

Lista 04 – Potencial Elétrico e Capacitância

Sequência didática proposta para os exercícios (Cap. 25):

4, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16, 20, 21, 24, 25, 26, 28, 29, 33, 34, 37, 46 e 49 (Halliday)

Sequência didática proposta para os exercícios (Cap. 26):

7, 9, 10, 13, 15, 20, 25, 40, 41, 42, 43, 45 e 47 (Halliday)

Potencial Elétrico (Livro: Fundamentos de Física, 6ª. Ed. Halliday, Resnick e Walker, 2003)

EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

SEÇÃO 25.2 Potencial Elétrico

1E. Uma certa bateria de automóvel de 12 V pode enviar uma carga total de 84 A·h (ampères-hora) através de um circuito, de um terminal ao outro. (a) Quantos coulombs de carga isso representa? (*Dica:* Veja a Eq. 22.3.) (b) Se toda esta carga estiver sujeita a uma diferença de potencial de 12 V, qual a energia envolvida?

2E. A diferença de potencial elétrico entre o solo e uma nuvem em uma determinada tempestade é de $1,2 \times 10^9$ V. Qual a intensidade da variação da energia potencial elétrica (em múltiplos do elétron-volt) de um elétron que se move entre o solo e a nuvem?

3P. Em um determinado relâmpago, a diferença de potencial entre uma nuvem e o solo é de $1,0 \times 10^9$ V e a quantidade de carga transferida é de 30 C. (a) Qual a redução na energia dessa carga transferida? (b) Se toda essa energia pudesse ser usada para acelerar um automóvel de 1000 kg a partir do repouso, qual seria a velocidade final do automóvel? (c) Se a energia pudesse ser usada para derreter gelo, quanto gelo ela derreteria a 0°C? O calor de fusão do gelo é igual a $3,33 \times 10^5$ J/kg.

SEÇÃO 25.4 Calculando o Potencial a partir do Campo

4E. Quando um elétron se move de *A* para *B* ao longo de uma linha de campo elétrico na Fig. 25.29, o campo elétrico realiza sobre ele

$3,94 \times 10^{-19}$ J de trabalho. Quais as diferenças de potencial elétrico (a) $V_B - V_A$, (b) $V_C - V_A$ e (c) $V_C - V_B$?

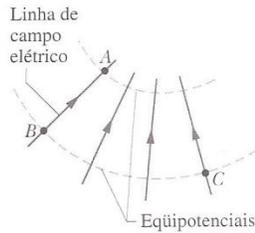


Fig. 25.29 Exercício 4.

5E. Uma placa não-condutora infinita possui uma densidade superficial de carga $\sigma = 0,10 \mu\text{C}/\text{m}^2$ sobre um dos lados. Qual a separação entre as superfícies equipotenciais cujos potenciais diferem de 50 V?

6E. Duas grandes placas condutoras paralelas estão distantes 12 cm uma da outra e possuem cargas de mesma intensidade e sinais contrários sobre suas superfícies vizinhas. Uma força eletrostática de $3,9 \times 10^{-15}$ N atua sobre um elétron colocado em um lugar qualquer entre as duas placas. (Despreze o efeito de borda.) (a) Determine o campo elétrico na posição do elétron. (b) Qual a diferença de potencial entre as placas?

7P. Um contador Geiger possui um cilindro metálico com 2,0 cm de diâmetro e ao longo do seu eixo se estende um fio de $1,3 \times 10^{-4}$ cm de diâmetro. Se a diferença de potencial entre o fio e o cilindro for de 850 V, qual será o campo elétrico na superfície (a) do fio e (b) do cilindro? (Dica: Use o resultado do Problema 23 do Cap. 24.)

8P. O campo elétrico no interior de uma esfera não-condutora de raio R , com a carga distribuída uniformemente em seu volume, possui direção radial e intensidade dada por

$$E(r) = \frac{qr}{4\pi\epsilon_0 R^3}$$

Nesta equação, q (positiva ou negativa) é a carga total dentro da esfera e r é a distância medida a partir do centro da esfera. (a) Tomando $V = 0$ no centro da esfera, encontre o potencial elétrico $V(r)$ dentro da esfera. (b) Qual a diferença de potencial elétrico entre um ponto na superfície da esfera e o centro da esfera? (c) Se q for positiva, qual desses dois pontos está no potencial mais elevado?

9P*. Uma carga q está distribuída uniformemente por todo um volume esférico de raio R . (a) Fazendo $V = 0$ no infinito, mostre que o potencial a uma distância r do centro, onde $r < R$, é dado por

$$V = \frac{q(3R^2 - r^2)}{8\pi\epsilon_0 R^3}$$

(Dica: Veja a Seção 24.9.) (b) Por que este resultado difere do resultado do item (a) do Problema 8? (c) Qual a diferença de potencial entre um ponto sobre a superfície da esfera e o centro da esfera? (d) Por que este resultado não difere daquele do item (b) da Pergunta 8?

10P. A Fig. 25.30 mostra, em vista lateral, uma placa não-condutora infinita com densidade superficial de carga positiva σ sobre um dos lados. (a) Use a Eq. 25.18 e a Eq. 24.13 para mostrar que o potencial elétrico de uma placa infinita de carga pode ser escrita como $V = V_0 -$

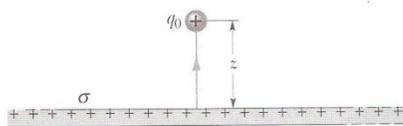


Fig. 25.30 Problema 10.

$(\sigma/2\epsilon_0)_z$, onde V_0 é o potencial elétrico na superfície da placa e z é a distância perpendicular à placa. (b) Qual o trabalho realizado pelo campo elétrico da placa quando uma pequena carga de teste positiva q_0 é movida de uma posição inicial sobre a placa até uma posição final localizada a uma distância z da placa?

11P*. Uma casca esférica espessa de carga Q e densidade volumétrica de carga ρ uniforme é limitada pelos raios r_1 e r_2 , onde $r_2 > r_1$. Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico V em função da distância r contada a partir do centro da distribuição, considerando as regiões (a) $r > r_2$, (b) $r_2 > r > r_1$ e (c) $r < r_1$. (d) Estas soluções coincidem em $r = r_2$ e $r = r_1$? (Dica: Veja a Seção 24.9.)

SEÇÃO 25.6 Potencial devido a um Grupo de Cargas Pontuais

12E. Quando um ônibus espacial se move através do gás rarefeito da ionosfera da Terra, seu potencial varia tipicamente de $-1,0$ V durante uma revolução. Supondo que o ônibus espacial é uma esfera com raio de 10 m, estime a quantidade de carga que ele coleta.

13E. Considere uma carga pontual $q = 1,0 \mu\text{C}$, um ponto A a uma distância $d_1 = 2,0$ m de q e um ponto B a uma distância $d_2 = 1,0$ m. (a) Se estes pontos estiverem diametralmente opostos um do outro, como na Fig. 25.31a, qual a diferença de potencial elétrico $V_A - V_B$? (b) Qual será essa diferença de potencial elétrico se os pontos A e B estiverem localizados como na Fig. 25.31b?

