AULA

39

Alta voltagem

PARA COMEÇAR

Ernesto e Roberto estavam construindo alguns aparelhos para o estudo da eletrostática. Para isso, seguiam as descrições de um livro.

Ernesto tinha recortado um retângulo de papel de uns 10 × 25 cm. Em seguida prendeu duas tirinhas de papel de bala na parte central desse retângulo, uma de cada lado do papel. Depois, prendeu tudo em dois canudos de refresco fixados em massa de modelar (Figura 1). Isto feito, carregou o conjunto, por contato, com um canudo de refresco que tinha sido atritado com papel para ficar carregado. As duas tirinhas de papel, uma de cada lado da folha, afastaram-se, mostrando que nos dois lados da folha existiam cargas elétricas (Figura 2).

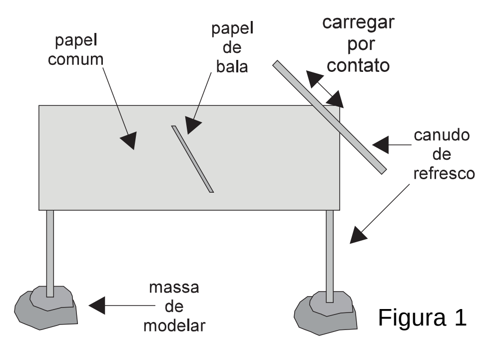


Figura 1

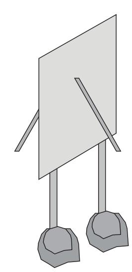
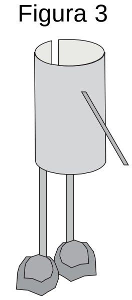


Figura 2

Figura 3


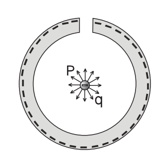


Figura 4

Ernesto então juntou os dois canudos de refresco, transformando a folha de papel numa superfície cilíndrica sem tocar no papel (Figura 3). Dessa maneira, uma das tirinhas de papel de bala ficou para fora do cilindro e a outra ficou na sua parte interna.

O que Ernesto observou foi que a tirinha externa abriu um pouco mais, enquanto a tira interna fechou. Parecia que dentro do cilindro de papel não existiam cargas elétricas. E era verdade. As cargas, num condutor (vimos que o papel pode ser um condutor), situam-se em sua parte externa. Para comprovar isso mais uma vez, Ernesto inverteu o modo de fechar o papel para formar o cilindro. Agora a tirinha que estava dentro ficou para fora e vice-versa. E o fato se repetiu. A tirinha interna permaneceu fechada e a externa abriu-se bastante.

As cargas estão todas localizadas na superfície externa do cilindro. Então, se considerarmos um ponto P dentro do cilindro (Figura 4), o campo gerado por essas cargas vai ser nulo. Isso porque, se colocarmos nesse ponto uma carga de prova positiva q, ela vai ser atraída igualmente por todos os lados. Dessa maneira, podemos fazer duas afirmações que são de grande importância:

1. Num condutor carregado, as cargas se localizam nas partes mais periféricas do mesmo.
2. O campo no interior de um condutor é nulo.

Como estão distribuidas as cargas na periferia de um condutor?

Fique ligado

Ernesto ainda estava intrigado com a maneira pela qual as cargas se distribuem num condutor.

– Veja! – disse a Roberto, repetindo o experimento que tinha realizado. – As cargas ficam sempre na parte externa do papel. Mas elas ficam sempre direitinhas?

– Como direitinhas? – perguntou Roberto.

– Sempre à mesma distância umas das outras.

– Isso vai depender do formato do corpo onde estão as cargas.

– Ainda não entendi!

Com a mão na massa

– Veja um experimento descrito aqui no livro. Ele mostra que nem sempre as cargas ficam separadas igualmente umas das outras. Vamos construir um igual!

