



Universidade de São Paulo Instituto de Física

4323201 Física Experimental A

NOTA

PROFESSOR

Equipe

1) Nome: No USP: Turma:

2) Nome: No USP: Data:

3) Nome: No USP: Mesa nº:

Movimento uniformemente acelerado – queda livre Guia de trabalho

Objetivos

Estudar o movimento de *queda livre* de um corpo:

- 1) Verificar a validade do modelo de queda livre para o arranjo experimental proposto e conferir se o empuxo e a força de atrito viscoso são desprezíveis;
- 2) Medir a aceleração da gravidade local g e compará-la com um valor de referência obtido pelo IAG nos Laboratórios Didáticos.

1. Introdução Teórica

Um corpo em queda na superfície da terra é submetido principalmente à ação da força gravitacional (força peso \vec{P}), ao empuxo \vec{E} e, para baixas velocidades, a uma força de atrito viscoso do tipo $\vec{F}_v = -b\vec{v}$, onde b é o coeficiente de atrito viscoso resultante da interação do corpo com o ar. Poderíamos ainda considerar outros fatores, porém esse não é o nosso objetivo e talvez isso não seja necessário. Formulando matematicamente as forças mencionadas acima, temos que a força resultante \vec{F}_R pode ser escrita na forma:

$$\vec{F}_R = \vec{P} - \vec{E} - \vec{F}_v \quad \text{ou ainda} \quad \vec{F}_R = m\vec{g} - m_{ar}\vec{g} - b\vec{v} \quad (1)$$

Na equação (1), m e m_{ar} são a massa do corpo e de ar deslocado pelo corpo, e podemos assumir duas hipóteses que podem nos ajudar a simplificar ainda mais o problema:

- A força gravitacional local é constante;
- O atrito viscoso e o empuxo são desprezíveis, isto é $|\vec{P}| \gg |\vec{E} + \vec{F}_v|$.

Neste caso, consideramos que a única força que atua no corpo é a força peso, e o experimento recebe a denominação de *queda livre* que será tratada a seguir. A partir das hipóteses acima, sabemos que a expressão da posição $s(t)$ e da velocidade $v(t)$ de um corpo em queda livre podem ser calculadas como

$$\vec{s}(t) = \vec{s}_0 + \vec{v}_0 \times (t - t_0) + \frac{\vec{a}}{2} \times (t - t_0)^2 \quad (2) \quad \text{e} \quad \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} \times (t - t_0) \quad (3)$$

onde s_0 e v_0 são, respectivamente, a posição e velocidade no tempo inicial t_0 , e a é a aceleração do corpo. Com base na teoria desenvolvida, nossos objetivos experimentais são:

- verificar se a força de atrito e o empuxo podem realmente ser desprezados;
- verificar se o movimento de um corpo em queda livre pode ser representado pelas equações (2) e (3).

2. O atrito viscoso

A força de atrito viscoso sobre uma pequena esfera em movimento em um meio viscoso (no ar, por exemplo) é dada pela equação de Stokes:

$$F_v = 6\pi\eta Rv \quad (4)$$

onde F_v é a força viscosa [N], η é a viscosidade dinâmica [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$], R é o raio da esfera [m] e v é a velocidade relativa entre a esfera e o fluido [m/s]. As condições necessárias para que a equação de Stokes seja válida são:

- o escoamento ocorre no regime laminar;
- o objeto em queda no fluido deve ser esférico, liso e feito de material homogêneo.

OBSERVAÇÃO: O corpo que usaremos não é esférico, nem homogêneo, e sua superfície não é lisa. Na experiência e hipótese de *queda livre*, talvez o escoamento em volta do corpo não esteja ocorrendo no regime laminar. Caso seja assim, podemos tentar estimar, através dos dados experimentais obtidos, um limite a partir do qual a força viscosa deva ser considerada, e tentaremos realizar a experiência abaixo desse limite.

3. Equipamento e Montagem Experimental

Nesta experiência, o corpo que sofrerá uma queda possui a forma de um elipsóide de revolução (parecido com um ovo) feito de material isolante, exceto por um fino anel condutor “*equatorial*”, que cai entre dois fios metálicos sem tocá-los. O corpo é mantido no topo de um trilho por meio de um eletroímã que é ligado através de uma chave (liga/desliga) no painel de uma fonte de potência. Ao pressionar o botão “faísca” na fonte, a corrente passando pelo eletroímã é interrompida, dando início à trajetória de queda, e pulsos de alta tensão são gerados entre os fios metálicos e conduzidos pelo anel condutor. As descargas elétricas entre os fios geram faíscas que marcam uma fita de papel termossensível fixada entre o corpo (ovo) e o fio metálico aterrado que está fixado no trilho. As marcas no papel indicam a posição do objeto no instante em que a faísca ocorreu. A fita de papel sensível (papel térmico de *fax*) deve ser fixada com a ajuda de fita crepe ao longo do trilho que dá suporte aos fios metálicos, conforme detalhado no guia de estudo. Os pulsos de alta tensão são gerados por um circuito elétrico (faiscador), em sintonia com a frequência da rede elétrica, $f = 60,0$ Hz. O intervalo de tempo entre duas faíscas consecutivas (e portanto também entre duas marcas consecutivas na fita) é dado por $\delta t = 1/60$ s.

