

VOLUME 3

ELETRICIDADE E
MAGNETISMO

FÍSICA

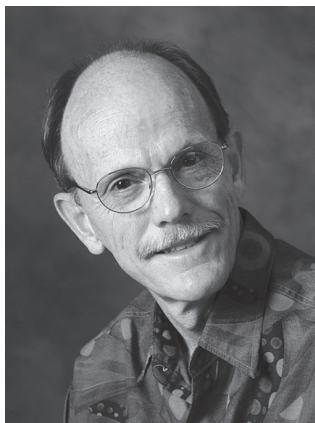
UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA

2ª EDIÇÃO



RANDALL D. KNIGHT

Sobre o Autor



Randy Knight leciona Física básica há 25 anos na Ohio State University, EUA, e na Califórnia Polytechnic University, onde atualmente é professor de física. O professor Knight bacharelou-se em Física pela Washington University, em Saint Louis, e doutorou-se em Física pela University of Califórnia, Berkeley. Fez pós-doutorado no Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, antes de trabalhar na Ohio State University. Foi aí que ele começou a pesquisar sobre o ensino da física, o que, muitos anos depois, o levou a escrever este livro.

Os interesses de pesquisa do professor Knight situam-se na área de laser e espectroscopia, com cerca de 25 artigos de pesquisa publicados. Ele também dirige o programa de estudos ambientais da Cal Poly, onde, além de física introdutória, leciona tópicos relacionados a energia, oceanografia e meio ambiente. Quando não está em sala de aula ou na frente de um computador, o professor Knight está fazendo longas caminhadas, remando em um caiaque, tocando piano ou usufruindo seu tempo com a esposa Sally e seus sete gatos.



K71f Knight, Randall D.

Física 3 [recurso eletrônico] : uma abordagem estratégica / Randall Knight ; tradução Manuel Almeida Andrade Neto. – 2. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : Bookman, 2009.

Editado também como livro impresso em 2009.
ISBN 978-85-7780-553-2

1. Física. 2. Eletricidade. 3. Magnetismo. I. Título.

CDU 537

26.2 Carga

Como você provavelmente sabe, os nomes dados atualmente aos dois tipos de carga são *carga positiva* e *carga negativa*. Talvez você se surpreenda ao saber que esses nomes foram cunhados por Benjamin Franklin. Franklin descobriu que a carga se comporta como os números positivos e negativos. Se um bastão de plástico está carregado duplamente por fricção e transfere uma dupla carga para uma esfera de metal, as forças elétricas exercidas pela esfera serão dobradas. Ou seja, $2 + 2 = 4$. Mas a esfera se encontra neutra após receber iguais quantidades da “carga do plástico” e da “carga do vidro”. Isso se parece com a operação $2 + (-2) = 0$. Estes experimentos estabelecem uma importante propriedade da carga.

Então, o que é positivo e o que é negativo? Isso depende apenas de nós! Franklin estabeleceu a convenção de que **um bastão de vidro friccionado com seda torna-se carregado positivamente**. É isso. Qualquer outro objeto que repila um bastão de vidro carregado também estará carregado positivamente. E qualquer objeto que atraia um bastão de vidro carregado estará carregado negativamente. Portanto, **um bastão de plástico friccionado com lã torna-se carregado negativamente**. Somente muito tempo depois disso, com a descoberta dos elétrons e dos prótons, foi verificado que os elétrons são atraídos por um bastão de vidro carregado, enquanto os prótons são repelidos por ele. Portanto, *por convenção*, os elétrons têm carga negativa, e os prótons, carga positiva.

NOTA ► Teria sido melhor se Franklin tivesse feito uma escolha oposta. Os elétrons são os formadores das correntes elétricas em metais, e a convenção de assinalar uma carga negativa para os elétrons irá apresentar futuramente algumas dificuldades de sinal que poderiam ser evitadas se os elétrons fossem considerados como positivos. ◀

Átomos e eletricidade

Voltemos rapidamente ao século XXI. A teoria da eletricidade foi desenvolvida sem o conhecimento da existência dos átomos, mas não há razão para continuarmos a desprezar essa parte importante de nossa perspectiva atual. Por enquanto, prosseguiremos sem demonstrar algumas das características importantes dos átomos e da matéria. Oportunamente você aprenderá as evidências experimentais que embasam tais afirmações.

