

Eletrização. Força elétrica

Sabe-se que a matéria em seu estado fundamental é neutra. No entanto, existem processos a partir dos quais os corpos podem se tornar eletrizados. A eletrização é verificada por meio de eletroscópios. Quando eletrizados, os corpos adquirem carga elétrica e entre eles passa a atuar uma força que pode ser determinada a partir da lei de Coulomb.

1.1 Eletrização por atrito. Noção de carga elétrica

Na eletrização por atrito, os corpos se eletrizam com cargas de mesmo valor absoluto e de sinais opostos.

1.2 Princípios da Eletrostática

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

1.3 Outras formas de eletrização

Os corpos também podem ser eletrizados por contato ou por indução. Essa eletrização pode ser verificada com o uso dos eletroscópios.

1.4 Forças entre cargas elétricas puntiformes: lei de Coulomb

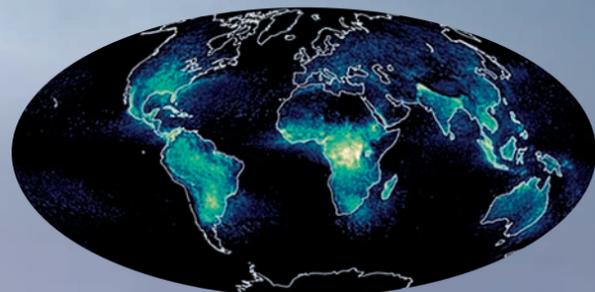
A lei de Coulomb descreve a força de ação mútua entre cargas elétricas puntiformes.

Eletrização das nuvens

As nuvens de tempestades apresentam-se, em geral, carregadas. Os processos de eletrização ocorrem no interior das nuvens que adquirem cargas elétricas de valores elevados. Como consequência, temos um dos fenômenos naturais mais misteriosos e violentos: os raios, acompanhados dos relâmpagos e dos trovões.

Incidência de raios no mundo

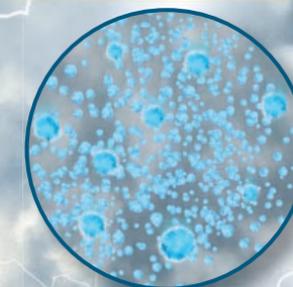
Anualmente 3,15 bilhões de raios atingem a Terra, resultando numa incidência de aproximadamente 100 raios por segundo. O Brasil é, de longe, o país onde mais caem raios, cerca 100 milhões por ano.



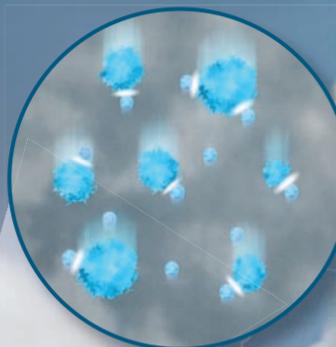
Frequência (Raios por km² por ano) 0 5 10 25 50 140

1 Em dias muito quentes, massas de ar quente, menos densas, sobem levando a umidade que, ao encontrar regiões mais frias, se condensa formando minúsculas gotas de água.

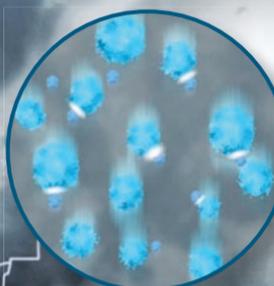
Fatores como a força de repulsão entre as cargas, a temperatura e a gravidade, fazem com que cargas de mesmo sinal se concentrem nas extremidades da nuvem.



4 Com o aumento de cargas nas nuvens, ocorre a ionização do ar, gerando uma descarga elétrica. Essas descargas ocorrem, na sua maioria, no interior da nuvem, mas podem ocorrer de uma nuvem para outra e da nuvem para a terra.



2 As massas de ar frio descem, formando uma corrente de convecção. Nessas correntes, as partículas de gelo presentes na nuvem colidem entre si, ocorrendo entre elas uma transferência de cargas elétricas. Dessa maneira, as partículas adquirem cargas elétricas de sinais opostos.



3 Sondas meteorológicas, verificaram que os cristais de gelo (menores), adquirem carga elétrica positiva, enquanto o granizo (maiores), adquirem carga negativa. Geralmente as cargas negativas se acumulam na base da nuvem.



Para pensar

1. Considere uma nuvem eletrizada com cargas elétricas negativas em sua parte inferior. Qual é o sinal da carga elétrica induzida no solo, durante a ocorrência de um raio?
2. Porque os para-raios são eficientes na proteção de descargas elétricas atmosféricas?

Objetivos

- ▶ Compreender o processo de eletrização por atrito.
- ▶ Explicar os fenômenos elétricos a partir da teoria atômica da matéria.

Termos e conceitos

- força nuclear
- corpos eletrizados
- corpos eletricamente neutros
- série triboelétrica

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 pedaço de lã for aproximado de uma das extremidades (fig. 1), o bastão será **atraído**. Se um segundo bastão de vidro for atritado com outro pedaço de lã e aproximado do bastão suspenso, este será **repelido** (fig. 2). Suspenda, finalmente, um dos pedaços de lã e aproxime o outro (fig. 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.

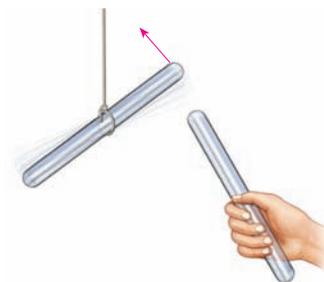


Figura 2. Os bastões de vidro se repelem.



Figura 3. Os pedaços de lã se repelem.

Os antigos gregos já haviam observado esse fenômeno ao atritarem o **âmbar*** com outros corpos. Como, em grego, **âmbar** significa *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.

Todos os corpos são formados de átomos. Cada átomo é constituído de partículas: 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** (fig. 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**.

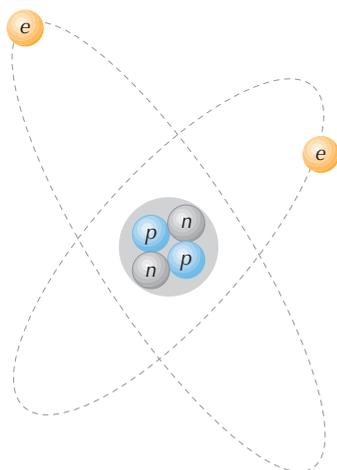


Figura 4. Modelo planetário do átomo.

