

**Material teórico – Módulo Eletrostática II**

**Campo Elétrico**

**Terceiro Ano do Ensino Médio**

**Autor: Vinicius Henning**

**Revisor: Lucas Lima**



## 1. Campo elétrico

### 1.1 Motivação do conceito de campo elétrico

Nessa parte da matéria nós vamos introduzir um dos conceitos fundamentais em eletrodinâmica: o campo elétrico (e futuramente o conceito de campo magnético). Para nos auxiliar a entender um pouquinho sobre o que vem a ser essa entidade física, vamos analisar a seguinte situação: imagine que temos uma carga  $q$  puntiforme (vamos colocá-la na origem de um sistema de coordenadas) e considere três pontos  $P_1, P_2$  e  $P_3$  como ilustrado abaixo:

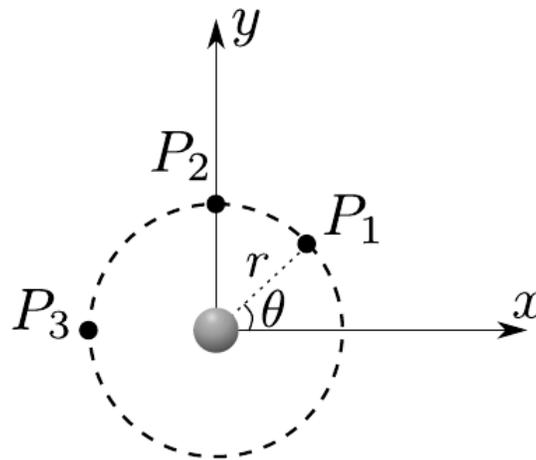


Fig. (1): Três pontos representados em volta de uma carga

Agora vamos responder à seguinte pergunta: **Caso existisse uma carga teste  $q_t$  no ponto  $P_1$ , qual seria a força exercida sobre ela? E se essa carga  $q_t$  estivesse no ponto  $P_2$ ? E no ponto  $P_3$ ?**

Como vocês já sabem, essa força é dada pela lei de Coulomb e vale, respectivamente,

$$\mathbf{F}_{P_1} = k \frac{q q_t}{r^2} (\cos \theta \hat{i} + \sin \theta \hat{j})$$

$$\mathbf{F}_{P_2} = k \frac{q q_t}{r^2} \hat{j}$$

$$\mathbf{F}_{P_3} = -k \frac{q q_t}{r^2} \hat{i}$$

Assim, podemos inferir a seguinte afirmação: os objetos carregados possuem uma propriedade que faz com que eles interajam com outros objetos carregados. Essa propriedade é responsável por

informar sobre a presença de uma dada carga para outros pontos do espaço e, caso tenha algum objeto carregado num ponto  $P$ , esse objeto sofrerá uma força elétrica. Essa propriedade é o que chamaremos de campo elétrico.

O campo elétrico é uma entidade que permeia o espaço trazendo a informação sobre a existência de outros objetos que também possuem carga. Outro campo que já estudamos anteriormente é o campo gravitacional, e, de fato, o campo elétrico e o campo gravitacional são muito parecidos entre si. O campo gravitacional é responsável por “sinalizar” que corpos possuem uma propriedade fundamental: a massa. Caso dois corpos possuam massa, eles vão experimentar uma força de atração, como a Terra e nós seres humanos habitando a superfície do nosso planeta. Duas pessoas também são atraídas gravitacionalmente, só que a interação é muito pequenininha, então não percebemos. Uma das diferenças fundamentais entre os campos elétricos e gravitacionais é que não temos “massa negativa” o que implica que o campo gravitacional é sempre atrativo.

