# Sumário

**1 Introdução** **3**

**2 Equação para calcular a carga em uma gota** **4**

**3 Método alternativo para calcular a carga em uma queda** **7**

**4 Equipamentos** **8**

**5 Diagrama de Peças** **10**

**6 Componentes da Plataforma** **11**

**7 Componentes da Câmara de Visualização de Gotas** **11**

**8 Configuração do equipamento** **13**
8.1 Ajustando o ambiente da sala de experimentos . . . . . 13
8.2 Ajustar a altura da plataforma e nivelá-la . . . . . 13
8.3 Separação da placa de medição . . . . . 14

**9 Alinhando o sistema óptico** **15**
9.1 Focando o escopo de visualização . . . . . 15

**10 Funções dos controles** **16**
10.1 Alavanca da fonte de ionização . . . . . 16
10.2 Interruptor de carregamento da placa . . . . . 17

**11 Ajustando e Medindo a Tensão** **18**

**12 Determinando a Temperatura da Câmara de Visualização de Gotas** **18**

**13 Procedimento experimental** **19**
13.1 Introduzir as gotículas na câmara . . . . . 19
13.2 Seleção da gota . . . . . 21
13.3 Coletando dados sobre a ascensão e queda da gota de óleo . . . . 22

**14 Cálculo da Carga de um Elétron** **23**
14.1 Procedimento sugerido para cálculo da carga de um elétron: . . . 24

**15 Usando um microscópio de projeção com o aparelho de gota de óleo Millikan** **24**
15.1 Procedimento . . . . . 24

**16 Informação histórica** **26**
16.1 Notas Históricas . . . . . 26
16.2 Determinações antecipadas de $e$ . . . . . 26
16.3 Determinação de Millikan de $e$ . . . . . 28
16.4 A Estimativa Exata de $e$ . . . . . 30
16.5 Natureza Atômica da Eletricidade . . . . . 32
16.6 Número de Avogadro . . . . . 33

**17 Notas de manutenção** **34**
17.1 Limpeza . . . . . 34
17.2 Ajustando o retículo vertical e visualizando os alinhamentos do escopo . . . . . 34
17.3 Ajustando o alinhamento do retículo horizontal . . . . . 35
17.4 Retocar a superfície pintada de preto no espaçador de plástico . 36

**18 Apêndice A: Viscosidade do Ar Seco em Função da Temperatura** **37**

**19 Apêndice B: Resistência do Termistor** **38**

**20 Guia do professor** **39**
20.1 Dados de amostra . . . . . 41

# 1 Introdução

O aparelho de gota de óleo Millikan da PASCO foi projetado para conduzir o experimento de gota de óleo Millikan, onde a carga elétrica transportada por uma partícula pode ser calculada medindo a força experimentada pela partícula em um campo elétrico de força conhecida. Embora seja relativamente fácil produzir um campo elétrico conhecido, a força exercida por tal campo sobre uma partícula carregando apenas um ou vários elétrons em excesso é muito pequena. Por exemplo, um campo de 1000 volts por centímetro ($10^5$ volts por metro) exerceria uma força de apenas $1,6 \cdot 10^{-9}$ dines ($1,6 \cdot 10^{-14}$ newtons) em uma partícula com um elétron em excesso. Esta é uma força comparável à força gravitacional em uma partícula com uma massa de $10^{-12}$ (um milhão de milionésimo) grama ($10^{-15}$ quilogramas).

O sucesso do experimento Millikan depende da capacidade de medir forças tão pequenas. O comportamento de pequenas gotas carregadas de óleo, com massas de apenas $10^{-12}$ gramas ($10^{-15}$ kg ) ou menos, é observado em um campo gravitacional e elétrico. A medição da velocidade de queda da gota no ar possibilita, com o uso da Lei de Stokes, o cálculo da massa da gota. A observação da velocidade da gota subindo em um campo elétrico permite então um cálculo da força sobre e, portanto, da carga transportada pela gota de óleo.

Embora este experimento permita medir a carga total de uma gota, é somente através da análise dos dados obtidos e de um certo grau de habilidade experimental que a carga de um único elétron pode ser determinada. Ao selecionar gotículas que sobem e descem lentamente, será certo que a gota tem um pequeno número de elétrons em excesso. Algumas dessas quedas devem ser observadas e seus respectivos encargos calculados. Se as cargas nessas gotas são múltiplos inteiros de uma certa carga menor, então esta é uma boa indicação da natureza atômica da eletricidade. No entanto, uma vez que uma gota diferente foi usada para medir cada carga, permanece a questão do efeito da própria gota na carga. Essa incerteza pode ser eliminada alterando a carga em uma única gota enquanto a gota está sob observação. Uma fonte de ionização colocada perto da gota fará isso. Na verdade, é possível alterar a carga na mesma gota várias vezes. Se os resultados das medições na mesma gota produzirem cargas que são múltiplos inteiros de alguma carga menor, então isso é uma prova da natureza atômica da eletricidade.

## 2 Equação para calcular a carga em uma gota

Uma análise das forças que atuam em uma gota de óleo fornecerá a equação para a determinação da carga transportada pela gota. A Figura 1 mostra as forças que atuam na gota quando ela está caindo no ar e atingiu sua velocidade terminal. (A velocidade terminal é alcançada em alguns milissegundos para as gotas usadas neste experimento.) Na Figura 1, $v_f$ é a velocidade de queda, $k$ é o coeficiente de atrito entre o ar e a gota, $m$ é a massa da gota, e $g$ é a aceleração da gravidade. Como a gota de óleo está em sua velocidade terminal, a força resultante é zero. Portanto, as forças são iguais e opostas:

**Figura 1:**

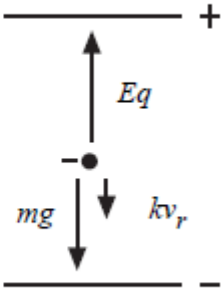



**Figura 2**

$$mg = kv_f \tag{1}$$

A Figura 2 mostra as forças que atuam na gota quando ela está subindo sob a influência de um campo elétrico. Na Figura 2, $E$ é a intensidade elétrica, $q$ é a carga transportada pela gota e $v_r$ é a velocidade de subida. Adicionando as forças vetorialmente, obtém-se:

$$qE = mg + kv_r \tag{2}$$

Em ambos os casos há também uma pequena força de empuxo exercida pelo ar sobre a gota. No entanto, como a densidade do ar é apenas cerca de um milésimo da do óleo, essa força pode ser desprezada

Eliminando $k$ das equações (1) e (2) e resolvendo para $q$ resulta:

$$q = \frac{mg(v_f + v_r)}{Ev_f} \tag{3}$$

onde $m$ é a massa e $g$ é a aceleração da gravidade.

Para eliminar m da equação (3), a expressão para o volume de uma esfera e a densidade do óleo são usadas:

$$mg = \frac{4}{3}\pi a^2 \rho g \tag{4}$$

onde $a$ é o raio da gota e $\rho$ é a densidade do óleo.

Substituindo a equação (4) na equação (3) resulta:

$$q = \frac{4\pi a^3 \rho g(v_f + v_r)}{3Ev_f} \tag{5}$$

Para calcular $a$, a fórmula da Lei de Stokes ($F_f = 6\pi\eta a v_f$) pode ser empregada. Esta expressão relaciona o raio $a$, de um corpo esférico à sua velocidade de queda $v_f$ em um meio viscoso (com o coeficiente de viscosidade, $\eta$). Igualando a fórmula da Lei de Stoke ao termo da direita na equação (4) e resolvendo para $a$ resulta o seguinte:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g}} \tag{6}$$

A Lei de Stokes, no entanto, torna-se incorreta quando a velocidade de queda das gotas é inferior a $0,1$ cm/s. (Gotas com essa velocidade e velocidades menores têm raios da ordem de 2 mícrons, comparáveis ao caminho livre médio das moléculas de ar, uma condição que viola uma das suposições feitas ao derivar a Lei de Stokes.) Uma vez que as velocidades das gotículas usadas neste experimento estará na faixa de $0,01$ a $0,001$ cm/s ($10^{-4}$ a $10^{-6}$ m/s), a viscosidade deve ser multiplicada por um fator de correção. A viscosidade efetiva resultante é:

$$\eta_{eff} = \eta \left[ \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right] \tag{7}$$

onde $b$ é uma constante, $p$ é a pressão atmosférica e $a$ é o raio da gota calculado pela forma não corrigida da Lei de Stokes, equação (6).

Substituindo $\eta_{eff}$ na equação (7) na equação (6) para $\eta$ dá:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g}\left(\frac{1}{1+\frac{b}{pa}}\right)} \tag{8}$$

Substituindo a equação (8) na equação (5) para $a$ resulta:

$$p = \frac{4}{3}\pi\rho g\left[\sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g}\left(\frac{1}{1+\frac{b}{pa}}\right)}\right]^3 \frac{(v_f+v_r)}{E_f} \tag{9}$$

A intensidade elétrica é dada por:

$$E = \frac{V}{d} \tag{10}$$

onde $V$ é a diferença de potencial entre as placas paralelas separadas pela distância $d$. Substituindo a equação (10) na equação (9) para $E$ e reorganizando os rendimentos:

$$q = \left[\frac{4}{3}\pi d\sqrt{\left(\frac{1}{\rho g}\left[\frac{9\eta}{2}\right]^3\right)}\right] \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1+\frac{b}{pa}}\right)^3}\right] \cdot \left[\frac{(v_f+v_r)\sqrt{v_f}}{V}\right] \tag{11}$$

Os termos no primeiro conjunto de colchetes precisam ser determinados apenas uma vez para qualquer aparelho específico. O segundo termo é determinado para cada gota, enquanto o termo no terceiro conjunto de colchetes é calculado para cada mudança de carga que a gota experimenta.

