

Estudo do Pêndulo Simples Utilizando o Tracker

Gedson Everton Dantas da Silva¹, Gustavo de Oliveira Gurgel Rebouças², Jusciane da Costa e Silva³

Resumo: Os movimentos oscilatórios estão presentes em nosso cotidiano de diversas formas, por exemplo, em um simples movimento como a corda de um violão, em estruturas de alvenaria como pontes e prédios, dentre outras. Compreender esses movimentos pode ainda se torna crucial para evitar prejuízos econômicos e sociais. Este artigo tem como objetivo realizar uma análise prática do Movimento Harmônico Simples, explorando-o por meio do pêndulo simples utilizando o Tracker, um *software* de vídeo análise. O propósito é examinar o comportamento desse oscilador e interpretar três propriedades fundamentais: a irrelevância da massa e a dependência do comprimento do pêndulo e da aceleração da gravidade para o período observado. Por meio dessa abordagem, pretende-se aprofundar o entendimento sobre o Movimento Harmônico Simples, destacando sua aplicação no estudo do pêndulo simples. Essa análise contribuirá para uma compreensão mais completa das propriedades do oscilador.

Palavras-chave: Movimento harmônico simples. Pêndulo. Gravidade. Senoidal. Tracker.

1. INTRODUÇÃO

O Movimento Harmônico Simples (MHS) é presença constante em nosso cotidiano, mesmo que muitas vezes despercebido está presente em diversos objetos e fenômenos. Imagine um artista em ação, utilizando um balde de tinta que balança suavemente de um lado para o outro, criando uma pintura que captura o movimento harmônico, elegância do balanço de um pêndulo de relógio, a oscilação tranquila de um lustre suspenso no teto e até mesmo o vaivém de uma gangorra no parque. São exemplos simples e recorrentes desse tipo de movimento (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2023). Esses casos, dentre outros, ilustra como o movimento harmônico está presente em situações do dia a dia, oferecendo-nos possibilidades concretas de observação e análise dos conceitos e leis associadas ao MHS.

O movimento harmônico simples possui uma importância maior do que se imagina, decorrente do fato de que o estudo do MHS consegue exemplificar uma das melhores aplicações das leis da mecânica no contexto da descrição e previsão dos movimentos oscilatórios, ilustrando um dos problemas da física, que é determinar a posição de uma partícula uma vez conhecidas as forças que atuam sobre ela. No entanto, o movimento harmônico simples ocorre em situações específicas. Ele está presente sempre que há uma força restauradora agindo sobre o corpo que apresente uma característica chamada comportamento elástico.

Quando um pêndulo é deslocado de sua posição de equilíbrio e liberado, ele executa oscilações livres, quando desconsideradas as forças dissipativas. Caso o pêndulo seja sujeito a impulsos externos periódicos, experimentaremos uma oscilação forçada, onde é essencial considerar não apenas o período dessas forças externas, mas também sua relação com o período natural das oscilações livres do sistema (NUSSENZVEIG, 2014).

Este artigo tem como objetivo estudar o movimento harmônico simples de um pêndulo utilizando o analisador de vídeo *Tracker*, que é uma ferramenta gratuita para análise e modelagem de vídeos construída na estrutura *Java Open Source Physics* (OSP), projetada especialmente para o ensino de física (PHYPHYSLETS, 2009).

A pesquisa se concentra nos resultados obtidos por meio do analisador em relação ao pêndulo simples, onde as forças de movimento são influenciadas pela gravidade. Para alcançar esse objetivo, será conduzida uma pesquisa bibliográfica sobre o movimento harmônico simples, abordando tanto os fundamentos teóricos quanto a metodologia empregada nos ensaios com o pêndulo simples. A metodologia será detalhada em um tópico específico, oferecendo uma descrição sobre os procedimentos adotados durante a análise. Ao unir os conhecimentos teóricos adquiridos na pesquisa bibliográfica com a aplicação prática por meio do analisador de vídeo *Tracker*, este estudo visa proporcionar uma análise do comportamento do pêndulo simples no contexto do movimento harmônico simples.