Como motivamos no desenho da Fig. (1), o campo elétrico é a entidade física responsável por gerar uma força num dado ponto  $P$  **caso** exista uma carga naquele ponto. Assim, o campo elétrico é definido da seguinte maneira:

$$\mathbf{F}_{1(2)} = q_2 \left( k \frac{q_1}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \right) = q_2 \mathbf{E}_1$$

onde na expressão acima estamos calculando a força que a carga  $q_1$  realiza sobre  $q_2$  mediante a ação de um campo elétrico. A quantidade entre parênteses é definida como sendo o campo elétrico gerado pela carga  $q_1$ , que provoca uma força na carga  $q_2$ . Note que o campo gerado pela carga  $q_1$  é de fato uma propriedade da carga  $q_1$  e do espaço em volta dela; o campo elétrico depende apenas do valor da carga  $q_1$  e da distância da carga ao ponto onde o campo elétrico está sendo gerado.

Se escrevermos a força peso como sendo a força gravitacional que a Terra (de massa  $M_T$ ) realiza sobre uma pessoa de massa  $m$ , nós escrevemos o seguinte

$$\mathbf{F}_{M_T(m)} = m\mathbf{g}$$

onde  $\mathbf{g}$  é o *campo gravitacional* da Terra em analogia com o campo elétrico.

Agora que nós já sabemos a expressão para o campo elétrico, podemos verificar sua unidade:

$$\mathbf{E} = k \frac{q}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}$$
$$\Rightarrow [\mathbf{E}] = N/C$$

Isto é Newton por Coulomb no sistema internacional de medidas. Novamente, é sempre bom lembrarmos as unidades, pois são uma ferramenta muito poderosa para conferirmos nossos resultados! Mas caso você tenha esquecido, lembre-se que pode facilmente verificar, por exemplo, lembrando da relação entre força e campo elétrico!

## 1.2 O caráter vetorial do campo elétrico

Nesta seção vamos discutir o caráter vetorial do campo elétrico. O campo elétrico é uma entidade física mais fundamental que a força, no sentido de que ele não precisa de um segundo objeto para existir. O campo elétrico de um objeto carregado permeia todos os pontos do espaço, e caso exista outro objeto carregado nas proximidades do primeiro, o campo é responsável por gerar uma força de um objeto em outro. Assim, todo objeto carregado tem um campo elétrico associado, enquanto que a força é sempre dada entre um objeto e outro.

Todavia, apesar de o campo elétrico ser mais fundamental que a força, nós estamos mais acostumados a pensar em forças em vez de pensar em campos. Logo, nós vamos fazer essa discussão usando a força como base. Primeiramente, vamos considerar uma esferinha de carga  $q_1 > 0$  e duas situações: na situação (I) uma esferinha de carga  $q_2 > 0$ , e na situação (II) uma esferinha de carga  $q_2 < 0$ .

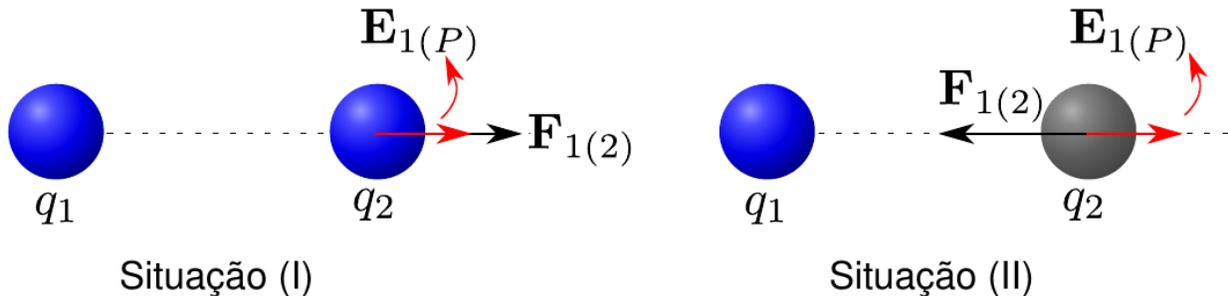


Fig. (2): Situação (I): as cargas são ambas positivas. Situação (II): a carga  $q_1$  é positiva e a carga  $q_2$  é negativa.

