

# ELETROMAGNETISMO

Guilherme  
de Lima Lopes



# Conceitos fundamentais da Eletrostática

## Objetivos de aprendizagem

Ao final deste texto, você deve apresentar os seguintes aprendizados:

- Compreender a natureza elétrica da matéria.
- Diferenciar as propriedades entre condutores e isolantes.
- Conhecer os processos de eletrização.

## Introdução

A carga elétrica é a propriedade fundamental da matéria, disponível em todos os corpos, tornando-os sensíveis a interações. Para iniciarmos nossos estudos, vamos analisar as cargas elétricas em repouso. Porque as cargas elétricas exercem forças umas sobre as outras? Como podemos quantificar e aplicar estes conceitos de carga elétrica e força elétrica? Dois tipos de materiais, como o cobre e a madeira, possuem propriedades diferentes, o primeiro é um material condutor e o segundo é um material isolante, mas o que define isso?

Por fim, é possível alterarmos a quantidade de carga elétrica de um corpo através de diferentes processos, por exemplo por contato, quais outros processos podem ser utilizados e como funcionam? A partir dos conceitos apresentados neste capítulo, você será capaz de responder a estas e outras perguntas.

## Natureza elétrica da matéria

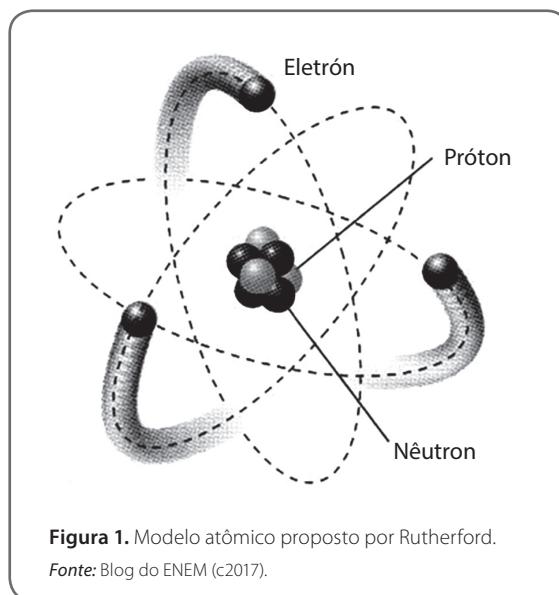
Desde o século XIX, cientistas investigam e propõem explicações sobre a constituição da matéria, ou seja, desenvolvem um modelo atômico.

Um desses modelos atômicos muito utilizados para compreender a natureza elétrica da matéria é o desenvolvido no decorrer do século XX, por Ernest Rutherford (1871-1937), e aperfeiçoado por Niels Bohr (1885-1962). Nesse

modelo, o átomo é formado por partículas menores, como elétrons, prótons e nêutrons.

Na visão de Rutherford e Bohr, os elétrons orbitam o núcleo atômico, no qual dispõem-se os prótons e os nêutrons, formando um agrupamento surprendentemente coeso. Tal modelo é bastante semelhantemente à representação planetária, onde os astros orbitam o Sol, que analogamente é o núcleo, e os elétrons comportam-se como os astros. A região onde os elétrons encontram-se é definida por eletrosfera.

Esse modelo atômico está representado na Figura 1.



**Figura 1.** Modelo atômico proposto por Rutherford.

*Fonte:* Blog do ENEM (c2017).

Por meio de estudos sobre os fenômenos elétricos, foi possível verificar experimentalmente que prótons e elétrons têm comportamentos elétricos opostos. Por exemplo, se confrontarmos um corpo carregado com alguma dessas cargas, e em determinada circunstância um for atraído, o outro será repelido. Se um for desviado para a direita, o outro será para a esquerda. Essas propriedades estão associadas ao poder de atração ou repulsão que essas partículas apresentam.

Por isso, define-se carga elétrica como uma propriedade intrínseca das partículas fundamentais de que é feita a matéria. Em outras palavras, é uma propriedade associada à própria existência das partículas (HALLIDAY; RESNICK, 2012).

