

# PARTE

1

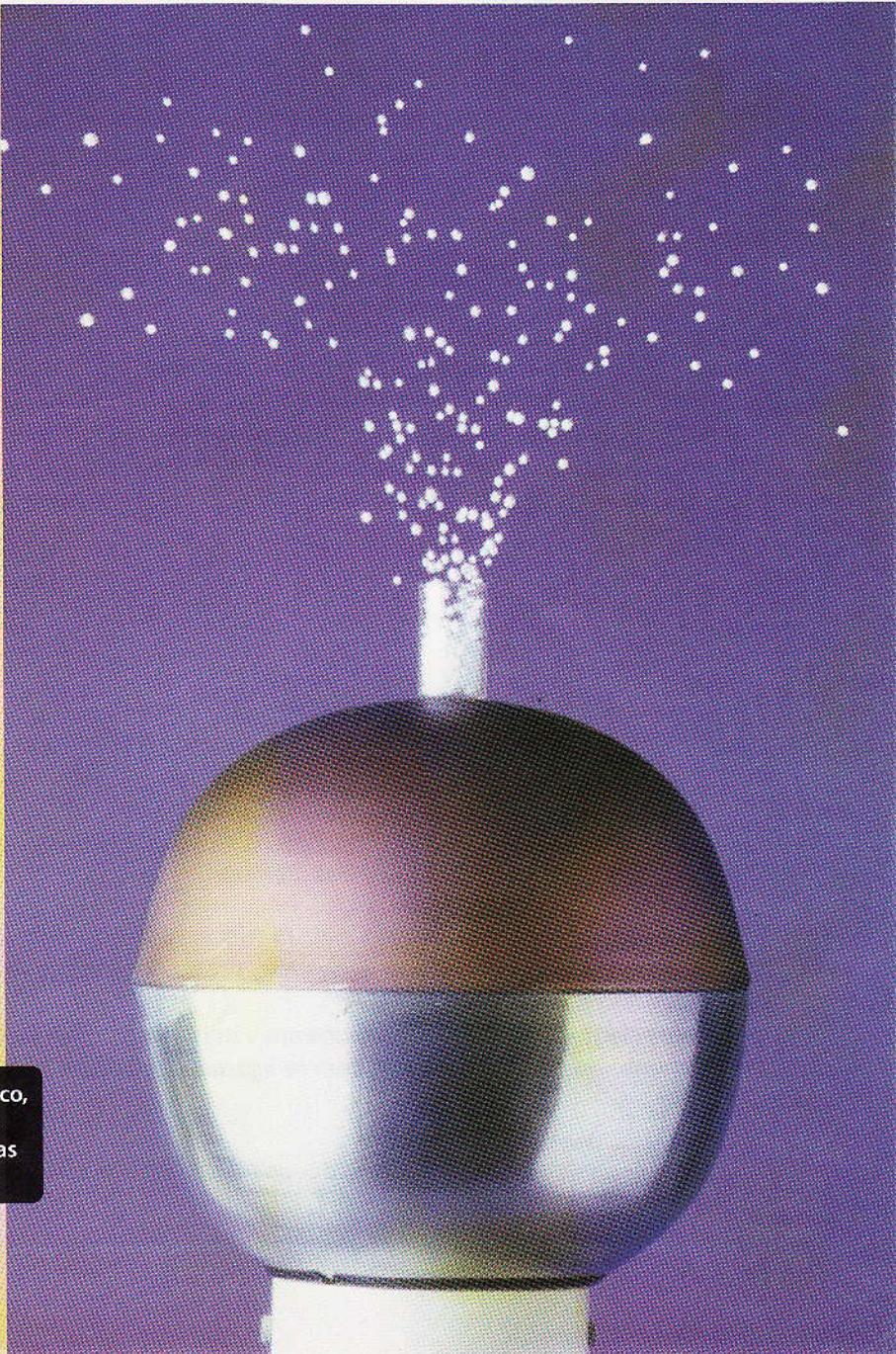
## Cargas elétricas em repouso

Nesta parte, iniciamos o estudo da eletricidade, analisando o comportamento das cargas elétricas em repouso. Apresentamos a lei de Coulomb, que permite obter a intensidade da força entre cargas elétricas consideradas puntiformes. Conceituamos campo e potencial elétrico e capacitação eletrostática.

- CAPÍTULO 1.  
ELETRIZAÇÃO. FORÇA ELÉTRICA**
- CAPÍTULO 2.  
CAMPO ELÉTRICO**
- CAPÍTULO 3.  
TRABALHO E POTENCIAL ELÉTRICO**
- CAPÍTULO 4.  
CONDUTORES EM EQUILÍBRIO  
ELETROSTÁTICO. CAPACITAÇÃO  
ELETROSTÁTICA**

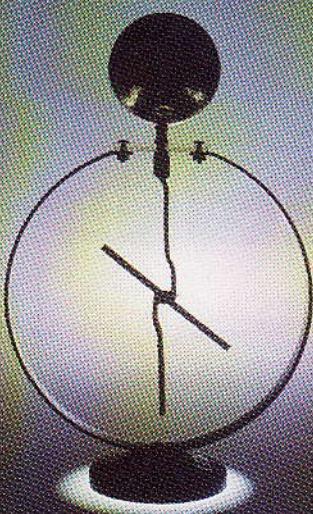
LEVY MENDES JR / LABORSCIENCE

Ao ligar-se o gerador eletrostático, as bolinhas de isopor colocadas sobre ele se eletrizam com cargas de mesmo sinal e são repelidas.



# Eletrização. Força elétrica

CHARLES D. WILFREDS / SPLATINSTOCK



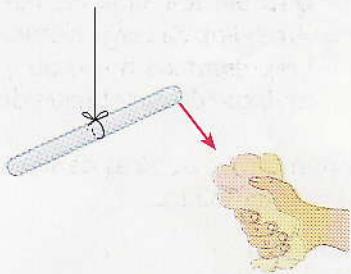
1. ELETRIZAÇÃO POR ATRITO. NOÇÃO DE CARGA ELÉTRICA
2. PRINCÍPIOS DA ELETROSTÁTICA
3. CONDUTORES E ISOLANTES
4. ELETRIZAÇÃO POR CONTATO
5. ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO
6. ELETROSCÓPIOS
7. FORÇAS ENTRE CARGAS ELÉTRICAS PUNIFORMES:  
LEI DE COULOMB

Neste capítulo conceituamos carga elétrica e corpo eletrizado. São apresentados: processos de eletrização de um corpo, procedimentos para determinar se um corpo está eletrizado ou não, por meio de eletroscópios, como o da foto, e também a lei de Coulomb, que nos permite determinar a intensidade da força de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas puntiformes.

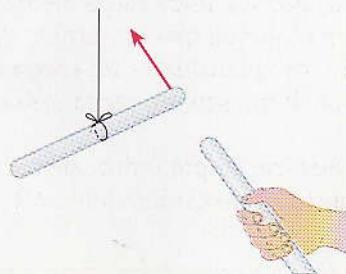


## 1. Eletrização por atrito. Noção de carga elétrica

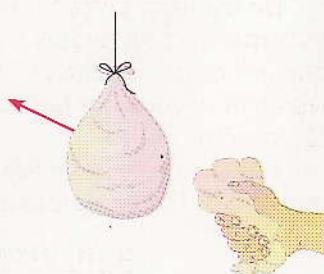
Friccione um bastão de vidro num pedaço de lã. Se o bastão for suspenso por um barbante e o pano de lã for aproximado de uma das extremidades (figura 1), o bastão será **atraído**. Se um segundo bastão de vidro for atritado com outro pano de lã e aproximado do bastão suspenso, este será **repelido** (figura 2). Suspenda, finalmente, um dos panos de lã e aproxime o outro (figura 3). Novamente haverá **repulsão**. Note que as **forças** observadas podem ser de **atração** ou de **repulsão**. Essas forças são, portanto, de natureza diferente das forças gravitacionais, que são sempre atrativas.



**Figura 1.** O vidro e a lã se atraem.



**Figura 2.** Os bastões de vidro se repelem.



**Figura 3.** Os panos de lã se repelem.

Os antigos gregos já haviam observado esse fenômeno ao atritarem o **âmbar\*** com outros corpos. Como, em grego, **âmbar** é *elektron*, posteriormente foi dado a essas forças o nome de **forças elétricas**.

Muitos cientistas e filósofos propuseram várias teorias para explicar tais **fenômenos elétricos**. Sabe-se atualmente que eles estão intimamente ligados à estrutura da matéria.

\* O âmbar é uma resina fóssil cuja tonalidade varia de amarelo a castanho, muito usada na confecção de objetos ornamentais.

Todos os corpos são formados de átomos. Cada átomo é constituído de partículas elementares: os elétrons, os prótons e os nêutrons. Embora hoje existam modelos mais complexos para explicar como essas partículas se distribuem no átomo, ficaremos, para simplificar, com o modelo planetário. Segundo esse modelo, os prótons e os nêutrons estão fortemente coesos numa região central chamada **núcleo**, enquanto os elétrons giram ao seu redor (como os planetas ao redor do Sol), constituindo a **eletrosfera** (figura 4). Por meio de experiências constata-se que os prótons se repelem, o mesmo acontecendo com os elétrons. Entre um próton e um elétron há atração. Para explicar essas ocorrências, estabeleceu-se que prótons e elétrons possuem uma **propriedade física** à qual se deu o nome de **carga elétrica**.

Experiências mostram que prótons e elétrons têm comportamentos elétricos opostos. Por isso convencionou-se que há duas espécies de cargas elétricas: a **positiva** (carga elétrica do próton) e a **negativa** (carga elétrica do elétron). Os **nêutrons** não apresentam essa propriedade física, isto é, os **nêutrons não têm carga elétrica**.

Em resumo:

**prótons:** carga elétrica positiva  
**elétrons:** carga elétrica negativa  
**nêutrons:** não têm carga elétrica



**Figura 4.** Modelo planetário do átomo.

No átomo, o número de prótons é igual ao número de elétrons: dizemos então que o átomo é eletricamente neutro. No núcleo, a intensa força de repulsão entre os prótons é equilibrada por uma outra força, de natureza não-elétrica e não-gravitacional, que mantém juntos os prótons e os nêutrons. Tal força é chamada de **força nuclear**. Por sua própria distribuição, os elétrons podem mais facilmente abandonar o átomo, ou elétrons de fora podem se agregar a ele. Com isso, o átomo pode perder sua neutralidade, adquirindo uma carga positiva (se perder elétrons) ou negativa (se receber elétrons). É essa possibilidade de elétrons se transferirem entre átomos que explica a eletrização dos corpos ao serem atritados.

Ao atritarmos o bastão de vidro com o pano de lã, ocorre uma transferência de elétrons entre eles, de modo que um fica com falta e o outro, com excesso de elétrons.

Os corpos que apresentam excesso ou falta de elétrons são chamados **corpos eletrizados\***. Se num corpo o **número de prótons é igual ao número de elétrons**, dizemos que ele está **eletricamente neutro**. Na experiência ilustrada nas figuras 1, 2 e 3, elétrons passaram do vidro para a lã. A lã, com excesso de elétrons, apresenta carga elétrica negativa. O vidro cedeu elétrons e, portanto, apresenta carga elétrica positiva. **O vidro e a lã eletrizaram-se por atrito, adquirindo cargas elétricas de sinais opostos.**

Do exposto, percebe-se que a propriedade física carga elétrica pode ser quantificada, uma vez que os corpos podem receber ou ceder um maior ou menor número de elétrons. A medida da carga elétrica que um corpo adquire recebe o nome de **quantidade de carga elétrica** e é representada por  $Q$  ou  $q$ . Freqüentemente, por facilidade, fala-se simplesmente carga elétrica  $Q$  ou  $q$ , em lugar de quantidade de carga elétrica  $Q$  ou  $q$ .

Finalmente, ressaltamos que, na eletrização por atrito, além de adquirirem cargas elétricas de sinais opostos, os corpos apresentam quantidades de cargas elétricas de mesmo valor absoluto.



\* É comum dizer que os corpos eletrizados adquirem **eletricidade estática**.

## A série triboelétrica

As substâncias podem ser distribuídas numa seqüência, de acordo com o sinal da carga que adquirem ao serem atritadas umas com as outras. Essa seqüência é denominada **série triboelétrica\***. Ela é organizada de tal maneira que uma dada substância adquire carga positiva se atritada com qualquer outra que a sucede na lista, e carga negativa se atritada com outra que a precede.

Exemplo de uma série triboelétrica com algumas substâncias:

..., vidro, lã, pele de ovelha, seda, algodão, ebonite\*\*, cobre, enxofre, ...

Se nessa seqüência considerarmos a seda, por exemplo, podemos afirmar que ela se eletriza **positivamente**, se for atritada com um bastão de ebonite, e **negativamente**, se for atritada com um bastão de vidro.



## 2. Princípios da Eletrostática

A **Eletrostática** é a parte da Física que estuda as propriedades e a ação mútua das **cargas elétricas em repouso** em relação a um sistema inercial de referência.

Vejamos os princípios sobre os quais se fundamenta a Eletrostática.

### 2.1. Princípio da atração e repulsão

Ao aproximarmos dois bastões de vidro, ambos positivamente eletrizados, ou dois panos de lã, ambos negativamente eletrizados, constatamos repulsão (figuras 5a e 5b). Entre o bastão de vidro, positivo, e o pano de lã, negativo, observamos atração (figura 5c). Esses fatos experimentais permitem enunciar:

Cargas elétricas de mesmo sinal repelem-se; cargas elétricas de sinais opostos atraem-se.

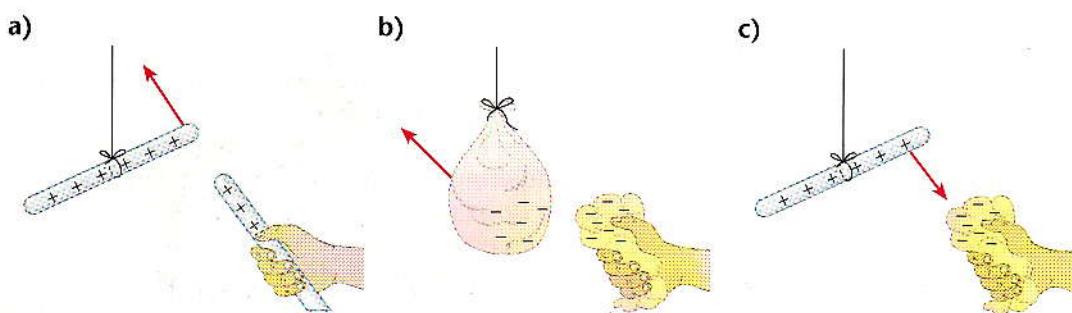


Figura 5.

### 2.2. Princípio da conservação das cargas elétricas

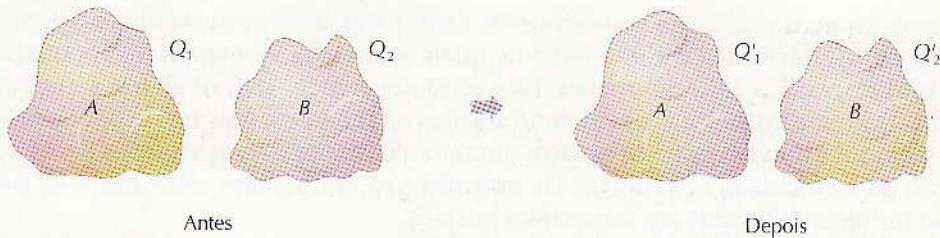
O princípio da conservação das cargas elétricas pode ser assim enunciado:

Num sistema eletricamente isolado, a soma algébrica das quantidades de cargas positivas e negativas é constante.

Consideremos, para exemplificar, dois corpos *A* e *B* eletrizados com quantidades de cargas elétricas  $Q_1$  e  $Q_2$ , respectivamente (figura 6). Admitamos que, de um modo conveniente, houve uma troca de cargas entre os corpos, e sejam, respectivamente,  $Q'_1$  e  $Q'_2$  as novas quantidades de cargas de *A* e *B*.

\* A palavra tribo advém do grego *tribein* e significa "atritar", "esfregar". Por isso a eletrização por atrito é também denominada **triboeletrização**.

\*\* A ebonite é uma substância dura e negra obtida pela vulcanização de borracha com excesso de enxofre.



**Figura 6.** Os corpos A e B estão eletrizados com quantidades de cargas  $Q_1$  e  $Q_2$ . Após a troca de cargas entre os corpos, as novas quantidades de carga serão  $Q'_1$  e  $Q'_2$ .

De acordo com o princípio da conservação das cargas elétricas, a quantidade de carga elétrica total antes da troca é igual à quantidade de carga elétrica total depois da troca, isto é:

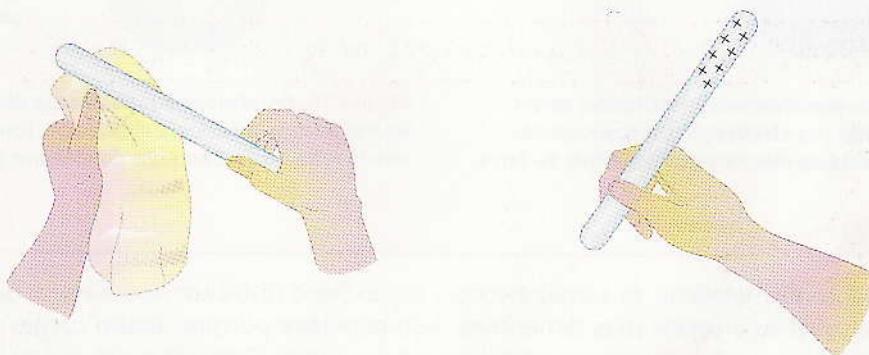
$$Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2$$

Essa igualdade só é válida se o sistema for **eletricamente isolado**, isto é, se o sistema não troca cargas elétricas com o meio exterior.



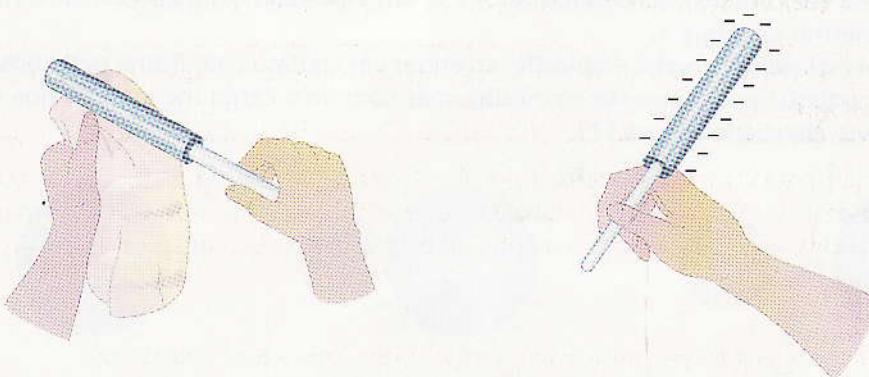
### 3. Condutores e isolantes

Segurando um bastão de vidro por uma das extremidades e atritando a outra com um pano de lã, **somente a extremidade atritada se eletriza** (figura 7). Isso significa que as cargas elétricas em excesso localizam-se em determinada região e não se espalham pelo bastão.



**Figura 7.** No bastão de vidro, as cargas em excesso localizam-se na região atritada.

Repetindo essa experiência com um bastão metálico, segurando-o por meio de um cabo de vidro, o bastão se eletriza e as cargas em excesso espalham-se por toda a sua superfície (figura 8).



**Figura 8.** No bastão metálico, as cargas em excesso distribuem-se por toda a sua superfície.

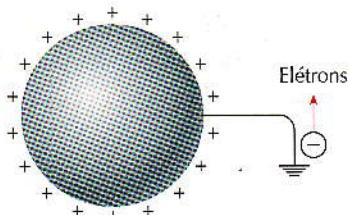
Os materiais, como o vidro, que **conservam as cargas nas regiões onde elas surgem** são chamados **isolantes ou dielétricos**. Os materiais nos quais as **cargas se espalham** imediatamente são chamados **condutores**. É o caso dos metais. Nos condutores metálicos, os elétrons mais afastados do núcleo estão fracamente ligados a ele e, quando sujeitos a uma força, mesmo de pequena intensidade, abandonam o átomo e movem-se pelos espaços interatômicos. Esses são os **elétrons livres**, responsáveis pela condução de eletricidade nos metais. Os isolantes não apresentam elétrons livres, pois todos os elétrons estão fortemente ligados aos respectivos núcleos.

Na prática, não existem condutores e isolantes perfeitos, e sim bons condutores, como os metais e a grafite, e bons isolantes, como a mica e a ebonite.

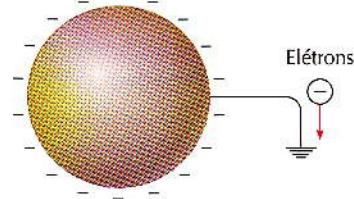
O corpo humano e a Terra também são condutores. Por isso, ao atritarmos o bastão metálico segurando-o diretamente com a mão, as cargas elétricas em excesso espalham-se pelo metal, pelo corpo humano e pela Terra. Isso significa que praticamente o bastão metálico não se eletriza em virtude de suas dimensões serem reduzidas em relação às dimensões da Terra. Desse fato concluímos:

Ao se ligar um condutor eletrizado à Terra, ele perde sua eletrização.

Quando um condutor isolado está positivamente eletrizado, elétrons sobem da Terra para ele, neutralizando seu excesso de cargas positivas (figura 9). Quando um condutor está negativamente eletrizado, seus elétrons em excesso escoam para a Terra (figura 10). Embora o movimento seja sempre dos elétrons, costuma-se dizer que o **condutor se descarrega** ao perder sua eletrização, esteja ele positiva ou negativamente eletrizado antes.



**Figura 9.** Condutor positivamente eletrizado: ao ser ligado à Terra, perde sua eletrização (descarrega-se) em virtude da subida de elétrons provenientes da Terra.



**Figura 10.** Condutor negativamente eletrizado: ao ser ligado à Terra, perde sua eletrização (descarrega-se) em virtude do escoamento de elétrons para a Terra.

### OBSERVAÇÃO

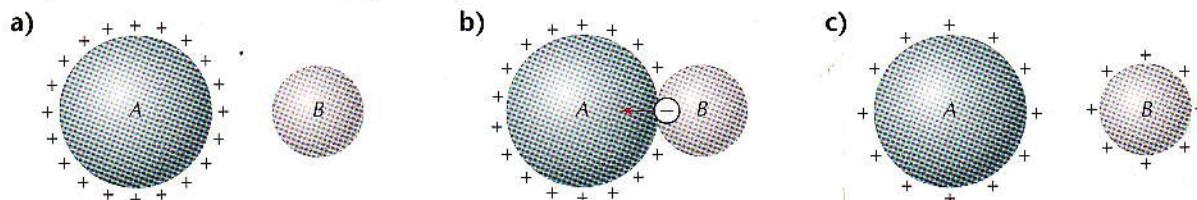
Nos condutores metálicos, as cargas elétricas em excesso distribuem-se sempre na superfície externa, quaisquer que sejam suas dimensões. Isso acontece porque, sendo cargas de mesmo sinal, elas repelem-se mutuamente de modo a manter a maior distância possível entre si.



## 4. Eletrização por contato

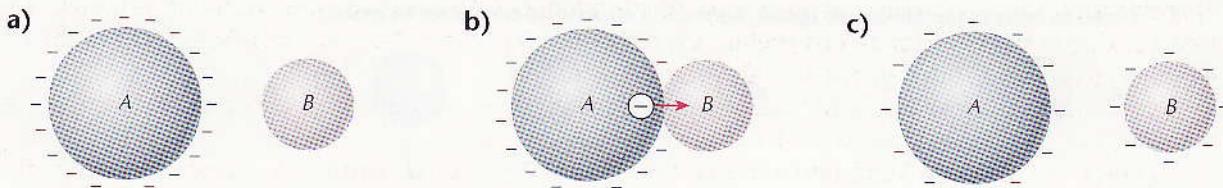
Colocando-se em contato dois condutores *A* e *B*, um eletrizado (*A*) e outro neutro (*B*), *B* se eletriza com carga de mesmo sinal que *A*.

De fato, se *A* está positivamente eletrizado, ao entrar em contato com *B* atrai parte dos elétrons livres de *B*. Assim, *A* continua positivamente eletrizado, mas com uma carga menor, e *B*, que estava neutro, fica positivamente eletrizado (figura 11).



**Figura 11.** (a) *A* positivo e *B* neutro estão isolados e afastados; (b) colocados em contato, durante breve intervalo de tempo, elétrons livres vão de *B* para *A*; (c) após o processo, *A* e *B* apresentam-se eletrizados positivamente.

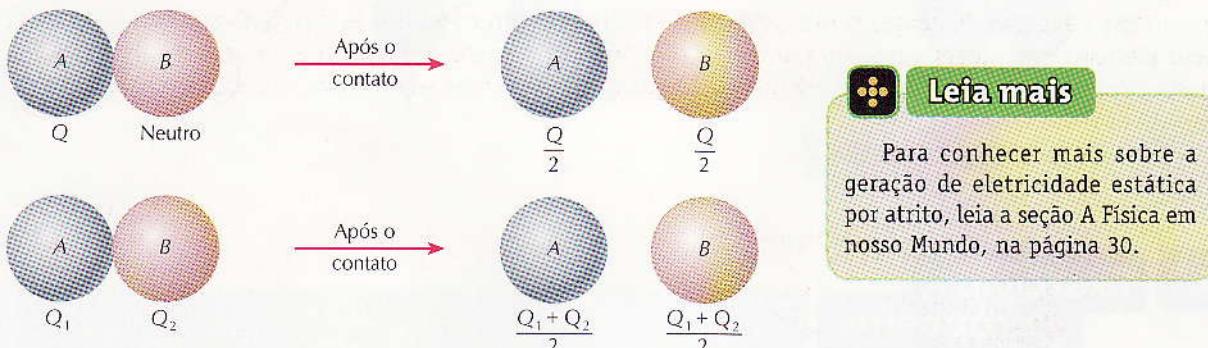
Estando A negativamente eletrizado, seus elétrons em excesso estão distribuídos em sua superfície externa. Ao entrar em contato com B, esses elétrons em excesso espalham-se pela superfície externa do conjunto. Assim, A continua negativo, mas com um menor número de elétrons em excesso, e B, que estava neutro, eletriza-se negativamente (figura 12).



**Figura 12.** (a) A negativo e B neutro estão isolados e afastados; (b) colocados em contato, durante breve intervalo de tempo, elétrons vão de A para B; (c) após o processo, A e B apresentam-se eletrizados negativamente.

Se B for isolante, a carga não se espalha por sua superfície, conservando-se na região do contato.

Considerando-se A e B como **condutores de mesma forma e de mesmas dimensões**, como por exemplo duas esferas condutoras de mesmo raio, após o contato eles terão cargas iguais (figura 13).



### Leia mais

Para conhecer mais sobre a geração de eletricidade estática por atrito, leia a seção A Física em nosso Mundo, na página 30.

**Figura 13.** Eletrização por contato entre esferas condutoras de mesmo raio.



## Exercícios resolvidos

**R.1** Atrita-se uma placa de vidro com um pano de lã, inicialmente neutros, e faz-se a lã entrar em contato com uma bolinha de cortiça, também inicialmente neutra, suspensa por um fio isolante. Se aproximarmos a placa da bolinha, constataremos atração ou repulsão? Justifique.

