



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE CIÊNCIAS MOLECULARES**

Nota: 8,5/10

Carol Carvalho do Vale - 14563828
Carolina Gosling do Amaral - 15651220
Giovana Nogueira Rodrigues - 14574316
Hillary Dandara Elias Gabriel -13684922

RELATÓRIO DE AULA PRÁTICA EM LABORATÓRIO

Demonstração 4 - Corda Vibrante, Molas e Ondulatória

São Paulo

2025

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. DEMONSTRAÇÃO 1: Sistema Massa e Mola.....	5
2.1. Metodologia.....	5
2.2. Resultados.....	5
2.3. Discussão.....	8
2.4. Conclusão.....	8
3. DEMONSTRAÇÃO 2: Pêndulo de Wilberforce.....	10
3.1. Metodologia.....	10
3.2. Resultados.....	11
3.3. Discussão.....	12
3.4. Conclusão.....	13
4. DEMONSTRAÇÃO 3: Pêndulo de torção.....	14
4.1. Metodologia.....	14
4.2. Resultados.....	15
4.3. Discussão.....	15
4.4. Conclusão.....	16
5. DEMONSTRAÇÃO 4: Propagação de onda na longitudinal e na transversal em molas.....	17
5.1. Metodologia.....	17
5.2. Resultados.....	18
5.3. Discussão.....	19
5.4. Conclusão.....	20
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20

1. INTRODUÇÃO

Movimentos oscilatórios periódicos estão presentes em uma ampla variedade de fenômenos naturais e tecnológicos, desde ciclos biológicos até dispositivos eletrônicos modernos. Para o estudo dessas oscilações, pode-se utilizar sistemas físicos simplificados que evidenciem suas propriedades fundamentais. Um exemplo clássico é o sistema massa-mola, em que um corpo de massa m é acoplado a uma mola de massa desprezível. As oscilações desse sistema podem ser descritas por uma única coordenada: o deslocamento ($x - x_0$) do corpo em relação à posição de equilíbrio x_0 (NUSSENZVEIG, 1996).

Quando o corpo é deslocado, surge uma força restauradora ($F(x)$), que, para pequenos deslocamentos, segue a relação da Lei de Hooke:

$$F(x) = -kx \quad (1)$$

onde k é a constante elástica da mola, medida em N/m (NUSSENZVEIG, 1996). Ao combinar essa relação com a segunda lei de Newton, obtém-se a equação do movimento:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} \Rightarrow m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx \quad (2)$$

Essa equação descreve o oscilador harmônico simples, cujo comportamento é conhecido como movimento harmônico simples (MHS). Vários sistemas físicos que apresentam pequenas oscilações em torno de uma posição de equilíbrio estável podem ser modelados por essa equação (NUSSENZVEIG, 1996).

A frequência f das oscilações está relacionada ao período T por $f = \frac{1}{T}$ (3), e também se relaciona à constante elástica k e à massa m por: $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ (4), onde $k = (2\pi f)^2 \cdot m$ (5).

Essa última expressão permite determinar a constante elástica da mola a partir da frequência medida das oscilações e da massa utilizada (NUSSENZVEIG, 1996).

Outro sistema oscilatório relevante é o pêndulo de Wilberforce, que permite estudar a transferência de energia entre dois modos distintos de oscilação: o movimento longitudinal, ou vai-e-vem vertical, e o movimento torcional, ou rotação em torno do próprio eixo (WILBERFORCE, 1894, p. 35). O acoplamento entre esses modos ocorre quando a mola helicoidal utilizada pode tanto se alongar quanto torcer, permitindo a transferência cíclica de

energia entre os dois tipos de movimento (CRAWFORD, 1968, p. 213). O peso preso à extremidade da mola pode gerar um torque quando não está simetricamente distribuído, iniciando um movimento rotacional mesmo que o impulso inicial tenha sido exclusivamente vertical (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 381). Esse tipo de comportamento é relevante para compreender sistemas reais com vibrações acopladas, como motores ou máquinas de lavar.

O pêndulo de torção, por sua vez, é um sistema oscilatório angular que também pode ser descrito como um oscilador harmônico simples, mas no contexto rotacional. Nele, uma haste ou disco metálico gira em torno de seu eixo sustentado por um fio que impõe um torque restaurador proporcional ao deslocamento angular: $\tau = -\kappa\theta$ (6), onde τ é o torque restaurador, κ é a constante de torção do fio e θ é o deslocamento angular (NUSSENZVEIG, 1996, p. 95-97). Quando o sistema está inserido em um meio resistivo, como um líquido viscoso, observa-se o fenômeno do amortecimento, no qual a energia mecânica é dissipada por forças resistivas proporcionais à velocidade angular. Nessa situação, o movimento é regido pela equação do oscilador harmônico amortecido:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + k\theta = 0 \quad (7)$$

em que I é o momento de inércia do corpo, b é o coeficiente de amortecimento viscoso e κ a constante de torção (NUSSENZVEIG, 1996, p. 181). No regime subamortecido, as oscilações persistem, mas com amplitude decrescente exponencialmente com o tempo.

