

# ELETROMAGNETISMO:

da magia da eletricidade e do magnetismo à descoberta das ondas electromagnéticas



Lucília Brito

Departamento de Física da  
Universidade de Coimbra

# PARTE I

- ✓ Algumas considerações sobre a evolução da eletricidade e do magnetismo;
- ✓ A interação eletromagnética no quadro das interações fundamentais;
- ✓ A lei de Coulomb: aplicações;
- ✓ O campo elétrico criado por diversas distribuições de cargas;
- ✓ Linhas do campo elétrico; lei de Gauss;
- ✓ Energia potencial eletrostática; relação entre campo elétrico e potencial elétrico;
- ✓ Condensadores e dielétricos.

## No Princípio foi assim...

- ★ Muito espanto, algum temor, muito mistério, muita magia:

*“Os deuses estão em todas as coisas, magnetes e âmbar ambos têm uma alma que lhes confere o poder de atraírem as coisas”*

Thales de Mileto, no ano 600 a. C.

“Foi de casa em casa a arrastar dois lingotes metálicos, e toda a gente ficou espantada ao ver como as caldeiras, os tachos, as tenazes e os fogareiros caíam dos seus lugares ... e até os objectos perdidos há muito tempo apareciam por onde mais se procurara e arrastavam-se em debandada turbulenta atrás dos ferros mágicos de Melquíades. *“As coisas têm vida própria”*, apregoava o cigano com sotaque áspero, *“é tudo uma questão de lhes acordar a alma”*

*Cem anos de solidão*, G. Garcia Marquez

## No Princípio foi assim...

- ★ A observação das trovoadas e o desejo de poder armazenar aquela força (?), aquela energia (?), aquele fluido (?) que destruía casas e árvores e poder “domesticá-lo” para usar quando e como fosse útil!
- ★ A observação dos fogos de santelmo (Sant’ Elmo) nos mastros das embarcações e nos extremos das lanças dos soldados, vistos como mensagens de bom augúrio por parte dos deuses...
- ★ A utilização de pedras-guia pelos chineses nos seus longos percursos por terra e por mar → invenção da bússola no século XII.

# É preciso “tomar notas” sobre as coisas que já sabemos

- 1600 → William Gilbert reuniu na obra *De Magnete* os relatos das experiências e das observações sobre os fenômenos elétricos e sobre os fenômenos magnéticos
  - Introduziu o termo elétrico para caracterizar materiais que se comportavam como o âmbar (elektron);
  - Sugeriu uma explicação para o comportamento das agulhas magnéticas usadas na orientação pelos viajantes;
  - Deixou-nos as designações de Pólo Norte e Pólo Sul magnéticos...

# Ao longo do século XVIII

- ✓ **1746** Peter Musschenbroek: armazenou pela 1ª vez energia elétrica numa garrafa: a garrafa de Leiden foi o 1º condensador;
- ✓ **1760** Benjamin Franklin instalou o 1º pára-raios na casa de um comerciante de Filadélfia;
- ✓ **1767** Joseph Priestley
- ✓ **1771** Henri Cavendish
- ✓ **1785** Charles Coulomb

Estudos quantitativos sobre os efeitos entre corpos carregados: **a lei de Coulomb.**

# Esperem para ver: vem aí o século XIX ...

- ✓ 1800 Alessandro Volta inventou a pilha;
- ✓ 1813 Humphry Davy inventou a lâmpada de arco;
- ✓ 1820 Hans C. Oersted observou o efeito de uma corrente elétrica sobre uma agulha magnética;
- ✓ 1820 ↔ 1830

Jean B. Biot e Félix Savart

Andre-Marie Ampère

Dominique Arago

Pierre S. Laplace

Estudaram os campos magnéticos criados por circuitos com diversas geometrias; lei de Biot e Savart; lei de Ampère, etc.

# E ainda não terminou!

- ✓ **1831** Michael Faraday e H. Lenz descobriram a indução eletromagnética; Joseph Henry ficou (quase) esquecido...
- ✓ **1865** James Maxwell estabeleceu as equações do campo eletromagnético; unificou o eletromagnetismo com a ótica.
- ✓ **1887** Heinrich Hertz produziu e detetou ondas eletromagnéticas (ondas hertzianas...)



Ah! Ah! Ah! Então só agora é que me descobriram?!  
Chamo-me eletrão e ando metido em tudo isto desde o princípio ...

**1897** J. J. Thomson determinou a razão  $e/m$ : identificou o eletrão

**1909** Robert Millikan determinou o valor da carga do eletrão (carga elementar)

# A interação eletromagnética no quadro das interações fundamentais

Interação 	gravitacional	eletromagnética	forte	fraca
intensidade	muito pequena $10^{-40}$	pequena $10^{-3}$	grande $10$	pequena $10^{-5}$
alcance	longo infinito ( $\infty$ )	longo infinito ( $\infty$ )	curto $\leq 10^{-13}\text{cm}$	curto $\leq 10^{-18}\text{cm}$

  
importante ao nível de  
objectos de grande  
massa

  
importante ao nível  
da Física Atómica e  
Molecular

  
importantes ao nível dos  
núcleos atómicos

# Mais... sobre as interações fundamentais

- ★ Gravitacional experimentada por partículas com **massa**; mediada pelo **gravitão**...
- ★ Eletromagnética experimentada pelas partículas com **carga elétrica**; mediada pelo **fotão**.
- ★ Fraca experimentada pelas partículas que têm **sabor** (quarks e leptões); mediada pelos **bosões  $W^+$   $W^-$  e  $Z^0$**  (fracões).
- ★ Forte experimentada pelas partículas que têm **cor** (quarks); mediada pelos **gluões**.