### Solução:

Atritando-se a placa de vidro com o pano de lã, ambos eletrizam-se com cargas de mesmo valor absoluto e sinais contrários. O vidro se eletriza positivamente e a lã, negativamente (figura a):



**Figura a**

Por contato, a bolinha de cortiça eletriza-se com a carga de mesmo sinal que a lã (figura b):



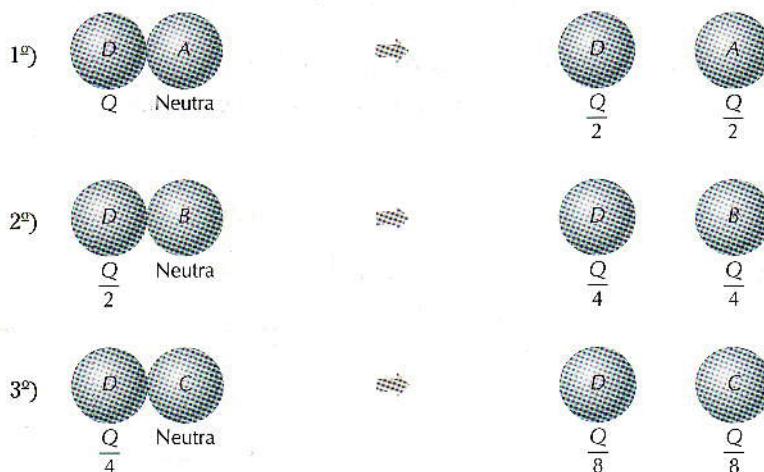
**Figura b**

Ao aproximarmos a placa de vidro da bolinha, há atração, pois a placa está eletrizada positivamente e a bolinha, negativamente.

- R.2** Dispõe-se de quatro esferas metálicas iguais e isoladas umas das outras. Três delas (*A*, *B* e *C*) estão neutras e a quarta (*D*) está eletrizada com a carga *Q*. Coloca-se *D* em contato sucessivamente com *A*, *B* e *C*. Qual a carga final de *D*?

**Solução:**

Como as esferas metálicas são iguais, após cada contato as cargas serão iguais:



**Resposta:** A carga final de *D* é  $\frac{Q}{8}$ .



## Exercícios propostos

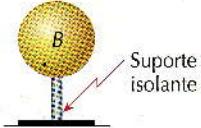
- P.1** Têm-se uma barra de vidro, um pano de lã e duas bolinhas de cortiça, todos inicialmente neutros. Atrita-se a barra de vidro com o pano de lã. A seguir, faz-se a barra de vidro entrar em contato com uma das bolinhas de cortiça e o pano de lã com a outra. Aproximando-se as bolinhas de cortiça constata-se atração. Justifique.

- P.2** Dispõe-se de três esferas metálicas idênticas e isoladas umas das outras. Duas delas (*A* e *B*) estão eletrizadas com cargas iguais a *Q* e a terceira (*C*) está neutra. Coloca-se em contato *C* com *A* e, a seguir, *C* com *B*. Determine, nessas condições, a carga elétrica final de *C*.

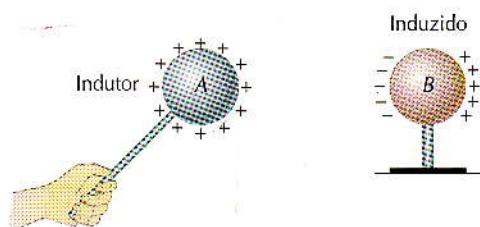


## 5. Eletrização por indução

Seja um condutor *B*, inicialmente neutro (figura 14). Aproxima-se dele, sem tocá-lo, um corpo *A*, positivamente eletrizado. Alguns elétrons livres de *B* são atraídos por *A* e se acumulam na região de *B* mais próxima de *A*. A região de *B* mais afastada de *A* fica com falta de elétrons e, portanto, com excesso de cargas positivas (figura 15). Esse fenômeno de separação de cargas em um condutor pela simples presença de outro corpo eletrizado é denominado **indução eletrostática**. O corpo eletrizado *A* é o **indutor** e o condutor *B*, que sofreu o processo de separação das cargas, é o **induzido**.



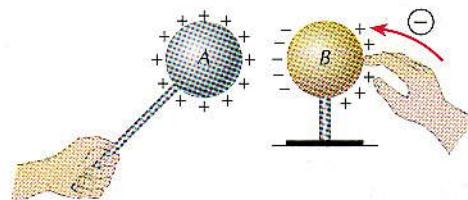
**Figura 14.** *B*: condutor inicialmente neutro.



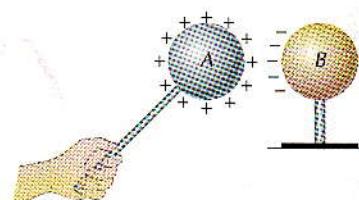
**Figura 15.** A região de *B* mais afastada de *A* fica com falta de elétrons.

Afastando-se o indutor, o induzido volta à situação inicial. Para que *B* fique eletrizado, deve-se, após aproximar *A* de *B*, realizar a seguinte seqüência de operações:

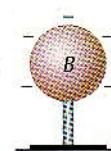
- 1º) **Na presença do indutor liga-se o induzido à Terra** (basta encostar o dedo no induzido, figura 16). Ligando-se o induzido à Terra, elétrons escoam da Terra para o induzido, neutralizando a carga positiva induzida de *B*. Portanto, com a ligação à Terra, neutralizam-se as cargas do induzido que têm o mesmo sinal da carga do indutor.
- 2º) **Na presença do indutor, desfaz-se a ligação do induzido com a Terra** (figura 17).
- 3º) **Afasta-se o indutor**. Os elétrons em excesso no induzido espalham-se imediatamente por ele. Assim, *B* eletriza-se negativamente (figura 18).



**Figura 16.**



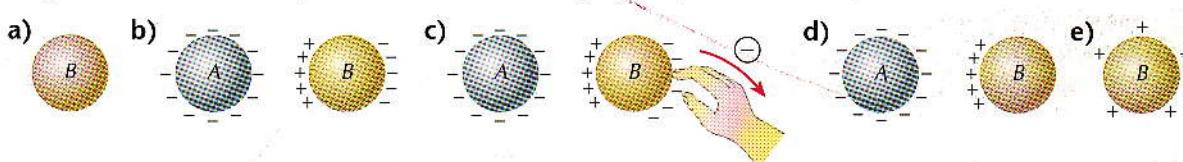
**Figura 17.**



**Figura 18.**

Esse é o processo de **eletrização por indução**.

A figura 19 mostra as operações realizadas considerando-se o indutor negativo. Note que, ao ser efetuada a ligação do induzido com a Terra, os elétrons que constituem as cargas do induzido de mesmo sinal que a carga do indutor escoam para a Terra. No final do processo, *B* encontra-se **positivamente eletrizado**.



**Figura 19.** (a) Condutor *B*, neutro e isolado; (b) aproximando *A* de *B*, ocorre indução eletrostática; (c) ligando *B* à Terra, elétrons de *B* escoam para a Terra; (d) a ligação de *B* com a Terra é desfeita; (e) o indutor *A* é afastado e *B* eletriza-se positivamente.

Dos casos analisados, podemos concluir:

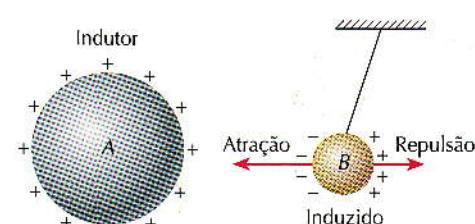
Na eletrização por indução, o induzido eletriza-se com carga de sinal contrário à do indutor. A carga do indutor não se altera.

Com base no fenômeno da indução eletrostática podemos explicar também por que, ao aproximarmos um corpo eletrizado de um condutor neutro, ocorre atração.

Seja um condutor metálico *B* neutro suspenso por um fio isolante (figura 20); aproxima-se dele, sem tocá-lo, um corpo *A* positivamente eletrizado (figura 21). O indutor *A* atrai cargas negativas do induzido *B*, repelindo as cargas positivas. Como a carga positiva do indutor está mais próxima da carga negativa do induzido, a força de atração tem intensidade maior que a de repulsão e o efeito resultante é de atração.



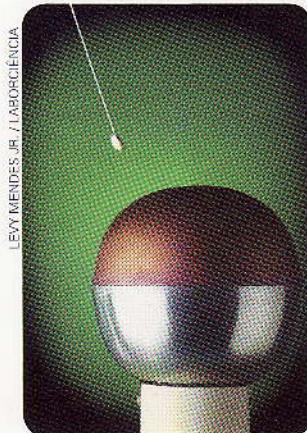
**Figura 20.** Condutor metálico *B* neutro e isolado.



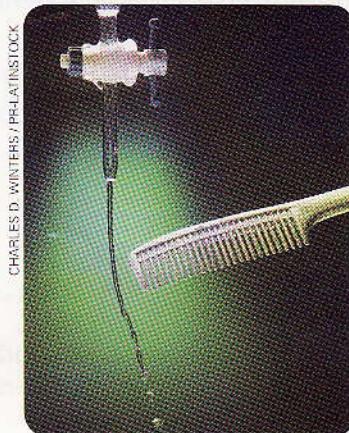
**Figura 21.** As cargas positivas de *A* atraem as negativas de *B* e repelem as positivas de *B*. A força de atração tem intensidade maior que a de repulsão.

Portanto:

Quando entre um corpo eletrizado *A* e um condutor *B* ocorre atração, *B* pode estar eletrizado com carga de sinal oposto ao de *A* ou pode estar neutro.



Uma pequena esfera neutra de isopor\* é atraída quando aproximada da esfera metálica eletrizada de um gerador eletrostático.



AE  
Pratique!  
Ver AE!  
pág. 32

O filete de água\* desvia-se da vertical ao ser atraído por um pente plástico previamente eletrizado por atrito com um pedaço de flanela.

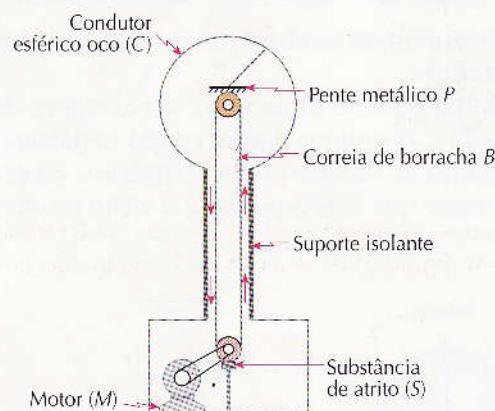
## Gerador eletrostático de Van de Graaf

O gerador eletrostático de Van de Graaf\*\*, apresentado de modo extremamente simplificado no esquema abaixo, consiste basicamente num condutor esférico metálico e oco *C*, no qual se acumulam cargas elétricas em sua superfície externa. Esse condutor é sustentado por suportes isolantes, de modo a manter a carga elétrica que armazena.

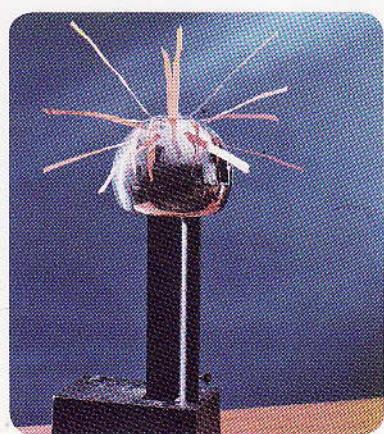
O gerador se eletriza da seguinte maneira: uma correia de borracha *B*, acionada por um motor *M*, durante seu movimento entre duas polias, atrita-se com uma substância *S*, colocada na parte inferior do dispositivo. Em consequência, a correia eletriza-se com carga de determinado sinal (vamos supor que positivo). Na parte superior, essa carga produz indução em um condutor metálico em forma de pente *P*, de modo que, nas pontas, acumulam-se cargas negativas, e as cargas positivas induzidas ocupam a superfície externa do condutor *C*. As cargas negativas induzidas nas pontas escoam e a correia desce neutra.

Conforme a natureza da substância *S* com que a borracha se atrita, podemos ter um gerador que armazena carga positiva ou um gerador que armazena carga negativa.

Geradores de Van de Graaf de grande porte, que armazenam grandes quantidades de carga elétrica, gerando descargas elétricas de enormes proporções, costumam ser utilizados em aceleradores de partículas.



As tiras de papel são repelidas pela esfera do gerador de Van de Graaf, pois adquirem cargas de mesmo sinal que as do aparelho.



ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY / SPLATINSTOCK

\* Os isolantes, quando próximos a corpos eletrizados, sofrem um processo semelhante à indução eletrostática denominado **polarização do dielétrico** (isolante). Há separação de cargas elétricas, embora os isolantes não possuam elétrons livres (veja capítulo 12, item 7).

\*\* VAN DE GRAAF, Robert Jemison (1901-1967), físico e engenheiro norte-americano.



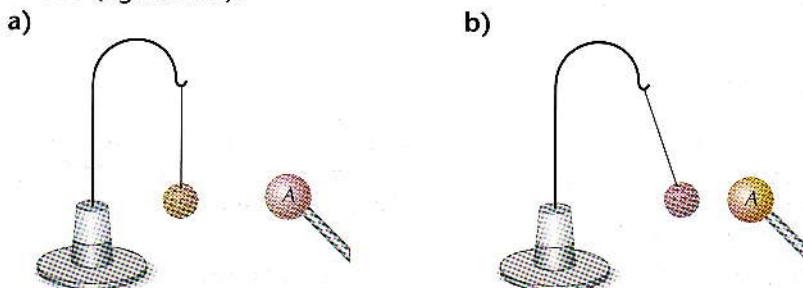
## 6. Eletroscópios

Os aparelhos destinados a verificar se um corpo está ou não eletrizado são chamados **eletroscópios**. Um deles é o **pêndulo elétrico** (figura 22), constituído por uma esfera de material leve (isopor ou cortiça), recoberta por delgada camada metálica, e suspensa por um fio isolante (seda ou náilon) em uma haste-suporte.



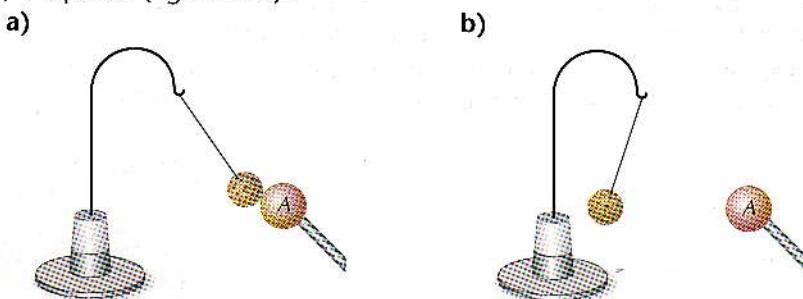
**Figura 22.** Pêndulo elétrico.

Para determinar se um corpo *A* está ou não eletrizado, com o auxílio do pêndulo elétrico, devemos aproximá-lo de sua esfera. Se esta não se mover, o corpo *A* está neutro (figura 23a). Se for atraída, o corpo *A* está eletrizado (figura 23b).



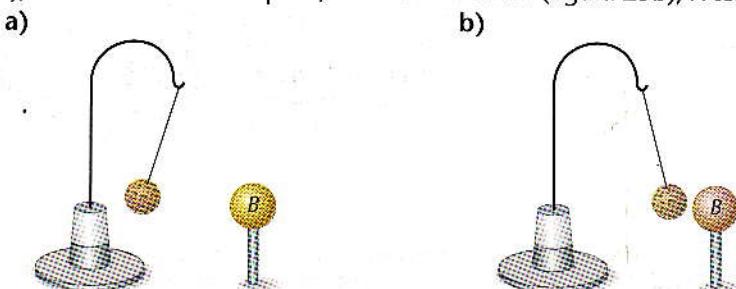
**Figura 23.**

Como determinar o sinal da carga elétrica do corpo *A*? O corpo *A* eletrizado atrai a esfera do pêndulo, estabelecendo-se entre eles um contato (figura 24a). A esfera se eletriza com carga de mesmo sinal que *A* e, em seguida, é repelida (figura 24b).



**Figura 24.**

Depois, afasta-se *A* e aproxima-se da esfera um corpo *B*, cuja carga tem sinal conhecido. Se *B* repelir a esfera (figura 25a), *A* tem mesmo sinal que *B*; se *B* atrair a esfera (figura 25b), *A* tem sinal contrário ao de *B*.



**Figura 25.**

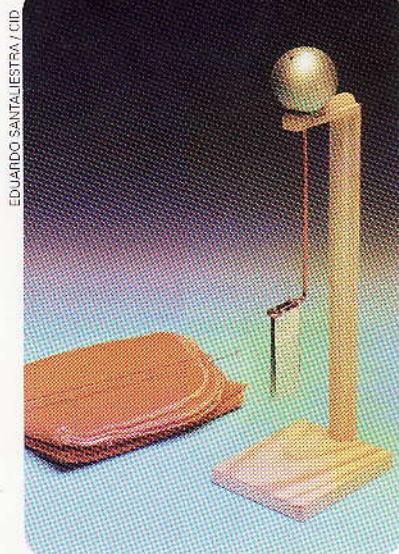


Outro aparelho com o qual podemos verificar se um corpo está ou não eletrizado é o **eletroscópio de folhas** (figura 26). Ele é constituído de duas lâminas metálicas delgadas, ligadas por uma haste condutora a uma esfera metálica.

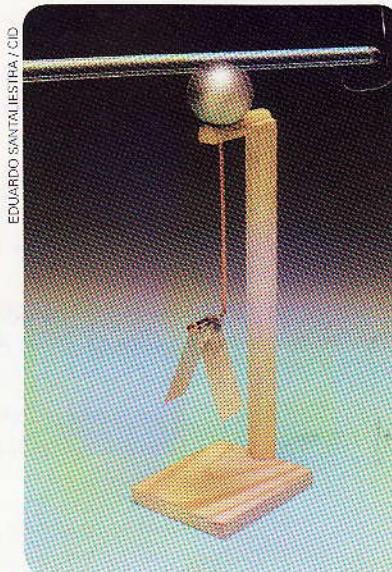
Para determinar se o corpo A da figura 27 está ou não eletrizado, aproximamos A da esfera do eletroscópio. Se as lâminas se abrirem, isso significa que A está eletrizado.



RE  
Pratique!  
Ver AEII  
pag. 33



As folhas metálicas do eletroscópio permanecem encostadas enquanto não-eletrizadas.



Quando o bastão eletrizado por atrito com uma flanela é aproximado da esfera do eletroscópio, as folhas metálicas se abrem. Elas se repelem porque adquirem (por indução) cargas de mesmo sinal que o bastão.



### Entre na rede

No endereço eletrônico <http://www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/mmedia/index.html> em Static Electricity (acesso em 29/6/2007), você pode encontrar animações e textos sobre indução eletrostática e eletroscópios.

R

### Exercício resolvido

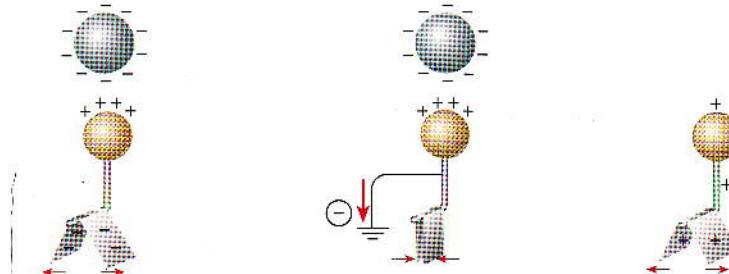
R.3 Considere um eletroscópio de folhas descarregado. São realizadas as seguintes operações:

- Aproxima-se de sua esfera um corpo negativamente eletrizado.
- Liga-se o eletroscópio à Terra.
- Desfaz-se a ligação com a Terra e, a seguir, afasta-se o corpo eletrizado.

Indique o que acontece em cada operação e determine o sinal da carga do eletroscópio após essas operações.

**Solução:**

- Ao aproximarmos da esfera do eletroscópio um corpo eletrizado negativamente, o eletroscópio sofre indução eletrostática e as lâminas se abrem.
- Ligando-se o eletroscópio à Terra, as lâminas se fecham, pois os elétrons escoam para a Terra.
- Desfazendo-se a ligação com a Terra e afastando-se o corpo eletrizado, o eletroscópio se eletriza positivamente. Observe que, novamente, as lâminas se abrem.



### Exercício proposto

**P.3**

Considere um eletroscópio de folhas descarregado. São realizadas as seguintes operações:

- Aproxima-se da esfera do eletroscópio um corpo positivamente eletrizado.
- Liga-se o eletroscópio à Terra.
- Desfaz-se a ligação com a Terra e, a seguir, afasta-se o corpo eletrizado.

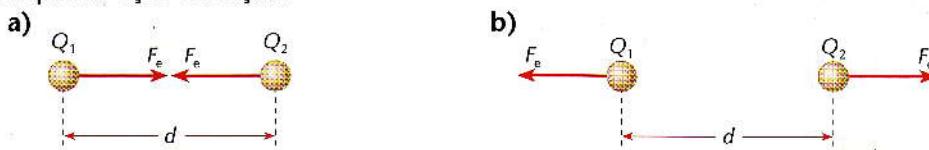
Indique o que acontece em cada operação e determine o sinal da carga do eletroscópio após essas operações.



## 7. Forças entre cargas elétricas puntiformes: lei de Coulomb

Define-se **carga elétrica puntiforme** como sendo o corpo eletrizado cujas dimensões podem ser desprezadas em relação às distâncias que o separam de outros corpos eletrizados.

Considere duas cargas elétricas puntiformes  $Q_1$  e  $Q_2$  separadas pela distância  $d$  e situadas no vácuo (figura 28). Entre elas ocorre **atração** (figura 28a), se tiverem sinais opostos, ou **repulsão** (figura 28b), se tiverem mesmo sinal, com forças de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos, de acordo com o princípio da ação-e-reAÇÃO.



**Figura 28.**

A intensidade da força de ação mútua entre as cargas supostas no vácuo depende da distância  $d$  entre as cargas e dos valores das cargas  $Q_1$  e  $Q_2$ .

A influência desses fatores foi determinada experimentalmente por Charles Coulomb\*, que estabeleceu o seguinte enunciado, conhecido como **lei de Coulomb**:

A intensidade da força de ação mútua entre duas cargas elétricas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos valores absolutos das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa.

\* COULOMB, Charles Augustin de (1736-1806), físico francês, trabalhou como engenheiro militar até os 40 anos nas colônias de seu país no Caribe. Por razões de saúde, voltou à Europa, passando a dedicar-se à pesquisa científica. Inventou a balança de torção, com a qual verificou a lei experimental que rege a ação entre cargas elétricas. Em sua homenagem, deu-se no SI o nome de coulomb (C) à unidade de carga elétrica.

A partir do enunciado podemos escrever:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

Nessa fórmula,  $Q_1$  e  $Q_2$  são tomadas em valor absoluto; seus sinais apenas indicam se a força é de atração ou de repulsão.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de carga elétrica é o **coulomb**, cujo símbolo é **C**.

A constante de proporcionalidade depende do meio onde estão as cargas e do sistema de unidades adotado. No caso do vácuo, é indicada por  $k_0$  e denominada **constante eletrostática do vácuo** ou simplesmente **constante eletrostática**.

Da fórmula da lei de Coulomb, podemos determinar a unidade da constante  $k_0$  no SI:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2} \Rightarrow k_0 = \frac{F_e \cdot d^2}{|Q_1| \cdot |Q_2|}$$

$$\text{Daí, vem: } \frac{\text{newton} \times (\text{metro})^2}{(\text{coulomb})^2} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Experimentalmente, obtém-se para a constante eletrostática do vácuo  $k_0$  o valor:

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Fixando-se os valores de  $Q_1$  e  $Q_2$  e variando-se a distância  $d$ , a intensidade  $F_e$  da força elétrica varia. Observe que, dobrando-se a distância, a intensidade da força elétrica fica quatro vezes menor; triplicando-se a distância, a intensidade da força elétrica fica nove vezes menor, e assim por diante. O quadro a seguir apresenta esses valores.

$d$	$2d$	$3d$	$4d$	$5d$
$F_e$	$\frac{F_e}{4}$	$\frac{F_e}{9}$	$\frac{F_e}{16}$	$\frac{F_e}{25}$

Colocando-se a intensidade da força elétrica no eixo das ordenadas e a distância no eixo das abscissas, obtemos o gráfico de  $F_e$  em função de  $d$  (figura 29).

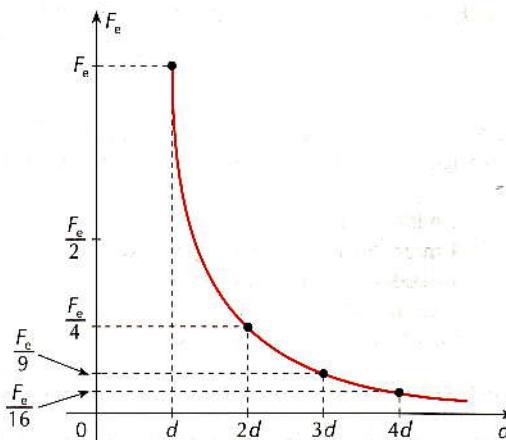


Figura 29. Gráfico de  $F_e \times d$ .



### Leia mais

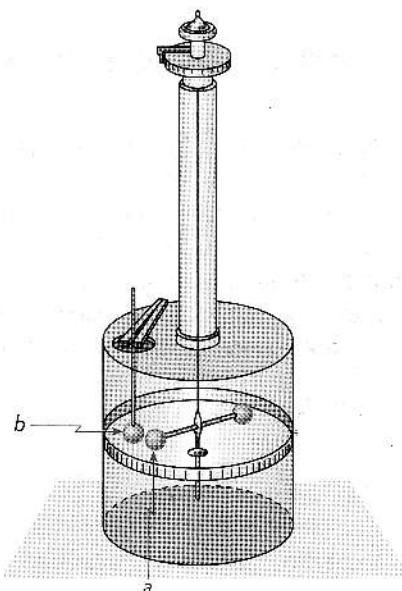
O conhecimento histórico de como a eletricidade se desenvolveu torna mais fascinante o seu estudo. Na página 33, leia sobre as primeiras descobertas e os pensadores que as desenvolveram.

## A experiência de Coulomb

Para estabelecer a lei de interação entre cargas elétricas, Coulomb usou uma balança de torção, esquematizada na figura. Nessa balança, uma barra isolante homogênea tem, em suas extremidades, duas pequenas esferas de mesmo peso, inicialmente neutras. A barra é suspensa pelo seu ponto médio por um delgado fio de prata, cuja torção pode ser avaliada num mostrador situado na parte superior do aparelho.

Durante a operação, outra barra isolante, em cuja extremidade há uma pequena esfera *b* eletrizada, é introduzida verticalmente por um orifício do dispositivo (ver figura), de modo a tocar uma das esferas (*a*) da primeira barra. A esfera *a* eletriza-se com carga de mesmo sinal que *b*, ocorrendo a repulsão entre elas. Em consequência dessa repulsão, há uma torção no fio de suspensão. A intensidade da força elétrica é proporcional ao ângulo de torção.

Medindo o ângulo de torção para diferentes distâncias entre *a* e *b*, Coulomb estabeleceu a lei do inverso do quadrado da distância. Mantendo a distância e mudando convenientemente o valor das cargas, ele estabeleceu que a intensidade da força elétrica é diretamente proporcional ao produto das cargas.



▲ Esquema da balança de torção apresentada por Coulomb, em 1785, à Academia Francesa de Ciências.

