

Alguns Experimentos de Mecânica Usando Gotas de Água sobre uma Superfície Aquosa*

O. L. DA SILVA, J. SAITO, D. SCHIEL e MILTON DE SOUZA

*Departamento de Física e Ciência dos Materiais, Instituto de Física e Química de São Carlos** USP. São Carlos SP*

Recebido em 13 de Março de 1975

A new arrangement, similar to air tables, is described. It consists of water droplets on a water surface, where their trajectories are studied. A few experiments are described and others are suggested showing how these water droplets can be used as a teaching tool.

Uma nova técnica, sob alguns aspectos semelhante a uma mesa de ar, é descrita. Consiste na geração de gotas de água sobre uma superfície aquosa. A trajetória, interação com obstáculos, reflexão, a ação do campo elétrico e outros experimentos são descritos com essas gotas de água. Diversos outros experimentos são sugeridos. Ênfase é dada ao uso das gotas, sem uma análise exaustiva do seu processo de formação e dos fatores que determinam a vida média, já tratados por outros autores.

1. Introdução

São bem conhecidos os trilhos e mesas de ar usados no ensino de mecânica. A considerável diminuição no coeficiente de atrito, causada pelo colchão de ar, permite uma gama variada de experimentos com grande facilidade.

Neste trabalho, descrevemos alguns experimentos realizados com gotas de água que se deslocam sobre uma superfície aquosa. A vida média dessas gotas é estudada desde longa data, sendo que medidas quantitativas mais recentes foram descritas por Schottland¹ e Jayaratne e Mason². Esses autores se preocuparam, em primeiro lugar, com a eventual coalescência no primeiro impacto com a superfície da água. Aqui abordamos, principalmente, o deslizamento da gotícula, tendo em vista as aplicações didáticas desse fenômeno.

*Trabalho realizado sob os auspícios do CNPq, BNDE e FAPESP.

**Caixa Postal 369, 13560 – São Carlos SP.

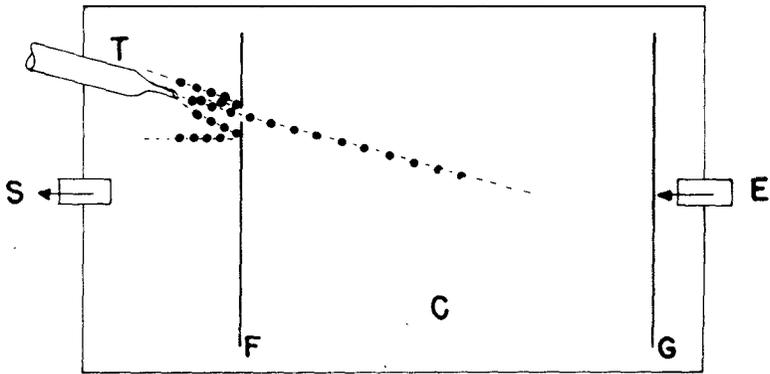


Fig. 1 – T – Tubo Gerador de gotas (mostrado em detalhe na Fig. 2). E e S – Entrada e saída de água ($\approx 0,1$ litros/mm) de modo a manter limpa a superfície de água na cuba. F – Fenda selecionadora de gotas. A placa F também tem, por finalidade, impedir que ondas se propaguem para a região C, onde se realizam os experimentos de interesse. G – A placa G tem por finalidade atenuar movimentos na região C da água que entra em E.

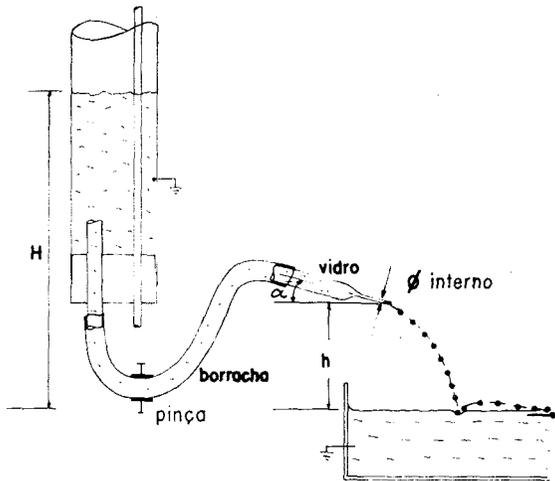


Fig. 2 – Dispositivo para obtenção das gotas. As gotas das fotografias, aqui apresentadas, foram obtidas com os valores $h \approx 2$ cm, $H \approx 60$ cm., $\alpha \approx 10^\circ$, $\Phi = 0,40$ mm. Outras combinações destes valores podem ser usadas.