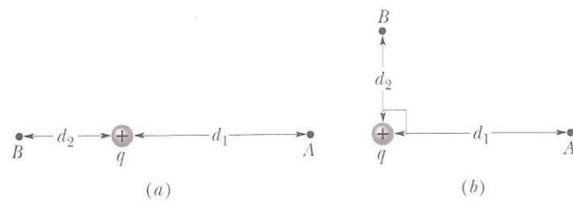


Fig. 25.31 Exercício 13.

14E. A Fig. 25.32 mostra duas partículas carregadas sobre um eixo. Esboce as linhas de campo elétrico e as superfícies equipotenciais no plano da página para (a) $q_1 = +q$ e $q_2 = +2q$ e (b) $q_1 = +q$ e $q_2 = -3q$.

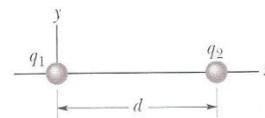


Fig. 25.32 Exercícios 14, 15 e 16.

15E. Na Fig. 25.32, considere $V = 0$ no infinito e que as partículas tenham cargas $q_1 = +q$ e $q_2 = -3q$. Localize então (em termos da distância de separação d) um ponto qualquer sobre o eixo x (que não esteja no infinito) no qual o potencial resultante devido às duas partículas seja nulo.

16E. Duas partículas, com cargas q_1 e q_2 , estão separadas pela distância d na Fig. 25.32. O campo elétrico resultante das partículas é nulo em $x = d/4$. Com $V = 0$ no infinito, localize (em termos de d) um ponto qualquer sobre o eixo x (que não esteja no infinito) no qual o potencial elétrico devido às duas partículas seja nulo.

17P. Uma gota d'água esférica transportando uma carga de 30 pC possui um potencial de 500 V na sua superfície (com $V = 0$ no infinito). (a) Qual o raio da gota? (b) Caso duas gotas como esta, com mesma carga e raio, se combinarem para formar uma única gota esférica, qual será o potencial na superfície da nova gota?

18P. Quais (a) a carga e (b) a densidade de carga na superfície de uma esfera condutora de raio 0,15 m, cujo potencial é 200 V (com $V = 0$ no infinito)?

19P. Observa-se com frequência um campo elétrico de aproximadamente 100 V/m próximo à superfície da Terra. Se este fosse o campo sobre toda a superfície terrestre, qual seria o potencial elétrico de um ponto sobre a superfície? (Considere $V = 0$ no infinito.)

20P. Na Fig. 25.33, o ponto P está no centro do retângulo. Com $V = 0$ no infinito, qual o potencial resultante em P devido às seis partículas carregadas?

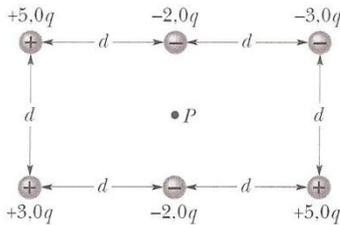


Fig. 25.33 Problema 20.

21P. Na Fig. 25.34, qual o potencial resultante no ponto P devido às quatro cargas pontuais, se $V = 0$ no infinito?

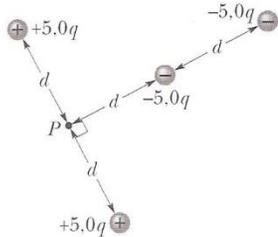


Fig. 25.34 Problema 21.

SEÇÃO 25.7 Potencial devido a um Dipolo Elétrico

22E. A molécula de amônia NH_3 possui um momento de dipolo elétrico permanente igual a 1,47 D, onde $1 D = 1$ unidade debye = $3,34 \times 10^{-30} C \cdot m$. Calcule o potencial elétrico devido a uma molécula de amônia em um ponto afastado 52,0 nm ao longo do eixo do dipolo. (Considere $V = 0$ no infinito.)

23P. A Fig. 25.35 mostra três partículas carregadas localizadas sobre um eixo horizontal. Mostre que, para pontos (como por exemplo o ponto P) sobre o eixo e com $r \gg d$, o potencial elétrico $V(r)$ é dado por

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \left(1 + \frac{2d}{r} \right).$$

(Dica: A configuração de carga pode ser vista como a soma de uma carga isolada e um dipolo.)

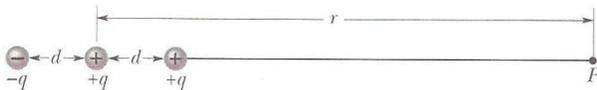


Fig. 25.35 Problema 23.

SEÇÃO 25.8 Potencial devido a uma Distribuição Contínua de Carga

24E. (a) A Fig. 25.36a mostra uma barra plástica carregada positivamente de comprimento L e densidade linear de carga uniforme λ . Fazendo $V = 0$ no infinito e considerando a Fig. 25.13 e a Eq. 25.35, de-

termine o potencial elétrico no ponto P sem cálculos por escrito. (b) A Fig. 25.36b mostra uma barra idêntica, exceto pelo fato de ela estar dividida ao meio e a metade da direita estar carregada negativamente; as metades esquerda e direita possuem a mesma intensidade λ da densidade linear de carga uniforme. Com V ainda nulo no infinito, qual o potencial elétrico no ponto P da Fig. 25.36b?

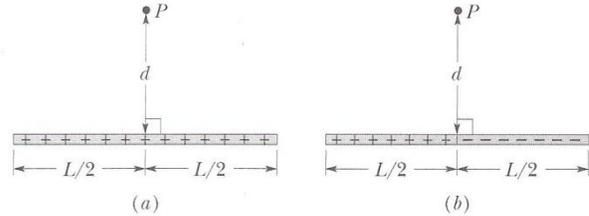


Fig. 25.36 Exercício 24.

25E. Uma barra plástica foi moldada segundo um círculo de raio R . Ela possui uma carga positiva $+Q$ uniformemente distribuída ao longo de um quarto da sua circunferência e uma carga negativa de $-6Q$ uniformemente distribuída ao longo do resto da circunferência (Fig. 25.37). Com $V = 0$ no infinito, qual o potencial elétrico (a) no centro C do círculo e (b) no ponto P , que está sobre o eixo central do círculo a uma distância z do centro?

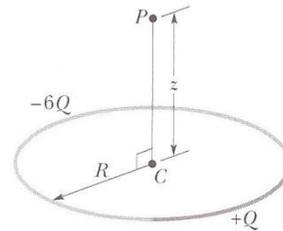


Fig. 25.37 Exercício 25.

26E. Na Fig. 25.38, uma barra plástica tendo uma carga $-Q$ uniformemente distribuída foi curvada na forma de um arco circular de raio R e ângulo central de 120° . Com $V = 0$ no infinito, qual o potencial elétrico em P , o centro de curvatura da barra?

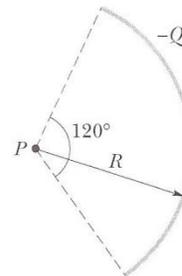


Fig. 25.38 Exercício 26.