## Exercícios resolvidos

- R.4** Determine a intensidade da força de repulsão entre duas cargas elétricas iguais a 1 C, situadas no vácuo e a 1 m de distância. É dada a constante eletrostática:  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

**Solução:**

$$\text{Pela lei de Coulomb: } F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

$$\text{Sendo } Q_1 = Q_2 = 1 \text{ C; } d = 1 \text{ m; } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}, \text{ temos: } F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1^2} \Rightarrow F_e = 9 \cdot 10^9 \text{ N}$$

**Resposta:**  $9 \cdot 10^9 \text{ N}$

**Observações:**

- Uma força de intensidade  $9 \cdot 10^9 \text{ N}$ , entre duas cargas elétricas de 1 C, corresponde aproximadamente ao peso de um corpo de massa igual a 1 milhão de toneladas. Em virtude disso, são muito utilizados os submúltiplos do coulomb:

$$1 \text{ milicoulomb} = 1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C}$$

$$1 \text{ microcoulomb} = 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$$

$$1 \text{ nanocoulomb} = 1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$$

$$1 \text{ picocoulomb} = 1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$$

- A menor carga elétrica livre encontrada na natureza é a carga de um elétron ou de um próton. Essas cargas são iguais em valor absoluto, constituindo a chamada **carga elementar** (*e*):  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Sendo *n* o número de elétrons em excesso de um corpo eletrizado negativamente, sua carga elétrica, em módulo, vale:

$$Q = ne \quad \text{em que } e \text{ é a carga elementar}$$

Usamos a mesma expressão para calcular a carga elétrica de um corpo positivamente eletrizado, sendo *n* o número de prótons em excesso (ou de elétrons em falta) no corpo.

Note que a carga elétrica de um corpo não existe em quantidades contínuas, mas sim múltiplas da carga elementar. Isso significa que a carga elétrica de um corpo é **quantizada**, isto é, ela é sempre um múltiplo inteiro da carga elétrica elementar.

- R.5** Um corpo inicialmente neutro é eletrizado com carga  $Q = 32 \mu\text{C}$ . Qual o número de elétrons retirados do corpo?

**Solução:**

Sendo  $n$  o número de elétrons retirados do corpo e  $e$  a carga elementar, temos:

$$Q = n\bar{e} \Rightarrow 32 \cdot 10^{-6} = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow n = 2 \cdot 10^{14} \text{ elétrons}$$

**Resposta:** Foram retirados  $2 \cdot 10^{14}$  elétrons do corpo.

- R.6** A distância entre o elétron e o próton no átomo de hidrogênio é da ordem de  $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ .

- Determine a intensidade da força de atração gravitacional.
- Determine a intensidade da força de atração eletrostática entre as partículas.
- Compare os valores obtidos.

Considere como dados:

massa do próton:  $1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

massa do elétron:  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

constante de gravitação universal:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$

carga elétrica do elétron:  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

carga elétrica do próton:  $+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

constante eletrostática do vácuo:  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

**Solução:**

- A lei de Newton nos fornece a intensidade da força de atração gravitacional:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 m_2}{d^2} \Rightarrow F_G = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1,7 \cdot 10^{-27} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{(5,3 \cdot 10^{-11})^2} \Rightarrow F_G \approx 3,7 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

- A lei de Coulomb nos fornece a intensidade da força de atração eletrostática:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2} \Rightarrow F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(5,3 \cdot 10^{-11})^2} \Rightarrow F_e \approx 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

$$\text{c)} \frac{F_e}{F_G} = \frac{8,2 \cdot 10^{-8}}{3,7 \cdot 10^{-47}} \Rightarrow \frac{F_e}{F_G} \approx 2,2 \cdot 10^{39} \Rightarrow F_e \approx 2,2 \cdot 10^{39} \cdot F_G$$

**Resposta:** a)  $F_G \approx 3,7 \cdot 10^{-47} \text{ N}$ ; b)  $F_e \approx 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$ ; c) A intensidade da força elétrica  $F_e$  é da ordem de  $10^{39}$  vezes maior que a intensidade da força de atração gravitacional  $F_G$ .

- R.7** Duas cargas elétricas puntiformes positivas e iguais a  $Q$  estão situadas no vácuo a 2 m de distância. Sabe-se que a força de repulsão mútua tem intensidade de 0,1 N. Calcule  $Q$ . (Dado:  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ )

**Solução:**

Pela lei de Coulomb:  $F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$

Sendo  $F_e = 0,1 \text{ N}$ ;  $d = 2 \text{ m}$ ;  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$  e  $Q_1 = Q_2 = Q$ , temos:

$$0,1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q \cdot Q}{2^2} \Rightarrow Q^2 = \frac{4}{9} \cdot 10^{-10} \Rightarrow Q = \frac{2}{3} \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

**Resposta:**  $\frac{2}{3} \cdot 10^{-5} \text{ C}$

- R.8** Duas pequenas esferas idênticas, positivamente eletrizadas com carga  $Q$  e  $3Q$ , são colocadas a uma distância  $d$ , no vácuo, originando-se entre elas uma força de intensidade  $F_e$ . Em seguida, as esferas são postas em contato e afastadas a uma distância  $2d$ . Determine, em função de  $F_e$ , a nova intensidade da força elétrica de repulsão.

**Solução:**

Antes do contato, a lei de Coulomb nos fornece:  $F_e = k_0 \cdot \frac{Q \cdot 3Q}{d^2}$

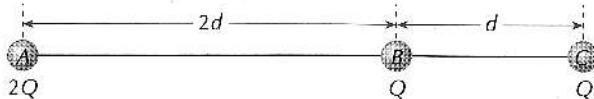
Após o contato, as cargas tornam-se iguais a:  $\frac{Q + 3Q}{2} = 2Q$

Assim, a intensidade da força elétrica de repulsão passa a ser:  $F_e' = k_0 \cdot \frac{2Q \cdot 2Q}{(2d)^2} \Rightarrow F_e' = k_0 \cdot \frac{Q \cdot Q}{d^2}$

Comparando-se  $F_e'$  com  $F_e$  resulta:  $F_e' = \frac{F_e}{3}$

**Resposta:**  $F_e' = \frac{F_e}{3}$

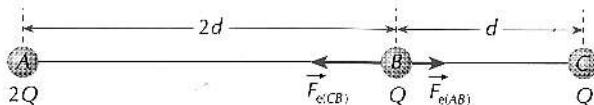
- R.9** Três pequenas esferas *A*, *B* e *C* com cargas elétricas respectivamente iguais a  $2Q$ ,  $Q$  e  $Q$  estão localizadas como mostra a figura:



A intensidade da força elétrica exercida por *C* sobre *B* é de  $8 \cdot 10^{-2}$  N. Qual a intensidade da força elétrica resultante que *A* e *C* exercem sobre *B*?

**Solução:**

Na figura representamos as forças elétricas que *A* e *C* exercem em *B*.



A força elétrica que *C* exerce em *B* tem intensidade:  $F_{e(CB)} = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |Q|}{d^2}$

A força elétrica que *A* exerce em *B* tem intensidade:

$$F_{e(AB)} = k_0 \cdot \frac{|2Q| \cdot |Q|}{(2d)^2} \Rightarrow F_{e(AB)} = \frac{1}{2} \cdot k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |Q|}{d^2}$$

Comparando  $F_{e(AB)}$  com  $F_{e(CB)}$  resulta:  $F_{e(AB)} = \frac{F_{e(CB)}}{2}$

Como  $F_{e(CB)} = 8 \cdot 10^{-2}$  N, temos que  $F_{e(AB)} = 4 \cdot 10^{-2}$  N.

As forças  $\vec{F}_{e(AB)}$  e  $\vec{F}_{e(CB)}$  têm mesma direção e sentidos opostos.

Portanto, a intensidade da força elétrica resultante na esfera *B* é dada por:

$$F_e = F_{e(CB)} - F_{e(AB)} \Rightarrow F_e = 8 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2} \Rightarrow F_e = 4 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

**Resposta:**  $4 \cdot 10^{-2}$  N

$$F_{e(CB)} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ N} \quad B \quad F_{e(AB)} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

- R.10** Considere dois pontos materiais *A* e *B* no vácuo, afastados de qualquer outro corpo. O ponto *A* é fixo e possui carga elétrica positiva  $+Q$ . O ponto *B* executa movimento circular com centro *A* e raio *r*; ele tem massa *m* e carga elétrica negativa  $-q$ . Desprezando as ações gravitacionais, determine a velocidade de *B*. A constante eletrostática é  $k_0$ .

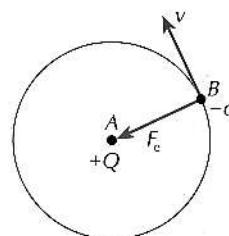
**Solução:**

A força elétrica, em cada instante, tem mesmo módulo e está voltada para o centro da trajetória. Isso significa que ela é uma força centrípeta. Desse modo, o movimento circular que *B* realiza é uniforme.

Sendo  $F_e = k_0 \cdot \frac{Qq}{r^2}$  e  $F_{cp} = ma_{cp} = \frac{mv^2}{r}$ , em que  $a_{cp}$  é a aceleração centrípeta e  $v$  a velocidade, vem:

$$F_e = F_{cp} \Rightarrow k_0 \cdot \frac{Qq}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{k_0 \cdot \frac{Qq}{mr}}$$

**Resposta:**  $v = \sqrt{k_0 \cdot \frac{Qq}{mr}}$





**R.11** Duas cargas puntiformes  $Q_1 = 10^{-6}$  C e  $Q_2 = 4 \cdot 10^{-6}$  C estão fixas nos pontos A e B e separadas pela distância

$d = 30$  cm no vácuo. Sendo a constante eletrostática do vácuo  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ , determine:

- a intensidade da força elétrica de repulsão;
- b) a intensidade da força elétrica resultante sobre uma terceira carga  $Q_3 = 2 \cdot 10^{-6}$  C, colocada no ponto médio do segmento que une  $Q_1$  a  $Q_2$ ;
- c) a posição em que  $Q_3$  deve ser colocada para ficar em equilíbrio sob a ação de forças elétricas somente.

**Solução:**

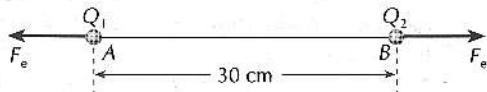
a) Pela lei de Coulomb, temos:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

Sendo  $Q_1 = 10^{-6}$  C,  $Q_2 = 4 \cdot 10^{-6}$  C,

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \text{ e } d = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m, decorre:}$$

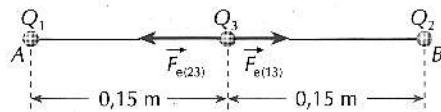
$$F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{(0,3)^2} \Rightarrow F_e = 0,4 \text{ N}$$



b)  $Q_1$  repele  $Q_3$  com força  $\vec{F}_{e(13)}$ .

$Q_2$  repele  $Q_3$  com força  $\vec{F}_{e(23)}$ .

Pela lei de Coulomb, temos:



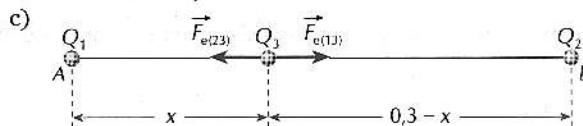
$$F_{e(13)} = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_3|}{d^2} \Rightarrow F_{e(13)} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(0,15)^2} \Rightarrow F_{e(13)} = 0,8 \text{ N}$$

$$F_{e(23)} = k_0 \cdot \frac{|Q_2| \cdot |Q_3|}{d^2} \Rightarrow F_{e(23)} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(0,15)^2} \Rightarrow F_{e(23)} = 3,2 \text{ N}$$

Assim, em  $Q_3$  agem as forças:

$$F_{e(23)} = 3,2 \text{ N} \quad Q_3 \quad F_{e(13)} = 0,8 \text{ N}$$

Portanto, a força elétrica resultante tem intensidade:  $F_e = 3,2 - 0,8 \Rightarrow F_e = 2,4 \text{ N}$



Para ficar em equilíbrio somente sob a ação de forças elétricas,  $Q_3$  deve ser colocada entre  $Q_1$  e  $Q_2$  e mais próxima de  $Q_1$  (carga menor).

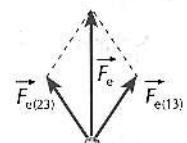
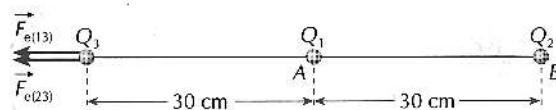
No equilíbrio  $\vec{F}_{e(13)}$  e  $\vec{F}_{e(23)}$  devem ter a mesma direção, sentidos opostos e mesma intensidade:

$$F_{e(13)} = F_{e(23)}$$

$$k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_3|}{x^2} = k_0 \cdot \frac{|Q_2| \cdot |Q_3|}{(0,3-x)^2} \Rightarrow \frac{|Q_1|}{x^2} = \frac{|Q_2|}{(0,3-x)^2} \Rightarrow \frac{10^{-6}}{x^2} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{(0,3-x)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{x^2} = \frac{4}{(0,3-x)^2} \Rightarrow 3x^2 + 0,6x - 0,09 = 0 \Rightarrow \begin{cases} x = 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm} \\ x' = -0,3 \text{ m} = -30 \text{ cm} \end{cases}$$

A resposta  $x = -30$  cm é inadequada, pois significa 30 cm à esquerda de A. Nesse ponto, embora  $\vec{F}_{e(13)}$  e  $\vec{F}_{e(23)}$  tenham mesma intensidade, têm também mesmo sentido:



**Observação:**

Fora da reta  $\overline{AB}$  não é possível  $Q_3$  ficar em equilíbrio sob ação das forças elétricas somente. Nesse caso, forças elétricas que atuam em  $Q_3$  apresentam resultante  $\vec{F}_e \neq \vec{0}$ .

**Resposta:** a) 0,4 N; b) 2,4 N; c) 10 cm à direita da carga A

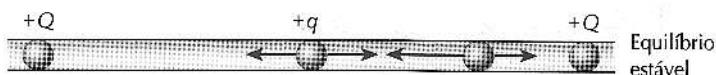
**R.12** Duas pequenas esferas eletrizadas com carga  $+Q$  estão fixas numa canaleta horizontal, isolante e sem atrito. Uma pequena esfera eletrizada é colocada exatamente no ponto médio entre as duas e pode mover-se sobre a canaleta. Supondo as cargas puntiformes, analise o equilíbrio da terceira esfera, dizendo se é estável, instável ou indiferente nos casos:

- a carga central é  $+q$ ;
- a carga central é  $-q$ .

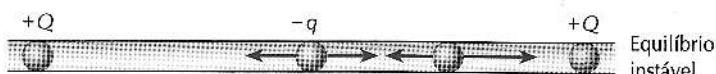
**Solução:**

Para saber se o equilíbrio é estável, instável ou indiferente, basta dar à partícula um pequeno deslocamento a partir da posição de equilíbrio. Se a partícula tende a voltar à posição de equilíbrio, ele é estável; afastando-se, é instável e, se ficar na nova posição, é indiferente.

- A carga  $+q$ , ao ser deslocada da posição de equilíbrio (conforme a figura), será repelida mais intensamente pela carga  $+Q$  da direita, tendendo a voltar à posição de equilíbrio. Portanto, o equilíbrio é estável.



- A carga  $-q$ , ao ser deslocada da posição de equilíbrio (conforme a figura), será atraída mais intensamente pela carga  $+Q$  da direita, afastando-se da posição de equilíbrio. O equilíbrio é instável.

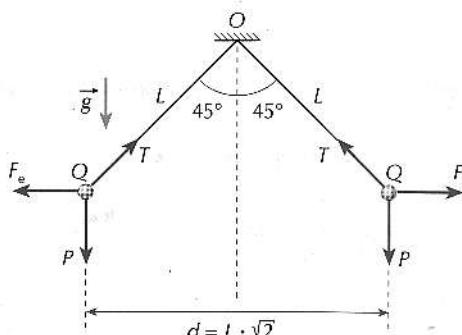


**Resposta:** a) O equilíbrio é estável. b) O equilíbrio é instável.

**R.13** Duas pequenas esferas metálicas iguais são suspensas de um ponto  $O$  por dois fios isolantes de mesmo comprimento  $L = 0,5$  m. As esferas são igualmente eletrizadas com carga  $Q = 1,0 \mu\text{C}$ . Sabendo-se que, na posição de equilíbrio, os fios formam com a vertical ângulos de  $45^\circ$ , determine o peso de cada esfera. O meio é o vácuo, cuja constante eletrostática é  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ .

**Solução:**

Na figura, desenhamos as forças em cada pequena esfera: repulsão elétrica ( $F_e$ ), peso ( $P$ ) e tração do fio ( $T$ ).



Como a partícula está em **equilíbrio, a linha poligonal das forças deve ser fechada**.

Do triângulo formado pelas forças, temos:  $\tan 45^\circ = \frac{F_e}{P}$

Sendo  $\tan 45^\circ = 1$ , resulta:  $P = F_e$

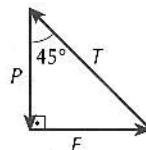
Pela lei de Coulomb:  $P = F_e = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |Q|}{d^2}$

Sendo  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ ,  $Q = 1,0 \mu\text{C} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $d = L \cdot \sqrt{2} = 0,5 \cdot \sqrt{2} \text{ m}$ , temos:

$$P = F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}}{(0,5 \cdot \sqrt{2})^2}$$

$$P = F_e = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

**Resposta:**  $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$





## Exercícios propostos

Nos exercícios seguintes, considere conhecida a constante eletrostática do vácuo:  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

**P.4** A que distância devem ser colocadas duas cargas positivas e iguais a  $1 \mu\text{C}$ , no vácuo, para que a força elétrica de repulsão entre elas tenha intensidade  $0,1 \text{ N}$ ?

**P.5** Duas cargas elétricas positivas e puntiformes, das quais uma é o triplo da outra, repelem-se com forças de intensidades  $2,7 \text{ N}$  no vácuo, quando a distância entre elas é de  $10 \text{ cm}$ . Determine a menor das cargas.

**P.6** Se um corpo inicialmente neutro é eletrizado com uma carga  $Q = -56 \text{ mC}$ , quantos elétrons ele recebeu nesse processo? Dado:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

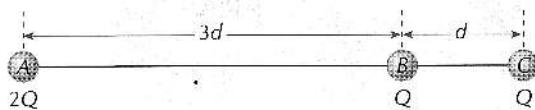
**P.7** Dois corpos de dimensões desprezíveis têm massas iguais a  $2 \text{ kg}$ , estando colocados no vácuo a  $2 \text{ m}$  um do outro. Cada um deles está eletrizado com carga  $Q = 25 \mu\text{C}$ . Calcule:

- a intensidade da força de atração gravitacional  $\vec{F}_G$  entre eles;
- a intensidade da força de repulsão elétrica  $\vec{F}_e$  entre eles;
- a relação entre as intensidades de  $\vec{F}_e$  e  $\vec{F}_G$ .

$$\left( \text{Dado: } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right)$$

**P.8** Duas pequenas esferas idênticas estão situadas no vácuo, a uma certa distância  $d$ , aparecendo entre elas uma força elétrica de intensidade  $F_{e(1)}$ . A carga de uma é o dobro da carga da outra. As duas pequenas esferas são colocadas em contato e, a seguir, afastadas a uma distância  $2d$ , aparecendo entre elas uma força elétrica de intensidade  $F_{e(2)}$ . Calcule a razão  $\frac{F_{e(1)}}{F_{e(2)}}$ .

**P.9** Três pequenas esferas  $A$ ,  $B$  e  $C$  com cargas elétricas respectivamente iguais a  $2Q$ ,  $Q$  e  $Q$  estão alinhadas como mostra a figura. A esfera  $A$  exerce sobre  $B$  uma força elétrica de intensidade  $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ N}$ . Qual a intensidade da força elétrica resultante que  $A$  e  $C$  exercem sobre  $B$ ?



**P.10** (Vunesp) Em um modelo atômico simples, proposto por Bohr em 1913, um núcleo contendo prótons e nêutrons é rodeado por elétrons que giram em órbitas circulares de raio  $r_n$ , onde a força de atração elétrica do núcleo positivo sobre cada elétron segue a lei de Coulomb.

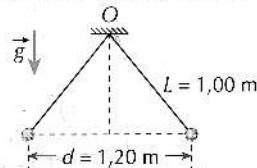
Utilizando esse modelo para o caso do átomo de hidrogênio (um único elétron girando em torno de um núcleo que contém um próton):

- determine a direção, o sentido e a expressão para o módulo da força elétrica, atuando sobre o elétron, em função da carga  $e$  do elétron, do raio  $r_n$  e da constante eletrostática do vácuo  $k$ ;
- determine a expressão para a velocidade  $v$  da órbita do elétron em função da carga  $e$  e da massa  $m_e$  do elétron, do raio  $r_n$  e da constante eletrostática do vácuo  $k$ .

**P.11** Duas cargas elétricas puntiformes  $Q_1 = 8 \cdot 10^{-8} \text{ C}$  e  $Q_2 = -2 \cdot 10^{-8} \text{ C}$  estão fixas no vácuo, separadas por uma distância  $d = 6 \text{ cm}$ . Determine:

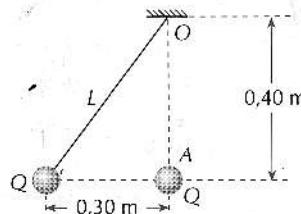
- a intensidade da força elétrica de atração;
- a intensidade da força elétrica resultante, que age sobre uma carga  $Q_3 = 10^{-8} \text{ C}$ , colocada no ponto médio do segmento que une  $Q_1$  a  $Q_2$ ;
- a posição em que  $Q_3$  deve ser colocada de modo a ficar em equilíbrio somente sob a ação de forças elétricas.

**P.12** Duas esferas condutoras idênticas e muito pequenas, de massa  $m = 0,30 \text{ g}$ , encontram-se no vácuo suspensas por meio de dois fios leves, isolantes, de comprimentos iguais  $L = 1,00 \text{ m}$ , presos a um mesmo ponto de suspensão  $O$ . Estando as esferas separadas, eletriza-se uma delas com carga  $Q$ , mantendo-se a outra neutra. Em seguida, elas são colocadas em contato e depois abandonadas. Verifica-se que na posição de equilíbrio a distância que as separam é  $d = 1,20 \text{ m}$ . Considere  $Q > 0$ . (Adote: aceleração da gravidade  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .)



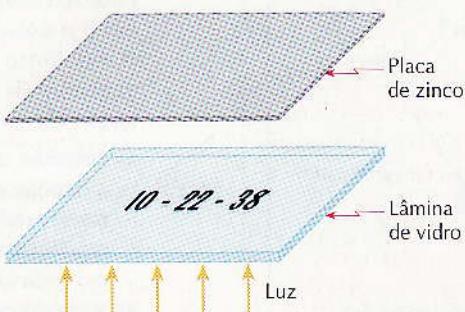
- Determine o valor de  $Q$ .
- Determine o valor da carga  $q$  que deve ser colocada no ponto  $O$  a fim de que sejam nulas as forças de tração nos fios.

**P.13** Um pêndulo elétrico de comprimento  $L$  e massa  $m = 0,12 \text{ kg}$  eletrizado com carga  $Q$  é repelido por outra carga igual fixa no ponto  $A$ . A figura mostra a posição de equilíbrio do pêndulo. Sendo  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , calcule  $Q$ .

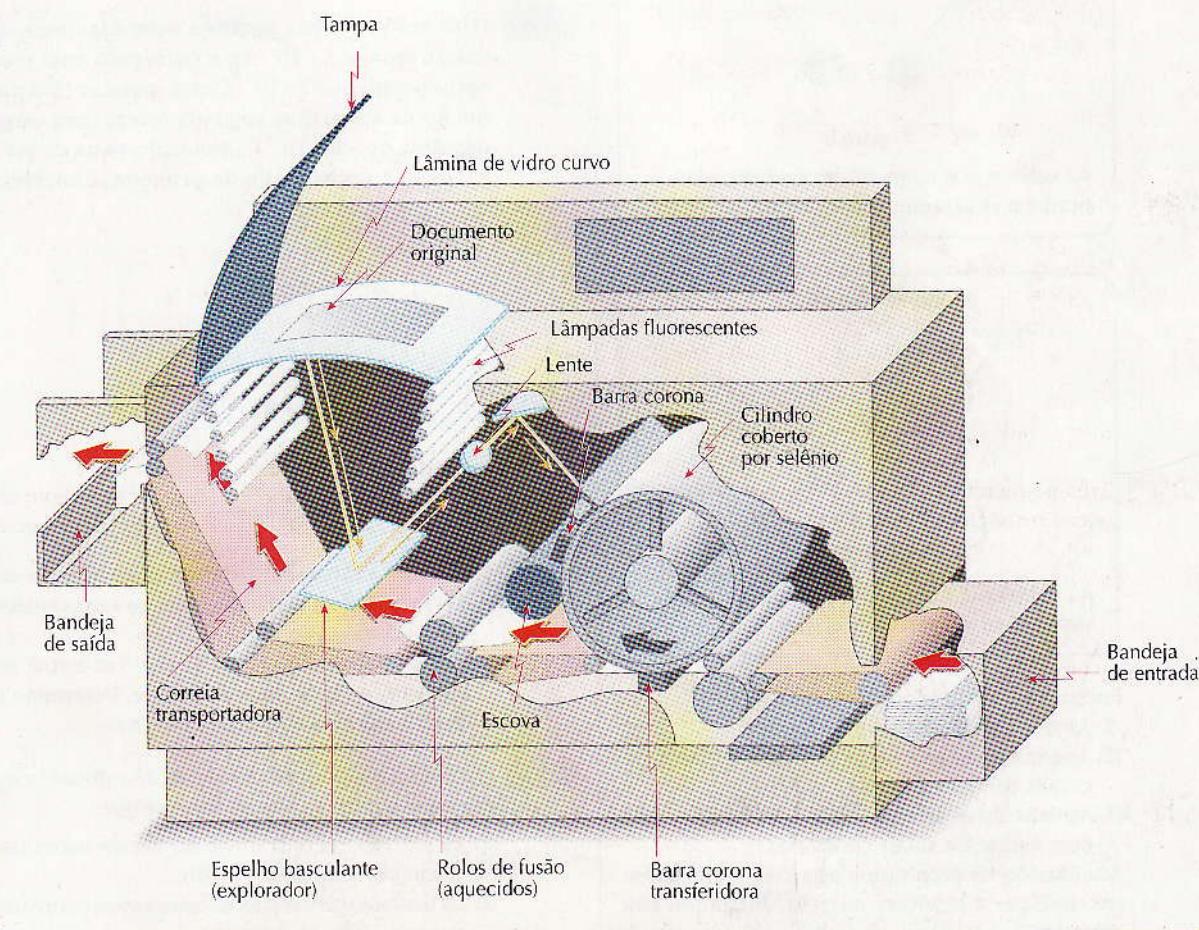


## A xerografia

O processo de copiagem conhecido como **xerografia** (do grego: *xeros* = seca; *grafia* = escrita) foi inventado pelo advogado norte-americano Chester Carlson, que obteve sua patente em 1938. Em sua experiência original, Carlson recobriu de enxofre uma placa de zinco e eletrizou-a por atrito com algodão. Sobre uma lâmina de vidro escreveu a nanquim a data do experimento: 10-22-38. Encostando a placa na lâmina e iluminando o conjunto, verificou que a placa se descarregava, exceto na região que permanecia escura (a parte escrita). Pulverizando então a placa com pó de licopódio (planta rasteira), este aderia às partes eletrizadas, reproduzindo a imagem do texto escrito. Ao comprimir uma folha de papel sobre a placa e aquecendo o conjunto, os dizeres tingidos pelo pó apareceram: estava pronta a cópia desejada.

