

# Material Instrucional

Rodrigo Fernandes Morais

Penha Maria Cardozo Dias

Instituto de Física

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Alguns pesquisadores em Ensino de Física aconselham professores a utilizarem, em suas aulas, textos históricos originais, fragmentos dos mesmos ou textos de historiadores confiáveis, antes de serem ministrados conteúdos específicos. Acreditam que, a partir dos textos históricos, os estudantes possam desenvolver uma aprendizagem significativa do conceito em questão. Seguindo essa sugestão, apresenta-se, neste material instrucional, um roteiro que pode ser útil para introduzir o conceito de carga no Ensino Médio, usando a História como motivadora de ideias, problemas e discussões.

Na primeira parte, usa-se material histórico para motivar discussões sobre diferentes concepções do que é eletricidade e os fenômenos que motivaram seu estudo. Na segunda parte, a concepção moderna é introduzida por um material histórico sobre raios catódicos. Na terceira parte, apresenta-se uma tentativa bem sucedida, de introduzir o conceito de carga elétrica para alunos de Ensino Médio do Colégio Santo Ignácio apresentado em Luiz Cesar Mendes da Silva *et alii*.

## 1 Fluidos de eletricidade e magnéticos

Provavelmente, as primeiras observações de fenômenos elétricos foram na Grécia Antiga. Citações em trabalhos de filósofos apontam que Tales de Mileto (640-546 a.C.) foi, possivelmente, o primeiro a constatar que o âmbar, ao ser atritado, adquiria a propriedade de atrair corpos leves. Tales também teria notado a atração do ferro pelo ímã (J.L. Cindra e Odete P.B. Teixeira, p.386). Posteriormente, ainda na Grécia, Teofrasto (372-288 a.C.) observou que minerais atritados também atraíam corpos leves, ou seja, essa propriedade não era exclusiva do âmbar. Somente em 1550, o matemático Girolamo Cardano (1501-1576) diferencia os fenômenos do âmbar atritado daqueles provenientes dos ímãs. Por séculos, fenômenos elétricos e magnéticos foram tratados separadamente.

Um dos cientistas que iniciou as pesquisas modernas sobre magnetismo e sobre eletricidade foi o médico britânico William Gilbert (1544-1603). Ele denomina de *elétricos* os corpos que, ao serem atritados, passam a atrair corpos leves, como pluma e palha;<sup>1</sup> em outras palavras, corpos que têm a mesma propriedade do âmbar (Andre Koch Torres Assis p.17). A maior contribuição de Gilbert para a ciência da eletricidade foi a descoberta de uma série de substâncias que se comportam como o âmbar, ao serem atritadas (Assis, p.20).

---

<sup>1</sup>O termo vem de *elektron* que, em grego, significa âmbar (*apud* André Koch Torres Assis, p.21).

O desenvolvimento de novas teorias elétricas e magnéticas depois de Gilbert foi lento.

Uma teoria formal da natureza da eletricidade muito influente foi enunciada por Charles François de Cisternay Du Fay (1698-1739), em 1735. Ele propôs a existência de dois tipos de eletricidade, a vítrea e a resinosa. Naquela época, ainda não havia explicação para a atração e a repulsão entre corpos eletrizados. Du Fay refez experimentos análogos aos feitos por Francis Hauksbee (1660-1713) e Stephen Gray (1666-1736), dos quais se declarava devedor (Sérgio Luiz Bragatto Boss e João José Caluzi, p.636). Hauksbee e Gray utilizavam uma penugem que era atraída e em seguida repelida por um tubo atritado de *flint-glass*, uma espécie de vidro composto de chumbo (Assis, p.58). Desses experimentos, Du Fay extraiu novos princípios.

O primeiro princípio estabelece que (Du Fay, p.262):

[...] Corpos Elétricos atraem todos aqueles que não estão desta forma [não eletrizados] e os repelem, assim que eles se tornam elétricos, pela Proximidade ou pelo Contato com o Corpo Elétrico.

