

# Carga Elementar

Felipe Fontinele; 150009321, Ranier Menote; 150020864, and Vítor Dantas; 150023405  
*IF-UnB/Laboratório de Física Moderna*  
(Dated: 17/03/2018)

Este trabalho apresenta resultados sobre a medição das cargas elétricas de gotículas de óleo através da aplicação de um campo elétrico externo. Nota-se que as cargas das gotículas assumem valores proporcionais ao que se conhece como carga elementar, que é associado como sendo a carga de um elétron.

## INTRODUÇÃO

A eletrização de um corpo pode ocorrer por uma série de motivos, como atrito com outro corpo, ser iluminada por radiação eletromagnética ou até mesmo aplicação de um campo eletromagnético externo. Seja qual for a maneira adotada para se eletrizar um corpo, o princípio é o mesmo, deve-se retirar ou doar elétrons ao corpo. Dessa maneira, ele deixar de ser neutro e apresenta uma carga total resultante. A ideia é que, como a eletrização é basicamente um processo resultante da troca de elétrons entre dois sistemas, a carga final deve ser proporcional a quantidade de elétrons ganhos ou perdidos pelo processo.

Pensando em medir a carga elétrica, precisamos de um grande número de partículas carregadas. A partir desse espaço amostral, podemos deduzir a carga elementar capaz de formar todas as cargas observadas. Apesar de parecer uma ideia simples, quanto maior o valor das cargas observadas mais complicado é determinar a carga elementar. Por isso, é interessante que seja analisado um sistema de partículas carregadas com poucos elétrons, na prática isso significa que podemos pensar a respeito de partículas microscópicas.

O experimento tem como objetivo encontrar as cargas dessas partículas carregadas e depois fazer uma análise da distribuição de cargas medidas.

A carga elétrica de um corpo pode ser medida por meio da observação de como ele se comporta na presença de um campo elétrico. Uma partícula carregada com carga  $q$  numa região de campo elétrico sofre uma força:

$$F_e = qE \quad (1)$$

Pensando nisso, imagina-se as partículas microscópicas sujeitas a ação de um campo elétrico. Além da força elétrica, elas serão influenciadas pela força da gravidade, da resistência e do empuxo do ar.

podemos escrever essas forças como:

$$\vec{F}_p = \frac{4\pi r^3 \rho_p \vec{g}}{3} \quad (2)$$

Força peso de uma partícula com raio médio  $r$  e densidade  $\rho_p$ .

$$\vec{F}_E = -\frac{4\pi r^3 \rho_{ar} \vec{g}}{3} \quad (3)$$

Força de empuxo que atua sobre uma partícula submersa em um fluido, no caso o ar, com raio médio  $r$ , e a densidade do ar  $\rho_{ar}$

$$\vec{F}_r = -6\pi r \eta v \quad (4)$$

Força de resistência do ar (Lei de Stokes).  $\eta$  é o coeficiente de resistência do ar e  $v$  a velocidade da partícula.

Vemos que a única força que não é constante é a força de viscosidade. Mas como é uma força contrária ao movimento, e que depende da velocidade, a partícula deve ser acelerada até que a força de viscosidade seja igual a soma de todas as outras forças, e apartir desse ponto, a partícula segue trajetória com velocidade constante, que chamamos de velocidade terminal.

A partículas são sujeitas a dois tipos de situações. Inicialmente uma partícula é solta, entre as placas de um capacitor com campo elétrico constante no sentido contrário ao da gravidade, ou seja, para cima. Sob essas condições, escrevemos a equação de movimento da partícula que está subindo:

$$F = qE - \frac{4\pi r^3 (\rho_p - \rho_{ar})}{3} g - 6\pi r \eta v \quad (5)$$

Quando é atingido o equilíbrio, temos:

$$qE - \frac{4\pi r^3 (\rho_p - \rho_{ar})}{3} g = 6\pi r \eta v_s \quad (6)$$

Após inverter o sentido do campo elétrico, obtemos uma equação semelhante para a descida:

$$qE + \frac{4\pi r^3 (\rho_p - \rho_{ar})}{3} g = 6\pi r \eta v_d \quad (7)$$

E assim temos as velocidades de subida e descida:

$$V_s = \frac{1}{6\pi r \eta} \left( qE - \frac{4\pi r^3 (\rho_p - \rho_{ar})}{3} g \right) \quad (7)$$

$$V_d = \frac{1}{6\pi r \eta} \left( qE + \frac{4\pi r^3 (\rho_p - \rho_{ar})}{3} g \right) \quad (8)$$

Como se trata de um campo elétrico no interior de um capacitor, podemos escrevê-lo como  $E = \frac{U}{D}$ , onde  $D$  é a distância entre as placas do capacitor.