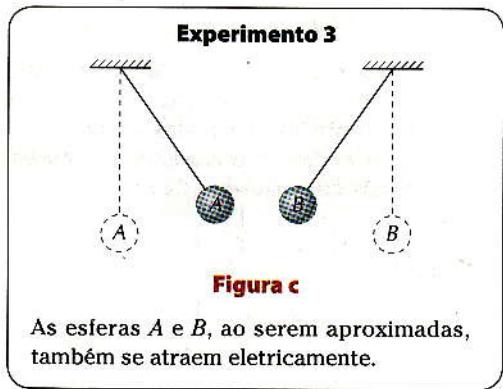
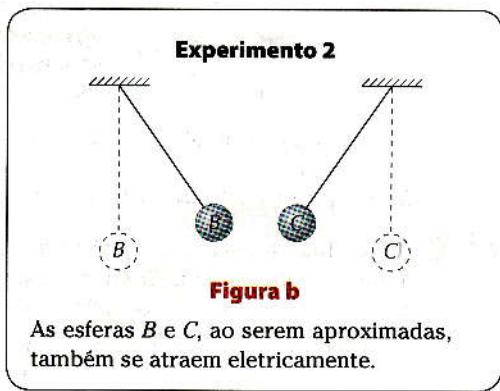
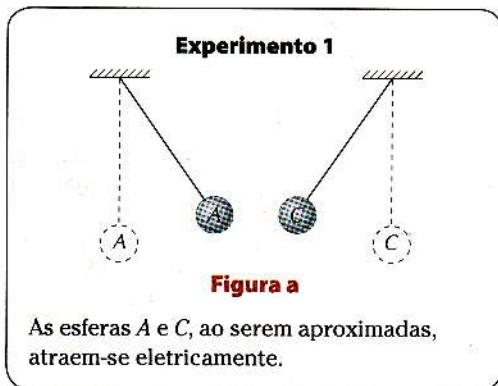


Modernamente, a imagem do original é projetada, por meio de lentes e espelhos, sobre um cilindro metálico previamente eletrizado e recoberto por selênio, substância que conduz eletricidade apenas quando exposta à luz. Assim, ao se produzir a iluminação, o cilindro só se descarrega na parte não-escrita. A parte escrita (escura) mantém a eletrização e atrai o pó tonalizador (*toner*), que adere a uma folha de papel que passa pelo cilindro. A imagem formada é então fixada por pressão e aquecimento: está pronta a cópia desejada.



## Exercícios propostos de recapitulação

- P.14** (UFRJ) Três pequenas esferas metálicas idênticas, A, B e C, estão suspensas, por fios isolantes, de três suportes. Para testar se elas estão carregadas, realizam-se três experimentos durante os quais se verifica como elas interagem eletricamente, duas a duas:



Formulam-se três hipóteses:

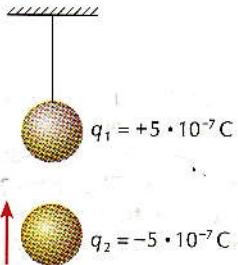
- As três esferas estão carregadas.
- Apenas duas esferas estão carregadas com cargas de mesmo sinal.
- Apenas duas esferas estão carregadas, mas com cargas de sinais contrários.

Analizando os resultados dos três experimentos, indique a hipótese correta. Justifique sua resposta.

- P.15** (Vunesp) Uma pequena esfera, P, carregada positivamente, está fixa e isolada numa região onde o valor da aceleração da gravidade é  $g$ . Uma outra pequena esfera, Q, também eletricamente carregada, é levada para as proximidades de P. Há duas posições, a certa distância  $d$  de P, onde pode haver equilíbrio entre a força peso atuando em Q e a força elétrica exercida por P sobre Q. O equilíbrio ocorre numa ou noutra posição, dependendo do sinal da carga de Q. Despreze a força gravitacional entre as esferas.

- Desenhe um esquema mostrando a esfera P, a direção e o sentido de  $\vec{g}$  e as duas posições possíveis definidas pela distância  $d$  para o equilíbrio entre as forças sobre Q, indicando, em cada caso, o sinal da carga de Q.
- Suponha que a esfera Q seja trazida, a partir de qualquer uma das duas posições de equilíbrio, para mais perto de P, até ficar à distância  $\frac{d}{2}$  desta, e então abandonada nessa nova posição. Determine, exclusivamente em termos de  $g$ , o módulo da aceleração da esfera Q no instante em que ela é abandonada.

- P.16** (Unicamp-SP) Uma pequena esfera isolante de massa igual a  $5 \cdot 10^{-2}$  kg e carregada com uma carga positiva de  $5 \cdot 10^{-7}$  C está presa ao teto por um fio de seda. Uma segunda esfera com carga negativa de  $-5 \cdot 10^{-7}$  C, movendo-se na direção vertical, é aproximada da primeira. Considere  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ .

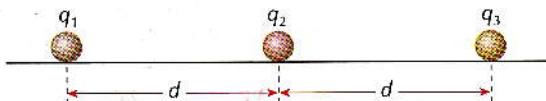


- Calcule a força eletrostática entre as duas esferas quando a distância entre os seus centros é de 0,5 m.
- Para uma distância de  $5 \cdot 10^{-2}$  m entre os centros, o fio de seda se rompe. Determine a tração máxima suportada pelo fio.

- P.17** (ITA-SP) Três pequenas esferas são dotadas de cargas elétricas  $q_1$ ,  $q_2$  e  $q_3$ . Sabe-se que:

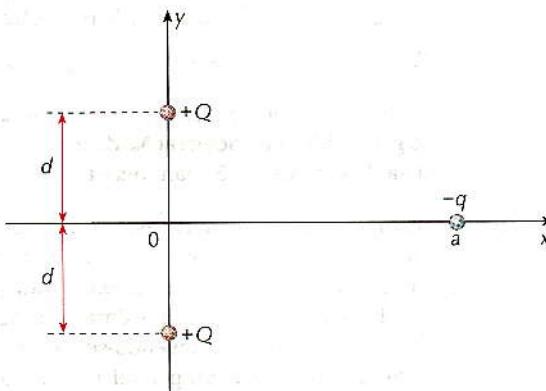
- as esferas encontram-se no vácuo sobre um plano horizontal sem atrito;
- os centros das esferas encontram-se sobre um mesmo plano horizontal;

- 3) as esferas encontram-se em equilíbrio, nas posições representadas no esquema;  
 4) a carga da esfera intermediária é positiva e tem valor  $q_2 = 2,70 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ ;  
 5) a distância entre as esferas tem valor  $d = 0,12 \text{ m}$ .



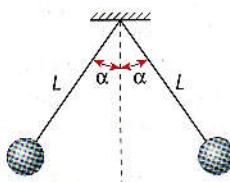
- a) Determine os sinais das cargas  $q_1$  e  $q_3$ , justificando a resposta.  
 b) Calcule os valores das cargas  $q_1$  e  $q_3$ .  
 c) Uma vez fixadas em suas posições as esferas de cargas  $q_1$  e  $q_3$ , qual o tipo de equilíbrio (estável, instável ou indiferente) da esfera intermediária? Justifique.

- P.18** (Unicamp-SP) Considere o sistema de cargas na figura. As cargas  $+Q$  estão fixas e a carga  $-q$  pode mover-se somente sobre o eixo  $x$ . Solta-se a carga  $-q$ , inicialmente em repouso, em  $x = a$ .



- a) Em que ponto do eixo  $x$  a velocidade de  $-q$  é máxima?  
 b) Em que ponto(s) do eixo  $x$  a velocidade de  $-q$  é nula?

- P.19** (Unifesp) Na figura, estão representadas duas pequenas esferas de mesma massa,  $m = 0,0048 \text{ kg}$ , eletrizadas com cargas de mesmo sinal, repelindo-se no ar. Elas estão penduradas por fios isolantes muito leves, inextensíveis, de mesmo comprimento,  $L = 0,090 \text{ m}$ . Observa-se que, com o tempo, essas esferas se aproximam e os fios tendem a tornar-se verticais.



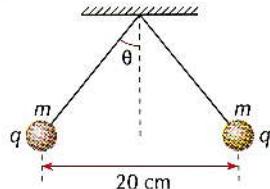
- a) O que causa a aproximação dessas esferas? Durante essa aproximação, os ângulos que os fios formam com a vertical são sempre iguais ou podem tornar-se diferentes um do outro? Justifique.

- b)** Suponha que, na situação da figura, o ângulo  $\alpha$  é tal que  $\sin \alpha = 0,60$ ;  $\cos \alpha = 0,80$ ;  $\operatorname{tg} \alpha = 0,75$  e as esferas têm cargas iguais. Qual é, nesse caso, a carga elétrica de cada esfera?

$$\left( \text{Admita } g = 10 \text{ m/s}^2 \text{ e } k_0 = 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right)$$

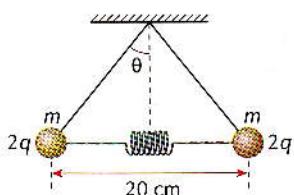
**P.20**

- (UFG-GO) Considere a situação hipotética esquematizada na figura I, onde duas esferas idênticas de massa  $m = 90 \text{ g}$ , carregadas com cargas de  $2 \mu\text{C}$  cada, estão separadas por  $20 \text{ cm}$ .



**Figura I.** Esferas carregadas com cargas de  $2 \mu\text{C}$  cada.

Dobram-se as cargas nas esferas e, para que não saiam de suas posições, prende-se uma mola entre elas, como na figura II.



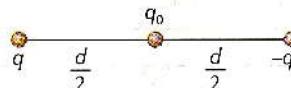
**Figura II.** Esferas carregadas com cargas de  $4 \mu\text{C}$  cada e ligadas por uma mola.

A mola distende-se  $1,0 \text{ cm}$ . Qual a constante elástica da mola?

$$( \text{Adote } g = 10 \text{ m/s}^2 \text{ e } k_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 )$$

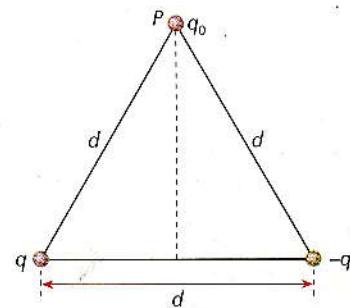
**P.21**

- (UFRJ) Duas cargas,  $q$  e  $-q$ , são mantidas fixas a uma distância  $d$  uma da outra. Uma terceira carga  $q_0$  é colocada no ponto médio entre as duas primeiras, como ilustra a figura a.



**Figura a**

Nessa situação, o módulo da força eletrostática resultante sobre a carga  $q_0$  vale  $F_A$ . A carga  $q_0$  é então afastada dessa posição ao longo da mediatrix entre as duas outras até atingir o ponto  $P$ , onde é fixada, como ilustra a figura b.

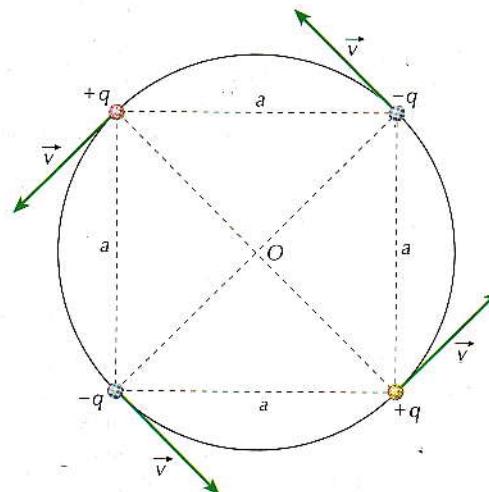


**Figura b**

Agora, as três cargas estão nos vértices de um triângulo equilátero. Nessa situação, o módulo da força eletrostática resultante sobre a carga  $q_0$  vale  $F_B$ . Calcule a razão  $\frac{F_A}{F_B}$ .

**P.22** (Fuvest-SP) Quatro pequenas esferas de massa  $m$  estão carregadas com cargas de mesmo valor absoluto  $q$ , sendo duas negativas e duas positivas, como mostra a figura. As esferas estão dispostas formando um quadrado de lado  $a$  e giram numa trajetória circular de centro  $O$ , no plano do quadrado, com velocidade de módulo constante  $v$ . Suponha que as únicas forças atuantes sobre as esferas são devidas à interação eletrostática. A constante eletrostática do meio é  $k_0$ . Todas as grandezas (dadas e solicitadas) estão em unidades SI.

- Determine a expressão do módulo da força eletrostática resultante  $F_R$  que atua em cada esfera e dê sua direção.
- Determine a expressão do módulo da velocidade tangencial  $\bar{v}$  das esferas.



## T

### Testes propostos

**T.1** (UFSCar-SP) Atritando vidro com lã, o vidro se eletriza com carga positiva e a lã, com carga negativa. Atritando algodão com enxofre, o algodão adquire carga positiva e o enxofre, negativa. Porém, se o algodão for atritado com lã, o algodão adquire carga negativa e a lã, positiva. Quando atritado com algodão e quando atritado com enxofre, o vidro adquire, respectivamente, carga elétrica:

- positiva e positiva.
- positiva e negativa.
- negativa e positiva.
- negativa e negativa.
- negativa e nula.

**T.2** (UFSCar-SP) Considere dois corpos sólidos envolvidos em processos de eletrização. Um dos fatores que pode ser observado tanto na eletrização por contato quanto na por indução é o fato de que, em ambas:

- torna-se necessário manter um contato direto entre os corpos.
- deve-se ter um dos corpos ligado temporariamente a um aterramento.
- ao fim do processo de eletrização, os corpos adquirem cargas elétricas de sinais opostos.
- um dos corpos deve, inicialmente, estar carregado eletricamente.
- para ocorrer, os corpos devem ser bons condutores elétricos.

**T.3** (Olimpíada Brasileira de Física) Ao se esfregar um canudinho de refrigerante com um pedaço de lã e aproximá-lo de uma parede ele poderá ficar "grudado" na parede. Isto se justifica porque:

- prótons passam da lã para o canudinho deixando-o eletrizado positivamente e isso o prende aos elétrons dos átomos que estão na parede.

- ocorre uma transferência de elétrons da lã para o canudinho e, ao colocá-lo em contato com a parede, ocorre a descarga desse excesso de elétrons, ficando o canudinho preso até que a descarga termine.
- ocorre indução de cargas elétricas na parede, que passam para o canudinho e, devido à atração entre essas cargas, surge uma força elétrica que aumenta a força normal e equilibra o peso do canudinho.
- com o atrito, o canudinho se eletriza pela retirada de alguns de seus prótons, o que o deixa eletricamente negativo, sendo, portanto, atraído pelos prótons da parede.
- o canudinho fica eletrizado e, por ser um mau condutor, não perde esse excesso de carga para a parede, ficando assim preso a ela por forças elétricas entre as cargas do canudinho e as induzidas na parede.

**T.4** (Fuvest-SP) Têm-se três esferas condutoras idênticas  $A$ ,  $B$  e  $C$ . As esferas  $A$  (carga positiva) e  $B$  (carga negativa) estão eletrizadas com cargas de mesmo módulo  $Q$ , e a esfera  $C$  está inicialmente neutra. São realizadas as seguintes operações:

- Toca-se  $C$  em  $B$ , com  $A$  mantida à distância, e em seguida separa-se  $C$  de  $B$ ;
- Toca-se  $C$  em  $A$ , com  $B$  mantida à distância, e em seguida separa-se  $C$  de  $A$ ;
- Toca-se  $A$  em  $B$ , com  $C$  mantida à distância, e em seguida separa-se  $A$  de  $B$ .

Podemos afirmar que a carga final da esfera  $A$  vale:

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| <b>a)</b> zero           | <b>d)</b> $+\frac{Q}{6}$ |
| <b>b)</b> $+\frac{Q}{2}$ | <b>e)</b> $-\frac{Q}{8}$ |
| <b>c)</b> $-\frac{Q}{4}$ |                          |

- T.5** (UFF-RJ) Um aluno tem 4 esferas idênticas, pequenas e condutoras (*A*, *B*, *C* e *D*), carregadas com cargas respectivamente iguais a  $-2Q$ ,  $4Q$ ,  $3Q$  e  $6Q$ . A esfera *A* é colocada em contato com a esfera *B* e a seguir com as esferas *C* e *D*. Ao final do processo a esfera *A* estará carregada com carga equivalente a:

- a)  $3Q$       c)  $\frac{Q}{2}$       e)  $5,5Q$   
 b)  $4Q$       d)  $8Q$

- T.6** (PUC-SP) Duas esferas *A* e *B*, metálicas e idênticas, estão carregadas com cargas respectivamente iguais a  $16\ \mu C$  e  $4\ \mu C$ . Uma terceira esfera *C*, metálica e idêntica às anteriores, está inicialmente descarregada. Coloca-se *C* em contato com *A*. Em seguida, esse contato é desfeito e a esfera *C* é colocada em contato com *B*. Supondo que não haja troca de cargas elétricas com o meio exterior, a carga final de *C* é de:

- a)  $8\ \mu C$       c)  $4\ \mu C$       e) nula  
 b)  $6\ \mu C$       d)  $3\ \mu C$

- T.7** (Fesp-PE) Quatro corpos *A*, *B*, *C* e *D* formam um sistema eletricamente isolado. Inicialmente tem-se que  $Q_A = 6\ \mu C$ ,  $Q_B = -2\ \mu C$ ,  $Q_C = 4\ \mu C$  e  $Q_D = -4\ \mu C$ . O corpo *A* cede  $2\ \mu C$  ao corpo *B* e o corpo *C* cede  $1\ \mu C$  ao corpo *D*. Identifique a afirmação incorreta:

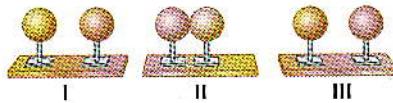
- a) O corpo *B* ficou eletricamente neutro.  
 b) A carga total após a transferência é de  $4\ \mu C$ .  
 c) A soma algébrica das quantidades de carga elétrica é constante.  
 d) O corpo *A*, antes e depois, tem carga elétrica positiva.  
 e) Após a transferência de carga, os corpos *C* e *D* ficaram eletricamente positivos.

- T.8** (UCSal-BA) Uma esfera condutora eletrizada com carga  $Q = 6,00\ \mu C$  é colocada em contato com outra, idêntica, eletrizada com carga  $q = -2,00\ \mu C$ . Admitindo-se que haja troca de cargas apenas entre essas duas esferas, o número de elétrons que passa de uma esfera para a outra até atingir o equilíbrio eletrostático é:

- a)  $5,00 \cdot 10^{19}$       d)  $2,50 \cdot 10^{13}$   
 b)  $2,50 \cdot 10^{16}$       e)  $1,25 \cdot 10^{13}$   
 c)  $5,00 \cdot 10^{14}$

(Dado: carga elementar =  $1,60 \cdot 10^{-19}\ C$ )

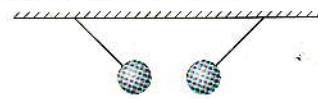
- T.9** (UFMG) Duas esferas metálicas idênticas — uma carregada com carga elétrica negativa e a outra eletricamente descarregada — estão montadas sobre suportes isolantes. Na situação inicial, mostrada na figura I, as esferas estão separadas uma da outra. Em seguida, as esferas são colocadas em contato, como se vê na figura II. As esferas são, então, afastadas uma da outra, como mostrado na figura III.



Considerando-se as situações representadas nas figuras I e III, é correto afirmar que:

- a) em I as esferas se atraem e em III elas se repelem.  
 b) em I as esferas se repelem e em III elas se atraem.  
 c) em I não há força entre as esferas.  
 d) em III não há força entre as esferas.

- T.10** (UFMG) Um professor mostra uma situação em que duas esferas metálicas idênticas estão suspensas por fios isolantes. As esferas se aproximam uma da outra, como indicado na figura.



Três estudantes fizeram os seguintes comentários sobre essa situação:

- Cecília — uma esfera tem carga positiva e a outra está neutra.  
 Heloísa — uma esfera tem carga negativa e a outra tem carga positiva.  
 Rodrigo — uma esfera tem carga negativa e a outra está neutra.

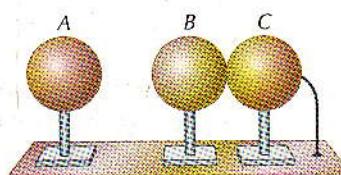
Identifique a alternativa correta.

- a) Apenas Heloísa e Rodrigo fizeram comentários pertinentes.  
 b) Todos os estudantes fizeram comentários pertinentes.  
 c) Apenas Cecília e Rodrigo fizeram comentários pertinentes.  
 d) Apenas Heloísa fez um comentário pertinente.

- T.11** (Unifesp) Uma estudante observou que, ao colocar sobre uma mesa horizontal três pêndulos eletrostáticos idênticos, equidistantes entre si, como se cada um ocupasse o vértice de um triângulo equilátero, as esferas dos pêndulos se atraíram mutuamente. Sendo as três esferas metálicas, a estudante concluiu corretamente que:

- a) as três esferas estavam eletrizadas com cargas de mesmo sinal.  
 b) duas esferas estavam eletrizadas com cargas de mesmo sinal e uma com carga de sinal oposto.  
 c) duas esferas estavam eletrizadas com cargas de mesmo sinal e uma neutra.  
 d) duas esferas estavam eletrizadas com cargas de sinais opostos e uma neutra.  
 e) uma esfera estava eletrizada e duas neutras.

- T.12** (Fuvest-SP) Três esferas metálicas iguais, *A*, *B* e *C*, estão apoiadas em suportes isolantes, tendo a esfera *A* carga elétrica negativa. Próximas a ela, as esferas *B* e *C* estão em contato entre si, sendo que *C* está ligada à terra por um fio condutor, como na figura.



A partir dessa configuração, o fio é retirado e, em seguida, a esfera A é levada para muito longe. Finalmente, as esferas B e C são afastadas uma da outra. Após esses procedimentos, as cargas das três esferas satisfazem as relações:

- a)  $Q_A < 0; Q_B > 0; Q_C > 0$
- b)  $Q_A < 0; Q_B = 0; Q_C = 0$
- c)  $Q_A = 0; Q_B < 0; Q_C < 0$
- d)  $Q_A > 0; Q_B > 0; Q_C = 0$
- e)  $Q_A > 0; Q_B < 0; Q_C > 0$

**T.13** (UFRGS-RS) Um bastão eletricamente carregado atrai uma bolinha condutora X, mas repele uma bolinha condutora Y. As bolinhas X e Y se atraem, na ausência do bastão. Sendo essas forças de atração e repulsão de origem elétrica, conclui-se que:

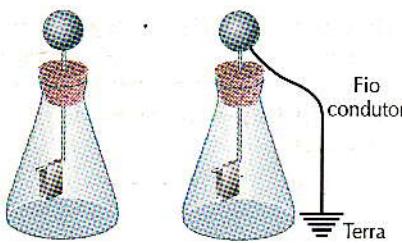
- a) Y está eletricamente carregada e X está eletricamente descarregada ou eletricamente carregada com cargas de sinal contrário ao das cargas de Y.
- b) ambas as bolinhas estão eletricamente descarregadas.
- c) X e Y estão eletricamente carregadas com cargas de mesmo sinal.
- d) X está eletricamente carregada com cargas de mesmo sinal das do bastão.
- e) Y está eletricamente descarregada e X, carregada.

**T.14** (Fuvest-SP) Três esferas de isopor, M, N e P, estão suspensas por fios isolantes. Quando se aproxima N de P, nota-se uma repulsão entre essas esferas; quando se aproxima N de M, nota-se uma atração. Das possibilidades apontadas na tabela, quais são compatíveis com as observações?

- a) 1<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup>
- b) 2<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup>
- c) 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup>
- d) 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup>
- e) 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup>

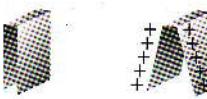
Possibilidades	Cargas		
	M	N	P
1 <sup>a</sup>	+	+	-
2 <sup>a</sup>	-	-	+
3 <sup>a</sup>	zero	-	zero
4 <sup>a</sup>	-	+	+
5 <sup>a</sup>	+	-	-

**T.15** (Efoa-MG) As figuras abaixo ilustram dois eletroscópios. O da esquerda está totalmente isolado da vizinhança e o da direita está ligado à Terra por um fio condutor de eletricidade.



Das figuras abaixo, a que melhor representa as configurações das partes móveis dos eletroscópios quando aproximarmos das partes superiores de ambos um bastão carregado negativamente é:

a)



b)



c)



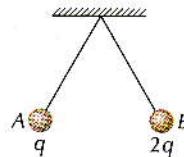
d)



e)



**T.16** (Univale-MG) Duas esferas metálicas pequenas, A e B, de massas iguais, suspensas por fios isolantes, conforme representa a figura, são carregadas com cargas elétricas positivas que valem respectivamente  $q$  na esfera A e  $2q$  na esfera B.



Sendo  $F_1$  a intensidade da força elétrica exercida por A sobre B, e  $F_2$  a intensidade da força elétrica exercida por B sobre A, pode-se afirmar que:

- a)  $F_1 = F_2$
- b)  $F_1 = 2F_2$
- c)  $F_2 = 2F_1$
- d)  $F_1 = 4F_2$
- e)  $F_2 = 4F_1$

**T.17** (Vunesp) Identifique a alternativa que apresenta o que as forças dadas pela lei da gravitação universal de Newton e pela lei de Coulomb têm em comum.

- a) Ambas variam com a massa das partículas que interagem.
- b) Ambas variam com a carga elétrica das partículas que interagem.
- c) Ambas variam com o meio em que as partículas interagem.
- d) Ambas variam com o inverso do quadrado da distância entre as partículas que interagem.
- e) Ambas podem ser tanto de atração como de repulsão entre as partículas que interagem.

- T.18** (PUC-RJ) Inicialmente, a força elétrica atuando entre dois corpos,  $A$  e  $B$ , separados por uma distância  $d$ , é repulsiva e vale  $F$ . Se retirarmos metade da carga do corpo  $A$ , qual deve ser a nova separação entre os corpos para que a força entre eles permaneça igual a  $F$ ?

- a)  $d$
- b)  $\frac{d}{2}$
- c)  $\frac{d}{\sqrt{2}}$
- d)  $\frac{d}{\sqrt{3}}$
- e)  $\frac{d}{3}$

- T.19** (FMTM-MG) A distância entre duas partículas carregadas é  $d$  e a força de interação entre elas é  $F$ . Suponha que elas sejam afastadas entre si a distâncias iguais a  $2d$ ,  $3d$  e  $4d$ , sem que nada mais se altere além da distância. A alternativa, com os respectivos valores assumidos pela força de interação entre elas, é:

- a)  $2F$ ,  $3F$  e  $4F$
- b)  $4F$ ,  $9F$  e  $16F$
- c)  $\frac{F}{2}$ ,  $\frac{F}{3}$  e  $\frac{F}{4}$
- d)  $\frac{F}{4}$ ,  $\frac{F}{9}$  e  $\frac{F}{16}$
- e)  $4F$ ,  $6F$  e  $8F$

- T.20** (Mackenzie-SP) Duas esferas metálicas idênticas, separadas pela distância  $d$ , estão eletrizadas com cargas elétricas  $Q$  e  $-5Q$ . Essas esferas são colocadas em contato e em seguida são separadas de uma distância  $2d$ . A força de interação eletrostática entre as esferas, antes do contato, tem módulo  $F_1$  e, após o contato, tem módulo  $F_2$ .

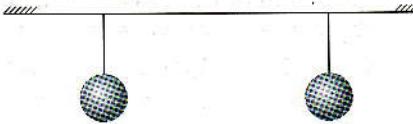
A relação  $\frac{F_1}{F_2}$  é:

- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 4
- e) 5

- T.21** (UFPI) Duas massas iguais de 4,8 gramas cada uma, originalmente neutras, estão fixadas em pontos separados entre si pela distância  $d$ . Um número  $n$  de elétrons é retirado de cada uma das massas de modo que a força de repulsão eletrostática entre elas compense exatamente a força de atração gravitacional. A constante da lei de Coulomb é dada por  $k_0 = 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ , a constante da lei de Newton da gravitação é  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$  e a carga elementar é  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . O número  $n$  de elétrons retirados de cada uma das massas é igual a:

- a)  $2,6 \cdot 10^2$
- b)  $2,6 \cdot 10^3$
- c)  $2,6 \cdot 10^4$
- d)  $2,6 \cdot 10^5$
- e)  $2,6 \cdot 10^6$

- T.22** (Fuvest-SP) Duas pequenas esferas metálicas idênticas, inicialmente neutras, encontram-se suspensas por fios inextensíveis e isolantes.