No mesmo parágrafo em que foi enunciado o primeiro princípio, Du Fay comenta um experimento em que uma lâmina de metal é aproximada de um tubo eletrizado. Lembrando que uma lâmina de metal, presa por um fio isolante, quando aproximada de um bastão eletrizado, é atraída e, após contato com o bastão, é repelida, pode-se entender o que Du Fay quis dizer. Esse princípio falhou, quando a lâmina de metal eletrizada foi aproximada de um pedaço eletrizado de goma-copal. Esperava-se que os corpos se repelissem, mas ocorreu o contrário, a lâmina metálica e a goma-copal se atraíram. Pode-se explicar a falha no primeiro princípio, levando em conta que o tubo estava eletrizado com cargas positivas e atraiu a lâmina de metal (neutra); após o contato com o tubo a lâmina de metal também ficou carregada com cargas positivas. A goma-copal (um tipo de material resinoso) estava carregada com cargas negativas e por isso foi atraída pela lâmina de metal.

O problema que se colocava era: Como um corpo eletrizado poderia atrair outro corpo eletrizado, sem ferir o primeiro princípio? Du Fay buscou responder a essa questão, apresentando um segundo princípio (Du Fay, p.263-264):

[...] existem duas Eletricidades distintas, muito diferentes uma da outra, uma que chamo de eletricidade vítrea e a outra que chamo de eletricidade resinosa.

Nesse princípio, Du Fay postula a existência de dois tipos de eletricidade, a vítrea e a resinosa. A escolha do nome desses diferentes tipos de eletricidades também surge de suas observações experimentais, pois percebeu que, de um lado, os corpos sólidos e transparentes, como o vidros, e, de outro lado as resinas e os betuminosos, possuem comportamento elétrico diferente. Tomando essa diferença de comportamento elétrico como base, ele classificou alguns materiais. Por exemplo, matérias como vidro, pedra-cristal, pedras preciosas, pelo de animais, lã etc., quando eletrizados, ficavam contendo eletricidade do tipo vítrea. Por outro lado, materiais como âmbar, copal, goma-laca, seda, linha, papel etc., quando eletrizados, ficavam contendo eletricidade resinosa. Nas palavras de Du Fay (*apud* Assis, p.101):

Aí estão constantemente duas eletricidades de uma natureza totalmente diferente, a saber, a eletricidade dos corpos transparentes sólidos, como o vidro, o cristal etc., e a eletricidade dos corpos betuminosos e resinosos, como o âmbar, a goma-copal, a cera da Espanha etc. Uns e outros repelem os corpos que adquiriram uma eletricidade da mesma natureza que a deles e atraem, ao

contrário, os corpos cuja eletricidade é de uma natureza diferente da deles. [...] Portanto aí estão duas eletricidades bem demonstradas, e não posso me dispensar de lhes dar nomes diferentes para evitar a confusão dos termos, ou embaraço de definir a cada momento a eletricidade que desejo falar; portanto, chamarei uma de eletricidade vítrea e a outra de eletricidade resinosa, não que eu pense que somente existam os corpos da natureza do vidro que sejam dotados de uma [espécie de eletricidade], e as matérias resinosas de outra, pois já tenho fortes provas do contrário, mas [escolho esta denominação] porque o vidro e o copal foram as duas matérias que me deram os vínculo para descobrir as duas eletricidades diferentes.

Sendo assim, Du Fay resolve a questão, quando divide os corpos eletrizados em duas classes e chega à conclusão de que corpos com eletricidades iguais se repelem e com eletricidades diferentes se atraem.<sup>2</sup>

Du Fay não chegou a classificar a eletricidade como sendo uma espécie de fluido (Weinberg, p.15), mas suas pesquisas influenciaram diretamente a teoria dos dois fluidos desenvolvida posteriormente. Foi o Abbé Jean-Antonie Nollet (1700-1770), professor da Universidade de Paris, que introduziu a ideia de que os dois tipos de eletricidade correspondem a dois tipos distintos de fluido elétrico (Weinberg, p.16).

Durante esse período, as idéias mecanicistas exerciam forte influência sobre os cientistas, por uma influencia do Iluminismo. E a idéia de explicar os fenômenos elétricos, baseando-se em teorias mecânicas de fluidos era bastante atraente. O desenvolvimento de teorias mecânicas de fluidos foi um passo no processo de quantificação de alguns ramos da Física (Thomas L. Hankins, p.50). O fluido “sutil” ou “imponderável” era uma substância que possuía propriedades físicas, mas não era como a matéria comum; os melhores exemplos de “fluidos sutis” nasceram na tentativa de explicar os fenômenos elétricos e térmicos. Segundo Hankins (p.50), os “fluidos sutis” tinham a vantagem de mostrar o que deve ser medido em física; eles forneceram um quadro teórico em torno do qual se poderia construir conceitos físicos como “carga”, “tensão elétrica”, “calor”, “capacidade de calor” e “temperatura”.