Então, podemos resolver o sistema para encontrar a carga em função das velocidades, as quais podem ser medidas:

$$q = \frac{9\pi D}{2} \sqrt{\frac{\eta^3}{g(\rho_p - \rho_{ar})}} \frac{(v_s + v_d)}{U} \sqrt{v_d - v_s} \quad (9)$$

Podemos determinar os raios dessas partículas:

$$r = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta}{g(\rho_p - \rho_{ar})}} \sqrt{v_d - v_s} \quad (10)$$

Como sabemos que:

$$\begin{aligned} d &= 2,5\text{mm} \\ \rho_p &= 1,03 \times 10^3 \text{Kg/m}^3 \\ \eta &= 1,82 \times 10^{-5} \text{Kg/m.s} \\ g &= 9,81\text{m/s}^2 \\ \rho_{ar} &= 1,293\text{Kg/m}^3 \end{aligned} \quad (11)$$

Podemos finalmente escrever:

$$q = 2,37 \times 10^{-11} \left( \frac{(v_s + v_d)}{U} \sqrt{v_d - v_s} \right) \quad (12)$$

$$r = 6,37 \times 10^{-5} (\sqrt{v_d - v_s}) \quad (13)$$

Estas equações são extremamente úteis, visto que as únicas quantidades a serem medidas no experimento serão as velocidades de subida e descida, em tensões diferentes.

## MATERIAIS

- Base tripé
- Tubo
- Nível Circular
- Cronômetro Digital
- Chave Comutadora
- Cabos de Conexão (32 A)
- Aparatos de Millikan
- Fonte de Alimentação
- FlexCam Básica
- Micrômetro de estágios (100div = 1mm)
- Notebook
- Software TVG

## METODOLOGIA

O experimento consiste em liberar gotículas de óleo carregadas entre as placas de um capacitor, fazendo com que elas sejam submetidas à ação da gravidade e do campo elétrico entre as placas do capacitor, e assim aceleradas com a aplicação de uma tensão. Para calcular a carga, e o raio, de cada gota foi necessário obter as velocidades das mesmas (eq.12) Para isso observamos as trajetórias (de subida e descida) assim como o tempo necessário para realizar tais trajetórias.

A montagem do aparato experimental é mostrada na figura 1. Primeiramente ligamos o aparato de millikan à fonte de alimentação, que fornece as tensões necessárias para a realização do experimento. Após isso ligamos a fonte de tensão fixa (300V) em série à de tensão variável (0 a 300V), permitindo que a tensão seja escolhida entre 300V a 600 V. Conectamos assim a chave comutadora, que permite inverter a polaridade do capacitor. Por fim conectamos um multímetro à fonte, para monitorar com mais precisão a voltagem fornecida durante o experimento.

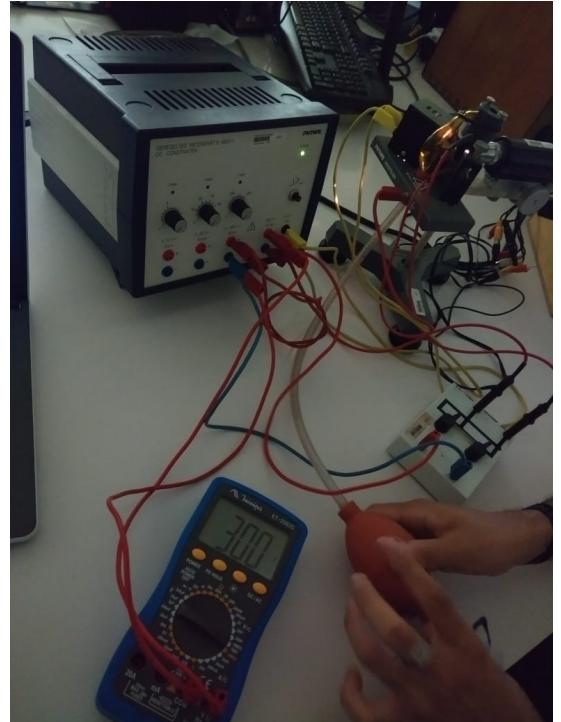


Figura 1. Aparato experimental

As gotículas de óleo eram liberadas a partir de um soprador manual acoplado ao aparato e eram visualizadas entre as placas do capacitor por uma câmera posicionada junto ao micrômetro ocular, que era ligada a um notebook. A cada medida realizada era gravado um vídeo, no software TVG, da gotícula se deslocando entre as divisórias do micrômetro ocular (entre as placas do capacitor), como

podemos ver na figura abaixo:

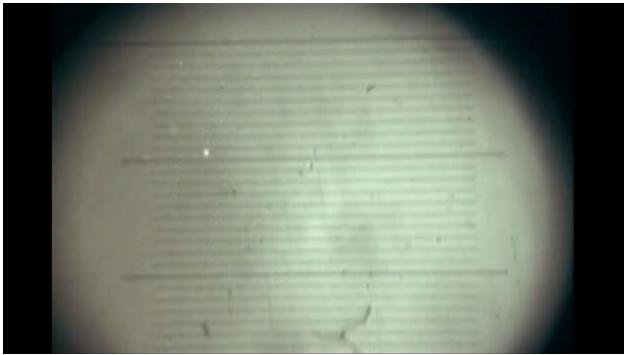


Figura 2. Gotícula de óleo se deslocando

Para identificar qual gotícula iria ser observada, mudávamos a chave do comutador, que inverte a polarização do campo entre as placas, e consequentemente inverte a direção de propagação das gotículas carregadas. Assim escolhíamos uma das gotículas carregadas para a coleta de dados.

Para que as medidas de deslocamento da gotícula fossem boas o suficiente para a análise posterior, foi preciso considerar deslocamentos maiores que o número de divisões vistas na tela, que eram aproximadamente 30 divisórias. Assim, era escolhida uma gotícula cargada e era observada a trajetória desta até atingir 20 divisórias, momento em que se inverte a polarização do capacitor, fazendo com que a partícula faça a trajetória inversa, até atingir 20 div, onde invertemos a polarização novamente. Este processo de subida e descida é repetido até o somatório das subidas e das descidas atingirem aproximadamente 100 div, cada. Assim, analisando os vídeos posteriormente, somamos também os tempos totais de subida e descida, respectivamente, para se obter as velocidades.

Durante o processo de inversão da direção do campo foi tomado cuidado para sempre manter a gotícula em vista, mudando o foco da câmera continuamente durante a trajetória da partícula. Além disso foram tomados alguns critérios para a escolha da gotícula, como o fato de a partícula não poder se mover muito rápido (30div em 1 seg), pois queremos uma com pouca carga, e também não escolhemos partículas com movimentos muito enviesados.

## DADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS

Analizando os vídeos captados de várias gotículas de óleo para tensões diferentes, medimos as distâncias percorridas e seus respectivos tempos. Assim, obtivemos as velocidades de subida e descida de cada uma delas, como descrito na Metodologia. Utilizando as equações (12) e

(13), calculamos suas respectivas cargas e raios, que seguem na figura (4).

Com os resultados obtidos para as cargas, observamos que elas estão na ordem de grandeza esperada para a carga elementar. Para uma análise mais detalhada da hipótese da quantização da carga, plotamos o gráfico da distribuição de carga em função do raio da gotícula de óleo, e comparamos com o esperado para uma carga elementar de  $q = 1.6 \times 10^{-19} C$  (figura 3).

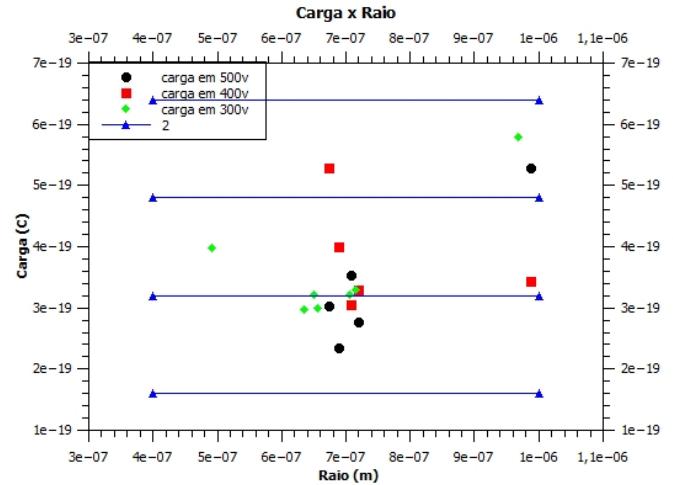


Figura 3. Distribuição das gotículas analisadas no plano Raio (m) X Carga (C). As linhas azuis representam o resultado esperado para a hipótese da quantização da carga, com  $e = 1.6 \times 10^{-19}$ .

