

VOLUME 3

ELETRICIDADE E
MAGNETISMO

FÍSICA

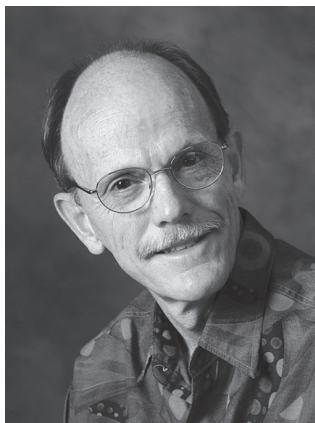
UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA

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.

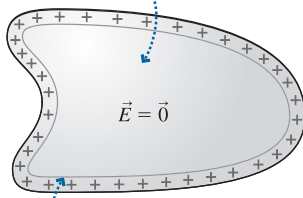
Física 3 [recurso eletrônico] : uma abordagem estratégica / Randall Knight ; tradução Manuel Almeida Andrade Neto. – 2. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : Bookman, 2009.

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

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

CDU 537

O campo elétrico é nulo no interior do condutor.



O fluxo através da superfície gaussiana é nulo. Não há carga líquida no interior do condutor. Portanto, todo o excesso de carga está na superfície.

FIGURA 28.28 Superfície gaussiana próxima à superfície interna de um condutor que se encontra em equilíbrio eletrostático.

O campo elétrico na superfície é perpendicular à mesma.

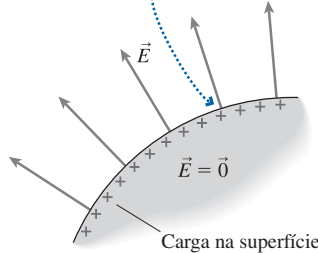


FIGURA 28.29 Campo elétrico na superfície de um condutor carregado.

O campo elétrico é perpendicular à superfície.

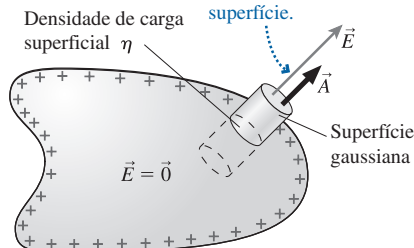


FIGURA 28.30 O fluxo não é nulo apenas na tampa externa da superfície gaussiana cilíndrica que atravessa a superfície do condutor.

28.6 Condutores em equilíbrio eletrostático

Considere um condutor carregado, tal como um eletrodo de metal carregado, em equilíbrio eletrostático, ou seja, não existem correntes através do condutor e as cargas estão, todas, em repouso. No Capítulo 26, você aprendeu que **o campo elétrico é nulo em todos os pontos no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático**, isto é, $\vec{E}_{\text{int}} = \vec{0}$. Se isto não fosse verdadeiro, o campo elétrico faria com que as cargas se movimentassem, o que violaria a hipótese inicial de que todas as cargas estejam em repouso. Vamos empregar a lei de Gauss para ver o que mais podemos aprender.

Na superfície de um condutor

A **FIGURA 28.28** mostra uma superfície gaussiana interna e levemente deslocada em relação à superfície física de um condutor em equilíbrio eletrostático. O campo elétrico é nulo em todos os pontos internos ao condutor, de modo que o fluxo elétrico Φ_e através dessa superfície gaussiana deve ser nulo. Porém se $\Phi_e = 0$, a lei de Gauss nos garante que $Q_{\text{int}} = 0$. Isto é, não há uma carga líquida dentro da superfície. Há cargas lá – elétrons e íons positivos –, mas não há uma carga *líquida*.

Se não há carga líquida no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático, então **todo o excesso de carga de um condutor carregado se encontra sobre a sua superfície externa**. Qualquer carga que seja adicionada ao condutor rapidamente se espalhará por toda a superfície até atingir uma configuração de equilíbrio eletrostático, mas não haverá carga líquida *dentro* do condutor.

Pode não haver campo elétrico dentro de um condutor carregado, todavia a presença de carga líquida requer a existência de um campo elétrico no espaço externo ao condutor. A **FIGURA 28.29** mostra que **o campo elétrico logo acima da superfície do condutor deve ser perpendicular à superfície em cada ponto**. Para verificar que isso é verdade, suponha que \vec{E}_{sup} possuísse um componente tangente à superfície. Tal componente de \vec{E}_{sup} exerceria, então, uma força sobre as cargas da superfície, o que daria origem a uma corrente superficial, contradizendo, portanto, a suposição de que todas as cargas estejam em repouso. O único campo exterior consistente com o equilíbrio eletrostático é um que seja perpendicular à superfície.

