

ELETROSTÁTICA

ELETRIZAÇÃO DE CORPOS

Iniciaremos o estudo sobre cargas elétricas com um experimento. Se atritarmos vigorosamente um canudo de plástico (canudo A na figura 1) com um pedaço de papel e logo depois o pendurarmos com um fio, observaremos que:

- o papel atritado atrai a parte atritada do canudo.
- um segundo canudo de plástico (canudo B), atritado com um outro pedaço de papel, repele a parte atritada do primeiro canudo.

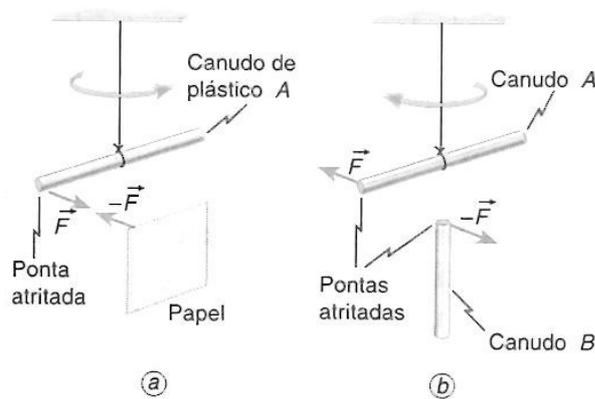


Figura 1 Atração (a) e repulsão (b) entre corpos eletrizados.

Esses experimentos mostram que as interações entre corpos atritados podem ser de atração ou de repulsão. Qual é a origem dessa interação? Por exclusão, podemos dizer que ela não é de origem gravitacional, pois a interação só ocorre após o atritamento dos corpos. Também não é de origem magnética, pois um ímã não atrairia o canudo de plástico nem a folha de papel.

Estudos realizados através dos tempos concluíram que, durante a esfregação, há transferência de elétrons de um corpo para outro, e também que a força de atração ou de repulsão entre os corpos se deve a uma propriedade da matéria denominada de **carga elétrica**. Caracteriza-se, assim, uma interação de origem elétrica.

Como há dois tipos de interação (força) elétrica - atração e repulsão -, os cientistas concluíram que existem dois tipos de carga elétrica, de comportamentos diferentes: a **carga elétrica positiva** e a **carga elétrica negativa**.

O modelo atômico que hoje conhecemos explica a origem da eletricidade. As partículas estáveis do átomo são os prótons, os elétrons e os nêutrons. Os prótons e os elétrons possuem massas muito diferentes, e suas cargas elétricas são opostas, ou seja, a quantidade de carga elétrica é igual para as duas partículas, mas de sinais contrários. Convencionou-se atribuir ao **próton** uma carga elétrica **positiva** e ao **elétron** uma carga elétrica **negativa**. A carga elétrica do nêutron é nula.

Quando nos referimos às cargas elétricas das partículas elementares (prótons e elétrons), estamos identificando o menor valor de quantidade de carga elétrica fisicamente possível. No Sistema Internacional (SI), a unidade de quantidade de carga elétrica é o **coulomb** (C).

O próton e o elétron possuem a mesma quantidade de carga elétrica em módulo, e esse valor é denominado de **quantidade de carga elementar** (e). Esse valor foi obtido experimentalmente por Harvey Fletcher em 1906.

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Como o próton possui carga elétrica positiva, sua quantidade de carga elétrica é representada por $+e$; e a carga do elétron por $-e$.

Em Física, existem grandezas que podem assumir um valor correspondente a qualquer número real: são chamadas de **grandezas contínuas**. Outras grandezas só podem assumir valores que sejam múltiplos de um valor fundamental: são as **grandezas quantizadas**.

Na experiência realizada por Harvey Fletcher, ficou evidenciado que a quantidade de carga elétrica é uma grandeza quantizada, ou seja, não pode assumir qualquer valor. Esse fato levou à conclusão de que a quantidade de carga elétrica (Q) é sempre um número inteiro (n) vezes a quantidade de carga elementar (e):

$$Q = ne$$

A experiência mostra que quando o número de prótons em um átomo (ou em uma molécula) é igual ao número de elétrons, o átomo (ou molécula) é eletricamente neutro. Se o número de prótons for diferente do número de elétrons, teremos um **Íon** (átomo ou molécula eletrizado). Generalizando:

Um corpo está eletrizado quando o número total de prótons (n_p) é diferente do número total de elétrons (n_e).