A **FIGURA 26.1** mostra que todo átomo consiste de um *núcleo* muito pequeno e denso (diâmetro $\sim 10^{-14}$) circundado por *elétrons*, de massa muito menor do que o núcleo, orbitando em torno do mesmo. As frequências orbitais dos elétrons são tão grandes ($\sim 10^{15}$ revoluções por segundo) que os elétrons parecem formar uma **nuvem eletrônica** com diâmetro $\sim 10^{-10}$ m, um fator 10^4 maior do que o núcleo. De fato, a dualidade onda-partícula da física quântica destrói qualquer noção de trajetória bem-definida para um elétron, e *tudo* o que nós sabemos sobre os elétrons é o tamanho e a forma da nuvem eletrônica.

Experimentos realizados no fim do século XIX – experimentos que estudaremos na Parte VI – revelaram que os elétrons são *partículas* de carga negativa e de massa. O núcleo é uma estrutura composta, que consiste de *prótons*, que são partículas carregadas positivamente, e de *nêutrons* neutros. O átomo é mantido coeso pela força elétrica atrativa entre o núcleo positivo e os elétrons negativos.

Uma das descobertas mais importantes é de que **a carga, como a massa, é uma propriedade inerente de prótons e elétrons**. É tão impossível haver um elétron desprovido de carga quanto o mesmo existir sem massa. Tanto quanto podemos saber atualmente, elétrons e prótons possuem cargas com sinais opostos e com *exatamente* o mesmo valor absoluto. (Experimentos realizados com muito cuidado nunca revelaram diferenças.) Essa unidade de carga em nível atômico, chamada de **unidade fundamental de carga**, é representada pelo símbolo e . A Tabela 26.1 mostra as massas e as cargas de prótons e de elétrons. Precisamos definir uma unidade de carga, o que faremos na Seção 26.5, antes de especificarmos quanto vale a carga e .

A conexão micro/macro

Os elétrons e os prótons são as cargas básicas da matéria elementar. Consequentemente, as várias observações feitas na Seção 26.1 precisam ser explicadas em termos de elétrons e de prótons.

O núcleo, exagerado para visualização, contém prótons positivos.

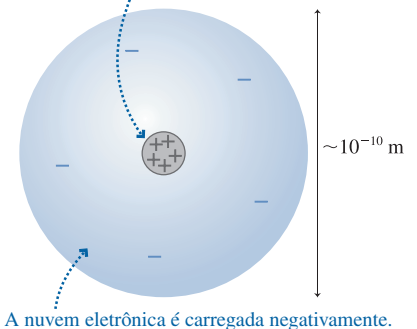


FIGURA 26.1 Um átomo.

TABELA 26.1 Prótons e elétrons

Partícula	Massa (kg)	Carga
Próton	$1,67 \times 10^{-27}$	$+e$
Elétron	$9,11 \times 10^{-31}$	$-e$

NOTA ► Elétrons e prótons são partículas da matéria. Seus movimentos são governados pelas leis de Newton. Elétrons podem se mover de um objeto para outro quando os objetos estão em contato, mas nem elétrons e nem prótons podem saltar de um objeto para outro através do ar. Um objeto não se torna carregado simplesmente por ter sido colocado próximo a um objeto carregado. ◀

A carga é representada pelo símbolo q (algumas vezes Q). Objetos macroscópicos como o bastão de plástico têm uma carga

$$q = N_p e - N_e e = (N_p - N_e) e \quad (26.1)$$

onde N_p e N_e são, respectivamente, o número de prótons e o número de elétrons contidos no objeto. A maioria dos objetos macroscópicos tem um *número igual* de prótons e elétrons e , portanto, tem $q = 0$. Um objeto sem carga *líquida* (i.e., $q = 0$) é considerado *eletricamente neutro*.

NOTA ► *Neutro* não significa “sem cargas”, e sim, que não possui uma carga *líquida*. Um volume de 1 cm^3 de um sólido comum contém $\sim 10^{24}$ elétrons e um número igual de prótons. Trata-se de um número enorme de cargas, mas a maioria dos sólidos é eletricamente neutra ou muito próxima disso. Um bastão de vidro perde apenas $\sim 10^{10}$ elétrons quando é carregado por fricção. Isso corresponde a apenas 1 elétron em 10^{14} . ◀

Um objeto carregado contém um número desigual de prótons e de elétrons. Qualquer objeto estará positivamente carregado se $N_p > N_e$. Ele é negativamente carregado se $N_p < N_e$. Note que um objeto carregado possui uma carga que é sempre igual a um múltiplo inteiro de e , ou seja, a quantidade de carga de um objeto sofre variações pequenas, mas discretas, e não-contínuas. A isto se denomina **quantização da carga**.