A teoria de dois fluidos era consistente com todas as experiências que poderiam ser levadas a cabo no século XVIII (Weinberg, p.16). Nessa teoria, um corpo é considerado neutro, quando contém a mesma quantidade dos dois fluidos. A eletrização acontece, quando o corpo tem excesso ou falta de um fluido. Entretanto, outra teoria competidora, a de um fluido, foi logo proposta (Weinberg, p.16), inicialmente, pelo médico e naturalista londrino William Watson (1715-1787); depois, seria proposta mais detalhadamente e de forma mais influente por Benjamin Franklin (1706-1790). Como diz Weinberg (p.16), “a paixão dos físicos pela simplicidade não os deixa sossegados com uma teoria complicada, se uma mais simples pode ser achada”.

Edmund Whittaker (p.47) explica que Franklin pode ter sido motivado pelo seguinte experimento. Uma pessoa, *A*, de pé sobre cera, portanto isolada do solo, atrita um tubo de vidro. Depois, uma outra pessoa, *B*, também de pé sobre cera, passa o nó dos dedos ao longo do mesmo tubo, a uma pequena distância dele. Uma terceira pessoa, *C*, está de pé sobre o solo. Se *A* e *B* tocarem *C*, uma após a outra, surge uma faísca, em cada um dos dois toques, indicando que *A* e *B* estão eletrizados. Franklin interpreta o resultado, supondo que eletricidade é um elemento; cada corpo, em condições normais, possui uma certa proporção desse elemento. Assim, *A*, *B* e

---

<sup>2</sup>Steven Weinberg (p.19) comenta que a série triboelétrica lista materiais, mostrando quais são aqueles que têm uma maior tendência a se tornarem positivamente eletrizados (eletricidade vítrea) e quais os que apresentam maior tendência de se tornarem negativamente eletrizados (eletricidade resinosa).

*C* possuem, inicialmente, antes do experimento, iguais quantidades de eletricidade; ao atritar o vidro, *A* passa eletricidade para o vidro que a transmite para *B*; *A* tem falta e *B*, excesso de eletricidade. Ao tocarem, um após o outro, *C*, que tem quantidade normal de eletricidade, a distribuição de eletricidade entre eles fica equalizada; se *A* e *B* se tocarem, eletricidade também flui entre eles, equilibrando a quantidade de fluido entre eles e nenhum tem mais ou menos eletricidade do que *C*. Franklin supôs, portanto, que a eletricidade fosse composta de um único tipo de fluido, constituído de “partículas extremamente finas”. Ele supôs, ainda, que a matéria comum dos corpos retivesse a eletricidade como um “tipo de esponja”. Ele não conhecia o trabalho de Du Fay e não usou sua terminologia (vítrea e resinosa); ele chamou a deficiência de eletricidade de eletricidade negativa e o excesso de eletricidade, de eletricidade positiva; à quantidade de eletricidade, positiva ou negativa, de um corpo ele chamou de *carga* do corpo, termos que ainda são usados nos dias de hoje.

Segundo Weinberg (p.16), Franklin foi o primeiro estudioso da natureza a afirmar que a quantidade total de cargas de um corpo é conservada; ou seja, foi o primeiro a postular que a eletricidade nunca é criada ou destruída, podendo apenas ser transferida de um corpo para outro corpo. Quanto ao fenômeno da atração e da repulsão, Franklin supôs que a eletricidade repele-se a si mesma, mas atrai a matéria que a retém; em outras palavras, um corpo com excesso de eletricidade repele um corpo com excesso de eletricidade e um corpo com excesso de eletricidade atrai um corpo com deficiência de eletricidade. Fazendo uma analogia com a teoria de Du Fay, pode-se identificar como vítrea o que Franklin chamou de excesso de eletricidade e como resinosa, o que ele chamou de deficiência de eletricidade. A dificuldade do modelo era explicar a repulsão entre corpos com deficiência de eletricidade, ou seja, entre corpos que contêm eletricidade resinosa. Em 1759, o astrônomo, físico, matemático e filósofo natural alemão Franz Ulrich Theodosius Aepinus (1724-1802), conhecedor do trabalho de Franklin, solucionou esse problema, criando a tese de que, quando dois corpos possuem ausência de eletricidade, a matéria comum repele-se a si mesma.