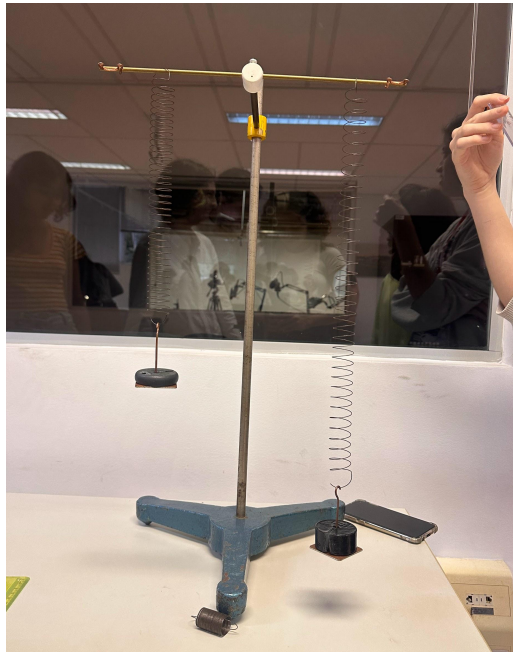
O estudo do pêndulo de torção é fundamental para a compreensão de fenômenos envolvendo torção e dissipação de energia em sistemas físicos e tecnológicos, como sensores de torque, mecanismos de relógios antigos e sismógrafos. O experimento realizado teve como objetivo observar a dinâmica desse pêndulo oscilando em dois meios distintos - ar e óleo - com foco na análise do amortecimento e na comparação com os modelos teóricos previstos para sistemas oscilatórios dissipativos.

2. DEMONSTRAÇÃO 1: Sistema Massa e Mola

2.1. Metodologia

Para este experimento foram utilizados: 2 molas diferentes, um suporte para pendurar as molas, dois objetos sendo um com massa de 200g e outro com massa de 100g, que foram acoplados à mola através do uso de um suporte.

Imagem 1: Suporte para pendurar molas com pesos.



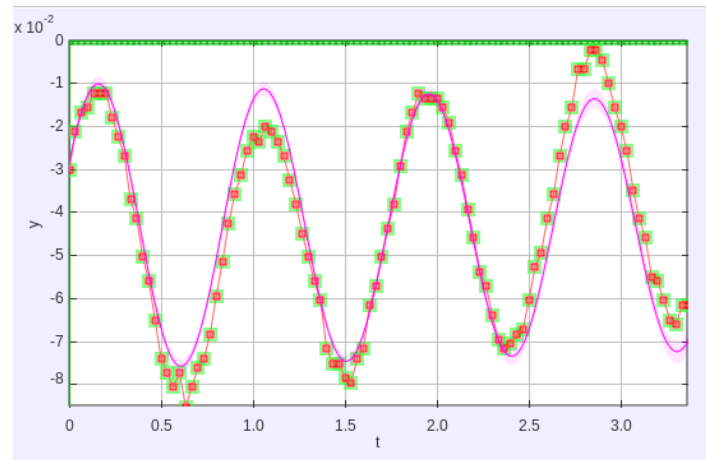
Fonte: Autoria própria.

O objetivo do experimento, uma vez ~~em~~ que as molas estão presas ao suporte no estado relaxado, é encontrar a constante elástica k destas, a partir do acoplamento do peso em sua extremidade e consequente oscilação, devido à força restauradora das molas, que a deslocam em direção oposta ao solo. E além disso, variar as massas dos objetos para analisar qual o efeito desta mudança na frequência de oscilações da mola. Para isso, o método utilizado se baseia na frequência de oscilação da mola.

