P.23 Dados: $q = 10^{-9}$ C; $F_e = 10^{-2}$ N (vertical, descendente);

a) Intensidade:

$$E = \frac{F_e}{|q|} \Rightarrow E = \frac{10^{-2}}{10^{-9}} \Rightarrow \boxed{E = 10^7 \text{ N/C}}$$

Direção: **vertical** (a mesma de $\vec{F}_e$)

Sentido: **descendente** (o mesmo de $\vec{F}_e$, pois $q > 0$)

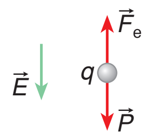
b) Sendo $q' = 3\ \mu C = 3 \cdot 10^{-6}$ C, temos:

$$F'_e = |q'|E \Rightarrow F'_e = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^7 \Rightarrow \boxed{F'_e = 30 \text{ N}}$$

Direção: **vertical** (a mesma de $\vec{E}$)

Sentido: **descendente** (o mesmo de $\vec{E}$, pois $q' > 0$)

P.24 a) Dados: $E = 5 \cdot 10^3$ N/C (vertical, descendente); $P = 2 \cdot 10^{-3}$ N



Intensidade:

$$F_e = P \Rightarrow \boxed{F_e = 2 \cdot 10^{-3} \text{ N}}$$

Direção: **vertical**

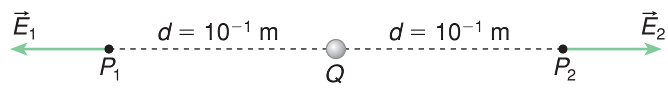
Sentido: **ascendente** (oposto ao do peso, pois a pequena esfera fica em equilíbrio)

b) $F_e = |q| \cdot E \Rightarrow 2 \cdot 10^{-3} = |q| \cdot 5 \cdot 10^3 \Rightarrow |q| = 0{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ C} \Rightarrow |q| = 4 \cdot 10^{-7}$ C

A carga tem sinal negativo ($\vec{F}_e$ e $\vec{E}$ têm sentidos opostos). Portanto:

$$\boxed{q = -4 \cdot 10^{-7} \text{ C}}$$

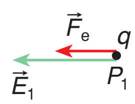
P.25 Dados: $Q = 10^{-5}$ C; $k_0 = 9 \cdot 10^9 \ \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$



Em P_1: $E_1 = k_0 \cdot \dfrac{|Q|}{d^2} \Rightarrow E_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{10^{-5}}{10^{-2}} \Rightarrow \boxed{E_1 = 9 \cdot 10^6 \text{ N/C}}$ (horizontal; para a esquerda)

Em P_2: $E_2 = k_0 \cdot \dfrac{|Q|}{d^2} \Rightarrow E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{10^{-5}}{10^{-2}} \Rightarrow \boxed{E_2 = 9 \cdot 10^6 \text{ N/C}}$ (horizontal; para a direita)

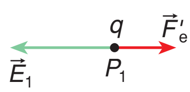
Carga $q = 1\ \mu$C $= 10^{-6}$ C colocada em P_1:



$F_e = |q| \cdot E_1 \Rightarrow F_e = 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^6 \Rightarrow \boxed{F_e = 9 \text{ N}}$

$\vec{F}_e$ tem o sentido e a direção de $\vec{E}_1$.

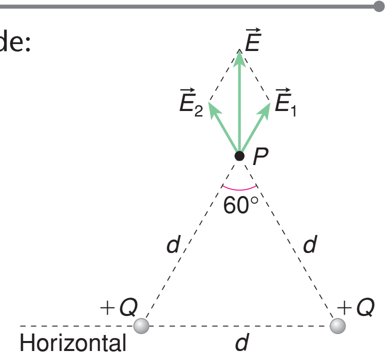
Carga $q = -\ 1\mu$C $= -\ 10^{-6}$ C colocada em P_1:



$F'_e = |q| \cdot E_1 \Rightarrow F'_e = 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^6 \Rightarrow \boxed{F'_e = 9 \text{ N}}$

$\vec{F}'_e$ tem a direção de $\vec{E}_1$ e sentido contrário.

