

## 1.2 Forças de longo alcance e carga elétrica

Engana-se quem acredita que o avanço da ciência é baseado somente em raciocínio lógico. Na história da ciência, intuição e preconceitos infundados muitas vezes produziram grandes descobertas. No caso das forças elétricas e magnéticas uma ideia intuitiva, que pertence mais ao domínio psicológico do que ao domínio das ciências exatas, tem sido um motor de importantes descobertas. Esta ideia infundada é que precisamos tocar num corpo para poder exercer força sobre o mesmo. Esta ideia está presente na mente da maioria das pessoas porque a vasta maioria das forças presentes na vida cotidiana é de fato de curto alcance. Por exemplo, quando batemos nossa cabeça na quina de uma mesa, a força que a quina da mesa exerce sobre a nossa cabeça começa a agir somente quando já é tarde demais para evitar a dolorosa interação. A única exceção é a força gravitacional. Ela é de longo alcance e ela está presente na nossa vida. Mas esta tem uma propriedade estranha. Ela é tão fraca que não percebemos nenhuma força de atração quando chegamos perto de um enorme caminhão cheio de pesados sacos de cimento. O único caso de atração gravitacional perceptível é a da atração exercida pela Terra. Mas esta está tão constantemente presente na nossa vida que a mente acaba esquecendo dela. Desta forma chegamos à falsa ideia de que é impossível que um objeto possa exercer forças sobre outro objeto afastado.



Fig. 1.2.1(a) e (b) Bastão de PVC atritado com pano de algodão atraindo pedacinhos de papel. (a) Um pedaço foi atraído e grudou no bastão; outro, por baixo do bastão, está erguido pela força de atração. (b) Com sorte no momento da tirada da foto alguns pedaços de papel estão em movimento e aparecem borradinhos na imagem.



Fig. 1.2.2 Pingente de âmbar.

É justamente este preconceito que torna as forças elétricas e magnéticas tão surpreendentes. Einstein menciona a fascinação que ele sentia na infância quando ele brincava com a reação mágica de uma bússola provocada por um imã bem distante da bússola. De forma igualmente mágica podemos atrair pequenos pedaços de papel com um bastão de PVC<sup>1</sup> que fora previamente atritado com um pano. As figuras 1.2.1 (a) e (b) mostram esta experiência. Este tipo de fenômeno já tinha sido observado na Grécia antiga, mas naturalmente não com PVC, mas com âmbar, que é um polímero natural usado para fabricação de joias. A figura 1.2.2 mostra

---

<sup>1</sup> PVC = Polyvinyl chloride (Policloreto de vinila) descoberto em 1872 por Eugen Baumann.

um pingente de âmbar. O nome grego de âmbar é ἥλεκτρον (= ouro claro). As nossas palavras “elétron” e “eletricidade” são derivadas deste nome devido ao fenômeno mencionado<sup>2</sup>.

A outra força de longo alcance, a força magnética, também já era conhecida na Grécia antiga. De fato o nome “magnetismo” vem de λίθος μάγνης = pedra de Magnésia, sendo Magnésia - hoje Manesia - uma cidade na Ásia menor onde se encontra esta pedra. Este tipo de pedra atrai ferro. Além disso aparecem também forças de longo alcance entre duas pedras deste tipo, e estas forças podem ser tanto atrativas como repulsivas.

Começaremos nosso estudo do eletromagnetismo com as forças elétricas. Experimentando com o fenômeno mostrado nas figuras 1.2.1(a) e (b), chegamos à conclusão de que esta força elétrica aparece quando dois corpos de materiais diferentes foram postos em contato e depois foram separados. O ato de atritar o bastão coloca o material do bastão em contato intenso com o material do pano. Por contato intenso quero dizer que há muitos pontos de contato entre estes materiais. De fato, para obtermos um bom efeito de atração, é necessário apertar o pano fortemente na hora de passar o bastão. Isto cria muitos pontos de contato na escala microscópica.

Com os objetos presentes na vida moderna, podemos observar estas forças com relativa facilidade. Um excelente objeto para estudar força elétrica é um rolo de fita adesiva. A fita consiste em algum material plástico e numa face desta fita adere uma cola, que é de um outro material sintético. Enquanto a fita está enrolada, a cola está em contato intenso com o material plástico da fita da camada inferior do rolo. Quando desenrolamos um pedaço de fita, separamos estes materiais. Prontamente aparecem então as forças elétricas.

Neste caso é especialmente interessante observar dois rolos com pedaços de fita desenrolada. As figuras 1.2.3 e 1.2.4 mostram duas situações interessantes. Nota-se claramente que estas forças podem ser repulsivas ou atrativas. Fita contra fita mostra uma forte repulsão e fita contra rolo, uma forte atração.

Fig. 1.2.3  
Repulsão entre fitas desenroladas



Fig. 1.2.4  
Atração entre fita e rolo



<sup>2</sup> A palavra “electricus” foi introduzida por William Gilbert (24/05/1544 - 30/11/1603).

Podemos ainda combinar as experiências de fita adesiva e de bastões atritados. Quando aproximamos um bastão de PVC, que foi atritado com um pano de algodão, ao pedaço de fita desenrolada, observa-se uma forte atração entre fita e bastão.

Mais interessante do que esta observação é uma que podemos fazer se substituirmos nesta última experiência o bastão de PVC por um de vidro. Infelizmente o efeito que se observa com o bastão de vidro é muito fraco e se consegue ver o fenômeno relevante apenas em dias com baixíssima umidade do ar. Somente muito mais tarde teremos condições para poder entender por que a umidade do ar atrapalha nestas experiências.