27E. Um disco plástico está carregado em um de seus lados com uma densidade superficial de carga uniforme σ , e depois três quadrantes do disco são removidos. O quadrante que sobrou é mostrado na Fig. 25.39. Com $V = 0$ no infinito, qual o potencial devido ao quadrante que so-

brou no ponto P , que está sobre o eixo central a uma distância z do centro original?

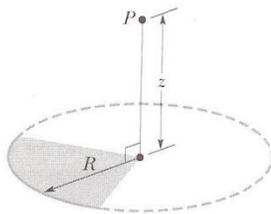


Fig. 25.39 Exercício 27.

28P. A Fig. 25.40 mostra uma barra de plástico de comprimento L e carga positiva uniforme Q localizada sobre um eixo x . Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico no ponto P_1 sobre o eixo, a uma distância d de uma das extremidades da barra.

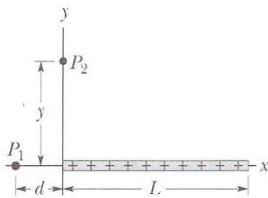


Fig. 25.40 Problemas 28, 29, 34 e 35.

29P. A barra de plástico mostrada na Fig. 25.40 possui comprimento L e uma densidade linear de carga não-uniforme $\lambda = cx$, onde c é uma constante positiva. Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico no ponto P_1 sobre o eixo, a uma distância d de uma das extremidades.

SEÇÃO 25.9 Calculando o Campo a partir do Potencial

30E. Duas grandes placas metálicas paralelas estão afastadas uma da outra 1,5 cm e possuem cargas iguais mas contrárias sobre suas superfícies vizinhas. Considere o potencial da placa negativa como nulo. Se o potencial no meio da distância entre as placas é então de +5,0 V, qual o campo elétrico na região entre as placas?

31E. O potencial elétrico em pontos de um plano xy é dado por $V = (2,0 \text{ V/m}^2)x^2 - (3,0 \text{ V/m}^2)y^2$. Qual a intensidade, direção e sentido do campo elétrico no ponto (3,0 m, 2,0 m)?

32E. O potencial elétrico V no espaço entre duas placas planas paralelas é dado por $V = 1500x^2$, onde V está em volts se x , a distância a uma das placas, estiver em metros. Calcule a intensidade, direção e sentido do campo elétrico em $x = 1,3$ cm.

33P. (a) Usando a Eq. 25.32, mostre que o potencial elétrico em um ponto sobre o eixo central de um anel fino de carga com raio R e a uma distância z do anel é

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\sqrt{z^2 + R^2}}$$

(b) A partir deste resultado, deduza uma expressão para E em pontos sobre o eixo do anel; compare o seu resultado com o cálculo de E na Seção 23.6.

34P. A barra de plástico de comprimento L da Fig. 25.40 possui densidade linear de carga não-uniforme $\lambda = cx$, onde c é uma constante positiva. (a) Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico no ponto P_2 sobre o eixo y a uma distância y de uma das extremidades da barra.

(b) A partir desse resultado, determine a componente E_y do campo elétrico em P_2 . (c) Por que a componente E_x do campo em P_2 não pode ser determinada usando o resultado do item (a)?

35P. (a) Use o resultado do Problema 28 para determinar a componente E_x do campo elétrico no ponto P_1 da Fig. 25.40. (Dica: Substitua primeiramente a distância d pela variável x no resultado.) (b) Use a simetria para determinar a componente E_y do campo elétrico em P_1 .

SEÇÃO 25.10 Energia Potencial Elétrica de um Sistema de Cargas Pontuais

36E. (a) Qual a energia potencial elétrica de dois elétrons separados de 2,00 nm? (b) Se a separação aumentar, a energia potencial aumentará ou diminuirá?

37E. Deduza uma expressão para o trabalho exigido para estabelecermos a configuração de quatro cargas da Fig. 25.41, supondo que as cargas estejam inicialmente separadas por uma distância infinita.

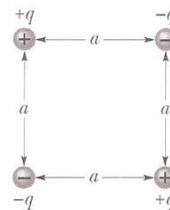


Fig. 25.41 Exercício 37.

38E. Qual a energia potencial elétrica da configuração de carga da Fig. 25.9a? Use os valores numéricos fornecidos no Problema Resolvido 25.3.

39P. No retângulo da Fig. 25.42, os lados possuem comprimentos de 5,0 cm e 15 cm, $q_1 = -5,0 \mu\text{C}$ e $q_2 = +2,0 \mu\text{C}$. Com $V = 0$ no infinito, quais os potenciais elétricos (a) no vértice A e (b) no vértice B ? (c) Qual o trabalho necessário para mover uma terceira carga $q_3 = +3,0 \mu\text{C}$ de B para A ao longo de uma diagonal do retângulo? (d) Este trabalho aumenta ou diminui a energia elétrica do sistema de três cargas? Este trabalho é maior, menor ou o mesmo exigido se q_3 for movida ao longo de trajetórias que estejam (e) dentro do retângulo, mas não sobre uma diagonal, e (f) fora do retângulo?



Fig. 25.42 Problema 39.

40P. Na Fig. 25.43, qual o trabalho exigido para trazer a carga de +5q do infinito ao longo da linha tracejada e colocá-la, como mostrado, próximo às duas cargas fixas +4q e -2q? Adote a distância $d = 1,40$ cm e a carga $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C.

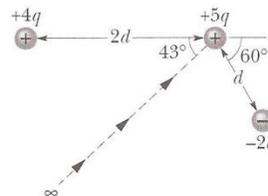


Fig. 25.43 Problema 40.

41P. Uma partícula de carga Q positiva está fixa no ponto P . Uma segunda partícula de massa m e carga negativa $-q$ se move com velocidade constante em um círculo de raio r_1 , centrado em P . Deduza uma expressão para o trabalho W que deve ser realizado por um agente

externo sobre a segunda partícula para aumentar o raio do círculo do movimento para r_2 .

42P. Calcule (a) o potencial elétrico estabelecido pelo núcleo de um átomo de hidrogênio na distância média ($r = 5,29 \times 10^{-11}$ m) do elétron do átomo (considere $V = 0$ a uma distância infinita), (b) a energia potencial elétrica do átomo quando o elétron está neste raio e (c) a energia cinética do elétron, supondo que ele esteja se movendo em uma órbita circular deste raio centrada sobre o núcleo. (d) Qual a energia necessária para ionizar o átomo de hidrogênio (ou seja, para remover o elétron do núcleo de modo que a separação seja efetivamente infinita)? Expresse todas as energias em elétrons-volts.

43P. Uma partícula de carga q está fixa no ponto P e uma segunda partícula de massa m e mesma carga q é mantida inicialmente a uma distância r_1 de P . A segunda partícula é então solta. Determine sua velocidade quando ela estiver a uma distância r_2 de P . Considere $q = 3,1 \mu\text{C}$, $m = 20$ mg, $r_1 = 0,90$ mm e $r_2 = 2,5$ mm.