2.2. Resultados

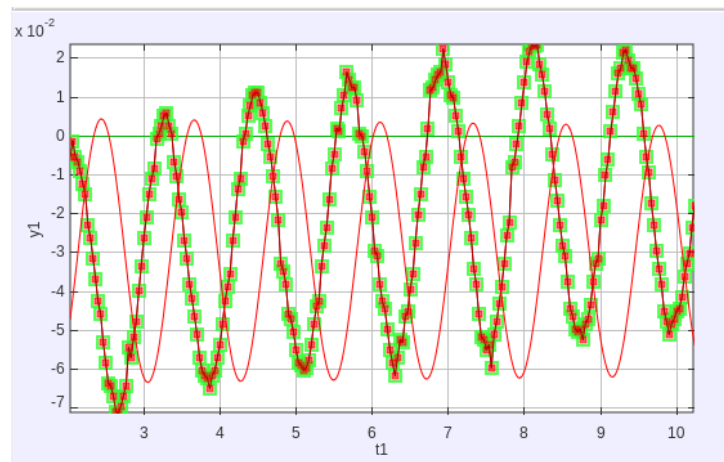
Com ajuda do software tracker e vídeos contendo a movimentação das molas com os pesos, conseguimos obter os gráficos que são os exibidos neste tópico. Foram produzidos um deles para cada, para fins de comparação. O delineado de cor rosa representa um ajuste construído automaticamente no programa com base em uma senoide, feito para otimizar a análise. Neles, t é o nosso tempo em segundos e y o deslocamento da mola, em metros.

Gráfico 2.3.1: tempo x deslocamento 100g (obtido com o software tracker)



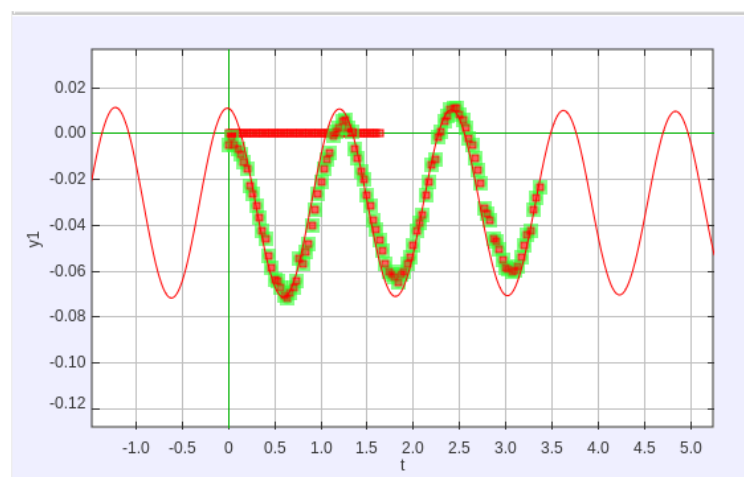
Fonte: autoria própria.

Gráfico 2.3.2: tempo x deslocamento 200g (obtido com o software tracker)



Fonte: autoria própria.

Gráfico 2.3.3: tempo x deslocamento 100g (obtido com o software tracker)



Fonte: autoria própria.

Através destes, calculamos a constante elástica de cada uma das molas fazendo uso do tempo de deslocamento obtido, unindo ao peso do objeto acoplado a mola, do qual temos conhecimento ser de 100g e 200g. Usamos como base a chamada frequência de oscilação, que pode ser determinada pelo período, sendo por sua vez, o tempo necessário para que a mola realize um ciclo de oscilação completo.

Utilizando a dedução apresentada na introdução temos que:

$$k = (2\pi f)^2 \cdot m \quad (8)$$

Para utilizar esta fórmula utilizaremos a massa em kg, logo 0,1 kg e 0,2 kg. Como já temos o tempo em segundos e a distância em metros, conversões não precisarão ser realizadas. Para o período levaremos em consideração as senóides delineadas, já que há pequenas imperfeições no rastreo direto do tracker, tendo em vista que ele teve de ser realizado manualmente.

- 0,1kg (referente ao gráfico 2.3.1):

$$T \simeq 0,9 \text{ s} \quad f \simeq 1,1 \text{ Hz} \quad k = 0,238 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

- 0,2 kg (referente ao gráfico 2.3.2):

$$T \simeq 1,2 \text{ s} \quad f \simeq 0,8 \text{ Hz} \quad k = 5,05 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

- 0,1 kg (referente ao gráfico 2.3.3):

$$T \simeq 1,2 \text{ s} \quad f \simeq 0,8 \text{ Hz} \quad k = 5,05 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

2.3. Discussão

Inicialmente, é importante considerar que as medições de tempo foram feitas com base nas oscilações observadas nos gráficos gerados pelo rastreo. Ainda que os dados tenham sido extraídos com atenção, o uso manual do tracker pode ter introduzido pequenas imprecisões, especialmente no instante inicial de cada gráfico, onde o momento da soltura da massa pode ter gerado variações pontuais.

Os gráficos 2.3.2 e 2.3.3 indicam o uso da mesma mola, uma vez que o valor de k foi idêntico em ambos os casos (5,05 N/m), apesar da massa diferente. Esse resultado está de acordo com o comportamento esperado de um sistema massa-mola ideal: o valor de k deve permanecer constante para uma mesma mola, independentemente da massa utilizada.

Por outro lado, o gráfico 2.3.1 apresenta uma constante elástica significativamente menor ($k = 0,238 \text{ N/m}$), o que nos leva a concluir que se trata de uma mola diferente das

outras duas. Essa mola é bem mais “suave” e menos rígida que a mola dos gráficos 2.3.2 e 2.3.3.