Matematicamente, essa desigualdade pode ser obtida alterando-se n_p ou n_e . Fisicamente, porém, o acesso aos átomos só é possível na eletrosfera, onde residem os elétrons. Assim, um corpo fica eletrizado quando perde ou recebe elétrons.

Em relação à eletricidade, os materiais são classificados como **condutores ou isolantes**. Para que um material seja condutor de energia elétrica, é necessário que ele possua portadores de carga elétrica livres (elétrons, íons positivos ou íons negativos) e mobilidade para esses portadores. Os metais são bons condutores de eletricidade, pois possuem elétrons "livres" e mobilidade para esses elétrons; o mesmo acontece com as soluções eletrolíticas, que apresentam os íons como portadores de carga elétrica, e com os gases, que possuem elétrons e íons como portadores de carga elétrica.

O vidro, a água pura, a madeira e os plásticos de modo geral são bons isolantes de eletricidade. Além dos condutores e dos isolantes, existem os materiais **semicondutores**, como o silício e o germânio.

Eletrização por atrito

Ao atritar vigorosamente dois corpos, A e B , estamos fornecendo energia para que haja transferência de elétrons de um para o outro. Se os corpos atritados estão isolados, ou seja, não sofrem a influência de quaisquer outros corpos, as cargas elétricas cedidas por um são exatamente as adquiridas pelo outro:

$$Q_A = -Q_B$$

Isto é, A e B adquirem quantidades de carga elétrica iguais em módulo, mas de sinais contrários. A figura 2 representa o que acontece quando um pedaço de metal é atritado com um pano de lã.

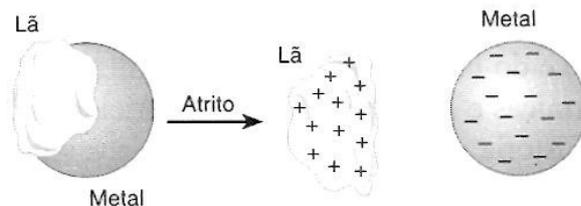
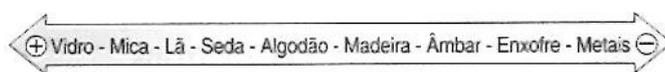


Figura 2 Pano de lã atritado com um pedaço de metal: o pano eletriza-se positivamente; o metal, negativamente.

Aparentemente, a eletrização por atrito é um processo sempre possível. Todavia, algumas condições precisam ser observadas.

Quando esfregamos as mãos, não eletrizamos nenhuma delas. Para que haja eletrização por atrito, uma condição necessária é que os corpos sejam de materiais diferentes, isto é, eles não podem ter a mesma tendência de ganhar ou perder elétrons. Em Química, essa tendência é traduzida por uma grandeza denominada de **eletroafinidade**. Os materiais podem ser classificados de acordo com essa tendência, elaborando-se as chamadas **séries triboelétricas**.



Exemplo de uma série triboelétrica

Ao atritarmos dois materiais quaisquer de uma série triboelétrica, o que estiver posicionado à esquerda ficará eletrizado positivamente; o que estiver à direita ficará eletrizado negativamente.

Na eletrização por atrito, pelo menos um dos corpos deve ser isolante. Se atritarmos dois condutores, eles não vão manter a eletrização.

Eletrização por contato

A eficiência nessa forma de eletrização depende de os corpos serem condutores ou isolantes. Se um dos corpos for isolante, a eletrização será local, isto é, restrita aos pontos de contato. Se os dois corpos forem condutores - um eletrizado e o outro neutro - e colocados em contato, poderemos imaginá-los como um único corpo eletrizado. A separação entre eles resultará em dois corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal.