Na prática, os objetos adquirem carga positiva não por ganharem prótons, como se poderia esperar, mas por perderem elétrons. Os prótons estão *extremamente* firmes e ligados ao interior do núcleo e não podem ser adicionados ou removidos do átomo. Os elétrons, por outro lado, estão ligados mais frouxamente ao núcleo e podem ser removidos mais facilmente. O processo de remoção de um elétron da nuvem eletrônica é chamado de **ionização**. Um átomo que perdeu um elétron é chamado de *íon positivo*. Sua carga *líquida* é $q = +e$.

Constatamos que alguns átomos podem acomodar um elétron *extra* e , portanto, se tornarem um *íon negativo* com uma carga *líquida* $q = -e$. Uma solução de água salgada é um bom exemplo. Quando o sal de cozinha (cloreto de sódio, NaCl) se dissolve na água, ele é separado em íons positivos de sódio, Na^+ , e íons negativos de cloro, Cl^- . A **FIGURA 26.2** mostra íons positivos e negativos.

Todos os processos de eletrização que estudamos na Seção 26.1 envolveram atrito e fricção. As forças de atrito ocasionam quebras nas ligações moleculares da superfície enquanto os dois materiais passam um pelo outro. Moléculas são eletricamente neutras, mas a **FIGURA 26.3** mostra que pode-se criar um *íon molecular* quando uma das ligações de uma molécula grande for quebrada. Os íons moleculares positivos permanecem em um material, e os negativos, no outro, de modo que um dos objetos que sofre a fricção fica com uma carga *líquida* positiva, e o outro, com uma carga *líquida* negativa. Essa é a maneira pela qual o bastão de plástico é carregado pelo atrito com a lã ou um pente é carregado ao passar através do seu cabelo.

A eletrização por atrito, através de quebra de ligações, funciona melhor para grandes moléculas orgânicas. Isto explica não somente por que o plástico é eletrizado pela fricção com a lã, mas também as nossas experiências cotidianas, como a produção de “eletricidade estática” em uma secadora de roupas. Os metais geralmente *não* podem ser carregados por atrito.

Conservação da carga e diagramas de carga

Uma das importantes descobertas sobre a carga é a **lei de conservação da carga**: a carga não é criada nem destruída. Uma carga pode ser transferida de um objeto para outro, à medida que elétrons e íons se movem, mas a quantidade total de carga se mantém constante. Por exemplo, carregar um bastão de plástico por fricção com a lã transfere elétrons da lã para o plástico durante a quebra das ligações moleculares. A lã fica com uma carga positiva de mesmo valor absoluto, porém de sinal contrário à carga do bastão: $q_{\text{lã}} = -q_{\text{plástico}}$. A carga *líquida* permanece nula.

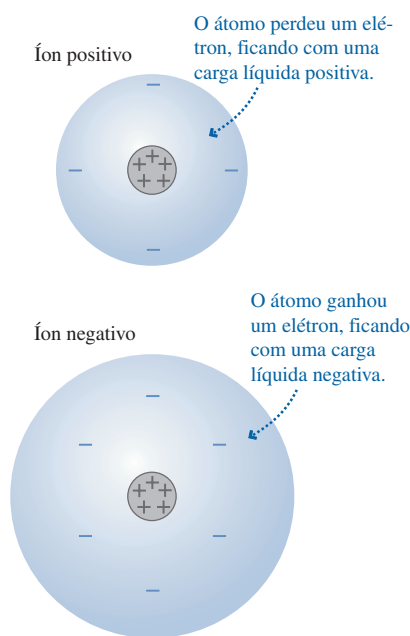


FIGURA 26.2 Íons positivos e negativos.

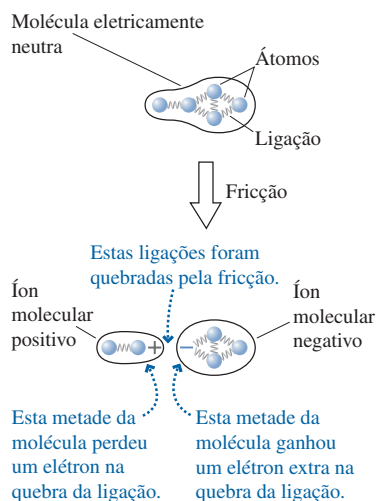


FIGURA 26.3 A eletrização por fricção geralmente cria íons moleculares através da quebra das ligações.