Então a experiência consiste no seguinte: primeiramente se desenrola um pedaço de fita e se pendura o rolo num suporte. Depois se atrita um bastão de vidro com um pano de algodão. Em seguida se aproxima o bastão do pedaço de fita desenrolada. Enquanto a distância entre fita e bastão for grande, pode-se observar repulsão entre bastão e fita. Mas, quando chegarmos muito perto da fita, a força torna-se atrativa. As figuras 1.2.5 e 1.2.6 mostram estas experiências.



Fig. 1.2.5 Repulsão entre bastão de vidro e fita.



Fig. 1.2.6 Atração entre bastão de vidro e fita.

(As manchas escuras no fundo das imagens não são marcas de balas perdidas, mas de construção civil contratada com licitação pública).



Então os fenômenos observáveis parecem ser bem complexos. O mesmo bastão pode ora atrair, ora repelir uma fita. Como podemos explicar isto?

Para encontrar uma explicação simples, é necessário fazer experiências sistematicamente. Pode-se procurar uma grande variedade de objetos de diversos materiais e atritar uns com os outros. Vamos definir uma noção de corpo eletrizado por atrito que corresponde ao material de um objeto e ao material do objeto que atritou. Chamaremos isto de *entidade eletrostática*. Então um bastão de PVC atritado com algodão é uma entidade eletrostática, mas um bastão de PVC atritado com seda é outra entidade eletrostática, e um bastão de vidro atritado com algodão é ainda outra entidade eletrostática. O pano de algodão atritado com um bastão de PVC também é outra entidade eletrostática. No conjunto das entidades eletrostáticas vamos definir duas relações:

Uma entidade eletrostática *A* obedece à relação *A* **r** *B* com uma entidade eletrostática *B* se encontrarmos uma força repulsiva para grandes distâncias entre os corpos que representam as entidades *A* e *B*.

Uma entidade eletrostática  $A$  obedece à relação  $A \mathbf{a} B$  com uma entidade eletrostática  $B$  se encontrarmos uma força atrativa para grandes distâncias entre os corpos que representam as entidades  $A$  e  $B$ .

Colocamos a cláusula de grandes distâncias nestas definições porque vimos que para pequenas distâncias as manifestações de forças podem ser mais complicadas e seria provavelmente mais difícil encontrar leis simples se começássemos logo com esta situação complexa.

Veremos exemplos com as nossas experiências: A entidade eletrostática do bastão de vidro atritado com algodão e a entidade eletrostática da cola separada do plástico do rolo de fita obedecem à relação  $\mathbf{r}$ . A entidade eletrostática do bastão de PVC atritado com algodão e a entidade eletrostática da cola separada do plástico do rolo de fita obedecem à relação  $\mathbf{a}$ .

Agora podemos fazer muitas experiências e tentar descobrir propriedades interessantes destas relações. Surpreendentemente estas duas relações têm propriedades muito diferentes. A relação  $\mathbf{a}$  não apresenta propriedades muito interessantes. Apenas podemos constatar que nenhuma entidade eletrostática obedece à relação  $A \mathbf{a} A$ .

$$A \mathbf{a} A \text{ é falso para todo } A \quad (1.2.1)$$

Por outro lado, a relação  $\mathbf{r}$  apresenta as propriedades de uma relação de equivalência:

$$A \mathbf{r} A \text{ é verdadeiro para todo } A \quad (1.2.2)^3$$

$$A \mathbf{r} B \text{ implica em } B \mathbf{r} A \quad (1.2.3)$$

$$A \mathbf{r} B \text{ e } B \mathbf{r} C \text{ implica em } A \mathbf{r} C \quad (1.2.4)$$

Uma relação  $\sim$  definida num conjunto  $C$  se chama relação de equivalência se ela cumpre exatamente estas condições:

$$\forall (a \in C): a \sim a \quad (1.2.5)$$

$$\forall (a, b \in C): (a \sim b \Rightarrow b \sim a) \quad (1.2.6)$$

$$\forall (a, b, c \in C): ((a \sim b \wedge b \sim c) \Rightarrow a \sim c) \quad (1.2.7)$$

As relações de equivalência têm um papel muito importante no processo de abstração. Muitas das nossas noções envolvem alguma relação de equivalência. Uma consequência importante das propriedades (1.2.5), (1.2.6) e (1.2.7) é que a relação de equivalência decompõe o conjunto no qual ela é definida em classes. Seja  $a$  um elemento de  $C$ . Podemos formar um subconjunto de  $C$  que compõe-se de todos os elementos que são equivalentes ao  $a$ . Depois pegamos outro elemento e fazemos o mesmo com este. Desta maneira podemos decompor  $C$  em subconjuntos (chamados de classes) de elementos equivalentes:

$$C = \bigcup_i C_i \quad (1.2.8)$$

com

$$\forall (a, b \in C_k): a \sim b \quad (1.2.9)$$

e

---

<sup>3</sup> Para garantir a validade desta afirmação é necessário excluir corpos que não exercem força alguma. Estes não serão considerados entidades eletrostáticas.

$$(a \in C_i \wedge b \in C_k \quad C_i \neq C_k) \Rightarrow a \not\sim b \quad (1.2.10)$$

onde  $a \not\sim b$  significa “ $a \sim b$  é falso”. O interessante é que duas classes distintas nunca têm elementos em comum. Demonstração: sejam  $C_i$  e  $C_k$  duas classes distintas:  $C_i \neq C_k$ . Suponhamos que  $C_i \cap C_k$  não é vazio, ou seja existe um  $b$  que pertence ao  $C_i$  e também ao  $C_k$ . Agora seja  $a$  um elemento arbitrário de  $C_i$  e  $c$  um elemento arbitrário de  $C_k$ . Como  $a$  e  $b$  estão ambos em  $C_i$ , temos  $a \sim b$ . E como  $b$  e  $c$  estão ambos em  $C_k$ , temos  $b \sim c$ . Mas com a propriedade (1.2.10) segue  $a \sim c$ . Como  $a$  e  $c$  eram elementos arbitrários das classes  $C_i$  e  $C_k$ , segue que todos os elementos de  $C_i$  são equivalentes a todos os elementos de  $C_k$ . Então as classes são na verdade a mesma classe, contradizendo a hipótese  $C_i \neq C_k$ .