Na imagem, observamos que a maior parte dos pontos coletados se concentram em torno do que esperaríamos para 2 cargas elementares, com aproximadamente o mesmo raio de gotícula. Obtivemos alguns pontos correspondentes a outros múltiplos da carga elementar, mas nenhum referente a uma única carga. Isso provavelmente se deve ao fato de que as melhores gotículas para a observação no aparato, ou seja, as que tinham velocidades razoáveis para a observação, apresentam essas propriedades.

**300 Volts**

	Desl. Subida (m)	Tempo Sub. (s)	Desl. Descida (m)	Tempo Desc. (s)	Vel. Sub. (m/s)	Vel. Desc. (m/s)	Carga (C)	Raio (m)
1	0,0029674	24	0,0023736	11	0,000123625	0,000215781	2,964986462e-19	6,114e-07
2	0,0041538	13	0,0047769	12	0,000319523	0,000398072	5,787501653e-19	5,645e-07
3	0,0023439	26	0,0024626	11	9,015e-05	0,000223874	3,304524021e-19	7,656e-07
4	0,0023143	15	0,0023736	9	0,000154284	0,000263733	3,979516515e-19	6,654e-07
5	0,0029077	18,3	0,0029077	12,2	0,000158888	0,000238333	3,21861576e-19	5,677e-07
6	0,0029373	34,3	0,0029373	14	8,563e-05	0,000206809	2,995941273e-19	7,098e-07
7	0,0029077	23,6	0,0028186	12,5	0,000122306	0,000225492	3,209215982e-19	6,442e-07

**400 Volts**

	Desl. Subida (m)	Tempo Sub. (s)	Desl. Descida (m)	Tempo Desc. (s)	Vel. Sub. (m/s)	Vel. Desc. (m/s)	Carga (C)	Raio (m)
1	0,0029672	17	0,0035604	13	0,000174529	0,000273876	3,05035567e-19	6,349e-07
2	0,0023736	17	0,0029674	8	0,000139623	0,000370875	5,29833544e-19	9,687e-07
3	0,0035604	18	0,0035604	11	0,000197827	0,000323672	3,99297046e-19	7,146e-07
4	0,0035604	12	0,0035604	10	0,000296723	0,000356042	3,431281212e-19	4,906e-07
5	0,0038013	19	0,004351	14	0,000184266	0,000288222	3,28799711e-19	6,495e-07
6	0,0023736	16	0,0017802	7	0,000148354	0,000254314	2,8389054e-19	6,557e-07
7	0,0041241	24	0,0041241	14	0,000171838	0,000294581	3,52677096e-19	7,057e-07

**500 Volts**

	Desl. Subida (m)	Tempo Sub. (s)	Desl. Descida (m)	Tempo Desc. (s)	Vel. Sub. (m/s)	Vel. Desc. (m/s)	Carga (C)	Raio (m)
1	0,0029373	12,8	0,0035307	10	0,000229474	0,000353073	3,536153356e-19	7,082e-07
2	0,0029674	14,3	0,0029674	9,3	0,000207482	0,000319032	3,036248702e-19	6,729e-07
3	0,0023736	16,8	0,0023736	9,2	0,000141286	0,000258457	2,362563987e-19	6,895e-07
4	0,0041385	21,6	0,0041538	9,6	0,000192355	0,000452687	5,9063391e-19	9,875e-07
5	0,00296723	18,5	0,0029676	10,3	0,000160378	0,000288058	2,766655202e-19	7,198e-07

Figura 4. Tabela com todos os dados coletados para cada uma das gotículas analisadas, para as diferentes tensões.

## CONCLUSÃO

Como discutido durante o trabalho, o experimento possui uma série de dificuldades práticas por trabalhar com

um sistema tão sensível a qualquer tipo de perturbação. Algumas medidas foram realizadas com sucesso, precisas o suficiente para se calcular algumas propriedades das partículas como raio e carga. Porém, com a distribuição de partículas obtida não foi possível verificar com clareza a quantização da carga elétrica.

## BIBLIOGRAFIA

- <http://dfis.ufes.br/caderno/vol9n12/MacetiMillikan.pdf>
- <https://pt.wikipedia.org/wiki/Experi3AAncia-da-gota-de-C3B3leo>
- <https://www.britannica.com/science/Millikan-oil-drop-experiment>
- <http://www.physics.utah.edu/belz/phys3719/presentations/millikan.pdf>