Os experimentos que podem ser realizados, com esse arranjo, são em grande número. Muitos desses experimentos são similares aqueles que as mesas e trilhos permitem realizar e outros são particulares a esse tipo de arranjo experimental.

O objetivo deste trabalho é descrever um pequeno número desses experimentos, descrever o arranjo experimental, as técnicas de medida e alguns resultados quantitativos.

Como o custo por experimento é bastante baixo, acreditamos que este trabalho possa despertar interesse, vindo a possibilitar posteriores desenvolvimentos e aperfeiçoamentos do arranjo experimental.

2. Arranjo Experimental

Em uma cuba de água, como na Fig. 1, são geradas gotas de água através do tubo de vidro T , de onde escorre água em vazão controlada.

A Fig. 2 mostra, em detalhe, esse tubo e a formação de gotas. Essa formação depende do fluxo de água no tubo, da altura h e do ângulo α . Se h for excessivo, as gotas penetrarão na água por rompimento da película superficial. O ângulo α controla, juntamente com o fluxo, a velocidade horizontal das gotas geradas.

Vazões e alturas pequenas conduzem a gotas razoavelmente grandes e de baixa velocidade. Sob condições especiais, gotas som mais de 1 ml podem ser facilmente conseguidas. Nas Figs. 1 e 2, estão indicados os parâmetros para obtenção de gotas da ordem de 1 mm de diâmetro, com velocidades da ordem de 10 cm/s.

Duas condições são necessárias para que sejam formadas gotas grandes ou pequenas: limpeza e ausência de campo elétrico. A limpeza foi feita com o uso de detergente ou de permanganato de potássio, antes e, ou durante a formação de gotas. Esses agentes de limpeza podem ser adicionados ao líquido que flui pelo tubo T . Após a limpeza, água sem detergente ou permanganato pode ser usada. Entretanto, a adição de pequena quantidade de detergente, tanto à água em escoamento quanto a superfície da cuba, irá sempre aumentar o número de goticulas formadas. Um limite para a quantidade de detergente é dado pelo início da formação de bolhas.

A neutralidade elétrica é fundamental. Um pente plástico, eletrizado por fricção, cessa completamente a formação de gotas quando a distância inferior a 1 metro do tubo *T*. Esse efeito elétrico ocorre, tanto no processo de formação, quanto após. Efeitos elétricos entre gotículas já foram descritos por Lord Rayleigh³. Um modelo quantitativo é dado por Michael e O'Neil⁴.

As gotas formadas deslocam-se sobre a superfície da água até comprimentos da ordem de 30 cm. No processo de formação, gotas com diferentes diâmetros e velocidades são geradas, levando a ocorrência de choques. A gota e a superfície da água são separadas por uma película de ar. A expulsão dessa película de ar determina o tempo de vida da gota e o espaço que percorre. A Fig. 3 mostra uma gota grande, de velocidade quase nula. Esse formato pode ser facilmente observado a olho desarmado. O escoamento dessa película de ar continua até que a gota toque a superfície da água, quando então ocorre o colapso. (Esse colapso e o formato da gota podem ser seguidos com gotas coloridas de permanganato). O formato que adquire a superfície da água, devido ao peso da gota, faz com que uma gota maior possa crescer as custas de gotas menores que dela se aproximem. Assim aglomerados de gotas podem também ser formados, principalmente no final da trajetória das gotas. Isso é interessante sob vários aspectos.



Fig. 3 – A espessura da película de ar (mostrada em dimensões exageradas) determina o tempo de vida da gota e o valor da força de atrito.

3. Técnica de Medida

A medição quantitativa é feita por fotografia estroboscópica. Usou-se uma câmara fotográfica Pentax, filme de 124 ASA, abertura 1.4, total do diafragma, e um estroboscópio Strobotac 1531-AB da General Radio. A fim de evitar reflexos, o fundo da cuba foi recoberto por um papel fosco preto. O posicionamento adequado da lâmpada estroboscópica, em relação a superfície da água, permite que um destaque apropriado possa ser obtido para as gotas.

