Estimativa do Valor da Carga Elétrica de Gotículas de Óleo

Ação de um campo elétrico sobre gotículas de óleo eletrizadas num fluido não condutor. (Experiência de Millikan)

1 OBJECTIVO DO TRABALHO

Pretende-se com este trabalho determinar a carga elétrica de pequenas gotas de óleo, tendo como objectivo final mostrar que a carga elétrica não aparece com uma quantidade qualquer, mas sempre como um múltiplo de uma unidade fundamental que é a carga do protão ou do eletrão. Deste modo um corpo eletrizado apresenta um excesso de carga de sinal positivo ou negativo, mas sempre de valor múltiplo da carga elementar $q_{ele} = 1.602176565(35) \cdot 10^{-19}\,C$. Traduz-se este facto dizendo-se que a carga elétrica se *quantifica*.

Dentro das várias experiências elaboradas para mostrar este facto, uma montagem clássica é a do físico americano Robert A. Millikan[1] (1869-1953), também chamada experiência da gota de óleo.

2 INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1 Corpo esférico em queda livre num fluido

Um corpo de dimensões muito pequenas[2] ao mover-se com uma velocidade relativamente baixa através de um fluido (líquido ou gás), fica sujeito a uma força de atrito aproximadamente proporcional à sua velocidade, modelada pela expressão:

$$\vec{F}_{at} = -k\,\eta\vec{v} \tag{1}$$

em que η é o coeficiente de viscosidade do fluido, $\vec{v}$ é a velocidade do corpo e k é um coeficiente que depende da forma do corpo que no caso de o corpo ser uma esfera de raio R que toma o valor (lei de Stokes):

$$k = 6\pi\,R \tag{2}$$

O coeficiente k virá assim expresso em *metro* no Sistema Internacional (SI) e o coeficiente de viscosidade em $Pa \cdot s$ (ou $N \cdot s/m^2$). Normalmente a unidade de viscosidade que aparece

[1] Millikan recebeu o prémio Nobel da Física em 1923 pelos seus trabalhos sobre a determinação da carga do eletrão e efeito fotoelétrico

[2] Com Número de Reynolds $Re = \frac{\rho v L}{\eta}$ inferior a $\simeq 100$

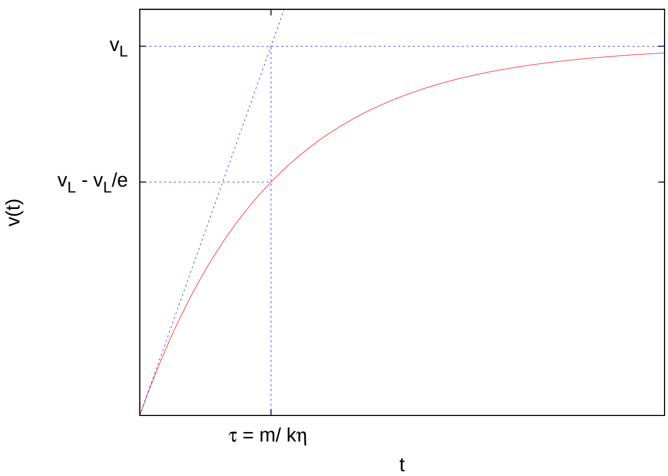

Figura 1: Evolução da velocidade de um corpo em queda livre sujeito a uma força de atrito.

na literatura é a unidade do sistema C.G.S. ($g/cm\, s$) que é designada por Poise (abreviatura P), verificando-se então a equivalência:

$$1\, P = 0.1\, Pa \cdot s$$

Quando um corpo de massa m, cai em queda livre sob a ação do seu peso ($\vec{P} = m\vec{g}$) através de um fluido, o seu movimento de queda será travado pela força de atrito e a equação do movimento escreve-se:

$$m\, a \equiv m\, \frac{\mathrm{d}\, v}{\mathrm{d}\, t} = m\, g - k\, \eta\, v \tag{3}$$