Na figura 3, um dos condutores está inicialmente neutro (a eletrização por contato pode ocorrer também com dois condutores inicialmente eletrizados).



Figura 3 Eletrização por contato.

Generalizando, podemos afirmar que, na eletrização por contato:

- os corpos ficam ou eletricamente neutros ou com cargas de mesmo sinal;
- quando o sistema é formado por corpos isolados das influências externas, a quantidade de carga elétrica total final é igual à quantidade de carga elétrica total inicial (**princípio da conservação de carga elétrica**):

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B$$

Na expressão, Q representa a quantidade de carga elétrica inicial e Q' a quantidade de carga elétrica final.

Em particular, se os corpos A e B forem iguais:

$$Q'_A = Q'_B = \frac{Q_A + Q_B}{2}$$

Podemos ainda observar que:

- se os corpos colocados em contato são de tamanhos diferentes, a divisão de cargas é proporcional às dimensões de cada um;
- quando um corpo eletrizado é colocado em contato com a Terra, ele se torna neutro, uma vez que sua dimensão é desprezível se comparada com a da Terra. Simbolicamente, a ligação à Terra é representada conforme a figura 4.

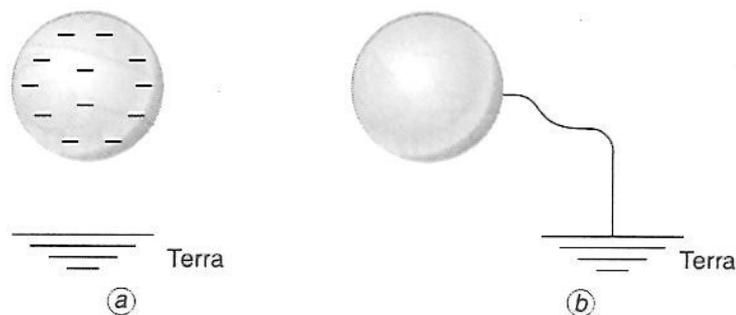


Figura 4 Em (a), o corpo está isolado da Terra e, portanto, mantém sua carga elétrica. Quando o contato com a Terra é estabelecido (b), o corpo se neutraliza.

Eletrização por indução

Nesse tipo de eletrização não há contato entre os corpos. Vejamos como acontece (figura 5). Primeiramente, precisamos de um corpo eletrizado (A), chamado de **indutor**, que pode ser condutor ou isolante, pois não terá contato com o outro. O segundo corpo (B) a ser eletrizado, chamado de **induzido**, deverá ser condutor, podendo ser uma solução eletrolítica ou dois corpos B_1 e B_2 ligados eletricamente.

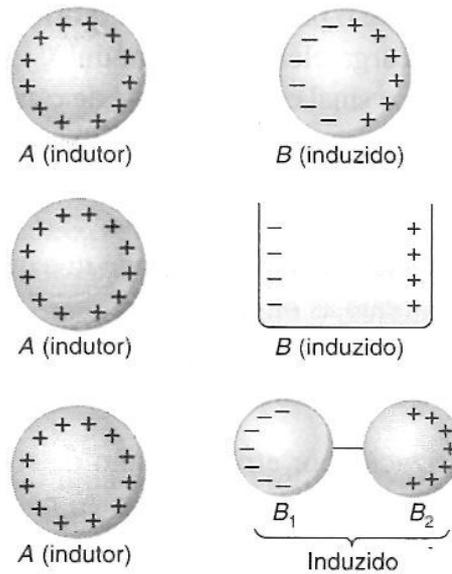


Figura 5 O indutor (corpo *A*) está eletrizado, o induzido (corpo está neutro.

O indutor (*A*), eletrizado positivamente, atrai as cargas elétricas negativas do induzido (*B*). Assim, na face do induzido mais próxima do indutor, temos acúmulo de cargas negativas, que não chegam ao indutor porque o ar entre eles é isolante. Por outro lado, a face do induzido mais afastada do indutor fica positiva.

A essa altura, podemos nos perguntar se o corpo *B* está eletrizado. Ele não está, pois o número de prótons no corpo continua igual ao número de elétrons. Dizemos que o corpo *B* está induzido, porque houve apenas uma separação das cargas. Quando retiramos o indutor, as cargas no induzido se reagrupam e ele volta à situação neutra.