44P. Uma carga de $-9,0$ nC está uniformemente distribuída ao redor de um anel plástico fino de raio $1,5$ m que está localizado no plano yz com seu centro na origem. Uma carga pontual de $-6,0$ pC está localizada sobre o eixo x em $x = 3,0$ m. Calcule o trabalho realizado sobre a carga pontual por uma força externa para mover a carga pontual até a origem.

45P. Duas esferas metálicas minúsculas A e B de massas $m_A = 5,00$ g e $m_B = 10,0$ g possuem cargas positivas iguais $q = 5,00 \mu\text{C}$. As esferas estão ligadas por um fio não-condutor e de massa desprezível de comprimento $a = 1,00$ m, que é muito maior do que os raios das esferas. (a) Qual a energia potencial elétrica do sistema? (b) Suponha que você corte o fio. Nesse instante, qual a aceleração de cada esfera? (c) Muito tempo depois de você ter cortado o fio, qual a velocidade escalar de cada esfera?

46P. Uma casca esférica condutora fina de raio R está presa sobre um suporte isolante e carregada até um potencial $-V$. Um elétron é então lançado do ponto P a uma distância r do centro da casca ($r \gg R$) com velocidade inicial v_0 e bem na direção do centro da casca. Que valor de v_0 é necessário para que o elétron atinja a casca pouco antes de reverter o sentido do seu movimento?

47P. Dois elétrons estão fixados com uma separação de $2,0$ cm entre eles. Um outro elétron é disparado do infinito e pára na metade da distância entre eles. Qual a sua velocidade escalar inicial?

48P. Duas superfícies condutoras planas, paralelas e carregadas estão espaçadas por $d = 1,00$ cm de distância e produzem uma diferença de potencial $\Delta V = 625$ V entre elas. Um elétron é projetado a partir de uma das superfícies bem na direção da segunda. Qual a velocidade escalar inicial do elétron se ele pára bem na segunda superfície?

49P. Um elétron é lançado com uma velocidade escalar inicial de $3,2 \times 10^5$ m/s bem na direção de um próton que está fixo. Se o elétron estiver inicialmente a uma grande distância do próton, a que distância do próton a velocidade escalar instantânea do elétron é igual ao dobro do valor inicial?

SEÇÃO 25.11 Potencial de um Condutor Isolado Carregado

50E. Uma esfera metálica oca vazia possui um potencial de $+400$ V em relação ao solo (definido como $V = 0$) e possui uma carga de $5,0 \times 10^{-9}$ C. Determine o potencial elétrico no centro da esfera.

51E. Qual a carga em excesso sobre uma esfera condutora de raio $r = 0,15$ m se o potencial da esfera for de 1500 V e $V = 0$ no infinito?

52E. Considere duas esferas condutoras, 1 e 2, separadas por uma grande distância, a segunda tendo o dobro do diâmetro da primeira. A esfera menor possui inicialmente uma carga positiva q e a maior está inicialmente descarregada. Agora você liga as esferas com um fio fino e longo. (a) Como estão relacionados os potenciais finais V_1 e V_2 das esferas? (b) Quais as cargas finais q_1 e q_2 sobre as esferas, em termos de q ? (c) Qual a razão entre a densidade superficial de carga final da esfera 1 e a da esfera 2?

53P. Duas esferas metálicas, cada uma com raio de $3,0$ cm, possuem uma separação de $2,0$ m de centro a centro. Uma delas possui uma carga de $+1,0 \times 10^{-8}$ C; a outra possui uma carga de $-3,0 \times 10^{-8}$ C. Suponha que a separação é grande o suficiente em relação ao tamanho das esferas para nos permitir considerar a carga sobre cada uma delas sendo distribuída uniformemente (as esferas não afetam uma à outra). Com $V = 0$ no infinito, calcule (a) o potencial no ponto médio entre seus centros e (b) o potencial de cada esfera.

54P. Uma esfera metálica carregada de raio igual a 15 cm possui uma carga resultante de $3,0 \times 10^{-8}$ C. (a) Qual o campo elétrico na superfície da esfera? (b) Se $V = 0$ no infinito, qual o potencial elétrico na superfície da esfera? (c) A que distância da superfície da esfera o potencial elétrico decresceu de 500 V?

55P. (a) Se a Terra tivesse uma densidade superficial de carga resultante de $1,0$ elétron por metro quadrado (uma hipótese muito artificial), qual seria o seu potencial? (Faça $V = 0$ no infinito.) (b) Qual seria o campo elétrico devido à Terra em um ponto externo bem próximo à sua superfície?

56P. Duas esferas finas condutoras concêntricas e isoladas de raios R_1 e R_2 (com $R_1 < R_2$) possuem cargas q_1 e q_2 . Com $V = 0$ no infinito, deduza expressões para $E(r)$ e $V(r)$, onde r é a distância a partir do centro das esferas. Faça um gráfico de $E(r)$ e de $V(r)$ de $r = 0$ até $r = 4,0$ m para $R_1 = 0,50$ m, $R_2 = 1,0$ m, $q_1 = +2,0 \mu\text{C}$ e $q_2 = +1,0 \mu\text{C}$.

Problema Adicional

57. *O mistério do chocolate granulado.* Esta história começa com o Problema 48 no Cap. 24. (a) A partir da resposta para a parte (a) desse problema, determine uma expressão para o potencial elétrico em função da distância radial r ao centro da tubulação. (O potencial elétrico é nulo sobre as paredes da tubulação aterradas.) (b) Para a densidade volumétrica de carga típica $\rho = -1,1 \times 10^{-3}$ C/m³, qual a diferença de potencial elétrico entre o centro da tubulação e sua parede interna? (A história continua com o Problema 48 no Cap. 26).

mesma que antes? (c) A capacitância equivalente C_{12} de C_1 e C_2 é maior, menor ou igual a C_1 ? (d) A carga total armazenada sobre C_1 e C_2 juntas é maior, menor ou igual à carga armazenada anteriormente sobre C_1 ?

8. Repita a Pergunta 7 para C_2 acrescentada em série, não em paralelo.

9. A Fig. 26.21 mostra três circuitos, cada um deles composto por uma chave e dois capacitores, inicialmente carregados como indicado. Depois de as chaves terem sido fechadas, em que circuito (se houver) a carga no capacitor da esquerda (a) aumentará, (b) diminuirá e (c) permanecerá a mesma?

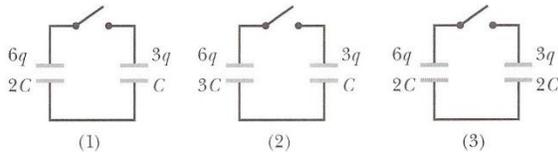


Fig. 26.21 Pergunta 9.

10. Duas esferas metálicas isoladas A e B possuem raios R e $2R$, respectivamente, e a mesma carga q . (a) A capacitância de A é maior, menor ou igual à de B ? (b) A densidade de energia imediatamente fora da superfície de A é maior, menor ou igual à de B ? (c) A densidade de energia à distância de $3R$ do centro de A é maior, menor ou igual àquela à mesma distância do centro de B ? (d) A energia total do campo elétrico devida a A é maior, menor ou igual à de B ?