As definições dos símbolos utilizados, juntamente com suas unidades métricas (SI) são:

$q$ - carga transportada pela gota (coulombs)

$d$ - separação das placas na câmara de visualização de gotas (m)

$\rho$ – densidade do óleo (kg/m$^3$)

$g$ – aceleração da gravidade (m/s$^2$)

$\eta$ - viscosidade do ar (N $\cdot s/m^2$)

$b$ – constante, igual a $8,2 \cdot 10^{-3}$ Pa $\cdot m$

$p$ – pressão barométrica (pascal)

$a$ – raio da queda em metros conforme calculado pela equação (6)

$v_f$ – velocidade de queda (m/s)

$v_r$ - velocidade de subida (m/s)

$V$ - diferença de potencial entre as placas (volts)

Nota: O valor aceito para $e$ é $1,60 \cdot 10^{-19}$ coulombs

# 3 Método alternativo para calcular a carga em uma queda

A equação (11) contém o raio da gota, $a$, e o termo de correção para a viscosidade efetiva, $\eta_{eff}$ . Observe que o termo de correção também inclui o valor de $a$. No entanto, é possível calcular a carga em uma gota, $q$, usando um termo corrigido para a que não inclui o valor de $a$.

A expressão para a na equação (8) pode ser convertida em uma equação quadrática:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g}\left(\frac{1}{1+\frac{b}{pa}}\right)}$$

$$a^2 = \frac{9\eta v_f}{2\rho g}\left(\frac{1}{1+\frac{b}{pa}}\right)$$

$$a^2 + \frac{ab}{p} = \frac{9\eta v_f}{2\rho g}$$

$$a^2 + \frac{ab}{p} - \frac{9\eta v_f}{2\rho g} = 0$$

Resolvendo para $a$ produz:

$$a = \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p} \tag{12}$$

Observe que esta expressão para $a$, diferentemente da equação (8), não inclui $a$.

Substituindo a equação (12) na equação (5) resulta:

$$q = \frac{4\pi\left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p}\right]^3 \rho g(v_f + v_r)}{3(Ev_f)} \tag{13}$$

Substituindo $E$ pela equação (10) produz o seguinte:

$$q = \frac{4\pi}{3}\left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p}\right]^3 \frac{\rho g d(v_f + v_r)}{3(Ev_f)} \tag{14}$$

# 4 Equipamentos

| Equipamentos | Número da peça |
|---|---|
| Aparelho de gota de óleo Millikan | AP-8210A |
| Adaptador CA, 100 - 240 VCA a 12 VCC, 1,0 A | 540-092 |
| Atomizador | 699-093 |
| Óleo mineral não volátil*, 120 mL ( 4 onças) | |

| Equipamento Necessário | Número da peça |
|---|---|
| Fonte de alimentação, alta tensão, bem regulada, 500 VCC, 10 mA (mínimo) | SF-9585 |
| Multímetro digital para medir tensão e resistência | SB-9599A |
| Cabos de remendo de plugue banana (4) | SE-9750 ou SE-9751 |
| Cronômetro digital | ME-1234 |

| Equipamento recomendado | Número da peça |
|---|---|
| Suporte de haste grande | ME-8735 |
| Haste de Aço, 45 cm (2) | ME-8736 |
| Micrômetro (0 a 25 mm com resolução de 0,1 mm) | SE-7337 |
| Microscópio Ken-A-Vision VideoFlex (opcional) | SE-7227 |

- *O Óleo Mineral Squibb 5597 tem uma densidade medida de 886 kg/m3. No entanto, a densidade de diferentes lotes de óleos minerais pode variar um pouco. Portanto, para maior precisão, você deve determinar a densidade do óleo mineral que está usando. Recomenda-se armazenar o equipamento na embalagem original. Após desembalar, remova o inserto de espuma de dentro da câmara de visualização de gotículas. Guarde o interruptor de carregamento da placa nas abas de gancho e laço localizadas na parte superior da plataforma.

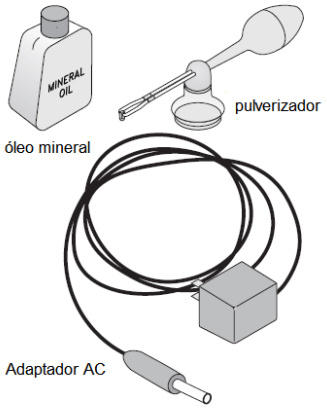


**figura 3: equipamento incluído**

# 5 Diagrama de Peças

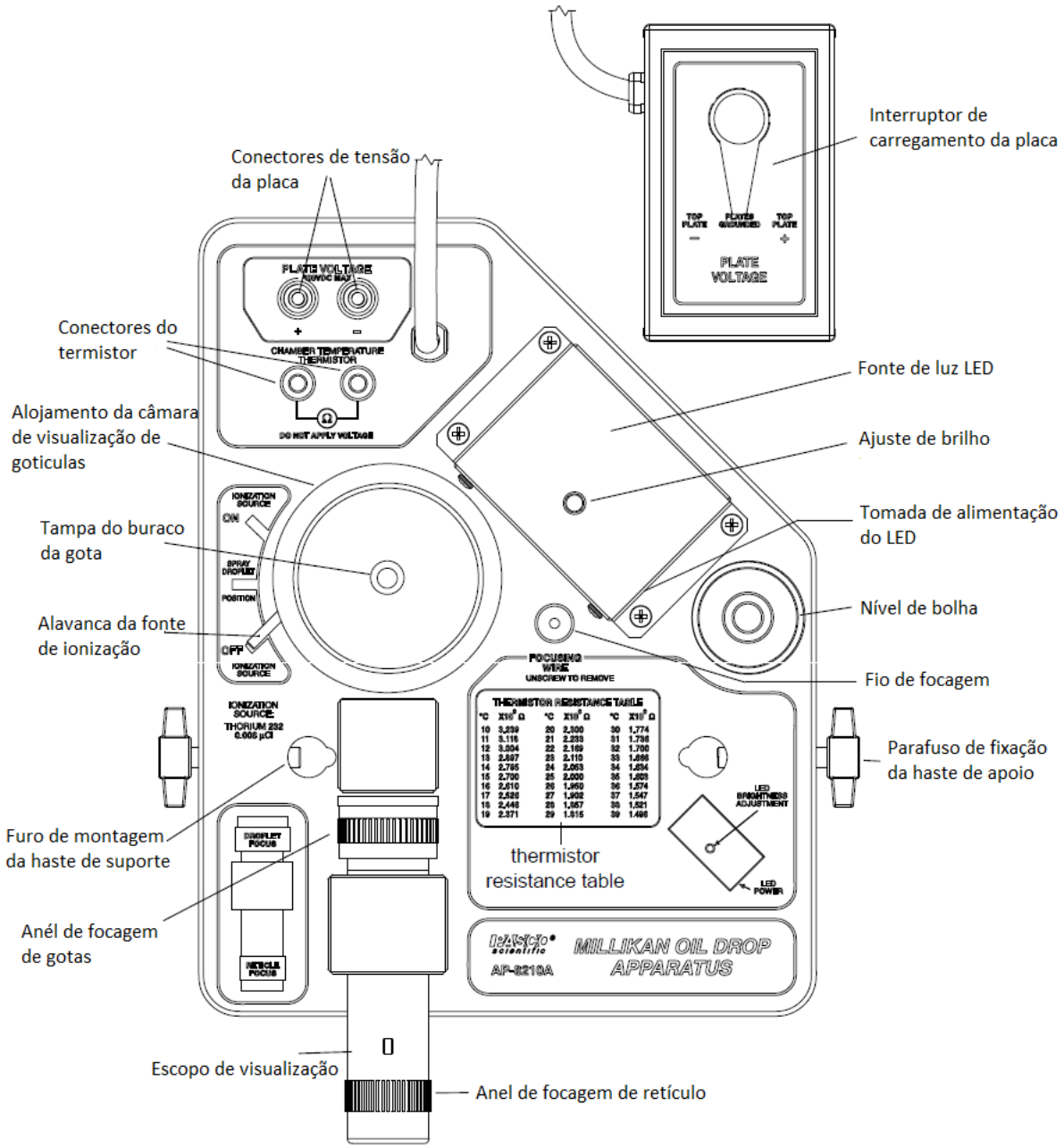



**Figura 4: plataforma de aparelhos**

# 6 Componentes da Plataforma

- Câmara de visualização de gotículas (veja detalhes na Figura 5) Escopo de visualização (30X, campo claro, imagem ereta) com retículo (separação de linha: divisões principais de 0,5 mm e divisões menores de 0,1 mm), anel de foco de retículo e anel de foco de gota
- Fonte de luz LED (diodo emissor de luz) com um botão de ajuste de brilho
- Fio de focagem (para ajustar o escopo de visualização)

  de tensão de placa, 4 mm de diâmetro
- conectores do termistor, 4 mm de diâmetro (o termistor é montado na placa do capacitor inferior na câmara de visualização de gotículas)

AVISO: Não aplique tensão aos conectores do termistor!

- Tabela de resistência do termistor (resistência versus temperatura)
- Alavanca da fonte de ionização com três posições: Ionização LIGADA, Ionização DESLIGADA e POSIÇÃO DE GOTA DE PULVERIZAÇÃO.
- Nível de bolha
- Furos de montagem da haste de suporte e parafusos de fixação para permitir a montagem da plataforma em hastes de suporte (para que a luneta de visualização possa ser elevada a um nível confortável dos olhos)
- Pés niveladores (3)
- Interruptor de carregamento de placa em um cabo de um metro (para evitar vibração da plataforma durante a atividade de comutação).