A teoria de um fluido de eletricidade levou, naturalmente, a tentativas de se construir uma teoria semelhante para o magnetismo; isso foi efetuada em 1759 por Aepinus, que supôs que os “pólos” fossem lugares em que um fluido magnético se encontrasse presente em quantidade superior à quantidade normal. Subsequentemente, a teoria de dois fluidos magnéticos imponderáveis, nomeados de boreal e austral, foi postulada por Anton Brugmans (1732-1789) e por Johan Carl Wilcke (1732-1796). Segundo a teoria, esses fluidos deveriam ter as propriedades de atração e repulsão mútuas, semelhantes aos possuídos pelas eletricidades vítrea e resinosa (Whittaker, p.57).

Charles Augustin Coulomb (1736-1806) era favorável à teoria de dois fluidos (Whittaker, p.58-59); além disso, observou que dois fluidos magnéticos, ao contrário dos dois fluidos elétricos, não podem ser obtidos separadamente; quando um ímã é quebrado em duas partes, uma contém o norte e outra o sul (Whittaker, p.59).

A teoria dos dois fluidos e a teoria de um fluido dividiu o pensamento dos físicos. Olhando em retrospecto, a natureza da eletricidade foi um problema que só foi resolvido com a descoberta do elétron.

## 2 A concepção moderna do elétron

### 2.1 Os raios catódicos

Descargas elétricas em tubos de vidro contendo um gás a baixa pressão eram estudadas desde 1709. Cientistas, na época, descobriram que, quanto mais baixa fosse a pressão no interior do tubo, menos o gás brilhava e, ainda assim, uma corrente elétrica fluía, sendo possível observar uma mancha brilhante que se formava do lado oposto do catodo — eletrodo negativo. Sabe-se, hoje, que as luzes são emitidas na ionização das moléculas do gás, quando colidem com elétrons provenientes do catodo. Se o vácuo for muito bom, ocorrem menos colisões, o que resulta em um feixe bem colimado dos elétrons do catodo. Por volta de 1800, com o auxílio de uma bomba de ar, o vácuo dentro do tubo foi sensivelmente melhorado, permitindo que os cientistas pudessem investigar o fenômeno mais a fundo.

A natureza do raio catódico foi um problema longamente debatido. Do ponto de vista da Física, em retrospecto, o que distinguiu a pesquisa de Thomson foi que, diferentemente de outros pesquisadores, ele conseguiu obter um bom vácuo e um “bom feixe”, o que lhe permitiu observar desvios do feixe por forças elétricas e magnéticas. Então foi possível medir a deflexão do feixe por campos elétrico e magnético e calcular razão entre a carga e a massa dessas partículas, encontrando um valor bem superior ao dos íons na eletrólise. Assim, ou as partículas que constituíam os raios catódicos, os “corpúsculos”, teriam cargas elétricas muito grandes ou seriam extremamente leves. A massa do “corpúsculo” seria 1836 vezes menor que a do hidrogênio ionizado ( $H^+$ ).

### 2.2 O experimento de Thomson

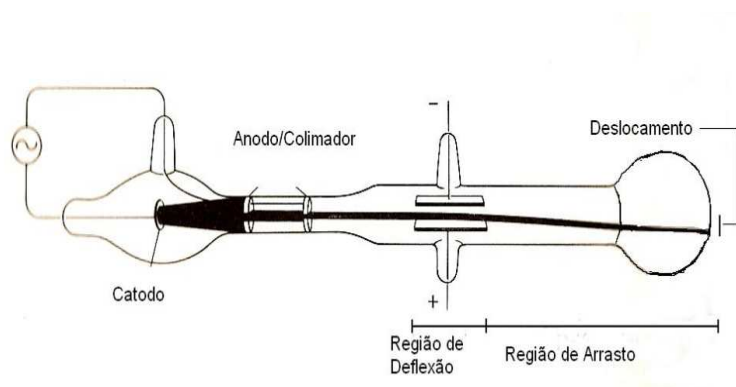


Figura 1: **Esquema de um tubo de raios catódicos.** O raio atravessa uma região, chamada de deflexão, com comprimento  $L_d$ , onde sofre forças perpendiculares à direção do raio. O raio emerge na região de arrasto, com comprimento  $L_a$ , onde não sofre forças e se move com movimento retilíneo uniforme.