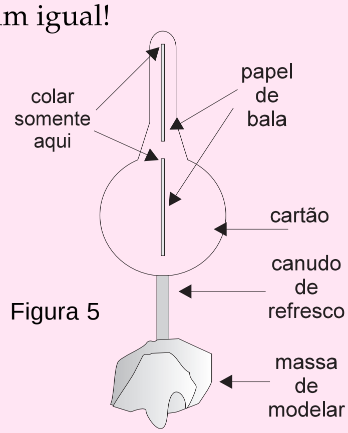


Figura 5

Roberto recortou, num pedaço de cartão, uma espécie de raquete com uns 15 cm de altura e 8 cm de largura. Em seguida, colou nessa figura duas tirinhas de papel de bala. Uma na parte superior, outra aproximadamente na metade da raquete. As tirinhas eram coladas apenas pela parte superior. Depois ele prendeu na parte posterior do cartão um canudo de refresco e espetou o conjunto num pedaço de massa de modelar. (Figura 5)

Em seguida, usando um canudo carregado por atrito, Roberto carregou o corpo da raquete por contato. Observou que a tirinha superior ficava mais aberta do que a tirinha que estava na posição inferior (Figura 6). Disse então para Ernesto:

– A tirinha de cima fica mais aberta que a de baixo porque lá temos mais cargas. Isso porque essa região é mais estreita que a região de baixo. As cargas vão se acumular nos lugares mais pontiagudos. Esse efeito é chamado **poder das pontas**.

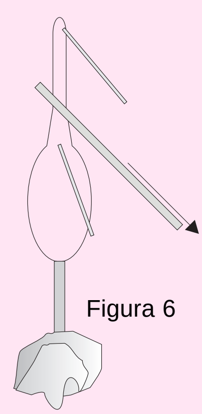


Figura 6

– Mas por que as cargas vão para as pontas e ficam espremidas lá, em lugar de se espalhar regularmente, de maneira uniforme? – perguntou Ernesto.

– Deixe eu tentar explicar. Vamos supor que eu tenha uma esfera ou um disco carregado. As cargas, nesse caso, estão espalhadas uniformemente. Veja este desenho que fiz. Uma carga q é empurrada por duas cargas vizinhas q_1 e q_2 com forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$. As forças são iguais porque as distâncias são iguais.

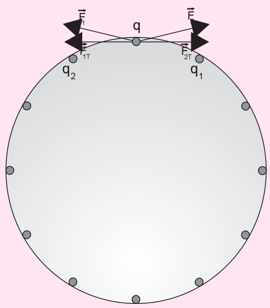


Figura 7

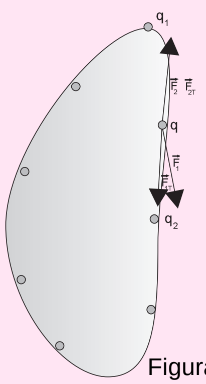


Figura 8

Essas forças tentam empurrar a carga q para os lados e para fora. Como a carga q não pode sair do corpo, seu movimento só pode existir para os lados. As componentes das forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ são, respectivamente, $\vec{F}_{1T}$ e $\vec{F}_{2T}$, que são também iguais, pois F_1 e F_2 são iguais e q_1 e q_2 estão à mesma distância de q. Logo, a carga q não vai sair do lugar, pois está sendo empurrada por forças iguais, na mesma direção, porém com sentidos contrários. Como a carga não vai mudar de lugar, teremos sempre uma distribuição uniforme de cargas ao longo da periferia da esfera.

Veja agora o que acontece se o objeto tiver uma região mais pontiaguda (Figura 8). Vamos supor ainda que as cargas estejam ditribuidas uniformemente, isto é: mais uma vez a carga q equidista de q_1 e q_2. Teremos também as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, que ainda são iguais, e as forças $\vec{F}_{1T}$ e $\vec{F}_{2T}$, que empurram q tangencialmente.

Acontece que, nesse caso, $\vec{F}_{2T}$ é maior que $\vec{F}_{1T}$, porque $\vec{F}_{2T}$ está praticamente na direção tangente. Então, $\vec{F}_{2T}$ é quase igual a $\vec{F}_2$, enquanto que $\vec{F}_{1T}$ é menor que $\vec{F}_1$. Dessa maneira, a carga q vai ser empurrada na direção de q_1 até que as duas componentes $\vec{F}_{1T}$ e $\vec{F}_{2T}$ se tornem iguais. Então, q ficará mais próxima de q_1 do que de q_2. Assim teremos um acúmulo de cargas nas regiões próximas à ponta do condutor. As cargas acumulam-se nas pontas. É por essa razão que os pára-raios são construídos em forma de pontas.