P.26 a) Os vetores campo $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ têm a mesma intensidade:



$E_1 = E_2 = k_0 \cdot \dfrac{|Q|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{10^{-6}}{(0{,}3)^2}$

$E_1 = E_2 = 10^5$ N/C

O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}$ tem direção vertical, sentido ascendente e intensidade que pode ser calculada pela lei dos cossenos:

$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos 60°$

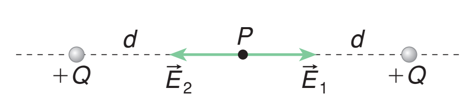
$E^2 = (10^5)^2 + (10^5)^2 + 2 \cdot 10^5 \cdot 10^5 \cdot \dfrac{1}{2}$

$E^2 = 3 \cdot (10^5)^2$

$\boxed{E = 10^5 \cdot \sqrt{3} \text{ N/C}}$

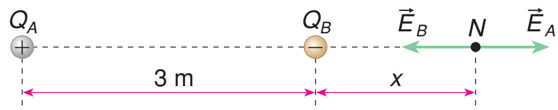
b) O vetor campo resultante em P é nulo:

$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{0} \Rightarrow \boxed{\vec{E} = \vec{0}}$



P.27 Dados: $Q_A = 8\ \mu C$; $Q_B = -2\mu C$

No ponto N, onde o campo elétrico resultante é nulo, os vetores do campo criado pela carga Q_A ($\vec{E}_A$) e do campo criado pela carga Q_B ($\vec{E}_B$) devem ter sentidos opostos e mesma intensidade. Isso só é possível à direita de B:



$$E_A = k_0 \cdot \frac{|Q_A|}{d_A^2} \Rightarrow E_A = k_0 \cdot \frac{8}{(3 + x)^2}$$

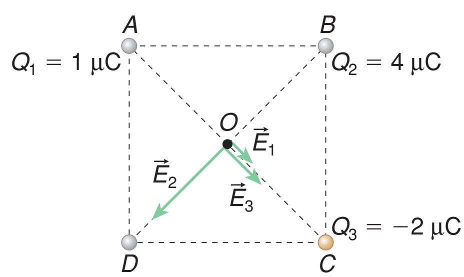
$$E_B = k_0 \cdot \frac{|Q_B|}{d_B^2} \Rightarrow E_B = k_0 \cdot \frac{2}{x^2}$$

$$E_A = E_B \Rightarrow k_0 \cdot \frac{8}{(3 + x)^2} = k_0 \cdot \frac{2}{x^2} \Rightarrow \frac{4}{(3 + x)^2} = \frac{1}{x^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 4x^2 = (3 + x)^2 \Rightarrow 2x = 3 + x \Rightarrow \boxed{x = 3\ \text{m}}$$

O ponto N, onde o campo elétrico resultante é nulo, deve estar a 3 metros à direita de B.

P.28



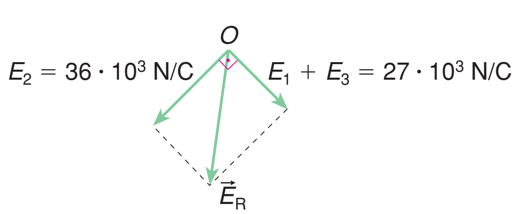
$$d = \frac{L\sqrt{2}}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}}{2} \Rightarrow d = 1\ \text{m}$$

$$E_1 = k_0 \cdot \frac{|Q_1|}{d^2} \Rightarrow E_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{1^2} \Rightarrow E_1 = 9 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

$$E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q_2|}{d^2} \Rightarrow E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{1^2} \Rightarrow E_2 = 36 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

$$E_3 = k_0 \cdot \frac{|Q_3|}{d^2} \Rightarrow E_3 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{1^2} \Rightarrow E_3 = 18 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

No ponto O, temos:



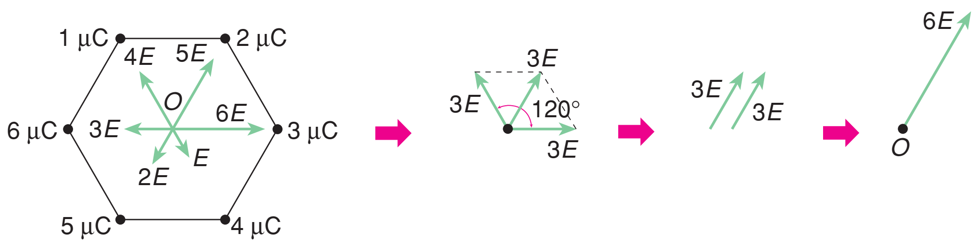
O teorema de Pitágoras permite achar a intensidade do vetor campo elétrico resultante em O:

$$E_R^2 = E_1^2 + E_2^2 \Rightarrow E_R^2 = (36 \cdot 10^3)^2 + (27 \cdot 10^3)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_R = 45 \cdot 10^3 \text{ N/C} \Rightarrow \boxed{E_R = 4{,}5 \cdot 10^4 \text{ N/C}}$$