A Eletricidade é baseada nos conceitos de carga elétrica e, assim, ela torna-se tão importante quanto o conceito de massa para a Mecânica.

Em todos os objetos, existe uma imensa quantidade de cargas elétricas, todavia raramente observamos essas propriedades, pois a maioria dos corpos contém quantidades iguais de dois tipos de cargas: as cargas positivas e as negativas.

Quando ocorre essa igualdade, ou esse equilíbrio, de cargas, dizemos que o objeto está eletricamente neutro. Sendo assim, a carga total do corpo é zero. Utilizando o mesmo raciocínio, quando a quantidade de cargas positivas e negativas de um objeto for diferente, a carga total será diferente de zero. Dizemos, assim, que o corpo está eletricamente carregado.

É valido notar que a diferença entre as quantidades de cargas negativas e positivas é sempre muito menor do que as quantidades absolutas dessas cargas em qualquer objeto.

Os corpos eletricamente carregados interagem, exercendo uma força sobre outros corpos.

Você provavelmente já deve ter tomado um choque ao descer do carro. Isso ocorre porque o carro em movimento atrita-se com as moléculas de ar, carregando-se eletricamente. Quando você encosta nele, as cargas elétricas acumuladas são transferidas a você, produzindo a sensação de choque.

Observando esses fenômenos, foi possível determinar a Lei de Atração e Repulsão, ou Lei das Cargas Elétricas, onde partículas com cargas de mesmo sinal repelem-se, e partículas com cargas de sinais diferentes atraem-se.

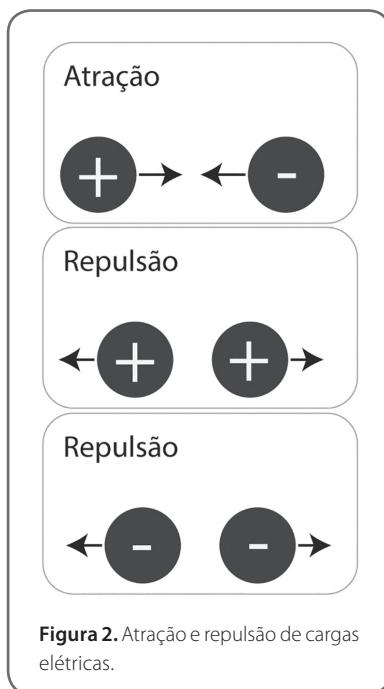
Essas forças são geralmente observadas quando as partículas estão próximas, tendo em vista que a força diminui com o aumento da distância entre as cargas.

Vamos considerar as seguintes situações:

- Dois corpos neutros estão próximos o suficiente para haver atração ou repulsão; não haverá interação entre eles, pois os dois corpos são eletricamente neutros.
- Dois corpos são eletrizados com cargas de sinais opostos e colocados próximos o suficiente para haver atração ou repulsão; nesse caso, haverá uma atração mútua.

- Dois corpos eletrizados com cargas de sinais iguais e próximos o suficiente para haver atração ou repulsão repelem-se reciprocamente.
- Um corpo eletrizado e um outro neutro são colocados próximos o suficiente para haver atração ou repulsão; o corpo eletrizado atrai o neutro.

Tais situações são expressas na Figura 2.



Segundo o modelo de Rutherford-Bohr, elétrons e prótons são as menores partículas integrantes do átomo, e suas cargas elétricas são as menores existentes na natureza.

O próton possui uma massa quase 2 mil vezes maior que a do elétron. Apesar disso, a quantidade de carga elétrica dos dois é igual, em valor absoluto. Este valor absoluto foi definido como carga elétrica elementar, simbolizado por “e”, cujo valor foi encontrado de forma experimental, pela primeira vez, pelo físico estadunidense Robert Andrews Millikan (1868-1953), por meio da experiência que levou seu nome, a Experiência de Millikan.



