

## EXPERIMENTO 2: MOVIMENTO RETILÍNEO EM MEIO FLUIDO

### OBJETIVO

- ✓ Analisar o movimento de um corpo em queda livre e depois em meio viscoso.

### PREPARAÇÃO

Um corpo se movendo no ar sofre uma força de arrasto devido ao atrito com o ar. Quando a altura de queda for pequena, de tal modo que a força de arrasto possa ser desprezada, dizemos que o corpo está em queda livre. Este mesmo corpo se movendo no interior de um fluido líquido, também sofre a ação de uma força de arrasto. Em ambos os casos, a força de arrasto  $\vec{F}_a$  é contrária ao deslocamento relativo do corpo em relação ao fluido.

Esta força resistiva é uma consequência da viscosidade do fluido (gases e líquidos). Em geral,

$$F_a = -bv^n \quad (1)$$

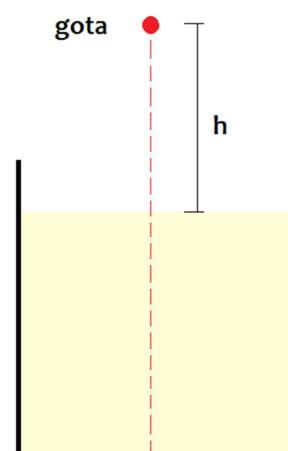
O sinal negativo na eq. (1) indica que a força de arrasto está no sentido contrário da velocidade da partícula. Para a maioria dos casos  $n$  é igual a 1 ou 2. No caso mais simples ( $n = 1$ ), arrasto linear, temos

$$F_a = -bv, \quad (2)$$

onde  $b$  é o coeficiente de arrasto. Esta aproximação é bem razoável para baixas velocidades. Para velocidades mais altas, podemos considerar que a força de arrasto é melhor descrita por uma função quadrática do módulo da velocidade,

$$F_a = -bv^2. \quad (3)$$

Neste experimento, uma gota de um líquido (solução supersaturada de água+sal e anilina usada como corante) será abandonada de uma altura  $h$  inicial (entre 10 e 15cm). Antes de atingir o fluido no recipiente (neste caso deve-se usar óleo de cozinha), será considerado que ela descreve um movimento de queda livre. Após atingir o meio fluido, de densidade menor que o da gota, a força de arrasto desempenha papel relevante no movimento da gota. Por simplicidade, suponha que as únicas forças atuando sobre a gota são a força gravitacional  $\mathbf{P}$  e a força de arrasto  $\mathbf{F}_a$ . Estamos desprezando a força de empuxo em nosso modelo. Aplicando-se a segunda lei de Newton à gota, quando está em movimento dentro do fluido, e lembrando que  $a = \frac{dv}{dt}$  temos:



$$\frac{dv(t)}{dt} = g - \frac{b}{m}v(t). \quad (4)$$

A solução desta equação diferencial linear de primeira ordem, fornece uma expressão para determinar a velocidade em função do tempo  $v(t)$ . Uma solução possível é:

$$v(t) = \frac{m}{b}g - e^{-\frac{b}{m}t} \left( \frac{m}{b}g - \sqrt{2gh} \right). \quad (5)$$

onde  $v(0) = \sqrt{2gh}$  é a velocidade que a gota atinge a superfície do fluido,  $h$  é a altura a partir da qual a gota foi abandonada em relação à superfície do fluido.

Note que, dentro do fluido, conforme  $t$  aumenta a aceleração diminui. A aceleração se aproxima de zero quando a força de arrasto se aproxima do peso da partícula. Portanto, no limite de  $t \rightarrow \infty$ , a velocidade  $v(t) \rightarrow cte$ . Esta é denominada velocidade terminal  $v_T$ :

$$v_T = \frac{m}{b}g. \quad (6)$$

onde a fração  $\frac{b}{m}$  tem unidade de 1/tempo. Na prática, não é necessário esperar um tempo “infinito” para que a gota atinja um alto percentual (99,99% por exemplo) da velocidade terminal.

## Questionário

Antes de começar as atividades práticas, discuta com seu grupo e responda as perguntas abaixo:

- 1 - Descreva qualitativamente o movimento (posição, velocidade e aceleração) da gota em queda e depois dentro do óleo.

- 2 - Represente todas as forças externas de que atuam na gota, durante o movimento de queda livre e também dentro do fluido. Em seguida, represente a reação de cada uma das forças.