Sendo o peso do corpo constante, a aceleração a produz um aumento em $v(t)$ e por consequência, um aumento na força de atrito. Para uma determinada velocidade limite v_L, o segundo membro de (3) anula-se e o corpo passará a deslocar-se com movimento uniforme. A velocidade limite v_L, será então obtida fazendo na equação (3), $a = 0$:

$$v_L = \frac{m\, g}{k\, \eta} \tag{4}$$

o que poderá ser facilmente constatado pela resolução da equação (3), pois a sua solução é da forma:

$$v(t) = \frac{m\, g}{k\, \eta}(1 - e^{-(k\, \eta/m)t}) \tag{5}$$

à qual corresponde o gráfico da Fig 1.

e quando $t \to \infty$: $v(t) \to v_L = \frac{m\, g}{k\, \eta}$

Se pretendermos ser mais rigorosos devemos substituir em (4) o peso do corpo pelo seu "peso aparente" no fluido. Isto é, quando um corpo cai em queda livre através de um fluido, sofre além da ação da força de atrito outra força de baixo para cima devida ao princípio de Arquimedes, de módulo igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo. Então o peso real do corpo deverá ser substituído pelo seu "peso aparente" e as equações (3) e (4) deverão ser modificadas para:

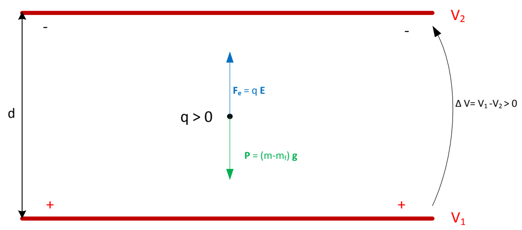

Figura 2: Equilíbrio de forças elétrica e gravítica numa gôta sujeita a campos gravítico e elétrico.

$$m\,a = m\,g - m_f\,g - k\,\eta\,v \tag{6}$$

$$v_L = \frac{(m - m_f)\,g}{k\,\eta} \tag{7}$$

Sendo m_f a massa do fluido deslocado.

No caso de um corpo esférico de raio R, introduzindo a equação (2) em (7) e atendendo a que:

$$m = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \quad \text{e} \quad m_f = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_f$$

Obtemos:

$$v_L = \frac{2\,R^2\,(\rho - \rho_f)\,g}{9\,\eta} \tag{8}$$

em que ρ e ρ_f são as massas específicas do corpo e do fluido.

2.2 Equilíbrio dum corpo carregado eletricamente, imerso num fluido através de um campo eletrico vertical.

Seja o esquema representado na figura 2, em que entre duas placas condutoras paralelas se encontra um fluido não condutor. Aplica-se uma diferença de potencial $U = V_1 - V_1 > 0$ com a polaridade indicada na figura. Esta diferença de potencial criará um campo elétrico ascendente. No caso de entre as duas placas se encontrar uma partícula de massa, m, e de carga, q, positiva[3] esta ficará sujeita a uma força elétrica que contrariará a sua queda.

No caso de entre as placas se poder considerar o campo elétrico, $\vec{E}$, como uniforme, o seu módulo será dado por:

$$E = \frac{U}{d}$$

sendo d a distância entre as placas. O módulo da força elétrica que atua a partícula será então dado por:

[3] No caso da partícula estar carregada negativamente obteríamos o mesmo resultado invertendo o sentido do campo elétrico.

$$F = |q|\frac{U}{d}$$

Deste modo a queda da partícula será agora contrariada, pela força de atrito e pela força elétrica. A equação (6) passa a escrever-se:

$$m\,a = (m - m_f)\,g - q\frac{U}{d} - k\,\eta_{ar}\,v \tag{9}$$

Variando a diferença de potencial (ddp), U, pode-se estabelecer o equilíbrio entre o peso da partícula e a força elétrica, conseguindo-se a sua paragem entre as placas. Nesse caso será $a = 0$ e $v = 0$ e tem-se:

$$0 = (m - m_f)\,g - q\frac{U}{d} \tag{10}$$

Substituindo em (10) $(m - m_f)\,g$ pela equação (7) obtemos:

$$v_L\,k\,\eta_{ar} = q\frac{U}{d}$$

E entrando também com (2) no caso de a partícula ser esférica, obtemos:

$$q = \frac{6\pi\,R\,\eta_{ar}\,d\,v_L}{U} \tag{11}$$

Onde

- v_L, a velocidade limite de queda da partícula através do fluido, na ausência do campo elétrico.
- $\eta_{ar} = 18.52 \cdot 10^{-5} P = 18.52 \cdot 10^{-6}\ Pa \cdot s$ (Viscosidade do ar a 23ºC).
- $\rho = 973\,kg/m^3$ (Massa específica do óleo de silicone).
- $\rho_f = 1\,kg/m^3$ (Massa específica do ar).
- $g = 9.800\,m/s^2$ (Aceleração gravítica em Lisboa).
- $d = 5.0\,mm$ (Distância entre placas).

2.3 Correções.

2.3.1 Temperatura Ambiente.

O valor da densidade da viscosidade do ar, no caso da temperatura ambiente se afastar muito de 23 ºC, terá de ser corrigido[4]

2.3.2 Dimensão das gotas.

A Lei de Stokes não é exata quando as dimensões dos corpos esféricos forem comparáveis às distâncias entre as moléculas do fluido (ar), pois este não pode ser considerado um fluido *incompressível*. Nestas condições Millikan verificou que a viscosidade η_{ar} deveria ser substituída por

[4] Utilize por exemplo a calculadora *online*: http://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.htm

$$\eta'_{ar} = \frac{\eta_{ar}}{1 + b/(p\,R)} \tag{12}$$

em que a constante $b = 7.88 \cdot 10^{-3} Pa \ \cdot \ m$, p é pressão atmosférica expressa em Pa e R é o raio da gota em m.

O valor corrigido q_c pode ser determinado afetando o valor experimental q por

$$q' = q \left(\frac{\eta'_{ar}}{\eta_{ar}}\right)^{3/2} = q \left(\frac{1}{1 + b/(p\,R)}\right)^{3/2} \tag{13}$$

3 Procedimento Experimental

3.1 Material utilizado

1. Célula de Millikan com gerador de alta tensão (DC) regulável (potenciómetro)
2. Atomizador e óleo de silicone
3. Multímetro, Cronómetro
4. Nível de bolha de ar. Parafuso para calibração do retículo do microscópio

4 Procedimento experimental

1. Depois de verificar que a célula está horizontal e colocando o potenciómetro que controla a alimentação das placas do condensador no valor mínimo de tensão elétrica, focalize o microscópio. Observe se o orifício que as gotículas atravessam está desobstruído.
2. Verifique se o interruptor de inversão da alimentação do condensador está na posição "Neutra". Rode o potenciómetro para uma posição que permita, quando ligar o interruptor de inversão, estabelecer um campo elétrico entre as placas do condensador.
3. Utilizando o pulverizador junto do orifício da célula produza uma pequena "nuvem" de gotículas de óleo. Observe através do microscópio o movimento das gotículas em frente do retículo (Note que a imagem encontra-se verticalmente invertida).
4. Ligando o interruptor de inversão e variando a intensidade do campo elétrico aplicado ao condensador por meio do potenciómetro e/ou o seu sentido. Verifique se as gotículas estão eletrizadas. Escolha uma das gotas e tente pará-la.
5. Obrigue a gota a colocar-se numa determinada divisão do retículo, imobilizando-a. Leia o valor da diferença de potencial que permitiu essa imobilização. Anule o campo elétrico aplicado e verá a gota movimentar-se (com velocidade limite). Com a ajuda de um colega e um cronómetro meça o tempo necessário para que a gota percorra $N > 4$ divisões do retículo. Repita pelo menos duas vezes. Repita este processo para várias gotas (pelo menos cinco), tentando selecionar as gotas de menor carga.
6. Calcule a velocidade limite média de cada gota e respetiva incerteza. Estime o raio e a carga de cada gota e correspondentes incertezas. Verifique se se pode considerar que a gotícula se move com a velocidade limite.
7. Calcule a carga de cada gota. Apenas para a gota de menor raio, calcule a carga corrigida
8. Compare os valores das cargas média das gotas de menor carga e a sua incerteza com o valor tabelado da carga do eletrão. Discuta os resultados.