Outro ponto interessante é a influência da massa na frequência do sistema. Como previsto teoricamente, ao aumentar a massa, o período de oscilação aumenta e a frequência diminui. Isso pode ser claramente observado na comparação entre os gráficos 2.3.2 e 2.3.3: com a mesma mola, uma massa maior (0,2 kg) produziu uma frequência menor (0,8 Hz), e uma massa menor (0,1 kg) manteve a mesma frequência apenas por um aparente erro ou inconsistência nos dados, possivelmente relacionado a falhas na coleta ou no rastreo do movimento.

Essas pequenas discrepâncias reforçam a possibilidade de erros experimentais, como a dificuldade de determinar com precisão o instante de início da oscilação ou a contagem exata dos ciclos. Ainda assim, os resultados permitem verificar qualitativamente os princípios fundamentais do sistema massa-mola: a frequência diminui com o aumento da massa, e a constante elástica é uma característica da mola, devendo ser constante para o mesmo artefato.

2.4. Conclusão

Através da análise dos gráficos e dos cálculos realizados, foi possível compreender de forma prática o comportamento de sistemas massa-mola e como a frequência de oscilação depende diretamente da massa e da constante elástica da mola. Observamos que, conforme esperado pela teoria, o aumento da massa acarreta uma diminuição da frequência de oscilação, comportamento esse claramente identificado ao comparar os dados experimentais.

Além disso, a determinação da constante elástica k para diferentes conjuntos experimentais permitiu identificar quais molas eram as mesmas e quais eram distintas. A mola utilizada nos gráficos 2.3.2 e 2.3.3 apresentou o mesmo valor de k , indicando que se tratava do mesmo componente físico. Já a mola do gráfico 2.3.1 possuía uma constante elástica consideravelmente menor, confirmando que se tratava de uma mola diferente, mais flexível.

Por fim, mesmo com possíveis fontes de erro associadas ao rastreo manual e à coleta dos dados, os resultados obtidos foram coerentes com as previsões teóricas e demonstraram de forma satisfatória os princípios fundamentais da oscilação harmônica em sistemas massa-mola.

3. DEMONSTRAÇÃO 2: Pêndulo de Wilberforce

3.1. Metodologia

O experimento consistiu na montagem e análise do pêndulo de Wilberforce (Figura 2), um sistema que permite a observação de oscilações acopladas entre movimentos longitudinais (translacionais) e torcionais (rotacionais).

Figura 2: Pêndulo de Wilberforce.

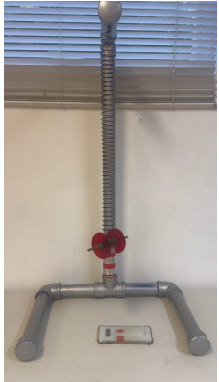
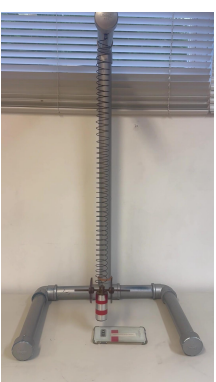
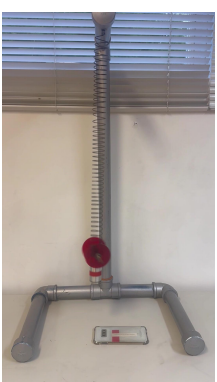
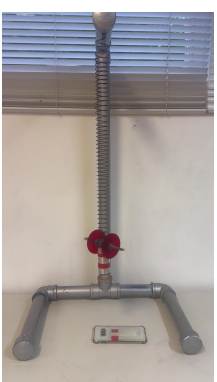
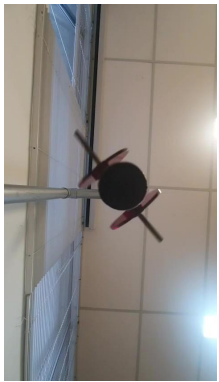
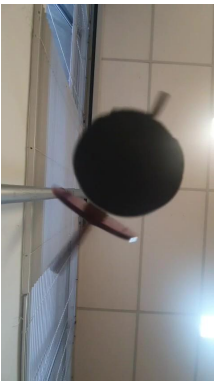
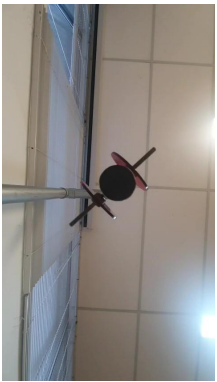


Fonte: Autoria própria.

