partícula, se ela estiver parada.

## 8. Espira num campo magnético

Já discutimos a influência de um campo magnético sobre um condutor retilíneo percorrido por corrente. Nesse caso nos preocupamos apenas com o trecho do fio que estava no campo. O resto do condutor, que completava o circuito ligando-se a uma pilha, não estava sujeito a forças de origem magnética, porque estava fora do campo.

Estudaremos agora o caso em que um condutor que forma um circuito fechado percorrido por corrente está todo dentro de uma região em que há campo magnético.

Um fio condutor, com a forma indicada na figura 22, percorrido por uma corrente  $i$ , é chamado **espira circular de corrente**. Imagine uma espira de corrente colocada num campo magnético uniforme paralelo ao seu plano, como mostra a figura 23.

**Q33** — Indique nos pontos **A**, **C**, **D** e **E** da figura 23 a direção e o sentido de percurso da corrente.

- Q34** — Qual a direção e o sentido da força que aparece no ponto **A** da espira?
- Q35** — Qual a direção e o sentido da força que aparece no ponto **C**?
- Q36** — Qual o módulo da força nos pontos **D** e **E**?
- Q37** — Qual a relação entre os módulos da força em **A** e em **C**?

Imagine que a espira seja suspensa num suporte horizontal, pelos pontos **D** e **E**. Imagine também que, na ausência de campo magnético, ela esteja equilibrada nesse suporte (veja figura 24).

**Q38** — O que deve ocorrer com a espira assim suspensa, quando colocada num campo magnético uniforme, paralelo ao seu plano?

Nessas condições, será que somente os pontos **A** e **C** ficarão sujeitos à ação de uma força?

Já vimos que em **D** e **E** a força é nula; como será então a força no trecho situado entre esses pontos?

Nessas regiões,  $\vec{i}$  não é perpendicular a  $\vec{B}$ ; para determinar o módulo de  $\vec{F}$ , devemos utilizar a expressão

$$F = i l B \sin \theta.$$

À medida que nos aproximamos de **E** ou **D**, o ângulo  $\theta$  entre  $\vec{i}$  e  $\vec{B}$  vai decrescendo; assim, a força, que depende de  $\sin \theta$ , também decresce.

As forças que aparecem sobre os vários trechos da espira estão representados na figura 25.

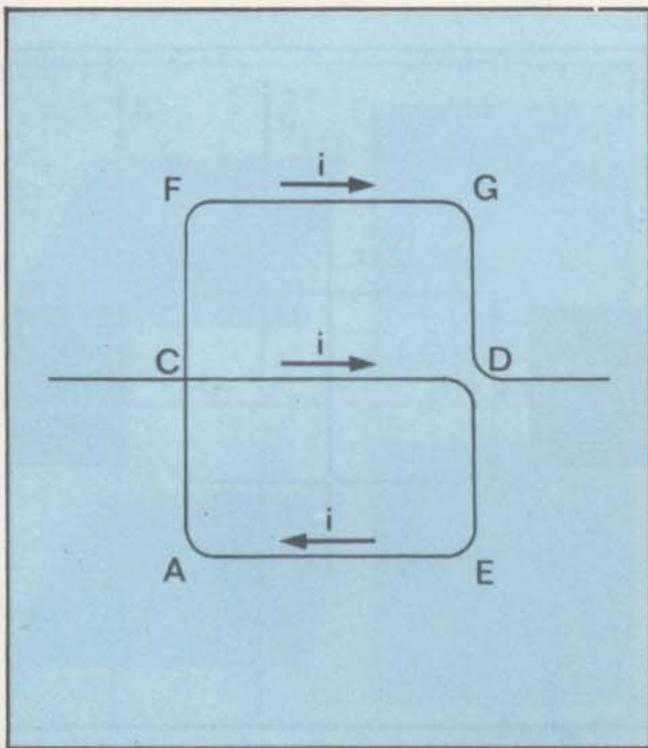


figura 26

Note que em cada um dos semicírculos a força tem o mesmo sentido.

**Q39** — Qual deve ser o valor da resultante de todas as forças que agem sobre a espira?

Para calcular a força total que age em cada semicírculo, são necessárias técnicas matemáticas um pouco mais complexas. Não faremos isso agora.

Estudaremos uma configuração parecida, considerando uma espira retangular, pois nesse caso o cálculo fica muito simplificado e as conclusões serão semelhantes.

Você vai inicialmente observar o que se passa, fazendo uma experiência.

Tome um fio condutor dobrado de modo a formar um retângulo (figura 26); o fio deve ser isolado externamente (pode ser de cobre envernizado). A corrente deve percorrer esse dispositivo, como está indicado na figura, sem que haja contato nos pontos **C** e **D**, em que o fio é superposto.

Monte esse dispositivo num suporte e estabeleça um campo magnético uniforme, paralelo ao plano do dispositivo. Esse campo magnético pode ser obtido, com boa aproximação, se você usar dois ímãs de barra, como mostra a figura 27.

Feche o circuito, ligando **C** e **D**, respectivamente, aos terminais positivo e negativo de uma pilha.