Na situação (I) ambas as cargas são positivas. Como sabemos, cargas de mesmo sinal repelem-se, logo a força que a carga  $q_1$  realiza sobre  $q_2$  é de repulsão. Como a carga  $q_1$  é positiva, o campo elétrico aponta no mesmo sentido e direção que o vetor  $r_{1(2)}$ . Na situação (II) temos uma interação entre cargas de sinais opostos, que sabemos que gera uma atração. Assim, a força que  $q_1$  gera em  $q_2$  aponta de  $q_2$  para  $q_1$ .

Se invertemos a fórmula que relaciona a força em termos do campo, obtemos

$$\mathbf{E}_{1(P)} = \frac{\mathbf{F}_{1(2)}}{q_2}$$

e facilmente vemos que se a carga é negativa o campo elétrico aponta no **sentido contrário** ao sentido da força. Note que isso já poderia ser esperado, visto que ao trocar o sinal da carga  $q_2$  para negativa, a força torna-se atrativa, porém o campo elétrico não muda, pois é gerado pela carga  $q_1$ ! E o que acontece caso queiramos estudar o campo elétrico gerado por uma carga negativa? Convido você a fazer uma análise baseada na força como fizemos acima, e desenhar as seguintes situações: na situação (I) uma carga  $q_1 < 0$  gera uma força sobre uma carga  $q_2 < 0$ . Numa situação

(II) uma carga  $q_1 < 0$  gera uma força sobre uma carga  $q_2 > 0$ . O desenho para a força e campo para as duas situações deve ser igual ao encontrado abaixo.

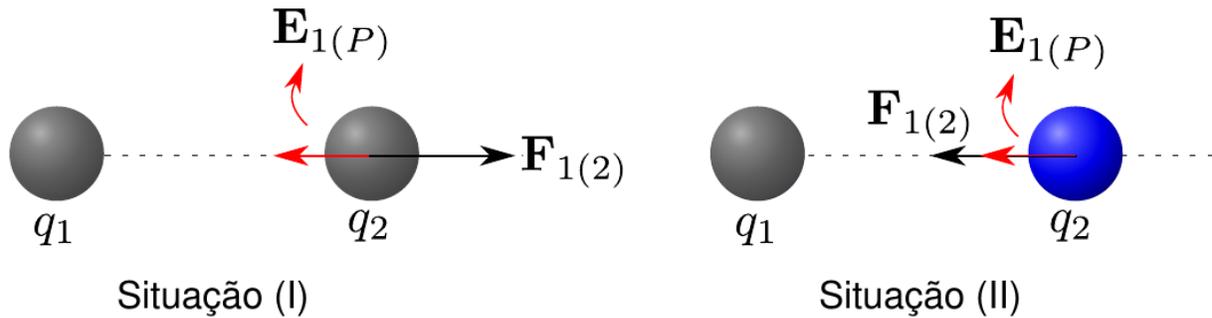


Fig. (3): Situação (I): as cargas são ambas negativas. Situação (II): a carga  $q_1$  é negativa e a carga  $q_2$  é positiva.

Quando ambas as cargas são negativas, a força é repulsiva. Como a carga  $q_2$  é negativa, o campo aponta no sentido contrário ao sentido da força. Na situação (II), como a carga  $q_2$  é positiva, a força aponta de  $q_2$  para  $q_1$ . Como a carga  $q_2$  é positiva, a força e o campo elétrico apontam no mesmo sentido. Novamente, e como era de se esperar, o campo elétrico gerado pela carga  $q_1$  é independente do sinal da carga  $q_2$ .

Outro conceito importante é o de **linhas de campo**. Basicamente são linhas imaginárias que traçamos ao longo da direção do campo elétrico, que servem para representar o campo elétrico em todos os pontos do espaço simultaneamente.