Para entender um pouco mais esse assunto e aprofundar o estudo da eletrostática, precisamos de novos conceitos: diferença de potencial, voltagem e outros.

Energia potencial elétrica

Estudando o movimento dos corpos quando abandonados à ação do campo gravitacional terrestre, vimos que, quando um objeto de massa m está a uma determinada altura h, ele possui uma energia potencial. Se esse objeto for largado daquela altura, vai ser atraído pela Terra por uma força constante. Ele adquire velocidade e, portanto, energia cinética (Figura 9).

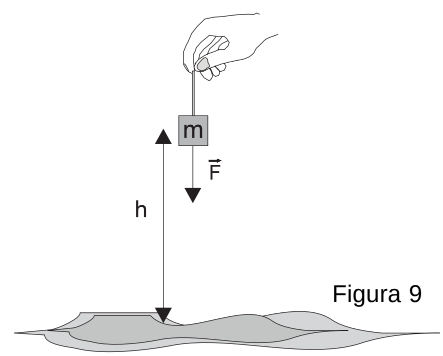


Figura 9

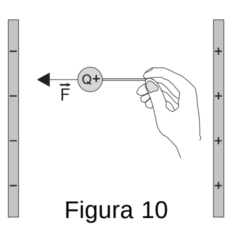


Figura 10

De maneira análoga, se uma carga está entre as placas de um capacitor, essa carga vai sofrer a ação de uma força constante que a empurra na direção de uma das placas. Assim a carga adquire velocidade e, portanto, energia cinética (Figura 10). Então, em cada ponto da região entre as placas de um capacitor, uma carga tem uma energia: uma **energia potencial elétrica**.

Vamos ver como é possível calcular a energia potencial elétrica de uma carga entre as placas de um capacitor por meio de uma comparação com o campo gravitacional. No caso de um objeto na Terra, podemos aumentar a energia potencial do objeto de massa m, elevando-o até uma altura maior. Assim, se ele for solto daquela posição, chegará à Terra com maior velocidade, isto é, com maior energia cinética. Para aumentar a energia potencial, ou seja, para aumentar a altura do objeto, precisamos realizar um trabalho. É possível fazer isso transportando o objeto a um nivel mais alto, sem acelerar esse objeto.

No caso de uma carga entre as placas de um capacitor, para aumentar sua energia potencial elétrica é preciso aumentar a distância entre essa carga e uma das placas do capacitor. Para isso, precisamos exercer uma força sobre essa carga e deslocá-la, ou seja, realizar um trabalho. Também nesse caso o movimento da carga durante o deslocamento deve ser uniforme. Quando executarmos esse trabalho, vamos permitir que a carga chegue à outra placa com maior velocidade. Estaremos aumentando, assim, sua energia potencial elétrica. O trabalho que foi exercido representa o aumento dessa energia.

Como o trabalho é medido pelo produto da força pelo deslocamento Δd, e a força pode ser representada pelo produto do valor do campo E pela carga q, a variação da energia potencial elétrica ΔE_p será representada por:

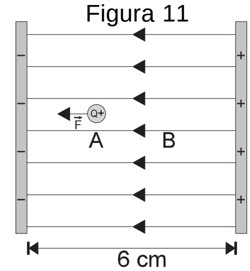
$$\boxed{\Delta E_p = q \cdot E \cdot \Delta d}$$

Passo a passo

Uma partícula cuja massa é $5 \cdot 10^{-8}$ kg possui uma carga de $2 \cdot 10^{-6}$ C e está presa num ponto A, situado a 2 cm da placa negativa de um capacitor de placas paralelas no qual existe um campo de $3 \cdot 10^{3}$ N/C. A distância entre as placas do capacitor é 6 cm e supomos que a influência do campo gravitacional seja nula.