**Q40** — Descreva o que ocorre na experiência, no instante em que a pilha é ligada, e indique, na figura 28, as forças que aparecem em cada trecho do dispositivo.

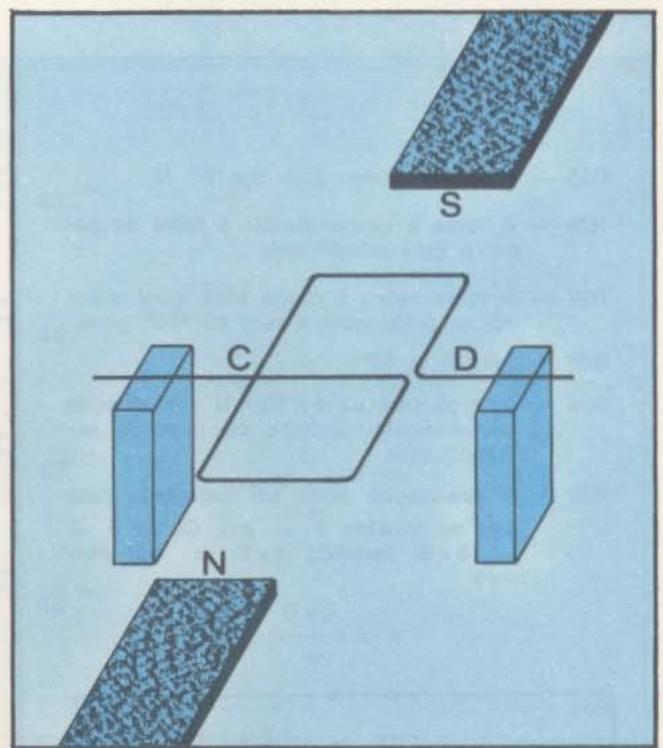


figura 27

## RESPOSTAS

R<sub>34</sub> -

R<sub>35</sub> -

R<sub>36</sub> -

R<sub>37</sub> -

R<sub>38</sub> -

R<sub>39</sub> -

R<sub>40</sub> -

R25 —  $F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta = 5 \times 10^{-7} \text{ N}$ .

R26 — A força é perpendicular à folha de papel e está saindo dela.

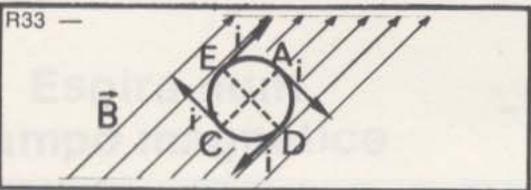
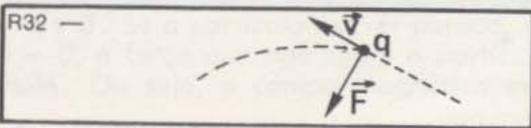
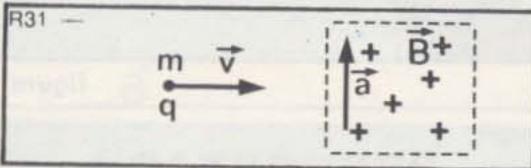
R27 — A força sobre a carga será igual a zero, se  $\theta$  for igual a zero ou  $180^\circ$ .

R28 — Para  $\theta = 90^\circ$ .

R29 — A força será de  $5 \times 10^{-7} \text{ N}$  com direção perpendicular à folha de papel e entrando nela.

R30 — A aceleração pode ser calculada pela Lei de Newton  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ . Como  $F = qvB$ , teremos  $qvB = ma$ , portanto,

$$a = \frac{qvB}{m}$$



R34 — A força em A é perpendicular à folha de papel saindo dela.

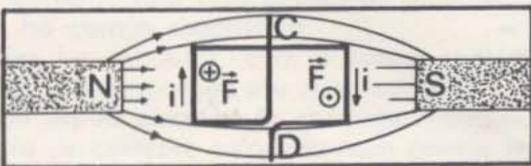
R35 — A força em C é perpendicular à folha de papel entrando nela.

R36 — O módulo da força em D e E é zero.

R37 — Os módulos das forças em A e C são iguais.

R38 — A espira deve tender a girar.

R39 — A resultante de todas as forças sobre a espira deve ser zero.



R40 — A espira tende a girar devido ao torque produzido pelas forças.