A montagem foi composta por uma mola helicoidal vertical, presa na parte superior a um suporte de PVC, com um peso cilíndrico metálico acoplado em sua extremidade inferior. Esse peso possui duas hastes metálicas fixadas na parte superior do cilindro, cada uma com um disco em sua extremidade externa. A massa do cilindro, assim como a altura exata do sistema, não foram medidas na atividade.

Após a montagem, o sistema foi posto em movimento por meio de um impulso inicial vertical, distendendo a mola, seguida da observação da sequência de oscilações do sistema, como demonstrado na linha “Movimento da mola observado lateralmente” do Quadro 1. O movimento inicial da mola consistia em compressões e extensões periódicas, mas, com o tempo, observou-se uma rotação espontânea do cilindro em torno de seu próprio eixo. Essa rotação era claramente visível através do movimento dos discos nas hastes laterais, como demonstrado na linha “Movimento do peso com as hastes durante a distensão da mola” do Quadro 1.

Quadro 1: Movimentos de translação da mola e rotação do peso durante o movimento no pêndulo de Wilberforce.

Movimentos mais relevantes observados no pêndulo de Wilberforce				
Momento analisado	Início da oscilação	Momento de máxima de transferência de energia entre os modos translacional e rotacional	Momento de inversão da energia	Momento da aproximação de parada
Movimento da mola observado lateralmente				
Movimento do peso com as hastes durante a distensão da mola				

Fonte: Autoria própria.

Durante o experimento, percebeu-se que, à medida que a oscilação vertical diminuía, o movimento rotacional aumentava, e vice-versa, sendo um comportamento cíclico. Esse fenômeno evidencia a existência de acoplamento entre os dois modos de oscilação. A energia do sistema, inicialmente concentrada no movimento vertical, foi transferida progressivamente para o modo rotacional, e posteriormente retornou ao modo inicial, formando um padrão de batimentos característico.

3.2. Resultados

Durante a execução do experimento com o pêndulo de Wilberforce, observou-se inicialmente um movimento puramente vertical do peso cilíndrico, caracterizado por

oscilações de vai e vem ao longo do eixo da mola. Esse movimento vertical foi iniciado por um impulso manual que distendeu a mola helicoidal, com o passar do tempo, notou-se que esse movimento vertical começou a diminuir, enquanto o peso começou a girar em torno do seu próprio eixo. Esse novo comportamento rotacional pôde ser claramente identificado pelo deslocamento angular dos discos fixados nas extremidades das hastes laterais do cilindro.

Após alguns segundos, a rotação passou a diminuir, e o movimento vertical retornou de forma visível. Esse ciclo de alternância entre movimentos verticais e rotacionais se repetiu ao longo da observação, indicando que havia uma transferência contínua de energia entre os dois modos de oscilação. O comportamento observado é conhecido como oscilação acoplada, em que diferentes tipos de movimento compartilham energia ao longo do tempo, sem que haja necessidade de um novo impulso externo.

Esse padrão também pôde ser visualizado nos vídeos gravados durante a prática, nos quais a energia migra de um modo para outro de maneira periódica, criando um fenômeno conhecido como batimento, sendo quando a energia de um modo decresce enquanto o outro aumenta, e vice-versa. A qualidade do experimento permitiu identificar essas transições com clareza, sendo evidente que o sistema oscilava entre dois comportamentos distintos que, ainda assim, estavam conectados.

3.3. Discussão

O comportamento observado no experimento é resultado de um fenômeno físico chamado acoplamento de modos de oscilação. Em termos simples, isso significa que dois tipos de movimento, neste caso, o movimento vertical e o movimento de rotação estão correlacionados, de forma que a energia presente em um deles pode ser transferida para o outro ao longo do tempo. Essa transferência só é possível porque a mola usada no experimento não é perfeitamente rígida, ou seja, além de esticar e comprimir, ela também pode torcer, como uma hélice.

Quando o peso cilíndrico é puxado para baixo e solto, o sistema começa com energia predominantemente no modo longitudinal, ou seja, a energia é armazenada como energia potencial elástica da mola e energia cinética translacional associada a velocidade do movimento de sobe-e-desce do peso. Entretanto, o peso do cilindro não é perfeitamente centrado, pois ele possui hastes laterais com discos que induzem uma pequena assimetria na distribuição de massa, o que é suficiente para gerar um leve torque sobre a mola durante o movimento vertical, fazendo com que as torções involuntárias da mola sejam intensificadas.

Assim, mesmo que a perturbação inicial seja puramente vertical, essa combinação entre a característica helicoidal da mola e a assimetria do peso acaba induzindo uma torção no sistema. Essa torção inicial é pequena, mas, por estar em um sistema acoplado, a energia começa a migrar do modo longitudinal para o torcional com o tempo.