1. Se a carga for solta desse ponto, com que energia cinética chegará à outra placa?
2. Qual seria o trabalho que deveríamos realizar para levar a carga do ponto A a um ponto B situado a 4 cm da placa negativa?
3. Se a carga fosse solta do ponto B, com que energia cinética chegaria à placa negativa?

Figura 11



1. A força, constante, que atua sobre a carga vale:
   $F = E \cdot q$
   $F = 3 \cdot 10^{3}\ \text{N/C} \cdot 2 \cdot 10^{-6}\ \text{C}$
   $F = 6 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$

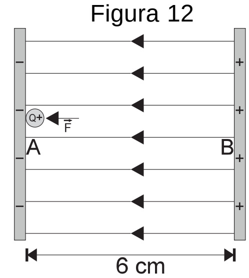
Podemos, agora, calcular a aceleração a que fica submetida a partícula.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{6 \cdot 10^{-3}\text{N}}{5 \cdot 10^{-8}\text{Kg}} = 1{,}2 \cdot 10^{5}\ \text{m/s}^2$$

O movimento é uniformemente variado. Então podemos determinar a velocidade final utilizando a fórmula de Torricelli.

$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta d$
$v^2 = 2 \cdot a \cdot \Delta d$
$v^2 = 2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{5}\text{m/s}^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}\text{m}$
$v^2 = 4{,}8 \cdot 10^{3}(\text{m/s})^2$

Figura 12



A energia cinética ficará assim:

$$E_C = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot 4{,}8 \cdot 10^{3}}{2} = 1{,}2 \cdot 10^{-4}\ \text{J}$$

2. Para calcular o trabalho τ_{AB} necessário para levar a carga do ponto A ao ponto B, usamos o valor da força e do deslocamento. Teremos:

$$\tau_{AB} = 6 \cdot 10^{-3}\ N \cdot 2 \cdot 10^{-2}\ m = 1{,}2 \cdot 10^{-4}\ J$$

3. Se a carga for solta do ponto B, é possivel calcular a velocidade com que atinge a placa negativa e qual a sua energia cinética. Como foi feito anteriomente, teremos:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta d$$
$$v^2 = 2 \cdot a \cdot \Delta d$$
$$v^2 = 2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^5 m/s^2 \cdot 4 \cdot 10^{-2} m$$
$$v^2 = 9{,}6 \cdot 10^3 (m/s)^2$$

A energia cinética ficará assim:

$$E_C = \frac{9{,}6 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-8}}{2} = 2{,}4 \cdot 10^{-4} J$$

Dessa maneira, quando levamos a partícula do ponto A ao ponto B, estamos aumentando sua energia potencial elétrica. Essa variação é medida pelo trabalho que estamos executando para levar a carga de um ponto ao outro. Note que, quando a partícula é solta do ponto A, ela atinge a placa oposta com uma energia cinética de $1{,}2 \cdot 10^{-4}$J. Quando ela é solta do ponto B, chega com uma energia cinética de $2{,}4 \cdot 10^{-4}$J. Ou seja: houve um aumento de energia de $1{,}2 \cdot 10^{-4}$J. Esse aumento de energia é exatamente igual ao trabalho realizado para transportar a carga do ponto A ao ponto B.

Potencial elétrico num campo uniforme

No exemplo anterior, para transportar a carga do ponto A ao ponto B dentro do campo elétrico do capacitor foi necessário realizar um trabalho de $1{,}2 \cdot 10^{-4}$J. O valor da carga transportada era $2 \cdot 10^{-6}$C. Como o trabalho pode ser calculado pela relação

$$\boxed{\tau_{AB} = E \cdot q \cdot \Delta d}$$

se tivéssemos uma carga com o dobro do valor, o valor do trabalho necessário para deslocá-la de entre esses mesmos dois pontos também dobraria. Isto é, se a carga tivesse valor de $4 \cdot 10^{-6}$C, o trabalho necessário para seu transporte seria $2{,}4 \cdot 10^{-4}$J. Se dividirmos o valor do trabalho pelo valor da carga transportada, teremos, no primeiro caso:

$$\frac{\tau_{AB}}{q} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-4} J}{2 \cdot 10^{-6} C} = 60\ J/C$$

No segundo caso, esse valor seria:

$$\frac{\tau_{AB}}{q} = \frac{2{,}4 \cdot 10^{-4} J}{4 \cdot 10^{-6} C} = 60\ J/C$$

Ou seja: dentro desse capacitor, para transportar uma partícula carregada do ponto A ao ponto B, necessitamos efetuar um trabalho de 60 joules para cada coulomb de carga transportado.