Várias fotografias foram tomadas e após observação por projeção ampliada do negativo, a trajetória das gotas foi marcada sobre uma folha branca e os eventos posteriormente estudados. As Figs. 4, 6 e 7 são ampliações dos negativos originais.

4. Resultados Quantitativos

A título de exemplo damos a análise quantitativa de dois experimentos.

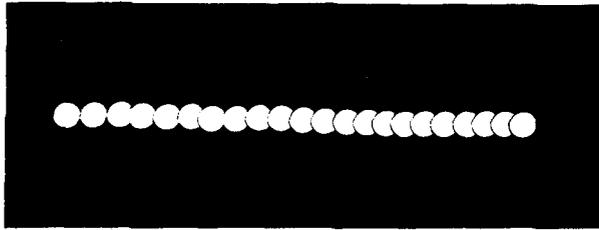


Fig. 4 – Fotografia estroboscópica (100 Hz), retocada, de uma gotícula com velocidade inicial de 7,2 cm/s. A retocagem visou apenas facilitar a reprodução neste trabalho, sendo que os dados, usados nos cálculos, foram tomados a partir da projeção do negativo original.

1. Movimento de uma gota. A fig. 4 mostra a trajetória de uma gota iluminada a intervalos de 10 ms, enquanto a Fig. 5 exibe a dependência da velocidade com o tempo. A força viscosa, responsável pela desaceleração da gota, pode ser escrita sob a forma $F = Cv^n$, onde C e n são constantes. Fazendo a hipótese de que o valor de n não depende da velocidade da partícula, podemos escrever que

$$\frac{dv}{dt} = -Bv^n, \quad (1)$$

$$v^{1-n} - v_0^{1-n} = -B(t - t_0). \quad (2)$$

O valor de n que satisfaz aos pontos experimentais e a equação (2), é $n = -1$, como mostra a Fig. 5. Assim, a força de atrito seria $F = -\frac{B}{v}$ isto é, aumenta para velocidades pequenas. Este resultado é compatível com o modelo proposto para o movimento da gota, sobre a superfície da água. Hasta admitirmos que a película de ar decresça com o tempo, tornando o "colchão de ar" cada vez menos efetivo.

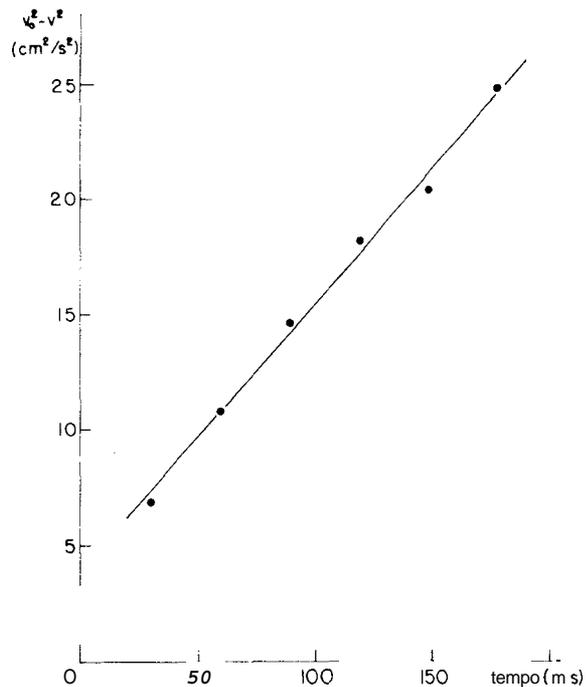


Fig. 5 - Análise da Fig. 4. Os dados foram tomados medindo-se cada terceira exposição. A partir deste gráfico, concluímos que o atrito deve ser inversamente proporcional à velocidade (vide texto).