Conforme esta dinâmica no pêndulo acontece, o movimento vertical perde intensidade porque parte da energia está sendo convertida em rotação do peso ao redor do seu próprio eixo. Quando a energia no modo rotacional atinge seu máximo, ou seja, quando toda a energia inicial do sistema foi transferida para o movimento torcional, o peso começa a girar de forma mais evidente e quase não sobe ou desce verticalmente, com a mola deixando de alongar-se ou comprimir-se, simultaneamente o peso na extremidade inferior da mola está girando em sua maior velocidade angular, gerando o maior acúmulo de torção de toda a dinâmica estudada. A partir daí, o processo se inverte, com a rotação diminuindo e o peso volta a oscilar verticalmente, com este processo ocorrendo repetidamente, pois analisa-se um sistema conservativo, portanto não ocorre perdas significativas de energia por atrito ou resistência do ar.

Este pêndulo ilustra como dois modos de oscilação podem compartilhar energia de forma cíclica, sem que ela desapareça, apenas migrando entre os diferentes graus de liberdade do sistema. Um exemplo claro de oscilações acopladas é o funcionamento de uma máquina de lavar roupas, em que durante o ciclo de centrifugação, se as roupas estiverem mal distribuídas no tambor, isso gera um desequilíbrio no centro de massa do sistema, esse desequilíbrio faz com que o tambor, além de girar em alta velocidade, também cause vibrações verticais e laterais na estrutura da máquina. Assim como no pêndulo de Wilberforce, esses movimentos podem se acoplar, com parte da energia da rotação do tambor se convertendo em vibração do corpo da máquina, pelo movimento consequente vertical do tambor.

3.4. Conclusão

O experimento com o pêndulo de Wilberforce permitiu observar a transferência cíclica de energia entre os movimentos longitudinal e torcional, evidenciando o fenômeno de acoplamento de oscilações. A rotação foi induzida pelo torque gerado pela massa assimétrica e pela torção da mola, resultando no aumento da velocidade angular ao longo do tempo. Essa dinâmica ajuda a compreender vibrações em sistemas reais, como máquinas de lavar, onde

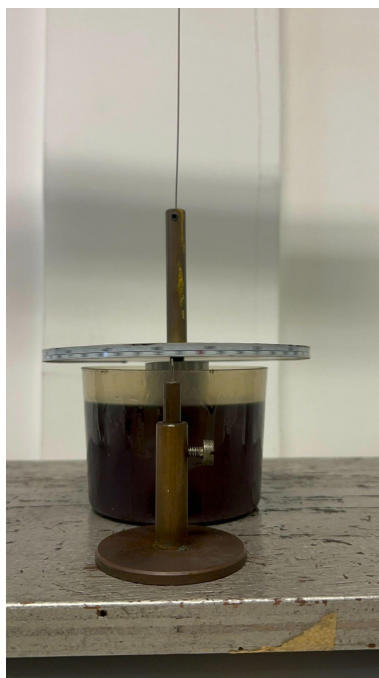
movimentos verticais e rotacionais também se acoplam. O estudo reforça a importância de entender esses fenômenos para projetar sistemas mais estáveis e eficientes.

4. DEMONSTRAÇÃO 3: Pêndulo de torção

4.1. Metodologia

O experimento teve como objetivo investigar o comportamento oscilatório de um pêndulo de torção em dois meios distintos: ar e óleo. Para isso, foi montado um sistema experimental constituído por uma haste metálica fixada a um fio de torção, com discos metálicos acoplados às extremidades. O fio de torção atua como elemento restaurador, exercendo um torque proporcional ao deslocamento angular da haste em relação à posição de equilíbrio, caracterizando um movimento harmônico simples angular. O pêndulo foi suspenso em um suporte rígido, garantindo estabilidade e minimizando interferências externas.

Figura 2: Pêndulo de torção em óleo.



Fonte: Autoria própria.

As medidas de tempo foram realizadas com auxílio de um cronômetro digital, com precisão de centésimos de segundo (0,01 s). Em cada condição experimental, os tempos foram registrados a partir da liberação do pêndulo, anotando-se o tempo total ao final de cada oscilação completa. As oscilações foram realizadas inicialmente com o pêndulo em contato apenas com o ar. Em seguida, foi posicionado um recipiente contendo óleo sob o sistema, de forma a submergir parcialmente os discos metálicos, e o procedimento foi repetido. Para cada

meio, foram registradas 11 oscilações consecutivas, sendo desprezada a primeira medida pela má execução e os dados a partir da segunda oscilação foram considerados como início da contagem. Os dados foram organizados em tabelas, contendo o número da oscilação, o tempo total acumulado e o intervalo de tempo entre oscilações sucessivas. O tempo médio de oscilação foi obtido por meio da média aritmética dos intervalos de tempo.