## Saiba mais

### A Experiência de Millikan

A fim de determinar o valor da carga do elétron, Robert Millikan avaliou o comportamento de gotículas de água eletrizadas submetidas à força peso e força elétrica, que atuavam simultaneamente.

Millikan borrou gotículas eletrizadas entre duas placas carregadas com sinais contrários (+ e -), localizadas no interior de um recipiente com vácuo. Consequentemente, as gotículas foram submetidas à força peso e à elétrica. As cargas da placa estavam reguladas de modo que as gotículas ficassesem em equilíbrio. Nessa situação, a força elétrica e a força peso são iguais em módulo. Com esse procedimento, pode-se igualar as forças e, assim, calcular a quantidade de carga presente em uma gotícula (VÁLIO et al., 2016).

Um elétron tem uma carga que vale  $-e$ , e um próton tem carga  $+e$ , ou seja, ambos possuem cargas iguais à carga elétrica elementar, porém com sinais opostos.

A quantidade de carga  $Q$  de qualquer corpo ou objeto corresponde à quantidade total de elétrons que esse corpo recebeu ou doou em relação ao seu estado eletricamente neutro. Para calculá-la, multiplicamos a quantidade de elétrons em ganhados ou cedidos pelo valor absoluto da carga elementar:

$$Q = \pm n \cdot e \quad (n \in \mathbb{Z})$$

O sinal da carga elétrica indicará o estado de eletrização do corpo e, a partir dele, obtemos as seguintes conclusões:

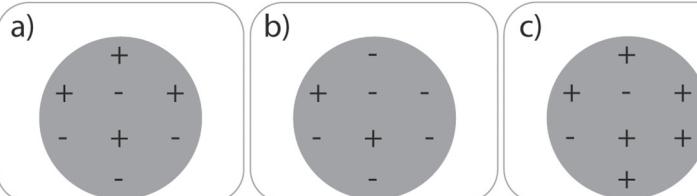
- Se o corpo tiver carga positiva (+), quer dizer que o número de prótons será maior que o de elétrons; portanto, o corpo perdeu elétrons em relação ao estado eletricamente neutro.
- Se o corpo tiver carga negativa (-), significa que o número de elétrons é maior que o número de prótons; portanto, o corpo ganhou elétrons em relação ao estado eletricamente neutro.

Vamos considerar um corpo neutro: se este perder elétrons, ele ficará carregado positivamente; e se ganhar elétrons, ficará eletrizado negativamente.

Observe que tratamos a eletrização como o acúmulo ou a falta de elétrons, pois eles são partículas eletrizadas presentes em todos os átomos e que podem mover-se pela eletrosfera com maior facilidade que os prótons presos ao núcleo.

Contudo, não há impedimento para ocorrer a eletrização por recebimento ou doações de partículas elétricas positivas, como, por exemplo, no acréscimo de íons de prata ( $\text{Ag}^+$ ) em uma solução iônica, sob condições específicas.

A Figura 3 representa corpos eletricamente neutro, eletrizado negativamente e eletrizado positivamente.



**Figura 3.** Corpo a) eletricamente neutro, b) eletrizado negativamente e c) eletrizado positivamente.

A soma algébrica das quantidades de carga elétrica contidas em um sistema eletricamente isolado (que não realiza trocas de carga) é uma constante. Isso constitui o *princípio de conservação de cargas elétricas*.

Vamos considerar inicialmente três objetos,  $A, B$  e  $C$ , eletrizados e com cargas elétricas de  $Q_A, Q_B$  e  $Q_C$ , respectivamente. Após terem realizado transferências de cargas entre si, em um sistema eletricamente isolado, adquirem os seguintes valores de cargas:  $Q'_A, Q'_B$  e  $Q'_C$ .

Segundo o *princípio de conservação de cargas*, temos:

$$Q_A + Q_B + Q_C = Q'_A + Q'_B + Q'_C \rightarrow \sum Q_{\text{antes}} = \sum Q_{\text{depois}}$$

Note que, no decorrer dos processos de eletrização, os elétrons não são criados e nem destruídos; eles são apenas trocados entre um corpo e outro, conforme estabelece o princípio de conservação de cargas.