Dependendo da relação de equivalência, pode haver muitas ou poucas classes. Fazendo experiências com objetos atritados, descobre-se que a relação  $\sim$  possui apenas duas classes. Podemos chamar uma das classes de classe positiva e a outra de classe negativa.

Diversos fatos experimentais precisam ser explicados. Um deles é o fato de que estas estranhas forças elétricas não aparecem no nosso dia a dia. É preciso preparar objetos especialmente, colocando diferentes materiais em contato e depois separá-los para que estas forças elétricas se manifestem. Agora o surgimento das duas classes de equivalência da relação  $\sim$  sugere uma possível interpretação:

Vamos supor que dentro de todos os materiais existam dois tipos de substâncias, podemos chamar uma de *carga positiva* e a outra de *carga negativa*. Vamos ainda supor que exista sempre uma força repulsiva entre cargas do mesmo tipo e uma força atrativa entre cargas de tipos diferentes. Podemos então explicar a ausência das forças elétricas entre os objetos comuns supondo que nestes objetos há naturalmente uma quantidade igual de carga positiva e negativa. No ato de atritar um objeto de um material com outro, podemos supor que há uma transferência de carga de um objeto para o outro e a subsequente separação dos materiais cria então dois corpos, ambos com excesso de algum tipo de carga, sendo o tipo de um objeto oposto ao tipo do outro. Então seria explicado que encontramos exatamente duas classes de equivalência. Uma classe é composta de entidades eletrostáticas que possuem excesso de carga positiva e a outra é composta de entidades eletrostáticas que possuem excesso de carga negativa.



Fig. 1.2.7 Charles François de Cisternay du Fay (14/09/1698 – 16/07/1739) (Imagem da Wikipedia)

Jogamos estas hipóteses aqui no papel e todo mundo já está convencido que isto é óbvio e é a mais pura verdade, porque se encontra nos livros e é ensinado por professores. Mas devemos nos lembrar que trata-se apenas de uma possível explicação dos fenômenos. Até hoje ninguém nunca viu uma carga elétrica! Mas, de fato, estas hipóteses acabam por ter muito sucesso na explicação de um número enorme de fenômenos e vamos adotá-las como hipóteses de trabalho.

Também devemos olhar o “jogar no papel” com certo senso crítico. Aquilo que está escrito aqui em poucas páginas ocupou as melhores cabeças da humanidade durante décadas para ser formulado e muitas tentativas com hipóteses inadequadas tiveram que ser eliminadas. A explicação de duas substâncias elétricas com repulsão das substâncias iguais e atração entre substâncias diferentes foi elaborada por Charles François de

Cisternay du Fay, escrita em 1733 e publicada no Volume 38 dos Philosophical Transactions of the Royal Society em 1734. Este pesquisador não chamou as cargas de positivas e negativas, mas usou nomes que mencionam substâncias que se carregam facilmente com um determinado tipo de carga. Então ele falou de eletricidade do tipo *vitreous* (aquele que aparece no bastão de vidro atritado com seda) e eletricidade do tipo *resinous* (aquele que aparece em âmbar atritado com algodão). O uso das palavras “positivo” e “negativo” para a carga elétrica foi introduzido por Benjamin Franklin (17/01/1706 - 17/4/1790). Qual tipo de carga é positivo e qual é negativo é naturalmente uma questão de convenção. Franklin escolheu a carga de um bastão de vidro atritado com seda como positiva, e esta convenção continua válida até hoje.

Poder-se-ia dizer positivo-negativo ou *vitreous-resinous* são apenas nomes. Tanto faz como chamarmos estas cargas. Mas resulta que o positivo e o negativo acabam tendo mesmo o significado de sinal de uma grandeza física unidimensional. Como para qualquer grandeza física, um dos itens mais importantes da definição da grandeza é a prescrição operacional que define a soma de valores da grandeza. No caso da carga podemos definir a soma de quantidades de carga da seguinte forma: se um corpo possui a quantidade de carga  $q_1$  e outro corpo possui a quantidade de carga  $q_2$  o corpo que é a junção dos dois corpos anteriormente mencionados possui a quantidade de carga  $q_1 + q_2$ .

Os corpos que encontramos no dia a dia, que não apresentam estas forças elétricas, seriam corpos de carga zero. Estes são frequentemente chamados de *neutros*<sup>4</sup>. Este zero pode ser imaginado como uma soma de uma parcela positiva e outra negativa. Ou seja, podemos imaginar os corpos neutros como repletos de cargas elétricas de sinais opostos. Por que faremos isto? A ideia é explicar o processo que transforma um corpo neutro num corpo eletricamente carregado através do ato de atritar como um processo de transferência de carga. No processo de atritar um corpo com outro de material diferente, geramos sempre dois corpos eletrizados e os dois têm sempre cargas de sinais opostos. Isto sugere que o processo de atritar não gera ou cria cargas, mas apenas redistribui cargas já existentes dentro dos corpos. Então, quando dois corpos neutros são postos em contato, há uma pequena redistribuição das cargas e, quando separamos os corpos, geramos dois corpos eletricamente desbalanceados.