Os diagramas serão uma importante ferramenta para entender e explicar cargas e forças sobre objetos carregados. Conforme você for usando os diagramas, será importante fazer uso explícito da conservação de carga. A quantidade líquida de sinais positivos e de sinais negativos desenhados no seu diagrama *não* deverá mudar conforme você os move.

BOX TÁTICO 26.1

Desenhando diagramas de carga



- 1 Faça um desenho da seção transversal bidimensional simplificada do objeto.
- 2 Desenhe as cargas *superficiais bem próximas* da superfície do objeto.
- 3 Desenhe as cargas *internas* distribuídas uniformemente no interior do objeto.
- 4 Represente apenas a carga *líquida*. Para objetos neutros, *não* se deve indicar cargas nem uma porção de sinais positivos ou negativos.
- 5 Se você usar uma série de diagramas para explicar um processo, conserve a carga de um diagrama para o próximo.

Exercícios 10–13

Estas referências são do *Student Workbook*, disponível, em inglês, apenas no mercado norte-americano.

A FIGURA 26.4 mostra dois exemplos de diagramas de carga. O passo 5 se tornará mais claro à medida que o usarmos nos exemplos. O passo 4 é de especial importância. Por exemplo, um objeto positivamente carregado perdeu elétrons. Independentemente de como o objeto se torna eletrizado, o diagrama de carga deve trazer o sinal positivo.

PARE E PENSE 26.2

Ordene em sequência decrescente os valores das cargas de q_a a q_e destes cinco sistemas.

Próton •	Elétron •	17 prótons 19 elétrons	1.000.000 prótons 1.000.000 elétrons	Bola de vidro que perdeu 3 elétrons •
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)

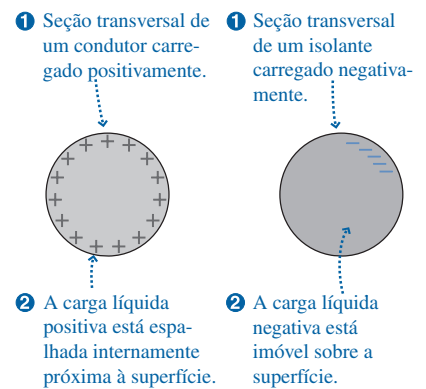


FIGURA 26.4 Diagramas de carga.

26.3 Isolantes e condutores

Você aprendeu que existem duas classes de materiais quanto às suas propriedades elétricas: a dos isolantes e a dos condutores. É hora de examinar melhor esses materiais.

A FIGURA 26.5 representa os interiores de um isolante e de um condutor metálico. Os elétrons do isolante estão todos fortemente ligados aos núcleos positivos e não são livres para se movimentar. Carregar um isolante por fricção deixa trechos da superfície com íons moleculares, mas tais íons são imóveis.

Em metais, os elétrons atômicos externos (chamados de *elétrons de valência* em química) estão ligados apenas fracamente ao núcleo. Quando os átomos se aproximam para formar um sólido, estes elétrons se desprendem de seus núcleos de origem e tornam-se livres para se mover através do sólido inteiro. O sólido, *como um todo*, permanece eletricamente neutro porque nenhum elétron foi adicionado ou removido durante o processo; todavia, agora os elétrons se parecem com um gás ou um líquido negativamente carregado – o que os físicos gostam de denominar **mar de elétrons** – que permeia uma rede de **caroços iônicos** positivamente carregados.

A consequência imediata dessa estrutura é que os elétrons são altamente móveis em um metal. Eles podem, rápida e facilmente, se mover através do metal em resposta a forças elétricas exercidas. O movimento de cargas através de um material é o que chamamos de **corrente**, e as partículas com carga que realmente se movem são chamadas de **portadores de carga**. Em um metal, os portadores de carga são os elétrons.

Os metais não são os únicos condutores que existem. As soluções iônicas, como a água salgada, também são bons condutores. Mas os portadores de carga em uma solução iônica são íons, e não, elétrons. Manteremos nossa atenção sobre os condutores metálicos devido à sua importância nas aplicações elétricas.