# 7 Componentes da Câmara de Visualização de Gotas

- tampa (tampa da câmara de plástico transparente)
- habitação
- lente convexa (não mostrada).

- tampa do orifício de gotículas
- placa do capacitor superior (latão)
- espaçador de plástico (aproximadamente 7,6 mm de espessura)
- placa do capacitor inferior (latão)
- fonte alfa, tório-232, 0,00185 microcuries
- conexão elétrica à placa do capacitor superior

Nota: Thorium-232 é um emissor de partículas alfa de baixo nível que ocorre naturalmente com uma meia-vida de $1,41 \cdot 10^{10}$ anos. Não é regulamentado em seu uso e não representa perigo para o usuário do Aparelho de Gota de Óleo PASCO Millikan.

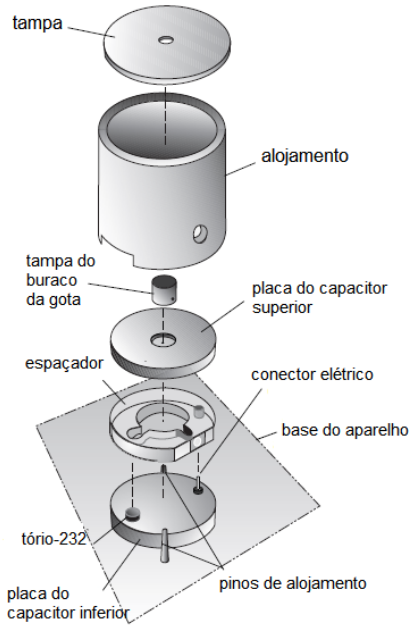



**figura 5: câmara de visualização de gotículas**

# 8 Configuração do equipamento

## 8.1 Ajustando o ambiente da sala de experimentos

1. Deixe a sala o mais escura possível, deixando luz adequada para ler o multímetro e o cronômetro e registrar os dados.

2. Certifique-se de que o fundo atrás do aparelho esteja escuro.

3. Selecione um local livre de correntes de ar e vibrações.

## 8.2 Ajustar a altura da plataforma e nivelá-la

1. Coloque o aparelho em uma mesa nivelada e sólida com o escopo de visualização a uma altura que permita ao experimentador sentar-se ereto enquanto observa as gotas através do escopo. Uma configuração possível é montar o aparelho em duas hastes de suporte (ME-8736) no suporte de haste grande (ME-8735). Consulte a Figura 6.

2. Usando o nível de bolha anexado como referência, nivele o aparelho com os parafusos de nivelamento no suporte da haste ou os pés de nivelamento no aparelho (dependendo da sua configuração).

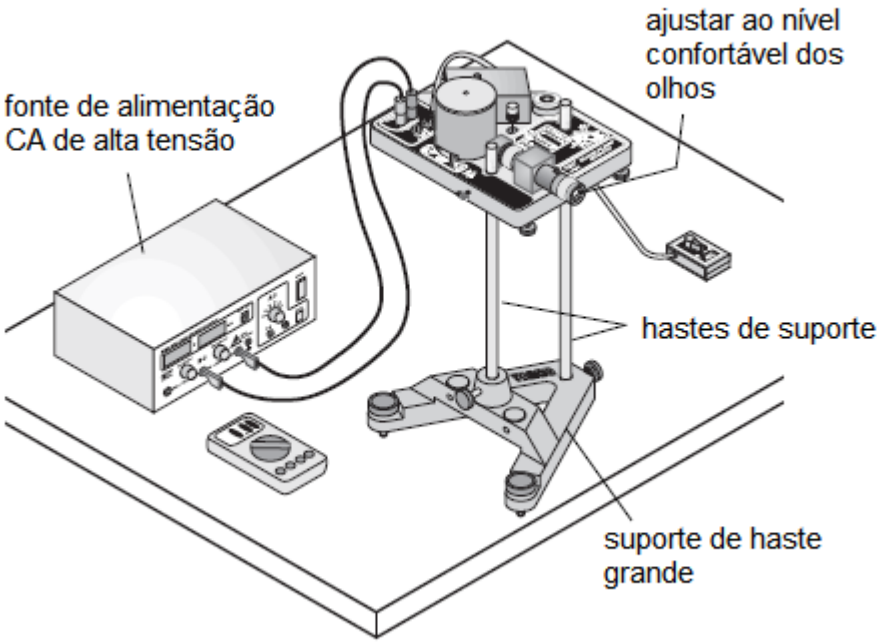



**figura 6: configuração do equipamento**

## 8.3 Separação da placa de medição

1. Desmonte a câmara de visualização de gotículas levantando a caixa para cima e, em seguida, removendo a placa do capacitor superior e a placa de espaço. (Veja a Figura 5.)

2. Use um micrômetro para medir a espessura da placa espaçadora. (A espessura é igual à distância de separação da placa, d).

3. Certifique-se de não incluir a borda elevada da placa espaçadora em sua medição. A precisão desta medição é importante para o grau de precisão dos resultados experimentais.

4. Registre a medição.

NOTA: Tenha cuidado ao manusear a placa do capacitor superior de latão e a placa espaçadora de plástico para evitar arranhá-los.

NOTA: Todas as superfícies envolvidas na medição devem estar o mais limpas possível para evitar leituras imprecisas.

# 9 Alinhando o sistema óptico

## 9.1 Focando o escopo de visualização

1. Remonte o espaçador de plástico e a placa do capacitor superior na placa do capacitor inferior. Recoloque a carcaça, alinhando os furos em sua base com os pinos da carcaça. (Veja a Figura 5.)

    - NOTA: A fonte de tório-232 e a conexão elétrica na placa do capacitor inferior se encaixam em orifícios de tamanho apropriado no espaçador de plástico.

2. Desaperte o fio de focagem de seu local de armazenamento na plataforma e insira-o cuidadosamente no orifício no centro da placa do capacitor superior (Figura 7.)

3. Conecte o adaptador CA incluído em um receptáculo (100 a 240 VCA) e conecte o cabo à tomada de energia na lateral da fonte de luz LED.

    - Verifique se o adaptador CA tem a voltagem correta: 100, 117, 220 ou 240 V.

4. Gire o botão de ajuste de brilho na fonte de luz LED para otimizar o contraste entre o pino iluminado e o fundo escuro.

5. Foque o retículo girando o anel de foco do retículo no visor.

6. Visualize o fio de focagem através da luneta de visualização e coloque o fio em foco nítido girando o anel de focagem da gota.

    - NOTA: A visualização será mais fácil para os experimentadores que usam óculos se o escopo de visualização estiver focado sem usar os óculos.

7. Retorne o fio de focagem ao seu local de armazenamento na plataforma.

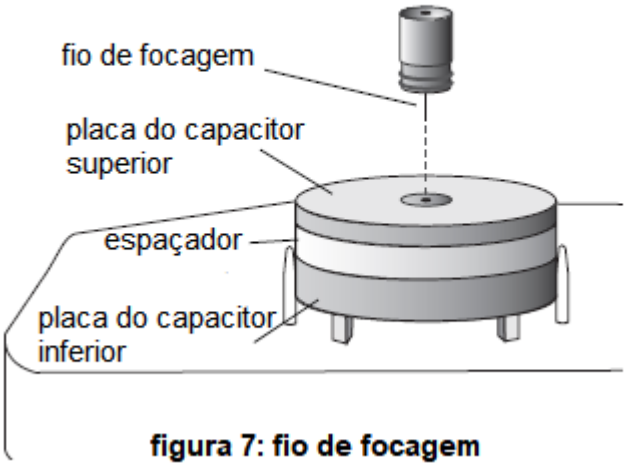



**figura 7: fio de focagem**

# 10 Funções dos controles

## 10.1 Alavanca da fonte de ionização

1. Quando a alavanca está na posição de ionização OFF, a fonte de ionização é girada para longe da área das gotículas, de modo que praticamente nenhuma partícula alfa entra na área. Nesta posição, a fonte alfa é blindada em todos os lados.

2. Na posição ON, a fonte de ionização é girada em direção à área das gotículas e a área é exposta às partículas alfa ionizantes do tório-232.

3. Na POSIÇÃO DE GOTA DE SPRAY, a câmara é ventilada por um pequeno orifício que permite que o ar escape quando as gotas de óleo estão sendo introduzidas na câmara.

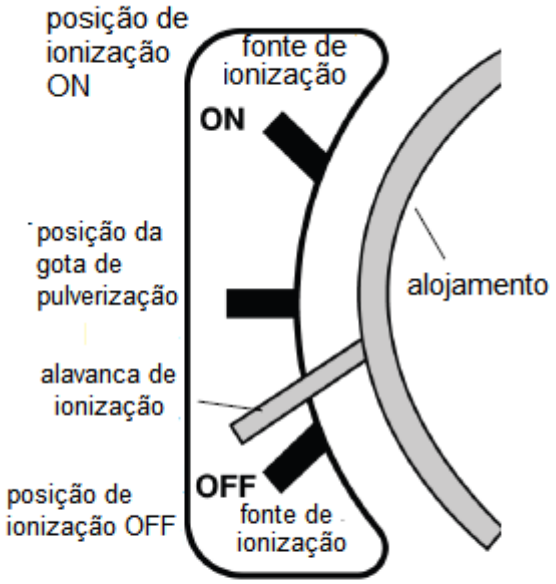



**figura 8: configurações da alavanca da fonte de ionização**

## 10.2 Interruptor de carregamento da placa

O interruptor de carregamento da placa tem três posições:

1. PLACA SUPERIOR -: o borne de ligação negativo é conectado à placa superior do capacitor.
2. PLACA SUPERIOR +: o borne de ligação negativo é conectado à placa do capacitor inferior.
3. PLACAS ATERRADAS: as placas são desconectadas da alimentação de alta tensão e são conectadas eletricamente umas às outras.