A figura mostra o esquema do tubo de raios catódicos, tirados de um artigo clássico de Thomson (Weinberg, p.30). O feixe de partículas sai do catodo, passa pela região de deflexão, onde é desviado por campos elétrico e/ou magnético, perpendiculares ao feixe. Em seguida, o raio atravessa a região de arrasto, onde se move com movimento retilíneo uniforme, até alcançar a parede do tubo. Uma mancha luminosa aparece onde o raio bate na parede do vidro no final do tubo.

O experimento de Thomson consistiu em medir o deslocamento do raio, devido primeiro à força elétrica e, depois, devido à força magnética; o deslocamento é dado pela distância entre a posição da mancha e a direção original do raio (quando não há forças externas). Usando os valores dos deslocamentos, é possível achar a razão  $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$ .

O raio sai do catodo com uma velocidade  $v_{\parallel}$ . Na região de deflexão, o raio sofre uma aceleração perpendicular a ele; adquire, pois, uma velocidade  $v_{\perp}$  dada pela lei de Newton:

$$v_{\perp} = at_d = \frac{F_{\perp}}{m}t_d = \frac{F_{\perp}}{m} \times \frac{L_d}{v_{\parallel}}, \quad (1)$$

na qual  $t_d$  é o tempo gasto na região. Na região de arrasto, o raio move com uma velocidade uniforme, com componentes paralela e perpendicular, isto é,  $\vec{v}_a = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$ ; portanto, o deslocamento perpendicular é:

$$D_{\perp} = v_{\perp}t_a = v_{\perp} \times \frac{L_a}{v_{\parallel}}, \quad (2)$$

em que  $t_a$  é o tempo gasto na região. Colocando o valor de  $v_{\perp}$  de (1) em (2), é fácil obter:

$$D_{\perp} = \frac{F_{\perp}L_dL_a}{mv_{\parallel}^2} \quad (3)$$

Na montagem da figura, o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) é vertical, de cima para baixo e a força é igual a  $F_{\text{el}} = qE$ ; uma carga negativa sofre um deslocamento para baixo. O campo magnético ( $\vec{B}$ ) é aplicado perpendicular à folha de papel, saindo do papel, e a força magnética é  $F_{\text{mag}} = qv_{\parallel}B$ ; uma carga negativa sofre um deslocamento para baixo. Colocando esses valores, respectivamente em (3):

$$D_{\text{el}} = \frac{qEL_dL_a}{mv_{\parallel}^2} \quad \text{e} \quad D_{\text{mag}} = \frac{qv_{\parallel}BL_dL_a}{mv_{\parallel}^2} \quad (4)$$

O valor desconhecido de  $v_{\parallel}$  pode, então, ser calculado:

$$v_{\parallel} = \left( \frac{D_{\text{mag}}}{D_{\text{el}}} \right) \left( \frac{E}{B} \right) \quad (5)$$

e substituindo (5) em qualquer uma das equações em (4):

$$\frac{m}{q} = \frac{B^2L_dL_aD_{\text{el}}}{ED_{\text{mag}}^2}.$$

ou seja, a razão  $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$  é obtida em termos de grandezas conhecidas.

### 3 Uma experiência no Ensino Médio

Nesta seção, é descrita uma série de experimentos realizados com alunos do Ensino Médio, do Colégio Santo Ignácio, no Rio de Janeiro. O colégio dispõe de uma versão moderna do aparelho de raios catódicos, utilizado por J.J. Thomson para determinar a razão  $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$  do elétron. Foram feitos quatro experimentos: O primeiro experimento consistiu na mera visualização do

feixe luminoso que permite a identificação da trajetória dos elétrons; no segundo, foi observado o comportamento do feixe na presença de um campo magnético; no terceiro, foi observado o comportamento do feixe, com a variação de seu ângulo com o campo; no quarto, os alunos fizeram medidas que levassem à razão  $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$ .