Para eletrizar o induzido, devemos, na presença do indutor, estabelecer o contato do induzido (corpo *B*) com um terceiro corpo, chamado de terra (figura 6). Esse terceiro corpo pode ser um outro corpo qualquer, até mesmo o planeta Terra.

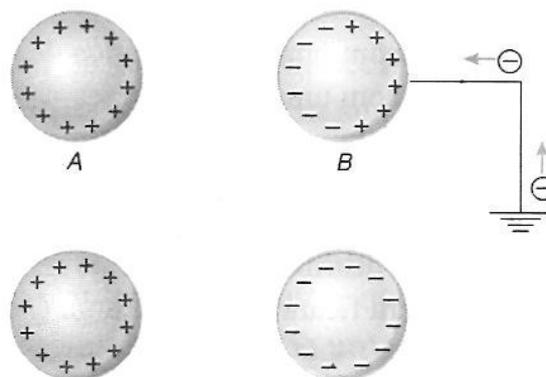
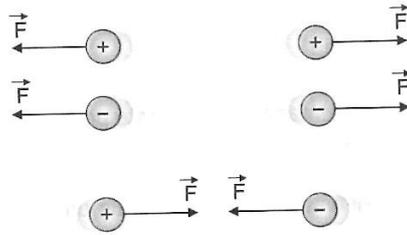


Figura 6 Na presença do indutor, desfazemos o contato entre *B* e a Terra; em seguida, afastamos os corpos: o corpo *B* fica eletrizado com carga oposta à do indutor (*A*).

FORÇA ELÉTRICA

Lei da atração e repulsão

Cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem.

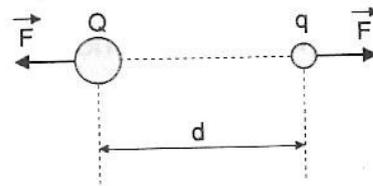


Lei de Coulomb

A intensidade da força de atração ou de repulsão entre duas cargas elétricas é diretamente proporcional ao produto dos valores absolutos das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa.

$$|\vec{F}| = \frac{k \cdot |Q| \cdot |q|}{d^2}$$

Lei de Coulomb



$$\text{no vácuo } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

k = constante eletrostática do meio

Submúltiplos da unidade de carga "coulomb":

$$\begin{aligned} 1 \text{ milicoulomb} &= 1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C} \\ 1 \text{ microcoulomb} &= 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C} \end{aligned}$$

ENERGIA POTENCIAL ELÉTRICA

A **energia potencial elétrica** E_p é uma grandeza escalar (positiva ou negativa) diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional à distância entre elas.

$$E_p = \frac{k \cdot Q \cdot q}{d}$$

CAMPO ELÉTRICO

A região do espaço afetada pela presença de uma carga elétrica é denominada **campo elétrico**.

Para caracterizar um ponto qualquer de um campo elétrico, definem-se duas grandezas: uma **vetorial (vetor campo elétrico)** e outra **escalar (potencial elétrico)**.

Define-se **vetor campo elétrico** \vec{E} como sendo a grandeza vetorial que representa o quociente entre a força elétrica \vec{F} que atua em uma carga de prova e o valor dessa carga q .

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Unidades SI:

F → newton (N)

q → Coulomb (C)

E → N/C

Define-se **potencial elétrico V** como sendo a grandeza escalar que representa o quociente entre a energia potencial elétrica (E_p) adquirida por uma carga de prova e o valor dessa carga (q).

$$V = \frac{E_p}{q}$$

Unidades SI:

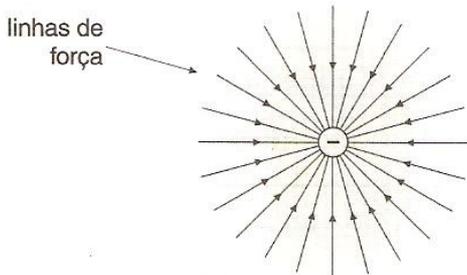
E_p → joule (J)

q → Coulomb (C)