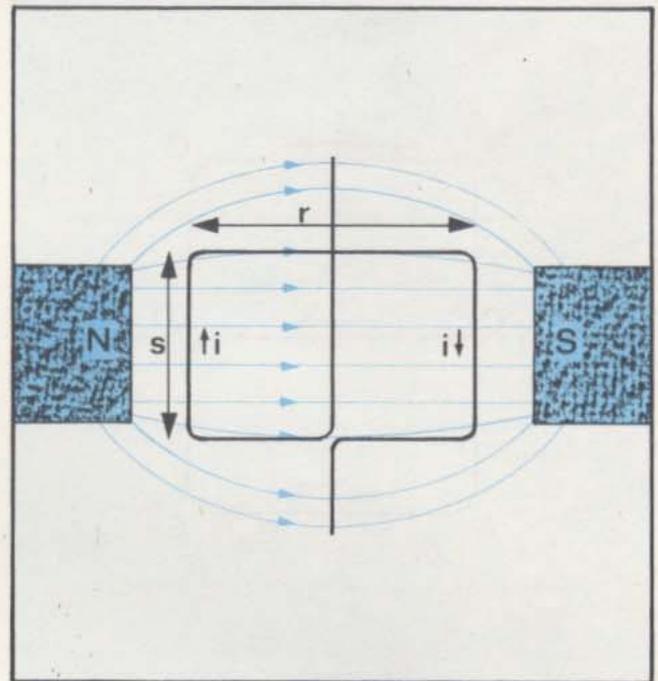


figura 28

Se conhecermos os valores de  $\vec{B}$  e de  $i$ , podemos ainda calcular a intensidade da força nos trechos **AE** e **FG**.

Sejam  $r$  e  $s$  os comprimentos dos lados do retângulo (figura 28); então,  $F = isB$  para os lados perpendiculares  $\vec{aB}$ , e  $F = 0$ , para os lados paralelos  $\vec{aB}$ .

Quando uma força produz ou tende a produzir rotação em torno de um eixo fixo, é conveniente exprimir a situação por meio de uma grandeza vetorial chamada **conjugado** (ou **torque**) **da força em relação ao eixo**.

Em nosso caso, obtém-se o módulo do conjugado, multiplicando o módulo da força pela distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação. O conjugado, devido à força em **AE**, tem intensidade

$$\tau_1 = F \frac{s}{2}$$

O conjugado correspondente à força em **HG** é

$$\tau_2 = F \frac{s}{2}$$

Como os dois conjugados têm por efeito fazer o retângulo girar no mesmo sentido, o torque total sobre o retângulo será:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \text{ ou } \tau = F \cdot s$$

Substituindo a expressão de **F** em função de **B** e  $i$ , teremos:

$$\tau = i \cdot s \cdot r \cdot B$$

mas  $s \cdot r$  é a área **A** do retângulo, então

$$\tau = iAB$$

(6)

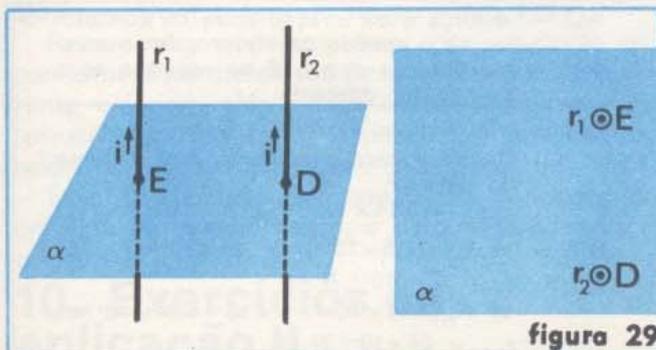


figura 29

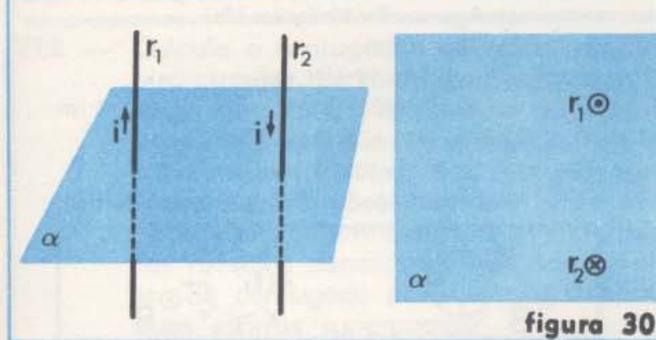


figura 30

Essa expressão, que permite calcular o conjugado, vale também para uma espira plana de forma qualquer. Essa generalização pode ser demonstrada e verificada experimentalmente.

**Q41** — Escreva a expressão de  $\tau$  para uma espira de raio  $r$ .

A expressão  $\tau = \mathbf{iAB}$  é válida no caso em que a direção do campo magnético é paralela ao plano da espira. Se a direção do campo não for paralela ao plano da espira, o torque terá um valor diferente e, no caso particular em que essa direção é perpendicular ao plano da espira, o torque será zero.

Em resumo, um condutor de qualquer forma, percorrido por corrente e imerso num campo magnético uniforme, fica sujeito a um conjunto de forças. A resultante de todas essas forças é nula e, dependendo da forma do fio e de sua orientação em relação ao campo, pode estar sujeita a um torque.

## 9. Força entre dois condutores paralelos

Um condutor retilíneo, quando percorrido por corrente, produz ao seu redor um campo magnético. Por outro lado, um condutor, quando percorrido por corrente, fica sujeito a uma força, desde que esteja colocado num campo magnético.

Vamos analisar aqui o efeito obtido, quando se tem dois condutores próximos paralelos, percorridos por corrente.