4. Procedimento Experimental

Para realizar a experiência, sugerimos os seguintes passos:

- Alinhe o suporte dos fios na vertical com o fio de prumo (acionando os parafusos localizados nos pés do equipamento) e teste algumas quedas antes de colocar a fita.
OBSERVAÇÃO 1: Tome muito cuidado para não tomar um choque elétrico (20.000 V). Não deixe o eletroímã ligado por muito tempo ($t < 30 - 40$ s) para ele não queimar.
- Prenda a fita sensível no trilho, em cima e em baixo, com pequenos pedaços de fita crepe.
OBSERVAÇÃO 2: Coloque a fita sensível (bem esticada) por cima do fio aterrado e com o lado encerado (mais brilhante) virado para você.
- Posicione o corpo no topo do trilho, preso pelo eletroímã (a fonte deve estar ligada para ativar o eletroímã), e pressione o botão “faísca” **durante toda a queda** do corpo.
- Chame o professor para conferir se a fita contém pelo menos 20 pontos consecutivos sem falhas. A fita deve conter pequenos pontos alinhados e cada vez mais espaçados como mostrado abaixo:

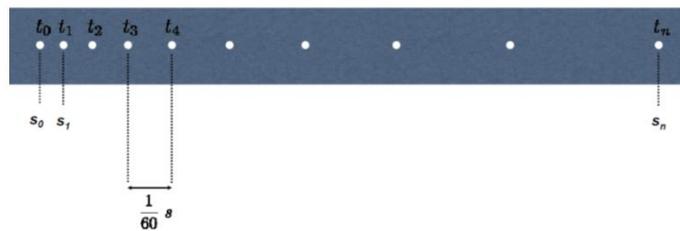


Figura 1: Ilustração da distribuição dos pontos gerados pelas faíscas na fita.

5. Análise de dados

- Estique a fita sobre uma mesa e prenda as extremidades dela com fita crepe. Selecione uma parte que contenha pelo menos 20 pontos consecutivos (sem falhas!!). Numere os pontos de 0 a 19 na fita (**19 em baixo!**) e atribua ao primeiro ponto (zero) o tempo $t=0$ s. Qual é a parte da fita que deve ser escolhida para isso?
- Vamos estudar o comportamento da velocidade do corpo em função do tempo (equação 3). Para isso, vamos preencher uma tabela com os tempos e os intervalos de distância percorridos pelo corpo, calcular a velocidade média em intervalos determinados e associá-la à velocidade instantânea no tempo médio (supondo que a aceleração seja constante). Meça os intervalos com uma régua. Para evitar dados correlacionados em uma mesma sequência, um mesmo ponto não deve pertencer a dois intervalos para que as velocidades médias sejam independentes. Para isso, podemos adotar os procedimentos de medida esquematizados na figura abaixo:

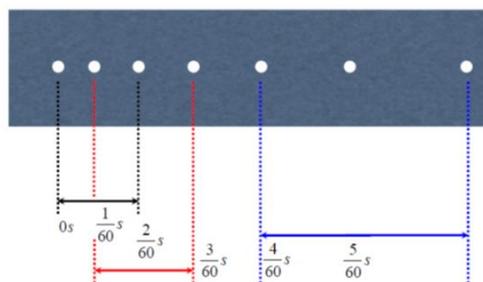


Figura 2: Exemplo de medidas não correlacionadas dos intervalos de distância.

Para um certo ponto n marcado no tempo $t_n = \frac{n}{60} s$, temos $\Delta s_n = s_{n+1} - s_{n-1}$,

$$\text{e } v_n(t_n) = \frac{\Delta s_n}{\Delta t_n}, \text{ onde } \Delta t_n = t_{n+1} - t_{n-1} = \frac{2}{60} s.$$

Q1. Para o preenchimento da tabela 1 abaixo, descreva aqui as incertezas que serão consideradas para a frequência da rede elétrica e para a medida dos intervalos Δs_n (justifique!). Em seguida, use o conceito de propagação de incerteza e mostre como obter as fórmulas para calcular a incerteza de t_n , Δt_n e v_n .

t_n (s)	σ_{t_n} (s)	Δs_n (cm)	$\sigma_{\Delta s_n}$ (cm)	$v_n = \Delta s_n / \Delta t_n$ (cm/s)	σ_{v_n} (cm/s)	$v_n \pm \sigma_{v_n}$ (cm/s)
$t_1 =$						
$t_2 =$						
$t_5 =$						
$t_6 =$						
$t_9 =$						
$t_{10} =$						
$t_{13} =$						
$t_{14} =$						
$t_{17} =$						
$t_{18} =$						

Tabela 1: Dados experimentais dos intervalos de distância Δs_n percorridos pelo corpo em função do tempo t_n , e cálculo da velocidade para o movimento de um corpo em queda.

Q2. Construa no Origin um gráfico da velocidade (eixo y, em m/s) em função do tempo (eixo x, em s), determine (explique como!) a aceleração da gravidade local e sua incerteza, e apresente-os corretamente ($g \pm \sigma_g$).

Q3. Foi possível ajustar uma reta nos seus dados? No gráfico inteiro ou só em parte dele? Por quê? Calcule o peso P do corpo, o empuxo E e a força máxima de atrito viscoso F_v do experimento para justificar a sua resposta (não precisa calcular as incertezas!). Para isso, procure na internet a densidade ρ e viscosidade dinâmica η (nas unidades corretas) do ar na temperatura da sua sala ($\approx 25^\circ\text{C}$), e veja qual raio do ovo considerar nos cálculos. Confira esses dados com o professor.

Q4. De acordo com a regressão linear do seu gráfico, qual é o valor da velocidade inicial v_0 ? Esse valor faz sentido? Por que não é nulo? Justifique.

Q5. Compare o valor da aceleração da gravidade local obtido pelo seu gráfico com o valor fornecido pelo IAG ($g=9,7864 \pm 0,0001 \text{ m/s}^2$). Os dois são compatíveis? Qual critério você usou para responder? Se não forem compatíveis, explique as possíveis razões.