

**Segunda Parte:** os números dos capítulos, das seções e dos exercícios são os da 12ª edição do Física III de Sears e Zemansky. Os números entre parênteses se referem aos capítulos, às seções e aos exercícios correspondentes da 10ª edição.

---

**Capítulo 24(25): Capacitância (Dielétricos)**

- Número de aulas: **1 aula** de 7/4 a 11/4
- Seções do livro texto: 24.4 *Dielétricos*; 24.5 *Modelo Molecular da Carga Induzida*; 24.6 *Lei de Gauss em Dielétricos* (25.5 a 25.6).
- Exercícios sugeridos: 24.39(25.27), 24.71(25.55), 24.72(25.56).

**Capítulo 25(26): Corrente, Resistência e Força Eletromotriz**

- Número de aulas: **2 aulas** de 13/4 a 25/4 (MEC e QUI) e de 12/4 a 14/4 (CIV)
- Seções do livro texto: 25.1 *Corrente*; 25.2 *Resistividade*; 25.3 *Resistência*; 25.4 *Força Eletromotriz e Circuitos*; 25.5 *Energia e Potência em Circuitos Elétricos* (26.1 a 26.6).
- Exercícios sugeridos: 25.1(26.1), 25.13(26.9), 25.32(26.20), 25.35(26.21), 25.64(26.48), 25.65(26.49).

**Capítulo 27(28): Campo Magnético e Forças Magnéticas**

- Número de aulas: **2 aulas** de 27/4 a 2/5 (MEC e QUI) e de 26/4 a 28/4 (CIV)
- Seções do livro texto: 27.1 *Magnetismo*; 27.2 *Campo Magnético*; 27.3 *Linhas de Campo Magnético e Fluxo Magnético*; 27.4 *Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético*; 27.5 *Aplicações de Movimento e Partículas Carregadas*; 27.6 *Força Magnética sobre um Condutor Transportando uma Corrente*; 27.7 *Força e Torque sobre uma Espira de Corrente*; 27.8 *O Motor de Corrente Contínua* (28.1 a 28.9).
- Exercícios sugeridos: 27.1(28.1), 27.6(28.6), 27.15(28.13), 27.46(28.32), 27.49(28.35), 27.75(28.57), 27.81(28.63), 27.82(28.64), 27.83(28.65).

**Capítulo 28(29): Fontes de Campo Magnético**

- Número de aulas: **3 aulas** de 4/5 a 11/5 (MEC e QUI) e de 3/5 a 10/5 (CIV)
- Seções do livro texto: 28.1 *Campo Magnético de uma Carga em Movimento*; 28.2 *Campo Magnético de um Elemento de Corrente*; 28.3 *Campo Magnético de um Condutor Retilíneo Transportando uma Corrente*; 28.4 *Força entre Condutores Paralelos*; 28.5 *Campo Magnético de uma Espira Circular*; 28.6 *Lei de Ampère*; 28.7 *Aplicações da Lei de Ampère* (29.1 a 29.8).
- Exercícios sugeridos: 28.1(29.1), 28.19(29.10), 28.29(29.15), 28.30(29.18), 28.36(29.23), 28.38(29.25), 28.45(29.29), 28.63(29.49), 28.64(29.50), 28.66(29.52).

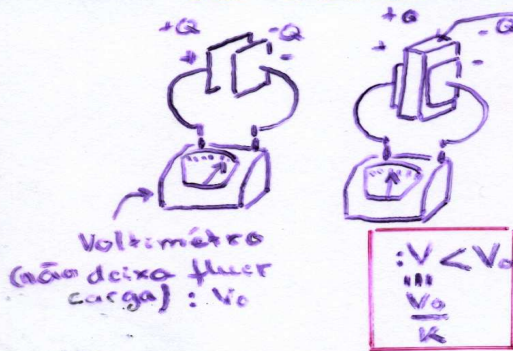
**P2 em 12 de maio às 13:10**

---

### Capacitores com dielétricos

Dieletrico é um material não condutor como borracha, vidro ou papel encerado. Ele tem associado a ele, um certo valor de constante dielétrica (que indica quanto ele modifica o capacitor). Ela vale 1 p/ vácuo e 1 p/ o ar. Ele tem também um certo valor de rigidez elétrica (campo elétrico máximo que pode existir num dielétrico sem provocar o rompimento dielétrico = ionização parcial que permite a condução através do material)  
 → cf. tabela