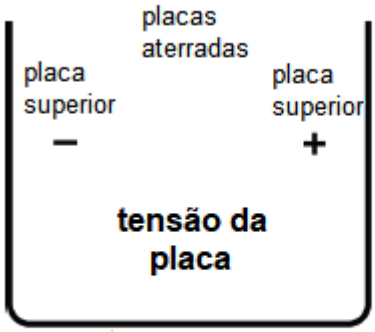



**figura 9: interruptor de carregamento da placa**

## 11 Ajustando e Medindo a Tensão

1. Conecte a fonte de alimentação CC de alta tensão aos conectores de tensão da placa usando cabos de conexão de plugue banana.
2. Ajuste a tensão para fornecer cerca de 500 VCC. Use o multímetro digital para medir a tensão fornecida aos conectores de tensão da placa.

- Meça a tensão nos conectores de tensão da placa e não nas placas do capacitor. Há um resistor de dez megaohms em série com cada placa do capacitor para evitar choque elétrico.

## 12 Determinando a Temperatura da Câmara de Visualização de Gotas

1. Conecte o multímetro aos conectores do termistor na plataforma para medir a resistência do termistor que está embutido na placa do capacitor inferior.
2. Consulte a Tabela de resistência do termistor localizada na plataforma para encontrar a temperatura da placa de latão inferior. A temperatura medida corresponde à temperatura dentro da câmara de visualização de gotículas.

- A temperatura dentro da câmara de visualização de gotículas deve ser determinada periodicamente (aproximadamente a cada quinze minutos).

# 13 Procedimento experimental

1. Conclua a remontagem da câmara de visualização de gotículas colocando a tampa do orifício de gotículas na placa do capacitor superior e, em seguida, colocando a tampa no compartimento. (Veja a Figura 5.)

   - NOTA: A tampa do orifício de gotículas possui um orifício em um lado e um orifício na parte inferior. O orifício na parte inferior se alinha com o pequeno orifício no centro da placa do capacitor superior.
   - NOTA: A tampa do orifício de gotículas evita que gotículas adicionais entrem na câmara após o início do experimento.

   .

2. Meça e registre a tensão da placa e a resistência do termistor (temperatura).

## 13.1 Introduzir as gotículas na câmara

1. Coloque óleo não volátil de densidade conhecida no atomizador, como o óleo mineral Squibb 5587 incluído, densidade de 886 kg/m3.

2. Certifique-se de que a ponta do atomizador esteja apontada para baixo (90° em relação ao eixo; veja a Figura 10). Prepare o atomizador apertando rapidamente o bulbo até que o óleo seja pulverizado.

3. Mova a alavanca da fonte de ionização para "SPRAY DROPLET POSITION" para permitir que o ar escape da câmara durante a introdução de gotículas na câmara.

4. Coloque a ponta do atomizador no orifício da tampa da câmara de visualização de gotículas.

5. Enquanto observa através do visor, aperte o bulbo do atomizador com um aperto rápido. Em seguida, aperte-o lentamente para forçar as gotículas através do orifício na tampa do orifício de gotículas, através do orifício de

entrada de gotículas na placa do capacitor superior e no espaço da área de visualização entre as duas placas do capacitor.

6. Quando você vir uma chuva de gotas através do escopo de visualização, mova a alavanca da fonte de ionização para a posição 'OFF'.

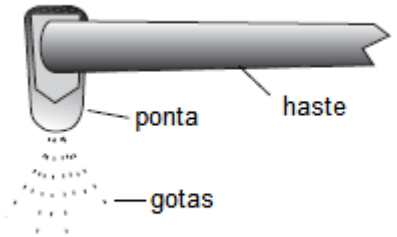



**figura 10: ponta do pulverizador**

- Se repetidos "esguichos" do atomizador não produzirem nenhuma gota na área de visão, mas produzirem um brilho bastante turvo no campo de visão, o orifício na placa superior do capacitor ou na tampa do orifício de gota pode estar entupido. Consulte a seção Manutenção para obter instruções de limpeza.
- NOTA: A técnica exata de introdução de gotículas precisará ser desenvolvida pelo experimentador. O objetivo é obter um pequeno número de gotas, não uma nuvem grande e brilhante da qual uma única gota pode ser escolhida.
- NOTA: Lembre-se de que as gotas estão sendo forçadas na área de visualização pela pressão do atomizador. O bombeamento excessivo do atomizador pode fazer com que muitas gotículas sejam forçadas na área de visualização e, mais importante, na área entre a parede da câmara e o ponto focal do escopo de visualização. Gotas nesta área impedem a observação de gotas no ponto focal do osciloscópio.
- OBSERVAÇÃO: Se toda a área de visualização ficar cheia de gotículas de modo que nenhuma gota possa ser selecionada, espere três ou quatro minutos até que as gotículas fiquem fora de vista ou desligue a

fonte de alimentação CC e desmonte a câmara de visualização de gotículas, removendo assim as gotas.

- NOTA: Quando a quantidade de óleo nas peças na câmara de visualização de gotículas se tornar excessiva, limpe as peças conforme detalhado na seção Manutenção. Lembre-se de que quanto menos óleo for pulverizado na câmara, menos vezes a câmara deve ser limpa

## 13.2 Seleção da gota

1. Das gotas em vista, selecione uma gota que caia lentamente (cerca de 0,02 a 0,05 mm/s) quando o interruptor de carregamento da placa estiver na posição "Placas Aterradas", e também pode ser acionada para cima e para baixo girando o interruptor de carregamento da placa para "PLACA SUPERIOR –" ou "PLACA SUPERIOR +".

   DICA: Uma gota que requer cerca de 15 segundos para descer a distância entre as linhas do retículo principal (0,5 mm) da luneta de visualização subirá a mesma distância, sob a influência de um campo elétrico (1000 V/cm) nos seguintes tempos com os seguintes encargos:

| Tempo (s) | Excesso de elétrons |
|---|---|
| 15 | 1 |
| 7 | 2 |
| 3 | 3 |

   NOTA: Se muitas gotículas estiverem à vista, você pode limpar muitas delas girando a chave de carregamento da placa para "PLACA SUPERIOR –" (conectando energia às placas do capacitor) por vários segundos.

   NOTA: Se poucas gotas tiverem cargas líquidas para permitir a seleção de uma gota de tamanho e carga apropriada, mova a alavanca da fonte de ionização para a posição ON por cerca de cinco segundos.

2. Quando você encontrar uma gota de óleo carregada e de tamanho apropriado, ajuste o foco do escopo de visualização.

   NOTA: A gota de óleo está no melhor foco para uma coleta de dados precisa quando aparece como um ponto de luz brilhante.

3. Gire o botão de ajuste de brilho na luz para otimizar o contraste entre a gota iluminada e o fundo escuro.

## 13.3 Coletando dados sobre a ascensão e queda da gota de óleo

1. Meça a velocidade de subida (quando as placas estão carregadas) e a velocidade de queda (quando as placas não estão carregadas) cerca de 10 a 20 vezes. Manobre a gota para cima e para baixo conforme necessário usando o interruptor de carregamento da placa.

   - NOTA: A maior precisão de medição é alcançada se você cronometrar desde o instante em que o ponto de luz brilhante passa atrás da primeira linha do retículo principal até o instante em que o ponto de luz passa atrás da segunda linha do retículo principal. (Essas linhas de retículo estão separadas por 0,5 mm.)

2. Calcule a carga da gota. Se o resultado desta primeira determinação para a carga na gota for maior que 5 elétrons em excesso, você deve selecionar gotas de movimento mais lento nas medições subsequentes.

3. Introduza mais gotas de óleo na câmara usando o procedimento descrito anteriormente e selecione outra gota.

4. Meça as velocidades de subida e descida da gota selecionada cerca de 10 a 20 vezes ou até que a carga mude espontaneamente ou a gota saia da vista.

5. Traga a gota para o topo do campo de visão e mova a alavanca de ionização para a posição ON por alguns segundos enquanto a gota cai.

6. Se a velocidade de subida da gota mudar, faça o máximo de medições da nova velocidade de subida que puder (10 a 20 medições).

7. Se a gota ainda estiver visível, tente alterar a carga na gota introduzindo mais partículas alfa, conforme descrito anteriormente, e meça a nova velocidade crescente de 10 a 20 vezes, se possível.

8. Repita o passo (7) quantas vezes puder.

9. Registre o potencial da placa, a densidade do óleo, a viscosidade do ar na temperatura da câmara de visualização de gotículas (consulte o Apêndice A) e a pressão barométrica para cada conjunto de medições de velocidade.

    - NOTA: É desejável observar o maior número possível de cargas diferentes em uma única gota.