Os conceitos teóricos envolvidos nos experimentos foram discutidos com os alunos, a partir de uma texto usando história, previamente preparado (Mendes da Silva *et al.*, p.2-4); esse material pode ser as duas seções acima. Nessa experiência, os alunos participaram de todo processo de montagem do experimento, tendo a oportunidade de aprender e compreender, na prática, como efetuar ligações de voltímetros e amperímetros; por exemplo, aprendem que o amperímetro deve ser ligado em série e o voltímetro em paralelo, nos circuitos. Os materiais utilizados no experimento foram: Tubo de feixe colimado, par de bobinas de Helmholtz, fonte de tensão de 600 V-DC, fonte de tensão usada como fonte de corrente, amperímetro, voltímetro e fios de conexão, figura abaixo.



Figura 2: **Tubo de raios catódicos.** (Mendes da Silva *et alii*).

## 4 Experimento 1



Figura 3: **Feixe de elétrons.** (Mendes da Silva *et alii*).

No primeiro experimento os estudantes tiveram a oportunidade de visualizar a luminosidade que permite a identificação da trajetória dos elétrons. Neste experimento, propositalmente, as

bobinas permaneceram desligadas, ou seja, não formavam campo magnético. Sendo assim, o feixe permaneceu em linha reta, sem sofrer nenhum tipo de desvio, como na figura 3.

## 5 Experimento 2

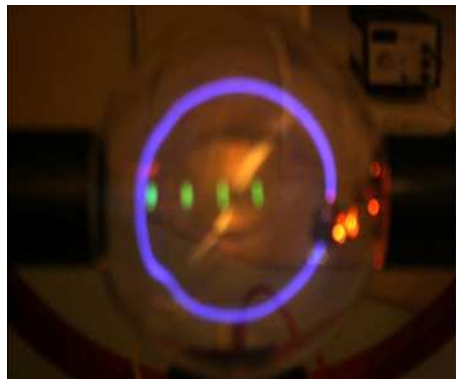


Figura 4: **Feixe de elétrons.** (Mendes da Silva *et al.*). O feixe forma um círculo, com velocidade perpendicular ao campo magnético.

A fonte de corrente contínua é ligada e a corrente elétrica que percorre o fio condutor gera um campo magnético que faz com que o feixe de elétrons sofra um desvio. O desvio é devido à força magnética que age sobre ele; o feixe e a força magnética formam entre si um ângulo de  $90^\circ$ . Quanto maior a corrente das bobinas, maior o campo magnético e maior o desvio de feixe; isso é constatado pelos alunos, na leitura do amperímetro. Os alunos podem, assim, constatar que o desvio sofrido pelo feixe de elétrons é devido à ação do campo magnético. Em seguida, desligou-se a fonte de corrente contínua e um dos alunos aproximou do feixe um ímã; a turma pode então observar que o ímã age como uma bobina. Os alunos, assim, constataam que o ímã também possui um campo magnético.

## 6 Experimento 3



Figura 5: **Feixe de elétrons.** (Mendes da Silva *et alii*). O feixe forma uma hélice pela modificação do ângulo.



Em um terceiro experimento a turma analisa a relação entre o ângulo formado pelo campo magnético e o feixe.

O ângulo é modificado, formando uma hélice, como mostrado na figura 5. Com isso, os alunos observam a relação entre o ângulo e a força exercida no feixe.

## 7 Experimento 4

No quarto experimento, os alunos medem a razão  $\frac{\text{carga}}{\text{massa}}$  em um experimento bem simples. Para entender o que vai ser medido, alguns cálculos são necessários. Se o feixe for circular (campo perpendicular ao plano do feixe), tem-se:

força centrípeta = força magnética

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad (6)$$

Por outro lado, a energia da partícula é dada por:

energia potencial elétrica = energia cinética

$$qU = \frac{mv^2}{2} \quad (7)$$

Resolvendo (6) para  $v$  e substituindo em (7), acha-se:

$$\frac{q}{m} = \frac{2}{r^2} \frac{U}{B^2} \quad (8)$$

É possível modificar essa fórmula para colocá-la em termos de parâmetros manuseáveis no laboratório.

