

EXPERIMENTO 3: PÊNDULO SIMPLES

OBJETIVO

- ✓ Medir o valor da aceleração da gravidade local.

PREPARAÇÃO

CONCEITOS BÁSICOS

No vácuo, na ausência de forças dissipativas, um corpo de massa m suspenso por um fio fino (cuja massa possa ser desprezada) e inextensível, tal como mostrado na Figura ao lado, executaria um movimento harmônico simples, na condição da amplitude do movimento ser pequena. Nestas condições, o ângulo θ entre o fio e uma reta vertical da posição de equilíbrio do pêndulo deve ser menor que 10° . Neste caso, o período de oscilação será dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Em um movimento real, o ar atmosférico faz com que a oscilação torne-se amortecida e a amplitude decresce com o tempo. Mas, se a medida do período puder ser realizada em um intervalo de tempo de algumas poucas oscilações, os efeitos do amortecimento poderão ser desprezados para o cálculo da aceleração da gravidade.

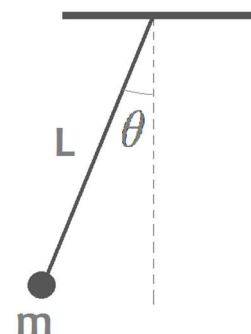


Figura: Esquema do pêndulo simples.

Questionário

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

- 1 - Represente todas as forças externas que atuam no objeto oscilante do pêndulo e a reação de cada uma das forças. Em seguida, aplique a segunda Lei de Newton para determinar a força restauradora atuando no pêndulo em algum ângulo θ de inclinação.

- 2 - Discuta porque a expressão que calcula o período T do pêndulo simples só é válida para ângulos de oscilação pequenos, ou seja, quando $\sin(\theta) \approx \theta$.

3 - Opcional: Aplique a segunda Lei de Newton ao movimento do pêndulo e mostre que

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

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, 9ª edição, LTC. Capítulo 15.
- ✓ TIPLER P. A. **Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**, Vol. 1, LTC. Capítulos 5 e 14 (p.477).
- ✓ ALONSO & FINN. Física: um curso universitário. Vol. 1, Edigar Blucher. Cap. 12.
- ✓ SOUZA, M. A. de e SANTOS, A. A. dos. *Absolute gravimetry on the Agulhas Negras calibration line*, Rev. Bras. Geof. 28, 165 (2010).

EXECUÇÃO

O material a ser utilizado para a realização deste procedimento experimental está listado abaixo:

- ✓ Pequeno pedaço de madeira, para servir de suporte para o pêndulo (pode ser um conjunto de uns 5 palitos de churrasco unidos com fita crepe).
- ✓ Um objeto esférico para servir de corpo oscilante de massa m (pode ser um limão ou laranja ou maçã).
- ✓ Barbante.
- ✓ Fita crepe.
- ✓ Régua.
- ✓ Trena ou metro.
- ✓ Uma câmera filmadora capaz de gravar vídeos de curta duração, que pode ser a do próprio celular.
- ✓ Software Tracker instalado em um computador, para a análise do vídeo, disponível para download em <https://physlets.org/tracker/>.
- ✓ Software SciDAVis instalado em um computador. Disponível para download em: <http://scidavis.sourceforge.net/>. Um tutorial sobre este programa pode ser baixado em: http://hpc.ct.utfpr.edu.br/~rsilva/Tutorial_SciDaVis.pdf.