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

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

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 pedaço 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 . Frequentemente, por facilidade, fala-se simplesmente carga elétrica Q ou q , em lugar de quantidade de carga elétrica Q ou q .

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

A série triboelétrica

As substâncias podem ser distribuídas numa sequência, de acordo com o sinal da carga que adquirem ao serem atritadas umas com as outras. Essa sequência 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 sequência 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.

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

** 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.



Objetivos

- ▶ Conhecer os princípios da Eletrostática.
- ▶ Caracterizar os materiais como condutores elétricos ou como isolantes elétricos.
- ▶ Saber o que ocorre quando se liga um condutor eletrizado à Terra.

Termos e conceitos

- dielétrico

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.

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 (figs. 5A e 5B). Entre o bastão de vidro, positivo, e o pano de lã, negativo, observamos atração (fig. 5C). Esses fatos experimentais permitem enunciar:

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

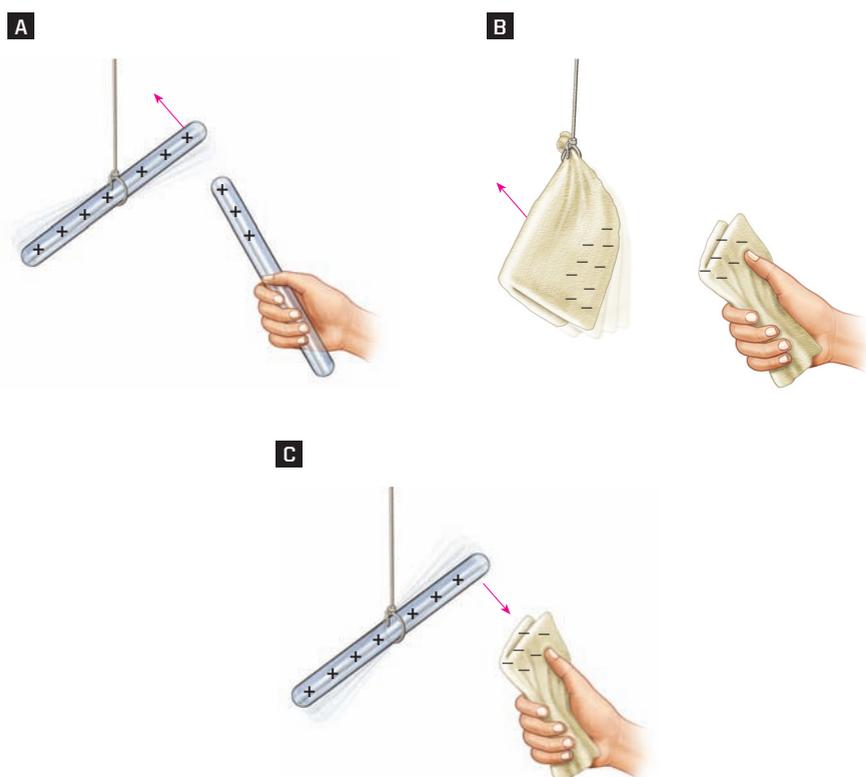


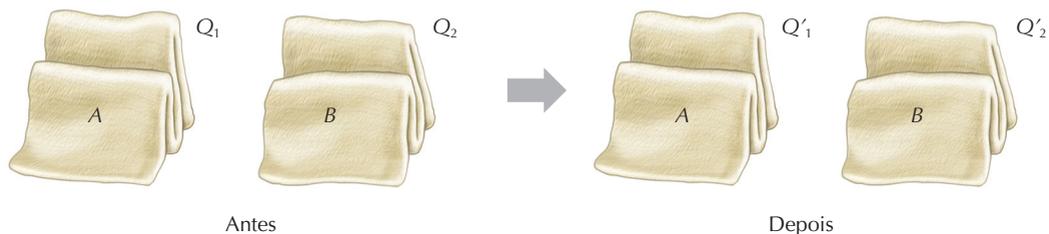
Figura 5.

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 (fig. 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 .



► **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 cargas serão Q'_1 e Q'_2 .

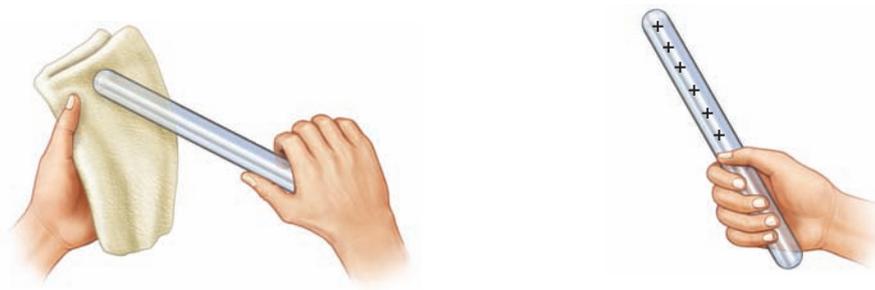
De acordo com o princípio da conservação das cargas elétricas, a quantidade de carga elétrica total antes da troca é igual à quantidade de carga elétrica total depois da troca, isto é:

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

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** (fig. 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 (fig. 8).



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



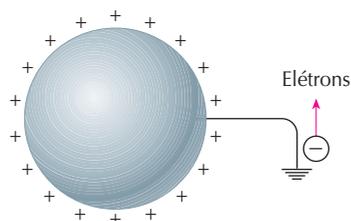
Os materiais, como o vidro, que **conservam as cargas nas regiões onde elas surgem**, são chamados **isolantes** ou **dielétricos**. Os materiais nos quais as **cargas se espalham** imediatamente são chamados **condutores**. É o caso dos metais. Nos condutores metálicos, os elétrons mais afastados do 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.

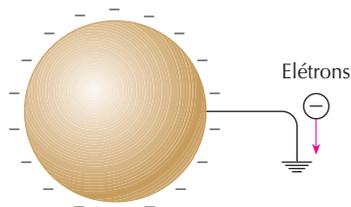
O corpo humano e a Terra também são condutores. Por isso, ao atritarmos o bastão metálico segurando-o diretamente com a mão, as cargas elétricas em excesso espalham-se pelo metal, pelo corpo humano e pela Terra. Isso significa que praticamente o bastão metálico não se eletriza em virtude de suas dimensões 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 (**fig. 9**). Quando um condutor está negativamente eletrizado, seus elétrons em excesso escoam para a Terra (**fig. 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 de ser aterrado.