## Exemplo

Três corpos carregados com  $Q_1 = 2\mu C$ ,  $Q_2 = -4\mu C$  e  $Q_3 = 6\mu C$ , encontram-se em um sistema eletricamente isolado. Depois de algumas trocas de cargas entre eles, os corpos 2 e 3 ficaram com cargas  $Q'_2 = -2\mu C$  e  $Q'_3 = 3\mu C$ . Pede-se o seguinte:

1. Determine a carga final do corpo 1 ( $Q'_1$ ).
2. O corpo 1 cedeu ou recebeu elétrons? Calcule o número de elétrons do corpo 1 após as transferências.
3. Após a troca de cargas, haverá atração ou repulsão entre os corpos 1 e 3? Explique.

### Resolução:

1. Pelo princípio de conservação de cargas elétricas, temos:

$$\begin{aligned}\sum Q_{\text{antes}} &= \sum Q_{\text{depois}} \\ Q_1 + Q_2 + Q_3 &= Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 \\ 2\mu C + (-4\mu C) + 6\mu C &= Q'_1 + (-2\mu C) + 3\mu C \\ 4\mu C &= Q'_1 + 1\mu C \\ Q'_1 &= 3\mu C\end{aligned}$$

2. A quantidade de carga transferida pelo corpo 1 é dada por:

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= Q'_1 - Q_1 \\ \Delta Q_1 &= 3\mu C - 2\mu C \\ \Delta Q_1 &= 1\mu C\end{aligned}$$

Para calcular o número de elétrons envolvidos nessas trocas, temos:

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= n \cdot e \\ 1\mu C &= n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} C \\ n &= 6,25 \cdot 10^{12} \text{ elétrons}\end{aligned}$$

3. Após as trocas de cargas,  $Q'_1 = +3\mu C$  e  $Q'_3 = +3\mu C$ , portanto, segundo o princípio de atração e repulsão de cargas elétricas, cargas de mesmo sinal repelem-se.

## Propriedades de condutores e isolantes

As características dos condutores e dos isolantes (não condutores) devem-se à estrutura e às propriedades elétricas dos átomos.

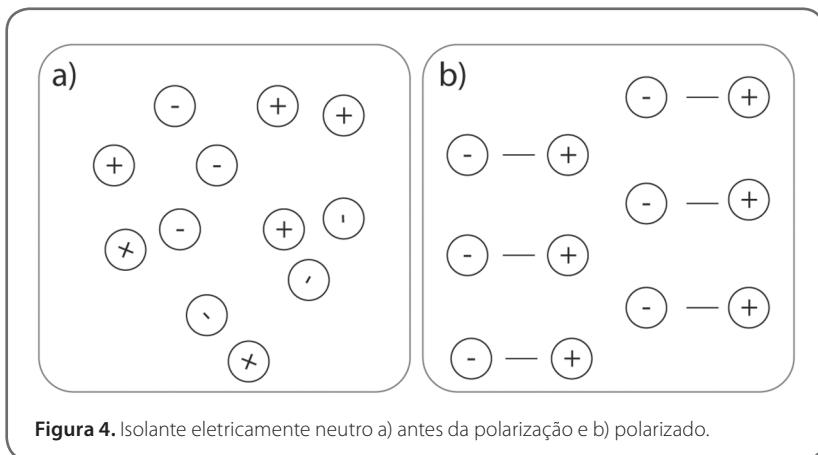
Os materiais podem ser classificados conforme a facilidade com a qual as cargas elétricas deslocam-se no seu interior. Temos, então:

- Nos **condutores** — como os metais, o grafite, as soluções eletrolíticas, os gases ionizados, o corpo humano, a superfície da Terra, entre outros —, as cargas elétricas movem-se com facilidade.
- Nos **não condutores**, ou isolantes ou dielétricos — como o ar seco, a água pura, o vidro, o plástico, a seda, a lã, o enxofre, a parafina, a madeira, a cortiça, a borracha, entre outros —, as cargas não se movem.
- Os **semicondutores** — como o germânio, o silício, entre outros — têm propriedades elétricas ora iguais aos dos condutores e ora iguais aos dos isolantes.
- Os **supercondutores** são condutores perfeitos, ou seja, materiais nos quais as cargas deslocam-se sem qualquer resistência.