Uma carga elétrica colocada no ponto D origina em O um vetor campo elétrico que tem a direção da reta $\overleftrightarrow{DO}$; portanto, nunca poderá anular o vetor campo $\vec{E}_R$ produzido por Q_1, Q_2 e Q_3 em O.

P.29 Chamando de E a intensidade do campo que a carga 1 μC origina no centro O do hexágono, temos:



O vetor campo elétrico resultante tem intensidade:

$$E_R = 6E = 6 \cdot k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2} \Rightarrow E_R = 6 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0{,}3)^2} \Rightarrow \boxed{E_R = 6 \cdot 10^5 \text{ N/C}}$$

P.30 a) O campo elétrico é mais intenso nas proximidades da carga q_1, onde há uma maior concentração de linhas de força.

b) A carga q_1 é positiva ($q_1 > 0$), pois as linhas de força estão partindo dela. A carga q_2 é negativa ($q_2 < 0$), pois as linhas de força estão chegando a ela.

Portanto, o produto $q_1 \cdot q_2$ é negativo: $\boxed{q_1 \cdot q_2 < 0}$

P.31 A mínima velocidade com que a partícula deve ser lançada de A corresponde a atingir B com velocidade nula. A equação de Torricelli fornece:

$$v_B^2 = v_A^2 + 2\alpha \cdot \Delta s \Rightarrow 0 = v_{\text{mín.}}^2 + 2\alpha \cdot \Delta s$$

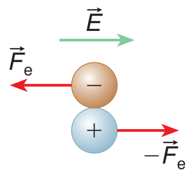
Para o cálculo da aceleração, apliquemos a equação fundamental da Dinâmica:

$$F = ma \Rightarrow qE = ma \Rightarrow a = \frac{qE}{m} \Rightarrow a = \frac{0{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5}{10^{-7}} \Rightarrow a = 10^5 \text{ m/s}^2$$

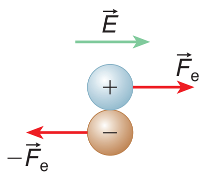
Na equação de Torricelli, sendo $\alpha = -a = -10^5$ m/s² e $\Delta s = 0{,}2$ m, temos:

$$0 = v_{\text{mín.}}^2 - 2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}2 \Rightarrow \boxed{v_{\text{mín.}} = 200 \text{ m/s}}$$

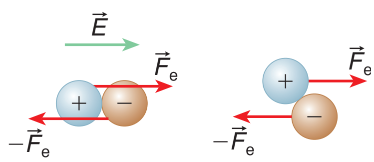
P.32 Analisemos as várias situações apresentadas:

a) 

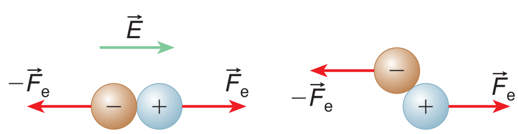
A molécula não está em equilíbrio. Ela está sob a ação do binário constituído por $-\vec{F}_e$ e $\vec{F}_e$.

b) 

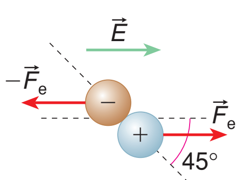
A molécula não está em equilíbrio. Ela está sob a ação do binário constituído por $\vec{F}_e$ e $-\vec{F}_e$.

c) 

O equilíbrio é **instável**, pois girando-se a molécula surge um binário (constituído por $\vec{F}_e$ e $-\vec{F}_e$) que a afasta da posição de equilíbrio.

d) 

O equilíbrio é **estável**, pois girando-se a molécula surge um binário (constituído por $\vec{F}_e$ e $-\vec{F}_e$) que a reconduz à posição de equilíbrio.

e) 

A molécula não está em equilíbrio. Ela está sob a ação do binário constituído por $\vec{F}_e$ e $-\vec{F}_e$.