Um jato de ar perpendicular ao plano da figura é lançado durante um certo intervalo de tempo sobre as esferas. Observa-se então que ambas as esferas estão fortemente eletrizadas. Quando o sistema alcança novamente o equilíbrio estático, podemos afirmar que as tensões nos fios:

- a) aumentaram e as esferas se atraem.
- b) diminuíram e as esferas se repelem.
- c) aumentaram e as esferas se repelem.
- d) diminuíram e as esferas se atraem.
- e) não sofreram alterações.

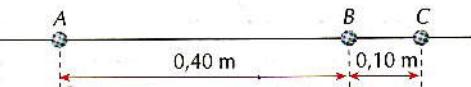
- T.23** (Fuvest-SP) Duas cargas elétricas  $-q$  e  $+q$  estão fixas nos pontos  $A$  e  $B$ , conforme a figura. Uma terceira carga positiva  $Q$  é abandonada num ponto da reta  $\overrightarrow{AB}$ .



Podemos afirmar que a carga  $Q$ :

- a) permanecerá em repouso se for colocada no meio do segmento  $\overrightarrow{AB}$ .
- b) mover-se-á para a direita se for colocada no meio do segmento  $\overrightarrow{AB}$ .
- c) mover-se-á para a esquerda se for colocada à direita de  $B$ .
- d) mover-se-á para a direita se for colocada à esquerda de  $A$ .
- e) permanecerá em repouso em qualquer posição sobre a reta  $\overrightarrow{AB}$ .

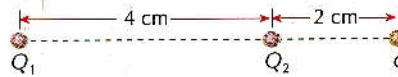
- T.24** (Mackenzie-SP) Três pequenos corpos  $A$ ,  $B$  e  $C$ , eletrizados com cargas elétricas idênticas, estão dispostos como mostra a figura.



A intensidade da força elétrica que  $A$  exerce em  $B$  é 0,50 N. A força elétrica resultante que age sobre o corpo  $C$  tem intensidade de:

- a) 3,20 N
- b) 4,68 N
- c) 6,24 N
- d) 7,68 N
- e) 8,32 N

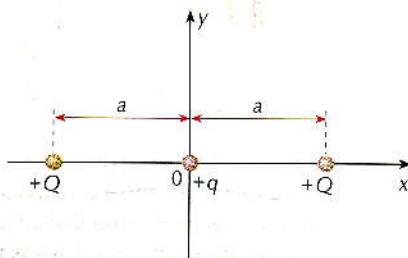
- T.25** (PUC-Campinas-SP) As cargas elétricas puntiformes  $Q_1$  e  $Q_2$ , posicionadas em pontos fixos conforme o esquema, mantêm, em equilíbrio, a carga elétrica puntiforme  $q$  alinhada com as duas primeiras.



De acordo com as indicações do esquema, o módulo da razão  $\frac{Q_1}{Q_2}$  é igual a:

- a) 36      c) 2      e)  $\frac{2}{3}$   
 b) 9      d)  $\frac{3}{2}$

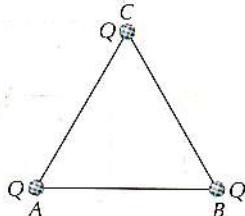
**T.26** (Cesgranrio-RJ) No esquema a seguir, as cargas  $+Q$  de mesmo módulo estão fixas, enquanto a carga  $+q$ , inicialmente em repouso na origem do sistema de eixos, pode deslizar sem atrito sobre os eixos  $x$  e  $y$ .



O tipo de equilíbrio que a carga  $+q$  experimenta nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente, é:

- a) estável, estável.  
 b) instável, instável.  
 c) estável, instável.  
 d) instável, estável.  
 e) estável, indiferente.

**T.27** (Fesp-PE) Três cargas elétricas idênticas iguais a  $Q$  estão distribuídas nos vértices de um triângulo equilátero de lado  $d$  posicionado no plano vertical, de acordo com a figura.

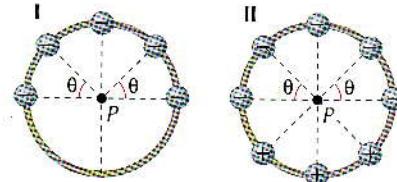


As cargas em  $A$  e  $B$  estão fixas, enquanto em  $C$  a carga está livre. Sendo  $k$  a constante eletrostática no vácuo e  $g$  a aceleração da gravidade, para que a carga colocada no vértice  $C$  permaneça em equilíbrio é necessário que sua massa seja igual a:

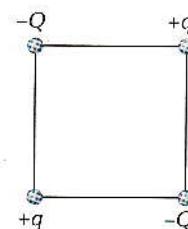
- a)  $\frac{kQ^2}{gd^2}$   
 b)  $\frac{gk}{(Qd)^2}$   
 c)  $\frac{kQ}{(gd)^2}$   
 d)  $\frac{\sqrt{3} \cdot kQ^2}{gd^2}$   
 e)  $\frac{\sqrt{3} \cdot g^2 k}{Qd^2}$

**T.28** (Fuvest-SP) Pequenas esferas, carregadas com cargas elétricas negativas de mesmo módulo  $Q$ , estão dispostas sobre um anel isolante e circular, como indicado na figura I. Nessa configuração, a intensidade da força elétrica que age sobre uma carga de prova negativa, colocada no centro do anel (ponto  $P$ ), é  $F_1$ . Se forem acrescentadas sobre o anel três outras cargas de mesmo módulo  $Q$ , mas positivas, como na figura II, a intensidade da força elétrica no ponto  $P$  passará a ser:

- a) zero  
 b)  $\frac{1}{2} \cdot F_1$   
 c)  $\frac{3}{4} \cdot F_1$   
 d)  $F_1$   
 e)  $2 \cdot F_1$



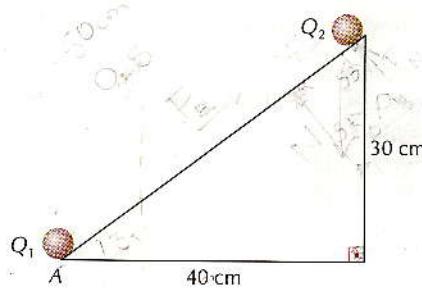
**T.29** (UEL-PR) Quatro cargas elétricas estão fixadas nos vértices de um quadrado de lado  $L$ , como na figura, estando indicados os módulos e os sinais das cargas.



Para que a força elétrica total em uma das cargas  $+q$  seja nula, o módulo da carga  $-Q$  deve ser igual a:

- a)  $q\sqrt{2}$   
 b)  $q$   
 c)  $\frac{q}{2}$   
 d)  $\frac{q\sqrt{2}}{2}$   
 e)  $\frac{q\sqrt{2}}{4}$

**T.30** (Mackenzie-SP) Na figura a seguir a carga  $Q_1 = 0,50 \mu\text{C}$  fixa em  $A$  tem massa igual a  $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ . A carga  $Q_2$  de massa  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$  é abandonada no topo do plano inclinado perfeitamente liso e permanece em equilíbrio.



Adotando  $g = 10 \text{ m/s}^2$  e  $k_0 = 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ , podemos afirmar que a carga  $Q_2$  vale:

- a)  $10 \mu\text{C}$     c)  $1,0 \mu\text{C}$     e)  $0,25 \mu\text{C}$   
 b)  $5,0 \mu\text{C}$     d)  $0,50 \mu\text{C}$

**T.31** (Fuvest-SP) Um pequeno objeto, com carga elétrica positiva, é largado da parte superior de um plano inclinado, no ponto  $A$ , e desliza, sem ser desviado, até atingir o ponto  $P$ . Sobre o plano, estão fixados 4 pequenos discos com cargas elétricas de mesmo módulo. As figuras representam os discos e os sinais das cargas, vendo-se o plano de cima. Das configurações abaixo, a única compatível com a trajetória retilínea do objeto é:

a)



d)



b)



e)



c)

**T.32**

(PUC-SP) Duas esferas condutoras iguais estão dispostas conforme a figura I. Após receberem uma carga total  $Q > 0$ , elas se mantêm na configuração de equilíbrio indicada na figura II.

Dados: comprimento do fio  $L = 20 \text{ cm}$ ; peso de cada esfera  $= 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ ; e a constante da lei de Coulomb  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

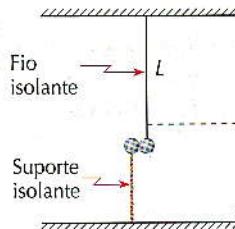


Figura I

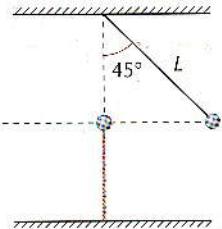
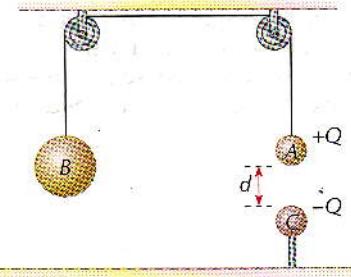


Figura II

A carga de cada esfera em coulomb é:

- a)  $4,00 \cdot 10^{-14}$     c)  $2,00 \cdot 10^{-5}$     e)  $3,60 \cdot 10^{-2}$   
 b)  $2,00 \cdot 10^{-7}$     d)  $3,24 \cdot 10^{-5}$

**T.33** (Olimpíada Brasileira de Física) Os corpos  $A$  e  $B$ , de massas  $m$  e  $M$  respectivamente, estão atados por uma corda que passa por duas roldanas. O corpo  $A$  está carregado com carga  $+Q$  e sofre a ação de uma outra carga  $-Q$ , que se encontra a uma distância  $d$  (figura a seguir). Nessa situação, todo o sistema encontra-se em equilíbrio.

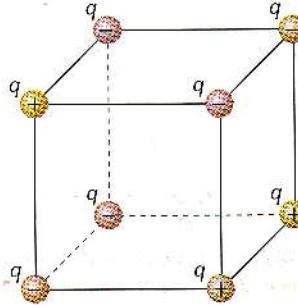


Se as massas de  $A$  e  $B$  quadruplicarem, qual deve ser a nova distância entre as cargas para que o sistema fique em equilíbrio? Considere desprezíveis a massa da corda e o atrito nas roldanas.

- a)  $d$   
 b)  $\frac{d}{2}$   
 c)  $\frac{d}{4}$   
 d)  $2d$   
 e)  $4d$

**T.34**

(PUC-SP) Em cada um dos vértices de uma caixa cúbica de aresta  $\ell$  foram fixadas cargas elétricas de módulo  $q$  cujos sinais estão indicados na figura.



Sendo  $k$  a constante eletrostática do meio, o módulo da força elétrica que atua sobre uma carga pontual de módulo  $2q$  colocada no ponto de encontro das diagonais da caixa cúbica é:

- a)  $\frac{4kq^2}{3\ell^2}$     d)  $\frac{8kq^2}{\ell^2}$   
 b)  $\frac{8kq^2}{3\ell^2}$     e)  $\frac{4kq^2}{\ell^2}$   
 c)  $\frac{16kq^2}{3\ell^2}$



### A eletricidade estática no dia-a-dia

A geração de eletricidade estática por atrito é mais comum do que se pode imaginar. Quando penteamos o cabelo num dia seco, podemos notar que os fios repelem-se uns aos outros. Isso ocorre porque os fios de cabelo, em atrito com o pente, eletrizam-se com cargas de mesmo sinal. Ao tirarmos um agasalho de lã, notamos que os pêlos do braço se arrepiam, atraídos pelo tecido, e às vezes ouvem-se até pequenos estalidos de faíscas que saltam entre o corpo e o agasalho. Ao caminharmos sobre um tapete de lã, o atrito dos sapatos com o tapete pode gerar cargas que se acumulam em nosso corpo. Se tocarmos a maçaneta de uma porta, nessas condições, poderá saltar uma faísca, produzindo um leve choque. Além dessas, seria possível enumerar várias outras situações do dia-a-dia em que se pode constatar a eletrização por atrito.

Ao se movimentarem, as aeronaves também podem se tornar eletrizadas pelo atrito com o ar atmosférico. Por isso, colocam-se pequenos fios nas asas dos aviões, a fim de escoar para o ambiente as cargas geradas por atrito. No reabastecimento, por garantia, o avião é ligado ao solo, para que se escoe qualquer eletricidade ainda existente e que poderia, eventualmente, provocar faíscas, incendiando os vapores do combustível. Pela mesma razão, durante o reabastecimento dos tanques de postos de combustível, os caminhões são ligados ao solo por meio de um fio condutor.



CORTESIA DA EMBRAER S.A. / TODOS OS DIREITOS RESERVADOS

▲ Fios metálicos nas asas do avião permitem o escoamento das cargas elétricas geradas pelo atrito com o ar.

### L Teste sua leitura

- L.1** (PUC-SP) Leia com atenção a tira do gato Garfield mostrada abaixo e analise as afirmativas que se seguem.



© 1981 PAWS, INC. ALL RIGHTS RESERVED / DISL BY ATLANTIC SYNDICATION / UNIVERSAL PRESS SYNDICATE

- Garfield, ao esfregar suas patas no carpete de lã, adquire carga elétrica. Esse processo é conhecido como eletrização por atrito.
- Garfield, ao esfregar suas patas no carpete de lã, adquire carga elétrica. Esse processo é conhecido como eletrização por indução.
- O estalo e a eventual faísca que Garfield pode provocar, ao encostar em outros corpos, são devidos à movimentação da carga acumulada no corpo do gato, que flui de seu corpo para os outros corpos.

Estão certas:

- a) I, II e III  
b) I e II  
c) I e III  
d) II e III

- e) apenas I

Em regiões de clima seco, é relativamente comum um passageiro sentir um pequeno choque ao descer de um veículo e tocá-lo. Isso ocorre porque, sendo o ar seco bom isolante elétrico, a eletricidade estática adquirida por atrito não se escoa para o ambiente, e o passageiro, ao descer, faz a ligação do veículo com o solo. Às vezes é a roupa do passageiro (ou do motorista) que se eletriza por atrito com o banco do carro. Ao descer, o toque na parte metálica produz a descarga e a sensação de choque.



**Quando os tanques de um posto de serviços são abastecidos, é indispensável que o caminhão seja ligado à Terra. Assim, previne-se um eventual incêndio que as cargas geradas por atrito possam causar, caso salte uma faísca nos vapores de combustível. O mesmo deve ser feito no abastecimento de um avião, ligando-o à Terra ou ao próprio caminhão, que faz as vezes da Terra.**

**L.2** (Cefet-PI) A geração de eletricidade estática por atrito é mais comum do que se pode imaginar. Veja, por exemplo, a reportagem a seguir.

#### Reportagem

**A época é de tomar choques no carro. Mas dá para evitar.**

**A baixa umidade do ar no inverno faz a eletricidade estática se acumular no ocupante do veículo. Veja como, pelo menos, reduzir o problema.**

Inverno é época de tomar choque ao sair do carro. Com a baixa umidade do ar, a eletricidade estática criada enquanto o veículo está em movimento só se descarrega quando se sai do veículo. E aparece na forma de choques, que podem até mesmo gerar faíscas.

A intensidade varia de acordo com as características físicas e fatores externos. De acordo com a Associação Brasileira de Medicina e Acidentes no Trânsito (Abramet), pessoas que

transpiram muito ficam mais expostas às descargas, pois os sais minerais, condutores de eletricidade, são expelidos na transpiração.

Os tecidos dos bancos e das roupas também são fatores determinantes, mas há maneiras de evitar o desconforto: antes de sair do veículo, segure alguma parte da lataria, como a porta, e só retire a mão dali quando o pé estiver no chão. Outra solução é evitar roupas de tecido sintético e sapatos com sola de borracha, que é isolante elétrico.

Jornal do Carro, Jornal da Tarde, 26 de julho de 2000.  
Quando pentearmos os cabelos num dia seco, podemos notar que os fios repelem-se uns aos outros. Isso ocorre porque os fios de cabelo, em atrito com o pente, eletrizam-se com cargas:

- de mesmo sinal.
- de mesmo módulo.
- de sinais opostos.
- negativas.
- positivas.



## Atividade experimental • I

Realize a experiência\* com supervisão de seu professor.

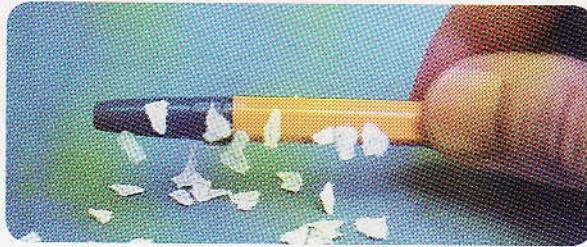
### Eletrização por atrito e indução eletrostática

Esfregue em sua roupa o corpo de uma caneta de plástico. Em seguida, aproxime-o de pequenos pedaços de papel. Observe que os pedacinhos de papel são atraídos, encostam no plástico e caem. Responda:

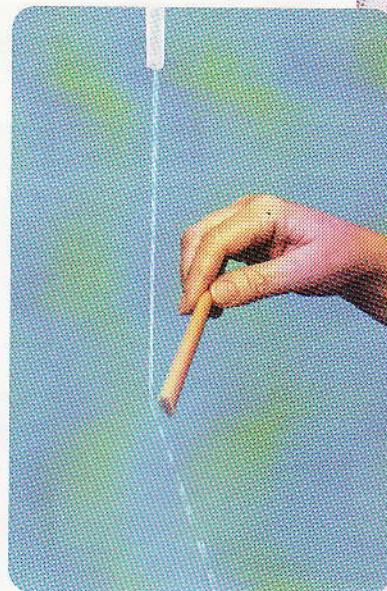
- Por que o plástico da caneta atrai os pedaços de papel?
- Qual o mecanismo dessa atração?
- Por que os pedaços de papel caem após o contato com o plástico?

Repita a experiência aproximando, agora, a mesma caneta ou outro objeto de plástico previamente atritado de um filete de água que escorre de uma torneira ou de um recipiente.

- Explique por que o filete de água se desvia de sua trajetória normal.



O. CABRÉO / CIO



EDUARDO SANTAUERIA / CIO



## Atividade experimental • II

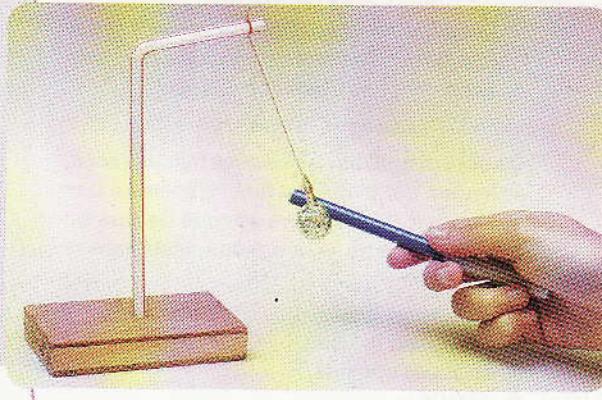
Realize a experiência com supervisão de seu professor.

### Pêndulo elétrico

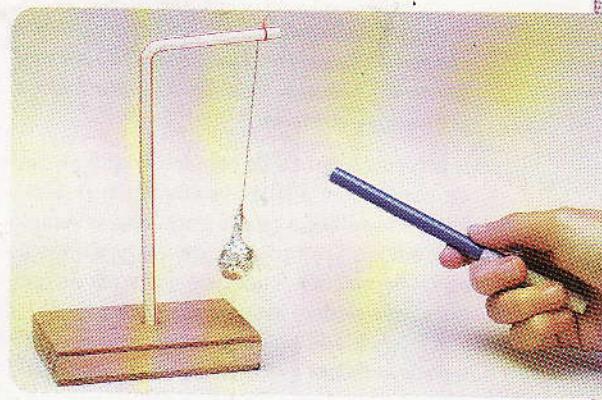
Com um canudo de refresco “sanfonado”, construa um pêndulo elétrico: amarre na extremidade de uma linha uma bolinha de isopor envolta em papel-alumínio e amarre na ponta do canudo a outra extremidade da linha.

Aproxime do pêndulo o plástico de uma caneta (ou de um pente) previamente atritado na roupa. Você vai verificar que a bolinha do pêndulo é atraída, encosta no plástico e, em seguida, é repelida, como mostram as fotos abaixo.

- Explique o que aconteceu em termos de fenômenos elétricos para justificar tal ocorrência.
- De que maneira você deveria proceder para saber o sinal da carga do plástico eletrizado?



THE NEXT



THE NEXT

\* Os dias quentes e secos são mais propícios para realizar as atividades experimentais propostas (I, II e III). O ar úmido conduz mais facilmente a eletricidade e os corpos eletrizados se descarregam mais rapidamente.



## Atividade experimental • III

Realize a experiência com supervisão de seu professor.

### Eletroscópio de folhas

- Com base na teoria, construa um eletroscópio de folhas metálicas.
- Reproduza as experiências apresentadas no item 6 com esse eletroscópio e explique as ocorrências verificadas.



## HISTÓRIA DA FÍSICA

### DO ÂMBAR À PILHA VOLTAICA

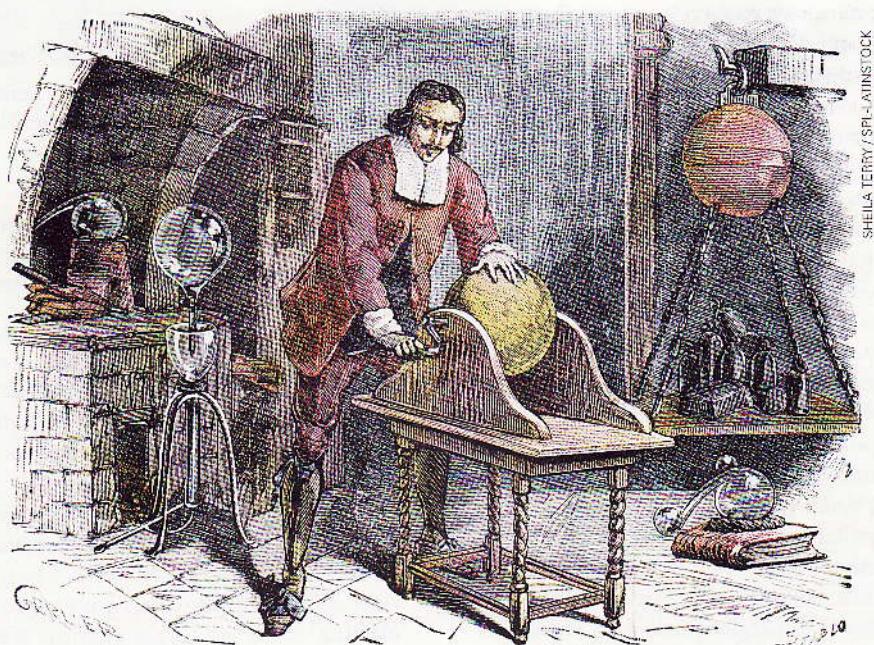
Um dos contatos mais fascinantes e também mais perigosos e violentos do homem com a natureza se dá pela eletricidade. Os raios, com sua brilhante luminosidade (o relâmpago) e seu som estrondoso (o trovão), ao mesmo tempo que assustam, fascinam o homem desde os tempos mais remotos.

Historicamente, registra-se que a eletricidade tornou-se objeto de observação quando o filósofo grego TALES DE MILETO, no século VI a.C., notou que o âmbar, atritado com a pele de um animal ou um tecido qualquer, adquiria a propriedade de atrair objetos leves. Uma observação aparentemente tão banal marca o início da ciência da Eletricidade, fundamental para o progresso de nossa civilização.

Muitos séculos se passaram, após a observação pioneira de Tales, até os fenômenos elétricos serem analisados cientificamente. Coube ao cientista inglês WILLIAM GILBERT (1544-1603) retomar a experiência original, verificando que a propriedade

apresentada pelo âmbar era comum a várias outras substâncias quando atritadas entre si. Foi Gilbert quem cunhou o termo “elétrico” para designar esse fenômeno, derivando-o de *elektron* (âmbar). A partir daí, os corpos que atraíam objetos leves depois de atritados passaram a ser chamados corpos **eletrizados** ou carregados de **eletricidade**.

Vários cientistas dedicaram-se então a investigar os fenômenos elétricos. Um dos pioneiros foi o alemão OTTO VON GUERICKE (1602-1686). Prefeito da cidade de Magdeburgo, além de suas funções administrativas e políticas, foi um cientista de talento. No campo da Eletricidade, Guericke interessou-se pelos trabalhos de William Gilbert e procurou repetir suas experiências. Constatou que a quantidade de eletricidade adquirida pelo âmbar, ou outro material atritado com um pano, era muito pequena e procurou um modo de obter corpos mais intensamente eletrizados.



▲ Otto Von Guericke realizando experiências com sua máquina eletrostática.

Guericke construiu então a primeira máquina eletrostática de que se tem notícia. Era constituída de uma esfera de enxofre atravessada por uma barra à qual adaptou uma manivela; para entrar em funcionamento, o operador deveria fazer a esfera girar velozmente e encostar nela a sua mão, coberta por uma espessa luva. Em virtude do atrito, a esfera de enxofre se eletrizava intensamente, produzindo até faíscas.

Um avanço significativo na história da Eletricidade ocorreu em 1729, quando o cientista inglês STEPHEN GRAY (1666-1736), discípulo de ISAAC NEWTON (1642-1727), constatou, por meio de um conjunto de experiências, que a eletricidade podia ou não fluir de um ponto a outro através de fios, dependendo do material com que eram feitos os fios. Estabeleceu, assim, a distinção entre condutores e isolantes elétricos.

### ■ Os dois tipos de eletricidade

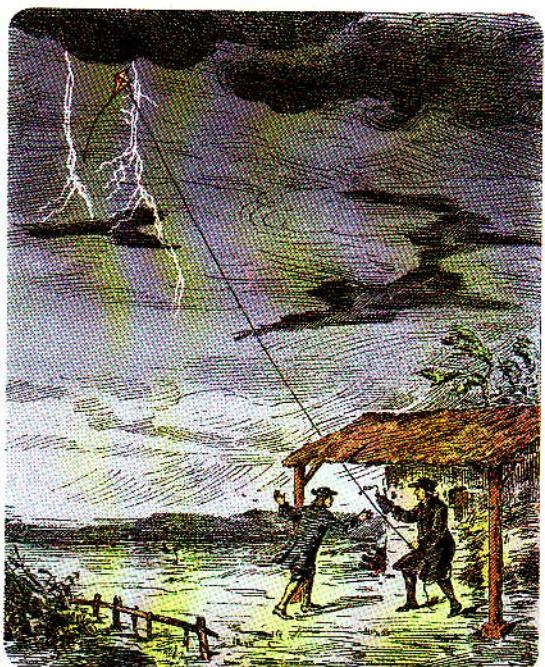
Várias experiências comprovaram que entre corpos eletrizados podia ocorrer atração ou repulsão: aproximando-se duas barras de vidro, depois de atritadas com seda, observava-se repulsão. Entre uma barra de vidro e outra de resina, depois de atritadas com seda, constatava-se atração. As experiências mostravam que os corpos se comportavam ou como o vidro ou como a resina. Esse fato levou CHARLES DU FAY (1698-1739) a considerar a existência de duas espécies de eletricidade: a vítreia e a resinosa.