Durante a formação de um sólido de material condutor, elétrons que estão mais afastados do núcleo — estando, portanto, mais fracamente atraídos — tornam-se livres e vagam pelo material. Esse processo gera átomos positivamente carregados, íons positivos. A facilidade de ceder ou receber elétrons livres uns dos outros faz com que conduzam eletricidade. Esses elétrons livres recebem o nome de **elétrons de condução**. Os materiais isolantes possuem um número muito reduzido, ou mesmo nulo, de elétrons de condução.

Os materiais condutores são assim chamados por conduzirem eletricidade — e mesmo que os materiais dielétricos não conduzam eletricidade, eles podem ser eletrizados. Geralmente isso ocorrerá em duas situações:

1. Um material isolante permanece com a carga elétrica localizada na região em que recebeu ou doou elétrons. Essa região atuará como um polo positivo ou negativo e exercerá atração ou repulsão sobre corpos com os quais interagir.
2. Ao submeter-se a forças elétricas externas, substâncias não condutoras formadas de moléculas polares podem orientar-se no interior do dielétrico. Dessa maneira, o objeto ainda permanece eletricamente neutro, tendo em vista que sua carga total permanece nula, porém agora estará polarizado e poderá atrair ou repelir outros objetos devido às polaridades que o corpo apresentará (Figura 4).



**Figura 4.** Isolante eletricamente neutro a) antes da polarização e b) polarizado.

## Processos de eletrização

Um corpo é eletricamente neutro quando as quantidades de prótons e elétrons contidas nele forem iguais. Um corpo onde há excesso de uma dessas partículas, dizemos que está eletrizado.

Existem diferentes processos para eletrizar corpos neutros, que são: eletrização por contato, eletrização por atrito e eletrização por indução.

Na **eletrização por contato**, no mínimo, um dos corpos deve estar previamente eletrizado. Os corpos são aproximados, fazendo com que ocorra o contato entre eles, acarretando, assim, na transferência de carga. É importante entender que, na eletrização por contato, os corpos ficam com cargas do mesmo sinal que o objeto previamente eletrizado.

Esse processo de eletrização por contato está representado na Figura 5.

a)



Atração

b)



Repulsão

**Figura 5.** Eletrização por contato, onde a) os corpos atraem-se antes do contato e b) os corpos repelem-se depois do contato.



### Fique atento

Se o objeto eletrizador A e o eletrizado B forem esféricos e de mesmo material, com raios  $R_A$  e  $R_B$  diferentes, parte da carga do corpo A é transferida para o corpo B, obedecendo à proporcionalidade dos raios das esferas. Dessa forma, a relação entre as quantidades de cargas dos corpos ( $Q'_A$  e  $Q'_B$ ) após o contato será proporcional aos seus raios, ou seja:

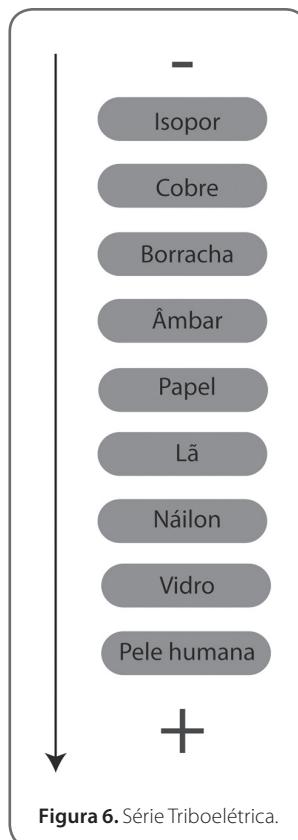
$$\frac{Q'_A}{Q'_B} = \frac{R_A}{R_B}$$

Particularmente quando temos duas esferas iguais, de mesmo material e mesmo raio, depois de realizado o contato, cada uma delas terá metade da quantidade de carga total que havia antes do contato.