4.2. Resultados

Os resultados obtidos estão apresentados em duas tabelas, correspondentes às oscilações no ar e no óleo, respectivamente. Em ambos os casos, foram anotados os tempos acumulados e os intervalos entre oscilações consecutivas. O tempo médio de oscilação no ar foi de aproximadamente 4,813 s, com um desvio padrão de 0,40 s, enquanto no óleo a média foi de 4,805 s, com desvio padrão de 0,30 s. Os dados foram arredondados para duas casas decimais, em conformidade com a precisão do instrumento de medição utilizado.

Tabela 1 : (a) tempo de oscilações no ar e (b) tempo de oscilações em óleo.

AR			ÓLEO		
N de osc	T total	T parcial	N de osc	T total	T parcial
1	11.43	04.86	1	9.75	04.75
2	16.34	04.91	2	14.49	04.74
3	21.11	04.77	3	19.13	04.64
4	24.99	03.88	4	24.45	05.32
5	30.26	05.27	5	29.33	04.88
6	35.52	05.26	6	34.33	05.00
7	40.06	04.54	7	38.86	04.53
8	45.15	05.09	8	43.57	04.71
9	29.92	04.77	9	48.77	05.20
10	54.70	04.78	10	53.05	04.28

(a)

(b)

Fonte: Autoria própria.

4.3. Discussão

A análise dos dados evidencia o efeito do amortecimento sobre o movimento oscilatório do pêndulo de torção. No regime ~~sem-fluido~~ (ar), observa-se maior variabilidade nos tempos de oscilação, enquanto no óleo os tempos tornam-se mais uniformes, com redução do desvio padrão. Esse comportamento está de acordo com a teoria do oscilador harmônico amortecido, segundo a qual o movimento angular de um sistema sujeito a torque

restaurador e força resistiva viscosamente dependente da velocidade é descrito pela equação 7.

A solução para essa equação, no regime subamortecido, prevê oscilações cuja amplitude decai exponencialmente no tempo:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega' t + \phi)$$

Ainda que a frequência não tenha sido diretamente determinada neste experimento, a diminuição visível da amplitude e a maior regularidade nos tempos de oscilação observadas no meio viscoso corroboram esse modelo teórico.

Além disso, a ligeira diminuição do tempo médio de oscilação no óleo pode, à primeira vista, contradizer a expectativa teórica de que o amortecimento aumentaria o período. No entanto, essa diferença é pequena e está dentro da margem de incerteza experimental, podendo ser atribuída a variações no início das oscilações ou limitações de medição. De todo modo, a maior regularidade e a visível dissipação de energia no meio viscoso corroboram o comportamento esperado para um oscilador amortecido.

As principais fontes de erro experimental incluem a reação humana durante a cronometragem, variações na amplitude inicial e possíveis perturbações causadas por movimentos fora do plano ideal. Tais fatores podem ter contribuído para o maior desvio observado nas medições feitas no ar. No entanto, a repetição dos testes e o controle das condições minimizam esses efeitos.

4.4. Conclusão

O experimento com o pêndulo de torção evidenciou, de forma qualitativa, os efeitos do amortecimento viscoso em um sistema oscilatório angular. A comparação entre os dados obtidos no ar e no óleo mostrou que a dissipação de energia reduz a amplitude e a variabilidade temporal das oscilações, como previsto pelo modelo do oscilador harmônico amortecido.

Apesar da leve redução no tempo médio de oscilação no meio viscoso, o resultado está dentro da incerteza experimental e não contradiz a teoria. A regularidade observada no óleo confirma a ação do amortecimento e corrobora a aplicação do modelo com termo dissipativo proporcional à velocidade angular.

5. DEMONSTRAÇÃO 4: Propagação de onda na longitudinal e na transversal em molas

5.1. Metodologia

Tendo em vista o objetivo de analisar as diferentes formas de propagação de ondas - longitudinal e transversal - foram utilizadas duas molas. A primeira apresenta cerca de 3 metros quando no repouso e um diâmetro **menor** (mola 1). Já a segunda, tem um diâmetro um pouco **maior**, mas tem um comprimento menor, de cerca de 1,5 metros (mola 2).

De modo prático, duas pessoas sentaram uma em frente à outra segurando uma extremidade da mola, para a análise das ondas longitudinais, a mola utilizada foi, inicialmente, a segunda esticada e mantida no chão sendo aplicada um pouco mais de força que em seu estado de repouso.

Assim, foram feitas ondas deslocando a mão que retém a extremidade da mola para frente e trás - a partir do referencial que obedece a própria **orientação do corpo humano** - para gerar um pulso, testando diferentes frequências de emissão de pulso; também foram feitos pulsos simultaneamente partindo de cada extremidade, então cada indivíduo fez um pulso ao mesmo tempo em cada extremidade.