11. Quando uma placa espessa é inserida entre as placas de um dos dois capacitores idênticos da Fig. 26.22, as seguintes propriedades desse capacitor aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas: (a) capacitância, (b) carga, (c) diferença de potencial e (d) energia potencial? (e) E quanto às mesmas propriedades do outro capacitor?

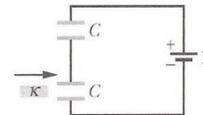


Fig. 26.22 Pergunta 11.

EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

SEÇÃO 26.2 Capacitância

1E. Um eletrômetro é um aparelho usado para medir carga estática — uma carga desconhecida é colocada sobre as placas do capacitor do medidor e a diferença de potencial é medida. Qual a carga mínima que pode ser medida por um eletrômetro com uma capacitância de 50 pF e uma sensibilidade de voltagem de $0,15 \text{ V}$?

2E. Os dois objetos metálicos da Fig. 26.23 possuem cargas resultantes de $+70 \text{ pC}$ e -70 pC , que resulta em uma diferença de potencial de 20 V entre eles. (a) Qual a capacitância do sistema? (b) Se as cargas forem modificadas para $+200 \text{ pC}$ e -200 pC , qual será o valor da capacitância? (c) Qual será o valor da diferença de potencial?

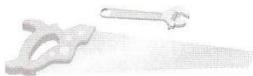


Fig. 26.23 Exercício 2.

3E. O capacitor da Fig. 26.24 possui uma capacitância de $25 \text{ }\mu\text{F}$ e está inicialmente descarregado. A bateria fornece uma diferença de potencial de 120 V . Depois de a chave S ser fechada, quanta carga passará por ela?

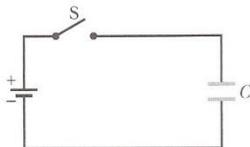


Fig. 26.24 Exercício 3.

SEÇÃO 26.3 Calculando a Capacitância

4E. Se resolvermos a Eq. 26.9 para ϵ_0 , vemos que a sua unidade SI é o farad por metro. Mostre que esta unidade é equivalente àquela obtida anteriormente para ϵ_0 — a saber, o coulomb ao quadrado por newton-metro ao quadrado ($\text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$).

5E. Um capacitor de placas paralelas possui placas circulares de $8,2 \text{ cm}$ de raio e $1,3 \text{ mm}$ de separação. (a) Calcule a capacitância. (b) Que carga aparecerá sobre as placas se for aplicada uma diferença de potencial de 120 V ?

6E. Você possui duas placas metálicas planas, cada uma com área de $1,00 \text{ m}^2$, para construir com elas um capacitor de placas paralelas. Se a capacitância do dispositivo deve ser de $1,00 \text{ F}$, qual deve ser a separação entre as placas? Este capacitor poderia ser realmente construído?

7E. Uma gota esférica de mercúrio de raio R possui uma capacitância dada por $C = 4\pi\epsilon_0 R$. Se duas destas gotas se combinarem para formar uma única gota maior, qual será a sua capacitância?

8E. As placas de um capacitor esférico possuem raios de $38,0 \text{ mm}$ e $40,0 \text{ mm}$. (a) Calcule a capacitância. (b) Qual deve ser a área da placa de um capacitor de placas paralelas com a mesma separação entre as placas e a mesma capacitância?

9P. Suponha que as duas cascas esféricas de um capacitor esférico tenham raios aproximadamente iguais. Sob estas condições, o dispositivo se aproxima de um capacitor de placas paralelas com $b - a = d$. Mostre que a Eq. 26.17 realmente se reduz à Eq. 26.9 neste caso.

SEÇÃO 26.4 Capacitores em Paralelo e em Série

10E. Na Fig. 26.25, determine a capacitância equivalente da combinação. Suponha que $C_1 = 10,0 \text{ }\mu\text{F}$, $C_2 = 5,00 \text{ }\mu\text{F}$ e $C_3 = 4,00 \text{ }\mu\text{F}$.

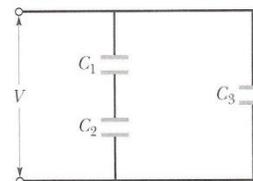


Fig. 26.25 Exercício 10 e Problema 30.

11E. Quantos capacitores de $1,00 \text{ }\mu\text{F}$ devem ser ligados em paralelo para armazenar uma carga de $1,00 \text{ C}$ com uma diferença de potencial de 110 V entre as extremidades dos capacitores?

12E. Cada um dos capacitores descarregados da Fig. 26.26 possui uma capacitância de $25,0 \mu\text{F}$. Estabelece-se uma diferença de potencial de 4200 V quando a chave é fechada. Quantos coulombs de carga passam então pelo medidor A?

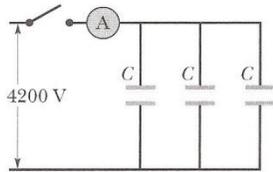


Fig. 26.26 Exercício 12.

13E. Determine na Fig. 26.27 a capacitância equivalente da combinação. Suponha que $C_1 = 10,0 \mu\text{F}$, $C_2 = 5,00 \mu\text{F}$ e $C_3 = 4,00 \mu\text{F}$.

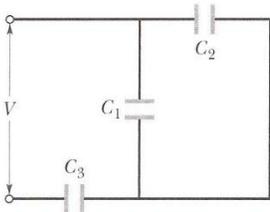


Fig. 26.27 Exercício 13, Problemas 14 e 28.

14P. Na Fig. 26.27 suponha que o capacitor 3 sofra uma ruptura elétrica, tornando-se equivalente a um percurso condutor. Que mudanças (a) na carga e (b) na diferença de potencial ocorrem para o capacitor 1? Suponha que $V = 100 \text{ V}$.

15P. A Fig. 26.28 mostra dois capacitores em série; a seção central de comprimento b pode ser movida verticalmente. Mostre que a capacitância equivalente desta combinação em série é independente da posição da seção central e é dada por $C = \epsilon_0 A/(a - b)$, onde A é a área da placa.

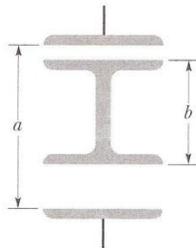


Fig. 26.28 Problema 15.

16P. Na Fig. 26.29, a bateria possui uma diferença de potencial de 10 V e os cinco capacitores possuem, cada um, uma capacitância de $10 \mu\text{F}$. Qual a carga (a) sobre o capacitor 1 e (b) sobre o capacitor 2?

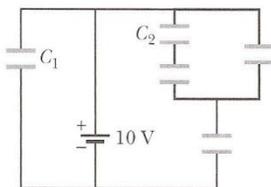


Fig. 26.29 Problema 16.

17P. Um capacitor de 100 pF é carregado até uma diferença de potencial de 50 V , e a bateria que o carregou é desconectada. O capacitor é então ligado em paralelo com um segundo capacitor (inicialmente descarregado). Se a diferença de potencial entre as placas do primeiro capacitor cair para 35 V , qual a capacitância deste segundo capacitor?