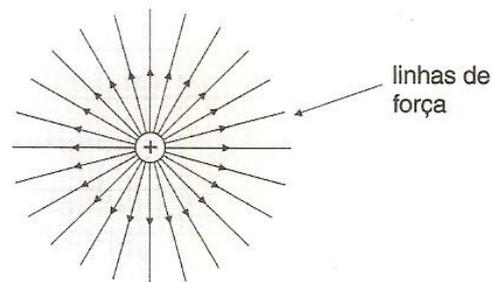
V → volt (V)

$$1V = \frac{1J}{1C}$$

Campo elétrico de uma carga puntiforme



Campo de afastamento ($Q > 0$).



Campo de aproximação ($Q < 0$).

Cálculo de $|\vec{E}|$ a uma distância d de Q

$$|\vec{E}| = \frac{k \cdot |Q|}{d^2}$$

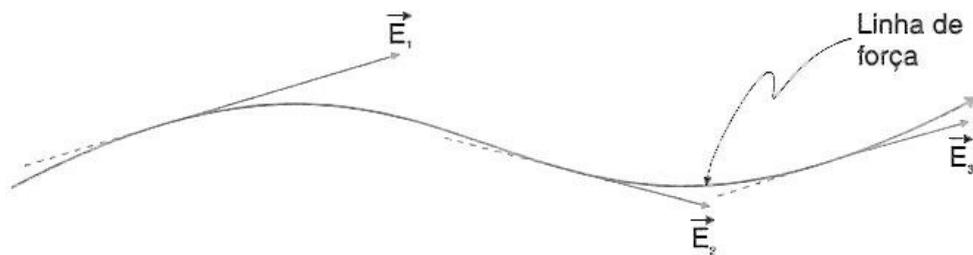
Cálculo de V a uma distância d de Q

$$V = \frac{k \cdot Q}{d}$$

$$\begin{array}{l} Q > 0 \Rightarrow V > 0 \Rightarrow \text{campo de afastamento} \\ Q < 0 \Rightarrow V < 0 \Rightarrow \text{campo de aproximação} \end{array}$$

Linhas de força

São linhas em que o vetor campo elétrico é tangente em cada um de seus pontos, no mesmo sentido.



Duas linhas de força nunca se cruzam e o potencial elétrico decresce no sentido da linha de força.

Com o auxílio das linhas de força, podemos visualizar o campo elétrico gerado por cargas puntiformes ou outros corpos eletrizados.

Superfície eqüipotencial

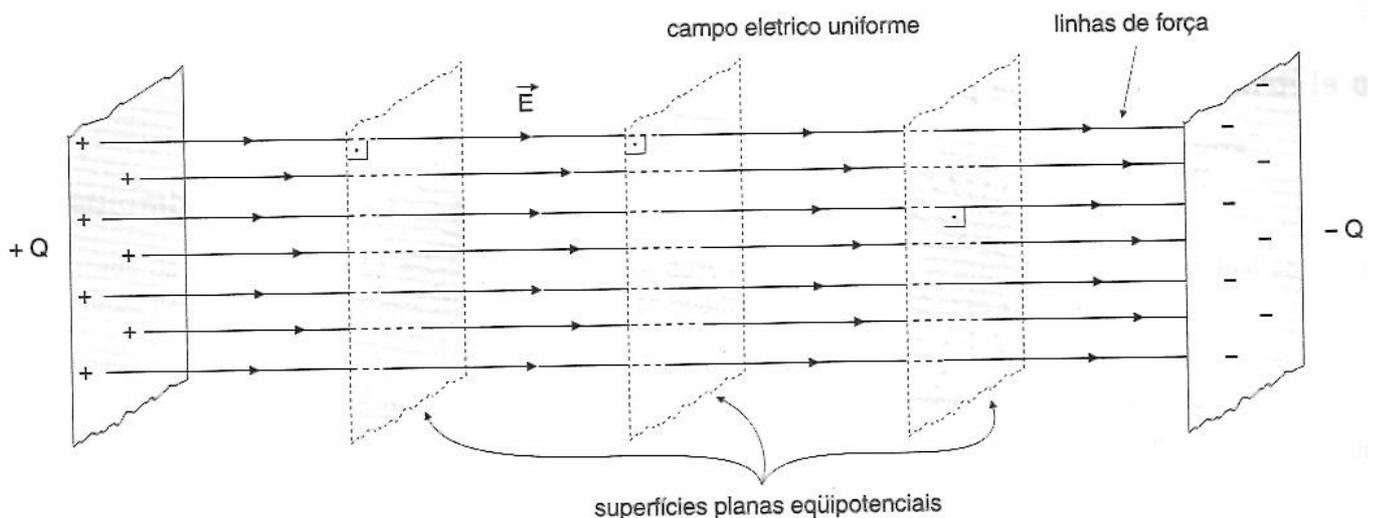
Denomina-se superfície de nível ou superfície eqüipotencial de um campo elétrico toda superfície em cujos pontos o potencial elétrico é constante. Essas superfícies podem ter as mais variadas formas, embora as mais usuais sejam planas ou esféricas.