Foi o cientista, político e escritor americano BENJAMIN FRANKLIN (1706-1790) quem introduziu os termos eletricidade positiva e eletricidade negativa para designar a eletricidade vítreia e resinosa, respectivamente. Ele formulou uma teoria para explicar a eletrização dos corpos. Segundo sua concepção, todos os corpos no **estado neutro** possuíam certa quantidade normal de um **fluído elétrico**. No caso de apresentar excesso desse fluido, ele manifestava propriedades semelhantes às do vidro atritado com seda: o corpo estaria **eletrizado positivamente**, pois teria fluido elétrico a mais. O corpo que apresentasse falta de fluido elétrico teria propriedades semelhantes às da resina atritada com seda: estaria **eletrizado negativamente**, pois teria fluido elétrico a menos. Assim, de acordo com Franklin, na eletrização por atrito ocorreria a passagem do fluido elétrico de um corpo para o outro, de modo que aquele que **ganhasse fluido** ficaria **positivo** e o que **perdesse fluido** ficaria **negativo**.

Hoje, sabe-se que o fluido elétrico não existe e que os responsáveis pela eletrização dos corpos são os **elétrons**. No entanto, para que os termos criados por Franklin fossem mantidos, arbitrou-se que os elétrons teriam "eletricidade negativa". Desse modo, os **corpos positivos** são os que apresentam **falta de elétrons** (em vez de excesso de fluido) e os **corpos negativos** são os que apresentam **excesso de elétrons** (em vez de falta de fluido).

### ■ A evolução da Eletricidade

As contribuições de Franklin para o desenvolvimento da Eletricidade foram muito importantes, merecendo destaque a invenção do pára-raios. Franklin percebeu que o raio nada mais era do que uma faísca elétrica. Para comprovar esse fato, ele empinou uma pipa num dia de tempestade: à extremidade superior da linha, adaptou um pedaço de arame fino e, à extremidade inferior, uma chave metálica, tomando o cuidado de colocar uma fita de seda isolante entre a chave e sua mão. Quando a pipa passou sob uma nuvem negra, ocorreu o que Franklin esperava: a linha molhada conduziu a eletricidade, e faíscas saltaram da chave. Estava descoberto o princípio de construção do pára-raios.



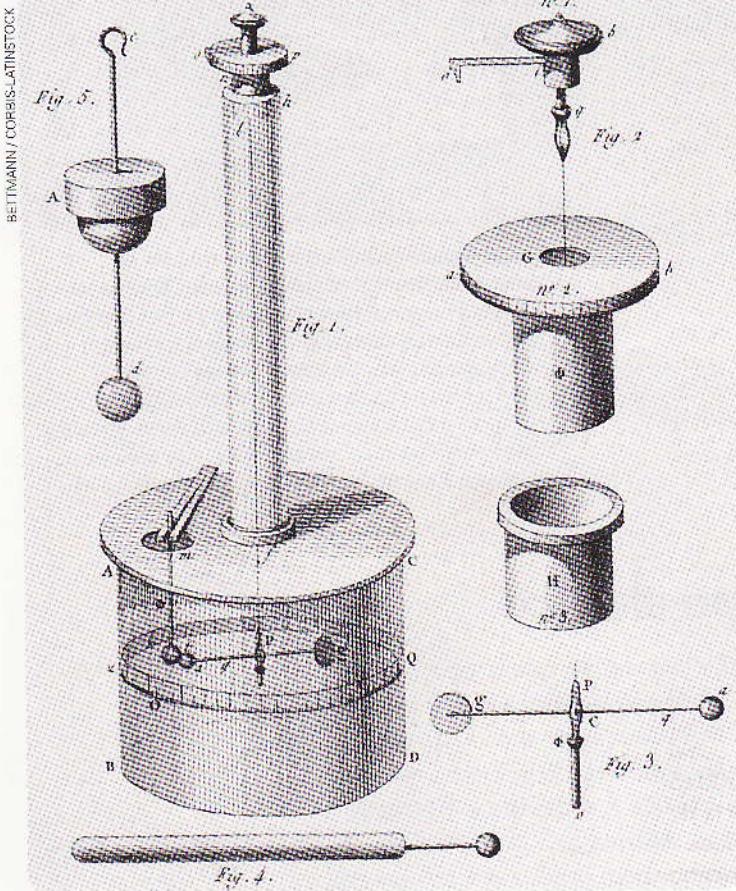
SHEILA TETRY / SPL-LATINSTOCK

▲ Ilustração mostrando Benjamin Franklin e seu filho realizando a famosa experiência que levou o cientista à invenção do pára-raios.

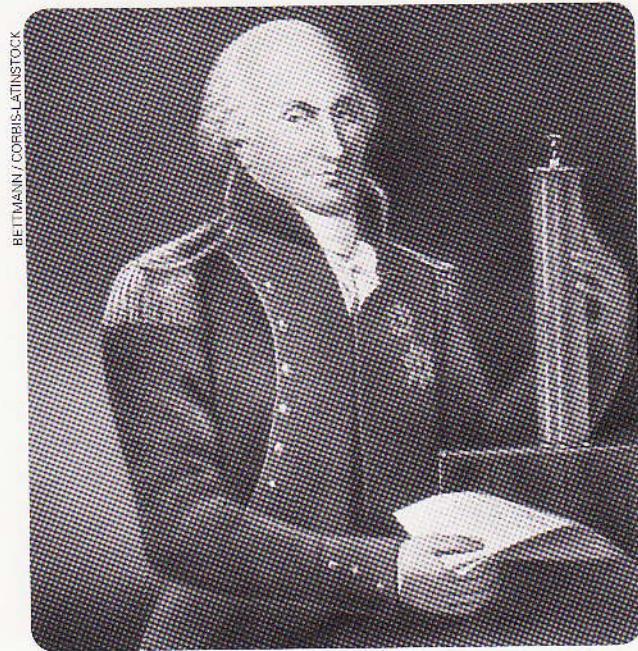
**Atenção:** a experiência realizada por Franklin é muito perigosa. Por isso, jamais tente repeti-la.

CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB (1736-1806), cientista francês, foi quem realizou os primeiros estudos quantitativos sobre as ações entre corpos eletricamente carregados. Utilizando uma balança de torção, Coulomb conseguiu estabelecer a lei que leva seu nome.

No final do século XVIII, o físico italiano ALESSANDRO VOLTA (1745-1827) construiu sua pilha elétrica. A partir daí teve início a fase mais importante da Eletricidade, com a obtenção da **corrente elétrica**, isto é, de cargas elétricas em movimento ordenado.



▲ A balança de torção utilizada por Coulomb, segundo esquema publicado em sua obra *Memórias sobre eletricidade e magnetismo*.



▲ Charles Augustin de Coulomb

## Enquanto isso...

Consulte a **Linha do Tempo**, nas primeiras páginas deste volume, onde são destacados os principais acontecimentos históricos que ocorreram na época de William Gilbert, Otto Von Guericke, Stephen Gray, Du Fay, Franklin e Coulomb, estendendo-se do século XVI ao século XVIII, e personagens importantes, em vários ramos de atividades, que viveram nesse mesmo período. Dentre eles, salientamos:

- **João Calvin** (1509-1564), teólogo francês que fez a reforma religiosa conhecida como calvinismo. Escreveu várias obras destinadas à propagação de sua doutrina, de seus ensinamentos e da compreensão dos evangelhos.
- **Henrique IV** de Bourbon (1553-1610), foi o rei da França que iniciou a dinastia dos Bourbons. Reinou de 1589 a 1610, quando foi assassinado, subindo ao trono seu filho Luiz XIII.
- **Thomas Hobbes** (1588-1679), filósofo inglês que se interessou por Física e Matemática. Autor de *Leviatã*, na qual apresenta sua teoria do poder político. Sua filosofia é mecanicista e materialista, em que o homem é movido pelo desejo e pelo temor. Segundo ele, "o homem é o lobo do homem".
- **Padre Antônio Vieira** (1608-1697), religioso jesuíta, orador e escritor português; seus sermões, muitas vezes de cunho político, evidenciavam seus dotes oratórios. Dos inúmeros sermões proferidos, os mais famosos são "Sermão da Quinta Dominga da Quaresma" e "Sermão da Sexagésima".
- **Johannes Vermeer** (1632-1675), pintor holandês e aluno de Rembrandt. Suas obras mais conhecidas são *Vista de Delft*, *Moça com brinco de pérola*, *Mulher na janela* e *A Leiteira*.
- **Georg Friedrich Haendel** (1685-1759), músico e compositor alemão. Além de óperas, compôs cantatas, concertos, sonatas e oratórios. De todas as suas obras a mais famosa é o oratório *Messias*.

# Campo elétrico

1. CONCEITO DE CAMPO ELÉTRICO
2. CAMPO ELÉTRICO DE UMA CARGA PUNTIFORME  $Q$  FIXA
3. CAMPO ELÉTRICO DE VÁRIAS CARGAS PUNTIFORMES FIXAS
4. LINHAS DE FORÇA
5. CAMPO ELÉTRICO UNIFORME



Neste capítulo apresentamos o conceito de campo elétrico e analisamos aqueles originados por uma carga elétrica puntiforme e por diversas cargas. Conceituamos linhas de força e campo elétrico uniforme. Os conceitos de campo e linhas de força foram introduzidos pelo cientista e conferencista inglês Michael Faraday, que vemos na foto ministrando uma aula no Instituto Real de Londres, na década de 1830.



## 1. Conceito de campo elétrico

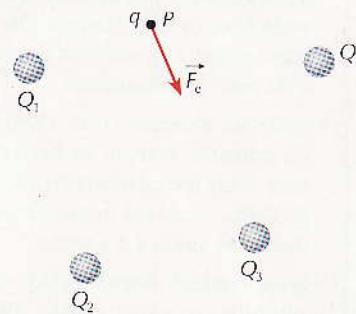
Uma carga elétrica puntiforme  $Q$  origina, na região que a envolve, um campo de forças chamado **campo elétrico**. Uma carga elétrica puntiforme de prova  $q$  colocada num ponto  $P$  dessa região fica sob ação de uma força elétrica  $\vec{F}_e$  (figura 1). A carga elétrica  $q$  “sente” a presença da carga  $Q$  por meio do campo elétrico que  $Q$  origina. Portanto, a força elétrica  $\vec{F}_e$  é devida à interação\* entre o campo elétrico da carga  $Q$  e a carga elétrica  $q$ .

Analogamente, a carga elétrica de prova  $q$  também produz um campo elétrico que age sobre  $Q$ . Assim:

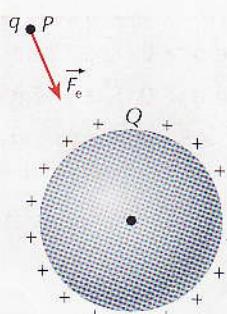
O campo elétrico desempenha o papel de transmissor de interações entre cargas elétricas.

O campo elétrico também pode ser originado por uma distribuição discreta ou contínua de cargas elétricas (figura 2).

a)



b)



$Q$



**Figura 1.** Campo elétrico de uma carga puntiforme  $Q$ .

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

**Figura 2.** (a) Campo elétrico de uma distribuição de cargas elétricas. (b) Campo elétrico de uma superfície esférica uniformemente eletrizada.

\* De acordo com a teoria da relatividade de Einstein, nenhuma informação pode ser transmitida com velocidade superior à velocidade de propagação da luz no vácuo. Por isso, uma carga não influí diretamente sobre a outra. O campo elétrico age como mediador da interação.

Vamos caracterizar o campo elétrico fazendo analogia com o campo gravitacional terrestre.

Como se representa esquematicamente na figura 3, um corpo de prova de massa  $m$ , colocado num ponto  $P$  próximo da Terra (suposta estacionária), fica sujeito a uma força atrativa  $\vec{P} = mg$  (peso do corpo). Isso significa que a Terra origina, ao seu redor, o campo gravitacional que age sobre  $m$ .

Na fórmula  $\vec{P} = mg$  notamos a presença de dois fatores:

a) **fator escalar ( $m$ )**, que só depende do corpo sobre o qual a força se manifesta.

b) **fator vetorial ( $\vec{g}$ )**, que exprime a ação no ponto  $P$  do responsável pelo aparecimento de tal força, no caso, a Terra. O vetor  $\vec{g}$  é denominado **vetor aceleração da gravidade** ou **vetor campo gravitacional**. A cada ponto  $P$  do campo gravitacional associa-se um vetor  $\vec{g}$ .

O módulo do vetor  $\vec{g}$  é dado por  $g = \frac{GM}{d^2}$ , em que  $G$  é a constante de gravitação universal,  $M$  é a massa da Terra e  $d$  é a distância do centro da Terra ao ponto  $P$ .

No caso do campo elétrico, a força elétrica  $\vec{F}_e$  que atua em  $q$  é também expressa pelo produto de dois fatores:

a) **fator escalar**, que é análogo a  $m$ : é a carga de prova  $q$  colocada em  $P$ , na qual aparece a força elétrica  $\vec{F}_e$ .

b) **fator vetorial**, que depende da carga puntiforme  $Q$  ou das cargas (se o campo for produzido por uma distribuição de cargas) responsáveis pelo aparecimento da força  $\vec{F}_e$  em  $P$ . Esse fator depende também do meio, como veremos posteriormente.

Esse fator vetorial análogo ao  $\vec{g}$  é representado por  $\vec{E}$  e é denominado **vetor campo elétrico em  $P$** . Assim, temos:

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

A cada ponto  $P$  de um campo elétrico associa-se um vetor  $\vec{E}$ , independentemente de colocarmos ou não uma carga de prova  $q$  em  $P$ .

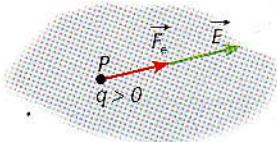
Fato análogo verifica-se no campo gravitacional: a cada ponto desse campo associa-se um vetor  $\vec{g}$ , independentemente de colocarmos um corpo de prova de massa  $m$ .

Colocando-se em  $P$  uma carga de prova  $q$ , esta fica sujeita à força  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ .

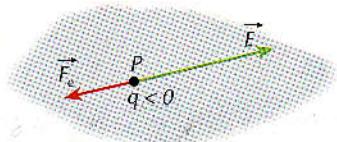
Da definição de produto de um número real por um vetor, podemos concluir:

- Se  $q > 0$ ,  $\vec{F}_e$  e  $\vec{E}$  têm mesmo sentido.
- Se  $q < 0$ ,  $\vec{F}_e$  e  $\vec{E}$  têm sentidos opostos.
- $\vec{F}_e$  e  $\vec{E}$  têm sempre mesma direção.

a)



b)



**Figura 4.** A carga  $q$ , colocada num ponto  $P$  de um campo elétrico, fica sujeita à força  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ .

Observe que  $\vec{F}_e$  e  $\vec{E}$  são grandezas físicas diferentes, ainda que sejam grandezas vetoriais:  $\vec{F}_e$  é força e  $\vec{E}$  é vetor campo elétrico.

## 1.1. Unidade de intensidade de campo elétrico

De  $\vec{F}_e = q\vec{E}$  (notação vetorial) vem  $F_e = |q| \cdot E$  (em módulo).

$$\text{Portanto: } E = \frac{F_e}{|q|}$$

$$\text{unidade de intensidade de campo elétrico} = \frac{\text{unidade de intensidade de força}}{\text{unidade de carga}}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI) temos:

$$1 \text{ unidade de } E = 1 \frac{\text{newton}}{\text{coulomb}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Conforme veremos no capítulo 3, o nome oficial da unidade de intensidade de campo no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o volt por metro ( $V/m$ ).

### R Exercícios resolvidos

- R.14** Num ponto de um campo elétrico, o vetor campo elétrico tem direção horizontal, sentido da direita para a esquerda e intensidade  $10^5 \text{ N/C}$ . Coloca-se, nesse ponto, uma carga puntiforme de  $-2 \mu\text{C}$ . Determine a intensidade, a direção e o sentido da força que atua na carga.

**Solução:**

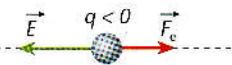
A força  $\vec{F}_e$  que atua na carga tem:

$$\text{intensidade: } F_e = |q| \cdot E \Rightarrow F_e = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 \Rightarrow F_e = 0,2 \text{ N}$$

**direção:** horizontal (mesma de  $\vec{E}$ )

**sentido:** da esquerda para a direita (oposto ao de  $\vec{E}$ , pois  $q < 0$ ).

**Resposta:** A força elétrica que atua em  $q$  tem intensidade  $0,2 \text{ N}$ , direção horizontal e sentido da esquerda para a direita.



- R.15** Uma partícula de massa  $m$  e carga  $q$  foi colocada num ponto  $A$  de um campo elétrico onde o vetor campo elétrico é vertical ascendente e tem intensidade  $E$ . Sendo dados  $E$ ,  $m$  e  $g$  (aceleração da gravidade), determine  $q$ , sabendo que em  $A$  a partícula fica em equilíbrio.

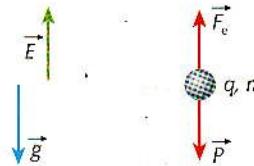
**Solução:**

Na partícula atuam o peso (ação gravitacional) e a força elétrica. Sendo o peso vertical, descendente, resulta que a força elétrica deve ser vertical, ascendente. Isso significa que  $q$  é positivo, pois a força elétrica tem o mesmo sentido do campo.

Além de mesma direção e sentidos opostos, as forças  $\vec{F}_e$  e  $\vec{P}$  devem ter a mesma intensidade:  $F_e = P$

$$\text{Como } F_e = qE \text{ e } P = mg, \text{ temos que: } qE = mg \Rightarrow q = \frac{mg}{E}$$

$$\text{Resposta: } q = \frac{mg}{E}$$



### P Exercícios propostos

- P.23** Uma carga elétrica puntiforme de  $10^{-9} \text{ C}$ , ao ser colocada num ponto  $P$  de um campo elétrico, fica sujeita a uma força de intensidade igual a  $10^{-2} \text{ N}$ , vertical e descendente. Determine:

- a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico em  $P$ ;
- a intensidade, a direção e o sentido da força que atuará sobre uma carga puntiforme igual a  $3 \mu\text{C}$ , se ela fosse colocada em  $P$ .

**P.24** Num ponto de um campo elétrico, o vetor campo elétrico tem direção vertical, sentido para baixo e intensidade igual a  $5 \cdot 10^3$  N/C. Coloca-se, nesse ponto, uma pequena esfera de peso  $2 \cdot 10^{-3}$  N e eletrizada com carga desconhecida. Sabendo que a pequena esfera fica em equilíbrio, determine:

- a intensidade, a direção e o sentido da força elétrica que atua na carga;
- o valor da carga.



## 2. Campo elétrico de uma carga puntiforme $Q$ fixa

Determinemos as características do vetor campo elétrico  $\vec{E}$  num ponto  $P$ , devido a uma carga puntiforme  $Q$ , fixa em  $O$  e no vácuo (figura 5).

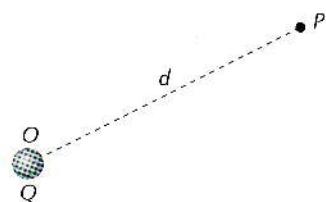
### a) Intensidade

Coloquemos em  $P$  uma carga puntiforme de prova  $q$  (figura 6). Esta fica sujeita a uma força de intensidade:  $F_e = |q| \cdot E$  ①

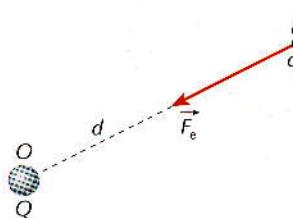
$$\text{Da lei de Coulomb vem: } F_e = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |q|}{d^2} \quad ②$$

$$\text{Portanto: } |q| \cdot E = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |q|}{d^2} \Rightarrow E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$$

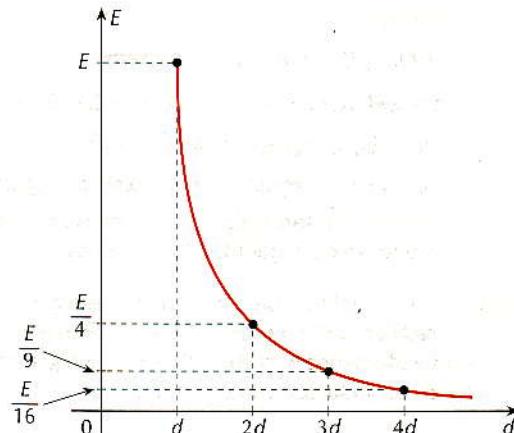
O gráfico de  $E$ , em função de  $d$ , é mostrado na figura 7. Observe que a intensidade do campo  $E$  é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $d$  à carga. Assim, se  $d$  dobra,  $E$  reduz-se à quarta parte; se  $d$  triplica,  $E$  reduz a  $\frac{1}{9}$  do valor inicial.



**Figura 5.**  $Q$  fixo em  $O$  gera no espaço que o envolve um campo elétrico. A cada ponto associa-se um vetor  $\vec{E}$ .



**Figura 6.** A carga elétrica  $q$  colocada em  $P$  fica sujeita a uma força  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ .



**Figura 7.** Gráfico de  $E \times d$ .

### b) Direção

A mesma da força  $\vec{F}_e$ , isto é, da reta que passa pelos pontos  $O$  e  $P$ .

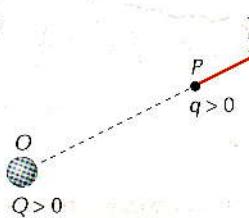
### c) Sentido

Analisemos os dois casos a seguir.

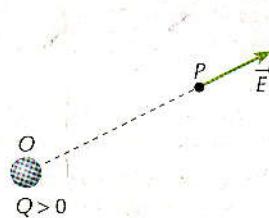
#### ■ 1º caso: $Q > 0$

Coloquemos em  $P$  a carga pontual  $q > 0$ . Nessas condições,  $Q > 0$  e  $q > 0$  se repelem (figura 8a). Como  $q > 0$ , segue-se que  $\vec{E}$  em  $P$  tem o mesmo sentido de  $\vec{F}_e$ , isto é, de  $O$  para  $P$  (figura 8b).

a).



b)



**Figura 8.**

## Exercício resolvido

- R.16** Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico nos pontos  $P_1$  e  $P_2$  indicados na figura. O campo elétrico é gerado pela carga puntiforme  $Q = 1 \mu\text{C}$  e o meio é o vácuo, cuja constante eletrostática é  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ . Determine, em seguida, a intensidade da força elétrica que atua em  $q = 10^{-7} \text{ C}$  quando colocada em  $P_1$ .

**Solução:**

O vetor campo  $\vec{E}_1$  em  $P_1$  tem as seguintes características:

**intensidade:**

A intensidade do campo elétrico no ponto  $P_1$  originado pela carga puntiforme  $Q$  fixa é dada por:

$$E_1 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$$

Sendo  $d_1 = 3 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ,  $Q = 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$  e  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ , temos:

$$E_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(3 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow E_1 = 10^7 \text{ N/C}$$

**direção:** vertical, isto é, da reta  $\overrightarrow{OP_1}$

**sentido:** para cima, pois  $Q > 0$  origina campo de afastamento

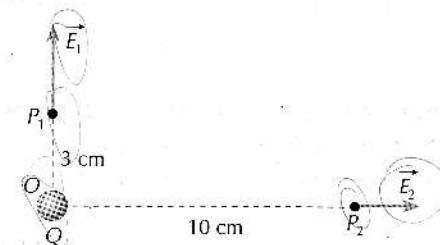
O vetor campo  $\vec{E}_2$  em  $P_2$  tem as seguintes características:

**intensidade:**  $E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$

Sendo, agora,  $d_2 = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$ , temos:  $E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(10^{-1})^2} \Rightarrow E_2 = 9 \cdot 10^5 \text{ N/C}$

**direção:** horizontal

**sentido:** da esquerda para a direita



A intensidade da força elétrica que atua em  $q = 10^{-7} \text{ C}$  colocada em  $P_1$  é dada por:

$$F_{e(1)} = qE_1 \Rightarrow F_{e(1)} = 10^{-7} \cdot 10^7 \Rightarrow F_{e(1)} = 1 \text{ N}$$

**Resposta:**  $E_1 = 10^7 \text{ N/C}$ , vertical, para cima;  $E_2 = 9 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ , horizontal, para a direita e  $F_{e(1)} = 1 \text{ N}$

## Exercício proposto

- P.25** Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico nos pontos  $P_1$  e  $P_2$  da figura. O campo elétrico é gerado pela carga puntiforme  $Q = 10^{-5} \text{ C}$  e o meio é o vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ ).



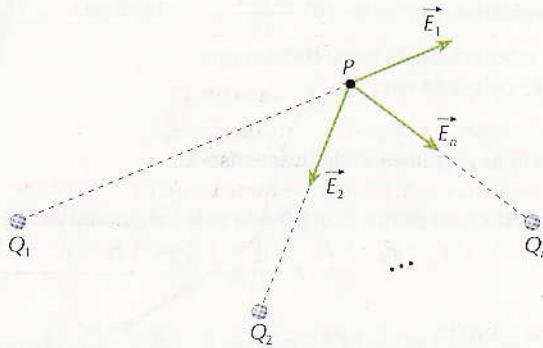
Determine, em seguida, a intensidade, a direção e o sentido da força elétrica que atua em  $q = 1 \mu\text{C}$ , colocada em  $P_1$ . Como se modificaria a resposta anterior se  $q$  valesse  $-1 \mu\text{C}$ ?



### 3. Campo elétrico de várias cargas puntiformes fixas

Consideremos diversas cargas puntiformes fixas  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  e determinemos o vetor campo elétrico originado por essas cargas num ponto  $P$  qualquer do campo (figura 14).

Se  $Q_1$  estivesse sozinha, originaria em  $P$  o vetor campo  $\vec{E}_1$ , bem como  $Q_2$ , sozinha, originaria em  $P$  o vetor campo  $\vec{E}_2$  e assim por diante, até  $Q_n$  que, sozinha, originaria em  $P$  o vetor campo  $\vec{E}_n$ .



**Figura 14.**

O princípio da superposição dos campos elétricos estabelece que:

O vetor campo elétrico resultante  $\vec{E}_R$  em  $P$ , devido a várias cargas  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ , é dado pela soma vetorial  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$ , em que cada vetor parcial é determinado como se a carga correspondente estivesse sozinha.

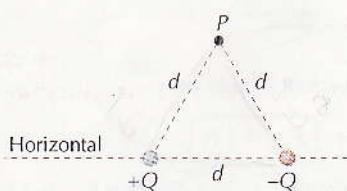
$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$



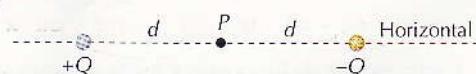
### Exercícios resolvidos

- R.17** Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico resultante em  $P$  nos casos **a** e **b** indicados. Admita, em cada caso, que  $Q = 10^{-6} \text{ C}$  e  $d = 0,3 \text{ m}$ . O meio é o vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ ).

**a)**



**b)**



**Solução:**

a) A carga  $+Q$  origina, em  $P$ , um vetor campo de afastamento:  $\vec{E}_1$ .

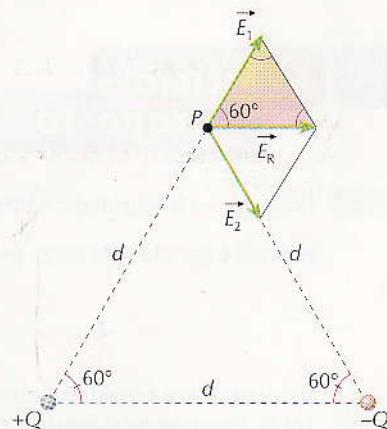
A carga  $-Q$  origina, em  $P$ , um vetor campo de aproximação:  $\vec{E}_2$ . O vetor campo resultante  $\vec{E}_R$ , obtido pela regra do paralelogramo, tem as seguintes características:

**intensidade:** os vetores campo  $\vec{E}_1$  e  $\vec{E}_2$  têm mesma intensidade, pois  $P$  dista igualmente de  $+Q$  e de  $-Q$ :

$$E_1 = E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$$

Sendo  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ ,  $Q = 10^{-6} \text{ C}$  e  $d = 0,3 \text{ m}$ , temos que:

$$E_1 = E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0,3)^2} \Rightarrow E_1 = E_2 = 10^5 \text{ N/C}$$

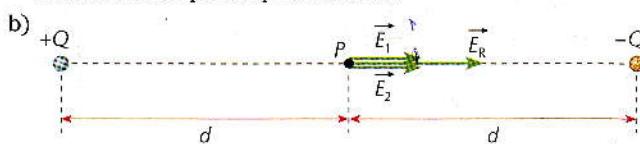


Observe que o triângulo colorido é eqüilátero. Isso significa que:

$$E_R = 10^5 \text{ N/C}$$

**direção:** horizontal

**sentido:** da esquerda para a direita



A carga  $+Q$  origina, em  $P$ , um vetor campo de afastamento  $\vec{E}_1$ .