Suponha que dois fios condutores retilíneos e paralelos  $r_1$  e  $r_2$  são percorridos por uma mesma

## RESPOSTAS

**R 41** -

**R 44** -

**R 47** -

**R 49** -

corrente elétrica  $i$ , que tem o mesmo sentido nos dois fios, como indicado na figura 29.

**Q42** — Indique no plano  $\alpha$  da figura 29 algumas linhas de campo correspondentes ao campo magnético produzido pelo condutor  $r_1$  ( $i$  saindo do papel).

**Q43** — Represente, no ponto **D** da figura 29, o vetor  $\vec{B}$  correspondente ao campo magnético produzido pelo condutor  $r_1$ .

**Q44** — O que você espera que ocorra com o condutor  $r_2$ , quando sujeito a esse campo magnético?

**Q45** — Indique, na mesma figura, a direção e o sentido da força que aparece em  $r_2$ .

**Q46** — Imagine, agora, o condutor  $r_1$  no campo magnético produzido por  $r_2$ . Indique, na mesma figura, o vetor  $\vec{B}$  e a força para o ponto **E** de  $r_1$ .

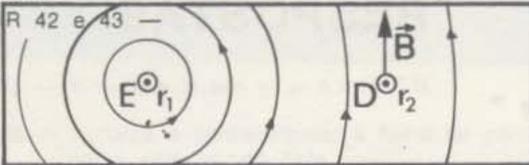
**Q47** — Se os dois condutores  $r_1$  e  $r_2$  estiverem livres para se movimentarem, o que deve ocorrer?

Suponha, agora, que as correntes nos condutores têm sentidos contrários. Na figura 30,  $i$  sai do papel no condutor  $r_1$  e entra no papel no condutor  $r_2$ .

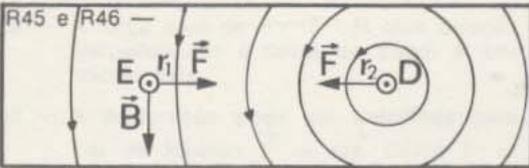
**Q48** — Responda, indicando na figura 30, as questões de **42** a **47** para este caso.

**Q49** — Qual o efeito da força que aparece em cada condutor?

R41 —  $\tau = IAB = i\pi r^2 N$ .



R44 — O condutor  $r_2$  deve ficar sujeito a uma força devida ao campo magnético produzido por  $r_1$ .



R47 — Os dois condutores devem atrair-se.



R48 — Neste caso, os condutores repelem-se.

R49 — O aparecimento de uma força sobre cada condutor produz repulsão entre eles.

R50 —  $B = \frac{Ci_1}{2\pi d}$

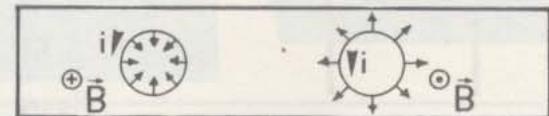
R51 — O campo magnético  $\vec{B}$  é constante ao longo de  $r_2$  porque  $r_1$  e  $r_2$  são paralelos ( $d$  é constante).

R52 —  $\frac{F}{\ell} = \frac{Ci_1 i_2}{2\pi d} = 0,25 \times 10^{-6} \text{ N/m}$ .

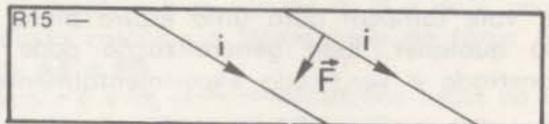
R53 — A força é de atração entre os condutores se o sentido da corrente for o mesmo para os dois. É de repulsão se o sentido for diferente.

R12 —  $\tau = IAB = 1,57 \times 10^{-2} \text{ N.m}$   
O torque para o conjunto será o dobro do anterior.  
 $\tau_{\text{conj}} = 3,14 \times 10^{-2} \text{ N.m}$

R13 — a)  $A_{i_1} = (5 \times 10^{-2})^2 = 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$   
 $\tau_{i_1} = 25 \times 10^{-3} \text{ N.m}$   
b)  $A_{\text{ret}} = 6 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^{-2} = 24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$   
 $\tau_{\text{ret}} = 24 \times 10^{-3} \text{ N.m}$   
c)  $A_{\text{ret}} = 8 \times 10^{-2} \times 2 \times 10^{-2} = 16 \times 10^{-4} \text{ m}^2$   
 $\tau_{\text{ret}} = 16 \times 10^{-3} \text{ N.m}$   
d)  $2\pi r = 20 \times 10^{-2} \text{ m} \therefore r = 3,18 \times 10^{-2} \text{ m}$   
 $A_c = \pi r^2 = 31,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$   
 $\tau_c = 31,8 \times 10^{-3} \text{ N.m}$   
A circunferência produz o maior torque.



R14 — Não, porque sua direção passa pelo diâmetro da espira.



R16 —  $B = Ci/2\pi d = 0,335 \times 10^{-6} \text{ T}$ .  
 $\vec{B}$  é perpendicular ao plano de  $\vec{A}$  e  $\vec{B}$  e, no condutor  $\vec{B}$ , está saindo do papel.