Pelas duas discussões acima nós podemos concluir:

- ◆ O campo elétrico gerado por uma carga positiva aponta para fora da carga que está gerando o campo. Dizemos que as cargas positivas são **fontes** de campo elétrico, pois as linhas de campo (os vetores) **saem** das cargas positivas.
- ◆ O campo elétrico gerado por uma carga negativa aponta para dentro da carga. Dizemos que a carga negativa é um **sorvedouro** de campo elétrico, pois as linhas de campo **entram** nas cargas negativas.

Assim, as linhas de campo elétrico para cargas positivas e negativas são:

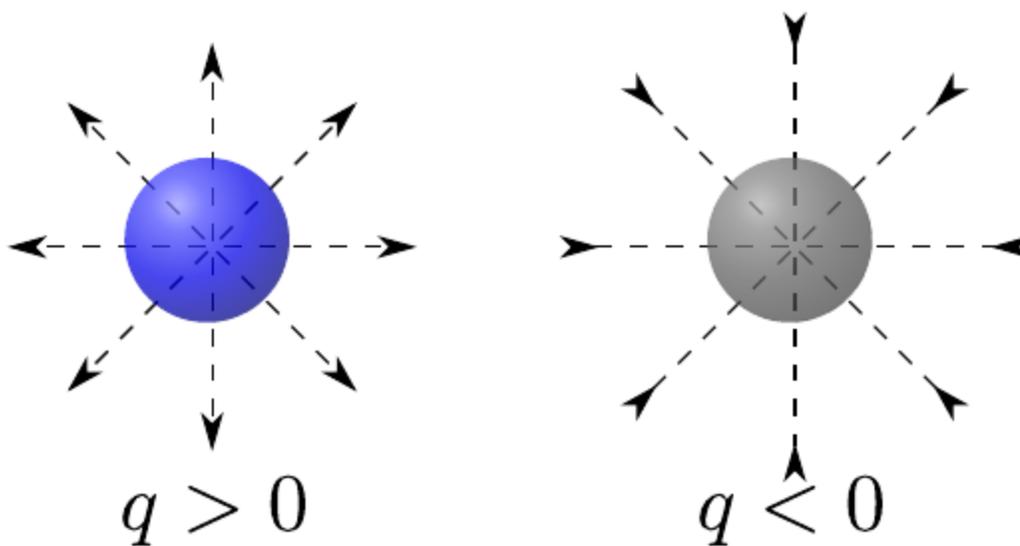


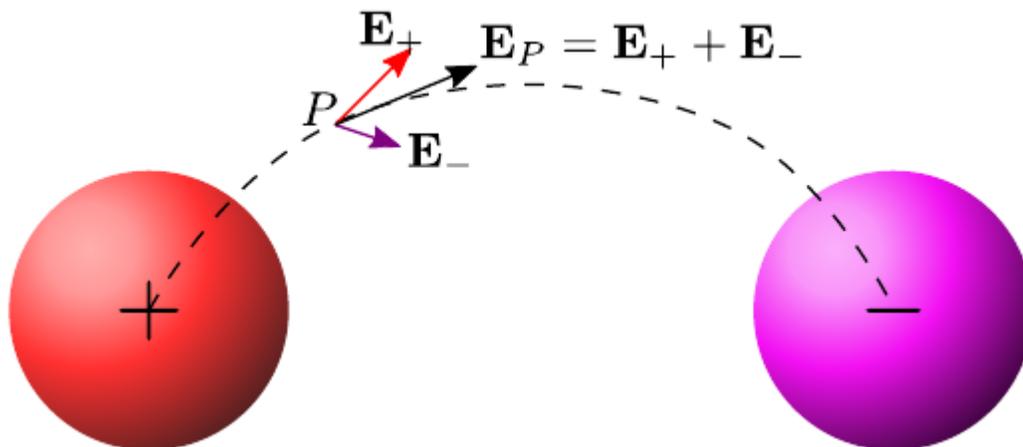
Fig. (3): Representação das linhas de campo para cargas pontuais positivas  $q > 0$  e negativas  $q < 0$ .