# A unificação das interações fundamentais: como? quando?

Gravidade  
terrestre

Gravidade  
astronómica

Interação  
gravitacional



Eletricidade

Magnetismo

Interação  
eletromagnética

Interação fraca

Interação  
eletrofraca

Interação forte

Grande  
interação  
unificada-GUT

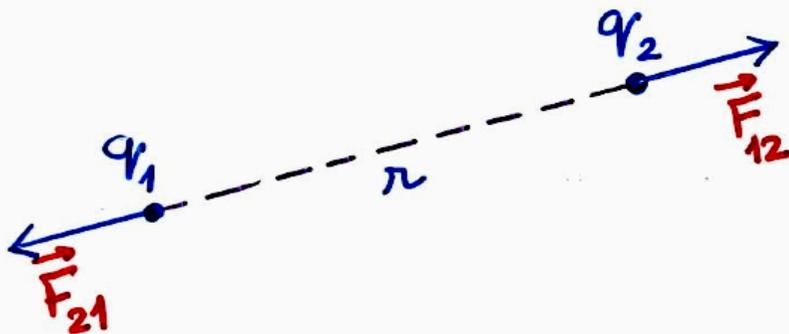


# A lei de Coulomb: interação entre duas cargas pontuais

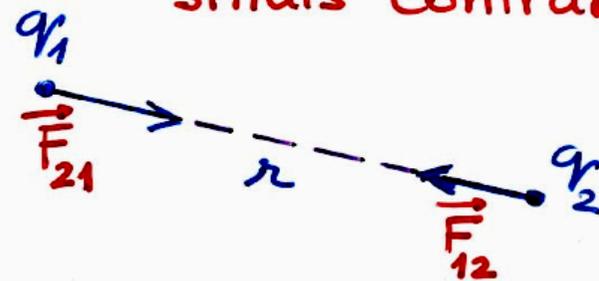
a lei de Coulomb

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$q_1$  e  $q_2$   
do mesmo sinal



$q_1$  e  $q_2$  de  
sinais contrários

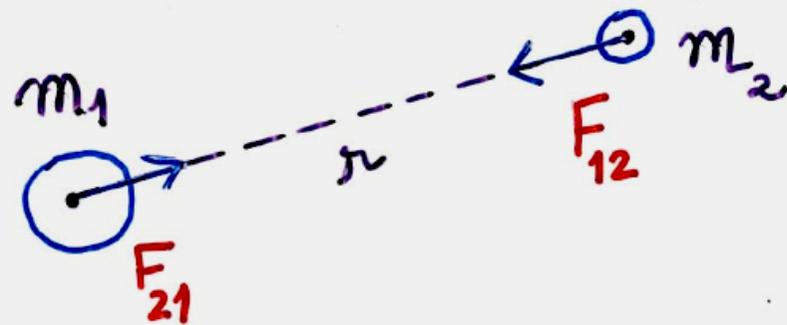


# A lei de gravitação universal

e a lei de atracção entre duas massas

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

força sempre  
atractiva



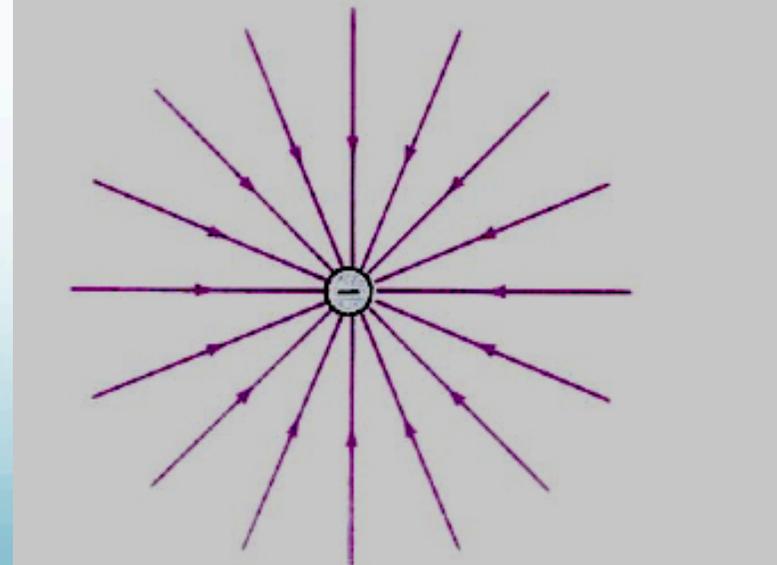
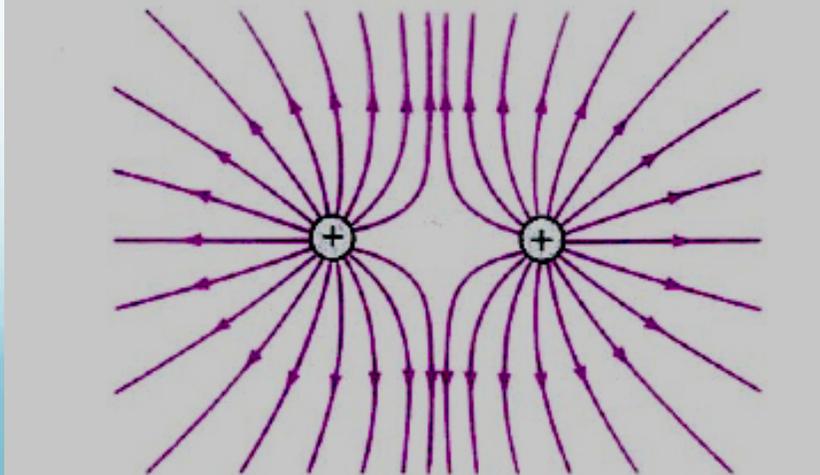
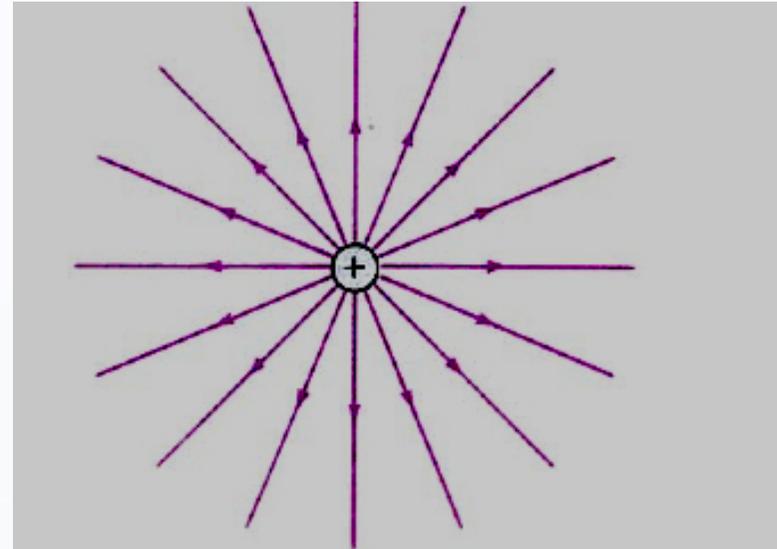
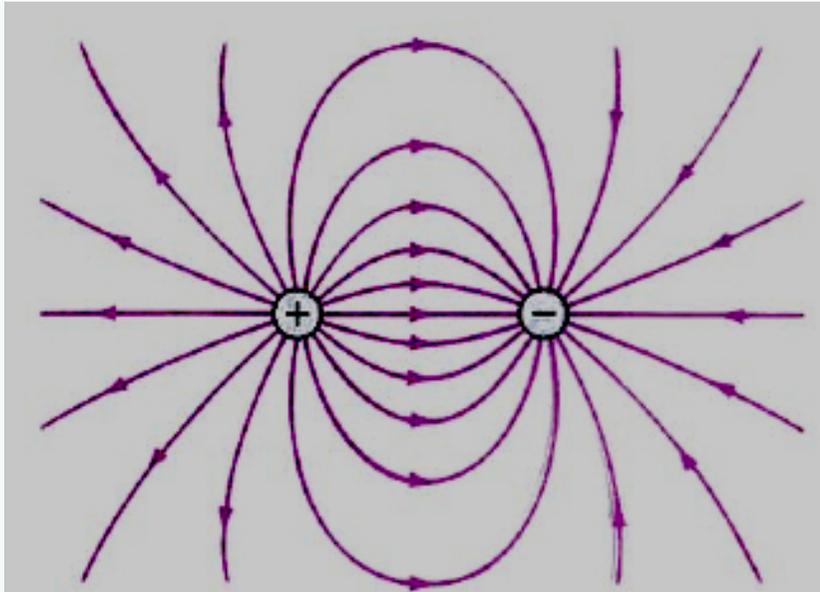
# O problema das interações à distância...

