

# Experimentos caseiros: Uma adaptação mão-na-massa da disciplina de Física Experimental II da UFRJ para o ensino remoto

**Home experiments: a hands-on adaptation of the Experimental Physics II course at UFRJ for remote teaching**

Alexis Hernández<sup>1</sup>, Angelo Gomes<sup>1</sup>, Elis Sinnecker<sup>\*1</sup>, Rafael Del Grande<sup>1</sup>,  
Rodrigo Capaz<sup>1</sup>, Simone Cardoso<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 9 de julho de 2021. Revisado em 10 de agosto de 2021. Aceito em 11 de agosto de 2021.

Neste trabalho, apresentamos a adaptação da disciplina de Física Experimental II do Instituto de Física da UFRJ para o ensino totalmente remoto, motivada pelas restrições impostas pela pandemia de COVID-19. A disciplina consiste em atividades práticas nos temas de hidrostática, oscilações harmônicas e ondas, que foram reformuladas para que o estudante pudesse realizá-las em casa, a partir de materiais de uso cotidiano ou de fácil acesso, enfatizando a abordagem “mão-na-massa” (montagem e realização dos experimentos pelo próprio estudante). Os alunos foram orientados pelo método de sala de aula invertida, combinando a visualização prévia de videoaulas (sessões assíncronas) e aulas de orientação por videoconferência (sessões síncronas) para cada experimento. A avaliação do desempenho foi realizada por relatórios que incluíam vídeos ou fotos das montagens e da realização dos experimentos. Os resultados obtidos permitem concluir que os alunos apresentaram engajamento por vezes superior àquele comumente obtido nos cursos presenciais, com evidentes benefícios para o aprendizado. As montagens experimentais são suficientemente simples para que possam ser replicadas sem dificuldade em outras instituições universitárias ou mesmo de ensino médio.

**Palavras-chave:** Ensino Remoto, Física Experimental, Empuxo, Oscilações Harmônicas, Ondas Sonoras.

In May 2020, the Physics Institute of Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) started a program aiming to reformulate its experimental courses to a completely remote format due to the restrictions imposed by the COVID-19 pandemic. In this work, we describe the results of this effort in the particular case of the Experimental Physics II course, which combines practical sessions on hydrostatics, oscillations and waves. The reformulated course focus on a “hands-on” approach, in which students were required to build their own experimental kit and perform measurements using easily accessible materials. Classes followed the inverted classroom method, in which recorded videos were watched by students previously to real-time orientation sessions. Students were evaluated based on their individual reports of each experiment, which necessarily included videos or pictures of the experimental setup and data acquisition procedure. Overall, we observed excellent results in terms of stronger commitment and enthusiasm from students in the remote version of the course as compared to the traditional one. The experimental kits and their assembly are simple enough so they can be reproduced without substantial difficulty in other universities or even in high-schools.

**Keywords:** Remote Teaching, Experimental Physics, Buoyancy, Harmonic Oscillations, Sound Waves.

## 1. Introdução

A pandemia de COVID-19 exigiu a adaptação rápida e emergencial das disciplinas ministradas pelo Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, para o formato remoto. Particularmente desafiadora foi a adaptação das disciplinas de Física básica experimental (também denominadas no Instituto de disciplinas práticas ou de laboratório) para o novo formato. Tais disciplinas, em seu formato tradicional, apresentam como duas de suas características mais importantes:

(1) o uso de “kits” ou montagens experimentais para sua realização e (2) a alta interatividade entre aluno e professor. Notadamente, estas duas características introduzem dificuldades adicionais para a boa realização destas disciplinas na forma remota. No entanto, considerando as enormes incertezas quanto ao restabelecimento das condições adequadas para o ensino presencial, em maio de 2020, o Instituto de Física tomou para si o desafio de implementar o ensino remoto também para as disciplinas práticas. Mais ainda, optou-se por enfatizar, sempre que possível, o caráter prático (“mão-na-massa”) das atividades que compõem estas disciplinas, evitando ao máximo transformá-las em atividades

\* Endereço de correspondência: elis@if.ufrj.br

de visualização de vídeos ou mesmo de simulação computacional.