O processo de atritar um corpo com outro conserva a carga elétrica. Começamos com dois corpos neutros. Então inicialmente a carga total dos dois corpos é  $0 + 0 = 0$ . No fim do processo temos de novo uma carga total zero, mas na forma de  $q + (-q) = 0$ .

No entanto há uma pequena diferença entre os conceitos de *não criação de carga* e *conservação de carga*. Hoje em dia sabemos que é possível criar partículas eletricamente carregadas. Nos laboratórios de pesquisa onde se investigam as forças fundamentais da Natureza se joga um partícula  $P_A$  com enorme energia cinética contra outra partícula  $P_B$ . Neste tipo de colisão, às vezes saem além das partículas originais  $P_A$  e  $P_B$  outras partículas  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . Pode-se dizer que a energia cinética das partículas originais se “materializou” neste processo. Frequentemente há também partículas eletricamente carregadas entre as partículas criadas. Mas, em todos estes processos, sempre se observou a conservação de carga elétrica. Quando uma partícula com carga  $q$  é criada, sempre aparece junto também uma nova partícula com carga

---

<sup>4</sup> A origem desta palavra é *neutralis* (latim) e esta última está ligada a *ne-uter* (=nenhum dos dois).

$-q$ . Por todas as experiências feitas até a data atual temos claros indícios de uma lei de conservação de carga elétrica.

Carga elétrica é conservada.

Mais tarde formularemos esta lei de forma quantitativa.

A nossa explicação dos fenômenos observados com a ajuda da hipótese de existência de cargas negativas e positivas está longe de ser completa. Mesmo no nível qualitativo há ainda muitos aspectos não explicados.

Tudo bem, explicamos por que os objetos comuns não apresentam forças elétricas sem nenhum preparo especial. É devido à neutralidade destes objetos. Mas os pedacinhos de papel na mesa pareciam ser objetos comuns, e de fato não observamos nenhuma força entre os mesmos. Então, se estes papéis são eletricamente neutros, como surge uma força quando aproximamos um bastão eletrizado? Há tanta carga positiva como negativa em cada pedaço de papel e consequentemente as forças atrativas e repulsivas exercidas pelas cargas de um bastão eletrizado dever-se-iam anular!

A força que atrai os papéis neutros para o bastão eletrizado pode ser explicada se admitirmos as seguintes hipóteses adicionais:

(a) As cargas dentro dos papéis têm mobilidade.

(b) O módulo das forças entre cargas elétricas cai com o aumento da distância entre as partículas carregadas.

Então vamos tentar elaborar uma explicação do fenômeno da figura 1.2.1: o bastão possui carga elétrica não nula. Digamos: ele está negativamente carregado. Como cargas opostas se atraem e cargas iguais se repelem, podemos esperar que as cargas negativas do papel migrem para os pontos que são mais afastados do bastão e as cargas positivas migrem para os pontos mais próximos do bastão. A figura 1.2.8 mostra isto simbolicamente. Se invocarmos agora a hipótese (b), temos a explicação do fenômeno: mesmo que as quantidades de carga positiva e negativa dentro do papel sejam iguais, as forças repulsivas e atrativas não serão iguais, pois as cargas que são atraídas se encontram mais próximas das cargas que atraem, e consequentemente esta força é

grande, enquanto as cargas repelidas estão mais longe daquelas que repelem, e esta força é mais fraca. Temos uma bela explicação, e esta corrobora a ideia de que os objetos neutros têm cargas elétricas de ambos os sinais na mesma quantidade.

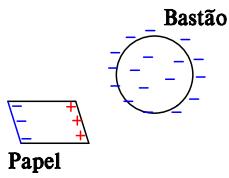
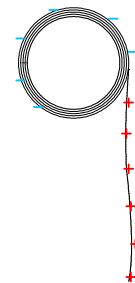


Fig. 1.2.8 Explicação da força exercida sobre objetos neutros.

Parece convincente, não é? Mas há um pequeno problema com esta explicação. A experiência dos papéis funciona também com outros materiais. Por exemplo, poderíamos retirar a cola da fita adesiva (somente para não grudar na mesa) e substituir os papéis por pedaços de fita. A experiência funciona com estes da mesma forma. Então dentro do plástico da fita as cargas elétricas também teriam que ter mobilidade. Mas neste caso teríamos problemas para explicar as experiências com o rolo de fita adesiva.

Fig. 1.2.9 Distribuição de cargas no rolo de fita adesiva. →



A figura 1.2.9 mostra simbolicamente a distribuição de cargas elétricas no rolo de fita depois de se desenrolar um pedaço de fita. Se as cargas tivessem mobilidade dentro da fita, as cargas positivas no pedaço desenrolado deveriam subir para o rolo, ou as cargas negativas deveriam descer para ficar perto das “queridas cargas do sexo oposto”. Desta maneira nunca iríamos observar os fenômenos mostrados nas figuras 1.2.3, 1.2.4 e 1.2.5.

Então precisamos de uma explicação ainda mais sofisticada. A ideia do deslocamento de cargas dentro de um objeto neutro devido às forças exercidas por um objeto eletrizado é bastante convincente. Mas temos que caprichar um pouco mais com o conceito de mobilidade. Há diferentes tipos de mobilidade. Um homem rico que mora numa bela mansão tem uma empregada. Tanto a empregada quanto o homem rico têm mobilidade: o homem rico viaja todo ano para Paris, a empregada vai todo dia para o supermercado no bairro onde ela mora. Que tal se supusermos que as cargas na fita de plástico têm o tipo de mobilidade da empregada? Podemos imaginar que existam minúsculas regiões dentro do plástico e que, dentro de cada região, as cargas possam se deslocar um pouco. Mas elas nunca saem da região onde se encontram. Veremos como fica a distribuição de carga elétrica num material com estas características quando este for posto perto de um objeto eletrizado. A figura 1.2.10 representa um pedaço de material perto de um objeto carregado negativamente.