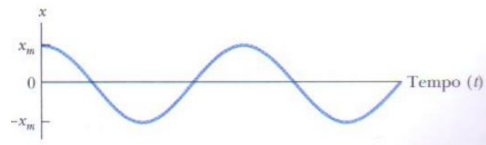
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O que é o movimento harmônico simples

O Movimento Harmônico Simples (MHS) caracteriza-se como um tipo de movimento oscilatório que ocorre quando um objeto se desloca em torno de uma posição de equilíbrio, seguindo uma lei de força restauradora proporcional à sua posição em relação a essa posição de equilíbrio. Esse padrão de movimento é observado em sistemas como massa-mola e pêndulos simples. Em um sistema oscilatório simples, a partícula em questão executa movimentos repetitivos de um lado para o outro a partir da origem do eixo x_m . Esse tipo de movimento é caracterizado por uma trajetória que se repete ao longo do tempo como mostra a figura 1, sendo o tempo de uma oscilação definido como período (T). E a frequência (f) é o número de oscilações por unidade de tempo, T (s) e f (Hz) se relacionam matematicamente da seguinte maneira:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Figura 1 - Deslocamento em relação ao tempo



Fonte: HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2023

A equação matemática que descreve a posição (x) em função do tempo (t) no MHS é uma função senoidal, *seno* ou *coseno*, dada por:

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

onde x_m é a amplitude da posição, dada por uma constante positiva e $-x_m \leq x(t) \leq x_m$, a fase do movimento é dada por ϕ , denominada como ângulo de fase, tendo seu valor dependendo do deslocamento e da velocidade da partícula (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2023). Já o ω é a frequência angular, que por sua vez é uma constante que está relacionada a frequência f , e sua unidade SI é radiano por segundo, portanto, ω é dado por:

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

Que influencia no tempo que a partícula completa um ciclo de oscilação, sendo assim, quanto maior a frequência, maior o número de oscilações em um mesmo intervalo de tempo. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2023).

No MHS, a energia mecânica do sistema é conservada, alterando entre energia potencial (U) dada por:

$$U = \frac{1}{2}kx^2 \quad (4)$$

e energia cinética, sendo a velocidade uma componente importante na energia cinética, dada por:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

Pela conservação da energia mecânica, E_m , para um sistema sem perdas de energia:

$$E_m = U + K \quad (6)$$

Entender como ela varia nos permite visualizar como a energia é convertida de cinética para potencial e vice-versa à medida que o objeto oscila. No ponto de equilíbrio, onde a velocidade é máxima, a energia do sistema é toda convertida, e nos pontos de máxima amplitude, onde a velocidade é nula, toda a energia é potencial. A velocidade é completamente influenciada pela força restauradora que age no MHS, que por sua vez, depende da posição do objeto em relação ao ponto de equilíbrio do sistema. Se derivarmos a equação (3), iremos obter uma expressão para a velocidade de um objeto em movimento harmônico simples (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2023):

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (7)$$

Associando a equação (7) com a equação (2) temos que a velocidade em função do tempo no MHS é dada por:

$$v(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \phi) \quad (8)$$

Junto a velocidade, a grandeza positiva ωx_m é chamada de amplitude de velocidade v_m , que é análoga à amplitude x_m , logo, $-v_m \leq v(t) \leq v_m$. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2023).

Fazendo a segunda derivada da equação (2) temos a aceleração do MHS em função do tempo dada por:

$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \phi) \quad (9)$$

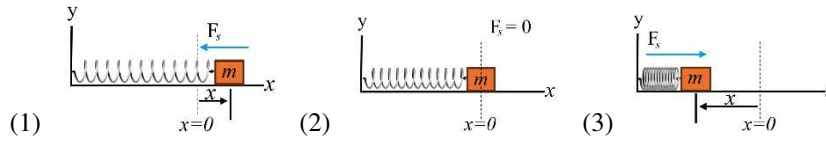
Sendo $\omega^2 x_m$ a amplitude de aceleração (a_m). Associando as equações (2) e (9), pode-se escrever a equação da aceleração em função da posição:

$$a(x) = -\omega^2 x \quad (10)$$

Neste caso a aceleração pode ser escrita em função do tempo ou em função da posição, o que não pode ser realizado com a velocidade dada pela equação (8).

2.2 Sistema massa-mola

Figura 2 – A figura mostra a ilustração de um sistema massa mola e a força restauradora em três posições.