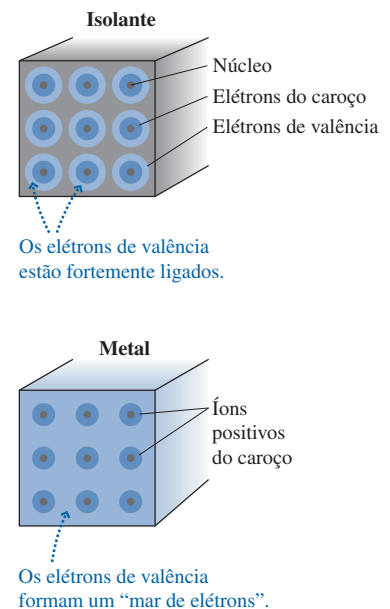


FIGURA 26.5 Uma visão microscópica dos isolantes e condutores.

Eletrização

Os isolantes, em geral, podem ser eletricamente carregados por atrito. Os diagramas de carga da **FIGURA 26.6** mostram que a carga do bastão está na superfície do mesmo e que a carga é conservada. A carga sobre o bastão é imóvel. Ela pode ser transferida para outro objeto por contato, mas não se move através do bastão.

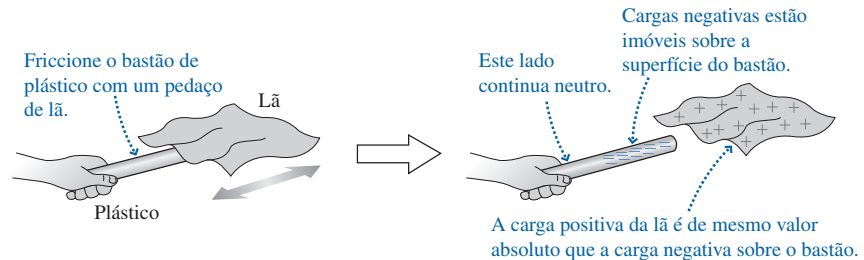


FIGURA 26.6 Um bastão isolante é carregado por atrito.

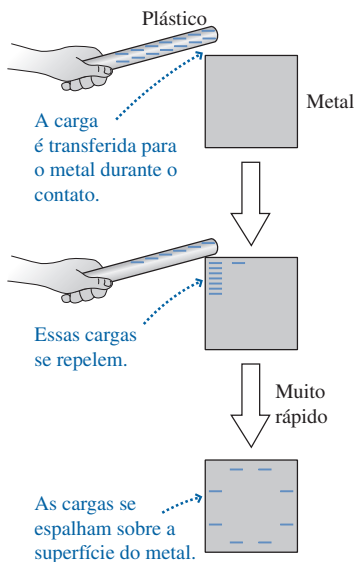


FIGURA 26.7 Um condutor é carregado por contato com um bastão de plástico eletrizado.

Os metais geralmente não podem ser eletrizados por atrito, mas o Experimento 9 mostra que uma esfera de metal pode ser eletricamente carregada por contato com um bastão de plástico. A **FIGURA 26.7** mostra um desenho explicativo do processo. A idéia essencial é que, **em um condutor, os elétrons são livres para se mover** pelo material. Uma vez que a carga tenha sido transferida para o metal, as forças repulsivas entre as cargas negativas farão com que os elétrons se afastem uns dos outros.

Note que os novos elétrons adicionados não precisam se mover para os cantos distantes do objeto metálico. Devido às forças repulsivas, os novatos simplesmente “empurram” o mar inteiro de elétrons para o lado. Em um tempo extremamente curto, geralmente menor do que 10^{-9} s, o mar de elétrons se ajusta à presença da carga adicionada. Para fins práticos, um condutor responde *instantaneamente* à adição ou à subtração de carga.

A não ser pelo breve intervalo de tempo durante o qual o mar de elétrons está se ajustando, as cargas em um condutor *isolado* encontram-se em equilíbrio estático, ou seja, as cargas estão em repouso e não há força resultante exercida sobre qualquer carga. Essa condição é chamada de **equilíbrio eletrostático**. Se *houvesse* uma força resultante sobre qualquer uma das cargas, ela iria rapidamente se mover para um ponto de equilíbrio no qual a força voltasse a ser nula.

O equilíbrio eletrostático tem uma consequência importante:

Em um condutor isolado, qualquer excesso de carga está localizado sobre a superfície do condutor.