Uma propriedade importante de uma superfície eqüipotencial é que em cada ponto desta as linhas de força são necessariamente perpendiculares à superfície.

Campo elétrico uniforme

Campo elétrico uniforme é aquele onde o vetor campo elétrico E é o mesmo em todos os pontos. Conseqüentemente, as linhas de força são retas paralelas de mesmo sentido e igualmente espaçadas e as superfícies eqüipotenciais são planos paralelos entre si.

Um campo elétrico uniforme pode ser obtido entre duas placas planas de dimensões muito grandes igualmente eletrizadas com cargas de sinais contrários, como mostra a figura a seguir.



EXEMPLOS

1) Um corpo tem $3 \cdot 10^{18}$ elétrons e $4 \cdot 10^{18}$ prótons. Sendo a carga elétrica elementar $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, qual é a carga elétrica do corpo?

2) Dispõe-se de três esferas metálicas idênticas e isoladas umas das outras. Duas delas, A e B, estão neutras, enquanto a esfera C contém uma carga elétrica Q. Faz-se a esfera C tocar primeiro a esfera A e depois a esfera B. No final desse procedimento, qual a carga elétrica das esferas A, B e C, respectivamente?

3) São dadas três esferas metálicas — A, B e C — idênticas e um pedaço de pano de seda, todos inicialmente neutros. Realiza-se a seguinte seqüência de operações:

I. atrita-se o pano de seda com a esfera metálica A;

II. em seguida, coloca-se a esfera A em contato com a esfera metálica B;

III. finalmente, coloca-se a esfera A em contato com a esfera metálica C.

Sabe-se que o pano de seda adquiriu uma quantidade de carga elétrica, em módulo, igual a $8 \cdot 10^{-10}$ C.

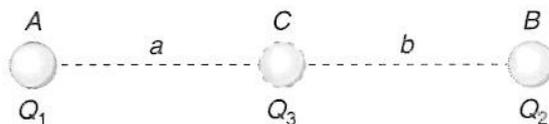
a) Qual será o sinal e a quantidade de carga elétrica de cada um dos corpos após a seqüência de operações?

b) O que acontecerá se, após as três operações citadas, colocarmos as três esferas, A, B e C, em contato, simultaneamente, de modo que qualquer uma sempre toque as outras duas?

4) Duas cargas elétricas puntiformes, Q_1 e Q_2 , estão fixas nos pontos A e B, conforme mostra a figura. Uma terceira carga elétrica, Q_3 , é colocada no ponto C e pode se mover livremente sobre a linha que une as cargas Q_1 e Q_2 .

a) Suponha que as cargas Q_1 e Q_2 sejam ambas positivas e que a carga Q_3 seja negativa. Represente vetorialmente na figura as forças elétricas que agem na carga Q_3 e estabeleça as condições para que ela permaneça em equilíbrio no ponto C.

b) Considere $Q_1 = +2 \mu\text{C}$, $Q_2 = +4 \mu\text{C}$, $Q_3 = -1 \mu\text{C}$, $a = 3 \text{ cm}$ e $b = 2 \text{ cm}$. Sendo $k = 9 \cdot 10^9 \text{ (N}\cdot\text{m}^2)/\text{C}^2$, determine a força elétrica resultante sobre a carga Q_3 .