## ✓ Como “sabem” as cargas que devem atrair-se ou repelir-se?

- Já Newton manifestava grande desconforto em aceitar as interações à distância sem nenhum tipo de mediação;
- Uma tentativa de explicar estas ações tinha sido sugerida por William Gilbert: teoria dos eflúvios e das atmosferas através da qual se manifestariam as interações;
- Com Descartes o espaço era preenchido pelo controverso éter: as perturbações introduzidas pelos corpos carregados seriam levadas através do éter até aos outros corpos;

No início do séc. XIX, Faraday introduziu o conceito de **campo** para descrever a região de influência de uma determinada fonte: carga, massa, etc.

# Linhas do campo elétrico



# O campo de uma carga pontual

- ✓ Quando uma carga pontual está na vizinhança de outros objectos carregados, experimenta a força

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}$$

- ✓ Se o único objecto carregado “por perto” for outra carga pontual

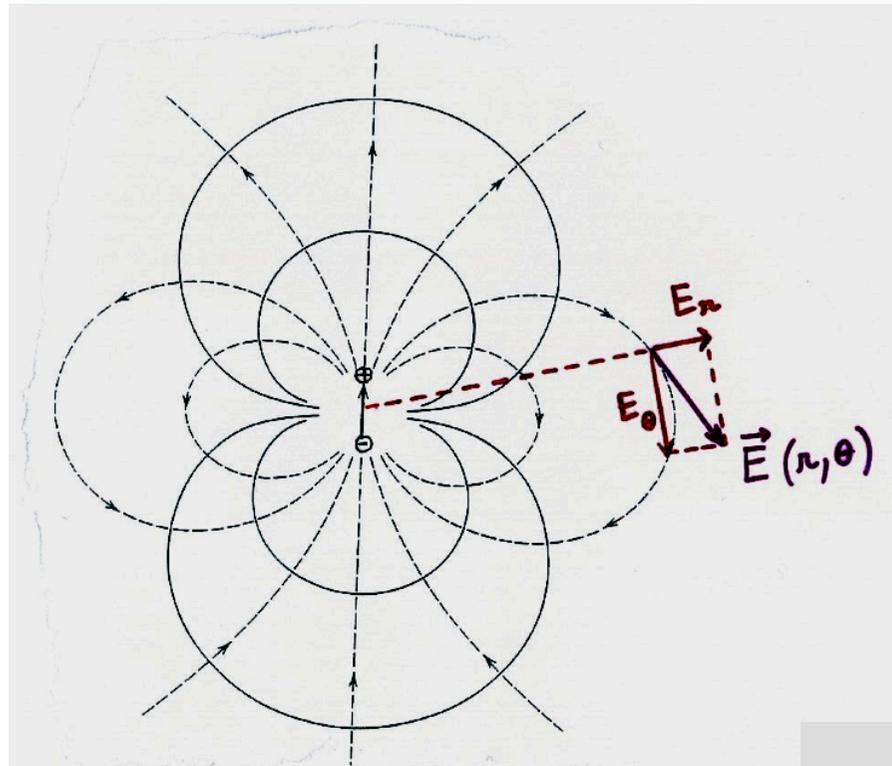
$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r^2} \hat{e}_r$$