**A eletrização por atrito** dá-se quando atritamos dois corpos de materiais diferentes, podendo ocasionar trocas de elétrons entre os objetos envolvidos. Após o atrito, um dos corpos estará carregado negativamente, pois recebeu elétrons do outro objeto. Consequentemente, o segundo corpo, que cedeu os elétrons, ficará eletrizado positivamente.

Esse tipo de eletrização pode ser facilmente demonstrado da seguinte maneira: atrite uma régua plástica em uma folha de caderno repetidamente e em um único sentido; separe pequenos pedaços de papel picado (eletricamente neutros) e aproxime a régua deles; você verá que os pedaços de papel são atraídos para a régua, comprovando que o objeto está carregado e eletrizado pelo processo de atrito.

Nesse tipo de eletrização, ao final do processo, os corpos adquirem cargas de sinais opostos. A fim de determinar qual dos corpos cederá e qual receberá elétrons, devemos consultar a Série Triboelétrica, conforme a Figura 6.



**Figura 6.** Série Triboelétrica.

A Série Triboelétrica informa o material que ficará eletrizado negativamente e o que será carregado positivamente.

Os materiais à esquerda ficaram carregados negativamente e os mais à direita eletrizaram-se positivamente.

Assim, se atritarmos um isopor contra nossa pele, supondo que os dois corpos estão electricamente neutros, a pele humana cederá elétrons ao isopor. Sendo assim, o isopor ficará carregado negativamente e a pele, positivamente.

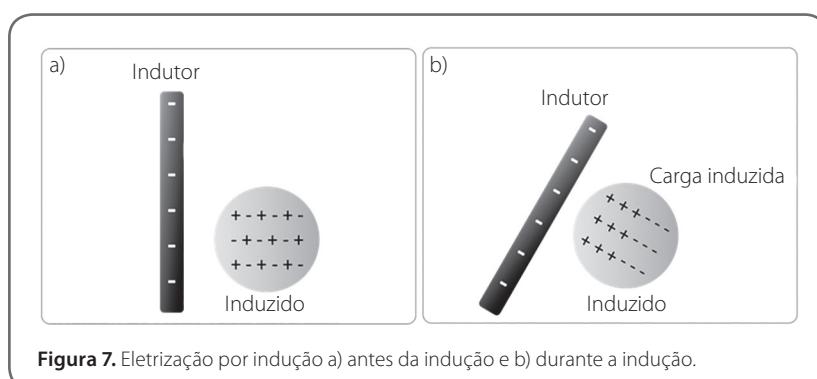
A eletrização por atrito acontece devido aos elétrons dos materiais, que estão mais fracamente ligados aos núcleos — elétrons mais afastados —, serem transferidos para o outro material. Sobre a eletrização por atrito, ainda é importante considerar os seguintes fatos:

- Nem sempre é possível eletrizar dois corpos por atrito. Por exemplo, quando atritamos dois corpos de mesmo material, poderá não acontecer a troca de elétrons entre eles.
- Na eletrização por atrito de corpos não condutores ou isolantes, o excesso de cargas permanecerá localizado na região do corpo onde ocorreu o atrito, semelhante ao ocorrido na eletrização por contato.
- Na eletrização por atrito de materiais condutores, as cargas distribuir-se-ão por toda a sua superfície. Tal fenômeno ocorre devido à repulsão das cargas elétricas no interior do material, fazendo, assim, com que as cargas fiquem o mais distante possível umas das outras.
- Para manter um corpo eletrizado, é necessário isolá-lo, utilizando, por exemplo, um material dielétrico como apoio.