Pode-se colocar em evidência o efeito do dielétrico da maneira seguinte:



Sem diel.:  $C_0 = \frac{Q}{V_0}$

com diel.:  $C = \frac{Q}{V} = K C_0 > C_0$

(descoberto por Faraday em 1837)

Assim, experimentalmente:

1. O dielétrico aumenta a capacitância de um capacitor:  $C_0 \rightarrow C = K C_0$
2. O dielétrico aumenta a <sup>ou carga máx</sup> voltagem operacional máxima de um capacitor (cf. tabela); então aumenta a energia máxima armazenável  
 $(U_0 = \frac{1}{2} C_0 V_0^{max 2} \rightarrow U = \frac{1}{2} C V^{max 2})$
3. O dielétrico pode proporcionar suporte mecânico entre as duas placas condutoras.



ção  
ráfico

(1791-  
el Faraday  
1867)

Michael Faraday foi um físico e químico britânico, que é considerado, muitas vezes, o maior cientista experimental do século XIX. Suas muitas contribuições ao estudo da eletricidade incluem a invenção do motor elétrico, do gerador elétrico e do transformador, além da descoberta da indução eletromagnética, das leis da eletrólise, e da descoberta do benzeno e da teoria de o plano de polarização da luz ser desviado, angularmente, pela ação de um campo elétrico.

Faraday nasceu em 1791, no interior da Inglaterra, mas sua família, logo depois, se mudou para Londres. Uma, entre dez crianças, e o filho de um ferreiro, Faraday recebeu um mínimo de educação e, aos 14 anos, tornou-se aprendiz de encadernador. Era fascinado pelos artigos sobre eletricidade e química e teve a sorte de ter um patrão que permitia que ele lesse os livros na oficina e ouvisse conferências científicas. Recebeu uma certa educação em ciência na City Philosophical Society.

Ao terminar seu aprendizado, em 1812, esperava dedicar-se à encadernação de livros, e não à ciência. Naquele mesmo ano, Faraday foi a uma conferência de Humphry Davy, que fizera muitas contribuições no campo do calor e da termodinâmica. Faraday, então, enviou a Davy 386 notas, encadernadas em couro: Davy ficou impressionado e nomeou Faraday seu assistente permanente na Royal Institution. Faraday viajou pela França e pela Itália, de 1813 a 1815, com Davy, visitando os principais cientistas da época, como Volta e Vauquelin.

Apesar de sua limitada capacidade matemática, Faraday conseguiu fazer as descobertas básicas sobre as quais se baseiam, praticamente, todas as aplicações que fazemos da eletricidade. Concebeu a natureza fundamental do magnetismo e, num certo grau, também a da eletricidade e da luz.

Homem modesto, que se contentava em servir à ciência da melhor maneira possível, Faraday recusou ser enobrecido e também a oferta de se tornar presidente da Royal Society. Era também um homem de princípios éticos; recusou-se a tomar parte na preparação de gás tóxico para ser usado na guerra da Crimeia.