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

- 4 - Fixe o suporte para o pêndulo com auxílio de fita crepe e algum objeto pesado (livros, jarro de plantas, etc)
- 5 - Corte um pedaço de barbante de aproximadamente 1,20 metros e amarre as duas pontas no suporte, deixando uma distância aproximada de 10cm entre um e outra amarração.
- 6 - Corte um pedaço de aproximadamente 30cm e amarre o objeto oscilante. Enrole um pedaço de fita crepe para ajudar a fixar o barbante no objeto oscilante. Em seguida, amarre-o no barbante preso ao suporte, de modo a montar o pêndulo. Siga as orientações do vídeo disponível no link: <https://youtu.be/aq5Vbhefjq4>. Segue também o link para algumas fotos que podem auxiliar nessa montagem: <https://drive.google.com/drive/folders/1pOyetlvklhyN12FEihwv4oaJdlCEwL5u?usp=sharing>
- 7 - Posicione a câmera, usando um tripé fixo simples, de modo que o plano da lente e o plano de oscilação do pêndulo sejam paralelos entre si. Garanta também que a câmera esteja no mesmo nível que o ponto central do objeto oscilante do pêndulo.
- 8 - Fixe a régua de modo visível no vídeo, também paralela à câmera e o mais próximo possível do objeto oscilante do pêndulo.
- 9 - Ponha o pêndulo para oscilar, com pequeno ângulo de oscilação (θ de no máximo 10°), e aguarde 1 minuto até que o movimento fique totalmente estável.
- 10 - Inicie o vídeo e deixe-o gravando no mínimo 70 oscilações completas. O ambiente precisa muito bem iluminado, para garantir um vídeo de boa qualidade. (Sugestão: Fazer o vídeo de dia e com incidência direta da luz solar sobre o objeto que será filmado. Sugere-se garantir a iluminação com uma luminária.).
- 11 - Certifique-se de que as imagens do vídeo estejam de boa qualidade e permitam a futura análise com o Tracker.
- 12 - Meça o comprimento do barbante do pêndulo e determine a incerteza da medida.
Comprimento do barbante $l = ______ \pm ______ \text{ mm}$
- 13 - Meça o diâmetro do objeto oscilante e determine a incerteza da medida.
Diâmetro do objeto oscilante $D = ______ \pm ______ \text{ mm}$
- 14 - Explique como procederam para determinar a incerteza do comprimento do barbante e do diâmetro do objeto oscilante.

- 15 - Determine o comprimento L do pêndulo e sua incerteza, somando o valor do comprimento do barbante com a metade do diâmetro.

Comprimento L do pêndulo e sua incerteza $L = ______ \pm ______ \text{ mm}$

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Parte 1 - Movimento harmônico simples

16 - Importe o vídeo para o Tracker e utilize a função *autotracker* para a coleta dos dados. Veja o vídeo com as orientações, disponível no link: <https://drive.google.com/file/d/1luV47yKmTMIqIVASdm9ZwxQyz6exSluY/view?usp=sharing>.

17 - De posse do gráfico automático de amplitude versus tempo do Tracker, use a tabela abaixo para registrar os 11 primeiros instantes de tempo em que o pêndulo atinge sua amplitude máxima.

Com estes valores, determine 10 valores para o período ($T_1 = t_1 - t_0$; $T_2 = \frac{t_2 - t_0}{2}$; $T_3 = \frac{t_3 - t_0}{3}$; ...) e registre-os na tabela abaixo:

Oscilação	Instante de tempo	Valor (s)	Período	Valor ($T_n = \frac{t_n - t_0}{n}$)(s)
0	t_0		---	
1	t_1		T_1	
2	t_2		T_2	
3	t_3		T_3	
4	t_4		T_4	
5	t_5		T_5	
6	t_6		T_6	
7	t_7		T_7	
8	t_8		T_8	
9	t_9		T_9	
10	t_{10}		T_{10}	

18 - Com os 10 valores calculados para o período, calcule o valor médio e sua respectiva incerteza.

Período $T = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}}$ s

19 - Calcule o valor da aceleração da gravidade usando a expressão $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ e sua respectiva incerteza.

Aceleração da gravidade $g = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}}$ m/s²

20 - Compare com o valor da aceleração da gravidade obtido com o valor de referência para Vitória-ES, fornecido pelo Observatório Nacional (www.on.br), que é de $g = (9,7864182 \pm 0,0000003) \text{ m/s}^2$. Aponte fatores que podem contribuir para a obtenção de um valor de incerteza muito maior que a de referência.