Na eletrização por indução, é possível eletrizar um corpo neutro sem a necessidade de encostar dois corpos, seja por atrito ou contato.

Quando um condutor eletrizado, chamado de *indutor*, é aproximado de um condutor neutro, denominado “*induzido*”, ocorre uma indução eletrostática, ou seja, a separação de cargas no corpo neutro. Aproximando os corpos sem contato, ocorrerá uma movimentação de cargas no *induzido*.

A eletrização por indução está representada na Figura 7.



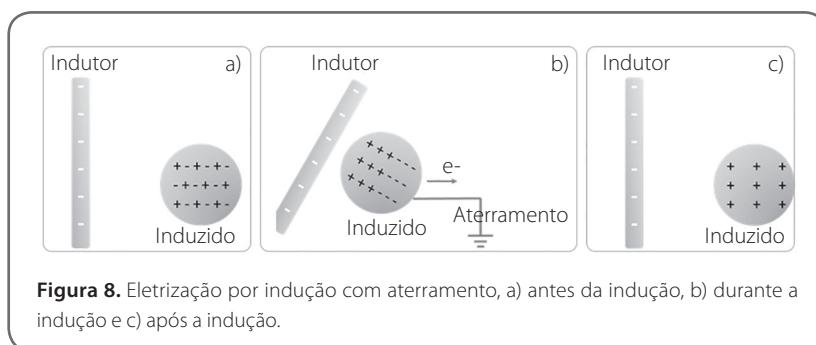
**Figura 7.** Eletrização por indução a) antes da indução e b) durante a indução.

A seguir, na Figura 8, está apresentada uma situação específica com indução eletrostática, em que é colocado um fio no condutor induzido, ligando-o ao solo. A essa ligação dá-se o nome de “aterramento”, pois possibilita o deslocamento de cargas através do fio condutor à Terra. Quando a carga de um objeto é neutralizada pela retirada do excesso de cargas negativas ou positivas através do solo, dizemos que o objeto foi descarregado.

O solo, por ser um corpo muito extenso, geralmente pode ser tratado como um corpo infinito em relação à maioria dos objetos, o que significa que a distribuição não altera em nada as propriedades dele, e, portanto, pode comportar-se doando ou recebendo elétrons. Sendo assim, a carga no induzido depende somente do indutor e tem sinal contrário à sua carga.

A eletrização por indução é temporária, ocorrendo enquanto o indutor estiver suficientemente próximo ao induzido. Para que o corpo permaneça eletrizado após a retirada do indutor, é necessário que ocorra o aterramento. Assim, ao final de uma eletrização por indução, os corpos envolvidos adquirem cargas de sinais opostos, assim como no processo de eletrização por atrito.

Note ainda que esse processo de eletrização dá-se em condutores, pois, em isolantes, as cargas elétricas movimentam-se pouco ou não no interior do objeto.



**Figura 8.** Eletrização por indução com aterramento, a) antes da indução, b) durante a indução e c) após a indução.



## Referências

BLOG DO ENEM. *Modelos atômicos e partículas: a estrutura do átomo – química ENEM.* [S.l.]: Blog do ENEM, [c2017]. Disponível em: <<https://blogdoenem.com.br/modelos-atomaticos-particulas-quimica-enem/>>. Acesso em: 19 jan. 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos de física*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. (Eletromagnetismo, v. 3).

VÁLIO, A. B. M. et al. *Ser protagonista: Física*. 3. ed. São Paulo: Edições SM, 2016. v. 3.

## Leituras recomendadas

BAUER, W.; WESTFALL, G.; DIAS, H. *Física para universitários*. Porto Alegre: AMGH, 2012. (Eletricidade e Magnetismo, v. 3).