◀ **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.

Outras formas de eletrização

1 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 (fig. 11).

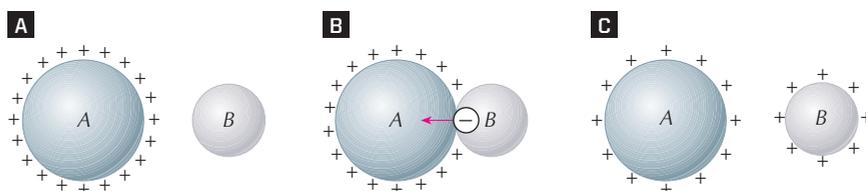


Figura 11. (A) A positivo e B neutro estão isolados e afastados; (B) colocados em contato, durante breve intervalo de tempo, elétrons livres vão de B para A ; (C) após o processo, A e B apresentam-se eletrizados positivamente.

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 (fig. 12).

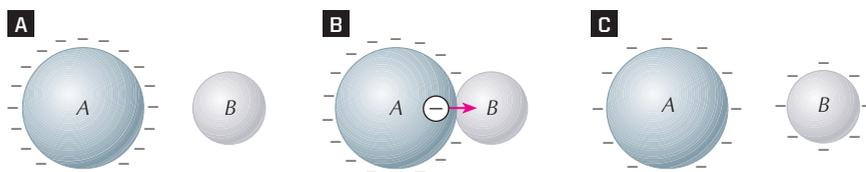


Figura 12. (A) A negativo e B neutro estão isolados e afastados; (B) colocados em contato, durante breve intervalo de tempo, elétrons vão de A para B ; (C) após o processo, A e B apresentam-se eletrizados negativamente.

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 (fig. 13).

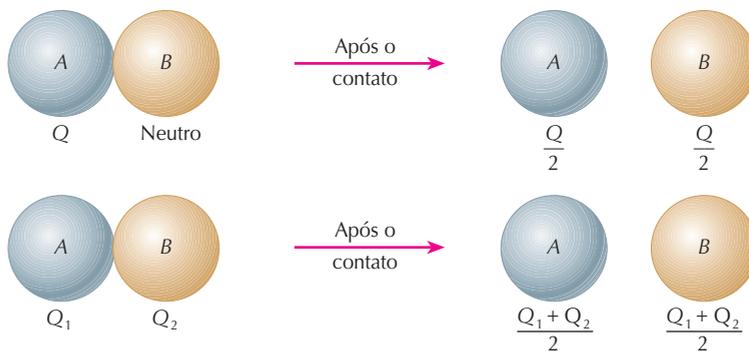


Figura 13. Eletrização por contato entre esferas condutoras de mesmo raio.

- Objetivos
- ▶ Compreender o processo de eletrização por contato.
 - ▶ Compreender o processo de eletrização por indução.
 - ▶ Analisar o funcionamento do gerador eletrostático de Van de Graaf.
 - ▶ Verificar se um corpo está ou não eletrizado utilizando um eletroscópio.

- Termos e conceitos
- pêndulo elétrico
 - eletroscópio de folhas



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 (fig. I):



Figura I.

Por contato, a bolinha de cortiça eletriza-se com a carga de mesmo sinal que a lã (fig. II):



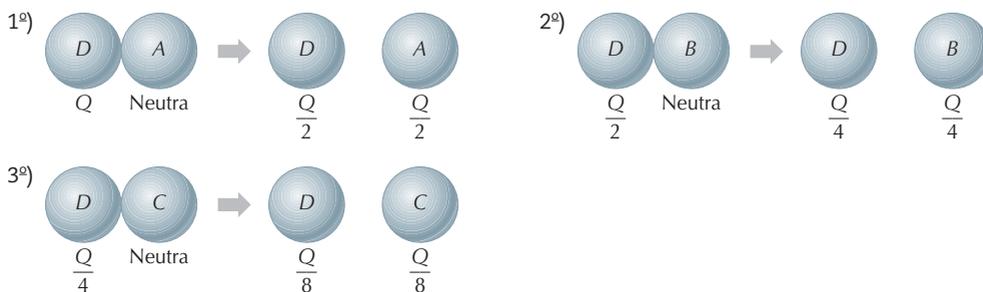
Figura II.

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.

Eletrização por indução

Seja um condutor B , inicialmente neutro (fig. 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 (fig. 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**.

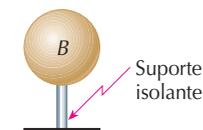


Figura 14. B : condutor inicialmente neutro.

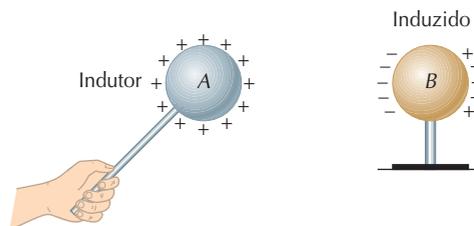


Figura 15. A região de B mais afastada de A fica com falta de elétrons.

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 sequência de operações:

- 1ª) 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.
- 2ª) Na presença do indutor, desfaz-se a ligação do induzido com a Terra (fig. 17).
- 3ª) Afasta-se o indutor. Os elétrons em excesso no induzido espalham-se imediatamente por ele. Assim, B eletriza-se negativamente (fig. 18).

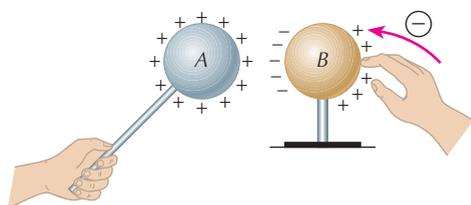


Figura 16.

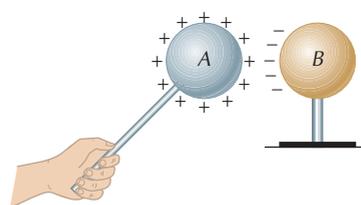


Figura 17.

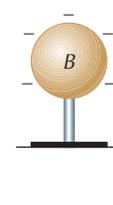


Figura 18.

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**.