Fonte: Autoria própria (2024)

O sistema massa-mola, apresentado na figura 2, é um modelo físico utilizado para descrever como comportam-se objetos que agem sob a influência de forças restauradoras, considerando que esse objeto seja composto por uma mola flexível de constante k e um corpo de massa m adicionado em sua extremidade, sendo assim, a lei de Hooke é fundamental para descrever o comportamento desse sistema, afirmando que a força restauradora F_r , é proporcionalmente e oposta ao deslocamento da massa a partir de sua posição de equilíbrio (SECO, 2012), logo:

$$F_r = -kx \quad (11)$$

Onde k é a constante elástica da mola, e o sinal negativo indica que o sentido da força é sempre contrário ao deslocamento, explicando o nome de força restauradora (SANTOS, 2019).

A Segunda Lei de Newton, fundamental na mecânica clássica, estabelece que a força resultante F_r atuando sobre um objeto é diretamente proporcional ao produto da massa m do objeto pela aceleração a que ele adquire. Em termos matemáticos pode ser expresso como (VEIT, MORS, TEODORO, 2002):

$$F_r = ma \quad (12)$$

Esta lei não apenas define a relação entre força e movimento, mas também introduz o conceito de massa como uma medida da inércia de um objeto, ou seja, uma resistência à mudança no estado de movimento do objeto. A aceleração que o objeto experimenta é diretamente proporcional à força resultante aplicada e inversamente proporcional à sua massa. Assim, a Segunda Lei de Newton nos fornece uma descrição quantitativamente precisa de como as forças afetam o movimento dos objetos (NUSSENZVEIG, 2014).

Associando as equações (10) e (9) temos

$$-kx = ma \quad (13)$$

Associando as equações (11) e (8) temos a relação:

$$k = \omega^2 m \quad (14)$$

que o módulo da frequência angular é dado por:

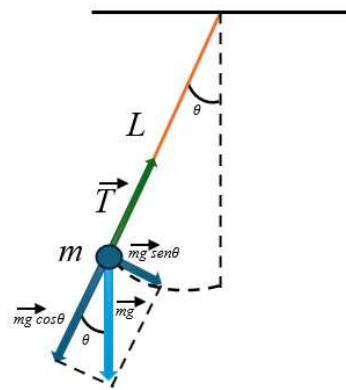
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (15)$$

Lembrado que de posse de ω podemos encontrar f e T usando as equações (1) e (3). Logo no oscilador massa-mola a frequência dependerá da constante da mola e da massa do objeto somente.

2.3 Pêndulo simples

O pêndulo simples é um dos instrumentos mais antigos para medir o ritmo do tempo. Ele é composto por um pequeno corpo de massa m preso em uma extremidade por uma haste, enquanto a outra extremidade do fio é fixada em um ponto que permite a livre movimentação do pêndulo, conforme mostra a Figura 3, (OLIVEIRA, 2020).

Figura 3 - Pêndulo Simples e o diagrama de forças que atuam sobre o objeto.



Fonte: Autoria própria (2024)

Ao oscilar em um campo gravitacional uniforme, o pêndulo apresenta oscilações isócronas, realizando-se com o mesmo período para pequenas amplitudes, tornando-o um precioso relógio que também pode ser usado para medir e aferir o campo gravitacional local. Para um pêndulo que oscila com amplitudes reduzidas, ou seja, pequenas oscilações, tipicamente com 10 graus em relação a vertical, a aproximação do seno do ângulo ($\sin \theta$) pelo próprio ângulo, ou seja, $\sin \theta \approx \theta$, se tornando bastante precisa. Essa simplificação é fundamental porque permite que a equação do movimento do pêndulo seja linearizada, resultando em uma forma que descreve o movimento harmônico simples, facilitando a análise e a solução

A posição do pêndulo é determinada, exclusivamente, pelo ângulo θ que o fio forma com a vertical, caracterizando esse sistema com um único grau de liberdade. Duas forças atuam na pequena massa suspensa: a tensão do fio (T), dirigida ao longo do fio em direção ao ponto de suspensão e a força peso (mg), vertical. A força que restaura a massa à sua posição de equilíbrio é a componente do peso tangente ao arco de circunferência que a massa percorre durante a oscilação, representada por $mg \sin \theta$, para pequenas oscilações, aproximamos $\sin(\theta) \approx \theta = \frac{S}{L}$, em que S é o arco da circunferência medido a partir da posição de equilíbrio (ou seja, da vertical). Nessa condição, o arco coincide com a corda (x), resultando na força restauradora escrita como:

$$F = -\frac{mg}{L}x \quad (16)$$

Com o sinal indicando que a força atua em direção à origem tanto quando $x > 0$ quanto quando $x < 0$. Se comparada a equação (14) com a equação (9), temos que a o termo que multiplica x na equação (14) equivale a constante elástica da equação (9), ou seja:

$$k = \frac{mg}{L} \quad (17)$$

Comparando (15) com a equação (13) temos que a frequência angular do pêndulo será dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (18)$$

E conseqüentemente o período será:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (19)$$

Importante verificar que diferente do sistema massa mola o pêndulo simples não tem seu período de oscilação dependente massa do sistema, somente do comprimento do fio e da aceleração da gravidade (YOUNG; FREEDMAN, 2015).