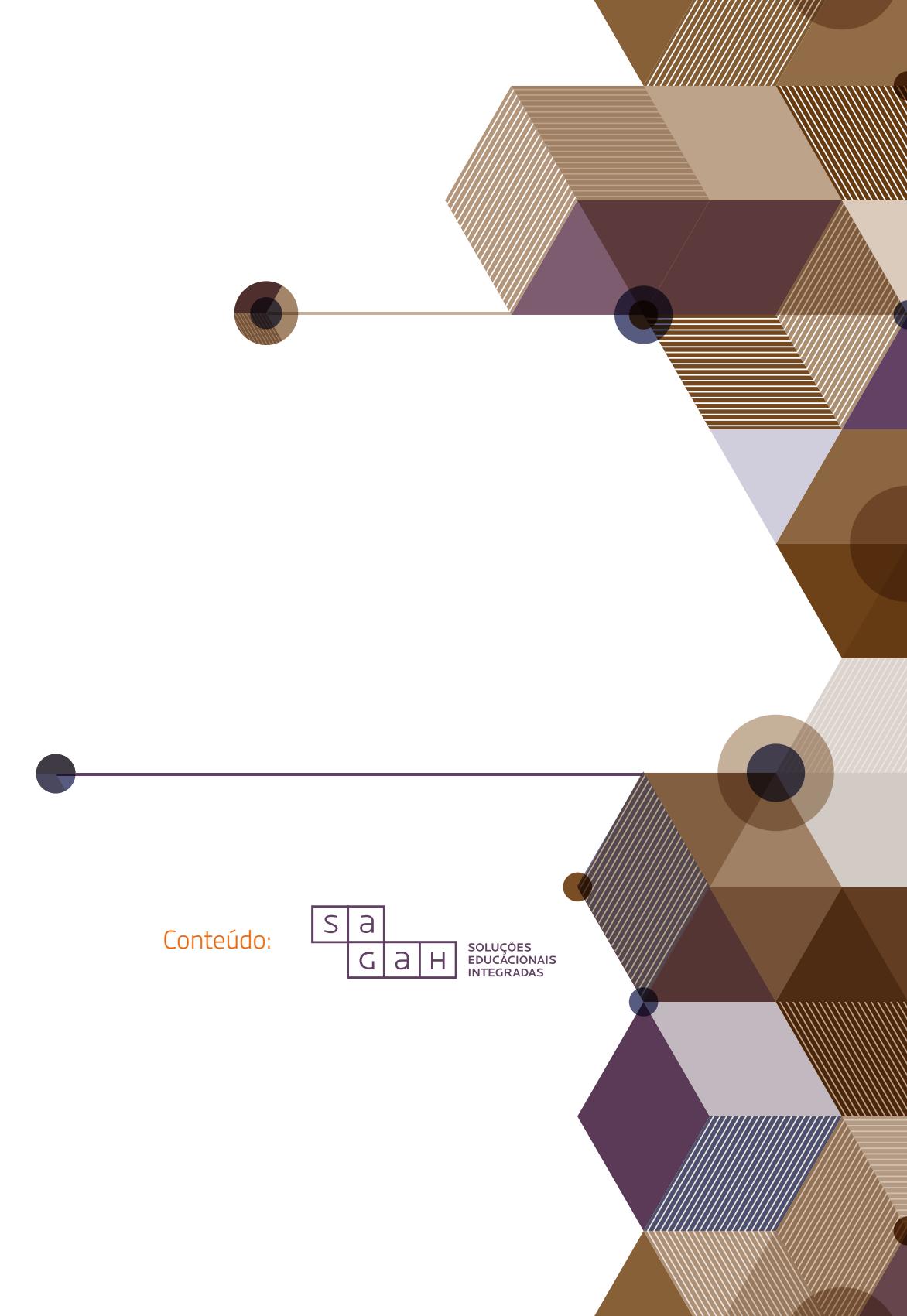
FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T.; FOGO, R. *Física básica*. 3. ed. São Paulo: Atual, 2009.

YAMAMOTO, K.; FUKE, L. F. *Física para o ensino médio*. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2017. (Eletricidade e Física Moderna, v. 3).

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física III: eletromagnetismo*. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

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





Conteúdo:



SOLUÇÕES  
EDUCACIONAIS  
INTEGRADAS