- 3 - Aplique a segunda Lei de Newton ao movimento de queda livre da gota e determine uma expressão para calcular a velocidade quando atingir a superfície do fluido (óleo de cozinha).

- 4 - Aplique a segunda lei de Newton ao movimento da gota dentro do fluido e demonstre a equação (4). Despreze a força de empuxo.

- 5 - Opcional: Resolva a equação diferencial (4) para encontrar a expressão  $v(t)$  (5) que descreve a velocidade da gota dentro do fluido.

- 6 - Mostre que, para valores grandes de  $t$ , a expressão (5) se transforma na expressão (6).

- 7 - Explique o significado físico do inverso da constante  $b/m$  que aparece multiplicando o tempo no expoente da função exponencial.

## Referências

É recomendada a leitura das referências abaixo para uma revisão e compreensão da Segunda Lei de Newton:

- ✓ HALLIDAY, RESNICK & WALKER, **Fundamentos de Física**, Vol. 2, 8ª edição, LTC. Capítulo 6.
- ✓ TIPLER P. A. **Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**, Vol. 1, LTC. Capítulo 5.
- ✓ JEWETT JR, J.W. & SEAWAY, R. A. **Física para Cientistas e Engenheiro: Mecânica**. Vol. 1, 8ª edição CENGAGE Learning. Capítulo 6.
- ✓ [1] NEVES, U. M. das. **Estudo do movimento de um corpo sob ação de força viscosa usando uma porção de xampu, régua e relógio**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 3, p. 1-4, (2006). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/VsX8jNH63MrrBW96RyPms4z/abstract/?lang=pt> Acesso em julho de 2021.
- ✓ [2] ALONSO & FINN. Física: um curso universitário. Vol. 1, Edigar Blucher. Cap. 7.
- ✓ [2] **Tutorial do software Tracker**. Laboratório didático de Física. <http://www.if.ufrgs.br/cref/uab/lab/tracker.html>. Acesso em 08/12/2020.

## EXECUÇÃO

---

Para a realização do experimento, a lista de material é:

- ✓ Anilina vermelha (corante para alimentos);
- ✓ Sal;
- ✓ Câmera filmadora que pode ser a do celular;
- ✓ Fita crepe;
- ✓ Recipiente transparente liso e de boca larga (pode ser pote de azeitona).
- ✓ Óleo de soja novo (a quantidade depende do tamanho do recipiente);
- ✓ Régua;
- ✓ Suporte para régua, que pode ser a caixa de leite moça.
- ✓ Seringa 3 ou 5 ou 10ml ou conta gotas;
- ✓ *Software Tracker* instalado em um computador, para a análise do vídeo, disponível para download em <https://physlets.org/tracker/>.

Para a realização do experimento, visando a coleta de dados, proceda da seguinte forma:

- 8 - Coloque o óleo de soja no recipiente transparente liso e de boca larga. Em seguida, prenda a régua ao suporte e posicione ao lado do recipiente. A superfície do fluido (óleo de cozinha) deve estar no mesmo nível da lente da câmera filmadora. Siga as orientações no vídeo disponível no link: <https://youtu.be/NpVtC5P-mjw>
- 9 - Prenda a câmera filmadora (ou celular) a um tripé fixo simples, de modo que a lente esteja exatamente no mesmo nível que a superfície do óleo dentro do recipiente. Siga as orientações contidas no vídeo citado acima.
- 10 - Em um copo, misture aproximadamente 20ml de água e uma colher (de café) de sal, de modo a obter uma solução supersaturada de água+sal. Adicione umas 3 gotas de anilina para obter uma solução de cor vermelha.
- 11 - Aspire uma pequena quantidade desta solução com a seringa.
- 12 - Certifique-se de que a câmera filmadora (ou celular) esteja nas condições adequadas (de acordo com as orientações acima) e pronta para iniciar a gravação de um vídeo. *(Obs: O ambiente precisa estar bem iluminado, para garantir um vídeo de boa qualidade. Para isso, sugere-se fazer o vídeo de dia e com incidência direta da luz solar sobre o corpo que será filmado).*
- 13 - Posicione a seringa a uma altura aproximada de 10 a 15cm acima da superfície do líquido. Acione a gravação do vídeo e produza uma gota pressionando a seringa.
- 14 - Certifique-se de que a gota se moveu através do fluido e que as imagens do vídeo estejam de boa qualidade, permitindo a análise com o *software Tracker*. *(Obs: Pode ser necessário regravar o vídeo.)*

## ANÁLISE DOS DADOS

15 - Importe o vídeo para o software Tracker e colete os dados de acordo com as orientações contidas no vídeo disponível no link: <https://drive.google.com/file/d/1vN6q6UeZTQQ6ieARtoKBBxkmiTaWV4ES/view?usp=sharing>. Cada integrante do grupo deverá fazer separadamente este procedimento, usando o mesmo vídeo.