# 14 Cálculo da Carga de um Elétron

A fórmula a seguir é a equação ( 14 ) na Introdução. Ele pode ser usado para calcular a carga, q, de um elétron.

$$q = \frac{4\pi}{3}\left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p}\right]^3 \frac{\rho g d(v_f + v_r)}{3(Ev_f)}$$

As definições dos símbolos usados e unidades métricas ($SI$) são as seguintes:

- $q$ – carga transportada pela gota $[C]$
- $d$ – separação das placas na câmara de visualização de gotas $[m]$
- $\rho$ – densidade do óleo $[kg/m^3]$ (aproximadamente $886kg/m^3$)
- $g$ – aceleração da gravidade [9,8 m/s2]
- $\eta$ – viscosidade do ar em $[N \cdot s/m2]$ (Ver Apêndice A)
- $b$ – constante, igual a $8,20 \cdot 10^{-3}[Pa \cdot m]$
- $p$ – pressão barométrica $[Pa]$
- $v_f$ – velocidade de queda $[m/s]$
- $v_r$ – velocidade de subida $[m/s]$
- $V$ – diferença de potencial entre as placas $[V]$
- Nota: O valor aceito para $e$ é $1,60 \cdot 10 - 19\ C$

## 14.1 Procedimento sugerido para cálculo da carga de um elétron:

1. Use a equação (12) para calcular o raio, $a$, da gota de óleo:

$$a = \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p}$$

2. Substitua o raio, $a$, do cálculo acima na equação (4) para encontrar a massa, $m$, da gota de óleo:

$$\begin{aligned} m &= \frac{4}{3}\pi a^3 \rho \\ m &= \frac{4}{3}\pi\left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p}\right]\rho \end{aligned}$$

3. Substitua $m$ do cálculo acima na equação ($3a$) para calcular a carga, $q$, de um elétron:

$$\begin{aligned} q &= \frac{mg(v_f + v_r)}{Ev_f} \\ q &= \frac{mgd(v_f + v_r)}{Vv_f}v \\ q &= \frac{4}{3}\pi\left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p}\right]\frac{\rho g d(v_f + v_r)}{Vv_f} \end{aligned}$$

# 15 Usando um microscópio de projeção com o aparelho de gota de óleo Millikan

Para demonstrar o experimento de Millikan para uma sala de aula inteira em uma tela de TV ou monitor de computador, use um microscópio de projeção, como o Microscópio Ken-A-Vision VideoFlex (PASCO Modelo SE-7227).

## 15.1 Procedimento

1. Coloque uma tela de papel branco na câmara de visualização de gotículas para refletir mais luz:

a) Antes de focar o escopo de visualização (consulte a seção Configuração do Equipamento, Alinhamento do Sistema Óptico), coloque uma tela de papel branco na câmara de visualização de gotículas, conforme ilustrado na Figura 11.

b) Prossiga com a etapa 1 de Alinhamento do Sistema Óptico.

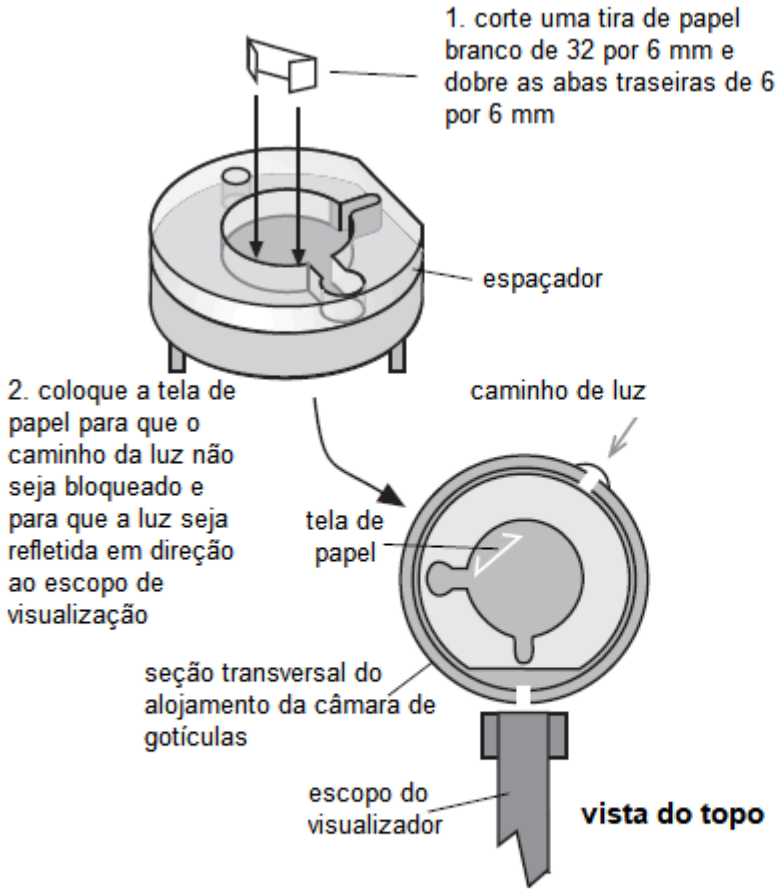



**figura 11: coloque uma tela de papel branco na câmara de visualização de gotículas**

2. Alinhe e foque o microscópio de projeção:

a) Configure o microscópio de projeção conforme indicado nas instruções do fabricante.

b) Depois de concluir a configuração e o foco do Millikan Oil Drop Apparatus nas gotículas de óleo, deslize cuidadosamente a ocular do microscópio de projeção sobre a ocular do Millikan Apparatus.

c) Focalize o microscópio de projeção conforme indicado nas instruções do fabricante.

# 16 Informação histórica

## 16.1 Notas Históricas

Os gregos foram os primeiros a relatar os efeitos da eletricidade quando registraram que o âmbar atritado atraía objetos leves. No entanto, as teorias que explicam esse fenômeno não surgiram até 1747, quando Benjamin Franklin propôs que um fluido elétrico ou fogo existia em certas quantidades em toda a matéria. Um excesso desse fluido na matéria produziria uma carga positiva e uma deficiência desse fluido produziria uma carga negativa. Uma teoria ligeiramente diferente foi apresentada pelo físico Symmer doze anos depois. Ele propôs que a matéria em estado neutro não mostra propriedades elétricas porque contém quantidades iguais de dois fluidos sem peso, que foram chamados de eletricidade positiva e negativa, respectivamente.

Franklin também postulou a existência de uma partícula elétrica pequena o suficiente para permear facilmente a matéria. Os experimentos de Faraday em eletrólise, que demonstraram que quando uma corrente passa por um eletrólito, as massas de compostos depositados em eletrodos opostos são proporcionais aos pesos químicos equivalentes dos compostos, também apoiaram o conceito de Franklin de uma partícula elétrica elementar. As teorias dos fluidos, juntamente com uma teoria que explica a eletricidade como um estado de tensão na matéria, foram as principais explicações dos fenômenos elétricos até o final do século XIX.

## 16.2 Determinações antecipadas de $e$

A palavra "elétron" foi sugerida pela primeira vez em 1891 pelo Dr. G. Johnstone Stoney como um nome para a "unidade natural de eletricidade", ou seja,

aquela quantidade de eletricidade que deve passar por uma solução para liberar em um eletrodo um átomo. de hidrogênio ou qualquer substância univalente. Segue-se que a carga do elétron multiplicada pelo número de moléculas em um grama-mol daria a quantidade de eletricidade necessária para depositar um grama-mol por eletrólise. Essa quantidade foi determinada por Faraday como sendo 9.650 unidades eletromagnéticas absolutas de eletricidade. Usando este método, Stoney obteve um valor de 0,3 x 10-10 e.s.u. (A Teoria Cinética forneceu a base para a estimativa de Stoney do número de Avogadro).

A primeira tentativa experimental de medir a carga de um íon foi feita por Townsend no final da década de 1890. Ele havia observado que durante a eletrólise do ácido sulfúrico, hidrogênio e oxigênio carregados positivamente eram produzidos (embora houvesse um milhão de milhões de moléculas neutras para cada carga). Este método foi usado para produzir um gás ionizado que foi então borbulhado através da água para formar uma nuvem. Para sua determinação de e Townsend procedeu da seguinte maneira:

1. Ele assumiu que no vapor d'água saturado cada íon condensava umidade em torno dele, de modo que o número de íons era o mesmo que o número de gotículas.

2. Determinou com o auxílio de um eletrômetro de quadrante a carga elétrica total por centímetro cúbico transportada pelo gás.

3. Ele encontrou o peso total da nuvem passando-a por tubos de secagem e determinando o aumento de peso desses tubos.

4. Ele encontrou o peso médio das gotas de água que constituem a nuvem observando sua taxa de queda sob gravidade e calculando seu raio médio com o auxílio de uma lei puramente teórica conhecida como Lei de Stokes.

5. Ele dividiu o peso da nuvem pelo peso médio das gotículas de água para obter o número de gotículas que, se a suposição 1 estiver correta, era o número de íons, e então dividiu a carga total por centímetro cúbico no gás pelo número de íons para encontrar a carga média transportada por cada íon, ou seja, para encontrar e

Townsend obteve resultados na faixa de $3 \cdot 10^{-10}$ e.s.u. para e. J. J. Thompson, em 1900, utilizou um método semelhante ao de Townsend e obteve um valor

de $6 \cdot 10^{-10}$ e.s.u. Em ambos os métodos, no entanto, a primeira suposição (cada gota formada em torno de apenas um íon) provou ser apenas aproximadamente correta, e os métodos experimentais não foram adequados para fornecer uma determinação precisa de $e$.