Portanto, a molécula estará em **equilíbrio estável** na posição representada na alternativa **d**. Nessa situação, a molécula se orienta na direção das linhas de força do campo $\vec{E}$ com o polo positivo no sentido de $\vec{E}$.

P.33 Dados: $q = 3 \cdot 10^{-8}$ C; $d = 3$ m; $F_e = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ N; $k_0 = 9 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m^2/C^2

a) $E = \dfrac{F_e}{|q|} \Rightarrow E = \dfrac{1{,}5 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^{-8}} \Rightarrow \boxed{E = 5 \cdot 10^5 \text{ N/C}}$

b) $E = k_0 \cdot \dfrac{|Q|}{d^2} \Rightarrow 5 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{|Q|}{9} \Rightarrow \boxed{|Q| = 5 \cdot 10^{-4} \text{ C}}$

A carga que gera o campo pode ser positiva ($Q = +5 \cdot 10^{-4}$ C) ou negativa ($Q = -5 \cdot 10^{-4}$ C).

P.34 a) Do gráfico: $E = 18 \cdot 10^3$ N/C para $d = 1$ m

Logo:

$$E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2} \Rightarrow 18 \cdot 10^3 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{|Q|}{1} \Rightarrow |Q| = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{C} \Rightarrow \boxed{Q = +2 \cdot 10^{-6}\ \text{C}}$$

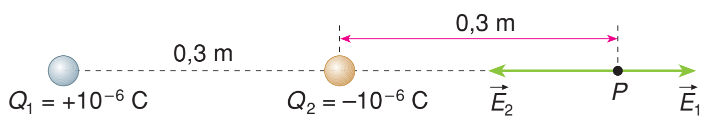
b) Para $q = -10^{-5}$ C e $d = 2$ m, temos:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|q| \cdot |Q|}{d^2} \Rightarrow F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{4} \Rightarrow \boxed{F_e = 4{,}5 \cdot 10^{-2}\ \text{N}}$$

c) Para $q = 10^{-5}$ C e $d = 1$ m, temos:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|q| \cdot |Q|}{d^2} \Rightarrow F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{1} \Rightarrow \boxed{F_e = 1{,}8 \cdot 10^{-1}\ \text{N}}$$

P.35 a)



$$E_1 = k_0 \cdot \frac{|Q_1|}{d_1^2} \Rightarrow E_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0{,}6)^2} \Rightarrow E_1 = 0{,}25 \cdot 10^5\ \text{N/C}$$

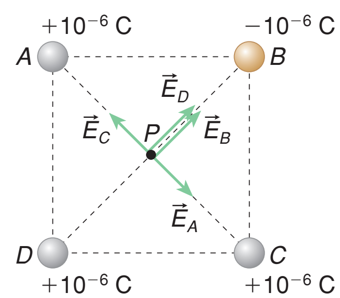
$$E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q_2|}{d_2^2} \Rightarrow E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0{,}3)^2} \Rightarrow E_2 = 10^5\ \text{N/C}$$

O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_R$ tem direção horizontal, sentido para a esquerda e intensidade:

$$E_R = E_2 - E_1 \Rightarrow E_R = 10^5 - 0{,}25 \cdot 10^5 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_R = 0{,}75 \cdot 10^5\ \text{N/C} \Rightarrow \boxed{E_R = 7{,}5 \cdot 10^4\ \text{N/C}}$$

b) Na figura, estão representados os vetores campo componentes.



$$E_A = E_B = E_C = E_D = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0{,}3)^2}$$

$$E_A = E_B = E_C = E_D = 10^5\ \text{N/C}$$

O vetor campo elétrico resultante tem a direção da reta $\overleftrightarrow{BD}$, o sentido de D para B e intensidade:

$$E_R = E_B + E_D \Rightarrow E_R = 10^5 + 10^5 \Rightarrow \boxed{E_R = 2 \cdot 10^5\ \text{N/C}}$$

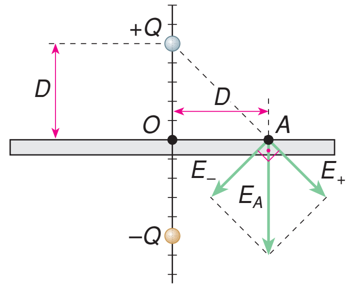
P.36 a) Pela configuração das linhas de força em torno de $+Q$, concluímos que a intensidade da força que age em $+Q$, devida às cargas induzidas na placa (figura I do enunciado) é a mesma com que $-Q$ age em $+Q$:

$$F = k \cdot \frac{Q \cdot Q}{(2D)^2} \Rightarrow F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1{,}5 \cdot 10^{-9})^2}{(2 \cdot 0{,}05)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 2{,}025 \cdot 10^{-6}\ \text{N} \Rightarrow \boxed{F \simeq 2{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{N}}$$

b) De $F = Q \cdot E_0$, vem: $2{,}0 \cdot 10^{-6} = 1{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot E_0 \Rightarrow E_0 \simeq 1{,}3 \cdot 10^3$ V/m

c)