Isso pode ser dito de outra maneira. Podemos afirmar que, entre os pontos A e B, existe uma diferença de potencial elétrico de 60 J/C. A relação entre essas duas unidades, joule e coulomb, é tão importante que recebeu um nome próprio: **volt**, cujo símbolo é V.

Finalmente, podemos dizer que entre os pontos A e B do capacitor existe uma difereça de potencial de 60 V. Representaremos a diferença de potencial por ΔV.

Como o trabalho é calculado por $\tau_{AB} = E \cdot q \cdot \Delta d$, a diferença de potencial elétrico entre dois pontos num campo uniforme vai ser dada por:

$$\frac{\tau_{AB}}{q} = \frac{E \cdot q \cdot \Delta d}{q} = E \cdot \Delta d$$

$$\boxed{\Delta V = E \cdot \Delta d}$$

Utilizando essa relação, podemos saber qual a diferença de potencial elétrico entre as duas placas do capacitor que estão separadas por uma distância de 6 cm, ou seja, $6 \cdot 10^{-2}$m. Como o campo vale $3 \cdot 10^{3}$N/C, teremos:

$$\Delta V = E \cdot \Delta d = 3 \cdot 10^{3} \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 180V$$

Faíscas elétricas

Ernesto estava intrigado com o resultado.

– 180 V?! Então isso não pode ocorrer nos aparelhinhos de cartão e papel que estamos construindo. Mesmo que conseguíssemos fazer um capacitor como esse que foi descrito, acho que não poderíamos ter 180 V. Senão, a gente tomaria um choque bem grande se tocasse o dedo no capacitor!

– Não é bem assim. Nós podemos ter dois objetos carregados e que tenham uma grande diferença de potencial elétrico sem que isso cause problemas. Nem sempre um choque de 180 V é perigoso.

– Como? Eu é que não quero tomar um choque desses!

– Não precisa ter medo. Vou mostrar que isso é verdade.

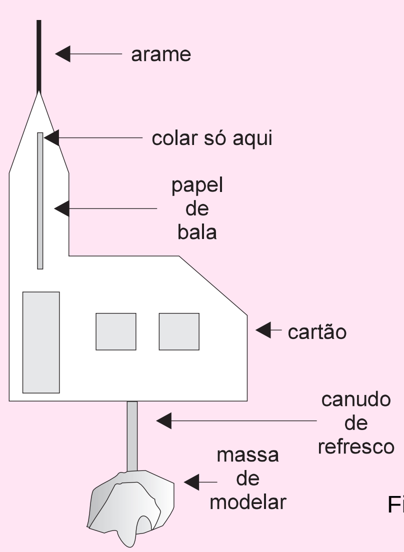


Figura 13

Roberto começou a construir a "igrejinha" que está representada na Figura 13. Ele recortou uma figura parecida com uma igreja e colou uma tirinha de papel de bala na "torre" dela. Depois, com fita adesiva, pregou na igreja um pedaço de arame (para simular um pára-raios) e um canudo de refresco (para servir de suporte). Em seguida, espetou o conjunto num pedaço de massa de modelar. Na realidade, acabara de construir um eletroscópio um pouco modificado.

Roberto carregou um canudo de refresco por atrito e falou para Ernesto:

– Veja, vou passar o canudo de refresco **perto** do arame da igreja. Não vou tocar o arame com o canudo, vou passar o canudo a uma distância de 1 cm do arame. O arame está fazendo o papel do pára-raios da igreja e o canudo representa uma nuvem carregada. Observe o que acontece com a tirinha de papel de bala.