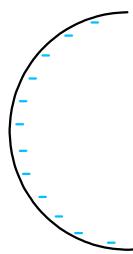
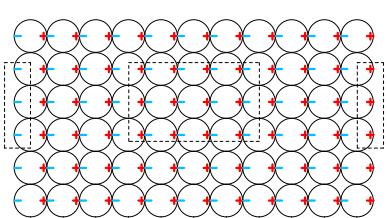


Fig. 1.2.10 Objeto polarizado perto de um objeto carregado.

As regiões nas quais as cargas podem mover-se são representadas como bolinhas. No mundo real estas regiões podem ser

extremamente pequenas, por exemplo, na ordem de 1 nm (nanômetro =  $10^{-9}$ m). Mas aqui desenhamos bolinhas grandes para podermos enxergar dentro delas. Na linguagem moderna estas regiões podem corresponder aos átomos ou às moléculas do material. As forças exercidas pelas cargas do objeto carregado deformam a distribuição de carga dentro de cada bolinha. Graficamente indicamos isto com os sinais + e -. No desenho separamos ainda três regiões com caixinhas pontilhadas. Percebemos que na caixinha no interior do material não há alteração da neutralidade. A soma das cargas na caixinha continua zero. Mas nas duas caixas nas superfícies há carga excedente, sendo positiva a superfície perto do objeto negativo, e negativa a superfície longe do objeto negativo. Então podemos ver que a nossa explicação da atração de objetos neutros por objetos carregados precisa apenas da mobilidade local das cargas. Não há necessidade de poder deslocar cargas por grandes distâncias. Então com esta explicação não entramos em conflito com as observações na fita desenrolada.

O efeito descrito é chamado de *polarização* do material. A polarização é uma deformação local das distribuições de carga, e aqui ela é provocada pelas forças elétricas de um objeto carregado perto do material. Uma polarização provocada por um objeto carregado resulta numa força atrativa, qualquer que seja o sinal da carga do objeto carregado. Vamos chamar esta força de *força de polarização*. Isto acontece com todo material, mesmo que o objeto que está sendo polarizado seja também eletricamente carregado. Então, quando colocamos dois objetos eletricamente carregados um perto do outro, temos sempre uma situação bem complicada; há a força elétrica direta entre carga em excesso de um corpo e carga em excesso do outro corpo, mas há também força de

polarização. Isto explica os comportamentos aparentemente contraditórios nas experiências com o bastão de vidro, que pode ora repelir um pedaço de fita, ora atrair este mesmo pedaço, como é mostrado nas figuras 1.2.5 e 1.2.6.

Para os próximos passos será muito importante entendermos esta complicação um pouco mais detalhadamente. Imagine um pedaço de papel polarizado perto de um bastão eletrizado. Vamos supor que o lado de carga oposta do bastão esteja a uma distância de 1 cm do bastão. Imagine que o pedaço de papel tenha também 1 cm de largura. Então as cargas do mesmo sinal do bastão têm uma distância do bastão de 2 cm, o dobro daquela das cargas atraídas. Agora imagine este pedaço de papel com o mesmo estado de polarização numa distância de 1 m do bastão. Nesta situação as distâncias dos dois tipos de carga são 100 cm e 101 cm, ou seja, quase a mesma distância. Então esperamos que a força de polarização seja muito mais fraca. Mas, nesta experiência imaginada, supusemos ainda que o estado de polarização fosse o mesmo. Na verdade a polarização é provocada pelas forças elétricas que o bastão exerce, e, quando o papel está a uma distância de 1 m, estas forças já são muito fracas. Assim a própria polarização também decai com a distância. Nesse caso a força de polarização enfraquece com a distância por três razões: a primeira é a mesma da diminuição da própria força elétrica com a distância, a segunda é que a polarização diminui com a distância e a terceira é que as diferenças de distâncias entre extremos do objeto polarizado se tornam irrelevantes para grandes distâncias. Daí concluímos que a força de polarização decai com a distância muito mais rapidamente do que a força entre carga e carga. Para grandes distâncias a força de polarização se torna desprezível. Mas, para pequenas distâncias, especialmente quando um dos objetos possui pouca carga elétrica, ela pode tornar-se mais importante que a força direta entre cargas líquidas dos objetos. Isto explica o comportamento estranho da fita na presença do bastão de vidro. O vidro tem carga do mesmo sinal da fita. Para grandes distâncias a repulsão entre cargas iguais domina e se observa repulsão. Para pequenas distâncias domina a força de polarização e se constata atração.

Discutimos este detalhe não por que adoramos detalhes chatos, mas porque esta discussão nos leva a um conceito de fundamental importância. Para poder avançar na compreensão das forças elétricas, precisamos tornar nossas observações mais quantitativas. Em experiências quantitativas as forças de polarização adicionam uma complicação extra que dificulta a visão clara dos princípios fundamentais. Com a discussão do último parágrafo vimos como este tipo de complicação pode ser eliminado, ou pelo menos minimizado; temos que pesquisar as forças elétricas usando grandes distâncias.