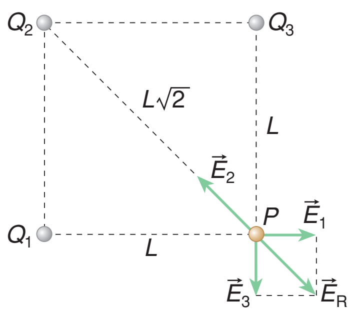
d) $E_+ = E_- = k \cdot \dfrac{Q}{d^2}$ ou de $d^2 = 2D^2$

$$E_+ = E_- = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1{,}5 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot (0{,}05)^2}$$

$$E_+ = E_- = 2{,}7 \cdot 10^3\ \text{V/m}$$

$$E_A^2 = E_+^2 + E_-^2 \Rightarrow E_A^2 = (2{,}7 \cdot 10^3)^2 + (2{,}7 \cdot 10^3)^2 \Rightarrow \boxed{E_A \simeq 3{,}8 \cdot 10^3\ \text{V/m}}$$

P.37 O campo resultante $\vec{E}_R$ dos campos gerados por Q_1 e Q_3 deve ter intensidade igual ao campo gerado por Q_2, conforme mostra a figura ($\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = \vec{0}$).



$$E_1 = E_3 = k_0 \cdot \frac{Q_1}{L^2}$$

$$E_R^2 = E_1^2 + E_3^2 = 2E_1^2$$

$$E_R = \sqrt{2} \cdot E_1$$

$$E_R = \sqrt{2} \cdot k_0 \cdot \frac{Q_1}{L^2}$$

$$E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q_2|}{\left(L\sqrt{2}\right)^2} \Rightarrow E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q_2|}{2L^2}$$

Mas $E_2 = E_R$. Logo:

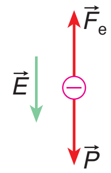
$$k_0 \cdot \frac{|Q_2|}{2L^2} = \sqrt{2} \cdot k_0 \cdot \frac{Q_1}{L^2} \Rightarrow |Q_2| = 2\sqrt{2} \cdot Q_1$$

Como a carga Q_2 deve ser negativa, para que o vetor $\vec{E}_2$ se oponha a $\vec{E}_R$, vem:

$$Q_2 = -2\sqrt{2} \cdot Q_1$$

Substituindo $Q_1 = 4\ \mu$C, teremos: $\boxed{Q_2 = -8\sqrt{2}\ \mu\text{C}}$

P.38 Dados: $P = 10^{-4}$ N; $E = 10^5$ N/C

a) 

Como a força elétrica $\vec{F}_e$ deve equilibrar o peso $\vec{P}$ da esfera, ela deve estar orientada verticalmente para cima.

Sendo a carga da esfera negativa, o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$ deve ser contrário ao da força elétrica $\vec{F}_e$. Portanto, as linhas de força do campo elétrico devem ter **direção vertical** e **sentido de cima para baixo**.

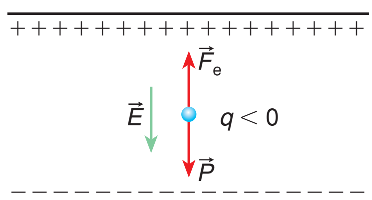
b) Havendo equilíbrio: $F_e = P = 10^{-4}$ N.

Como $F_e = |q| \cdot E$, vem:

$10^{-4} = |q| \cdot 10^5 \Rightarrow |q| = 10^{-9}$ C

A carga é negativa. Então: $\boxed{q = -10^{-9}\ \text{C}}$

c) O equilíbrio da carga é **indiferente**, pois o campo elétrico é uniforme. Em qualquer ponto em que a carga for colocada, a força elétrica (constante) estará equilibrando o peso.