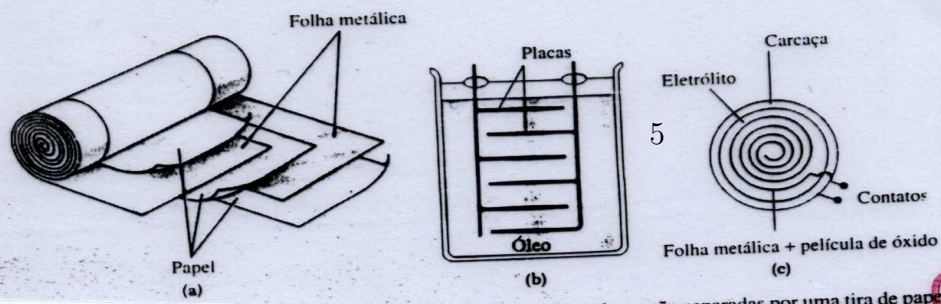
Faraday morreu em 1867. Suas diversas realizações são reconhecidas no uso do seu nome. O faraday é a quantidade de eletricidade que provoca a eletrólise de uma quantidade padrão de substância, e a unidade SI de capacitância é o farad.

(Cortesia da AIP Niels Bohr Library)

**TABELA 26.1 Constante Dielétrica e Rigidez Dielétrica de Diversos Materiais à Temperatura Ambiente**

Material	Constante Dielétrica $\epsilon$	Rigidez Dielétrica (V/m)
Vácuo	1,00000	—
Ar (seco)	1,00059	$3 \times 10^6$
Baquelite	4,9	$24 \times 10^6$
Quartzo fundido	3,78	$8 \times 10^6$
Vidro pìrex	5,6	$14 \times 10^6$
Poliestireno	2,56	$24 \times 10^6$
Teflon	2,1	$60 \times 10^6$
Borracha de neopreno	6,7	$12 \times 10^6$
Náilon	3,4	$14 \times 10^6$
Papel	3,7	$16 \times 10^6$
Titanato de estrôncio	233	$8 \times 10^6$
Água	80	—
Óleo de silicone	2,5	$15 \times 10^6$

\*A rigidez dielétrica é igual ao campo elétrico máximo que pode existir num dielétrico sem provocar rompimento dielétrico.



**Fig. 26.12** Três modelos de capacitores comerciais. (a) Capacitor de papel, cujas placas são separadas por uma tira de papel na forma de um cilindro. (b) Capacitor de alta voltagem com as placas separadas por óleo isolante. (c) Capacitor eletrolítico.

UMA DESCRIÇÃO ATÔMICA DOS DIELÉTRICOS

Sob a ação de um campo elétrico, moléculas apolares (= sem momento de dipolo elétrica) podem desenvolver um momento de dipolo. Isto ocorre porque sob a ação de campo, o centro das cargas negativas pode não coincidir com o centro das cargas positivas.

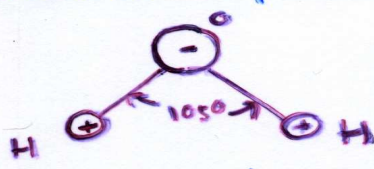
$\vec{E}_0 = 0$



$\vec{E}_0 \neq 0$

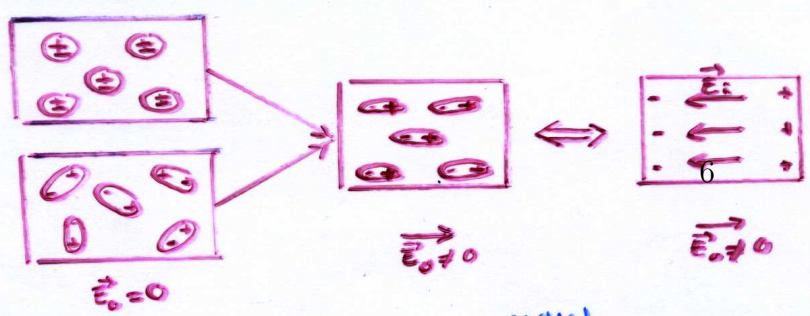


Existem outros materiais, como a água, com moléculas polares (com momento de dipolo, mesmo a campo nulo).



Os momentos de dipolo tendem a se alinhar com o campo. Assim no caso de moléculas polares, da mesma forma que ocorre com a molé.

culas apolares, os momentos de dipolo se alinham com o campo e provocam diminuição do campo interno:



O campo resultante <sup>total</sup> quando  $\vec{E}_0 \neq 0$  é:  
 $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_i$ . Mas  $E = E_0 - E_i < E_0$ .