Para ilustrar isso, suponha que *exista* um elétron em excesso no interior de um condutor isolado. O elétron extra irá desequilibrar a neutralidade elétrica do interior, exercendo forças sobre os elétrons próximos e fazendo com que se movam. Mas tal movimento violaria a hipótese de equilíbrio estático; logo, somos forçados a concluir que não pode haver elétrons em excesso no interior de um condutor isolado. Qualquer excesso de elétrons causará repulsões que os empurrarão para longe uns dos outros até que todos estejam na superfície.

EXEMPLO 26.2 Carregando um eletroscópio

Muitas demonstrações em eletricidade são feitas com o auxílio de um *eletroscópio* como o mostrado na **FIGURA 26.8**. Tocar a esfera do topo de um eletroscópio com um bastão de plástico carregado faz com que as folhas se afastem, mantendo um ângulo entre elas. Use os diagramas de carga para explicar por quê.

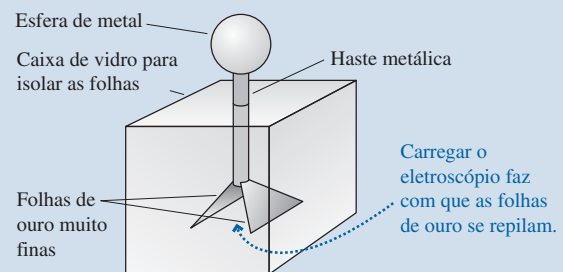


FIGURA 26.8 Um eletroscópio carregado.

MODELO Usaremos o modelo de carga e o modelo de um condutor como um material através do qual os elétrons podem se mover.

VISUALIZE A FIGURA 26.9 usa uma série de diagramas de carga para mostrar o processo de eletrização de um eletroscópio.

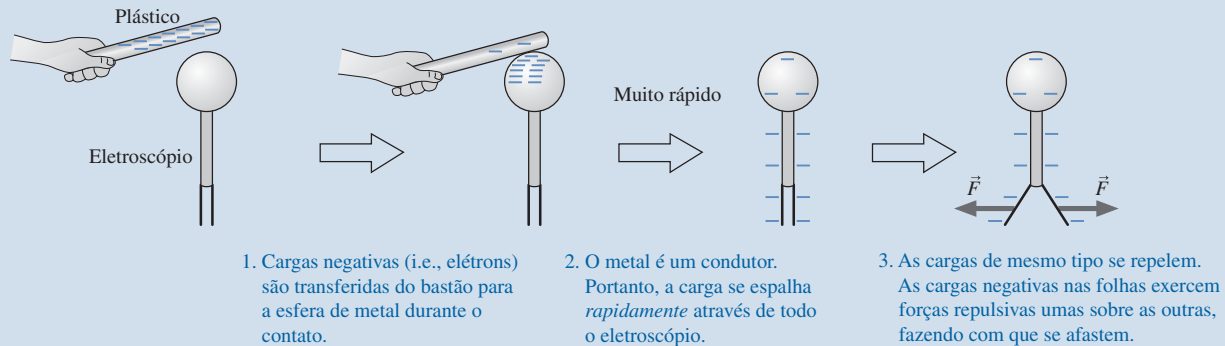


FIGURA 26.9 Processo pelo qual um eletroscópio é carregado.

Descarregamento

A água pura está longe de ser um bom condutor, mas quase toda água contém uma variedade de minerais dissolvidos que flutuam entre os íons. O sal de cozinha, conforme citamos anteriormente, se separa em íons Na^+ e Cl^- . Eles são os portadores de carga, permitindo que a água salgada seja um bom condutor.

Uma grande parte do corpo humano consiste de água salgada. Consequentemente, e ocasionalmente de forma trágica, os humanos são condutores razoavelmente bons. Este fato nos permite entender por que, ao *tocar* em um objeto carregado, nós o descarregamos como descrito no Experimento 10. A FIGURA 26.10 mostra uma pessoa que toca um metal positivamente carregado que perdeu elétrons. Ao contato, alguns dos íons negativos Cl^- sobre a superfície da pele transferem seu elétron extra para o metal, tornando ambos neutros, o metal e o átomo de cloro. Isso deixa o corpo com um excesso de íons positivos Na^+ e, portanto, uma carga líquida positiva. Como em qualquer condutor, as cargas positivas em excesso se afastam o máximo possível umas das outras, espalhando-se rapidamente sobre a superfície do condutor.