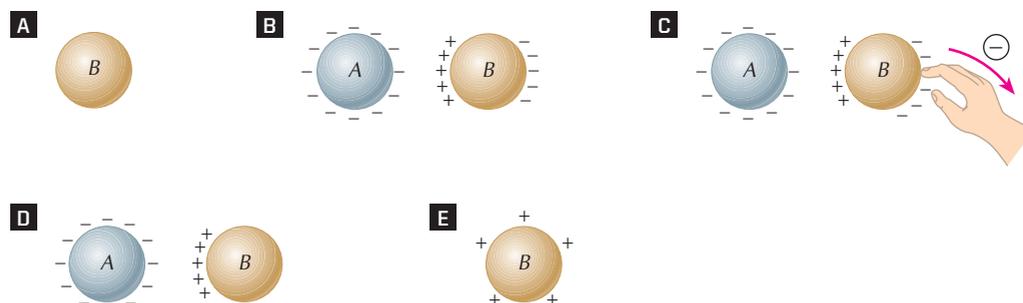


Figura 19. (A) Condutor B , neutro e isolado; (B) aproximando A de B , ocorre indução eletrostática; (C) ligando B à Terra, elétrons de B escoam para a Terra; (D) a ligação de B com a Terra é desfeita; (E) o indutor A é afastado e B eletriza-se positivamente.

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 (fig. 20); aproxima-se dele, sem tocá-lo, um corpo *A* positivamente eletrizado (fig. 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.

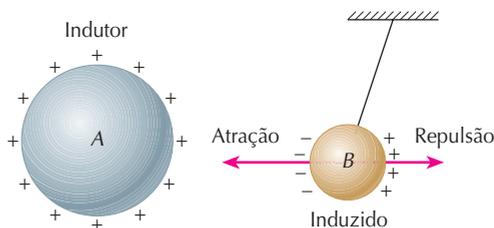
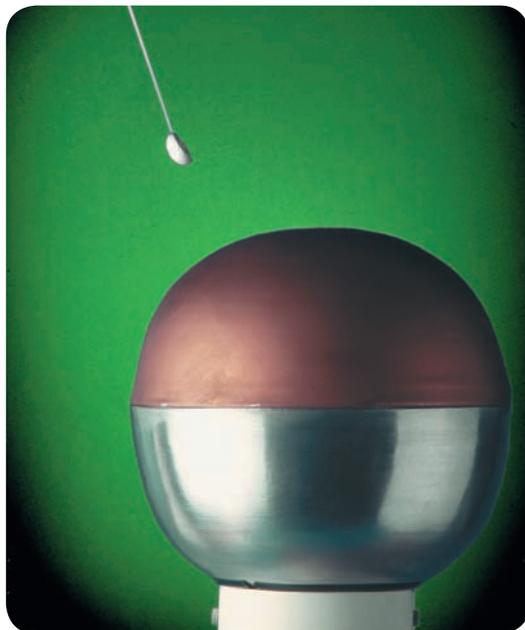


Figura 21. As cargas positivas de *A* atraem as negativas de *B* e repelem as positivas de *B*. A força de atração tem intensidade maior que a de repulsão.

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.



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

* 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 a seção 12.5, item 1).

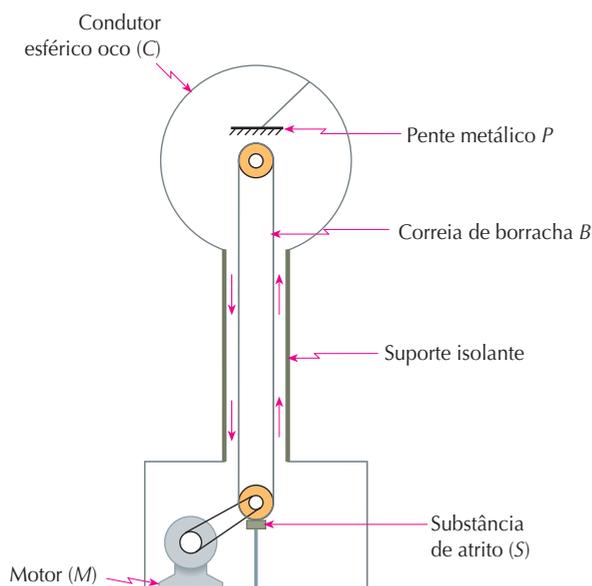
Gerador eletrostático de Van de Graaf

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 que mantenha 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 (que vamos supor 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.

3 Eletroscópios

Os aparelhos destinados a verificar se um corpo está ou não eletrizado são chamados **eletroscópios**. Um deles é o **pêndulo elétrico** (fig. 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. >

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

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 (fig. 23A). Se for atraída, o corpo *A* está eletrizado (fig. 23B).

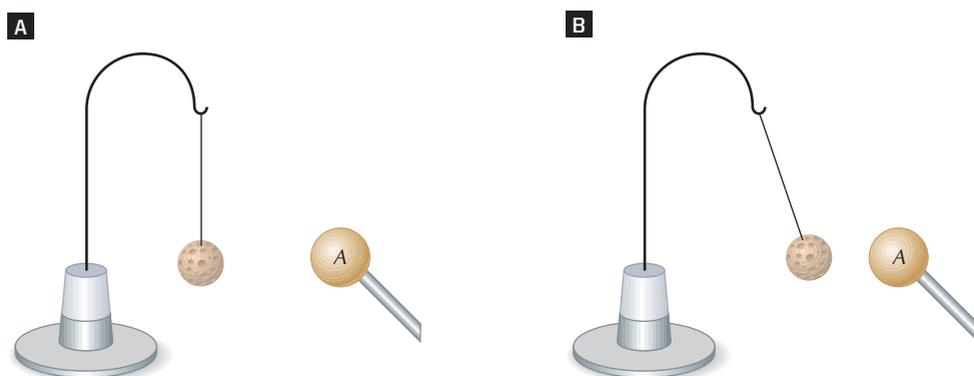


Figura 23.

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 (fig. 24A). A esfera se eletriza com carga de mesmo sinal que *A* e, em seguida, é repelida (fig. 24B).

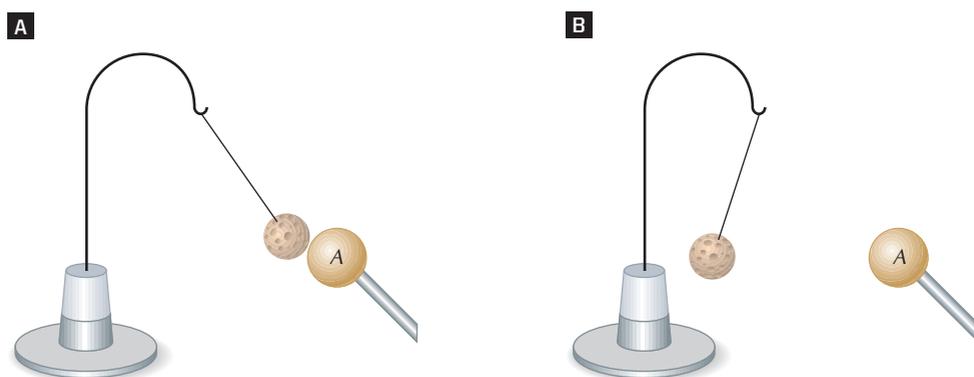


Figura 24.