A carga  $-Q$  origina, em  $P$ , um vetor campo de aproximação  $\vec{E}_2$ .

O vetor campo resultante  $\vec{E}_R$  tem as seguintes características:

**intensidade:** analogamente ao caso anterior, os vetores campo  $\vec{E}_1$  e  $\vec{E}_2$  têm a mesma intensidade:

$$E_R = E_1 + E_2 \Rightarrow E_R = 10^5 + 10^5 \Rightarrow E_R = 2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

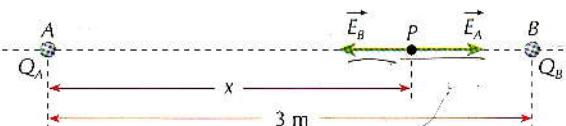
**direção:** horizontal

**sentido:** da esquerda para a direita

**Resposta:** a)  $10^5 \text{ N/C}$ , horizontal, e da esquerda para a direita; b)  $2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ , horizontal, da esquerda para a direita

**R.18** Nos pontos  $A$  e  $B$ , separados pela distância  $AB = 3 \text{ m}$ , fixam-se cargas elétricas puntiformes  $Q_A = 8 \mu\text{C}$  e  $Q_B = 2 \mu\text{C}$  respectivamente. Determine um ponto onde o vetor campo elétrico resultante é nulo.

**Solução:**



O ponto  $P$ , onde o vetor campo resultante é nulo, está entre  $A$  e  $B$  e mais próximo de  $B$  (carga menor).

A carga  $Q_A$  produz, em  $P$ , um vetor campo de afastamento  $\vec{E}_A$ .

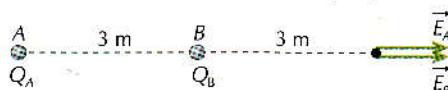
A carga  $Q_B$  produz, em  $P$ , um vetor campo de afastamento  $\vec{E}_B$ .

$\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_B$  devem ter mesma direção, sentidos opostos e mesma intensidade:

$$E_A = E_B \Rightarrow k_0 \cdot \frac{|Q_A|}{x^2} = k_0 \cdot \frac{|Q_B|}{(3-x)^2} \Rightarrow \frac{8}{x^2} = \frac{2}{(3-x)^2} \Rightarrow \frac{4}{x^2} = \frac{1}{(3-x)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x^2 - 8x + 12 = 0 \Rightarrow x = 2 \text{ m} \quad \text{ou} \quad x = 6 \text{ m}$$

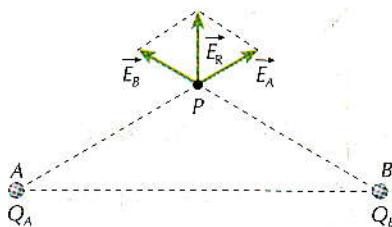
A resposta  $x = 6 \text{ m}$  é inadequada. A 6 m do ponto  $A$ , embora os vetores  $\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_B$  tenham mesma intensidade, têm também mesmo sentido.



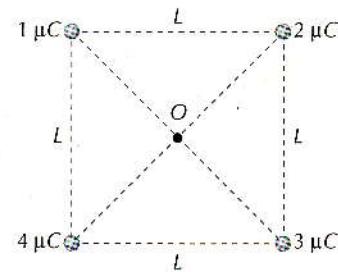
**Resposta:** ponto  $P$  a 2 m de  $A$

**Observação:**

Observe que fora da reta  $\overleftrightarrow{AB}$  não existem pontos onde o vetor campo elétrico é nulo; em  $P$ , o vetor campo resultante é  $\vec{E}_R \neq \vec{0}$ .

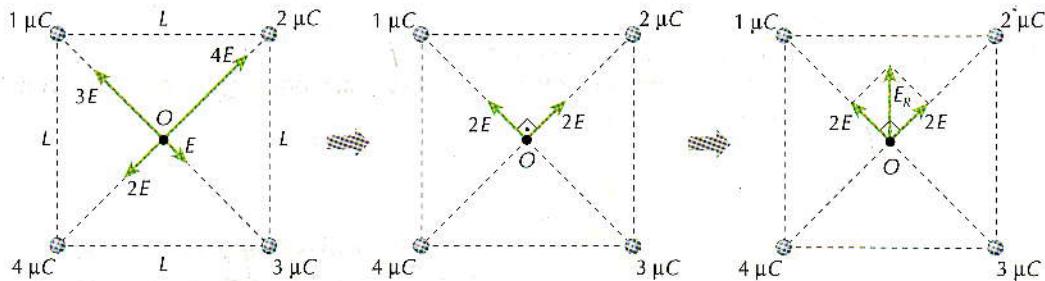


- R.19** Nos vértices de um quadrado fixam-se cargas elétricas puntiformes de valores  $1\ \mu\text{C}$ ,  $2\ \mu\text{C}$ ,  $3\ \mu\text{C}$  e  $4\ \mu\text{C}$ , conforme a figura. Qual a intensidade do vetor campo elétrico resultante no centro  $O$  do quadrado? O meio é o vácuo e o quadrado tem lado  $L = 0,6\ \text{m}$ . É dado  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ .



**Solução:**

As cargas elétricas são positivas e originam no centro  $O$  vetores campo de afastamento. Chamando de  $E$  a intensidade do vetor campo elétrico que a carga de  $1\ \mu\text{C}$  origina no centro  $O$ , as cargas elétricas de  $2\ \mu\text{C}$ ,  $3\ \mu\text{C}$  e  $4\ \mu\text{C}$  originam em  $O$  vetores campo elétrico de intensidades  $2E$ ,  $3E$  e  $4E$ , respectivamente. Assim, temos:



O vetor campo elétrico resultante em  $O$  tem intensidade  $E_R = 2\sqrt{2} \cdot E$ .

Sendo  $E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$ , em que:

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

$$Q = 1\ \mu\text{C} = 10^{-6}\ \text{C}$$

$$d = \frac{L\sqrt{2}}{2} = \frac{0,6\sqrt{2}}{2} \Rightarrow d = 0,3\sqrt{2}\ \text{m} \quad (\text{metade da medida da diagonal})$$

temos:

$$E = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0,3\sqrt{2})^2} \Rightarrow E = 5 \cdot 10^4\ \text{N/C}$$

$$\text{Portanto: } E_R = 2\sqrt{2} \cdot E \Rightarrow E_R = 2\sqrt{2} \cdot 5 \cdot 10^4 \Rightarrow E_R = \sqrt{2} \cdot 10^5 \Rightarrow E_R = 1,4 \cdot 10^5\ \text{N/C}$$

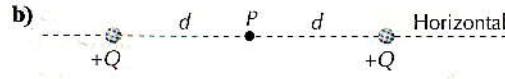
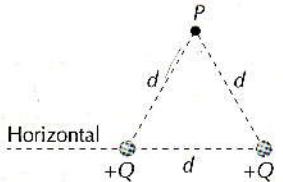
**Resposta:**  $\approx 1,4 \cdot 10^5\ \text{N/C}$



## Exercícios propostos

- P.26** Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico resultante em  $P$  nos casos **a** e **b** indicados. Admita em cada caso que  $Q = 10^{-6}\ \text{C}$  e  $d = 0,3\ \text{m}$ . O meio é o vácuo, cuja constante eletrostática é  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ .

**a)**

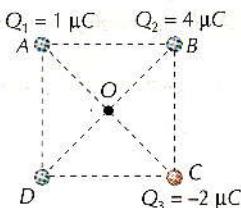


- P.27** Nos pontos  $A$  e  $B$  separados pela distância  $AB = 3\ \text{m}$ , fixam-se cargas elétricas puntiformes  $Q_A = 8\ \mu\text{C}$  e  $Q_B = -2\ \mu\text{C}$ , respectivamente. Determine um ponto onde o vetor campo elétrico resultante é nulo.



- P.28** Em três vértices,  $A$ ,  $B$  e  $C$ , de um quadrado de lado igual a  $\sqrt{2}$  m colocam-se cargas elétricas puntiformes, conforme a figura ao lado. Sendo o meio o vácuo, determine a intensidade do vetor campo elétrico resultante no centro do quadrado. É possível colocar uma carga elétrica puntiforme em  $D$ , de modo que o vetor campo elétrico resultante no ponto  $O$  seja nulo?

$$\text{Adote } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}.$$

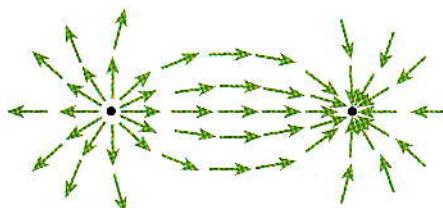


- P.29** Nos vértices de um hexágono regular fixam-se cargas elétricas puntiformes de valores  $1 \mu\text{C}$ ,  $2 \mu\text{C}$ ,  $3 \mu\text{C}$ ,  $4 \mu\text{C}$ ,  $5 \mu\text{C}$  e  $6 \mu\text{C}$ , nessa ordem. Qual a intensidade do vetor campo elétrico no centro do hexágono? O meio é o vácuo e o hexágono tem lado  $L = 30 \text{ cm}$ . É dado  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ .

## 4. Linhas de força

A cada ponto de um campo elétrico associa-se um vetor  $\vec{E}$ .

A representação gráfica de um campo elétrico é feita desenhando-se um número conveniente de vetores  $\vec{E}$ , conforme indicado na figura 15.



**Figura 15.** Vetores campo produzidos por duas cargas puntiformes de sinal oposto.

Outra maneira de representar graficamente um campo elétrico consiste em utilizar as **linhas de força**.

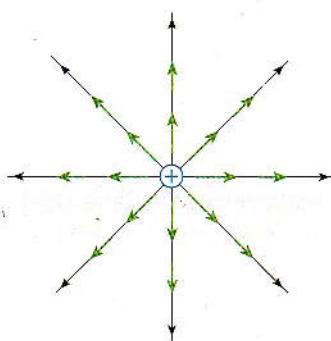
Linhos de força são linhas tangentes ao vetor campo elétrico em cada um dos seus pontos. Elas são orientadas no sentido do vetor campo.



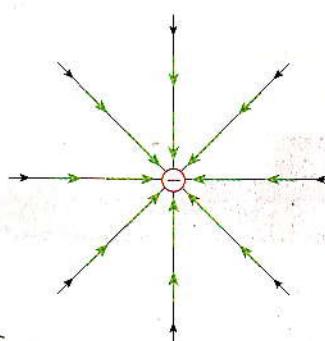
**Figura 16.** (a) A cada ponto do campo associa-se um vetor  $\vec{E}$ ; (b) a linha de força é tangente ao vetor campo elétrico em cada um de seus pontos.

O desenho das linhas de força numa determinada região nos dá idéia de como variam, aproximadamente, a direção e o sentido do vetor  $\vec{E}$  na região considerada.

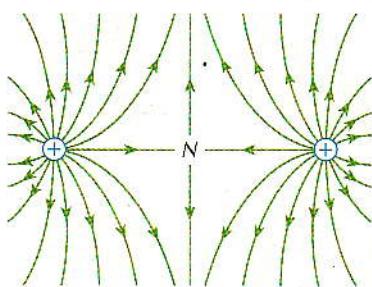
As figuras a seguir mostram linhas de força de alguns campos elétricos particulares:



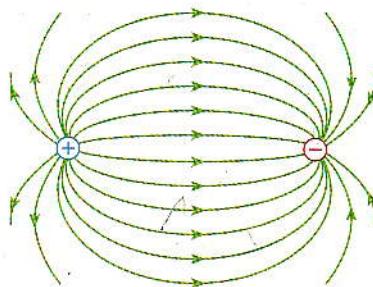
**Figura 17.** Carga puntiforme  $Q > 0$ . As linhas de força partem das cargas positivas.



**Figura 18.** Carga puntiforme  $Q < 0$ . As linhas de força chegam nas cargas negativas.



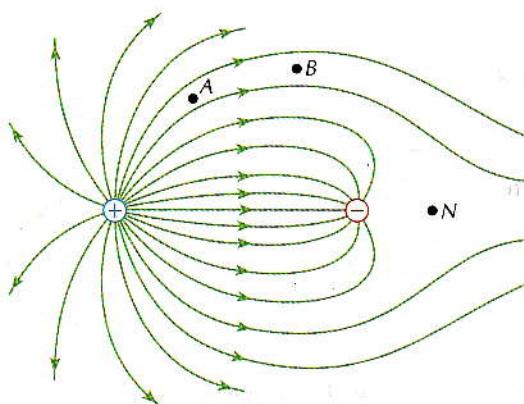
**Figura 19.** Duas cargas puntiformes de mesmo módulo e positivas. Em  $N$ , o vetor campo elétrico é nulo.



**Figura 20.** Duas cargas puntiformes de mesmo módulo e de sinal opostos.

Quando tivermos duas cargas puntiformes de sinais opostos e módulos diferentes, da carga de maior módulo parte (se a carga for positiva) ou chega (se a carga for negativa) um número maior de linhas de força. Como exemplo disso, observemos na figura 21 que a carga positiva é a que possui maior módulo.

Nas regiões em que as linhas estão mais próximas, ou seja, a concentração de linhas de força é maior, o campo é mais intenso. Assim, no ponto A o vetor campo elétrico é mais intenso do que em B. Já em N, o vetor campo elétrico é nulo.



**Figura 21.** Duas cargas puntiformes de sinal oposto e módulos diferentes.

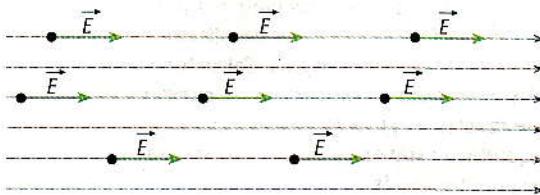
### Entre na rede

No endereço eletrônico <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/campoeletrico/campoeletrico.htm> (acesso em 29/6/2007), você pode visualizar as linhas de força do campo elétrico originado por duas cargas elétricas, variando-se o sinal e o valor de uma das cargas.

## 5. Campo elétrico uniforme

**Campo elétrico uniforme** é aquele em que o vetor  $\vec{E}$  é o mesmo em todos os pontos. Assim, em cada ponto do campo, o vetor  $\vec{E}$  tem a mesma intensidade, a mesma direção e o mesmo sentido.

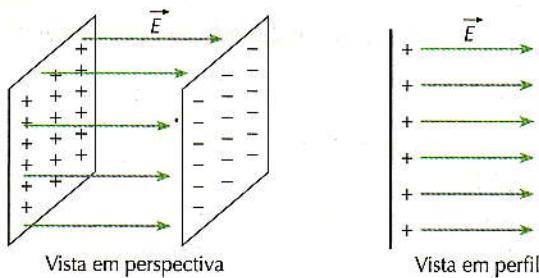
As linhas de força de um campo elétrico uniforme são retas paralelas igualmente espaçadas e todas com o mesmo sentido (figura 22).



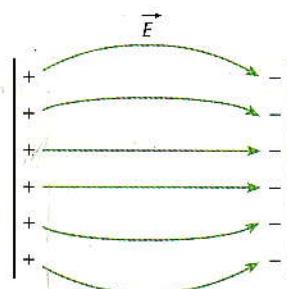
**Figura 22.** Linhas de força de um campo uniforme.

Tem-se um campo elétrico praticamente uniforme entre duas placas eletrizadas com cargas elétricas de sinal oposto (figura 23). Para que isso ocorra, a distância entre as placas deve ser muito pequena, quando comparada com suas dimensões.

Quando a distância entre as placas não for desprezível, quando comparada com suas dimensões, o campo elétrico é praticamente uniforme na região central entre as placas e não é uniforme próximo às bordas. Este efeito é conhecido como **efeito de borda** (figura 24).



**Figura 23.** Campo elétrico uniforme entre duas placas eletrizadas.



**Figura 24.** O campo elétrico é uniforme na região central entre as placas.

## Exercícios resolvidos

R.20

Uma carga elétrica puntiforme  $q = 1 \mu\text{C}$  e de massa  $m = 10^{-6} \text{ kg}$  é abandonada, em repouso, num ponto  $A$  de um campo elétrico uniforme de intensidade  $E = 10^5 \text{ N/C}$ , conforme a figura.

Determine:

- a intensidade da força elétrica que atua em  $q$ ;
  - a aceleração do movimento de  $q$ ;
  - a velocidade que  $q$  possui ao passar por  $B$ , situado a 0,2 m de  $A$ .
- Despreze as ações gravitacionais.

**Solução:**

- a) Sendo  $q > 0$  resulta que  $\vec{F}_e$  tem mesmo sentido que  $\vec{E}$ . A intensidade da força elétrica em  $q$  é dada por:

$$F_e = |q| \cdot E$$

Sendo  $q = 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$  e  $E = 10^5 \text{ N/C}$ , temos:

$$F_e = 10^{-6} \cdot 10^5 \Rightarrow F_e = 10^{-1} \text{ N}$$

- b) Pela equação fundamental da Dinâmica,  $F_e = ma$ , sendo  $F_e = 10^{-1} \text{ N}$  e  $m = 10^{-6} \text{ kg}$ , temos:

$$10^{-1} = 10^{-6} \cdot a \Rightarrow a = 10^5 \text{ m/s}^2$$

Observe que, sendo o campo uniforme ( $\vec{E}$  é constante), resulta que  $\vec{F}_e$  é constante. Portanto, a partícula abandonada em repouso executa movimento retílineo uniformemente variado e, no caso, acelerado. Se a partícula fosse lançada na direção do campo, mas em sentido contrário, o movimento inicial seria retílineo, uniformemente variado e retardado.

- c) Sendo o movimento uniformemente variado, podemos aplicar a equação de Torricelli:

$$v_B^2 = v_A^2 + 2a\Delta s \Rightarrow v_B^2 = 0 + 2 \cdot 10^5 \cdot 0,2 \Rightarrow v_B = 2 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

**Resposta:** a)  $10^{-1} \text{ N}$ ; b)  $10^5 \text{ m/s}^2$ ; c)  $2 \cdot 10^2 \text{ m/s}$

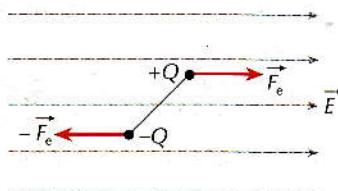
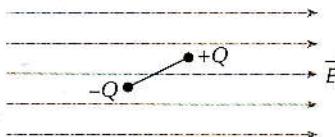
R.21

Considere um sistema constituído por duas cargas elétricas puntiformes de mesmo valor absoluto e de sinais opostos, situadas nos extremos de uma pequena haste isolante e rígida. Tal sistema constitui um **dipolo elétrico**. O dipolo é colocado num campo elétrico uniforme, conforme mostra a figura ao lado.

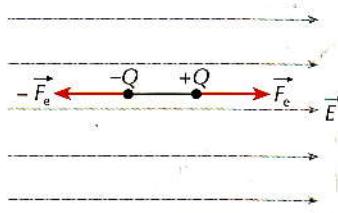
Como seria a posição de equilíbrio estável do dipolo no interior do campo? Despreze ações gravitacionais.

**Solução:**

Sobre as cargas elétricas puntiformes  $+Q$  e  $-Q$  o campo elétrico exerce forças, respectivamente, no mesmo sentido e em sentido oposto ao de  $\vec{E}$ .



Sob a ação desse sistema de forças, o dipolo tende a se orientar na **direção do vetor campo elétrico  $\vec{E}$** , com a carga elétrica positiva  $+Q$  no sentido de  $\vec{E}$ .



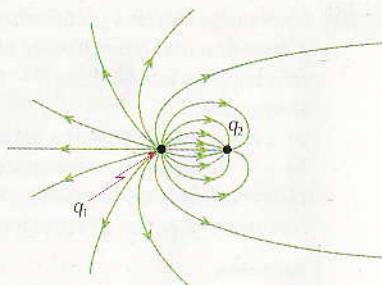
Essa é a posição de equilíbrio estável. Note que, girando ligeiramente o dipolo, ele tende a retornar à posição de equilíbrio.



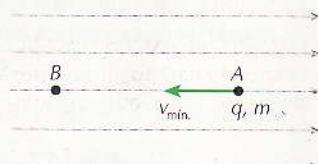
## Exercícios propostos

- P.30** (Unicamp-SP) A figura mostra as linhas de força do campo eletrostático criado por um sistema de duas cargas puntiformes  $q_1$  e  $q_2$ .

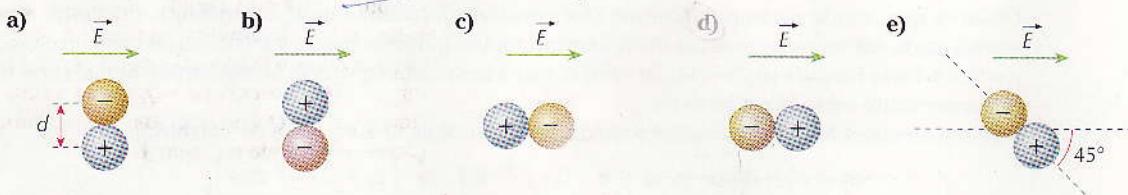
- Nas proximidades de que carga o campo eletrostático é mais intenso? Por quê?
- Qual é o sinal do produto  $q_1 \cdot q_2$ ?



- P.31** Qual a mínima velocidade com que uma carga  $q = 0,1 \mu\text{C}$  de massa  $m = 10^{-7} \text{ kg}$  deve ser lançada de um ponto  $A$ , na direção e sentido contrário às linhas de força de um campo elétrico uniforme de intensidade  $E = 10^5 \text{ N/C}$ , para que atinja  $B$ , situado a  $0,2 \text{ m}$  de  $A$ ? Despreze as ações gravitacionais.

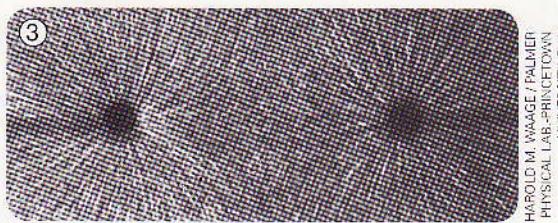
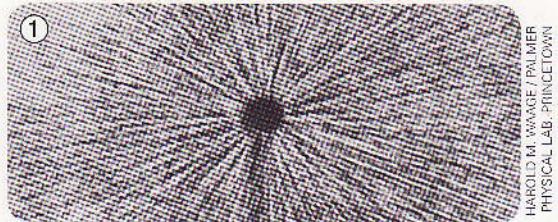


- P.32** (Unicamp-SP) Uma molécula diatômica tem átomos com carga  $+q$  e  $-q$ . A distância entre os centros dos átomos é  $d$ . A molécula está numa região onde existe um campo elétrico uniforme  $\vec{E}$ . Descubra em qual das seguintes posições a molécula estará em equilíbrio estável. Justifique.



### As fotos das linhas de força

Nas fotos, apresentamos as linhas de força dos campos elétricos originados por uma carga elétrica puntiforme isolada (1), por duas cargas puntiformes de mesmo módulo e sinais contrários (2), por duas cargas puntiformes de mesmo módulo e de mesmo sinal (3), e por duas placas eletrizadas (4). Observe que na região central entre as placas o campo elétrico é praticamente uniforme.



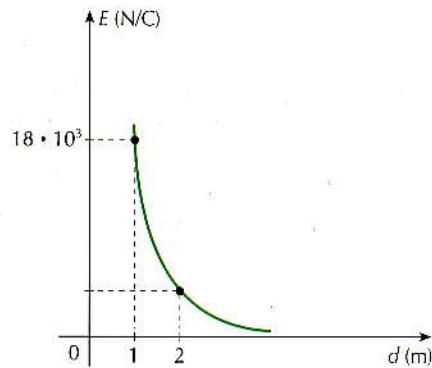
As fotos foram obtidas com fiapos de tecidos suspensos em óleo. Em cada foto, nas extremidades dos fiapos, surgem cargas elétricas de sinais opostos devido à ação da carga ou das cargas que originam o campo elétrico. Cada fiapo torna-se um dipolo e se orienta na direção do vetor campo elétrico (ver exercício resolvido R.21). Desse modo, as linhas definidas pelos fiapos são as linhas de força.

## Exercícios propostos de recapitulação

- P.33** (Efoa-MG) Uma partícula de carga elétrica  $q = 3 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ , colocada num ponto  $P$  localizado a 3 m de uma carga  $Q$ , no vácuo, sofre a ação de uma força de módulo  $F_e = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ . Sendo a constante eletrostática do vácuo  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ , responda:

- Qual o módulo do campo elétrico em  $P$ ?
- Admitindo-se que esse campo elétrico se deve exclusivamente a  $Q$ , qual o valor de  $Q$ ?

- P.34** O gráfico abaixo representa a variação da intensidade do campo gerado por uma carga  $Q$  puntiforme, positiva, em função da distância à carga.

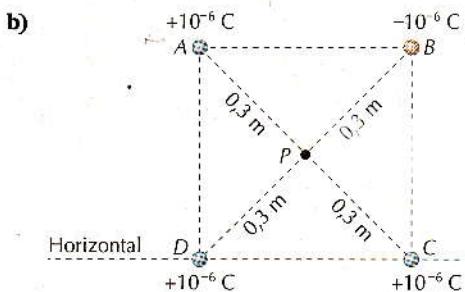
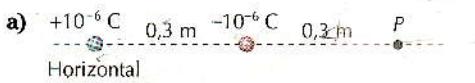


Admitindo-se que o meio seja o vácuo

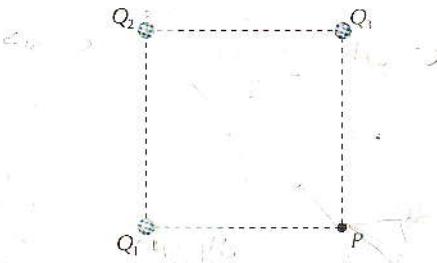
$$\left( k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right), \text{ determine:}$$

- o valor da carga  $Q$ ;
- a intensidade da força elétrica que atua em  $q = -10^{-5} \text{ C}$ , colocada a 2 m de  $Q$ ;
- a intensidade da força elétrica que atua em  $q = 10^{-5} \text{ C}$ , colocada a 1 m de  $Q$ .

- P.35** Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico resultante em  $P$  nos casos **a** e **b** indicados. O meio é o vácuo  $\left( k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right)$ .



- P.36** A figura mostra três cargas elétricas puntiformes  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$  localizadas nos vértices de um quadrado. Sendo  $Q_1 = Q_3 = 4,0 \mu\text{C}$ , calcule  $Q_2$  para que o vetor campo elétrico resultante no ponto  $P$  seja nulo.



- P.37** (Fuvest-SP) Uma pequena esfera, com carga elétrica positiva  $Q = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ , está a uma altura  $D = 0,05 \text{ m}$  acima da superfície de uma grande placa condutora, ligada à Terra, induzindo sobre essa superfície cargas negativas, como na figura I. O conjunto dessas cargas estabelece um campo elétrico que é idêntico, apenas na parte do espaço acima da placa, ao campo gerado por uma carga  $+Q$  e uma carga  $-Q$ , como se fosse uma "imagem" de  $Q$  que estivesse colocada na posição representada na figura II.