3. ANALISADOR DE VÍDEO TRACKER

O Tracker como mostra a figura 4, é uma ferramenta de análise de vídeo e modelagem gratuita e de código aberto que é amplamente utilizada para fins educacionais e de pesquisa. É particularmente popular entre físicos, engenheiros e educadores devido à sua capacidade de capturar e gerar dados do movimento em vídeos. O Tracker permite aos usuários sobrepor gráficos, desenhos animados e modelos teóricos aos vídeos para visualizar e analisar fisicamente os dados de movimento. Dentre as principais características e funcionalidades do Tracker, destacam-se: Modelagem de movimento para aplicações na física, Modelagem dinâmica, Ferramentas de anotação, Exportação de dados, Compatibilidade, Comunidade e Suporte, (PHYPHYSLETS, 2009).

Figura 4 - Identidade do Tracker



Fonte: PHYPHYSLETS, 2009.

Além das funcionalidades avançadas, um dos aspectos mais louváveis desse *software* é sua interface relativamente simples. Essa simplicidade desempenha um papel crucial na facilitação da aprendizagem e na utilização eficaz do aplicativo, especialmente para aqueles que estão se aventurando pela primeira vez no campo da análise de movimento físico através de vídeos.

A interface do Tracker foi projetada para ser intuitiva, permitindo que usuários com um certo nível de habilidade possam navegar e utilizar suas diversas funcionalidades sem enfrentar uma curva de aprendizado íngreme. Isso significa que estudantes, educadores e pesquisadores podem concentrar-se mais no conteúdo de sua investigação e menos em como operar o software em si. Tal abordagem reduz significativamente o tempo necessário para se familiarizar com o aplicativo, tornando a experiência de aprendizado mais agradável e produtiva. Tendo uma comunidade

bastante ativa, torna fácil achar tutoriais que possam ajudar novos ingressantes a darem os primeiros passos ou alguém que quer se aprofundar ainda mais no *software* aprender algo mais avançado, bastando uma breve pesquisa para encontrar o que procura.

Neste trabalho, o Tracker será utilizado para o estudo do MHS, no que toca a posição temporal do pêndulo.

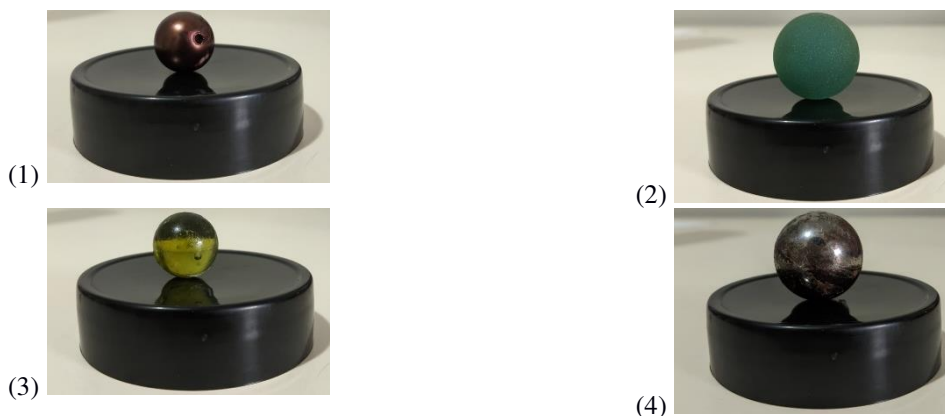
4. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO COM PÊNDULO SIMPLES

O experimento proposto visa investigar o comportamento do MHS de um pêndulo simples utilizando o Tracker, além de encontrar o valor da gravidade de forma experimental com os dados coletados por meio da captura de dados. Para tanto, empregaremos uma metodologia que permite a análise do MHS sob diferentes condições de massa e comprimento do fio, de forma a observar as influências destas variáveis na periodicidade do movimento pendular. A seguir, descreve-se detalhadamente os materiais e a metodologia empregados no experimento.