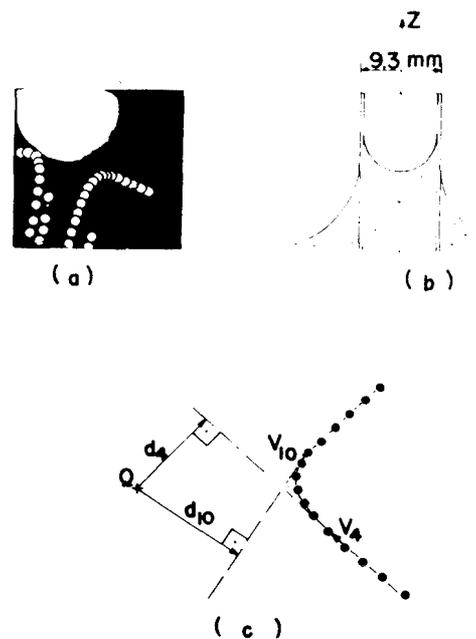


Fig. 6 - Fotografia estroboscópica (100 Hz), retocada, de uma partícula que se move em um campo central repulsivo (a). O campo é obtido pela deformação da superfície, provocada por um cilindro de vidro limpo (b). Se houver conservação do momento angular, será necessário que $v_i d_i = \text{constante}$ (c). O desenho (c) é uma ampliação, em escala, da Foto (a). Quanto à retocagem, vale também aqui a observação feita na legenda da Fig. 4.

2. Movimento de uma gota em um campo de forças centrais, repulsivas.

Um campo central repulsivo pode ser obtido com auxílio de uma deformação da superfície da água pela tensão superficial. (Fig. 6-b). Como a superfície da água será uma superfície de rotação ao redor do eixo z, e como a resultante das forças que atuam sobre a gotícula é dirigida conforme o gradiente daquela superfície, decorre que a força que atua sobre a gotícula será sempre radial, com origem sobre o eixo z. O movimento estará, assim, sujeito a uma força central, o que nos faz concluir que o momento angular será conservado.

A coluna das velocidades medidas, v' , Tabela 1, mostra que o valor final da velocidade não coincide, em módulo, com o valor inicial, devido a existência da força de atrito, não central. Iremos então corrigir esse valor, baseado no resultado anterior de que a força de atrito seja inversamente proporcional a velocidade e sempre tenha a direção desta. Chamando de v , a velocidade que a partícula teria se não existisse a força de atrito, podemos calcular a velocidade v' , observada, aplicando o teorema do impulso, lembrando que a força de atrito sempre só tem a componente intrínseca. Assim, obtemos que

$$v' = v - \int_0^t \frac{A}{v'} dt, \quad (3)$$

onde A é uma constante relacionada com a constante B da Eq. 1. No caso desta experiência, de resultados discretos, podemos então escrever, para $\Delta t = 1$,

$$v_t = v'_t + \sum_{i=1}^t \frac{A}{v'_i}. \quad (4)$$

A expressão 4 não é definida para $t=0$, quando $v_0 = v'_0$. No outro extremo da Tabela, podemos calcular a constante A , impondo a condição para a velocidade final $v_f = v_0$ e substituindo o respectivo valor de t (no nosso caso, com $t = 12$, obtivemos $A = 0,81$). Aplicando agora a Eq. 4, podemos calcular o valor da velocidade v e, a partir desta, e de d , o valor do momento angular l , o qual, como se observa, é constante, a menos dos erros experimentais.

Os erros são devidos, principalmente, a dificuldades na interpretação da fotografia e a pequenas ondas superficiais. Essas ondas não se manifestam, na fotografia, devido a múltipla exposição.

t	v'	$\frac{A}{v'}$	$\sum_1^t \frac{A}{v_i}$	v	d	1
0	7,5	—	—	7,5	2,5	19
1	7,0	<i>0,116</i>	<i>0,116</i>	7,1	2,5	18
2	6,5	<i>0,124</i>	<i>0,240</i>	6,7	2,6	17
3	6,5	<i>0,124</i>	<i>0,364</i>	6,9	2,7	19
4	5,5	<i>0,147</i>	<i>0,511</i>	6,0	3,1	19
5	4,8	<i>0,168</i>	<i>0,679</i>	5,5	3,3	18
6	4,0	<i>0,202</i>	<i>0,882</i>	4,9	3,6	18
7	3,5	<i>0,231</i>	<i>1,11</i>	4,6	4,3	20
8	3,6	<i>0,225</i>	<i>1,33</i>	4,9	3,9	19
9	4,2	<i>0,192</i>	<i>1,53</i>	5,7	3,3	19
10	4,6	<i>0,175</i>	<i>1,70</i>	6,3	2,8	18
11	5,5	<i>0,147</i>	<i>1,85</i>	7,3	2,5	18
12	5,5	<i>0,147</i>	<i>2,00</i>	7,5	2,5	19