P.39 a) 

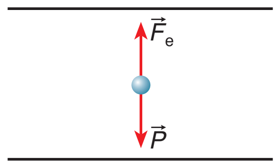
b) Para que a gotícula permaneça em repouso, é necessário que sua carga seja tal que a força elétrica que sobre ela age tenha intensidade igual ao seu peso: $F_e = P$

Como $F_e = |-q| \cdot E$ e $P = mg$, vem:

$$|-q| \cdot E = mg \Rightarrow \boxed{|-q| = \frac{mg}{E}}$$

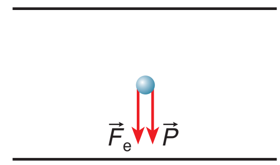
Sendo negativa: $\boxed{-q = -\frac{mg}{E}}$ ou $\boxed{q = \frac{mg}{E}}$

P.40 Dado: $g = 10 \text{ m/s}^2$



Situação inicial:

$F_e = P$



Após a inversão dos sinais das placas:

$F_R = P + F_e = 2P = 2mg$

Aplicando o princípio fundamental da Dinâmica:

$F_R = ma \Rightarrow 2mg = ma \Rightarrow a = 2g \Rightarrow \boxed{a = 20 \text{ m/s}^2}$

P.41 a) $F_e = |q| \cdot E = ma \Rightarrow a = \dfrac{|q| \cdot E}{m} \Rightarrow a = 1{,}76 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}0 \cdot 10^5 \Rightarrow$

$\Rightarrow \boxed{a = 1{,}76 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2}$

b) $v^2 = v_0^2 + 2a \cdot \Delta s \Rightarrow v^2 = 0 + 2 \cdot 1{,}76 \cdot 10^{16} \cdot 8{,}8 \cdot 10^{-3} \Rightarrow$

$\Rightarrow \boxed{v = 1{,}76 \cdot 10^7 \text{ m/s}}$

P.42 Força elétrica:

$F_e = |q| \cdot E \Rightarrow F_e = 10^{-6} \cdot 7 \cdot 10^4 \Rightarrow F_e = 7 \cdot 10^{-2} \text{ N}$

Força peso:

$P = mg \Rightarrow P = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \Rightarrow P = 10 \cdot 10^{-2} \text{ N}$

Força resultante:

$F_R = P - F_e \Rightarrow F_R = 10 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-2} \Rightarrow F_R = 3 \cdot 10^{-2} \text{ N}$

Equação fundamental da Dinâmica:

$F_R = ma \Rightarrow a = \dfrac{F_R}{m} \Rightarrow a = \dfrac{3 \cdot 10^{-2}}{10 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow a = 3 \text{ m/s}^2$

Tempo de subida:

Sendo $v = v_0 + \alpha \cdot t$; $v_0 = 6$ m/s; $\alpha = -3 \text{ m/s}^2$ (subida: MRUV retardado), temos:

$v = 0 \Rightarrow 0 = 6 - 3t_s \Rightarrow 3t_s = 6 \Rightarrow t_s = 2 \text{ s}$

Tempo total (até retornar ao ponto de lançamento): $t_t = 2t_s \Rightarrow \boxed{t_t = 4 \text{ s}}$

P.43 a) $F_e = Mg + F_{elétrica} \Rightarrow F_e = Mg + Q \cdot E \Rightarrow$

$\Rightarrow F_e = 0{,}1 \cdot 10 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^5 \Rightarrow \boxed{F_e = 4\text{ N}}$

b) $R = \dfrac{T_Q}{T_0} \Rightarrow R = \dfrac{2\pi \cdot \sqrt{\dfrac{M \cdot \ell}{F_e}}}{2\pi \cdot \sqrt{\dfrac{M \cdot \ell}{Mg}}} \Rightarrow R = \sqrt{\dfrac{Mg}{F_e}} \Rightarrow R = \sqrt{\dfrac{1}{4}} \Rightarrow \boxed{R = \dfrac{1}{2}}$

c) Sob ação do campo elétrico o período do pêndulo se reduz à metade, isto é, o pêndulo oscila mais rapidamente e o relógio adianta ($T_0 = 2$ s e $T_Q = 1$ s). Na situação inicial o pêndulo completa 1.800 oscilações. Sob ação do campo elétrico o pêndulo completará 3.600 oscilações, indicando o dobro do tempo. Portanto, quando de fato forem 3 horas da tarde, o relógio estará indicando **6 horas da tarde**.