5) Duas cargas elétricas puntiformes e iguais são colocadas a 3 m uma da outra no vácuo e se repelem com uma força de intensidade $F = 0,4 \text{ N}$. Determine o valor das cargas. Dado: $k_0 = 9 \cdot 10^9$ unidades (SI).

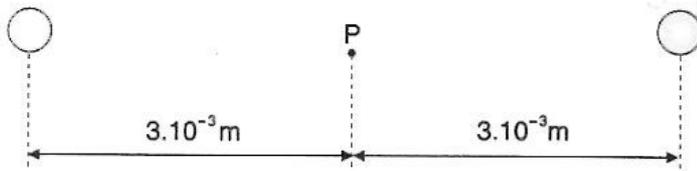
6) Uma carga elétrica puntiforme $Q = -1,0 \mu\text{C}$ gera um campo elétrico no vácuo. Determine o potencial elétrico e a intensidade do vetor campo elétrico num ponto situado a 3 m da carga. Dado: $k_0 = 9 \cdot 10^9$ unidades (SI).

7) Determine a intensidade do vetor campo elétrico resultante e o potencial elétrico total no ponto P da figura abaixo, considerada no vácuo.

Dado: $k_0 = 9 \cdot 10^9$ unidades (SI)

$$Q_1 = 1,0 \mu\text{C}$$

$$Q_2 = 5,0 \mu\text{C}$$



EXERCÍCIOS

1) É dado um corpo eletrizado com carga $6,4 \mu\text{C}$.

a) Determine o número de elétrons em falta no corpo. A carga do elétron é $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

b) Quantos elétrons em excesso tem o corpo eletrizado com carga -16 nC ?

2) Um corpo tem $2 \cdot 10^{18}$ elétrons e $4 \cdot 10^{18}$ prótons. Como a carga elétrica de um elétron (ou de um próton) vale, em módulo, $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, podemos afirmar que o corpo está carregado com uma carga elétrica de:

a) $-0,32 \text{ C}$

b) $0,32 \text{ C}$

c) $0,64 \text{ C}$

d) $-0,64 \text{ C}$

3) Julgue (Vou F) as seguintes afirmações:

I. Na eletrização por atrito, os dois corpos ficam carregados com cargas de módulos iguais, porém de sinais contrários.

II. Na eletrização por contato, os corpos ficam eletrizados com cargas de mesmo sinal.

III. No processo de indução eletrostática, o corpo induzido se eletrizará sempre com cargas de sinal contrário às do indutor.

4) Têm-se 4 esferas idênticas, uma carregada eletricamente com carga Q e as outras eletricamente neutras. Colocando-se, separadamente, a esfera eletrizada em contato com cada uma das outras esferas, a sua carga final será de:

a) $\frac{Q}{4}$

c) $\frac{Q}{16}$

e) $\frac{Q}{64}$

b) $\frac{Q}{8}$

d) $\frac{Q}{32}$

5) Um corpo A, com carga $Q_A = 8 \mu\text{C}$, é colocado em contato com um corpo B, inicialmente neutro. Em seguida, são afastados um do outro. Sabendo que a carga do corpo B, após o contato, é de $5 \mu\text{C}$, calcule a nova carga do corpo A.

6) Considere duas esferas, A e B, idênticas e isoladas eletricamente. As esferas A e B possuem cargas respectivamente iguais a $3 \mu\text{C}$ e $1 \mu\text{C}$. Colocam-se as duas esferas em contato.

a) Qual a carga final de cada esfera?

b) Qual o número de elétrons transferidos da esfera A para a B?

7) Duas cargas elétricas puntiformes de $5 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ e $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, no vácuo, estão separadas entre si por uma distância de 5 cm. Calcule a intensidade da força de repulsão entre elas.