O campo  $B$  é dado independentemente em função da corrente  $i$  pelo arranjo de Helmholtz de duas bobinas de raio  $R$  com  $n$  espiras; sendo  $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$  a permissividade do vácuo:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \mu_0 \frac{n}{R} \times i; \quad (9)$$

$n = 154$  e  $R = 0,02 \text{ m}$  são fornecidos pelo fabricante e são constantes, de modo que:

$$B = \Lambda \times i \quad (10)$$

onde a constante  $\Lambda$  é:

$$\Lambda = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \times 1,257 \times 10^{-6} \times \frac{154}{0,02}$$

Substituindo (10) em (8):

$$U = \left(\frac{q}{m}\right) r^2 \frac{\Lambda^2}{2} \times i^2 \quad (11)$$

Portanto, para valores fixos de  $\frac{q}{m}$  e  $r$ , o gráfico  $i^2 \times U$  é uma reta, onde a tangente do ângulo entre a reta e a abscissa  $i^2$  é  $\left(\frac{q}{m}\right) r^2 \frac{\Lambda^2}{2}$ ; então:

$$\frac{q}{m} = \left( \frac{2}{\Lambda^2 r^2} \right) \times \frac{U}{i^2} \quad (12)$$

O experimento consiste em variar a tensão e a corrente, de modo a trazer o feixe circular para um raio pré fixado. Os valores obtidos pelos alunos estão na tabela 1:

Tabela 1: Dados obtidos para  $r = 0,03$  m

#	tensão (V)	corrente (A)	corrente ao quadrado(A <sup>2</sup> )
1	150	1,71	2,92
2	165	1,81	3,28
3	180	1,91	3,65
4	195	2,00	4,00
5	210	2,14	4,58
6	225	2,17	4,71
7	240	2,32	5,38

As incertezas associadas às medidas são  $0,1$  V para a tensão e  $0,01$  A para a corrente. Para determinar a incerteza da corrente ao quadrado, foi usada a propagação de erros  $2i\delta i$ ; os valores variam entre  $0,02$  A<sup>2</sup> e  $0,05$  A<sup>2</sup>.

Esses valores são ajustados em uma reta:

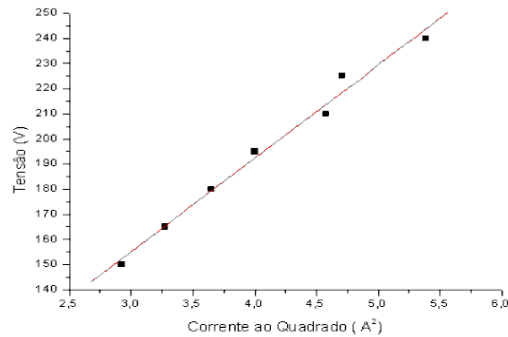


Figura 6: **Gráfico tensão versus corrente ao quadrado.** (Mendes da Silva *et alii*).

Do gráfico:

$$\frac{U}{i^2} = 37,11 \pm 0,6 \frac{V}{A^2};$$

portanto, de (12),

$$\frac{q}{m} = 1,727 \times 10^{11} \frac{C}{kg};$$

a discrepância percentual em relação ao valor teórico,  $1,759 \times 10^{11}$ , é de  $1,8\%$ .

## Referências

- [1] Assis, André Koch Torres (2011), *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, Editora Livraria da Física.
- [2] Boss, Sérgio Luiz Bragatto Boss; Caluzi, João José (2007), “Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **29**, p.635-644.
- [3] Cindra, José Lourenço; Teixeira, Odete P. Baierl (2005), “A evolução das idéias relacionadas aos fenômenos térmicos e elétricos: algumas similaridades”, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, **22**, p.379-399.
- [4] Du Fay, Charles François de Cisternay (1733), “A letter from Mons. Du Fay . . . to his Grace Charles Duke of Richmond and Lenox”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **38**, p.258-266.
- [5] Hankins, Thomas L. (1985), *Science and the Enlightenment*, Cambridge University Press.
- [6] Mendes da Silva, Luiz Cezar; Santos, Wilma Machado Soares; Cardozo Dias, Penha Maria (2011), “A Carga Específica do Elétron (Um Enfoque Histórico e Experimental)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **33**, art.1601.
- [7] Weinberg, Steven (1983), *The Discovered of Subatomic Particles*, Scientific American Library.
- [8] Whittaker, Edmund (1951), *A History of the Theories of Æther and Electricity*, 2 vols., The Philosophical Library; v.1.