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

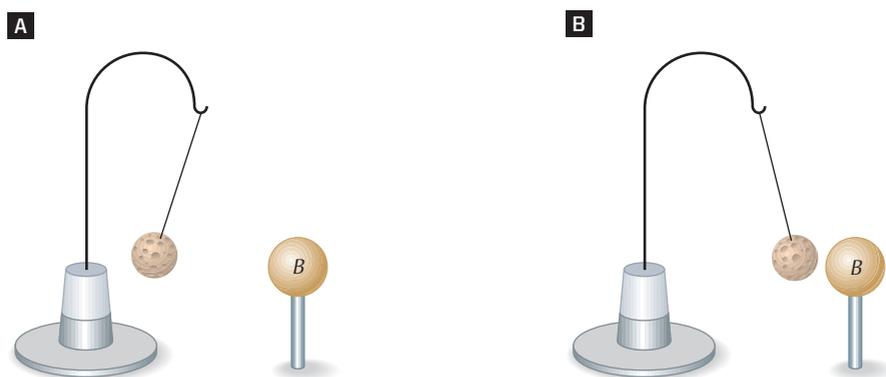


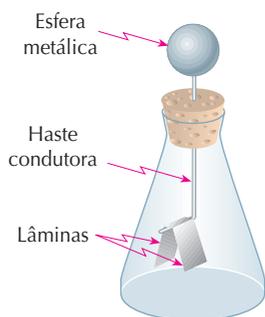
Figura 25.

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

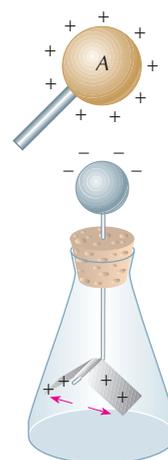


Outro aparelho com o qual podemos verificar se um corpo está ou não eletrizado é o **eletroscópio de folhas** (fig. 26). Ele é constituído de duas lâminas metálicas delgadas, ligadas por uma haste condutora a uma esfera metálica.

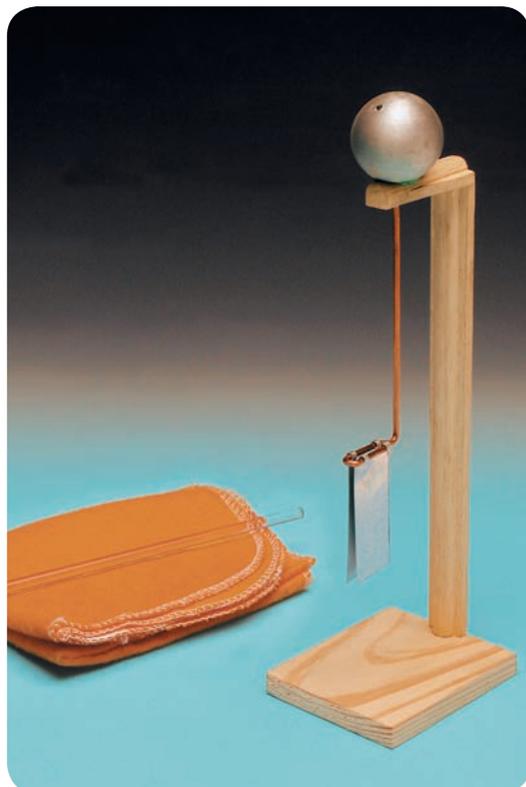
Para determinar se o corpo A da **figura 27** está ou não eletrizado, aproximamos A da esfera do eletroscópio. Se as lâminas se abrirem, isso significa que A está eletrizado.



📌 **Figura 26.** Eletroscópio de folhas.



📌 **Figura 27.** Se A estiver eletrizado, ocorre indução e as lâminas se abrem.



📌 **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.physicsclassroom/mmedia>, em Static Electricity (acesso em julho/2009), você pode encontrar animações e textos sobre indução eletrostática e eletroscópios.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

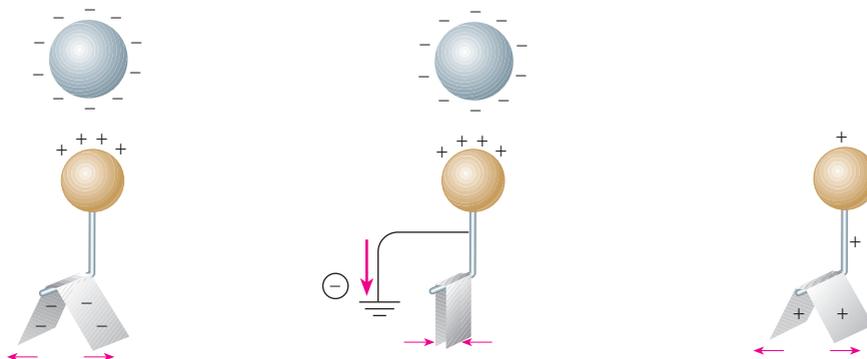
R. 3 Considere um eletroscópio de folhas descarregado. São realizadas as seguintes operações:

- 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:

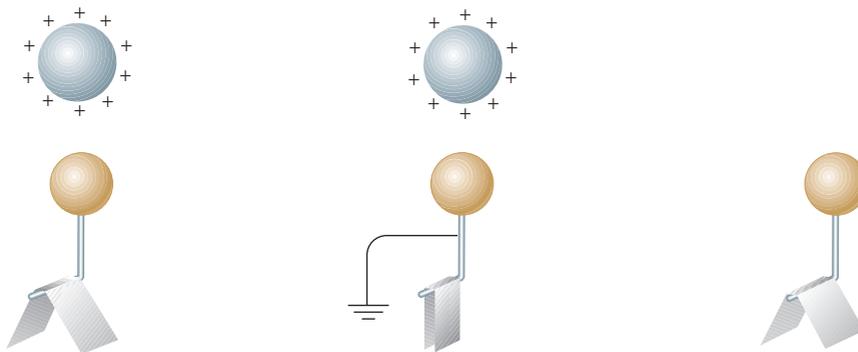
- Ao aproximarmos da esfera do eletroscópio um corpo eletrizado negativamente, o eletroscópio sofre indução eletrostática e as lâminas se abrem.
- Ligando-se o eletroscópio à Terra, as lâminas se fecham, pois os elétrons escoam para a Terra.
- Desfazendo-se a ligação com a Terra e afastando-se o corpo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



Forças entre cargas elétricas puntiformes: lei de Coulomb

Objetivo

- Conhecer a lei de Coulomb.