- 21 - Que modificações poderiam ser feitas no experimento para diminuir a incerteza na medida do valor de g ?

Parte 2 - Movimento harmônico amortecido

- 22 - O movimento real de um pêndulo é afetado pela força de atrito viscoso com o ar. Levando-se em consideração essa força de atrito, pode ser mostrado que a amplitude do movimento vai decaindo com o tempo de acordo com a expressão $A(t) = A_0 e^{-\left(\frac{b}{2m}\right)t} \cos(w't + \delta)$, onde A_0 é a amplitude inicial do movimento, b é o coeficiente de atrito viscoso entre o ar e o pêndulo, m é a massa do objeto oscilante, w' é a frequência das oscilações amortecidas e δ é uma constante arbitrária. De posse dessa expressão, é possível mostrar que o valor de g com amortecimento é dado por $g = L \left[\frac{4\pi^2}{T^2} + \left(\frac{b}{2m} \right)^2 \right]$.
- 23 - Tarefa optativa: Mostrar esta expressão para o cálculo de g , que leva em consideração a força de atrito viscoso com o ar.

- 24 - Novamente de posse do gráfico automático de amplitude versus tempo do Tracker, registre agora o intervalo de tempo decorrido a cada 10 oscilações (até a oscilação 70). Registre também o valor da amplitude $A(t)$ dessas oscilações. Veja o vídeo para orientações sobre a coleta destes dados, disponível neste link: https://drive.google.com/file/d/1y8TEHuoGGun2PBylO6F14Rho8fsnM3kH/view?usp=s_haring

Oscilação	Instante de tempo (s)	Amplitude $A(t)$ (mm)	$\ln[A(t)]$
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			

- 25 - Em seguida, calcule o valor de $\ln[A(t_i)]$ e use a mesma tabela para registrar estes valores. Atenção: O grupo deve compreender a necessidade desses cálculos para fazer a linearização da expressão que calcula a amplitude de oscilação do pêndulo.

- 26 - Use o programa SciDAVis (Veja o vídeo disponível no link para orientações de como instalar e usar esse programa: <https://drive.google.com/file/d/1vqjYwveUaYa957UbeNEPwrPoDxZsuorO/view?usp=sharing>) para plotar o gráfico de $\ln[A(t)]$ em função de t .

- 27 - Use o programa SciDAVis para determine o coeficiente angular da reta obtida, bem como sua respectiva incerteza.

Coeficiente angular = _____ \pm _____

- 28 - O que significa o valor do coeficiente angular encontrado? Qual a sua unidade?

- 29 - De posse desse termo proveniente do amortecimento, calcule novamente o valor da aceleração da gravidade, usando a expressão $g = L \left[\frac{4\pi^2}{T^2} + \left(\frac{b}{2m} \right)^2 \right]$ e também o valor da incerteza.

Aceleração da gravidade $g =$ _____ \pm _____ m/s^2

- 30 - Considerando as incertezas, compare o valor de g determinado **sem** e **com** o amortecimento. É possível dizer que são iguais? O amortecimento poderia ter sido desprezado no cálculo de g ? Justifique sua resposta.

- 31 - Escreva um breve relato da execução do experimento e das dificuldades encontradas pelo grupo na realização das atividades.

ATIVIDADES ADICIONAIS

Para aprofundar o entendimento do efeito da força de atrito sobre o movimento do pêndulo e do valor de g , siga as instruções a seguir:

- 32 - A força amortecedora é do atrito viscoso, e é dada por $\vec{F} = -b\vec{v}$. Para uma amplitude de oscilação de 20° , calcule o valor máximo da força restauradora. Para este cálculo,

será necessário conhecer o valor da massa do objeto (precisa de uma balança ou dinamômetro) oscilante e o valor da velocidade. Este último pode ser obtido derivando-se a expressão da amplitude.

33 - Em seguida, calcule o valor da força restauradora para este mesmo ângulo.

34 - Compare o valor dessas duas forças e discuta a influência na determinação do período de oscilação do pêndulo e da consequente determinação do valor de g .