Mas o que significa grande distância? 10 cm é uma distância grande? 1 m é grande? Ou precisamos da distância Terra-Lua? Distâncias não são números. Um valor de uma grandeza física não numérica por si só nunca é grande nem pequeno. Temos que comparar um valor com outro para poder falar de grande e pequeno. Por exemplo, 1 m é grande comparado com o diâmetro de um micrório, mas 1 m é pequeno em comparação com a distância Terra-Lua. Quando queremos grandes distâncias entre objetos eletrizados para facilitar a compreensão dos fenômenos, temos que comparar a distância dos objetos com alguma outra distância relevante na experiência. É bastante óbvio que esta distância precisa ser comparada com os tamanhos dos objetos. Então temos duas opções para poder eliminar os efeitos da polarização: para dados objetos podemos afastá-los muito, ou para dadas distâncias podemos usar objetos muito pequenos.

Por esta razão os teóricos imaginam objetos idealizados de tal forma que para qualquer distância os efeitos da polarização sejam desprezíveis: seriam objetos de tamanho zero, ou seja, pontos. Desta forma chegamos ao conceito de *carga pontual*. Mas temos que

lembra sempre que este conceito é uma idealização. Nada garante que estas cargas pontuais realmente existam no mundo real. Idealizações são criadas para facilitar o trabalho. De fato a análise das forças elétricas fica facilitada com o conceito de carga pontual. Mas às vezes estas idealizações resultam também em problemas artificialmente criados pela mente humana. Na verdade o conceito de carga pontual traz alguns problemas, como veremos futuramente.

Antes de encarar a tarefa da descrição quantitativa das forças elétricas, faremos mais uma experiência qualitativa que revela um aspecto importante da questão da mobilidade das cargas. Penduramos uma bolinha de isopor presa num fio de costura num suporte. Quando aproximamos um bastão de PVC atritado com algodão, observamos que a bolinha é atraída pelo bastão, como pode ser visto na figura 1.2.11. A bolinha certamente estava neutra e o fenômeno é o mesmo que observamos com os papéis. No suporte fixamos um grampo que permite pendurar uma chapa na frente da bolinha. A questão que queremos investigar é se a atração da bolinha funciona mesmo se colocarmos uma chapa entre bastão e bolinha.



Fig. 1.2.11 Uma bolinha de isopor foi atraída por um bastão de PVC eletrizado.

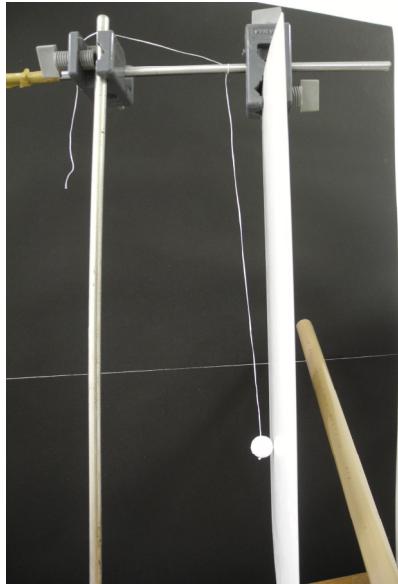
Temos à nossa disposição uma chapa de PVC e uma chapa de alumínio. Qual será a reação da bolinha se nós colocarmos uma destas chapas entre o bastão e a bolinha?

Antes de continuar a leitura faça aqui a sua aposta:

	A bolinha ainda é atraída.	A bolinha não é mais atraída.
Com a chapa de PVC		
Com a chapa de Alumínio		

Fazendo esta pergunta aos nossos alunos costuma-se ter um resultado de aproximadamente 80% de apostas erradas. Isto mostra que, apesar da presença constante da eletricidade na vida moderna, os fenômenos elétricos não são corriqueiros, e nossa intuição a respeito destas coisas precisa ser formada passo a passo.

Bom, aqui está a revelação das respostas: a figura 1.2.12 mostra a experiência com a chapa de PVC (branca) e se percebe que a bolinha continua sofrendo a atração do bastão. Ela está sendo puxada até encostar na chapa. A figura 1.2.13 mostra o caso da chapa de alumínio e se percebe que a bolinha não é mais atraída.



← Fig. 1.2.12 Uma chapa de PVC entre bola de isopor e bastão eletrizado não impede a atração da bolinha.

Fig. 1.2.13 Uma chapa de alumínio entre bola de isopor e bastão eletrizado impede a atração da bolinha. →

Podemos explicar estes resultados supondo que no metal existe uma mobilidade das cargas elétricas que permite deslocamentos das

cargas por grandes distâncias. A figura 1.2.14 mostra esquematicamente o que acontece. Quando aproximamos o bastão negativo, atraímos cargas positivas, ou expulsamos cargas negativas da região da chapa que fica próxima ao bastão. Não temos, por enquanto, meios de saber qual tipo de carga tem mobilidade dentro do metal. Mas isto não importa. Com mobilidade que permite deslocamentos arbitrariamente grandes de qualquer uma das espécies de carga, obtemos uma região positivamente carregada. Na figura supomos um movimento de carga negativa que saiu da chapa e foi para a mesa. Indicamos este movimento de carga negativa simbolicamente com uma seta azul que acompanha o caminho das cargas.