H.S. Wilson melhorou o trabalho de Townsend e Thompson adicionando duas placas de latão que poderiam ser conectadas a uma bateria de 2000 volts. Uma nuvem foi formada entre essas placas (não carregadas) e a velocidade de queda da nuvem foi registrada. Uma segunda nuvem foi então formada e sua velocidade de queda observada em um campo elétrico (as placas sendo carregadas). Como as duas velocidades são proporcionais às forças que atuam nas gotas, e a velocidade da nuvem com as placas descarregadas determina o tamanho e a massa das gotas pela Lei de Stokes, Wilson conseguiu obter um valor de $3 \cdot 10^{-10}$ e.s.u. para $e$. Como as medições de Wilson sempre foram feitas no topo da nuvem, ou nas gotas com a menor carga (as gotas mais carregadas sendo conduzidas para baixo mais rapidamente no campo), a suposição de um íon por gota foi validada.

## 16.3 Determinação de Millikan de $e$

Millikan melhorou o projeto de Wilson usando um potencial mais alto nas placas para que a velocidade de queda da nuvem pudesse não apenas ser impedida, mas realmente revertida. Algumas gotas carregadas moveram-se para cima, algumas moveram-se rapidamente para baixo, enquanto as gotas não carregadas não foram afetadas e continuaram a descer. Algumas gotas, que carregavam uma carga de magnitude apropriada para que a força da gravidade sobre a gota quase igualasse a força do campo elétrico sobre a gota, permaneceram à vista. Variando o potencial das placas, Millikan conseguiu equilibrar essas gotas. Esta situação provou ser uma melhoria significativa, pois permitiu que todas as medições fossem feitas em uma única gota. Ao usar esse método de gota balanceada, Millikan foi capaz de observar as propriedades de íons individuais e determinar se diferentes íons carregam a mesma carga.

Na passagem a seguir, retirada da "Revista Filosófica" de fevereiro de 1910, Millikan descreve o procedimento real do experimento.

"As observações sobre a taxa de queda foram feitas com um telescópio de foco curto colocado a cerca de 60 cm das placas. Na ocular deste telescópio foram colocados três retículos igualmente espaçados... Uma pequena seção do

espaço entre as placas foi iluminada por um feixe estreito de uma luz de arco, o calor do arco sendo absorvido por três células de água em série. O ar entre as placas foi ionizado por 200 mg de rádio de atividade 20.000 colocado de 3 a 10 cm de distância das placas. Cerca de um segundo após a formação da nuvem, o rádio foi removido... e o campo acionado por meio de um interruptor de dupla ação. Se as gotas não fossem mantidas suspensas pelo campo, a diferença de potencial era alterada... Os retículos foram colocados perto da placa inferior e, assim que uma gota estacionária foi encontrada em algum lugar acima do retículo superior, ela foi observada por alguns segundos para ter certeza de que não estava se movendo e, em seguida, o campo foi lançado. e as placas são curto-circuitadas por meio do interruptor de dupla ação, de modo a garantir que não retenham carga. A queda foi então cronometrada por meio de um cronômetro preciso ao passar pelos três retículos, sendo um dos dois ponteiros do relógio parado no instante da passagem pelo retículo do meio e o outro no instante de passagem pelo inferior. Ver-se-á que este método de observação fornece uma dupla verificação da evaporação; pois se a gota é estacionária no início, ela não está evaporando o suficiente para influenciar a leitura da taxa de queda, e se ela começa a evaporar sensivelmente antes que a leitura seja concluída, o tempo necessário para passar pelo segundo espaço deve ser maior que o necessário para passar pelo primeiro espaço. Ver-se-á das observações que se seguem que este não era, em geral, o caso.

É um experimento extremamente interessante e instrutivo observar uma dessas gotas começar e parar, ou até mesmo inverter sua direção de movimento, à medida que o campo vai e volta. Muitas vezes peguei uma gota que era leve demais para permanecer estacionária e a movi para frente e para trás dessa maneira quatro ou cinco vezes entre os mesmos dois retículos, observando-a primeiro cair sob a gravidade quando o campo foi lançado e depois subir contra a gravidade quando o campo foi lançado...

Além disso, uma vez que as observações... são todos feitos na mesma gota, todas as incertezas sobre se as condições podem ser exatamente duplicadas na formação de nuvens sucessivas obviamente desaparecem. Não há incerteza teórica no método, a menos que seja uma incerteza se a Lei de Stokes se aplica ou não à taxa de queda dessas gotas sob a gravidade.

Experimentos com a gota d'água balanceada produziram o valor de $3,422 \cdot 10^{-10}$ e.s.u. para $e$. O aspecto mais importante desses experimentos, no en-

tanto, foi a observação de Millikan de que uma queda ascendente mudaria repentinamente sua velocidade. Este fenômeno poderia ser facilmente produzido colocando uma fonte radioativa perto da gota. Isso demonstrou que a gota havia "capturado" um íon, alterando assim a carga da gota e sua respectiva velocidade.

## 16.4 A Estimativa Exata de $e$

Em 1909, Millikan começou a construir um novo aparelho projetado para a observação de gotas únicas de óleo por longos períodos de tempo. Como as gotas de água se mostraram inadequadas para a observação prolongada desse fenômeno de captura de íons, Millikan usou gotas de óleo, que não foram afetadas pela evaporação. O aparato consistia em duas placas paralelas de latão separadas por uma distância de 16 mm por blocos de ebonita. O óleo não volátil foi pulverizado na câmara acima das placas, e pequenas gotas lentamente encontraram seu caminho na área entre as placas através de um pequeno orifício na placa superior. As gotas foram iluminadas por um feixe de uma lâmpada de arco de carbono e observadas através de uma luneta de medição. Os detalhes da construção do aparato final de Millikan construído em 1914 (que era basicamente semelhante aos seus aparelhos anteriores, e para os propósitos desta discussão pode ser considerado o mesmo que os aparelhos anteriores) atestam o esforço despendido na obtenção do mais avaliação precisa de e possível. A passagem a seguir é parte da descrição do aparelho de Millikan, incluindo um diagrama do dispositivo.

"Assim, construí há dois anos um novo condensador com superfícies polidas opticamente e achatadas a dois comprimentos de onda de luz de sódio. Eles tinham 22 cm. de diâmetro e foram separados por três pedaços de placas escalonadas, 14,9174 mm. espesso e com superfícies de placa opticamente perfeitas. As dimensões do condensador, portanto, não introduziam mais uma incerteza de mais de 1 parte em 10.000."

"A completa estagnação do ar entre as placas do condensador foi alcançada, primeiro, absorvendo todos os raios de calor da lâmpada de arco por meio de uma célula de água de 80 cm. longo, e uma célula de cloreto cúprico, e em segundo lugar, pela imersão de todo o recipiente em um banho de óleo de motor a gás (40 litros) a temperatura constante, o que permitiu, em geral, flutuações não superiores a $0,02\ C$ durante uma observação."

Com este novo aparato foram feitas centenas de medições em diferentes gotas, com o propósito tanto de fazer uma avaliação exata de e quanto de provar ou refutar a teoria atômica da eletricidade. O valor de e obtido nesses cinco anos de trabalho foi de $4,774 \cdot 10^{-10}$ e.s.u. Este valor de e foi aceito até 1928, quando uma determinação precisa do número de Avogadro por medidas de difração de raios X em cristais permitiu o cálculo de e ser $4,803 \cdot 10^{-10}$ e.s.u. A discrepância foi posteriormente atribuída ao valor muito baixo de Millikan para a viscosidade do ar.

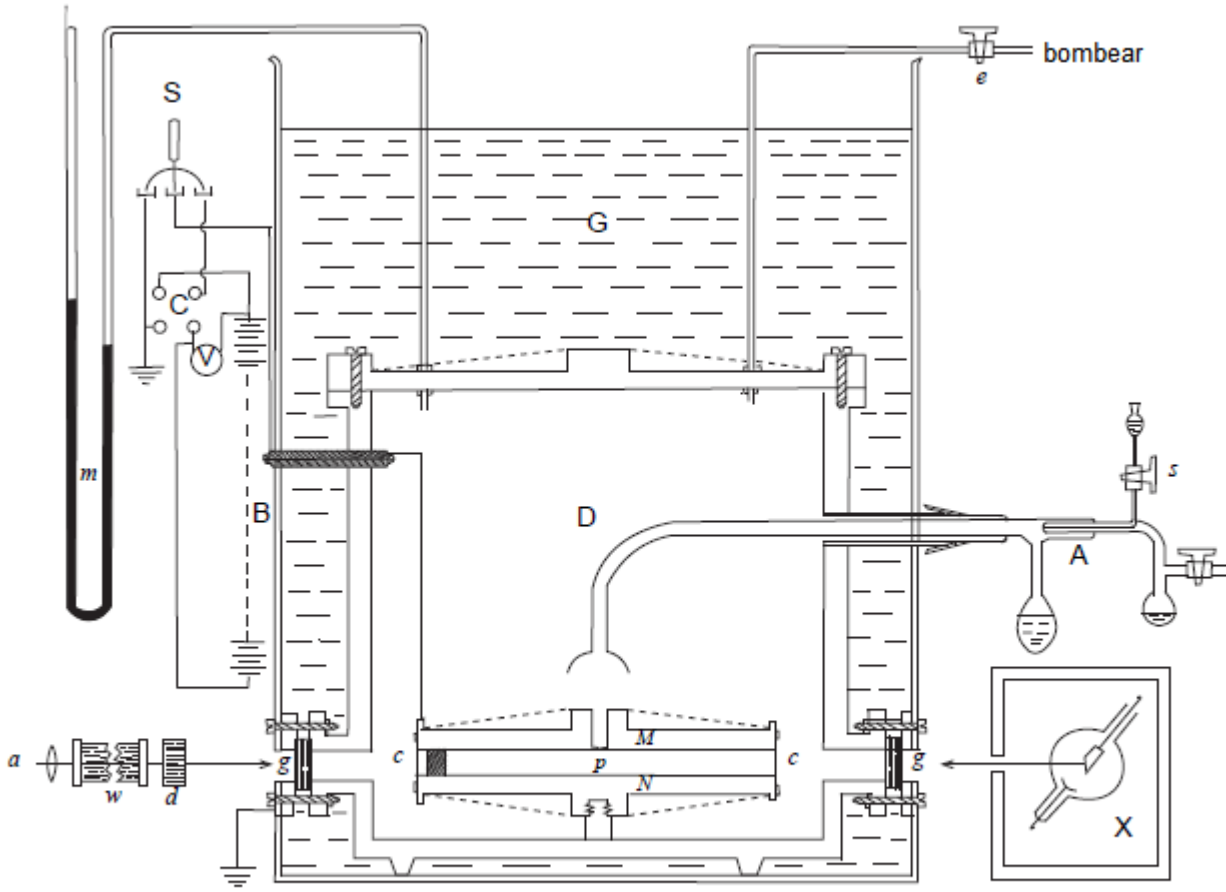



**figura 11: diagrama do aparelho de Millikan**

## 16.5 Natureza Atômica da Eletricidade

A natureza atômica da eletricidade é melhor exemplificada pela seguinte tabela extraída dos dados de Millikan:

| $n$ | $4.917 \cdot n$ | Carga Observada | $n$ | $4.917 \cdot n$ | Carga Observada | $n$ | $4.917 \cdot n$ | Carga Observada |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.917 | — | 7 | 34.42 | 34.47 | 13 | 63.92 | 63.68 |
| 2 | 9.834 | — | 8 | 39.34 | 39.38 | 14 | 68.84 | 68.65 |
| 3 | 14.75 | — | 9 | 44.25 | 44.42 | 15 | 73.75 | — |
| 4 | 19.66 | 19.66 | 10 | 49.17 | 49.41 | 16 | 78.67 | 78.34 |
| 5 | 24.59 | 24.60 | 11 | 54.09 | 53.91 | 17 | 83.59 | 83.22 |
| 6 | 29.50 | 29.62 | 12 | 59.00 | 59.12 | 18 | 88.51 | — |

Millikan faz os seguintes comentários sobre esta tabela.

"Nesta tabela 4.917 é apenas um número obtido... da mudança de velocidade devido à captura de íons e que é proporcional neste experimento à carga iônica. A coluna com o título $4,917 \cdot n$ contém simplesmente toda a série de múltiplos exatos desse número de 1 a 18. A coluna com o título 'Carga observada' fornece os valores observados sucessivos da velocidade ascendente da gota mais a velocidade descendente. Ver-se-á que durante o tempo de observação, cerca de quatro horas, essa queda transportou todos os múltiplos possíveis da carga elementar de 4 a 17, exceto 15. Nenhuma relação múltipla mais exata ou mais consistente é encontrada nos dados que os químicos têm acumulada sobre os poderes de combinação dos elementos e sobre a qual se baseia a teoria atômica da matéria do que se encontra nos números anteriores.

Tabelas como essas – e dezenas delas poderiam dar lugar, sem sombra de dúvida, à visão de que uma carga elétrica onde quer que seja encontrada, seja em um isolante ou condutor, seja em eletrólitos ou em metais, tem uma estrutura granular definida, que consiste em de um número exato de partículas de eletricidade (elétrons) todas exatamente iguais, que em fenômenos estáticos estão espalhadas sobre a superfície do corpo carregado e em fenômenos de corrente estão à deriva ao longo do condutor. Em vez de desistir, como Maxwell pensou que deveríamos fazer algum dia, a 'hipótese provisória das cargas moleculares', nos vemos obrigados a fazer todas as nossas interpretações dos fenômenos elétricos, metálicos e eletrolíticos, em termos dela.

Embora os valores da carga em uma gota específica fossem múltiplos exatos

de um certo valor ($e$), o valor de e variou para gotas de massas diferentes. Essa discrepância foi atribuída ao colapso da Lei de Stokes. Por meio de experimentação, a lei falhou quando o tamanho da gota se aproximou do caminho livre médio das moléculas de ar. Quando esta situação ocorre, o meio em que a gota cai não é mais homogêneo em relação à gota. Isso contradiz uma das suposições sobre as quais se baseia a Lei de Stokes. Através de seu trabalho no elétron, Millikan foi capaz de determinar um fator de correção para a Lei de Stokes.

Ao realizar o experimento com gotas de mercúrio e gotas de outros materiais, Millikan demonstrou que a carga elétrica elementar era a mesma para isolantes, semicondutores e condutores. Ele também demonstrou que a partícula beta tinha a mesma carga que um elétron (na verdade, é um elétron) e que os elétrons positivos e negativos (o elétron positivo referindo-se a um próton e não a um pósitron) são iguais em carga. O experimento também produziu insights sobre o estudo de gases ionizados.

Poucos experimentos tão simples em princípio forneceram tamanha riqueza de evidências experimentais para confirmar a teoria atômica e medir uma importante constante física.

## 16.6 Número de Avogadro

A medição da carga do elétron também permite o cálculo do número de Avogadro. A quantidade de corrente necessária para eletrodepositar um grama equivalente de um elemento em um eletrodo (o faraday) é igual à carga do elétron multiplicada pelo número de moléculas em um mol. Através de experimentos de eletrólise, descobriu-se que o faraday é $2,895 \cdot 10^{14}$ unidades eletrostáticas (e.s.u.) por grama de peso equivalente (mais comumente expresso no sistema m-k-s como $9,625 \cdot 10^{7}$ coulombs por quilograma de peso equivalente). Dividindo o faraday pela carga do elétron,

$$\frac{2.895 \cdot 10^{14} e.s.u./gm}{4.803 \cdot 10^{-10} e.s.u.}$$

produz $6,025 \cdot 10^{23}$ moléculas por grama de peso equivalente, ou Número de Avogadro.

# 17 Notas de manutenção

## 17.1 Limpeza

1. A caixa da câmara de visualização de gotículas, as placas do capacitor, o espaçador de plástico e a tampa do orifício de gotículas devem ser limpas com água e detergente, com atenção especial ao orifício de gotículas na placa do capacitor superior, as tampas da porta de observação de vidro na a carcaça e a tampa do orifício de gotículas.

2. O espaçador de plástico deve ser polido com um pano macio e sem fiapos para remover qualquer óleo, impressões digitais ou fiapos.

3. A lente no espaçador de plástico deve ser limpa em ambos os lados usando uma ponta coberta de algodão ("Q-tip").

4. Aplique uma fina camada de óleo nas placas do capacitor para ajudar a prevenir a corrosão.

5. Seque todas as peças completamente antes da remontagem.

   - Sempre manuseie o espaçador de plástico e as placas do capacitor com cuidado para evitar arranhá-los.
   - Solventes que possam atacar o plástico devem ser evitados.

## 17.2 Ajustando o retículo vertical e visualizando os alinhamentos do escopo

Se o alinhamento do retículo ou do escopo de visualização for alterado durante o manuseio grosseiro, realinhe-o usando o seguinte procedimento:

1. Afrouxe o parafuso de fixação no suporte da luneta (Figura 13).

2. Com o fio de focagem no lugar e olhando através da ocular, gire a luneta de visualização até que as linhas verticais do retículo estejam verticais ao fio de focagem.

3. Encontre o centro do foco no botão de ajuste no escopo de visualização (isso será aproximadamente a meio caminho entre o foco mínimo e máximo).

4. Mova manualmente a luneta para dentro e para fora através de seu suporte até que o fio de focagem fique em foco.

5. Verifique novamente o retículo para garantir que ele ainda esteja alinhado com o fio de foco (como na etapa 2).

6. Trave a luneta na posição apertando o parafuso de ajuste no suporte da luneta.

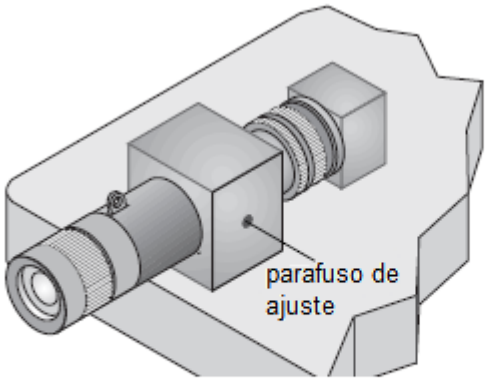



**figura 13: parafuso de ajuste do escopo de visualização**

## 17.3 Ajustando o alinhamento do retículo horizontal

Se o alinhamento horizontal do escopo de visualização for alterado durante o manuseio brusco, realinhe-o usando o seguinte procedimento:

1. Solte um dos dois parafusos de cabeça cilíndrica na parte inferior da plataforma mostrado na Figura 14.

2. Com o fio de focagem no lugar e olhando através da ocular, bata suavemente na luneta até que o fio de focagem esteja centrado no retículo.

   - Apenas um ajuste muito pequeno será necessário.
   - Tenha cuidado para evitar perder o local do fio de focagem.