Tabela 1 — Cálculo do momento angular, a partir dos dados da Fig. 6. Todas as grandezas estão em unidades arbitrárias. A coluna v' representa os valores medidos da velocidade, e a coluna v corresponde aos valores que obteremos se subtrairmos o efeito do atrito, que admitimos ser inversamente proporcional a velocidade. As colunas em itálico referem-se a passagens intermediárias do cálculo.

5. Outros Exemplos

Além dos dois exemplos apresentados, outras experiências podem ser realizadas com nosso equipamento, como: conceito de vida média², reflexão em uma barreira plana, choque entre partículas, interferência de partículas clássicas em duas fendas, simulação da experiência de Rutherford (Fig. 7), etc.

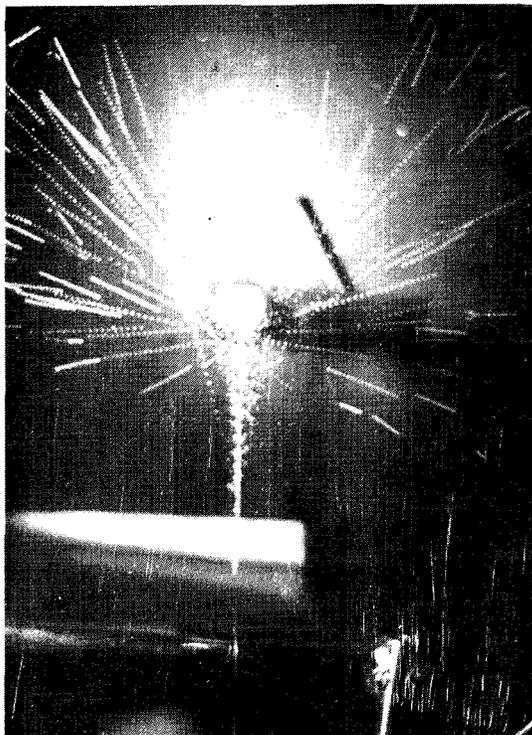


Fig. 7 – Simulação da Experiência de Rutherford. Esta fotografia não foi retocada

6. Conclusão

O sistema apresentado tem dois aspectos didáticos, interessantes: 1. iniciação à metodologia da pesquisa científica, em modelos simples sobre o mecanismo de sustentação, onde o fenômeno é acessível a estudantes de graduação. 2. Ilustração de fundamentos da mecânica,

como foi feito no exemplo quantitativo apresentado. Como o atrito dificilmente pode ser eliminado, a análise é um pouco mais complexa do que a de sistemas de mesa de ar, sendo mais apropriada para cursos universitários de introdução à mecânica ou então de mecânica geral.

Este trabalho foi iniciado, por estudantes de graduação, a partir da observação do fenômeno, sem conhecimento de modelos e bibliografia. Tomamos conhecimento, após a redação deste artigo, de trabalho publicado na revista *Scientific American*, aparentemente desenvolvido em condições semelhantes⁵. É de leitura recomendada, principalmente para estudantes, tanto pelo modelo alternativo, apresentado para o mecanismo de sustentação, quanto pelas experiências interessantes que propõe, como, por exemplo, a verificação da película de sustentação pela observação de anéis de Newton que se formam pela interferência da luz refletida nas duas superfícies que a limitam.

References

1. R. M. Schottland, *Disc. Faraday Soc.*, **30**, 72, 1960.
2. O. W. Jayaratne, B. J. Mason, *Proc. Roy. Soc.* **280**, 545, 1964.
3. Rayleigh, Lord (John William Strutt), *The Theory of Sound*, II, Dover Publications, New York, 1945, p. 369.
4. D. H. Michael, M. E. O'Neill, *J. Fluid Mech.* **41**, 571, 1970.
5. *The Amateur Scientist*, *Scientific American* **229** (2), 104, 1973.