No segundo caso, as ondas transversais foram realizadas também com duas pessoas sentadas, uma em frente à outra segurando cada extremidade da segunda mola, por sua vez, apoiada no chão. A partir de seu estado de equilíbrio as duas pessoas se aproximaram um pouco, cerca de 15 centímetros (0,15 metros), permitindo a formação das ondas mais facilmente.

Dessa maneira, elas foram produzidas a partir do deslocamento horizontal da mola no chão, então a extremidade foi movida da direita para a esquerda a fim de formar uma onda. Primeiramente, apenas uma pessoa realizou as ondas testando diferentes frequências; em seguida, as duas pessoas fizeram o movimento simultaneamente, cada uma iniciando para a sua direita; finalmente, as duas pessoas iniciaram o movimento ao mesmo tempo, um indivíduo deslocou a mola primeiro para a direita e o outro partiu da própria esquerda.

Por fim, todas as etapas foram repetidas para a primeira mola.

5.2. Resultados

Primeiro foram realizados os pulsos com a mola 2, eles foram observados a partir da variação do espaço entre os aros. Ademais, ao realizar múltiplos pulsos simultaneamente, ficaram visíveis trechos diferentes com aros mais próximos, sendo esta variação de concentração dos aros uma forma de enxergar os pulsos. Já com a primeira mola, os pulsos acabaram erguendo-a um pouco, tal contraste é visível nas imagens 3 e 4 abaixo.

Imagem 3: flecha indicando um pulso na mola 2.



Fonte: autoria própria.

Imagem 4: flecha indicando um pulso na mola 1.



Fonte: autoria própria.

A continuação do experimento dessa mola parte do estudo de ondas transversais. Ambas as molas deixaram visível uma onda que seria uma curva na extensão da mola. Ao formar mais de uma onda com o aumento da frequência do movimento, foi obtido o resultado da imagem 5, onde estavam visíveis múltiplas curvas com diferentes fases, formando nós entre elas.

Imagem 5: ondas transversais e nós na mola 1.



Fonte: autoria própria.

Por fim, a realização de ondas ou pulsos simultâneos, ambas as pessoas movendo as extremidades para a própria direita inicialmente, apresentou como resultado suas ondas se propagando que se encontravam ao meio da mola e nada mais se propagava. Em contrapartida, quando uma era movida à direita e a outra à esquerda a amplitude de cada fase aumentou.

5.3. Discussão

Inicialmente, é necessário discutir o uso de diferentes molas, a primeira, por ser mais fina e mais comprida, permite com maior eficiência a observação das ondas latitudinais, já que o espaço entre os aros é pouco relevante para esse experimento. Enquanto o pulso é melhor analisado pelo espaço entre cada aro, assim, pela segunda mola, afinal, ela, quando um pouco esticada permite uma clara visualização do deslocamento do pulso pelas espirais.

Ademais, foram observados, no primeiro experimento, os pulsos ao longo da mola 2 como esperado, a mola 1 acabou erguendo-se durante a propagação. Isso deve ter ocorrido como consequência do fato de que a mola estava sem espaço entre os aros, assim, o

deslocamento pela força se deu em um espaçamento para cima. No segundo experimento, foi possível ver, em ambas as molas, a formação de ondas e suas fases, além de nós entre elas, seguindo o resultado esperado.

Na terceira parte, em que foram estudadas ondas simultâneas, ambas sendo iniciadas para a direita de cada pessoa a fazendo o experimento, foi possível ver o anulamento das ondas já que elas partiram em fases opostas. Porém, ainda havia um pouco de ondulação na mola, não ocorrendo um anulamento total, o que é consequência de irregularidades nas condições não ideais do ambiente e ~~falhas humanas que impedem a sincronia do movimento.~~

~~Assim, idealmente todas as ondas de todos os experimentos continuariam para sempre, mas é preciso considerar a dissipação de energia e condições não tão ideais, como a própria textura e irregularidade do piso.~~

5.4. Conclusão

Em suma, foi obtido que as ondas longitudinais, assim como as ondas transversais, elas puderam ser reproduzidas experimentalmente gerando resultados compatíveis com a literatura presente na área. Contudo, é importante observar que o atrito com o solo, imprecisões humanas e condições não ideais afetaram a conservação do movimento, pois houve dissipação de energia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CRAWFORD, Frank S. *Waves: Berkeley Physics Course – Volume 3*. New York: McGraw-Hill, 1968.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física: Volume 1 – Mecânica*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica, v. 2: Fluidos, Oscilações e Ondas e Calor**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1996.

WILBERFORCE, Lionel R. On a Method of Demonstrating the Vibration of a Rotating System. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 38, n. 233, p. 31–37, 1894.