R17 —  $\frac{F}{\ell} = \frac{Ci_1 i_2}{2\pi d} = 0,167 \times 10^{-6} \text{ N/m}$ .

Concluindo, podemos dizer que aparece uma força entre dois condutores paralelos percorridos por corrente. Essa força é de atração, quando o sentido das correntes elétricas que os percorrem é o mesmo, e de repulsão, quando o sentido é oposto.

Veremos agora como calcular a intensidade da força que aparece entre os condutores.

O campo magnético  $\vec{B}$ , produzido por um condutor percorrido por uma corrente  $i_1$ , a uma distância  $r$  do fio, pode ser determinado através da Lei de Ampère.

$$B = \frac{Ci}{2\pi d}$$

Q50 — Volte à figura 29 e escreva o valor de  $B$  que age sobre o condutor  $r_2$ , produzido pela corrente  $i_1$ , do condutor  $r_1$ .

Q51 — O campo magnético  $\vec{B}$  é constante ao longo do condutor  $r_2$ ? Por quê?

Num comprimento  $\ell = 1 \text{ m}$  do condutor  $r_2$ , age uma força que pode ser calculada pela relação

$$F = i_2 \cdot \ell B$$

Então, podemos dizer que, por unidade de comprimento, age uma força que pode ser descrita como:

$$\frac{F}{\ell} = \frac{Ci_1 i_2}{2\pi d}$$

No Sistema Internacional de Unidades, essa expressão é usada para definir a unidade de corrente — **ampère**. Nesse sistema, toma-se arbitrariamente  $C = 1,26 \times 10^{-6} \text{ m T/A}^2$  e define-se o **ampère** da seguinte forma: a corrente que deve percorrer cada um dos condutores paralelos, para que a força que age em cada metro do condutor seja igual a **1N**, quando a distância  $d$  entre eles for **1m**.

Esse valor da constante  $C$  pode também ser utilizado na Lei de Ampère.

Q52 — Uma corrente de 0,5A percorre dois condutores longos paralelos separados por uma distância de 0,2m. Calcule a força que age em um trecho de 1m de cada um dos condutores.

**Q53** — Qual o sentido dessa força  $F/l$ ?

Resumindo, podemos dizer que, quando dois condutores paralelos são percorridos por uma corrente elétrica, eles ficam sujeitos a uma força (atrativa ou repulsiva, dependendo dos sentidos relativos das correntes em cada um).

Essa força, que age em cada condutor por unidade de comprimento, é calculada através da relação (7).

## 10. Exercícios de aplicação II

**E12** — Calcule o conjugado que sofre uma espira circular, de raio 5 cm, quando colocada num campo magnético de módulo  $B = 1\text{T}$ , paralelo ao plano da espira, sabendo que é percorrida por uma corrente de 2A. Suponha que você tem duas espiras idênticas, exatamente nestas mesmas condições; qual será o valor do conjugado para o conjunto das duas espiras superpostas?

**E13** — Faz-se um quadrado, com um fio condutor de 20 cm de comprimento. Ele é percorrido por uma corrente de 1A e está num campo magnético de  $10^{-1}\text{T}$  paralelo a seu plano; o quadrado pode girar em torno da linha AC que passa pelo meio de dois lados opostos.

a) Calcule o torque (ou conjugado) sofrido por este quadrado.

Mantidas todas as condições anteriores, calcule o conjugado nos seguintes casos:

b) o quadrado é transformado num retângulo com um de seus lados igual a 6 cm;

c) o quadrado é transformado num retângulo com um de seus lados igual a 8 cm;

d) o quadrado é transformado numa circunferência.

Qual a forma geométrica que produz torque de maior valor?

**E14** — Uma espira circular é colocada numa região onde o campo magnético é paralelo ao seu eixo. Indique na figura 31 as forças que aparecem sobre a espira em cada caso. Essa força pode produzir torque fazendo a espira tender a girar em torno de um diâmetro?

**E15** — Indique, baseado nos dados da figura 32, o sentido da corrente no fio A.

**E16** — Determine a intensidade do campo magnético produzido pelo condutor B no condutor A da figura 32. Qual a direção e o sentido desse campo?

**E17** — Suponha que as correntes em A e B são iguais a 0,5A e determine a intensidade da força que age num trecho de 1m do condutor A.