4.1 Esferas utilizadas no pêndulo

Para os pêndulos simples foram utilizados os seguintes objetos disponíveis apresentados na figura 5. Quatro objetos de diferentes massas serão utilizados em cada um dos comprimentos de fio. As esferas são apresentadas na figura 2, sendo: (1) uma miçanga redonda (4.0 gramas), (2) uma bola de silicone (8.0 gramas), (3) uma bola de gude (9.0 gramas), e (4) uma esfera de metal (66.0 gramas).

Figura 5 – Massas utilizadas nos experimentos.



Fonte: Autoria própria (2024).

A massa mais substancial oferece uma visão clara de como pêndulos mais massivos se comportam, destacando diferenças notáveis em comparação com massas mais leves.

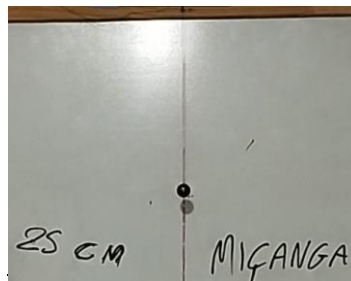
4.2 Comprimentos variáveis e eixo de fixação

Para investigar a influência dos comprimentos na dinâmica do pêndulo, serão utilizadas linhas de *nylon* com espessura de 0.2 mm com quatro tamanhos distintos: 25 cm, 50 cm, 75 cm e 100 cm. Cada comprimento representará uma variável independente no experimento, permitindo a análise da relação entre o comprimento do fio e as características do movimento. Para cada um dos comprimentos especificados, serão realizados experimentos com cada uma das quatro massas.

Assim, para cada combinação de massa e comprimento do fio, o pêndulo será montado fixando-se a linha no eixo (prego) na parede, e a massa selecionada será presa à extremidade livre da linha.

A escolha da linha de nylon deve-se à sua baixa elasticidade, por ser um material de fácil acesso, leveza e resistência, garantindo que o comprimento do pêndulo permaneça constante durante os experimentos sem que a linha influencie no movimento do pêndulo. Um prego será utilizado como eixo de fixação para o pêndulo na parede, garantindo que a massa pendular esteja a uma distância segura do quadro, não permitindo que se choque contra a parede, havendo assim uma desaceleração do pêndulo. Esse eixo permitirá o movimento livre da linha e da massa do pêndulo mostrado na figura 6.

Figura 6 - Pêndulo montado

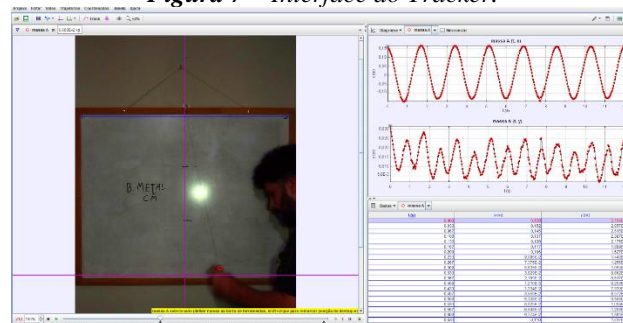


Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 Análise de dados

As filmagens foram realizadas com uso de celulares e analisadas utilizando o *software* Tracker, que permitirá medir com certa precisão a posição em função do tempo e consequentemente identificar o período e a amplitude do movimento oscilatório para cada uma das configurações de massa e comprimento do fio. A Figura 7 apresenta a interface do Tracker com um vídeo sendo analisado. Além de fornecer o gráfico senoidal de cada experimento, também fornecerá os dados necessários para compreender a equação (2) do MHS fornecendo os parâmetros de interesse: x_m , ω , e ϕ . Os dados serão fundamentais para a investigação das propriedades do movimento harmônico simples e para verificar a validade das leis físicas que descrevem o comportamento do pêndulo simples.

Figura 7 – Interface do Tracker.



Fonte: Autoria própria (2024).

Este experimento proporcionará uma compreensão sobre como diferentes massas e comprimentos de fio influenciam o período do movimento harmônico simples de um pêndulo, além de permitir uma investigação detalhada das características deste fenômeno físico com a precisão do ângulo inicial padronizado.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para cada comprimento de linha especificado, serão realizados experimentos com cada uma das quatro massas. O pêndulo será montado fixando a linha no eixo, utilizando um prego na parede, e a massa selecionada será presa à extremidade livre da linha. O pêndulo será deslocado de acordo com a figura 8 de sua posição de equilíbrio e solto de um ângulo inicial da ordem de 10° ou 0.17rad , que satisfaz a oscilação para as leis do pêndulo simples, sem impulso inicial, para iniciar o movimento oscilatório.