18P. Na Fig. 26.30, a bateria possui uma diferença de potencial de 20 V . Determine (a) a capacitância equivalente de todos os capacitores e (b) a carga armazenada sobre esse capacitor equivalente. Determine o potencial entre as placas e a carga sobre (c) o capacitor 1, (d) o capacitor 2 e (e) o capacitor 3.

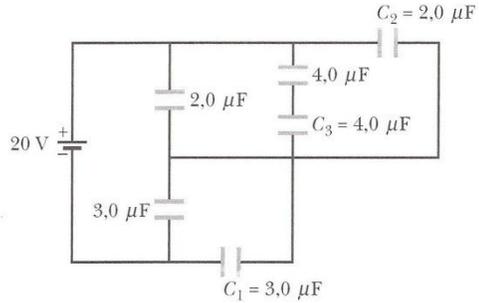


Fig. 26.30 Problema 18.

19P. Na Fig. 26.31, as capacitâncias são $C_1 = 1,0 \mu\text{F}$ e $C_2 = 3,0 \mu\text{F}$ e ambos os capacitores estão carregados com uma diferença de potencial de $V = 100 \text{ V}$, mas com polaridades opostas, como mostrado. As chaves S_1 e S_2 são agora fechadas. (a) Agora qual a diferença de potencial entre os pontos a e b ? Agora quais são as cargas sobre os capacitores (b) 1 e (c) 2?

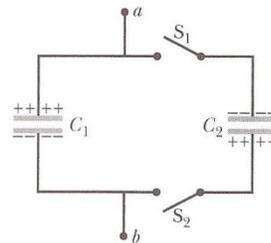


Fig. 26.31 Problema 19.

20P. Na Fig. 26.32, a bateria B fornece 12 V . Determine a carga sobre cada capacitor (a) primeiramente quando apenas a chave S_1 for fechada e (b) mais tarde, quando a chave S_2 também for fechada. Adote $C_1 = 1,0 \mu\text{F}$, $C_2 = 2,0 \mu\text{F}$, $C_3 = 3,0 \mu\text{F}$ e $C_4 = 4,0 \mu\text{F}$.

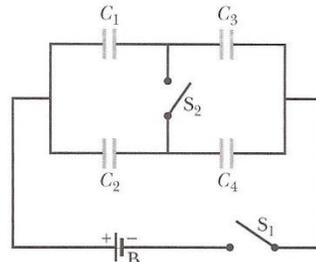


Fig. 26.32 Problema 20.

21P. Quando a chave S é posicionada na esquerda na Fig. 26.33, as placas do capacitor 1 adquirem uma diferença de potencial V_0 . Os capacitores 2 e 3 estão inicialmente descarregados. A chave agora é posicionada na direita. Quais são as cargas finais q_1 , q_2 e q_3 sobre os capacitores?

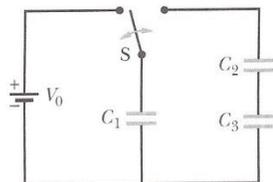


Fig. 26.33 Problema 21.

SEÇÃO 26.5 Energia Armazenada em um Campo Elétrico

22E. Quanta energia é armazenada em 1 metro cúbico de ar devido ao campo elétrico “de bom tempo” com intensidade igual a 150 V/m?

23E. Qual a capacitância necessária para armazenar uma energia de 10 kW·h com uma diferença de potencial de 1000 V?

24E. Um capacitor de placas paralelas, com o espaço entre as placas preenchido por ar, tendo uma área de 40 cm² e um espaçamento entre placas de 1,0 mm é carregado com uma diferença de potencial de 600 V. Determine (a) a capacitância, (b) a intensidade da carga sobre cada placa, (c) a energia armazenada, (d) o campo elétrico entre as placas e (e) a densidade de energia entre as placas.

25E. Dois capacitores, de 2,0 e 4,0 μF de capacitância, estão ligados em paralelo atravessando uma diferença de potencial de 300 V. Calcule a energia total armazenada nos capacitores.

26P. Um banco de capacitores de 5,00 μF cada, ligados em paralelo, é usado para armazenar energia elétrica. Quanto custa para carregar os 2000 capacitores do banco a 50 000 V, supondo que o kW·h custe 3 centavos de dólar?

27P. Um capacitor é carregado até que a sua energia armazenada seja de 4,0 J. Um segundo capacitor descarregado é então ligado a ele em paralelo. (a) Se a carga se distribui igualmente, qual é agora a energia total armazenada nos campos elétricos? (b) Para onde foi o excesso de energia?

28P. Na Fig. 26.27 determine (a) a carga, (b) a diferença de potencial e (c) a energia armazenada para cada capacitor. Considere os valores numéricos do Exercício 13, com $V = 100$ V.

29P. Um capacitor de placas paralelas possui placas com área A e separação d e é carregado para uma diferença de potencial V . A bateria que o carregou é então desconectada, e as placas são afastadas até que a sua separação seja $2d$. Deduza expressões em termos de A , d e V para (a) a nova diferença de potencial; (b) as energias armazenadas inicial e final, U_i e U_f ; e (c) o trabalho necessário para separar as placas.

30P. Na Fig. 26.25 determine (a) a carga, (b) a diferença de potencial e (c) a energia armazenada para cada capacitor. Considere os valores numéricos do Exercício 10, com $V = 100$ V.

31P. Um capacitor cilíndrico possui raios a e b como na Fig. 26.6. Mostre que metade da energia potencial elétrica está localizada no interior de um cilindro cujo raio é $r = \sqrt{ab}$.

32P. Uma esfera metálica isolada e carregada com diâmetro de 10 cm possui um potencial de 8000 V em relação a $V = 0$ no infinito. Calcule a densidade de energia no campo elétrico próximo à superfície da esfera.

33P. (a) Mostre que as placas de um capacitor de placas paralelas se atraem com uma força dada por $F = q^2/2\epsilon_0 A$. Para isso calcule o trabalho necessário para aumentar a separação entre as placas de x para $x + dx$, com a carga q permanecendo constante. (b) Em segui-

da mostre que a força por unidade de área (a *tensão eletrostática*) atuando sobre cada uma das placas do capacitor é dada por $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$. (Na verdade, esta é a força por unidade de área sobre *qualquer* condutor de *qualquer* formato com um campo elétrico \vec{E} na sua superfície.)

SEÇÃO 26.6 Capacitor com um Dielétrico

34E. Um capacitor de placas paralelas, com ar entre as placas, possui uma capacitância de 1,3 pF. A separação entre as placas é duplicada e introduz-se cera entre elas. A nova capacitância é igual a 2,6 pF. Determine a constante dielétrica da cera.

35E. Dado um capacitor de 7,4 pF, cheio de ar entre as placas, pede-se para convertê-lo em um capacitor que possa armazenar até 7,4 μJ com uma diferença de potencial máximo de 652 V. Que dielétrico da Tabela 26.1 deveria ser usado para preencher o intervalo no capacitor cheio de ar se não fosse permitida uma margem de erro?

36E. Um capacitor de placas paralelas, preenchido com ar entre elas, possui uma capacitância de 50 pF. (a) Se cada uma de suas placas possuir uma área de 0,35 m², qual a separação? (b) Se a região entre as placas for agora preenchida com um material tendo $\kappa = 5,6$, qual a capacitância?