– Ah! Ela começa a subir! A igreja está carregada! (Figura 14)

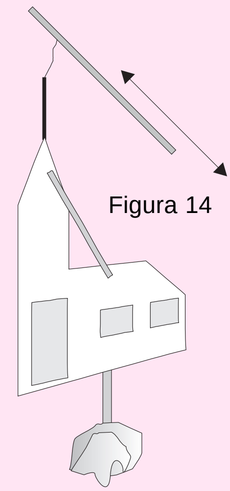


Figura 14

– Exatamente! Mas como ela foi carregada? Por atrito? Por indução? Por contato?

– Humm... Por atrito não foi. Por contato, também não. Poderia ser por indução. Então a carga da tirinha deveria ser contrária à carga do canudo. Coloque o canudo perto da tirinha para eu ver se ela é atraida pelo canudo.

Roberto faz o que Ernesto pede.

– Ih! Foi repelida! O canudo, a tirinha e a igreja, todos têm a mesma carga. Então... A igreja não foi carregada por indução. Nem por atrito, nem por contato, nem por indução. Ora, como então foi carregada a igreja?

– Foi um raio!

– O quê?

– Exatamente isso. Foi uma faísca elétrica. Foi uma faísca elétrica pequena. Quase não dá para perceber. Mas, como você percebeu, as cargas "pularam" do canudo para a igreja. Você viu que as cargas do canudo e da igreja eram do mesmo sinal.

– E como é que acontece isso?

– Você já sabe que as cargas elétricas se acumulam nas regiões pontiagudas dos condutores. Quando aproximamos o canudo do arame, um número muito grande de cargas vai ficar naquela região. Então o campo elétrico vai ficar muito intenso. Tão intenso que é capaz de arrancar elétrons dos átomos do ar. O ar fica **ionizado** e torna-se um bom condutor. Dessa maneira, as cargas passam do canudo à igreja por meio do ar. Mas, para isso, devemos ter um campo de 1.000.000 N/C. Entendeu?

– Mais ou menos. Não entendi direito esse campo.

– Veja, podemos usar outras unidades para o campo elétrico. Em lugar de usar N/C, podemos usar V/m.

A definição de campo nos diz:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{\text{(newtons)}}{\text{(coulombs)}}$$

Porém, como a definição de potencial diz que $\Delta V = E \cdot \Delta d$, podemos dizer que:

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta d} = \frac{\text{(volts)}}{\text{(metros)}}$$

Um campo de 1.000.000 N/C é o mesmo que um campo de 1.000.000 V/m. Podemos falar que esse campo vale 10.000 V/cm. Então, para que o ar se torne condutor, necessitamos de 10.000 V/cm. Como o canudo estava a 1 cm do arame e passaram cargas para a igreja, isso significa que a diferença de potencial entre o canudo e o pára-raios era de **mais de 10.000 V**!

PARA TERMINAR

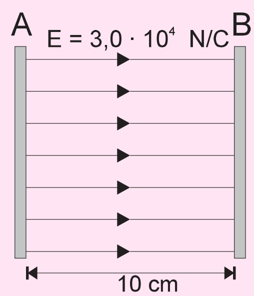
Nesta aula você aprendeu:

- que as cargas, num condutor, estão em suas regiões periféricas;
- que o campo no interior de um condutor é nulo;
- o que é energia potencial elétrica e potencial elétrico;
- que as cargas se acumulam nas regiões pontiagudas dos condutores.

Mãos à obra

Exercício 1

A figura abaixo mostra esquematicamente um capacitor de placas paralelas e as linhas de campo desse capacitor. Qual é a placa positiva? Qual o trabalho para mover um elétron por toda a extensão desse capacitor? Qual a diferença de potencial entre as duas placas? A carga do elétron vale $1,6 \cdot 19^{-19}$C.



Exercício 2

Um capacitor de placas paralelas está submetido a uma diferença de potencial de 100V. A distância entre as placas é 5 cm. Determine a variação de energia potencial elétrica de um elétron que é abandonado na placa negativa e chega à placa positiva. Sabendo-se que a massa do elétron é $9,1 \cdot 10^{-31}$kg, com que velocidade o elétron atinge a placa positiva?