- ✓ Assim, o campo criado por uma carga pontual tem a expressão

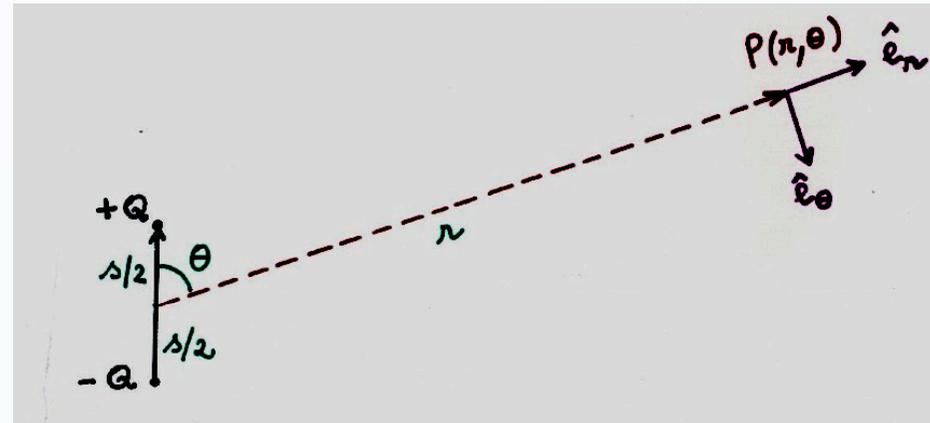
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{e}_r$$

# Diversas distribuições de cargas... diferentes expressões para o campo elétrico...

## Campo de um dipolo eléctrico



— limhas equipotenciais  
- - - limhas do campo eléctrico

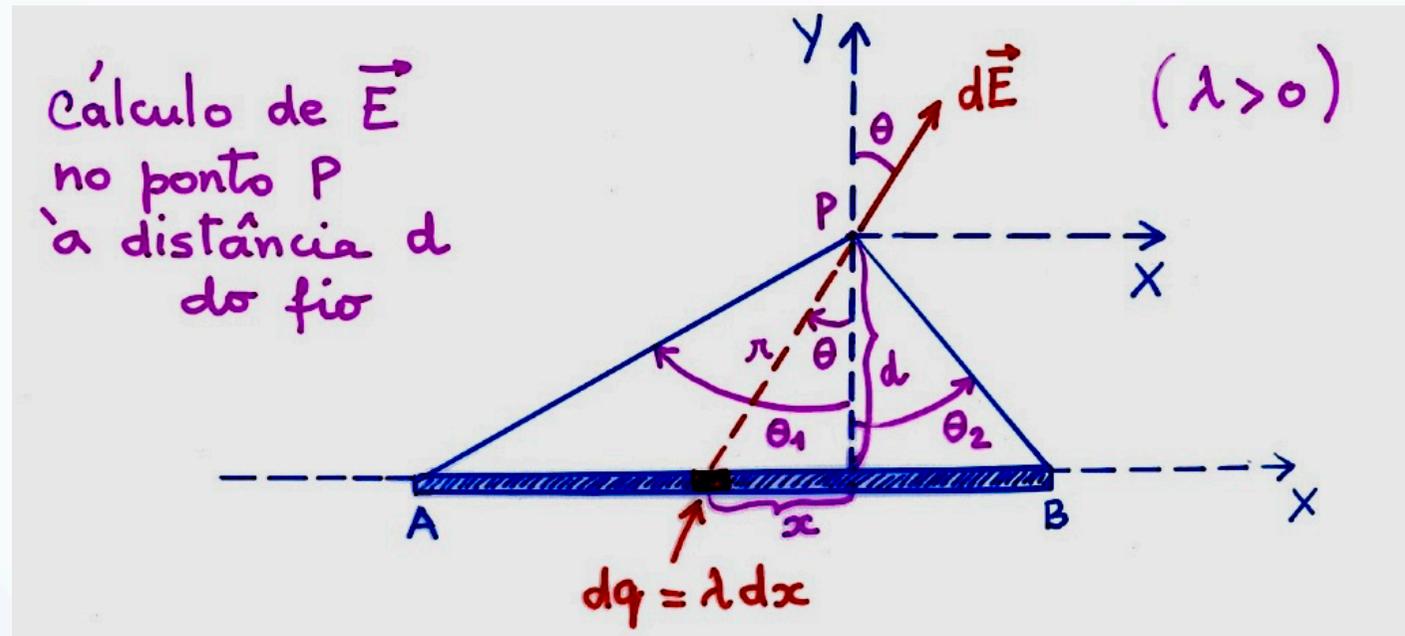


Campo eléctrico criado no ponto  $P(r, \theta)$

$$\vec{E}(r, \theta) = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} (2 \cos \theta \hat{e}_r + \sin \theta \hat{e}_\theta)$$

# A lei de Coulomb e o princípio de sobreposição

- ✓ sempre possível, mas pode ser trabalhoso ...

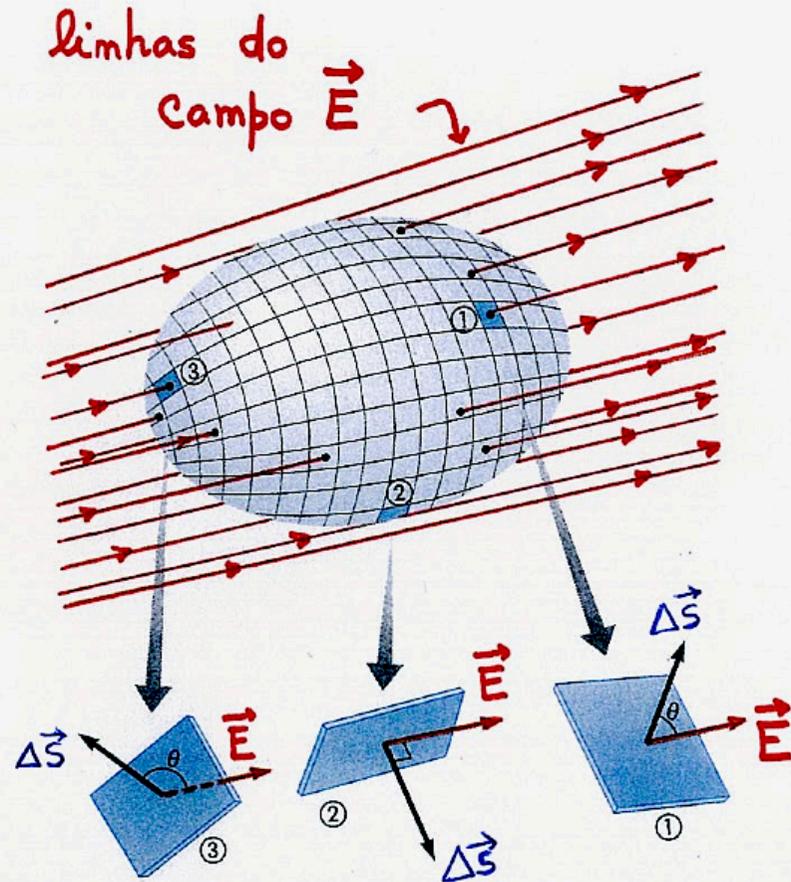


$$\begin{cases} E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 d} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \\ E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 d} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \end{cases}$$