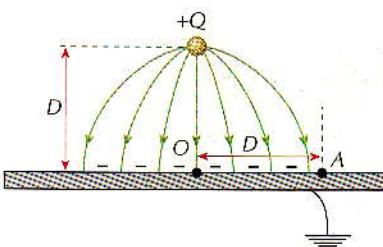


Figura I

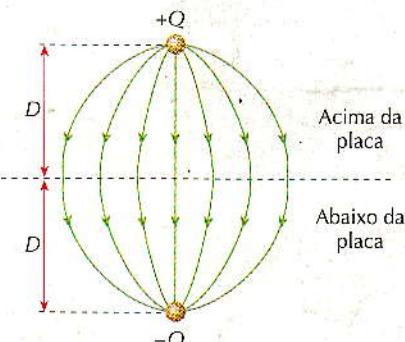
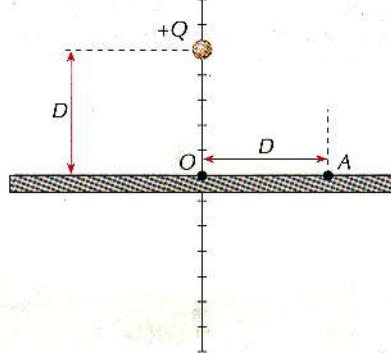


Figura II

- Determine a intensidade da força  $F$ , em N, que age sobre a carga  $+Q$ , devida às cargas induzidas na placa.
- Determine a intensidade do campo elétrico  $E_0$ , em V/m, que as cargas negativas induzidas na placa criam no ponto onde se encontra a carga  $+Q$ .

- c) Represente, no diagrama abaixo, no ponto A, os vetores campo elétrico  $\vec{E}_+$  e  $\vec{E}_-$ , causados, respectivamente, pela carga  $+Q$  e pelas cargas induzidas na placa, bem como o campo resultante  $\vec{E}_A$ . O ponto A está a uma distância  $D$  do ponto O da figura e muito próximo à placa, mas acima dela.



- d) Determine a intensidade do campo elétrico resultante  $\vec{E}_A$ , em V/m, no ponto A.

Note e adote:

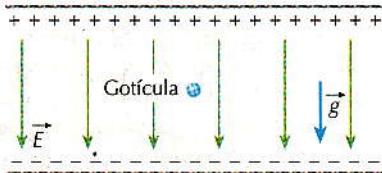
$$F = \frac{k \cdot Q_1 \cdot Q_2}{r^2}; E = \frac{k \cdot Q}{r^2},$$

onde  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ;  $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$

- P.38** Uma pequena esfera de peso  $P = 10^{-4} \text{ N}$  e carga negativa está em equilíbrio num campo elétrico uniforme de intensidade  $10^5 \text{ N/C}$ . Estando sujeita somente às forças dos campos elétrico e gravitacional, supostos também uniformes, determine:  
a) a direção e o sentido das linhas de força do campo elétrico;  
b) o valor da carga elétrica;  
c) o tipo de equilíbrio que a carga possui: estável, instável ou indiferente.

- P.39** (UFJF-MG) Existe um campo elétrico uniforme no espaço compreendido entre duas placas metálicas eletrizadas com cargas elétricas de sinais opostos.

Considere então o campo elétrico uniforme  $\vec{E}$  vertical, gerado pelas placas metálicas horizontais eletrizadas, conforme indica a figura. Uma gotícula de óleo de massa  $m$  e carga elétrica negativa  $-q$  é colocada entre as placas. Seja  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade local.



- a) Desenhe o diagrama de forças para a gotícula, desprezando empuxo e resistência do ar.  
b) Qual a condição necessária para que a carga permaneça em repouso? Nessa situação, encontre o valor da carga  $q$  em função das outras grandezas dadas no problema.

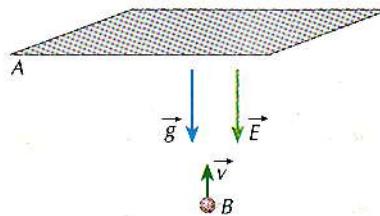
- P.40** Entre duas placas horizontais eletrizadas com cargas de sinais opostos, observa-se que uma pequena esfera eletrizada encontra-se em equilíbrio sob ação de seu peso e da força elétrica. Invertendo-se os sinais das cargas elétricas das placas, a pequena esfera entra em movimento. Calcule a aceleração desse movimento.

(É dado  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .)

- P.41** (Unicamp-SP) Um elétron é acelerado, a partir do repouso, ao longo de  $8,8 \text{ mm}$ , por um campo elétrico uniforme de intensidade  $1,0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ . Sabendo-se que a razão carga/massa do elétron vale, em valor absoluto,  $1,76 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ , calcule:

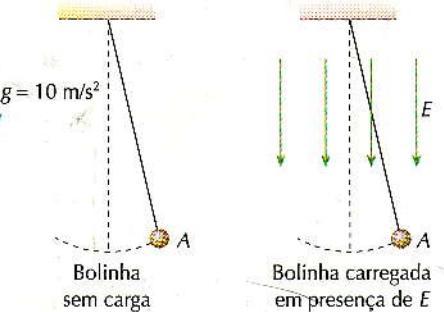
- a) a aceleração do elétron;  
b) a velocidade final do elétron.

- P.42** (UFBA) A figura representa uma placa condutora A, eletricamente carregada, que gera um campo elétrico uniforme  $\vec{E}$ , de módulo igual a  $7 \cdot 10^4 \text{ N/C}$ . A bolinha B, de  $10 \text{ g}$  de massa e carga negativa igual a  $-1 \mu\text{C}$ , é lançada verticalmente para cima, com velocidade de módulo igual a  $6 \text{ m/s}$ . Considerando que o módulo da aceleração da gravidade local vale  $10 \text{ m/s}^2$ , que não há colisão entre a bolinha e a placa e desprezando a resistência do ar, determine o tempo, em segundos, necessário para a bolinha retornar ao ponto de lançamento.



- P.43** (Fuvest-SP) Um certo relógio de pêndulo consiste em uma pequena bola, de massa  $M = 0,1 \text{ kg}$ , que oscila presa a um fio. O intervalo de tempo que a bolinha leva para, partindo da posição A, retornar a essa mesma posição é seu período  $T_0$ , que é igual a  $2 \text{ s}$ . Nesse relógio, o ponteiro dos minutos completa uma volta (1 hora) a cada  $1.800$  oscilações completas do pêndulo.

Estando o relógio em uma região em que atua um campo elétrico  $E$ , constante e homogêneo, e a bola carregada com carga elétrica  $Q$ , seu período será alterado, passando a  $T_Q$ .



Considere a situação em que a bolinha esteja carregada com carga  $Q = 3 \times 10^{-5}$  C, em presença de um campo elétrico cujo módulo  $E = 1 \times 10^5$  V/m. Então, determine:

- a intensidade da força efetiva  $F_e$ , em N, que age sobre a bola carregada;
- a razão  $R = \frac{T_0}{T_1}$  entre os períodos do pêndulo, quando a bola está carregada e quando não tem carga;
- a hora que o relógio estará indicando, quando forem de fato três horas da tarde, para a situação em que o campo elétrico tiver passado a atuar a partir do meio-dia.

Note e adote:

Nas condições do problema, o período  $T$  do pêndulo pode ser expresso por:

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{\text{massa} \times \text{comprimento do pêndulo}}{F_e}}$$

em que  $F_e$  é a força vertical efetiva que age sobre a massa, sem considerar a tensão do fio.

## Testes propostos

**T.35**

(PUC-SP) Uma carga de prova negativa  $q$  é colocada num ponto  $A$ , onde há um campo elétrico  $\vec{E}$  gerado por uma carga  $Q$  positiva, ficando, então, sujeita a uma força  $\vec{F}_e$  de intensidade 10 N. Sendo  $q = -50$  mC, identifique a opção que fornece o valor correto da intensidade do vetor campo elétrico em  $A$ , bem como as orientações corretas dos vetores  $\vec{E}$  e  $\vec{F}_e$ .

- a)  $2,0 \cdot 10^{-1}$  N/C
  - b)  $2,0 \cdot 10^2$  N/C
  - c)  $2,0 \cdot 10^5$  N/C
  - d)  $2,0 \cdot 10^2$  N/C
  - e)  $2,0 \cdot 10$  N/C
- 

**T.36**

(UFSM-RS) Uma partícula com carga de  $8 \cdot 10^{-7}$  C exerce uma força elétrica de módulo  $1,6 \cdot 10^{-2}$  N sobre outra partícula com carga de  $2 \cdot 10^{-7}$  C. A intensidade do campo elétrico no ponto onde se encontra a segunda partícula é, em N/C:

- a)  $3,2 \cdot 10^{-9}$
- b)  $1,28 \cdot 10^{-8}$
- c)  $1,6 \cdot 10^4$
- d)  $2 \cdot 10^4$

**T.37**

(UEL-PR) Considere duas cargas puntiformes  $Q_1 = 3 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = 12 \mu\text{C}$ , fixas e isoladas de outras cargas, nas posições indicadas na figura abaixo.



O módulo do vetor campo elétrico é nulo no ponto:

- a) I
- b) II
- c) III
- d) IV
- e) V

**T.38**

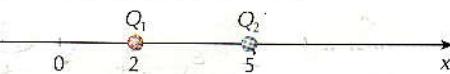
(Mackenzie-SP) Duas cargas elétricas puntiformes  $Q_A = +2,0 \mu\text{C}$  e  $Q_B = -5,0 \mu\text{C}$  encontram-se no vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ ) a uma distância de

10 cm uma da outra. No ponto médio do segmento  $\overline{AB}$ , o vetor campo elétrico, relativo às cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ :

- a) tem intensidade  $9,0 \cdot 10^6$  N/C e sentido de  $A$  para  $B$ .
- b) tem intensidade  $9,0 \cdot 10^6$  N/C e sentido de  $B$  para  $A$ .
- c) tem intensidade  $2,52 \cdot 10^7$  N/C e sentido de  $A$  para  $B$ .
- d) tem intensidade  $2,52 \cdot 10^7$  N/C e sentido de  $B$  para  $A$ .
- e) tem intensidade  $1,08 \cdot 10^7$  N/C e sentido de  $A$  para  $B$ .

**T.39**

(PUC-Campinas-SP) Sobre o eixo  $x$  são fixadas duas cargas puntiformes  $Q_1 = -2 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = 8 \mu\text{C}$ , nos pontos de abscissas 2 e 5, respectivamente, como representado no esquema.



O vetor campo elétrico, resultante da ação dessas duas cargas, tem intensidade nula no ponto de abscissa:

- a) 8
- b) 6
- c) 3
- d) 1
- e) -1

**T.40**

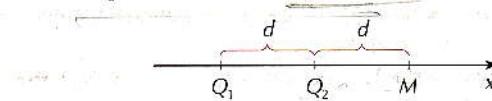
(PUC-Campinas-SP) Duas cargas elétricas puntiformes  $Q_1 = 40 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = -60 \mu\text{C}$  estão fixas, separadas 10 cm, no vácuo. No ponto  $P$ , a 10 cm de  $Q_2$ , conforme mostra a figura abaixo, o módulo do vetor campo elétrico, em N/C, vale:

- a) zero
- b)  $9,0 \cdot 10^6$
- c)  $45 \cdot 10^6$
- d)  $54 \cdot 10^6$
- e)  $63 \cdot 10^6$



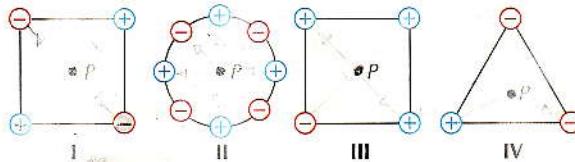
$$\left( \text{Dados: } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right)$$

- T.41** (Fatec-SP) Duas cargas pontuais  $Q_1$  e  $Q_2$  são fixadas sobre a reta  $x$  representada na figura. Uma terceira carga pontual  $Q_3$  será fixada sobre a mesma reta, de modo que o campo elétrico resultante no ponto  $M$  da reta será nulo.



- Conhecendo-se os valores das cargas  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ , respectivamente  $+4,0 \mu\text{C}$ ,  $-4,0 \mu\text{C}$  e  $+4,0 \mu\text{C}$ , é correto afirmar que a carga  $Q_3$  deverá ser fixada:
- à direita de  $M$  e distante  $3d$  desse ponto.
  - à esquerda de  $M$  e distante  $3d$  desse ponto.
  - à esquerda de  $M$  e distante  $2\sqrt{3} \cdot d$  desse ponto.
  - à esquerda de  $M$  e distante  $\frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot d$  desse ponto.
  - à direita de  $M$  e distante  $\frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot d$  desse ponto.

- T.42** (Efoa-MG) Elétrons e prótons são distribuídos simetricamente em torno de um ponto  $P$  nas configurações indicadas nas figuras abaixo.



- É correto afirmar que o vetor campo elétrico resultante, no ponto  $P$ , é nulo nas figuras:
- II e III
  - I e III
  - I e II
  - III e IV
  - II e IV

- T.43** (Mackenzie-SP) Em cada um dos pontos de coordenadas  $(d, 0)$  e  $(0, d)$  do plano cartesiano, coloca-se uma carga elétrica puntiforme positiva  $Q$ , e em cada um dos pontos de coordenadas  $(-d, 0)$  e  $(0, -d)$  coloca-se uma carga puntiforme  $-Q$ . Estando essas cargas no vácuo (constante dielétrica  $k_0$ ), a intensidade do vetor campo elétrico na origem do sistema cartesiano será igual a:

- $2\sqrt{2} \cdot \frac{k_0 Q}{d^2}$
- $(2 + \sqrt{2}) \cdot \frac{k_0 Q}{d^2}$
- $(2 - \sqrt{2}) \cdot \frac{k_0 Q}{d^2}$
- $\sqrt{2} \cdot \frac{k_0 Q}{d}$
- $\sqrt{5} \cdot \frac{k_0 Q}{d}$

- T.44** (Cesgranrio-RJ) Duas cargas elétricas pontuais, de mesmo valor e com sinais opostos, se encontram em dois dos vértices de um triângulo equilátero. No ponto médio entre esses dois vértices, o módulo do campo elétrico resultante devido às duas cargas vale  $E$ . Qual o valor do módulo do campo elétrico no terceiro vértice do triângulo?

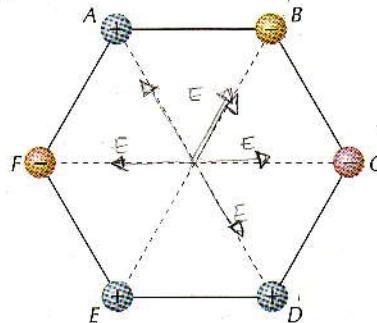
- $\frac{E}{2}$
- $\frac{E}{3}$
- $\frac{E}{4}$
- $\frac{E}{6}$
- $\frac{E}{8}$

- T.45** (Cesgranrio-RJ) Quatro partículas carregadas estão fixas nos vértices de um quadrado. As cargas das partículas têm o mesmo módulo  $q$ , mas os seus sinais se alternam conforme é mostrado na figura. Identifique a opção que melhor representa o vetor campo elétrico no ponto  $M$  assinalado na figura.



- $\vec{E}$  vertical para cima em  $M$
- $\vec{E}$  horizontal para a direita em  $M$
- $\vec{E} = \vec{0}$  em  $M$
- $\vec{E}$  horizontal para a esquerda em  $M$

- T.46** (PUC-SP) Seis cargas elétricas puntiformes se encontram no vácuo fixas nos vértices de um hexágono regular de lado  $\ell$ . As cargas têm mesmo módulo,  $|Q|$ , e seus sinais estão indicados na figura.



Dados:

constante eletrostática do vácuo =

$$= k_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

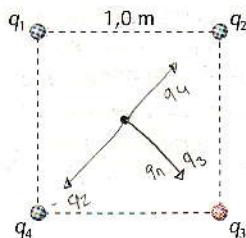
$$\ell = 3,0 \cdot 10^{-1} \text{ cm}$$

$$|Q| = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

No centro do hexágono, o módulo e o sentido do vetor campo elétrico resultante são, respectivamente:

- $5,0 \cdot 10^6 \text{ N/C}$ ; de  $E$  para  $B$
- $5,0 \cdot 10^6 \text{ N/C}$ ; de  $B$  para  $E$
- $5,0 \cdot 10^6 \text{ N/C}$ ; de  $A$  para  $D$
- $1,0 \cdot 10^7 \text{ N/C}$ ; de  $B$  para  $E$
- $1,0 \cdot 10^7 \text{ N/C}$ ; de  $E$  para  $B$

- T.47** (Ufac) Nos vértices de um quadrado de  $1,0 \text{ m}$  de lado são colocadas as cargas  $q_1 = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ ;  $q_2 = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ ;  $q_3 = -1,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$  e  $q_4 = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ , como mostra a figura.

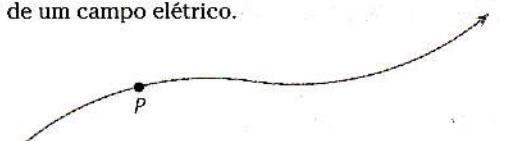


A intensidade do campo elétrico no centro do quadrado será:

- a)  $2,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$       d)  $16,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$   
 b)  $3,6 \cdot 10^3 \text{ N/C}$       e)  $32,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$   
 c)  $8,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$

$$\left( \text{Dado: } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right)$$

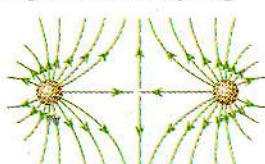
- T48** (PUC-MG) A figura representa uma linha de força de um campo elétrico.



A direção e sentido do vetor campo elétrico em P é:

- a)      c)      e)
- b)      d)

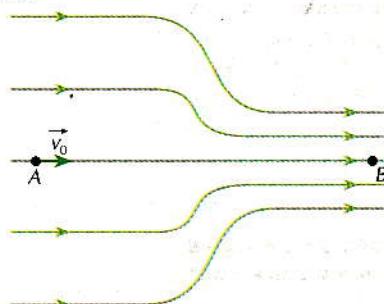
- T49** (UFMA) A figura representa, na convenção usual, a configuração de linhas de força associadas a duas cargas puntiformes  $Q_1$  e  $Q_2$ .



Podemos afirmar, corretamente, que:

- a)  $Q_1$  e  $Q_2$  são neutras.  
 b)  $Q_1$  e  $Q_2$  são cargas negativas.  
 c)  $Q_1$  é positiva e  $Q_2$  é negativa.  
 d)  $Q_1$  é negativa e  $Q_2$  é positiva.  
 e)  $Q_1$  e  $Q_2$  são cargas positivas.

- T50** (Mackenzie-SP) Uma carga pontual positiva é lançada com velocidade  $v_0$  no campo elétrico representado por suas linhas de força como mostra a figura.



Então:

- a) nos pontos A e B a carga possui acelerações iguais.  
 b) a aceleração da carga no ponto A é menor que no ponto B.  
 c) a aceleração da carga no ponto A é maior que no ponto B.  
 d) a velocidade da carga em A é maior que a velocidade em B.  
 e) a velocidade da carga é a mesma em A e em B.

**T51**

(Vunesp) Uma partícula de massa  $m$  e carga  $q$  é liberada, a partir do repouso, num campo elétrico uniforme de intensidade  $E$ . Supondo que a partícula esteja sujeita exclusivamente à ação do campo elétrico, a velocidade que atingirá  $t$  segundos depois de ter sido liberada será dada por:

- a)  $\frac{qEt}{m}$   
 b)  $\frac{mt}{qE}$   
 c)  $\frac{qmt}{E}$   
 d)  $\frac{Et}{qm}$   
 e)  $\frac{t}{qmE}$

**T52**

(Unaerp-SP) Um campo elétrico uniforme existe na região entre duas placas planas paralelas com cargas de sinais opostos. Um elétron de massa  $m = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  e carga  $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  é abandonado em repouso junto à superfície da placa carregada negativamente e atinge a superfície da placa oposta, a 12 cm de distância da primeira, em um intervalo de tempo de  $3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ . Determine a intensidade do campo elétrico e a velocidade do elétron no momento em que atinge a segunda placa. Identifique a opção correta.

- a)  $E = 15 \text{ N/C}; v = 8 \cdot 10^5 \text{ m/s}$   
 b)  $E = 200 \text{ N/C}; v = 4 \text{ km/h}$   
 c)  $E = 100 \text{ N/C}; v = 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$   
 d)  $E = 10^6 \text{ N/C}; v = 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$   
 e)  $E = 5 \text{ N/C}; v = 8 \cdot 10^5 \text{ m/s}$

**T53**

(UFJF-MG) Uma gotícula de óleo, de massa  $m = 9,6 \cdot 10^{-15} \text{ kg}$  e carregada com carga elétrica  $q = -3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , cai verticalmente no vácuo. Num certo instante, liga-se nessa região um campo elétrico uniforme, vertical e apontando para baixo. O módulo desse campo elétrico é ajustado até que a gotícula passe a cair com movimento retilíneo e uniforme. Nessa situação, qual o valor do módulo do campo elétrico?

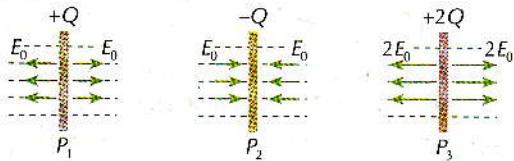
- a)  $3,0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$   
 b)  $2,0 \cdot 10^7 \text{ N/C}$   
 c)  $5,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$   
 d)  $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ N/C}$

(Dado:  $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

- T.54** (Inatel-MG) Uma pequena esfera de carga conhecida  $q$  e massa desconhecida  $m$ , inicialmente em repouso, cai de uma altura  $h$  na presença de um campo elétrico uniforme  $E$  dirigido verticalmente para baixo. A esfera chega ao solo com uma velocidade  $v = 2\sqrt{gh}$ . O valor da massa  $m$  da esfera em função de  $E$ ,  $q$  e  $g$  é expressa na forma:

- $\frac{qE}{g}$
- $\frac{gE}{q}$
- $\frac{E}{qg}$
- $\frac{qg}{E}$
- $\frac{q}{Eg}$

- T.55** (Fuvest-SP) Três grandes placas,  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , com, respectivamente, cargas  $+Q$ ,  $-Q$  e  $+2Q$ , geram campos elétricos uniformes em certas regiões do espaço. As figuras abaixo mostram, cada uma, intensidade, direção e sentido dos campos criados pelas respectivas placas  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , quando vistas de perfil.



Colocando-se as placas próximas, separadas pela distância  $D$  indicada, o campo elétrico resultante, gerado pelas três placas em conjunto, é representado por:

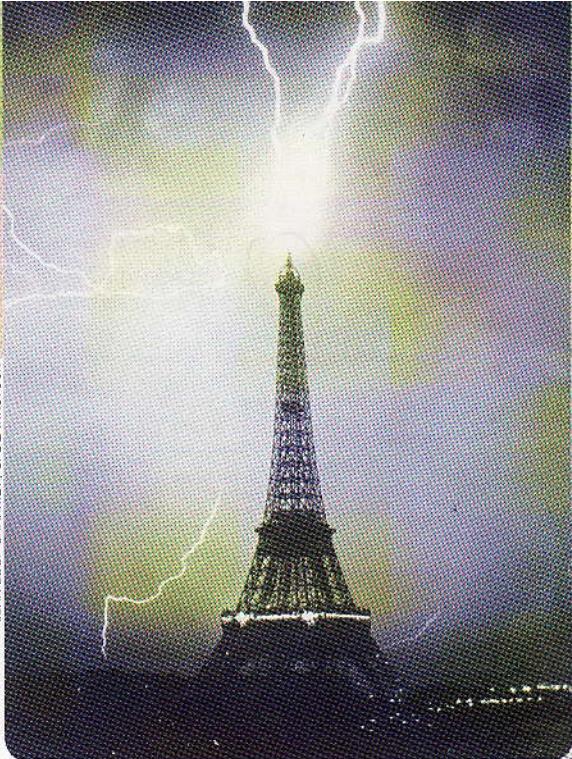
- 
- 
- 
- 
- 

Nota: onde não há indicação, o campo elétrico é nulo.

# Trabalho e potencial elétrico

1. TRABALHO DA FORÇA ELÉTRICA NUM CAMPO UNIFORME
2. TRABALHO DA FORÇA ELÉTRICA NUM CAMPO ELÉTRICO QUALQUER. DIFERENÇA DE POTENCIAL ELÉTRICO
3. POTENCIAL ELÉTRICO NUM PONTO DE UM CAMPO ELÉTRICO QUALQUER
4. POTENCIAL ELÉTRICO NO CAMPO DE UMA CARGA PUNTIFORME
5. POTENCIAL ELÉTRICO NO CAMPO DE VÁRIAS CARGAS
6. ENERGIA POTENCIAL ELÉTRICA
7. PROPRIEDADES DO POTENCIAL ELÉTRICO
8. SUPERFÍCIE EQÜIPOTENCIAL
9. DIFERENÇA DE POTENCIAL ENTRE DOIS PONTOS DE UM CAMPO ELÉTRICO UNIFORME

JEAN-LOUPI CLAINMET / SPL LATINSTOCK



Neste capítulo analisamos o trabalho da força elétrica e conceituamos diferença de potencial elétrico entre dois pontos de um campo elétrico. Mostramos que uma carga elétrica, ao ser colocada num ponto de um campo elétrico, adquire energia potencial elétrica. Em 1902, uma diferença de potencial provocou descargas na torre Eiffel, Paris, como vemos na foto.



## 1. Trabalho da força elétrica num campo uniforme

Considere um campo elétrico uniforme de intensidade  $E$ . Nesse campo, vamos supor que uma carga elétrica puntiforme  $q$  positiva, por exemplo, sofre um deslocamento do ponto  $A$  até o ponto  $B$ , ao longo de uma linha de força (figura 1).

A força elétrica  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ , que age em  $q$ , é constante, pois o campo é uniforme ( $\vec{E}$  constante). Seja  $d$  o módulo do deslocamento de  $A$  a  $B$  e  $F_e = qE$  a intensidade da força elétrica. Da definição de trabalho de uma força constante e paralela ao deslocamento, vem:

$$\begin{cases} \mathcal{Z}_{AB} = F_e d \\ F_e = qE \end{cases} \Rightarrow \boxed{\mathcal{Z}_{AB} = qEd}$$

Esse trabalho é positivo (trabalho motor), pois a força elétrica está a favor do deslocamento. Se  $q$  fosse levada de  $B$  até  $A$ , a força elétrica teria sentido contrário ao deslocamento e o trabalho seria negativo (trabalho resistente). Se  $q$  vai de  $A$  até  $B$ , passando por um ponto intermediário  $C$  (figura 2), para o cálculo do trabalho projetamos o deslocamento na direção da força. Sejam  $d_1$  a projeção de  $AC$  e  $d_2$  a projeção de  $CB$ . Daí:

$$\mathcal{Z}_{AB} = \mathcal{Z}_{AC} + \mathcal{Z}_{CB} = qEd_1 + qEd_2 \Rightarrow \mathcal{Z}_{AB} = qE \cdot (d_1 + d_2) \Rightarrow \boxed{\mathcal{Z}_{AB} = qEd}$$

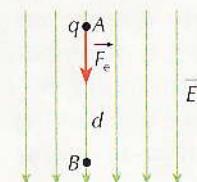


Figura 1.

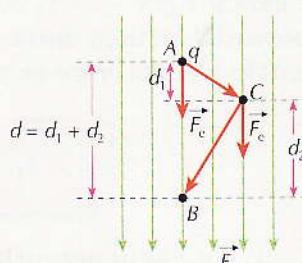


Figura 2.