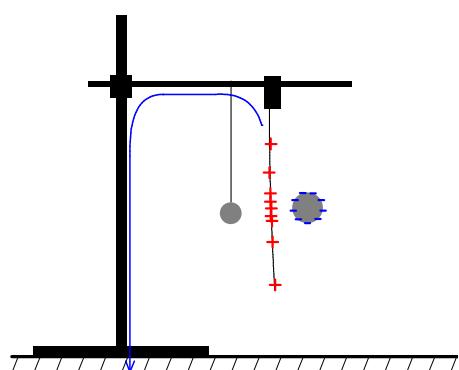
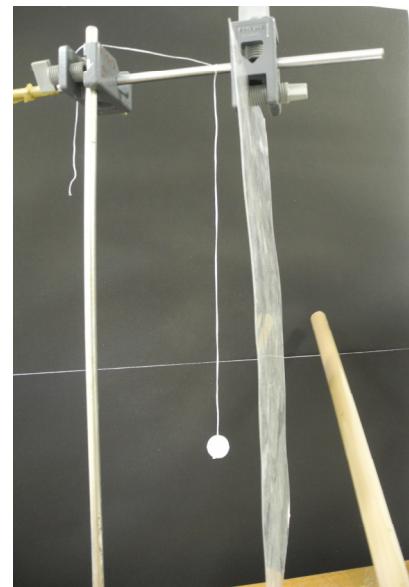


Fig. 1.2.14 Redistribuição de cargas na chapa metálica e suporte de mesa provocada por um bastão negativo. Um acúmulo de carga positiva na chapa blinda a ação das cargas do bastão, e a bola de isopor ao lado esquerdo da chapa não sofre força de atração.

Esta cortina de carga positiva anula o efeito das cargas negativas sobre a bolinha de isopor. Este fenômeno é conhecido com o nome de *blindagem*. Então, com materiais nos quais existem cargas com mobilidade não local, podemos blindar as forças elétricas. Chamamos estes materiais de *condutores*. Chamamos os materiais nos quais as cargas possuem apenas mobilidade local de *isolantes* ou *dielétricos*. O nome dielétrico tem sua origem exatamente nas experiências do tipo da figura 1.2.12. O prefixo “di” é uma abreviação do prefixo “dia” que vem do grego “διά” e significa “através de”, “em direção ao outro lado”. Encontra-se este prefixo em algumas palavras portuguesas: *diâmetro* = medida através, *diapedese* = passagem de células sanguíneas através da parede do vaso, *diarréia* = fluxo que atravessa, *diapositivo* = fotografia positiva que se vê com luz atravessando o filme.

No caso das substâncias dielétricas o “através de” significa que a força elétrica atravessa este material como se vê na figura 1.2.12.

A classificação dos materiais em condutores e isolantes tem o mesmo tipo de problema da classificação dos materiais em sólidos e líquidos. Lembramos da Física II: Um sólido reage a uma tensão de cisalhamento com uma deformação que chega a um equilíbrio estático. Em líquidos não há possibilidades de tensões de cisalhamento no equilíbrio estático. O problema reside na definição de equilíbrio estático; se olharmos uma placa de vidro que for exposta a forças causadoras de tensão de cisalhamento durante alguns dias ou até alguns anos, vamos julgar que o vidro está suportando esta tensão de forma estática. Mas, se olharmos numa escala de milhões de anos, vamos dizer que o vidro é um líquido. Algo parecido acontece com a classificação condutor-isolante. Se observarmos a distribuição de cargas num isolante durante alguns segundos, podemos ter a impressão que nada muda. Mas, umas horas mais tarde, constatamos que houve deslocamentos de cargas por grandes distâncias. Então a classificação dos materiais depende sempre das circunstâncias. A tabela abaixo mostra uma classificação que seria apropriada para o contexto das experiências descritas nesta seção.

Condutores:	Isolantes:
Metal	Vidro
Madeira	PVC
Papel	Âmbar
Corpo humano	Teflon

A experiência com a chapa de alumínio mostra ainda outro aspecto interessante. Descobrimos com esta experiência uma outra técnica de criar objetos eletricamente carregados. A chapa de alumínio não foi atritada, mas, enquanto o bastão negativo esteve por perto, a chapa possuiu um excesso de carga positiva que veio através de um caminho condutor, no caso o suporte. Chama-se isto de *carga induzida* e o fenômeno, de *indução eletrostática*<sup>5</sup>. Imagine agora que a chapa se solte da garra e caia sobre alguma superfície isolante. Neste caso ela ficaria com esta carga positiva mesmo que retirássemos agora o bastão negativo.

Este efeito de indução pode ser usado em máquinas engenhosas para criar grandes acúmulos de carga elétrica. A primeira máquina para eletrizar foi inventada pelo prefeito de Magdeburg, Otto von Guericke (20/11/1602 – 11/05/1686 (calendário juliano); 30/11/1602 – 21/05/1686 (calendário gregoriano)), o mesmo que pesquisou pressão dos gases e executou a espetacular experiência dos semi-esferas de Magdeburg (compare Física II capítulo fluidos). Esta máquina funcionava somente com atrito. A primeira máquina que podia gerar continuamente eletricidade com o princípio de indução eletrostática foi inventada por Wilhelm Holtz (15/10/1836 – 27/09/1913). Bem antes o fenômeno de indução já tinha sido usado por Johan Carl Wilcke (6/9/1732 - 18/4/1796) para gerar eletricidade de forma não contínua.

---

<sup>5</sup> A “indução eletrostática” não deve ser confundida com o fenômeno da indução da lei de Faraday.

### Exercícios:

**E 1.2.1:** As propriedades da relações **r** e **a** são diferentes, mas podemos estabelecer uma correspondência. Por exemplo, a propriedade (1.2.1) da relação **a** corresponde à propriedade (1.2.2) da relação **r**. Determine as propriedades da relação **a** que correspondem às propriedades (1.2.3) e (1.2.4) da relação **r**, ou seja, propriedades do tipo “**A a B** implica em .....” e “**A a B e B a C** implica em .....”.