Podemos usar a lei de Gauss para relacionar a intensidade do campo na superfície à densidade de carga sobre a mesma. A **FIGURA 28.30** mostra um pequeno cilindro gaussiano perpendicular com as tampas igualmente afastadas da superfície do condutor carregado, uma dentro e outra fora do mesmo. A carga dentro desse cilindro Gaussiano é ηA , onde η é a densidade superficial de carga neste ponto sobre o condutor. Há um fluxo $\Phi = AE_{\text{sup}}$ através da face externa do cilindro; todavia, ao contrário do Exemplo 28.6 para o plano infinito de carga, *não* há fluxo através da face interior porque $\vec{E}_{\text{int}} = \vec{0}$ dentro do condutor. Além disso, não há fluxo através da lateral do cilindro porque \vec{E}_{sup} é perpendicular à superfície do condutor. Portanto, o fluxo resultante é $\Phi_e = AE_{\text{sup}}$. A lei de Gauss é

$$\Phi_e = AE_{\text{sup}} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \frac{\eta A}{\epsilon_0} \quad (28.19)$$

de onde podemos concluir que o campo elétrico criado por um condutor carregado em sua própria superfície é

$$\vec{E}_{\text{sup}} = \left(\frac{\eta}{\epsilon_0}, \text{perpendicular à superfície} \right) \quad (28.20)$$

Em geral, a densidade superficial de carga η *não* é constante sobre a superfície de um condutor, mas varia de uma maneira complicada que depende da forma do condutor. Se pudermos determinar η , ou pelo seu cálculo ou pela sua medida, então a Equação 28.20 nos informará o campo elétrico naquele ponto da superfície. Alternativamente, podemos usar a Equação 28.20 para deduzir a densidade de carga naquele ponto da superfície do condutor se conhecemos o campo elétrico na vizinhança externa do condutor.

Cargas e campos internos a um condutor

A **FIGURA 28.31** mostra um condutor carregado com uma cavidade dentro do mesmo. Pode haver carga sobre a superfície interior da cavidade? Para descobrir, escolhamos uma superfície gaussiana que contorna toda a cavidade a uma distância infinitesimal da superfície da mesma, porém mantendo-se sempre dentro do condutor. O fluxo elétrico Φ_e através dessa superfície gaussiana é nulo porque o campo elétrico é nulo em qualquer ponto dentro do condutor. Assim, concluímos que $Q_{\text{int}} = 0$. Não há carga líquida dentro dessa superfície gaussiana e, portanto, não há carga também na superfície da cavidade. Qualquer excesso de carga do condutor deve residir na superfície *externa* do condutor, e não, em qualquer superfície interior existente.

Além disso, devido ao fato de que não há campo elétrico dentro do condutor e de que não há carga dentro da cavidade, o campo elétrico dentro da cavidade também deve ser nulo. Esta conclusão tem uma aplicação prática importante. Por exemplo, suponha que precisemos “blindar” de campos elétricos externos a região delimitada por linhas pontilhadas da **FIGURA 28.32a**. Podemos fazer isso cercado a região por uma caixa condutora neutra, como mostrado na **FIGURA 28.32b**.

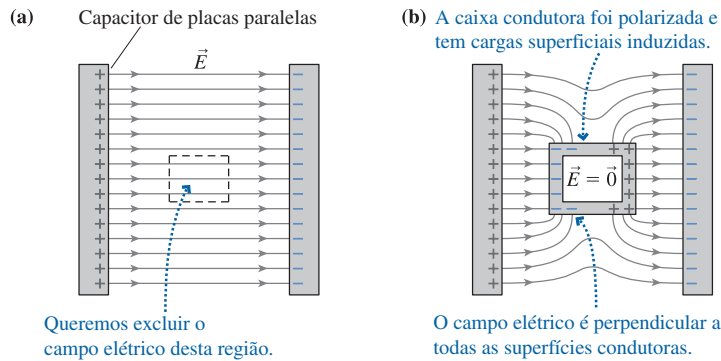


FIGURA 28.32 Uma região pode ser “blindada” de campos elétricos externos ao ser envolvida por uma caixa condutora.

Com isso, esta região do espaço constitui, efetivamente, uma cavidade completamente fechada dentro do condutor, de modo que o campo elétrico interno é nulo. O uso de uma caixa condutora para blindar de campos elétricos uma região do espaço é chamado de **blindagem**. Paredes sólidas de metal são ideais, mas, na prática, são usadas telas ou redes de arames – às vezes chamadas de *gaiolas de Faraday* – as quais fornecem proteção suficiente para a maioria das aplicações de alta sensibilidade. O preço que pagamos é que o campo elétrico exterior torna-se, com isso, muito complicado.