Aplicamos isto ao diel. entre as placas de um capacitor carregado: 54

Como campo el. no interior do diel. é menor, a voltagem também é menor ( $V < V_0$ ). (isto implica que a capacitância aumenta:  $C = \frac{q}{V} > C_0 = \frac{q}{V_0}$ .  
(índice "0" = vácuo))

Vamos analisar mais quantitativamente o que ocorre no caso do capacitor plano:



devido ao campo el. entre as placas,

✓ Aparece uma densidade superficial de carga  $\sigma_i$  no dielétrico. (Quando o diel. é homogêneo pode surgir uma densidade volumétrica de carga.)

Como as placas são planas:  $E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$   
e para o diel. polarizado:  $E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}$   
assim

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} \\ V = \frac{V_0}{k} \Rightarrow E = \frac{E_0}{k} \end{array} \right. \Rightarrow \frac{E}{k\epsilon_0} = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} \Leftrightarrow \sigma_i = \left( \frac{k-1}{k} \right) \sigma$$

[Se não há diel.,  $k=1$  e  $\sigma_i=0$ .  
Se  $k \gg 1$ ,  $\sigma_i \approx \sigma$  e  $E \approx 0$ .]

De modo geral:

Chama-se permissividade do diel.  $\epsilon \equiv k\epsilon_0$

Esta quantidade simplifica o problema:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \longrightarrow \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \quad \longrightarrow \quad u = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

(vácuo) (diel.)

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \longrightarrow \quad C = \epsilon \frac{A}{d}$$

$$U_0 = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 \quad \longrightarrow \quad U = \frac{1}{2} C V^2$$

(verifiquem!)

## Lei de Gauss em dielétricos

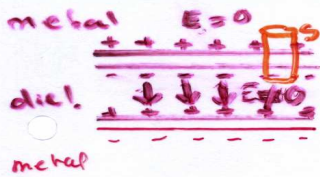
(45)

A lei de Gauss  $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}$  vale desde que

$\vec{E}$  = campo elétrico total

$Q_{\text{enc}}$  = carga total (incluindo cargas de polarização) dentro de  $S$ .

Como em geral, as cargas de polarização não são simples de obter, é prático re-escrever a lei de Gauss, evitando-as.



Temos  $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \underbrace{\int_{\text{tampa cima}} \vec{E} \cdot d\vec{A}}_{0 \text{ pois } E=0} + \underbrace{\int_{\text{corpo}} \vec{E} \cdot d\vec{A}}_{\text{pois } E \parallel d\vec{A}} + \underbrace{\int_{\text{tampa baixo}} \vec{E} \cdot d\vec{A}}_{EA}$

$$EA = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} = \frac{(\epsilon - \epsilon_0)A}{\epsilon_0}$$

Usando  $\epsilon_r = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0}$  temos:  $EA = \frac{QA}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{QA}{\epsilon}$

Assim a lei de Gauss pode ser re-escrita:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon} \quad \leftarrow \text{(sem cargas de polarização)}$$

↑ campo eletr. "total"

↑ fenômeno de polarização "escondido" aqui

[Pode-se introduzir  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ , vetor de deslocamento. Neste caso  $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q_{\text{enc}}^{\text{livre}}$ ]

(46)

Exemplos:

⑥ Um capacitor de placas planas tem  $A = 2000 \text{ cm}^2$  e  $d = 1,00 \text{ cm}$ . Ele é conectado a uma fonte de alimentação e carregado até que a ddp atinja  $V_0 = 3000 \text{ V}$ . A seguir ele é desconectado da fonte e uma placa plástica isolante é inserida preenchendo totalmente o espaço entre as placas. A ddp diminui para  $1000 \text{ V}$ , enquanto a carga de cada placa permanece constante.