Termos e conceitos

- constante eletrostática
- balança de torção
- carga elementar
- carga elétrica quantizada

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 (fig. 28). Entre elas ocorre **atração** (fig. 28A), se tiverem sinais opostos, ou **repulsão** (fig. 28B), se tiverem mesmo sinal, com forças de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos, de acordo com o princípio da ação e reação.

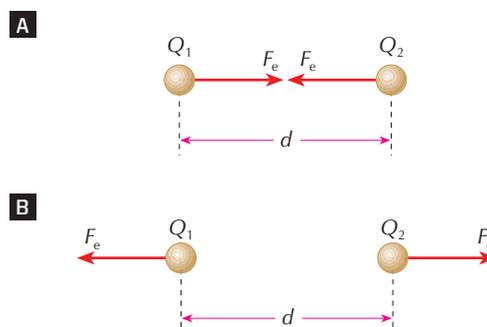


Figura 28.

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.

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.

* **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.

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:

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

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 (fig. 29).

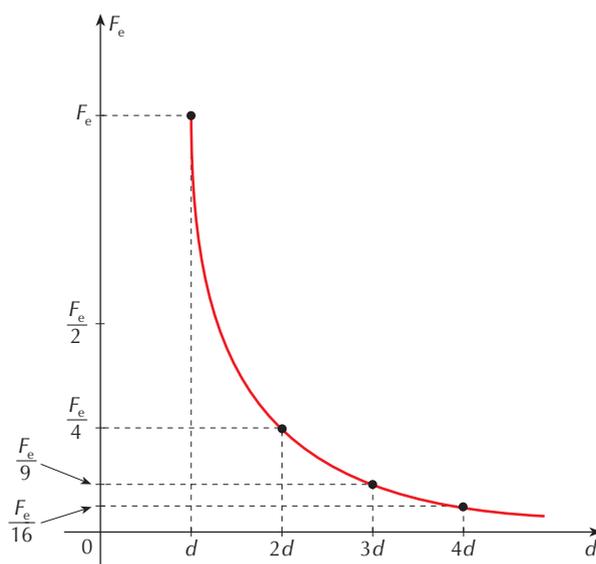


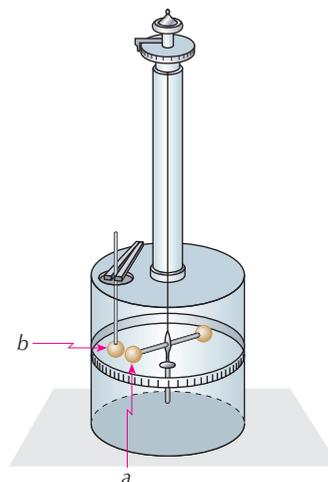
Figura 29. Gráfico de $F_e \times d$.

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 que toque 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.



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Animação: Experimento de Coulomb

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:

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

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

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

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

- 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:

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

Seja $F_e = 0,1 \text{ N}$; $d = 2 \text{ m}$; $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ 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: $F'_e = \frac{F_e}{3}$

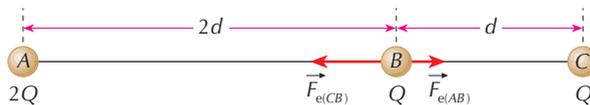
R. 9 Três pequenas esferas A, B e C com cargas elétricas respectivamente iguais a $2Q$, Q e Q estão localizadas como mostra a figura:



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:

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

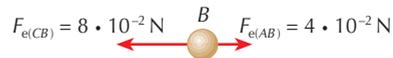
A força elétrica que A exerce em B tem intensidade:

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

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

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 .

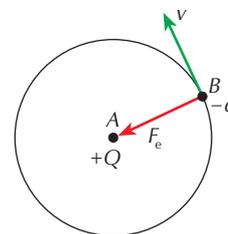
Solução:

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 $Q_1 = 10^{-6} \text{ C}$ e $Q_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ estão fixas nos pontos A e B e separadas pela distância $d = 30 \text{ cm}$ 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;
- a intensidade da força elétrica resultante sobre uma terceira carga $Q_3 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, colocada no ponto médio do segmento que une Q_1 a Q_2 ;
- a posição em que Q_3 deve ser colocada para ficar em equilíbrio sob a ação de forças elétricas somente.

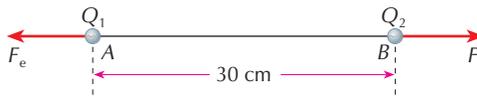
Solução:

a) Pela lei de Coulomb, temos:

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

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

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \text{ e } d = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m, decorre: } F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{(0,3)^2} \Rightarrow F_e = 0,4 \text{ N}$$



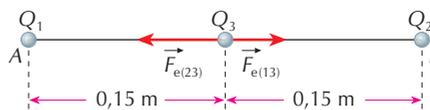
b) Q_1 repele Q_3 com força $\vec{F}_{e(13)}$.

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: $F_e = 3,2 - 0,8 \Rightarrow F_e = 2,4 \text{ N}$

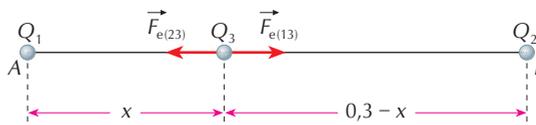
c) Para ficar em equilíbrio somente sob a ação de forças elétricas, Q_3 deve ser colocada entre Q_1 e Q_2 e mais próxima de Q_1 (carga menor).