Figura 8 - Pêndulo deslocado



Fonte: Autoria própria (2024).

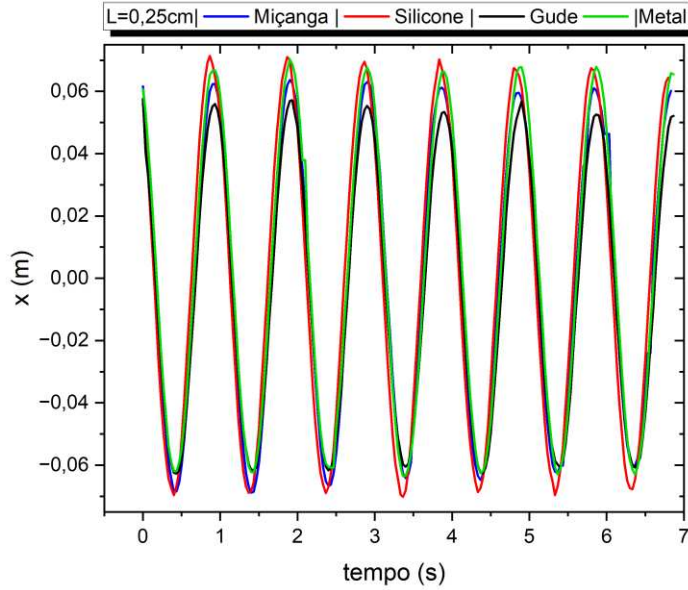
Cada sessão será filmada por um intervalo de tempo correspondente a sete oscilações completas do pêndulo, com um quadro de fundo que facilite a visualização do movimento e a coleta de dados pelo Tracker.

5.1 Pêndulos $L=0.25\text{ m}$

Seguindo essa metodologia, demos início à prática experimental com o pêndulo configurado para 25 cm de comprimento, utilizando as quatro massas correspondentes. Ele foi então colocado em oscilação com um deslocamento inicial de $4,34\text{ cm}$ no eixo- x , o que equivale a um ângulo de 10° .

A posição em função do tempo para os três objetos é apresentado na figura 9. Conforme esperado os gráficos se sobrepõem e mantêm aproximadamente a mesma oscilação.

Figura 9 – Gráfico senoidal para o comprimento de 25 cm



Fonte: Autoria própria (2024).

As equações de movimento das quatro esferas, indicadas pelos índices, são, em unidades dos SI, respectivamente:

$$x_{mic}(t) = 0.064\cos(6,362t) \quad (20)$$

$$x_{sil}(t) = 0.069\cos(6,357t) \quad (21)$$

$$x_{gud}(t) = 0.059\cos(6,345t) \quad (22)$$

$$x_{met}(t) = 0.065\cos(6,342t) \quad (23)$$

A aceleração média para os 4 pêndulos foi:

$$a_{25} = 10,09 \pm 0,28 \text{ m/s}^2 \quad (24)$$

O erro na medida é calculado usando $erro = \pm(média - valor \text{ exato})$, o valor exato da aceleração foi usado $9,81 \text{ m/s}^2$. E a média foi obtida pela equação (18), dos quatro valores supracitados.

5.2 Pêndulos L=0.50 m

Para o pêndulo com $L=0,50 \text{ m}$ com deslocamento de $8,68 \text{ cm}$ no eixo- x , obtivemos as seguintes equações de movimento:

As equações de movimento das quatro esferas, indicadas pelos índices, são, em unidades dos SI, respectivamente:

$$x_{mic}(t) = 0.096\cos(4,462t) \quad (25)$$

$$x_{sil}(t) = 0.101\cos(4,483t) \quad (26)$$

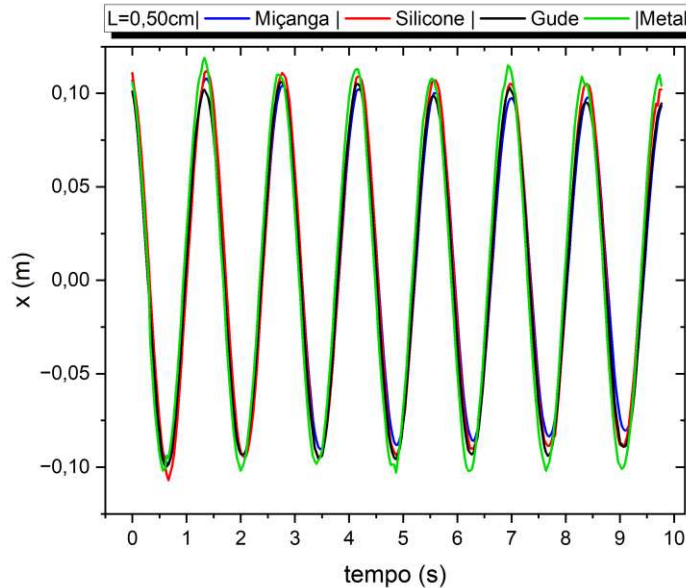
$$x_{gud}(t) = 0.106\cos(4,471t) \quad (27)$$

$$x_{met}(t) = 0.098\cos(4,462t) \quad (28)$$

A aceleração média para os 4 pêndulos foi:

$$a_{50} = 9,98 \pm 0,17 \text{ m/s}^2 \quad (29)$$

Figura 10 – Gráfico senoidal para o comprimento de 50 cm.



Fonte: Autoria própria (2024)

5.3 Pêndulos L=0.75 m

Prosseguindo com o experimento, agora configuramos o pêndulo com comprimento de 75cm. Mantendo as mesmas quatro massas utilizadas anteriormente, iniciamos a oscilação com um deslocamento de 13,02 cm no eixo-x, correspondendo a um ângulo inicial de 10° adequado para um pêndulo de 75 cm. Com isso, obtemos um conjunto de dados que gerou o gráfico senoidal, que pode ser visto na Figura 11.

Do mesmo encontramos as seguintes equações de movimento:

$$x_{mic}(t) = 0.135\cos(3,634t) \quad (30)$$

$$x_{sil}(t) = 0.140\cos(3,646t) \quad (31)$$

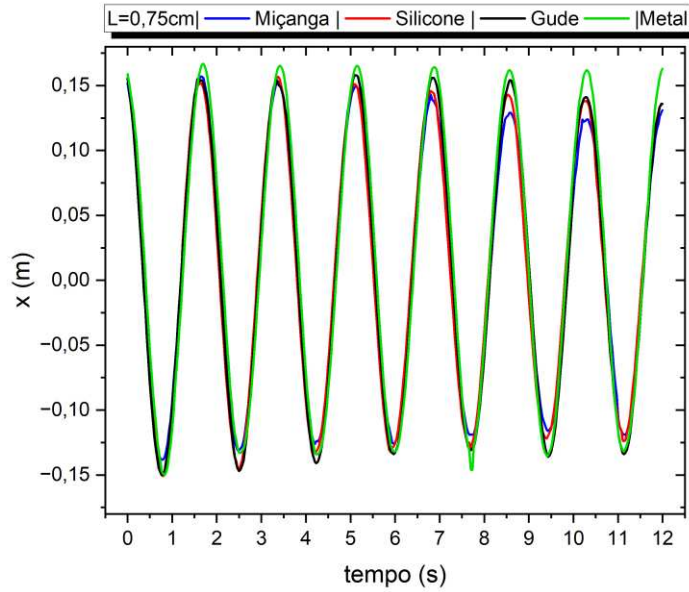
$$x_{gud}(t) = 0.150\cos(3,652t) \quad (32)$$

$$x_{met}(t) = 0.146\cos(6,632t) \quad (33)$$

A aceleração média para os 4 pêndulos foi:

$$a_{75} = 9,95 \pm 0,14 \text{ m/s}^2 \quad (34)$$

Figura 11 – Gráfico senoidal para o comprimento de 75 cm.



Fonte: Autoria própria (2024)

5.4 Pêndulos L=1.00 m

Ao analisar o pêndulo com comprimento de 100 cm, utilizando as mesmas quatro massas empregadas anteriormente, o deslocamento será de 17,36 cm no eixo-x, correspondendo a um ângulo inicial de 10° apropriado para um pêndulo com 100 cm de altura. A partir disso, obteremos um conjunto de dados que gerou a Figura 12.