Calcular: a) a capacitância original  $C_0$

b) a carga  $Q$  de cada placa

c) a capacitância  $C$  com diel.

d) a este  $k$  do diel.

e) a permissividade  $\epsilon$  do diel.

f) o módulo  $Q_i$  da carga sobre cada face do diel.

g) o campo el. original  $E_0$  entre as placas

h) o campo el.  $E$  depois que o diel. é inserido

i) a en. armazenada original  $U_0$

j) a en. " " com diel.  $U$

$$a) C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} = (8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}) \frac{2,00 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2}{1,00 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 1,77 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$

$$b) Q = C_0 V_0 = (1,77 \cdot 10^{-10} \text{ F}) (3,00 \cdot 10^3 \text{ V}) = 5,31 \cdot 10^{-7} \text{ C}$$

$$c) C = \frac{Q}{V} = \frac{5,31 \cdot 10^{-7} \text{ C}}{1,00 \cdot 10^3 \text{ V}} = 5,31 \cdot 10^{-10} \text{ F} = 531 \text{ pF}$$

$$d) k = \frac{C}{C_0} = \frac{5,31 \cdot 10^{-10} \text{ F}}{1,77 \cdot 10^{-10} \text{ F}} = 3,00$$

$$[\text{alt. } k = \frac{V}{V_0}]$$

$$e) \epsilon = k \epsilon_0 = (3,00) (8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)) = 2,66 \cdot 10^{-11} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

$$f) Q_i = \sigma_i A \text{ com } \sigma_i = \frac{k-1}{k} \sigma \Rightarrow Q_i = (1 - \frac{1}{k}) Q = (1 - \frac{1}{3}) Q = 3,54 \cdot 10^{-7} \text{ C}$$



97

$$g) E_0 = \frac{V_0}{d} = \frac{3000V}{1,00 \cdot 10^{-2}m} = 3,00 \cdot 10^5 \text{ V/m}$$

$$h) E = \frac{V}{d} = 1,00 \cdot 10^5 \text{ V/m} \quad [\text{alt. } E = \frac{E_0}{2}]$$

$$i) U_0 = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 = \frac{1}{2} (1,77 \cdot 10^{-10} \text{ F}) (3000V)^2 = 7,97 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

$$j) U = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} (5,31 \cdot 10^{-10} \text{ F}) (1000V)^2 = 2,66 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Porque  $U < U_0$ ? quando o diel. está sendo inserido, ele é puxado para o interior por forças elétricas devidas as cargas nas placas. isto custa energia.

10

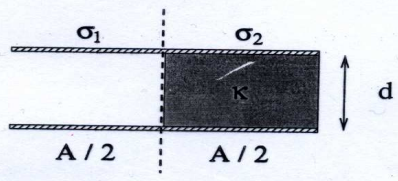
[Obs.: a deformação do campo el. nos condensadores capacitados sem diel. causa isto.]

**P2**

**Física III**  
Escola Politécnica - 2007  
FGE 2203 - GABARITO DA P2  
17 de maio de 2007

**Questão 1**

Um capacitor plano é constituído por duas placas planas paralelas de área  $A$ , separadas por uma distância  $d$ . Estas placas são mantidas a uma diferença de potencial  $V$ . O potencial na placa de cima é maior do que o potencial na placa de baixo. Metade do espaço entre as placas está preenchido por um material dielétrico com constante dielétrica  $\kappa$ , conforme a figura abaixo.



- (a) (1,0 ponto) Qual é a capacitância  $C$  do sistema?
- (b) (1,0 ponto) Quais são as densidades superficiais de carga  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  na placa superior do capacitor (1 e 2 designam, respectivamente, o lado esquerdo com vácuo e o lado direito com dielétrico)? Expresse sua resposta em função de  $\epsilon_0$ ,  $\kappa$  e  $V$ .
- (c) (0,5 ponto) Quais são os módulos dos campos elétricos  $E_1$  e  $E_2$  entre as placas do capacitor?