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

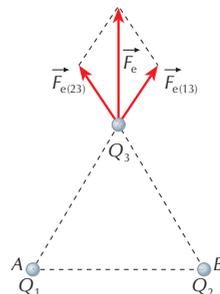
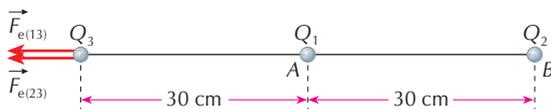
$$F_{e(13)} = F_{e(23)}$$

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

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



A resposta $x = -30 \text{ cm}$ 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

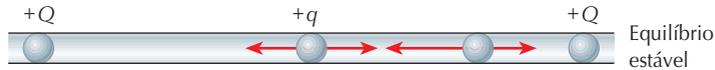
R. 12 Duas pequenas esferas eletrizadas com carga $+Q$ estão fixas numa canaleta horizontal, isolante e sem atrito. Uma pequena esfera eletrizada é colocada exatamente no ponto médio entre as duas e pode mover-se sobre a canaleta. Supondo as cargas puntiformes, analise o equilíbrio da terceira esfera,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

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

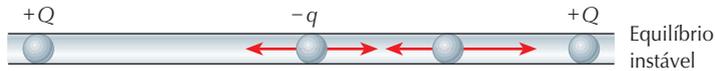
Solução:

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; se afasta-se, é instável e, se ficar na nova posição, é indiferente.

- a) 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.



- b) 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.

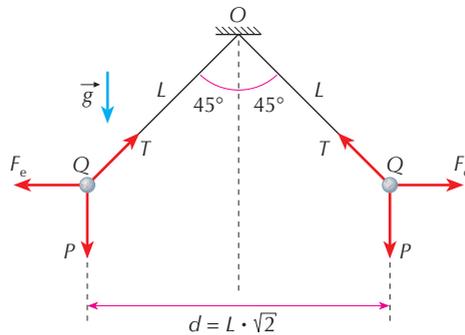


Resposta: a) O equilíbrio é estável. b) O equilíbrio é instável.

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° , 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).

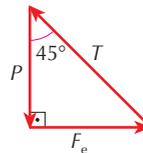


Como a partícula está em equilíbrio, a linha poligonal das forças deve ser fechada.

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

Sendo $\text{tg } 45^\circ = 1$, 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 de $0,1 \text{ N}$?

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 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 kg , estando colocados no vácuo a 2 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.

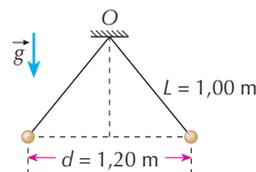
Utilizando esse modelo para o caso do átomo de hidrogênio (um único elétron girando em torno de um núcleo que contém um próton):

- 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:

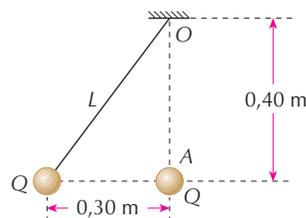
- a intensidade da força elétrica de atração;
- a intensidade da força elétrica resultante, que age sobre uma carga $Q_3 = 10^{-8} \text{ C}$, colocada no ponto médio do segmento que une Q_1 a Q_2 ;
- a posição em que Q_3 deve ser colocada de modo que fique em equilíbrio somente sob a ação de forças 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 separa é $d = 1,20 \text{ m}$. Considere $Q > 0$. (Adote: aceleração da gravidade $g = 10 \text{ m/s}^2$.)



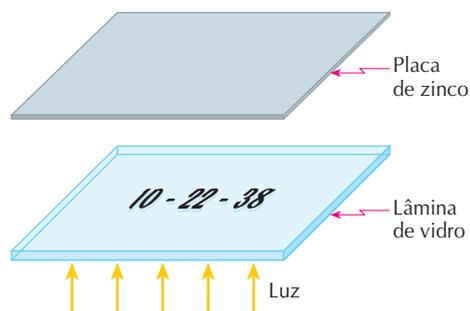
- Determine o valor de Q .
- Determine o valor da carga q que deve ser colocada no ponto O a fim de que sejam nulas as forças de tração nos fios.

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 .

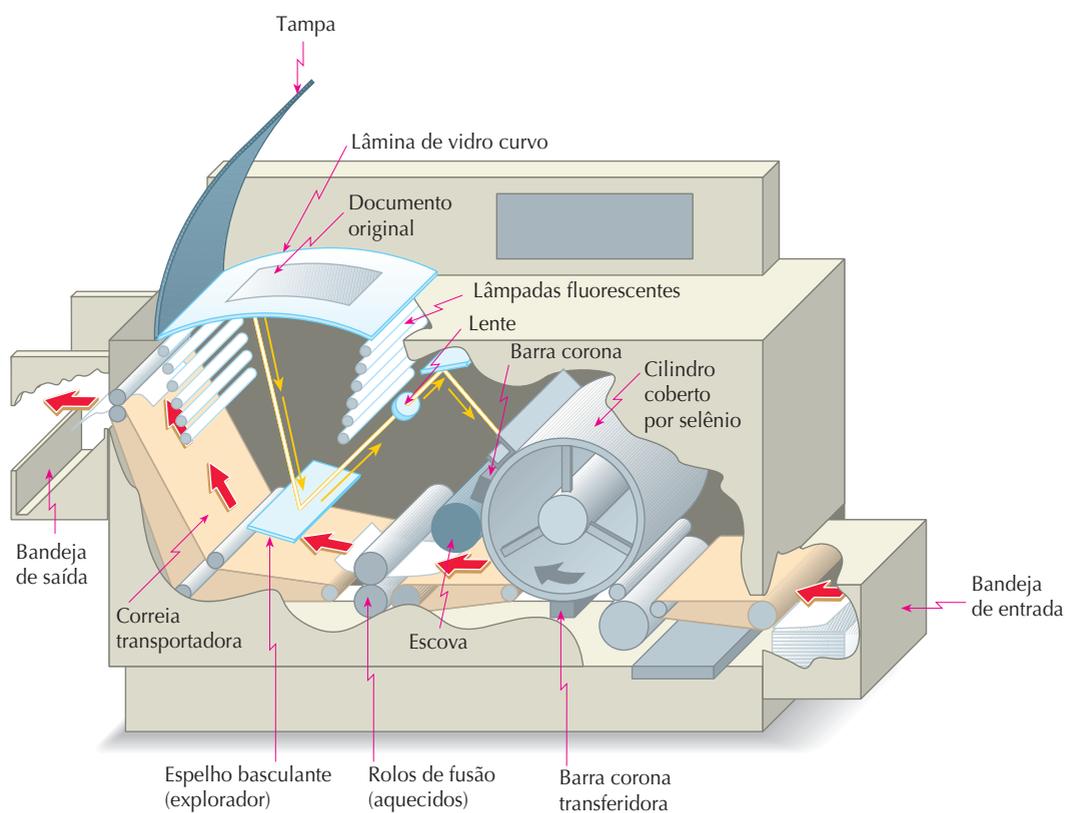


A xerografia

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 lycopódio (planta rasteira), este aderiu 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.