Finalmente, a **FIGURA 28.33** mostra uma carga q dentro de uma cavidade no interior de um condutor neutro. O campo elétrico *dentro* do condutor ainda é nulo, pois o fluxo elétrico através da superfície gaussiana é nulo. Mas $\Phi_e = 0$ requer $Q_{\text{int}} = 0$. Consequentemente, a carga dentro da cavidade atrai uma carga igual e oposta, e uma carga $-q$ agora circunda a superfície interna da cavidade.

O condutor, na sua totalidade, continua neutro, portanto mover $-q$ para a superfície da cavidade deve deixar para trás $+q$ de carga em algum lugar. Onde? Não pode ser no interior do condutor, conforme vimos, e isto nos deixa somente com a superfície exterior. Em essência, uma carga interna polariza o condutor da mesma forma que uma carga externa. A carga líquida $-q$ se desloca para o interior do condutor, e a carga líquida $+q$ é deixada para trás, sobre a superfície exterior.

Em resumo, os condutores em equilíbrio eletrostático possuem as propriedades descritas no Box Tático 28.3, a seguir.

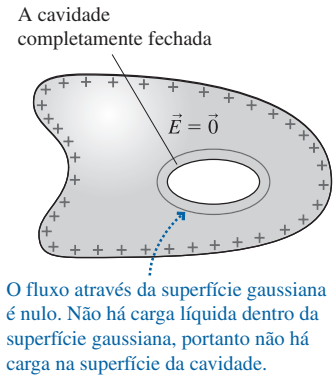


FIGURA 28.31 Uma superfície gaussiana envolve uma cavidade completamente fechada dentro de um condutor em equilíbrio eletrostático.

O fluxo através da superfície gaussiana é nulo, e, assim, não há carga líquida dentro dessa superfície. Deve haver uma carga $-q$ no lado interno da superfície que contrabalance a carga puntiforme q .

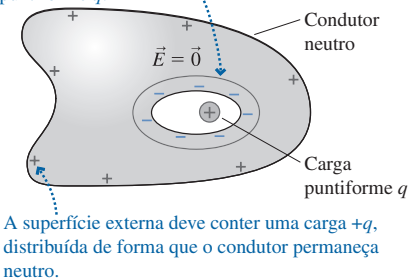


FIGURA 28.33 A carga dentro da cavidade induz uma carga líquida na superfície exterior e na superfície interior.

BOX TÁTICO
28.3

Determinação do campo elétrico criado por um condutor em equilíbrio eletrostático



- ❶ O campo elétrico é nulo em todos os pontos internos do condutor.
- ❷ Qualquer excesso de carga do condutor deve estar inteiramente na face *externa da superfície* do condutor.
- ❸ O campo elétrico externo na vizinhança da superfície do condutor carregado é perpendicular a esta superfície e tem módulo igual a η/ϵ_0 , onde η é a densidade de carga superficial naquele ponto.
- ❹ O campo elétrico é nulo no interior de qualquer cavidade dentro de um condutor, a menos que exista uma carga dentro da cavidade.

Exercícios 20–24

**EXEMPLO 28.7 O campo elétrico na superfície de uma esfera metálica carregada**

Uma esfera de bronze com 2 cm de diâmetro foi eletrizada com uma carga de 2,0 nC. Qual é a intensidade do campo elétrico na superfície da esfera?

MODELO O bronze é um condutor. O excesso de carga se deposita sobre a superfície.

VISUALIZAÇÃO A distribuição de carga possui simetria esférica. O campo elétrico aponta radialmente para fora da superfície.

RESOLUÇÃO Podemos resolver esse problema de duas maneiras. Uma emprega o fato de que a esfera é a forma para a qual qualquer excesso de carga se espalhará igualmente sobre a superfície, dando origem a uma densidade de carga superficial *uniforme*. Portanto,

$$\eta = \frac{q}{A_{\text{esfera}}} = \frac{q}{4\pi R^2} = \frac{2,0 \times 10^{-9} \text{ C}}{4\pi (0,010 \text{ m})^2} = 1,59 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$$

Da Equação 28.20, sabemos que o campo elétrico na superfície tem a intensidade

$$E_{\text{sup}} = \frac{\eta}{\epsilon_0} = \frac{1,59 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2}{8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2} = 1,8 \times 10^5 \text{ N/C}$$

Alternativamente, poderíamos ter usado o resultado, obtido no início do capítulo, de que a intensidade do campo elétrico fora de uma esfera carregada Q é $E_{\text{ext}} = Q_{\text{int}}/(4\pi\epsilon_0 r^2)$. Todavia $Q_{\text{int}} = q$ e, na superfície, $r = R$. Portanto

$$E_{\text{sup}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} = (9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{2,0 \times 10^{-9} \text{ C}}{(0,010 \text{ m})^2} = 1,8 \times 10^5 \text{ N/C}$$

Como podemos ver, os dois métodos levam ao mesmo resultado.

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