## 2. Linhas de campo

### 2.1 Sistema formado por duas cargas opostas

Na seção anterior nós falamos sobre como o campo elétrico é uma propriedade do espaço gerada por corpos carregados e que influencia os corpos carregados. O campo elétrico é responsável por exercer força sobre corpos que possuem cargas. No final nós introduzimos o conceito de linhas de campo (ou linhas de força). Nessa seção, nós vamos discutir em detalhe as linhas de campo elétrico e como elas podem nos ajudar a interpretar e melhor entender fenômenos elétricos.

A definição canônica de linhas de campo é: trata-se de *linhas imaginárias que permeiam o espaço, tal que para cada ponto do espaço o campo elétrico é tangente à linha de campo naquele ponto*. Para entendermos melhor esse conceito, vamos analisar o desenho abaixo:



*Fig. (4): Ilustração para uma das linhas de campo para a situação de uma carga positiva e outra negativa. O vetor campo elétrico resultante no ponto  $P$  é mostrado como a soma dos campos elétricos devido às cargas positiva e negativa naquele ponto.*

O desenho acima ilustra duas cargas no espaço, uma positiva e outra negativa. Nós escolhemos um ponto  $P$  arbitrário do espaço e representamos os campos elétricos nesse ponto devido às cargas positiva e negativa.

Como nós discutimos no texto passado, as **cargas positivas são fontes** de campo elétrico e, portanto, as **linhas de campo saem** das cargas positivas. Em contrapartida, as **cargas negativas são sorvedouros** de campo elétrico e, portanto, as **linhas de campo entram** nas cargas negativas. Para simplificar a discussão, imagine que as cargas na Fig. (4) possuem o mesmo módulo. Assim, como o ponto  $P$  está mais próximo da carga positiva, a intensidade do campo elétrico gerado por ela é maior que o da carga negativa. A soma destes dois vetores dá-nos o vetor campo elétrico resultante no ponto  $P$ . Se calcularmos o campo elétrico resultante em outros pontos,  $P'$  e  $P''$ , nós obtemos o caso ilustrado na Fig. (5) abaixo, e o conceito de linhas de campo fica mais evidente.

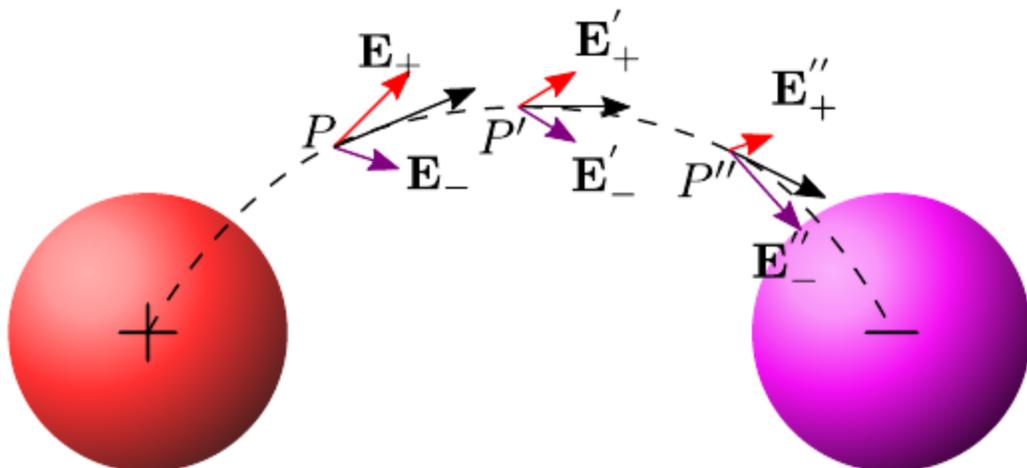


Fig. (5): Ilustração para mais vetores do campo elétrico sobre a linha de campo. Ilustramos o campo elétrico nos pontos  $P$  e  $P''$ . Como feito anteriormente: o campo produzido pela carga positiva está ilustrado em vermelho, enquanto que o campo gerado pela carga negativa está ilustrado em roxo. O campo elétrico resultante é dado pelo vetor preto. Nós evitamos escrever o símbolo do vetor resultante para não sobrecarregar mais a imagem.