E foram obtidas as seguintes equações de movimento:

$$x_{mic}(t) = 0.166\cos(3,153t) \quad (35)$$

$$x_{sil}(t) = 0.185\cos(3,159t) \quad (36)$$

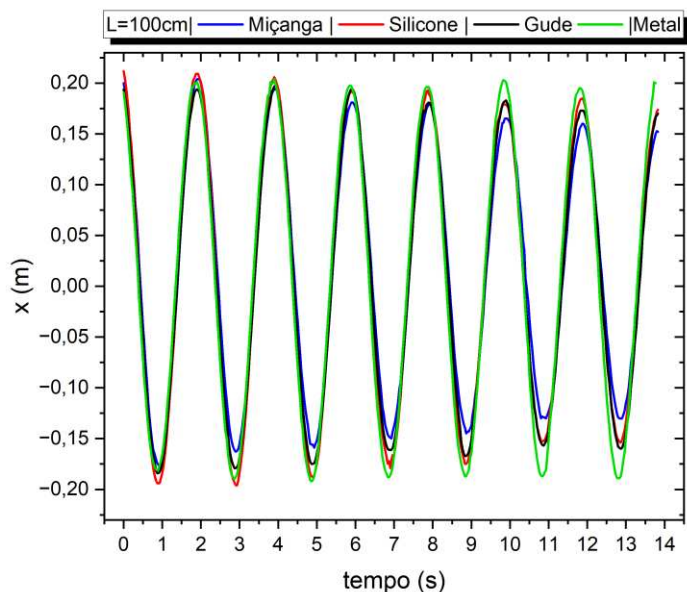
$$x_{gud}(t) = 0.194\cos(3,157t) \quad (37)$$

$$x_{met}(t) = 0.178\cos(3,153t) \quad (38)$$

A aceleração média para os 4 pêndulos foi:

$$a_{100} = 9,95 \pm 0,14 \text{ m/s}^2 \quad (39)$$

Figura 12 – Gráfico senoidal para o comprimento de 100 cm.



Fonte: Autoria própria (2024)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões do estudo sobre o movimento harmônico em um pêndulo simples foram altamente positivas, especialmente em relação à gravidade. O experimento demonstrou uma eficácia significativa na determinação da gravidade, obtendo um erro muito baixo ao calcular a aceleração para os diferentes comprimentos de L . Além disso, o estudo confirmou o efeito esperado da independência da massa no período para um mesmo comprimento de L , validando a teoria do movimento harmônico simples.

A ferramenta Tracker foi fundamental para o sucesso do experimento, oferecendo precisão, facilidade de uso e baixa complexidade. Embora seja possível realizar o experimento sem auxílio do Tracker na captura desses dados, tornaria o experimento bem mais demorado e complexo. Sua capacidade de rastreamento preciso dos pontos do pêndulo, a geração de gráficos e equações foram fundamentais para a obtenção de resultados confiáveis. Além disso, a versatilidade do Tracker permite sua aplicação em outros estudos da física em diversos contextos acadêmicos e educacionais.

Em resumo, o experimento confirmou a validade do movimento harmônico em pêndulos simples, demonstrando a precisão e eficácia do Tracker na obtenção de resultados confiáveis. A confirmação do efeito da independência da massa no período para um mesmo comprimento de L é uma contribuição importante para a física, principalmente no âmbito da mecânica, validando a teoria da oscilação e demonstrando a utilidade do Tracker como ferramenta de análise.

REFERÊNCIAS

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica - Volume 2. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2023. E-book. ISBN 9788521638568. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638568/>. Acesso em: 14 fev. 2024.

Nussenzveig, Herch M. Curso de física básica. Disponível em: Minha Biblioteca, (2nd edição). Editora Blucher, 2014.

OLIVEIRA, Eduardo Fernandes de. Estudo do período do pêndulo simples dependente da amplitude de oscilação. 2020.

PhyPhyslets. Tracker: Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education. Disponível em: <https://physlets.org/tracker/>. Acesso em: 14/02/2024.

SECO, Sônia Maria Pereira. **Sistema massa-mola**. 2012. Dissertação de Mestrado.

SANTOS, Gedeel et al. Sequência de ensino investigativa para o ensino da lei de Hooke e movimento harmônico simples: uso do aplicativo Phyphox, o simulador Phet e GIF's. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 31, n. 2, p. 91-108, 2019.

VEIT, E. A.; MORS, P. M.; TEODORO, V. D. Ilustrando a Segunda Lei de Newton no Século XXI. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, p. 176–184, jun. 2002.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Sears and Zemansky física II: termodinâmica e ondas**. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 04 abr. 2024.