**E 1.2.2:** Desenhe a distribuição de cargas para o caso da experiência da chapa de PVC da figura 1.2.12.

**E 1.2.3:** Escreva uma lista de pontos de destaque da seção 1.2. Se a sua lista tiver menos de 7 itens, volte a estudar com mais atenção.

**E 1.2.4:** A Figura 1.2.15 mostra o esquema de uma máquina de indução que foi inventada por Lord Kelvin (26/6/1824 – 17/12/1907). Ela usa água que sai pingando de dois orifícios de uma tubulação. Os pingos atravessam anéis metálicos sem tocar nos mesmos e caem em funis metálicos dentro de cilindros metálicos ligados de forma cruzada aos anéis. Para que esta máquina funcione, é necessário ter-se uma pequena carga elétrica inicial nos funis. Com o passar do tempo a carga nos funis aumenta.

Explique o funcionamento desta máquina.

Fig. 1.2.15 Máquina de indução eletrostática de Kelvin.

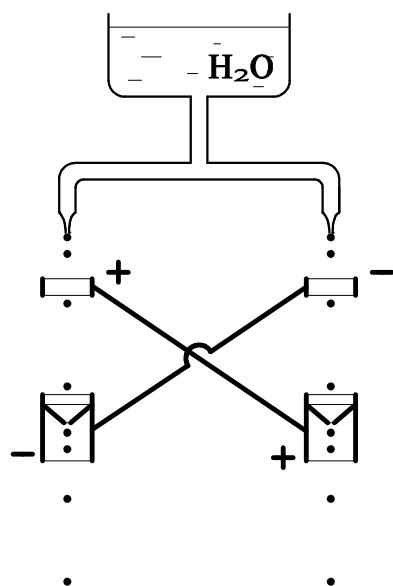


Fig. 1.2.16 Eletroscópio

**E 1.2.5:** A figura 1.2.16 mostra um instrumento simples que serve para indicar presença de carga elétrica. Este instrumento é chamado de eletroscópio. Ele consiste em um corpo metálico que possui uma plataforma horizontal, e este corpo é apoiado num isolante (no caso da figura foi usado teflon (cilindro branco na mesa)). Um palito de madeira balsa (condutor) é apoiado na plataforma horizontal com uma lâmina de barbear que atravessa a madeira. O centro de gravidade do conjunto palito-lâmina fica ligeiramente abaixo dos pontos de apoio.

**Experiência 1 do E 1.2.5::** Quando tocamos com um bastão de PVC, que foi previamente atritado com algodão, no corpo metálico do eletroscópio, a paleta de

madeira vira e se afasta das partes verticais do suporte (compare com a figura 1.2.17).  
(a) Explique este fenômeno.

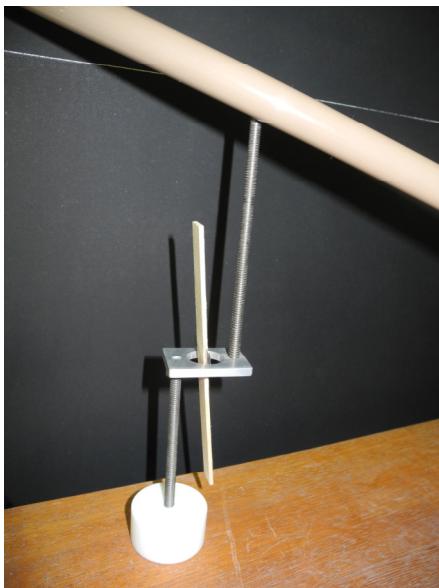


Fig. 1.2.17 Eletroscópio carregado. ↑

**Experiência 2 do E 1.2.5:** Quando se afasta o bastão, a inclinação da paleta continua. Somente quando tocamos nas partes metálicas do instrumento, ou quando esperamos muito tempo, a inclinação da paleta volta ao normal. (b) Explique este comportamento.

**Experiência 3 do E 1.2.5:** Quando se aproxima o bastão de PVC eletrizado do eletroscópio sem tocar nele, também aparece uma deflexão da paleta, mas esta desaparece quando o bastão é afastado. (c) Explique este comportamento.

Fig. 1.2.18 A proximidade de um bastão eletrizado provoca uma deflexão da paleta do eletroscópio. →

**Experiência 4 do E 1.2.5:** Mais uma experiência interessante pode ser feita com o eletroscópio. Uma pessoa aproxima o bastão eletrizado o suficiente para provocar uma deflexão da paleta, mas sem colocar o bastão em contato com o eletroscópio. Uma outra pessoa toca brevemente na parte metálica do instrumento chegando com a mão do lado oposto do bastão. Contrário ao caso da experiência 2, este toque não destrói a deflexão da paleta. Ao contrário, agora a deflexão continua mesmo retirando o bastão eletrizado. (d) Explique este comportamento.



**E 1.2.6:** Faça experiências eletrostáticas em casa. Dica: não use PET como material isolante. O PET se polariza e tem “memória eletrostática” de tal forma que a polarização continua depois de remover os objetos que a provocaram. Isto leva a fenômenos difíceis de entender. Um bom material para apoio de um eletroscópio, por exemplo, é vidro. Então pode-se enfiar a parte metálica de um eletroscópio numa rolha presa numa garrafa de vidro. Limpe bem as superfícies dos isolantes.

Outro aviso: caso você consiga construir um gerador eletrostático, e este realmente funcionar, você sentirá um cheiro “fresquinho” quando o gerador estiver funcionando. Este cheiro é de um gás chamado ozônio, que é gerado por faíscas. Ozônio,  $O_3$ , é um gás altamente tóxico que provoca graves problemas pulmonares. Use o seu gerador somente em ambientes bem ventilados!