Linha muito longa (linha "infinita")

$$\begin{matrix} \theta_1 \rightarrow -\frac{\pi}{2} \\ \theta_2 \rightarrow \frac{\pi}{2} \end{matrix} \rightarrow \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{d} \end{cases}$$

# Fluxo do campo elétrico



Superfície fechada numa região onde existe um campo elétrico  $\vec{E}$

A superfície está dividida em pequenas regiões de área  $\Delta S$

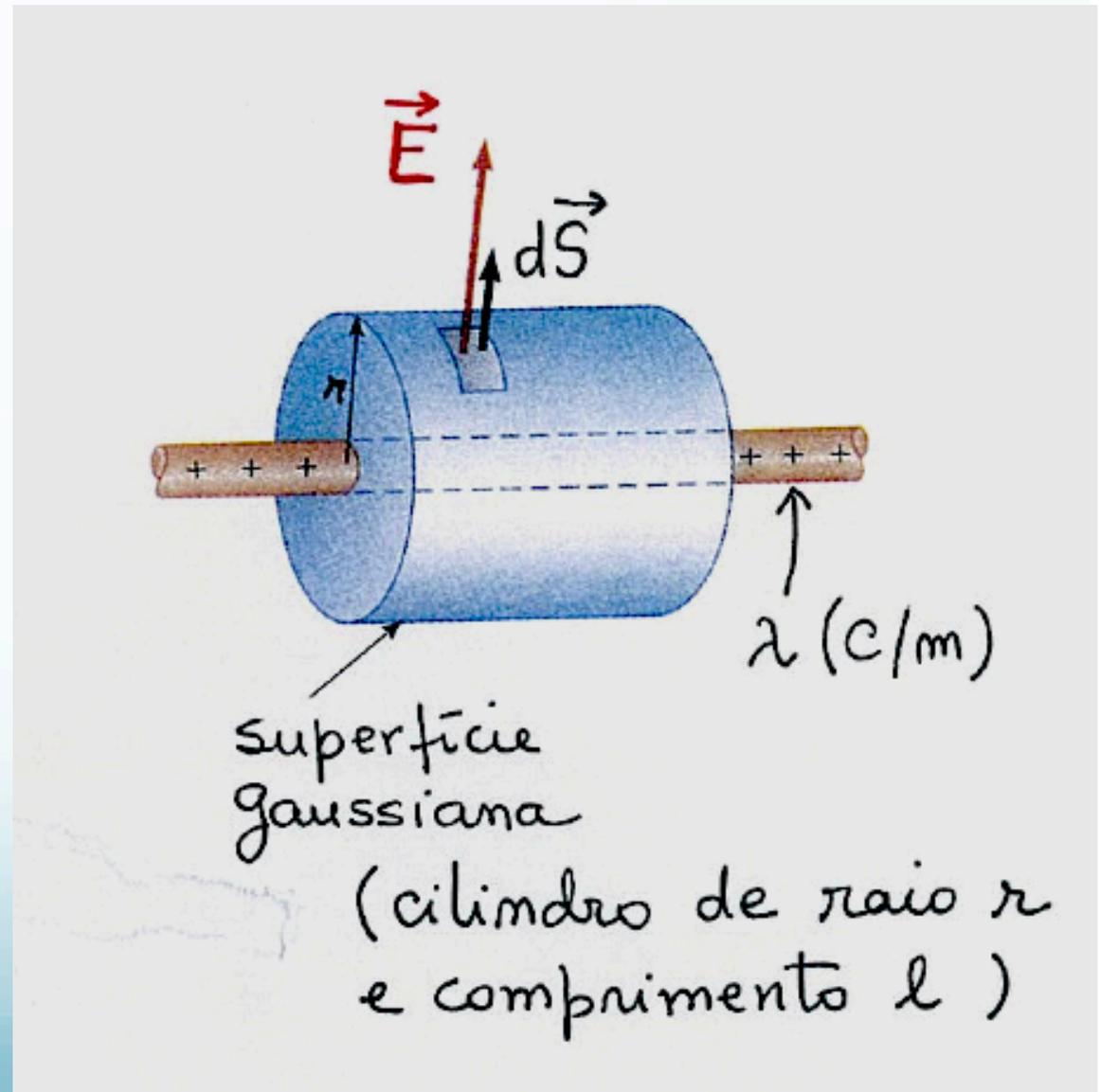
O fluxo através da área  $\Delta S$  é

$$\Delta\phi = \vec{E} \cdot \hat{n} \Delta S = \vec{E} \cdot \Delta\vec{S}$$

$\Delta\phi$  pode ser positivo (em ①)  
nulo (em ②)  
ou negativo (em ③)

# Linha carregada com a densidade uniforme de carga $\lambda$

Vamos calcular o fluxo do campo elétrico que sai através da superfície fechada!