Tocar em um metal carregado resulta em que, juntos, ele e o corpo humano condutor se tornam um único condutor maior do que o metal sozinho. Qualquer excesso de carga que estiver inicialmente confinado no metal poderá, agora, se espalhar sobre o grande condutor metal + corpo humano. Isso pode não descarregar totalmente o metal, mas, em circunstâncias típicas, onde o corpo humano é muito maior do que a amostra de metal, a carga residual que permanece no metal é muito menor do que a quantidade de carga original. Para a maioria das aplicações práticas, o metal está descarregado. Em essência, dois condutores em contato “repartem” a carga que originalmente pertencia a apenas um deles.

O ar úmido é um condutor, mas um mau condutor. Objetos carregados expostos ao ar perdem lentamente sua carga à medida que o objeto a divide com o ar. A própria Terra é um gigantesco condutor devido à água, à umidade do ar e a uma variedade de íons – claro, não um condutor tão bom quanto um pedaço de cobre, mas sem dúvida um condutor. Qualquer objeto que esteja fisicamente conectado à Terra através de um condutor é considerado como **aterrado**. O efeito do aterramento é que o objeto reparte qualquer excesso de carga que possua com a Terra inteira! Mas a Terra é tão grande que qualquer condutor conectado a ela estará completamente descarregado.

A finalidade de *aterrar* objetos, tais como circuitos e eletrodomésticos, é impedir acúmulos de carga sobre os mesmos. Como você verá adiante, o aterramento tem o efeito de impedir o surgimento de uma *diferença de voltagem* entre o objeto e o solo. O terceiro pino existente nos plugues de eletrodomésticos e aparelhos eletrônicos tem a finalidade de conectar o dispositivo à Terra. A fiação de uma construção conecta fisicamente o terceiro pino do plugue para dentro do solo, em algum lugar externo à construção, geralmente ligado a um cano de metal enterrado profundamente no solo.

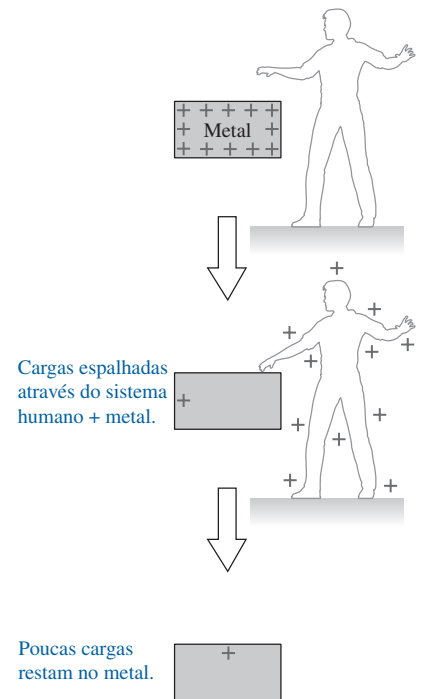


FIGURA 26.10 Encostar em um metal carregado o descarrega.

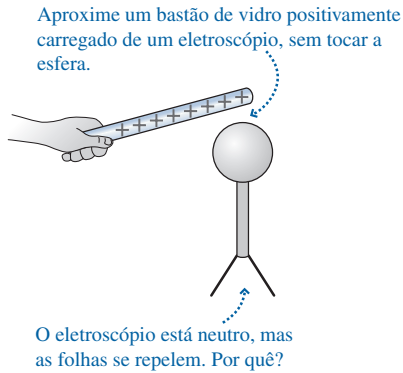


FIGURA 26.11 Um bastão carregado mantido perto de um eletroscópio faz as folhas do mesmo se repelirem mutuamente.

Polarização da carga

Fizemos grandes avanços ao aprender como a estrutura atômica da matéria pode explicar os processos de carga e as propriedades dos isolantes e dos condutores. Entretanto, uma observação da Seção 26.1 ainda necessita de explicação. Como objetos com cargas de sinais quaisquer exercem forças atrativas sobre um objeto *neutro*?

Para começar a responder à questão, consideremos um condutor neutro. A **FIGURA 26.11** mostra um bastão positivamente carregado mantido próximo – mas sem o tocar – a um eletroscópio *neutro*. As folhas se afastam e se mantêm afastadas enquanto o bastão for mantido próximo, mas rapidamente descem para suas posições normais quando o bastão é removido. Podemos compreender esse comportamento?