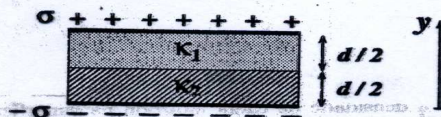
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO EM OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO EM OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO EM OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO EM OUTRO LADO

P2

**Física III**  
Escola Politécnica - 2008  
FGE 2203 - GABARITO DA P2  
15 de maio de 2008

**Questão 1**

Um capacitor com placas paralelas de área  $A$ , é preenchido com dielétricos com constantes dielétricas  $\kappa_1$  e  $\kappa_2$ , conforme mostra a figura.



- (a) (1,0 ponto) Calcule os campos elétricos  $\vec{E}_1$  e  $\vec{E}_2$  em cada um dos dielétricos e a diferença de potencial entre as placas.
- (b) (1,0 ponto) Calcular a capacitância.
- (c) (0,5 ponto) Calcule a densidade superficial de carga na superfície do dielétrico 1 (expresse sua resposta em função de  $\sigma$  e  $\kappa_1$ ).

**P2**

**Física III - 4320203**

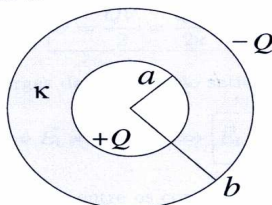
Escola Politécnica - 2010

GABARITO DA P2

**13 de maio de 2010**

**Questão 1**

Considere um capacitor esférico formado por um condutor interno de raio  $a$  e um condutor externo de raio  $b$ , conforme a figura. O espaço entre os condutores é preenchido com material de constante dielétrica  $\kappa$ .



Carrega-se o condutor interno com carga  $+Q$  e o externo com carga  $-Q$  (cargas livres). O campo elétrico devido apenas a essas cargas livres é

$$\vec{E}_0 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r},$$

onde  $r$  é a distância ao centro do capacitor esférico.

- (0,5 ponto) Escreva a expressão do vetor campo elétrico dentro do dielétrico ( $a < r < b$ ).
- (1,0 ponto) Calcule a energia  $U_0$  armazenada no capacitor na ausência de dielétrico (em função de  $a$ ,  $b$ ,  $Q$  e  $\epsilon_0$ ), e a energia  $U$  na presença do dielétrico (em função de  $a$ ,  $b$ ,  $Q$ ,  $\epsilon_0$  e  $\kappa$ ).
- (1,0 ponto) Calcule o vetor campo elétrico  $\vec{E}_i$  devido somente às cargas induzidas (ligadas) no dielétrico.

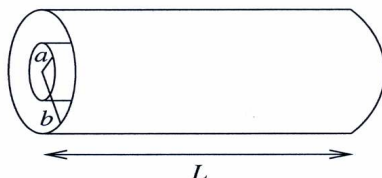
P2

### Física III

Escola Politécnica - 2009  
FGE 2203 - GABARITO DA P2  
14 de maio de 2009

#### Questão 1

Considere um capacitor cilíndrico de raio interno  $a$ , raio externo  $b$  e comprimento  $L \gg b$ , conforme a figura.



Sejam  $+Q$  e  $-Q$  as cargas livres nos cilindros de raios  $a$  e  $b$ , respectivamente. O espaço entre os cilindros é inteiramente preenchido com um material de constante dielétrica  $\kappa$ . Ignorando-se a região das bordas, campo elétrico entre os cilindros na ausência do dielétrico é dado por

$$\vec{E}_0 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L r} \hat{e}_r.$$

- (0,5 ponto) Determine o vetor campo elétrico dentro do dielétrico ( $a < r < b$ ).
- (1,0 ponto) Calcule, a partir da definição, a capacitância na ausência do dielétrico e com o dielétrico.
- (1,0 ponto) Determine as densidades superficiais de carga induzidas  $\sigma_i$  no dielétrico devido à polarização em  $r = a$  e em  $r = b$ .

14