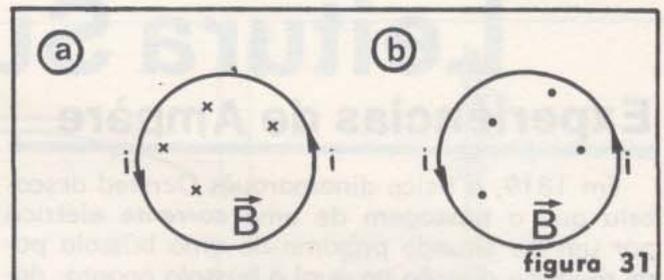


figura 31

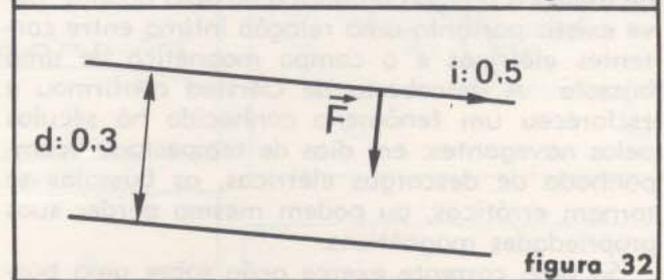


figura 32

## RESPOSTAS

R<sub>50</sub> -

R<sub>51</sub> -

R<sub>52</sub> -

R<sub>53</sub> -

## RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R<sub>12</sub> -

R<sub>13</sub> -

R<sub>14</sub> -

R<sub>16</sub> -

R<sub>17</sub> -

# Leitura Suplementar

## Experiências de Ampère

Em 1819, o físico dinamarquês Oersted descobriu que a passagem de uma corrente elétrica por um fio situado próximo de uma bússola pode mudar a direção na qual a bússola aponta: deve existir portanto uma relação íntima entre correntes elétricas e o campo magnético de uma bússola. A descoberta de Oersted confirmou e esclareceu um fenômeno conhecido há séculos pelos navegantes: em dias de tempestade acompanhada de descargas elétricas, as bússolas se tornam erráticas, ou podem mesmo perder suas propriedades magnéticas.

Se uma corrente exerce ação sobre uma bússola é de se esperar que duas correntes elétricas passando em fios próximos exerçam forças uma sobre a outra. Isto é o que de fato ocorre e que foi descoberto por Ampère, em 1820, menos de um ano depois da descoberta de Oersted: dois fios nos quais passam correntes de mesmo sentido se atraem; se as correntes têm sentidos opostos, os dois fios se repelem (figura 33).

Ampère não só observou este efeito como também estabeleceu uma fórmula para a força que dois elementos de circuitos elétricos exercem um sobre o outro (um elemento de um circuito é um pedacinho pequeno de condutor).

A teoria de Ampère das ações mútuas entre as correntes elétricas é baseada em quatro fatos experimentais. Vamos iniciar esta discussão transcrevendo as próprias palavras de Ampère:

"Quando se descobre um novo tipo de ação, até então desconhecido, o primeiro objetivo do físico deve ser o de determinar os principais fenômenos que resultam desta ação e as circunstâncias em que ela se produz; a tarefa seguinte é a de encontrar um meio de aplicar o cálculo matemático, representando por fórmulas o valor das forças que exercem, uns sobre os outros, os elementos constituintes dos corpos onde este gênero de ação se manifesta.

"Assim que descobri que dois condutores, nos quais circulam correntes, agem um sobre o outro, ou se atraindo ou se repelindo, e que identifiquei e descrevi as ações que eles exercem em situações diferentes em que podem se encontrar, uns em relação aos outros, procurei exprimir o valor da força atrativa ou repulsiva de dois de seus elementos (ou partes infinitamente pequenas), a fim de poder deduzir pelos métodos conhecidos de integração a ação que tem lugar entre duas porções finitas de condutores dados.

"A impossibilidade de realizar diretamente experiências com porções infinitamente pequenas de circuitos nos obriga, necessariamente (a partir de observações feitas sobre fios condutores de grandeza finita e de forma adequada), a permitir que se infira delas a lei de ação mútua de

duas porções infinitamente pequenas. É preciso, pois, fazer uma hipótese sobre o valor da ação mútua das duas porções infinitamente pequenas, deduzir dela a ação que deve resultar para os condutores de grandeza finita e **modificar a hipótese até que os resultados do cálculo estejam de acordo com as observações.**"

Todas as experiências de Ampère são exemplos do que se chama o **método do zero** para comparar forças.

No método usual de comparar forças em Mecânica (método estático), a força desconhecida é comparada ou com o peso de um corpo ou com a deformação de uma mola calibrada previamente.

No **método do zero**, duas forças devidas à mesma causa atuam simultaneamente num corpo que é livre de se movimentar; o estado de equilíbrio deste corpo indica que as forças se compensam.

O **método do zero** de Ampère é realizado por meio de um detector chamado **balança de Ampère**; ela consiste num quadro capaz de girar em torno de um eixo vertical e que possui um fio que forma dois circuitos retangulares de igual área no mesmo plano; a corrente circula em sentidos opostos nos dois quadros (sentido horário num caso e sentido anti-horário no outro). O objetivo deste arranjo é eliminar os efeitos do campo magnético terrestre nos fios condutores de eletricidade. Esta combinação de dois circuitos é dita **estática** (figura 34).

Em lados opostos dos retângulos circulam correntes de sinais opostos que cancelam, pois, os efeitos da interação com o campo magnético terrestre.