Baseados na discussão acima, nós podemos agora desenhar as linhas de campo que saem da carga positiva e chegam na carga negativa.

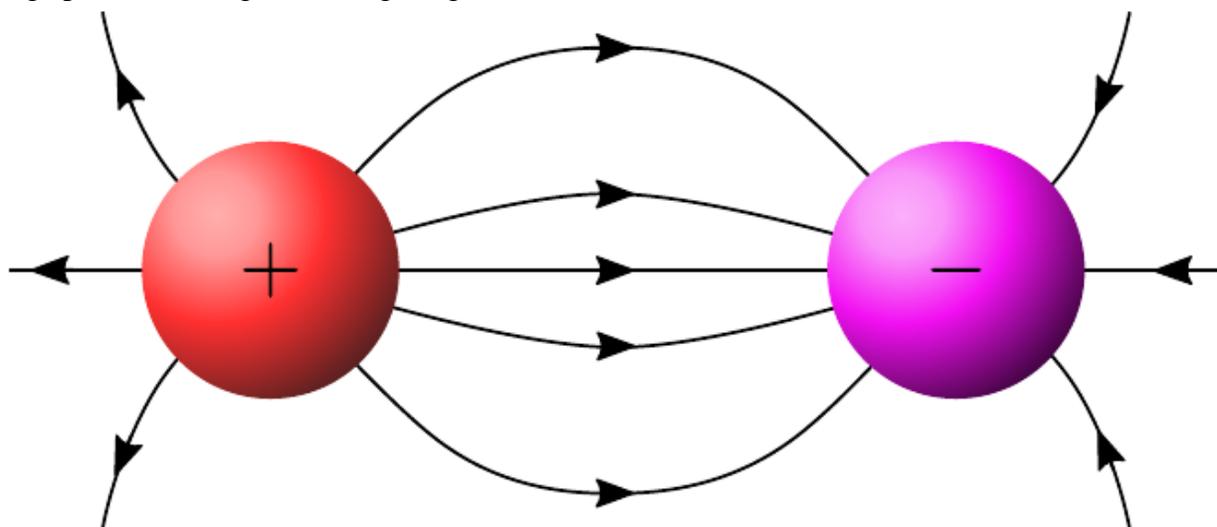
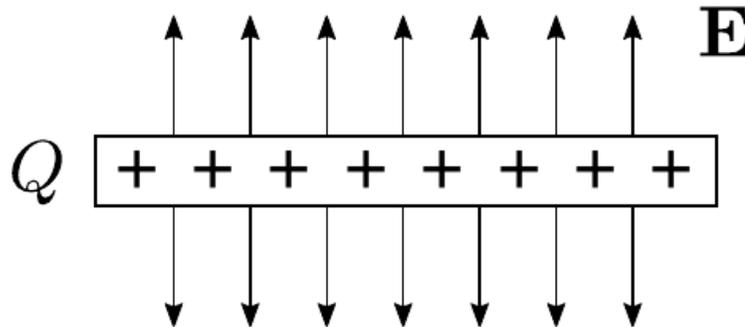


Fig. (6): Ilustração das linhas de campo elétrico para o sistema composto por duas cargas, uma delas positiva e outra negativa.

## 2. 2 O capacitor elétrico

O capacitor é um sistema composto por duas placas, uma com carga  $Q > 0$  e outra com carga  $-Q < 0$ . Para todos os propósitos, o campo gerado por essas placas é uniforme em todo o espaço.