16 - Anote os valores de posição e velocidade (em função do tempo) na tabela abaixo:

Pontos experimentais		Dados do aluno 1		Dados do aluno 2		Dados do aluno 3	
Ponto $i$	$t_{1i}(s)$	$y_{1i}(mm)$	$v_{1i}(mm/s)$	$y_{2i}(mm)$	$v_{2i}(mm/s)$	$y_{3i}(mm)$	$v_{3i}(mm/s)$
1	0,000						
2	0,033						
3	0,067						
4	0,100						
5	0,133						
6	0,167						
7	0,200						
8	0,233						
9	0,267						
10	0,300						
11	0,333						
12	0,367						
13	0,400						
14	0,433						
15	0,467						
16	0,500						
17	0,533						
18	0,567						
19	0,600						
20	0,633						
21	0,667						
22	0,700						
23	0,733						
24	0,767						
25	0,800						

17 - Use algum programa de planilha eletrônica para plotar os gráficos de  $y \times t$  e de  $v \times t$  de todo o movimento da gota.

18 - Determine a velocidade terminal da gota se movendo dentro do óleo.

Velocidade (aluno1) = \_\_\_\_\_

Velocidade (aluno2) = \_\_\_\_\_

Velocidade (aluno3) = \_\_\_\_\_

19 - De posse desses valores, determine o valor médio da velocidade e de sua respectiva incerteza.

Velocidade terminal (gota no óleo) = \_\_\_\_\_  $\pm$  \_\_\_\_\_ mm/s

- 20 - Use o valor de  $g=(9,79\pm0,08)\text{m/s}^2$  e o valor da velocidade terminal para determinar o valor do inverso da constante  $b/m$  e de sua respectiva incerteza.

$$1/\frac{b}{m} = \text{_____} \pm \text{_____} \text{ s}$$

- 21 - Use o *Tracker* para fazer uma estimativa do intervalo de tempo gasto, e de sua respectiva incerteza, desde o momento que a gota entra em contato com o líquido até o momento que ela atinge a velocidade terminal dentro do óleo.

$$\Delta t = \text{_____} \pm \text{_____} \text{ s}$$

- 22 - Comente sobre os fatores que podem influenciar na determinação do valor da incerteza da velocidade terminal da gota.

- 23 - Comente sobre os fatores que podem influenciar na determinação do valor da incerteza do intervalo de tempo  $\Delta t$ .

## DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

- 24 - O inverso da constante  $b/m$  tem dimensão de tempo. Explique a relação, caso exista, entre o valor de  $b/m$  e o intervalo de tempo  $\Delta t$  estimado do evento que compreende o momento que a gota entra em contato com o líquido até o momento que ela atinge a velocidade terminal dentro do óleo. Eles deveriam ser iguais?

- 25 - Em algumas situações onde a força de resistência é muito grande, o corpo é levado rapidamente a um movimento com velocidade constante. É o caso, por exemplo, de um paraquedista em queda livre quando abre o paraquedas. A força de oposição ao movimento faz com que rapidamente a resultante das forças seja zero e que o

paraquedista desça suavemente com velocidade fixa. O caso da gota é bem parecido com o caso do paraquedas? Explique!

#### ATIVIDADES ADICIONAIS

---

26 - A equação (4) não leva em consideração a força de empuxo da gota dentro do fluido. Reescreva a equação levando-se em consideração a força de empuxo e deduza novamente uma expressão para o cálculo da velocidade da gota dentro do fluido.

27 - O valor da velocidade terminal é afetado significativamente pela força de empuxo? Ele poderia ter sido desprezado nos cálculos?

28 - A inclusão da força de empuxo impacta no valor da constante  $b/m$ ? Se sim, qual o novo valor dessa constante?