Podemos, sim, e a **FIGURA 26.12a** mostra como. Embora o metal como um todo ainda esteja eletricamente neutro, dizemos que o objeto foi *polarizado*. A **polarização da carga** consiste em uma leve separação das cargas positivas e negativas em um objeto neutro. A polarização da carga produz um excesso de cargas positivas nas folhas do eletroscópio mostrado na **FIGURA 26.12b**, de modo que elas se repelem. Mas, devido ao fato de o eletroscópio não possuir uma carga *líquida*, o mar de elétrons rapidamente se reajustará uma vez que o bastão seja removido.

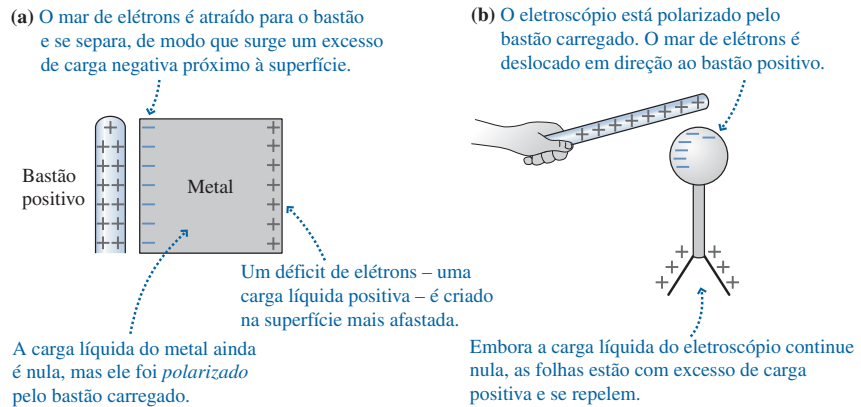
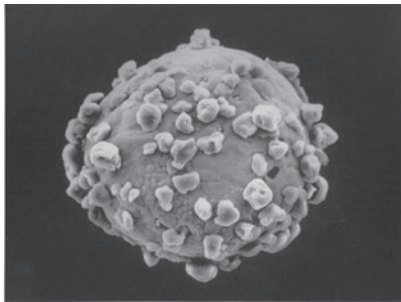


FIGURA 26.12 Um bastão carregado polariza um metal.



As partículas de tinta de uma máquina fotocopadora grudam-se a *gotas portadoras* eletrizadas devido a uma força de polarização. Em seguida, as partículas de tinta são transferidas para áreas previamente eletrizadas de uma folha de papel, produzindo, assim, uma fotocópia da imagem.

Por que nem *todos* os elétrons na Figura 26.12a vão para o lado carregado positivamente? Uma vez que o mar de elétrons se desvia ligeiramente, os íons positivos estacionários começam a exercer uma força restauradora, que puxa os elétrons de volta para a direita. A posição de equilíbrio para o mar de elétrons está suficientemente deslocada para a esquerda para que as forças exercidas pelas cargas externas e pelos íons positivos estejam equilibradas. Na prática, o deslocamento do mar de elétrons é geralmente *menor do que* 10^{-15} m!

A polarização da carga explica não somente por que as folhas do eletroscópio se defletem, mas também como um objeto carregado exerce uma força atrativa sobre um objeto neutro. A **FIGURA 26.13** mostra um bastão carregado positivamente próximo a um pedaço de metal neutro. Uma vez que a força elétrica diminui com a distância, a força atrativa sobre os elétrons no topo da superfície é *levemente maior* do que a força repulsiva dos íons no fundo. A força resultante orientada para o bastão carregado é chamada de **força de polarização**. As forças de polarização surgem por causa da separação de cargas no metal, e *não*, porque o bastão e o metal estão carregados com cargas de sinais opostos.

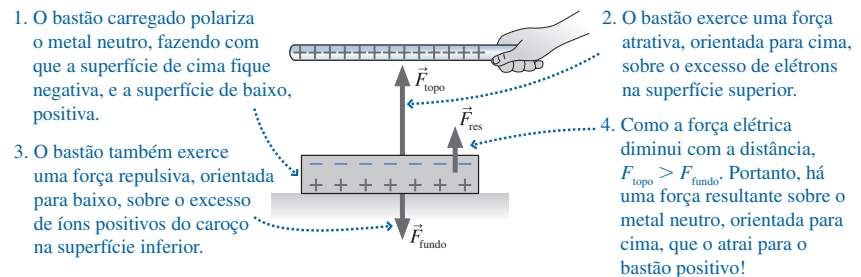


FIGURA 26.13 A força de polarização em um pedaço de metal neutro deve-se à pequena separação de cargas.

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.