37E. Um cabo coaxial usado em uma linha de transmissão possui um raio interno de 0,10 mm e um raio externo de 0,60 mm. Calcule a capacitância por metro para o cabo. Suponha que o espaço entre os condutores é preenchido com poliestireno.

38P. Pede-se que se construa um capacitor com uma capacitância próxima de 1 nF e um potencial de ruptura acima de 10 000 V. Pensa-se em usar os lados de um copo alto de pirex como um dielétrico, revestindo as superfícies curvas internas e externas com papel alumínio para que atuem como as placas. O copo tem 15 cm de altura com um raio interno de 3,6 cm e um raio externo de 3,8 cm. Quais (a) a capacitância e (b) o potencial de ruptura deste capacitor?

39P. Uma certa substância possui uma constante dielétrica de 2,8 e uma rigidez dielétrica de 18 MV/m. Se ela for usada como o material dielétrico em um capacitor de placas paralelas, que área mínima as placas do capacitor deveriam ter para se obter uma capacitância de $7,0 \times 10^{-2}$ μF e para assegurar que o capacitor será capaz de resistir a uma diferença de potencial de 4,0 kV?

40P. Um capacitor de placas paralelas de área de placa A é preenchido com dois dielétricos como na Fig. 26.34a. Mostre que a capacitância é

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2}$$

Verifique esta fórmula para casos limites. (Dica: Você pode justificar este arranjo como sendo dois capacitores em paralelo?)

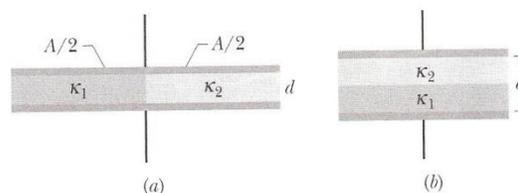


Fig. 26.34 Problemas 40 e 41.

41P. Um capacitor de placas paralelas com área de placa A é preenchido com dois dielétricos como na Fig. 26.34b. Mostre que a capacitância é

$$C = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2}$$

Verifique esta fórmula para casos limites. (Dica: Você consegue justificar este arranjo como sendo dois capacitores em série?)

42P. Qual a capacitância do capacitor, de área de placa A , mostrado na Fig. 26.35? (Dica: Veja os Problemas 40 e 41.)

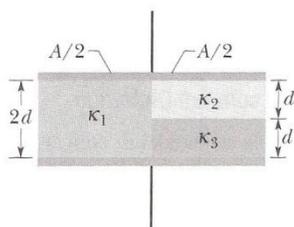


Fig. 26.35 Problema 42.

SEÇÃO 26.8 Dielétricos e a Lei de Gauss

43E. Um capacitor de placas paralelas possui uma capacitância de 100 pF, uma área de placa de 100 cm^2 e um dielétrico de mica ($\kappa = 5,4$) que preenche completamente o espaço entre as placas. Com uma diferença de potencial de 50 V, calcule (a) a intensidade do campo elétrico E na mica, (b) a intensidade da carga livre sobre as placas e (c) a intensidade da carga superficial induzida sobre a mica.

44E. No Problema Resolvido 26.6, suponha que a bateria permanece ligada enquanto a placa espessa dielétrica está sendo introduzida. Calcule (a) a capacitância, (b) a carga sobre as placas do capacitor, (c) o campo elétrico no intervalo entre as placas e (d) o campo elétrico na placa espessa, depois que a placa espessa estiver no lugar.

45P. O espaço entre duas cascas esféricas condutoras concêntricas de raios b e a (onde $b > a$) é preenchido com uma substância com constante dielétrica κ . Existe uma diferença de potencial V entre a casca interna e a casca externa. Determine (a) a capacitância do dispositivo, (b) a carga livre q sobre a casca interna e (c) a carga q' induzida ao longo da superfície da casca interna.

46P. Duas placas paralelas com área de 100 cm^2 recebem cargas de mesmas intensidades iguais a $8,9 \times 10^{-7} \text{ C}$ mas sinais contrários. O campo elétrico no interior do material dielétrico que preenche o espaço entre as placas é de $1,4 \times 10^6 \text{ V/m}$. (a) Calcule a constante dielétrica do material. (b) Determine a intensidade da carga induzida sobre cada superfície dielétrica.

47P. Uma placa espessa dielétrica de espessura b é inserida entre as placas de um capacitor de placas paralelas com separação d entre as placas. Mostre que a capacitância é então dada por

$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{\kappa d - b(\kappa - 1)}.$$

(Dica: Você pode deduzir a fórmula seguindo o procedimento delineado no Problema Resolvido 26.6.) Esta fórmula prevê o resultado numérico correto do Problema Resolvido 26.6? Verifique que a fórmula fornece resultados razoáveis para os casos especiais de $b = 0$, $\kappa = 1$ e $b = d$.

Problema Adicional

48. *O mistério do granulado de chocolate.* Esta história começou com o Problema 48, no Cap. 24, e o Problema 57, no Cap. 25. Como parte da investigação da explosão da fábrica de biscoitos, os potenciais elétricos dos trabalhadores foram medidos quando eles esvaziavam sacos de chocolate em pó para granulado para dentro da caixa de carga, levantando uma nuvem de pó ao redor deles mesmos. Cada trabalhador tinha um potencial elétrico de cerca de 7,0 kV em relação ao solo, que foi tomado como potencial nulo. (a) Supondo que cada trabalhador era efetivamente um capacitor com uma capacitância típica de 200 pF, encontre a energia armazenada nesse capacitor efetivo. Se uma única centelha entre o trabalhador e qualquer objeto condutor ligado ao solo neutralizasse o trabalhador, essa energia seria transferida à centelha. De acordo com medições, uma centelha que pudesse provocar a ignição de uma nuvem de pó para granulado de chocolate, e assim detonar uma explosão, teria que ter uma energia de pelo menos 150 mJ. (b) Uma centelha originária de um trabalhador poderia ter detonado uma explosão na nuvem de poeira na caixa de carga? (A história continua com o Problema 44 no Cap. 27.)