3. Trave a luneta na posição apertando os dois parafusos de cabeça cilíndrica no suporte da luneta.

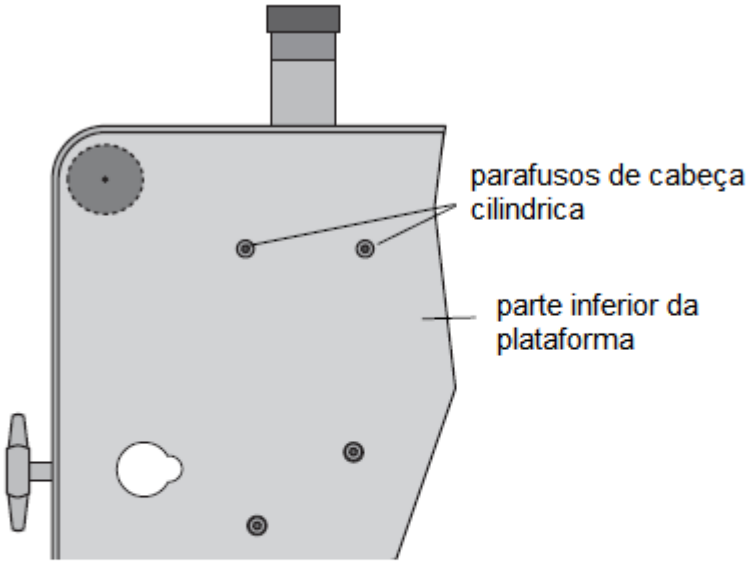



**figura 14: localização dos parafusos de cabeça cilíndrica que ancoram o escopo de visualização**

## 17.4 Retocar a superfície pintada de preto no espaçador de plástico

Após uso prolongado e limpeza repetida, a tinta preta (Figura 15) que absorve a luz refratada e refletida no espaçador plástico pode começar a se desgastar. Nesse caso, retoque a superfície com uma fina camada de tinta acrílica preta lisa, como a disponível em lojas de hobby. Não use verniz ou tinta à base de óleo.

- Não permita que a tinta entre nas superfícies planas superior e inferior

do espaçador de plástico, pois isso alteraria a espessura do espaçador de plástico.

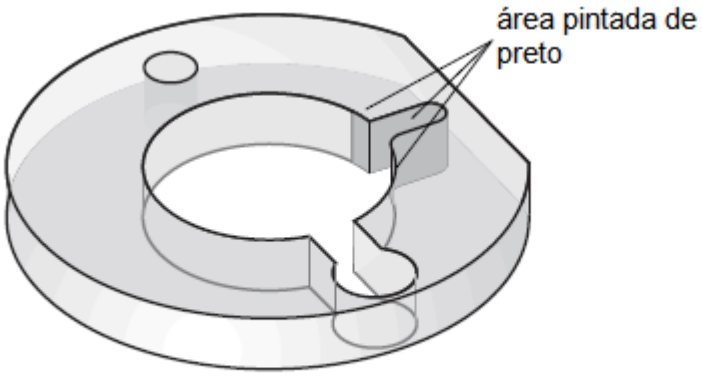
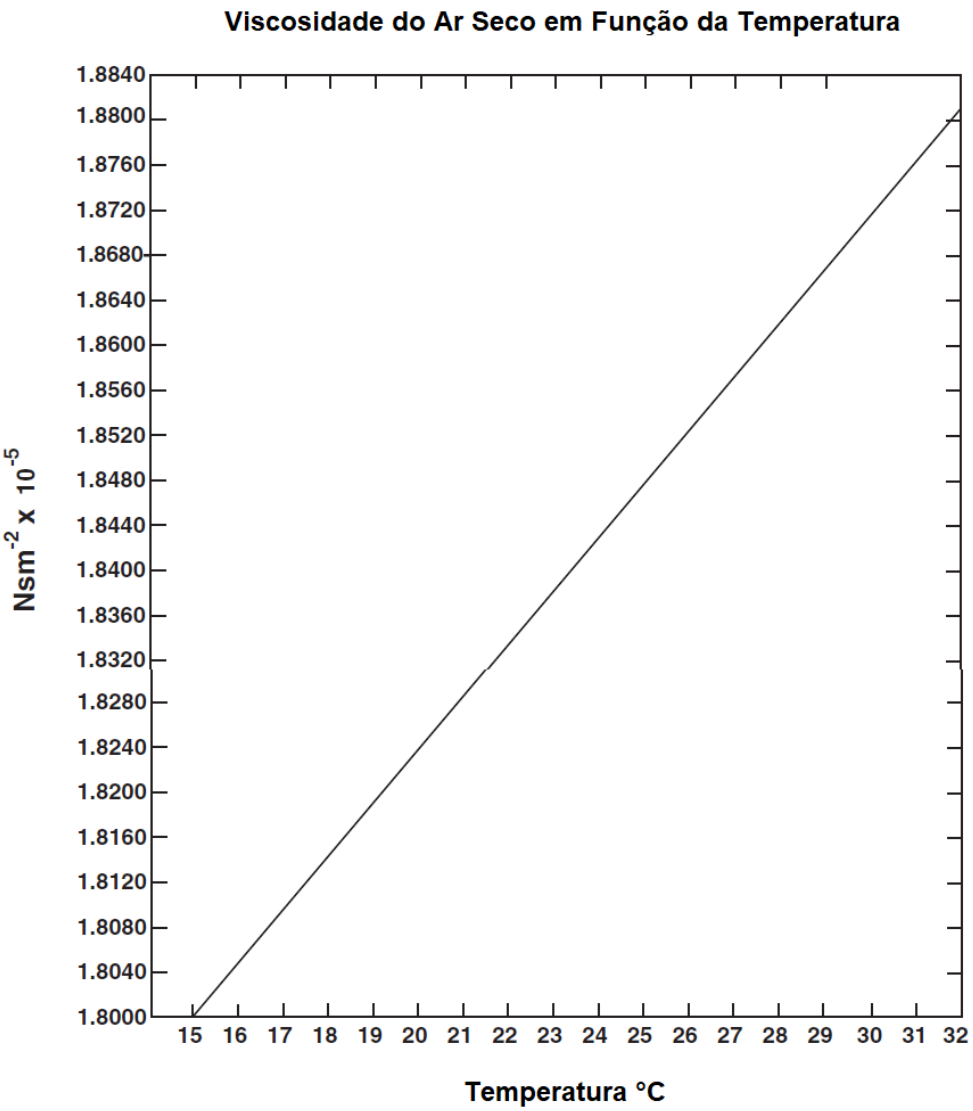



**figura 15: área no espaçador de plástico que deve ser pintada de preto**

# 18 Apêndice A: Viscosidade do Ar Seco em Função da Temperatura

Viscosidade do Ar Seco em Função da Temperatura




# 19 Apêndice B: Resistência do Termistor

Millikan Oil Drop Apparatus Thermistor Resistance at Various Temperatures

**Tabela de Resistência do Termistor**

| °C | X $10^6$ Ω | °C | X $10^6$ Ω | °C | X $10^6$ Ω |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 3.239 | 20 | 2.300 | 30 | 1.774 |
| 11 | 3.118 | 21 | 2.233 | 31 | 1.736 |
| 12 | 3.004 | 22 | 2.169 | 32 | 1.700 |
| 13 | 2.897 | 23 | 2.110 | 33 | 1.666 |
| 14 | 2.795 | 24 | 2.053 | 34 | 1.634 |
| 15 | 2.700 | 25 | 2.000 | 35 | 1.603 |
| 16 | 2.610 | 26 | 1.950 | 36 | 1.574 |
| 17 | 2.526 | 27 | 1.902 | 37 | 1.547 |
| 18 | 2.446 | 28 | 1.857 | 38 | 1.521 |
| 19 | 2.371 | 29 | 1.815 | 39 | 1.496 |

## 20 Guia do professor

- NOTA: É melhor que os alunos trabalhem em pares – um para observar a queda e outro para registrar os dados experimentais.
- NOTA: O nivelamento será mais preciso se o nível de bolha for observado diretamente de cima durante o nivelamento.
- NOTA: Se for necessária mais precisão com o nivelamento para evitar que as gotas de óleo se desloquem gradualmente para um lado durante a observação prolongada, execute a operação de nivelamento usando um nível bidimensional ou rolamento de esferas colocado diretamente na placa

do capacitor inferior.

Como exemplo de resultados experimentais típicos, as páginas a seguir listam os dados de um professor, usando o seguinte método alternativo para calcular a carga de um elétron. O professor mediu a velocidade da gota descendo com as placas carregadas e usou o procedimento listado abaixo para organizar os dados para cálculo.

Para cada evento de cobrança diferente para uma queda, foi feito o seguinte:

1. Mediu a velocidade da queda com as placas não carregadas, a velocidade da queda ascendente com as placas carregadas e a velocidade da queda com as placas carregadas;

2. Atribuiu uma "carga de cobrança" para cada evento de carga diferente para cada gota de óleo; por exemplo, para a gota 1: 1A, 0 (velocidade da gota descendente com as placas não carregadas), 1B, u (velocidade da gota ascendente), 1B, d (velocidade com as placas carregadas da gota descendente), 1C , u, d e 1D, u, d; para gotícula 2: 2A, 0, u, d, 2B u, d, 2C u, d e assim por diante.

3. Calcule a média de todas as medições para uma gota caindo com as placas não carregadas, para uso para determinar a;

4. Para cada carga de cobrança, calcule a média das medidas para os casos de queda ou subida com as placas carregada;

5. Calculou as cargas médias em cada gota para cada carta de cobrança (média das cargas para os casos com a gota subindo e com a gota caindo enquanto as placas eram carregadas);

6. Listou os encargos médios para as cartas de cobrança em ordem crescente de tamanho e calculou a diferença média entre os encargos;

7. Calculou o número de e para gotícula em cada uma das condições de carga dividindo a carga média para cada letra de carga pela diferença média na carga da etapa 5, acima.

Os dados e cálculos para medições em uma gota estão listados nas páginas a seguir.

## 20.1 Dados de amostra

Dados de amostra para o aparelho de gota de óleo Millikan: $Voltagem = 386$ VDC; $Temperatura = 28,8C$