8) Nos pontos A e B do vácuo ($k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$) são colocadas as cargas elétricas puntiformes $Q_A = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ e $Q_B = 6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, respectivamente. A força de repulsão entre essas cargas tem intensidade de 1,2 N. A distância entre os pontos A e B é:

- a) 20 cm b) 36 cm c) 48 cm d) 60 cm e) 72 cm

9) Duas pequenas esferas condutoras idênticas, separadas por uma distância d e carregadas com cargas elétricas Q e $3Q$, repelem-se com a força de $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ N}$. Suponha, agora, que as esferas são postas em contato e, finalmente, levadas de volta às suas posições originais.

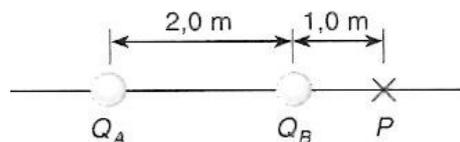
- a) Qual é a carga final de cada esfera?
b) Qual é a nova força de repulsão entre elas?

10) Duas cargas, q_1 e q_2 , de mesmo sinal, estão fixas sobre uma reta e distantes 4 m. Entre q_1 e q_2 é colocada outra carga, q_3 , distante 1 m de q_1 . Sabendo que $q_1 = 5 \mu\text{C}$ e que q_3 permanece em equilíbrio, determine o valor de q_2 .

11) Sobre uma reta são fixadas, a 30 cm uma da outra, as cargas elétricas $+Q$ e $-4Q$ puntuais. Uma terceira carga, também puntual, é colocada sobre a reta num ponto P, onde permanece imóvel, mesmo estando totalmente livre. As distâncias de P a $+Q$ e de P a $-4Q$ são, em cm, respectivamente, iguais a:

- a) 6 e 24 b) 10 e 40 c) 24 e 6 d) 30 e 60 e) 60 e 30

12) Duas partículas com cargas $Q_A = +1,0 \text{ nC}$ e $Q_B = +2,0 \text{ nC}$ estão posicionadas conforme indica a figura. Determine o módulo do campo elétrico resultante no ponto P, em N/C.

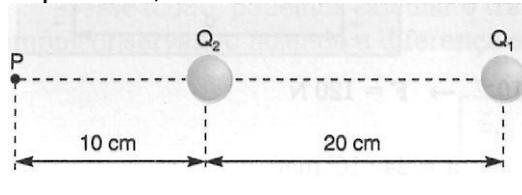


13) Uma carga puntiforme q produz um campo elétrico de módulo $E_1 = 32 \text{ N/C}$ num ponto que está a uma distância r dessa carga. Determine:

- a) o módulo E_2 do campo elétrico produzido pela carga puntiforme q num ponto P que está a uma distância $2r$ dessa carga.
b) o módulo da força que a carga q exerce sobre outra carga puntiforme $q_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, colocada no ponto P.

14) Duas cargas puntiformes de $4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ e $-5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ estão fixas e separadas entre si, no vácuo, pela distância de 6 cm. Determine a intensidade do vetor campo elétrico no ponto médio M do segmento que une as cargas. (Dados: $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.)

15) Uma carga puntiforme positiva $Q_1 = 18 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ dista, no vácuo, 20 cm de uma carga puntiforme negativa $Q_2 = -8,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$, conforme a figura. Qual é a intensidade do vetor campo elétrico \vec{E} criado por essas duas cargas no ponto P , sendo $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$?



16) Determine o potencial de um ponto P , situado a 30 cm de uma carga de $-6 \mu\text{C}$. Considere a carga e o ponto P no vácuo ($k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$).

17) Duas cargas elétricas puntiformes, valendo $-8 \mu\text{C}$ e $6 \mu\text{C}$, ocupam dois vértices de um triângulo equilátero de 0,4 m de lado, no vácuo. Determine o potencial do outro vértice do triângulo.

18) Duas cargas puntiformes de valores Q e $-3Q$ estão separadas por uma distância de 104 cm, conforme a figura. O ponto A e pontos infinitamente distantes das cargas têm potencial nulo. Determine, em centímetros, a distância entre a carga $-3Q$ e o ponto A .