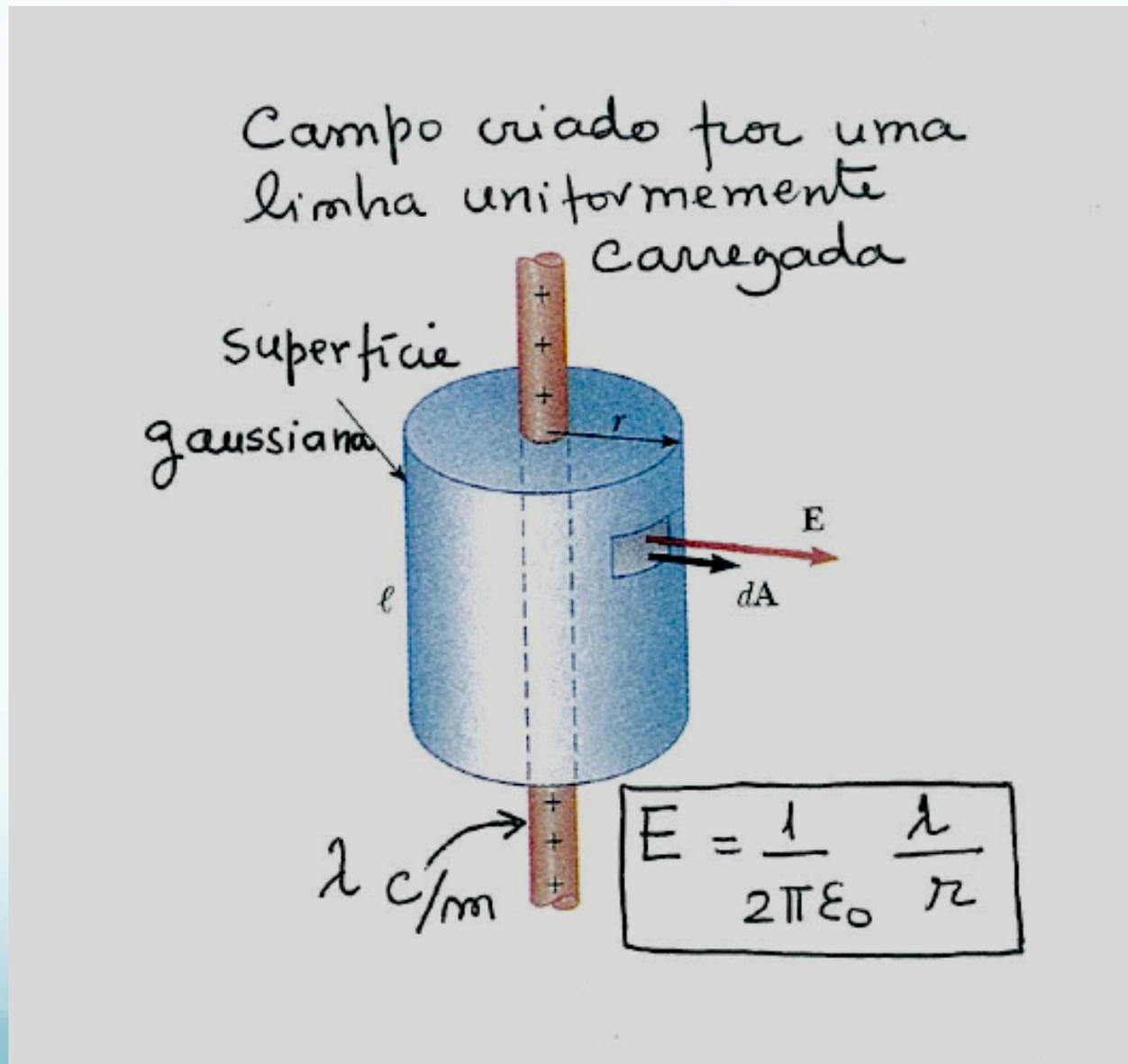


# A lei de Gauss para o campo elétrico

- ✓ A simetria da distribuição de cargas permite esboçar as linhas do campo;
- ✓ O fluxo do campo elétrico que atravessa uma superfície fechada deve ser proporcional à quantidade de carga que está no interior dessa superfície.

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS = \frac{q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

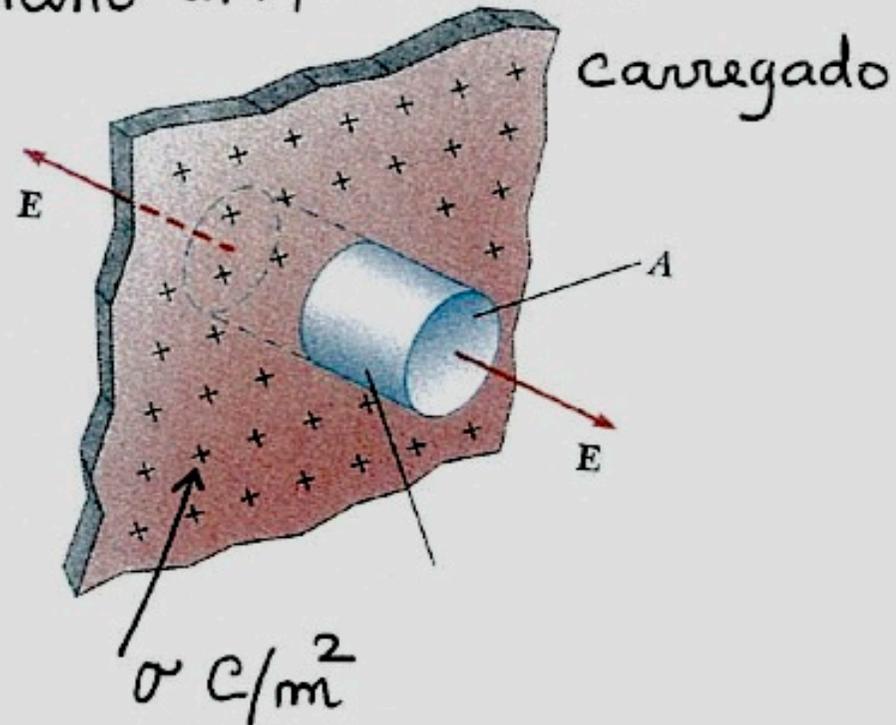
# Linha carregada com a densidade uniforme de carga $\lambda$