Se considerarmos uma dessas placas, com carga  $Q$ , por exemplo, e o campo gerado por elas sendo um campo elétrico  $\mathbf{E}$ , as linhas de campo são da seguinte forma



*Fig. (7): Ilustração do campo elétrico uniforme gerado por uma placa de carga  $Q$ . Como sabemos, as cargas positivas são fontes de campo elétrico, e que sai da placa positivamente carregada.*

Se considerarmos a placa com carga  $-Q$ , como são as linhas de campo associadas? E como são as linhas de campo no caso do capacitor (ou seja, o sistema formado pelas duas placas)?

**Discussão:** Similar ao caso da Fig. (7), se considerarmos uma placa negativamente carregada com carga  $-Q$ , o campo também será uniforme e perpendicular à placa, então as linhas de campo têm a mesma direção. Todavia, como as cargas negativas são sorvedouros de campo elétrico, as linhas de campo **entram** na placa. Se combinarmos o efeito das duas placas temos um cancelamento do vetor campo elétrico resultante nas regiões (I) e (III), mostradas na Fig. (8), e temos o dobro da intensidade do campo entre as duas placas, na região (II). O campo produzido pelas duas placas está ilustrado na Fig. (8.a), enquanto as linhas de campo estão ilustradas na Fig. (8.b) abaixo.

O conceito de campo uniforme é muito útil para a discussão de vários problemas físicos de interesse; por exemplo, se colocarmos uma carga  $q$  sob efeito de um campo uniforme  $E$ , a força sentida pela carga  $q$  é simplesmente  $F = qE$ , onde  $E$  é constante ao longo de todo o espaço (muito semelhante à força peso). Além disso, os capacitores são de suma importância para essencialmente todos os aparelhos eletrônicos no nosso dia a dia. Por exemplo, eles servem para controlar a frequência da rádio que estamos ouvindo. Nós teremos a chance de discutir capacitores em mais detalhe ao longo do curso, e o conceito de campo uniforme aparecerá em nossas discussões, e interessantes questões serão discutidas.

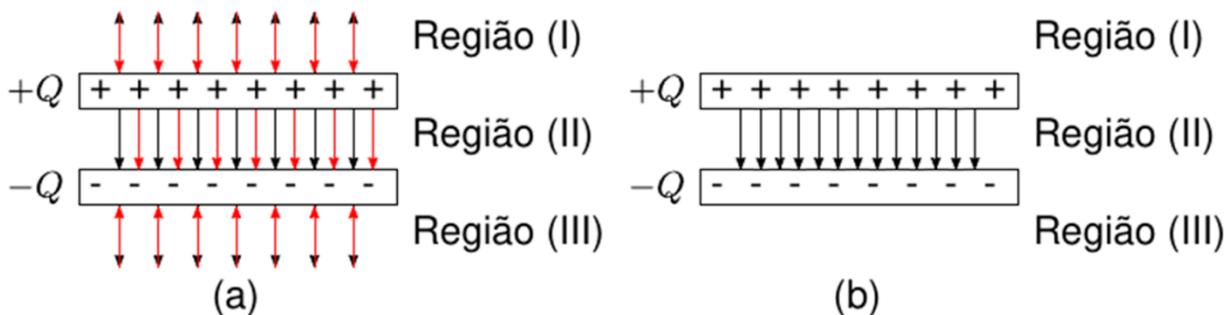


Fig.(8): Ilustração do campo uniforme gerado por duas placas, uma carregada positivamente, com carga  $Q$ , e outra carregada negativamente, com carga  $-Q$ . Na Fig. (8.a) ilustramos os campos uniformes gerados pelas duas placas. Essa ilustração ajuda-nos a visualizar por que há um cancelamento do campo elétrico nas regiões (I) e (III), enquanto há o dobro da intensidade de campo elétrico na região (II). A Fig. (8.b) dá-nos as linhas de campo nas três regiões.