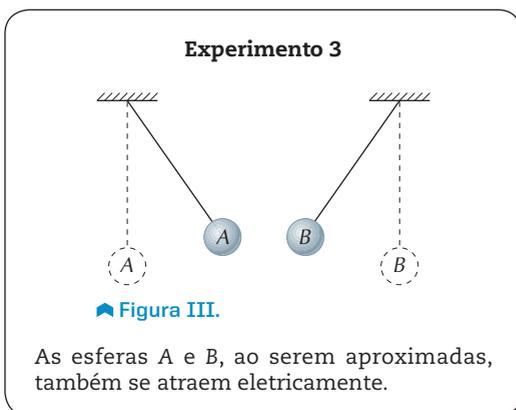
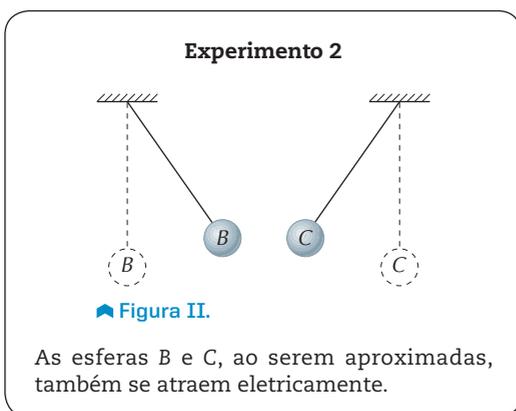
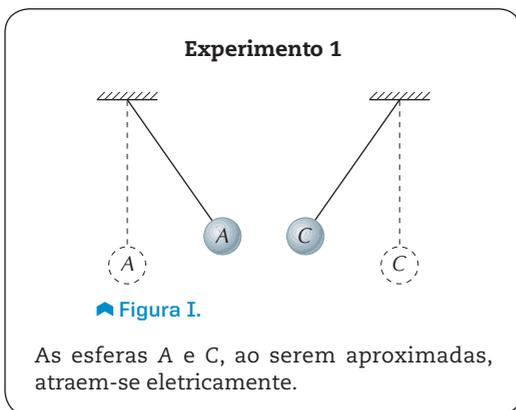


Modernamente, a imagem do original é projetada, por meio de lentes e espelhos, sobre um cilindro metálico previamente eletrizado e recoberto por selênio, substância que conduz eletricidade apenas quando exposta à luz. Assim, ao se produzir a iluminação, o cilindro só se descarrega na parte não escrita. 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.

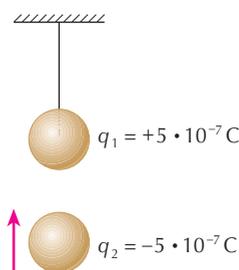
Analisando os resultados dos três experimentos, indique a hipótese correta. Justifique sua resposta.

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

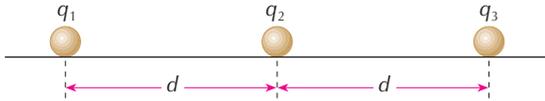


- Calcule a força eletrostática entre as duas esferas quando a distância entre os seus centros é de 0,5 m.
- Para uma distância de $5 \cdot 10^{-2}$ m entre os centros, o fio de seda se rompe. Determine a tração máxima suportada pelo fio.

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

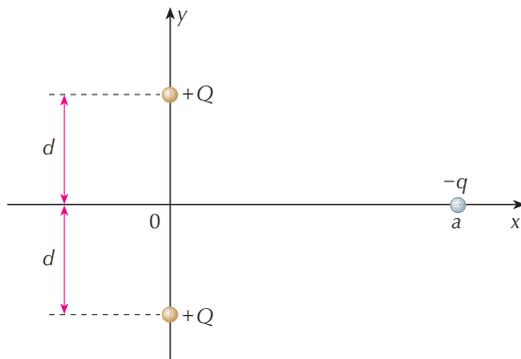
- as esferas encontram-se no vácuo sobre um plano horizontal sem atrito;
- os centros das esferas encontram-se sobre um mesmo plano horizontal;
- as esferas encontram-se em equilíbrio, nas posições representadas no esquema;

- 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 $d = 0,12 \text{ m}$.



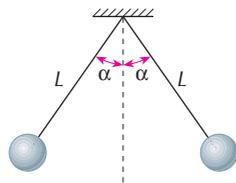
- a) Determine os sinais das cargas q_1 e q_3 , justificando a resposta.
 b) Calcule os valores das cargas q_1 e q_3 .
 c) Uma vez fixadas em suas posições as esferas de cargas q_1 e q_3 , qual o tipo de equilíbrio (estável, instável ou indiferente) da esfera intermediária? Justifique.

- 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 α é tal que $\sin \alpha = 0,60$; $\cos \alpha = 0,80$; $\text{tg } \alpha = 0,75$ e as esferas têm cargas iguais. Qual é, nesse caso, a carga elétrica de cada esfera?

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

- 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 cm .

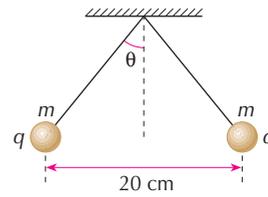


Figura I. Esferas carregadas com cargas de $2 \mu\text{C}$ cada.

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

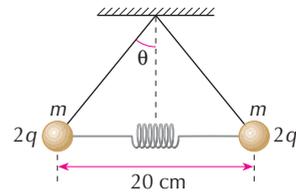


Figura II. Esferas carregadas com cargas de $4 \mu\text{C}$ cada e ligadas por uma mola.

A mola distende-se $1,0 \text{ cm}$. Qual a constante elástica da mola? (Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$ 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 I.

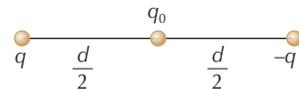


Figura I.

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 mediatriz entre as duas outras até atingir o ponto P , onde é fixada, como ilustra a figura II.

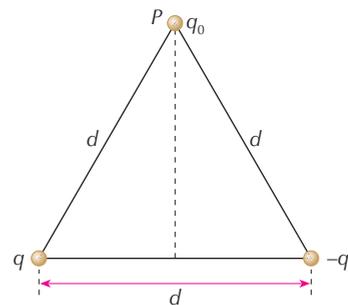


Figura II.

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 $\frac{F_A}{F_B}$.