# Plano carregado com densidade uniforme de carga $\sigma$

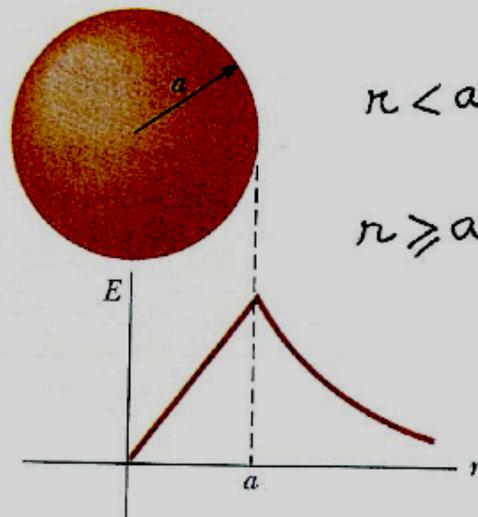
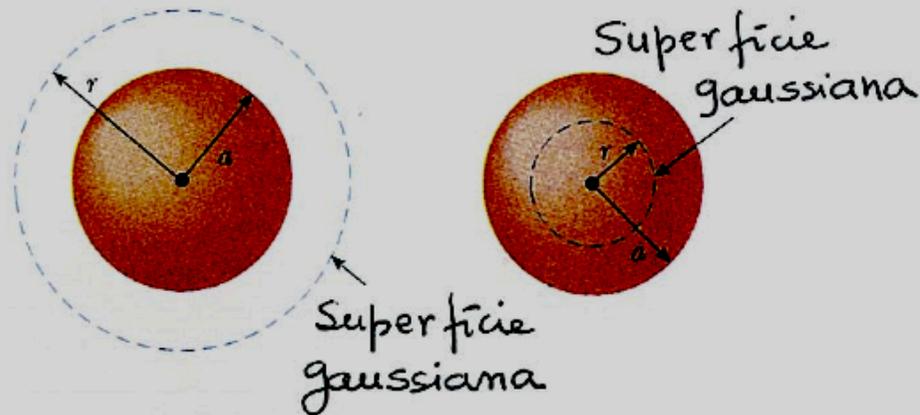
Exemplo de um campo uniforme em pontos próximos do plano

Campo criado por um plano uniformemente



$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

# Esfera isoladora com densidade de carga uniforme $\rho$



$$r < a : E = k \frac{Q}{a^3} r$$

$$r \geq a : E = k \frac{Q}{r^2}$$

# Distribuições de cargas e campos...

→ Campo criado por uma esfera condutora

- no interior da esfera,  $r < a \implies \vec{E} = 0$
- no exterior da esfera,  $r > a \implies \vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \hat{e}_r$

→ Campo criado por uma esfera isoladora

- no interior da esfera,  $r < a \implies \vec{E} = k \frac{Qr}{a^3} \hat{e}_r$
- no exterior da esfera,  $r \geq a \implies \vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \hat{e}_r$

# Energia potencial eletrostática entre cargas pontuais

- ✓ É necessário realizar trabalho para colocar duas cargas pontuais à distância  $r$  uma da outra

$$U_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r}$$

$$U_p(r_A) - U_p(r_B) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r_A} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r_B}$$

$$U_p(r_A) - U_p(r_B) = q_0 \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_A} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_B} \right) = q_0 (V_A - V_B)$$

# Potencial elétrico criado por diversas distribuições de cargas

→ Carga pontual  $q$

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

→ Esfera carregada com a carga  $Q$ , num ponto exterior à esfera

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

→ Linha infinita com a densidade linear de carga  $\lambda$

$$V(r) = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln r + C$$

→ Placa infinita com a densidade superficial de carga  $\sigma$

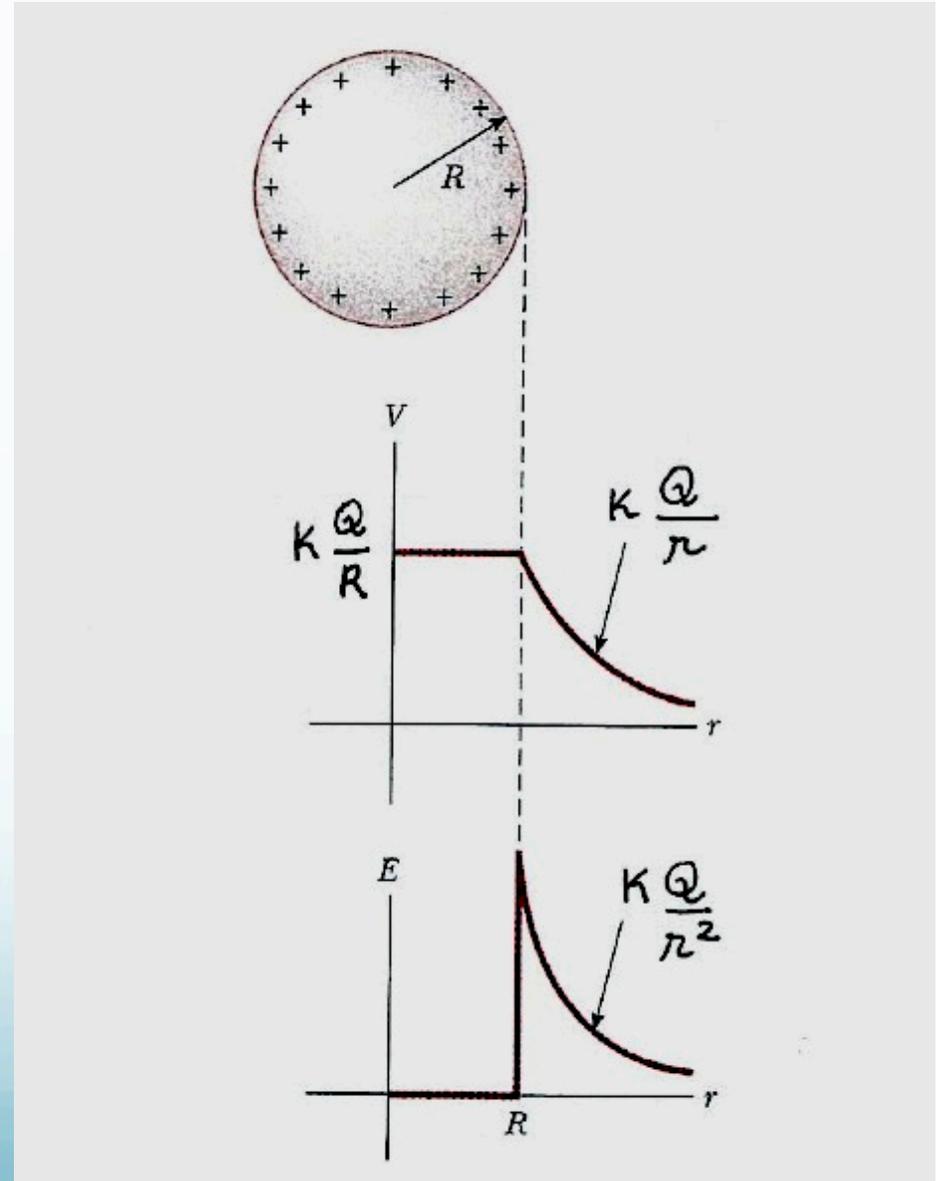
$$V(z) = -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} z + C$$