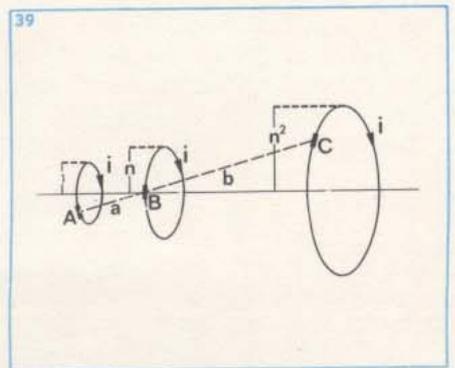
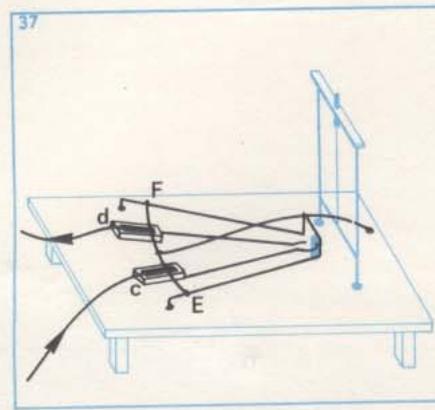
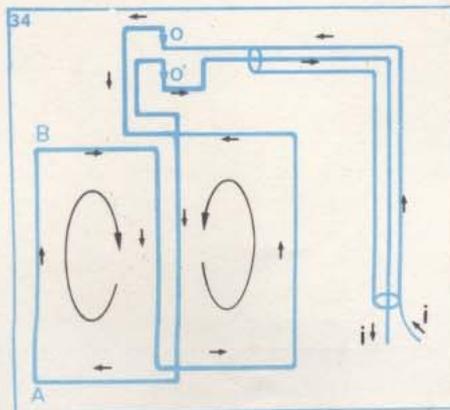
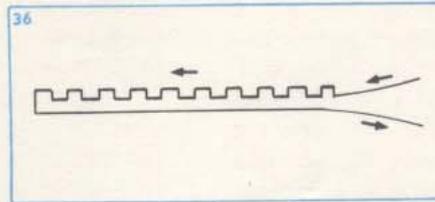
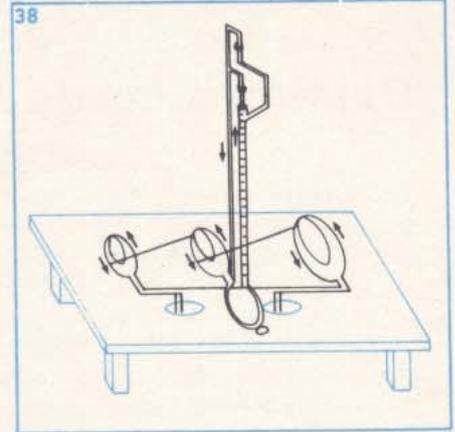
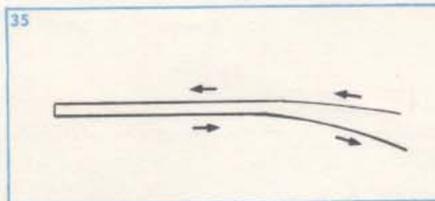
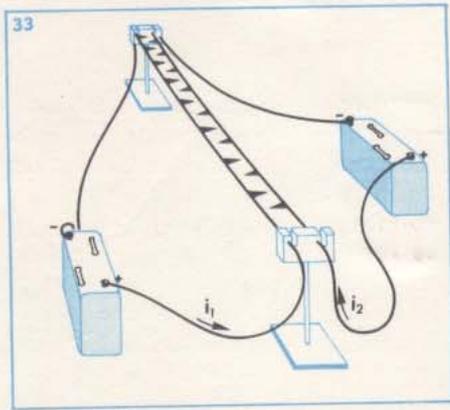
O quadro gira livremente em torno de um eixo vertical; os pontos por onde entra e sai a corrente são dois reservatórios de mercúrio **O** e **O'**, nos quais os terminais estão imersos e pivotam.

O lado AB é o detector que pode sofrer a ação de outras correntes ou de ímãs bem próximos, afastando-se da sua posição inicial. Como um todo, este sistema de correntes é insensível à ação do campo magnético terrestre.

### 1.ª Experiência

Esta experiência dá informação sobre o efeito de duas correntes iguais de direção oposta e muito próximas uma da outra (figura 35).

Toma-se em geral o mesmo fio, que é dobrado sobre si mesmo, percorrendo caminhos paralelos na ida e vinda. A passagem de uma corrente por este fio quando colocado nas proximidades do lado AB da balança de Ampère não afeta o seu equilíbrio. Fica demonstrado assim que correntes iguais e opostas produzem forças iguais e opostas sobre um fio percorrido por corrente (fio AB), **ou que o efeito de uma corrente muda de sinal quando a corrente muda de sinal.**



## 2.ª Experiência

Esta experiência dá informações sobre a atividade dos efeitos dos elementos de um condutor.

Uma das partes do fio da experiência anterior é dobrado de maneira a formar um zig-zague, mas permanecendo sempre próximo da primeira (figura 36).