CAPÍTULO 25

PV 1. (a) negativo; (b) aumenta **2.** (a) positivo; (b) mais alto **3.** (a) horizontal para a direita; (b) 1, 2, 3, 5: positivo; 4: negativo; (c) 3, então 1, 2 e 5 empatados, então 4 **4.** todos empatados **5.** a, c (zero), b **6.** (a) 2, então 1 e 3 empatados; (b) 3; (c) se acelerará para a esquerda **P 1.** (a) mais alto; (b) positivo; (c) negativo; (d) todos empatados; **3.** $-4q/4\pi\epsilon_0 d$ **5.** de (a) até (c) $Q/4\pi\epsilon_0 R$; (d) a, b, c **7.** (a) 2, 4 e então um empate de 1, 3 e 5 (onde $E = 0$); (b) sentido negativo de x; (c) sentido positivo de x **9.** de (a) até (d) zero **EP 1.** (a) $3,0 \times 10^5$ C; (b) $3,6 \times 10^6$ J **3.** (a) $3,0 \times 10^{10}$ J; (b) 7,7 km/s; (c) $9,0 \times 10^4$ kg **5.** 8,8 mm **7.** (a) 136 MV/m; (b) 8,82 kV/m **9.** (b) como $V = 0$, o ponto é escolhido de forma diferente; (c) $q/(8\pi\epsilon_0 R)$; (d) as diferenças de potencial independem da escolha do ponto onde

$$V = 0 \quad \mathbf{11.} \text{ (a) } Q/4\pi\epsilon_0 r; \text{ (b) } \frac{\rho}{3\epsilon_0} \left(\frac{3}{2} r_2^2 - \frac{1}{2} r^2 - \frac{r_1^3}{r} \right),$$

$$\rho = \frac{Q}{\frac{4\pi}{3}(r_2^3 - r_1^3)}; \text{ (c) } \frac{\rho}{2\epsilon_0}(r_2^2 - r_1^2) \text{ com } \rho \text{ como em (b); (d) sim}$$

13. (a) -4,5 kV; (b) -4,5 KV **15.** $x = d/4$ e $x = -d/2$ **17.** (a) 0,54 mm; (b) 790 V **19.** $6,4 \times 10^8$ V **21.** $2,5q/4\pi\epsilon_0 d$ **25.** (a) $-5Q/4\pi\epsilon_0 R$; (b) $-5Q/4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{1/2}$ **27.** $(\sigma/8\epsilon_0)[(z^2 + R^2)^{1/2} - z]$ **29.** $(c/4\pi\epsilon_0)[L - d \ln(1 + L/d)]$ **31.** 17 V/m num ângulo de 135° a

partir do eixo x positivo **35.** (a) $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 d(d+L)}$, para a esquerda;

(b) 0 **37.** $-0,21q^2/\epsilon_0 a$ **39.** (a) $+6,0 \times 10^4$ V; (b) $-7,8 \times 10^5$ V; (c) 2,5 J; (d) aumenta; (e) o mesmo; (f) o mesmo **41.**

$$W = \frac{qQ}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \mathbf{43.} 2,5 \text{ km/s} \quad \mathbf{45.} \text{ (a) } 0,225 \text{ J; (b) } A, 45,0 \text{ m/s}^2;$$

B, 22,5 m/s²; (c) A, 7,75 m/s; B, 3,87 m/s **47.** 0,32 km/s **49.** $1,6 \times 10^{-9}$ m **51.** $2,5 \times 10^{-8}$ C **53.** (a) -180 V; (b) 2700 V, -8900 V **55.** (a) -0,12 V; (b) $1,8 \times 10^{-8}$ N/C, radialmente para dentro

4) (a) ~ 2,5 V; (b) ~ 2,5 V; (c) 0

6) $E \cong 2,4 \cdot 10^4$ N/C; (b) ~ $2,9 \cdot 10^3$ V

$$\mathbf{8.} \text{ (a) } V(r) = -\frac{q}{8\pi\epsilon_0} \frac{r^2}{R^3}$$

$$\text{(b) } V(R) = -\frac{q}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{R}$$

$$\mathbf{10.} \text{ (a) } V = V_0 - \frac{\sigma z}{2\epsilon_0}; \text{ (b) } W = \frac{\sigma z q_0}{2\epsilon_0}$$

$$\mathbf{16.} q_2 = 9q_1; \emptyset$$

$$\mathbf{20.} V = 0,944 \frac{kq}{d}$$

$$\mathbf{24.} V = 2k\lambda \ln \left(\frac{L + \sqrt{L^2 + 4d^2}}{2d} \right)$$

$$\mathbf{26.} V = \frac{-Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R}$$

$$\mathbf{28.} V = k\lambda \ln \left(\frac{d+L}{d} \right)$$

$$\mathbf{33.} \text{ (a) No enunciado; (b) } E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{(z^2 + R^2)^{3/2}}$$

$$\mathbf{34.} V = kc \left(\sqrt{L^2 + y^2} - y \right)$$

$$\mathbf{46.} v = \sqrt{\frac{2k|q|e}{m} \left(\frac{r-R}{Rr} \right)}$$

CAPÍTULO 26

PV 1. (a) permanece a mesma; (b) permanece a mesma; **2.** (a) diminui; (b) aumenta; (c) diminui **3.** (a) $V, q/2$; (b) $V/2, q$ **4.** (a) $q_0 = q_1 + q_{34}$; (b) igual (C_3 e C_4 estão em série) **5.** (a) permaneceria igual; de (b) até (d) aumentariam; (e) permaneceria igual (mesma diferença de potencial através da mesma separação entre placas) **6.** (a) permanece o mesmo; (b) diminui; (c) aumenta **P 1.** a, 2; b, 1; c, 3 **3.** a, em série; b, em paralelo; c, em paralelo **5.** (a) $C/3$; (b) $3C$; (c) em paralelo **7.** (a) igual; (b) igual; (c) maior; (d) maior **9.** (a) 2; (b) 3; (c) 1 **11.** (a) aumenta; (b) aumenta; (c) diminui; (d) diminui; (e) permanece a mesma, aumenta, aumenta, aumenta **EP 1.** 7,5 pC **3.** 3,0 mC **5.** (a) 140 pF; (b) 17 nC **7.** $5,04\pi\epsilon_0 R$ **11.** 9090 **13.** $3,16 \mu\text{F}$ **17.** 43 pF **19.** (a) 50 V; (b) $5,0 \times 10^{-5}$ C; (c) $1,5 \times 10^{-4}$ C **21.**

$$q_1 = \frac{C_1 C_2 + C_1 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3} C_1 V_0, \quad q_2 = q_3 = \frac{C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3} C_1 V_0$$

23. 72 F **25.** 0,27 J **27.** (a) 2,0 J **29.** (a) 2V; (b) $U_i = \epsilon_0 A V^2 / 2d, U_f = 2U_i$; (c) $\epsilon_0 A V^2 / 2d$ **35.** Pirex **37.** 81 pF/m **39.** 0,63 m² **43.** (a) 10 kV/m;

(b) 5,0 nC; (c) 4,1 nC **45.** (a) $C = 4\pi\epsilon_0 k \left(\frac{ab}{b-a} \right)$; (b) $q =$

$$4\pi\epsilon_0 k V \left(\frac{ab}{b-a} \right); \text{ (c) } q' = q(1 - 1/\kappa)$$

9) No enunciado

10) 22/3 μF

15) No enunciado

20) (a) $q_1, q_3 = 9 \mu\text{C}; q_2, q_4 = 16 \mu\text{C}$

(b) $q_1 = 8,4 \mu\text{C}; q_2 = 16,8 \mu\text{C}; q_3 = 10,8 \mu\text{C}; q_4 = 14,4 \mu\text{C}$

40) No enunciado

41) No enunciado

$$\mathbf{42.} C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \left(\frac{\kappa_2 \kappa_3}{\kappa_2 + \kappa_3} + \frac{\kappa_1}{2} \right)$$

47) No enunciado