# Esfera condutora carregada com a carga $Q$

- O campo elétrico é nulo em todos os pontos de um condutor em equilíbrio;
- A carga distribui-se na superfície do condutor;
- O condutor é uma região de potencial constante.

$$V(r \leq R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} = \frac{\sigma R}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E}(r = R_+) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \hat{e}_r = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{e}_r$$

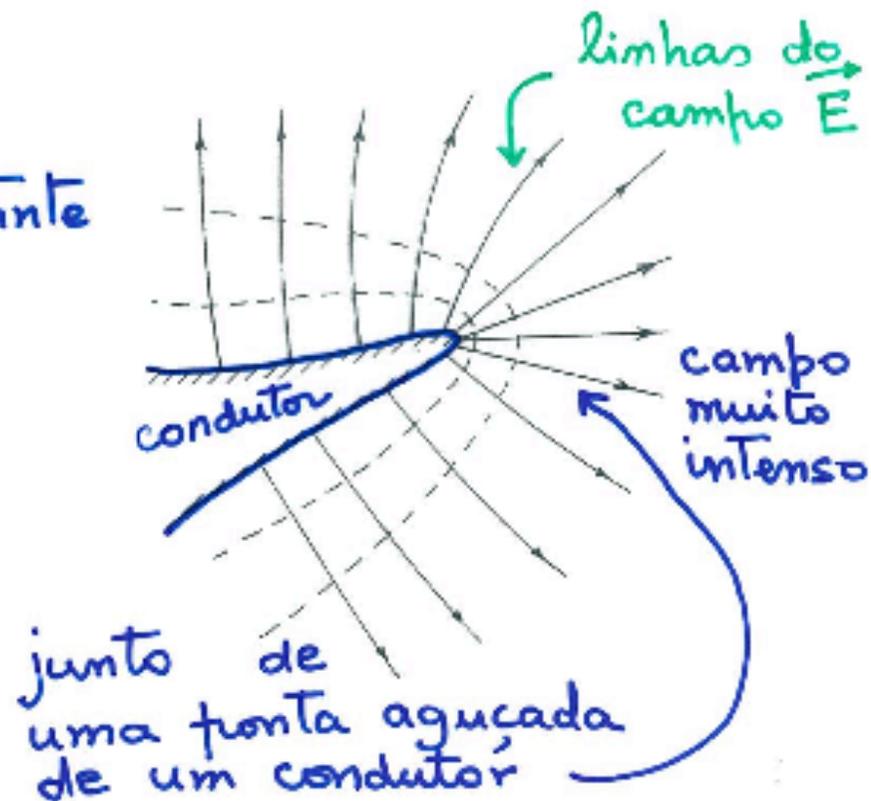
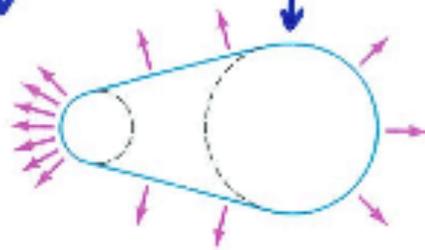


# O poder das "pontas"

pequeno raio de curvatura  $\Rightarrow$  elevado valor de  $\sigma$

Campo elétrico elevado  $(E = \frac{\sigma}{\epsilon_0})$

condutor  
(potencial constante em todo o condutor)



# Condensadores e dielétricos

★ Condensador: sistema de dois condutores que armazena carga; para carregar o condensador é necessário fornecer energia às cargas → o condensador é um reservatório de energia.

★ Capacidade de um condensador: 
$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{Q}{V}$$

★ A capacidade de um condensador depende da geometria e das dimensões do condensador e do material que existe entre os condutores (material isolador ou dielétrico).

★ Quanto maior for a permitividade relativa do dielétrico  $\epsilon_r$  (também chamada constante dielétrica  $k_e$  no caso estático), maior é a capacidade do condensador.

$$C' = \frac{Q}{V'} = \epsilon_r C$$

$$C' = \frac{Q'}{V} = \epsilon_r C$$

# Energia armazenada num condensador

→ O que significa aumentar a capacidade de um condensador?

★ Condensador isolado:

$Q$  mantém-se, mas o campo elétrico diminui.

★ Condensador inserido num circuito fechado:

O campo elétrico mantém-se, mas o condensador armazena mais carga.

Material	Constante dieléctrica ↳ K	Campo de ruptura dieléctrica (V/m) ↙
Vacuum	1.0000	
Air (1 atm)	1.0006	$3 \times 10^6$
Paraffin	2.2	$10 \times 10^6$
Polystyrene	2.6	$24 \times 10^6$
Rubber, neoprene	6.7	$12 \times 10^6$
Vinyl (plastic)	2-4	$50 \times 10^6$
Paper	3.7	$15 \times 10^6$
Quartz	4.3	$8 \times 10^6$
Oil	4	$12 \times 10^6$
Glass, Pyrex	5	$14 \times 10^6$
Porcelain	6-8	$5 \times 10^6$
Mica	7	$150 \times 10^6$
Water (liquid)	80	
Strontium titanate	300	$8 \times 10^6$