Se a mesma corrente passa pela parte reta e pela parte em zig-zague, o efeito na balança de Ampère é ainda nulo.

Esta experiência, comparada com a anterior, mostra que um fio em zig-zague (desde que não se afaste muito do reto) tem o mesmo efeito que um fio reto que liga suas extremidades.

## 3.ª Experiência

Nesta experiência o detector não é a balança de Ampère, mas consiste de um condutor em forma de arco EF, capaz de se mover apenas na direção da sua tangente; o centro é um eixo vertical em torno do qual pode girar; o condutor se apóia em dois reservatórios de mercúrio C e D por onde a corrente entra e sai (figura 37).

Observa-se que qualquer circuito por onde circula corrente (ou ímã) que se aproxima do condutor móvel não faz com que ele se movimente **ao longo** da direção do arco, o que mostra que **o efeito de um circuito por onde circula corrente sobre o condutor móvel é uma força que é perpendicular a este condutor.**

## 4.ª Experiência

Nesta experiência empregam-se três circuitos de forma circular de raios que estão na propor-

ção  $1:n:n^2$  (figura 38); o círculo do meio é suportado de forma que possa girar livremente; a mesma corrente passa pelos três circuitos. O que se faz é ajustar as distâncias  $a$  e  $b$  dos dois circuitos extremos até que a força que atua no círculo do meio seja zero (figura 39). A experiência mostra que isto ocorre quando  $b = na$ .

Uma análise desta experiência mostra que **a força entre dois elementos de corrente é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles.**

Resumindo, as informações das 4 experiências de Ampère são as seguintes:

- o efeito de uma corrente muda de sinal quando a corrente se inverte;
- os diferentes elementos de um circuito têm efeitos que se somam;
- a força que age sobre um elemento de um condutor percorrido por corrente é sempre perpendicular ao elemento;
- a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância.

Com base nelas, Ampère estabeleceu uma fórmula matemática simples que representa com exatidão as forças que atuam entre dois elementos quaisquer da corrente.

Esta tarefa foi classificada por Maxwell\* como uma das mais brilhantes de toda a história da Física.

\* James C. Maxwell é considerado o "Newton da Eletricidade"; ele estabeleceu as leis fundamentais deste campo da Física, como Newton o fez para a Mecânica.

# Leitura Suplementar

## Experiências de Física

1ª Experiência

Objetivo: Determinar a aceleração da gravidade local.

Material: Cronômetro, fita métrica, objeto em queda livre.

Procedimento: Medir o tempo de queda de um objeto a partir de diferentes alturas e calcular a aceleração.

2ª Experiência

Objetivo: Verificar a conservação da energia mecânica.

Material: Carrinho, rampa, cronômetro.

Procedimento: Medir a velocidade do carrinho no topo e na base da rampa para verificar a conservação da energia.

3ª Experiência

Objetivo: Medir a constante elástica de uma mola.

Material: Mola, massas, cronômetro.

Procedimento: Medir o deslocamento da mola sob diferentes cargas e determinar a constante elástica.

4ª Experiência

Objetivo: Determinar o coeficiente de atrito.

Material: Bloco, superfície inclinada, cronômetro.

Procedimento: Medir o tempo de deslizamento de um bloco por uma rampa inclinada para determinar o coeficiente de atrito.

5ª Experiência

Objetivo: Medir a velocidade da luz.

Material: Fita métrica, cronômetro, equipamento de medição de tempo.

Procedimento: Medir o tempo de percurso de um feixe de luz através de um percurso conhecido.

6ª Experiência

Objetivo: Determinar a velocidade de propagação de uma onda.

Material: Cordão, cronômetro, fita métrica.

Procedimento: Medir o comprimento de onda e o período de uma onda para determinar sua velocidade.

7ª Experiência

Objetivo: Medir a velocidade de uma onda em uma corda.

Material: Cordão, cronômetro, fita métrica.

Procedimento: Medir o comprimento de onda e o período de uma onda em uma corda para determinar sua velocidade.

8ª Experiência

Objetivo: Medir a velocidade de uma onda em um tubo.

Material: Tubo, cronômetro, fita métrica.

Procedimento: Medir o comprimento de onda e o período de uma onda em um tubo para determinar sua velocidade.

9ª Experiência

Objetivo: Medir a velocidade de uma onda em um líquido.

Material: Líquido, cronômetro, fita métrica.

Procedimento: Medir o comprimento de onda e o período de uma onda em um líquido para determinar sua velocidade.

10ª Experiência

Objetivo: Medir a velocidade de uma onda em um sólido.

Material: Sólido, cronômetro, fita métrica.

Procedimento: Medir o comprimento de onda e o período de uma onda em um sólido para determinar sua velocidade.

Esta obra foi impressa pela  
Companhia Gráfica LUX  
Estrada do Gabinal, n.º 1521 — Rio de Janeiro — RJ  
para a  
FENAME — Fundação Nacional de Material Escolar  
Rua Miguel Ângelo, 96 — Maria da Graça  
Rio de Janeiro — RJ — República Federativa do Brasil  
em 1976.