Neste artigo, relatamos a experiência da implementação da disciplina de Física Experimental II para o formato remoto. Esta disciplina aborda os conteúdos de hidrostática, oscilações harmônicas (simples e amortecidas) e ondas, e é oferecida semestralmente pelo Instituto de Física aos alunos do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN), da Escola Politécnica e da Escola de Química da UFRJ. Este artigo está dividido da seguinte forma. Na Seção 2, apresentamos as características básicas da disciplina. Nas Seções 3 a 6, descrevemos as quatro práticas realizadas na disciplina: Empuxo, Pêndulo Simples, Oscilações Harmônicas e Ondas, sempre com o cuidado de prover o máximo de detalhamento possível para que estas práticas possam ser replicadas sem dificuldade em outras instituições. Na Seção 7 apresentamos nossas discussões finais e as conclusões.

## 2. Características Básicas

Em sua versão presencial pré-pandemia, esta disciplina consistia em cinco práticas distintas, realizadas ao longo de um período letivo de 15 semanas. Com a pandemia, as aulas presenciais foram interrompidas em março e retomadas no formato totalmente remoto, no que se chamou de Período Letivo Excepcional (PLE), entre 24 de agosto e 14 de novembro de 2020. O PLE foi um período letivo mais curto que o usual, de apenas 12 semanas. Para este semestre excepcional, foram abertas 336 vagas, divididas em 21 turmas.

Em seu formato remoto, a disciplina de Física Experimental II no PLE apresentou as seguintes características básicas:

- **“Kits” experimentais e instrumentos de medida** – Partimos do conceito de que os alunos montariam seus próprios “kits” experimentais e instrumentos de medida a partir de materiais caseiros ou de fácil aquisição. Utilizamos também, em algumas situações, os aplicativos de celular Phyphox [1], Gerador de Funções [2] e Gerador de Ruído [3].
- **Formato das aulas** – Utilizamos um formato híbrido de aulas síncronas e assíncronas, combinadas com o conceito de *sala de aula invertida*, ou seja, no início de cada prática experimental, o estudante assistia uma videoaula que explicava em detalhes os procedimentos de montagem experimental e tomada de dados, bem como os aspectos teóricos do experimento. No apêndice A são disponibilizados os links para todas as videoaulas. A partir desta videoaula, era esperado que os estudantes pudessem dar início ao experimento. Posteriormente, havia duas sessões síncronas para cada experimento, nas quais os alunos poderiam

**Tabela 1:** Informações sobre as videoaulas do curso de Física Experimental 2 no PLE.

Vídeo	Tempo (mm:ss)	Número de Acessos	Tempo Médio Acessado (mm:ss)
Trat. de Dados e Incerteza 1	21:59	366	06:07
Trat. de Dados e Incerteza 2	25:21	262	07:12
Trat. de Dados e Incerteza 3	17:40	206	05:41
Trat. de Dados e Incerteza 4	34:13	130	07:01
Gráficos em Escala Linear	16:28	242	03:13
Ajuste Linear	41:54	215	05:37
Empuxo	27:32	620	07:29
Pêndulo	23:03	1053	07:33
Osc. Harmônico Simples (Teo)	16:09	468	06:35
Osc. Harmônico Simples (Exp)	23:34	696	07:07
Osc. Harmônico Amortecido	26:55	611	08:05
Ondas (Teo)	21:59	433	06:20
Ondas (Exp)	20:26	711	06:18

tirar dúvidas sobre aspectos mais específicos da montagem e tomada de dados.

- **Material de suporte** – Além das videoaulas, foram disponibilizados roteiros escritos das práticas experimentais, onde o procedimento de montagem e tomada de dados era descrito em mais detalhe do que nas videoaulas. É importante acrescentar que, no formato presencial, os estudantes realizavam o experimento em dupla (ou, às vezes, em trio). No novo formato remoto, os experimentos e relatórios foram feitos individualmente.
- **Relatórios** – As avaliações consistiam em relatórios individuais, que obrigatoriamente deveriam ser complementados por vídeos curtos ou fotos em que os alunos apresentavam sua montagem e, de forma resumida, o procedimento de tomada de dados.

A Tabela 1 mostra informações sobre as videoaulas. Na medida do possível, tentamos encaixar as aulas no intervalo de tempo entre 15 min e 25 min, com algumas exceções. Os dados referentes ao acesso foram colhidos apenas durante o PLE, de modo que refletem aproximadamente a audiência de apenas um período. Os vídeos foram disponibilizados no YouTube com acesso limitado (categoria “não-listado”), ou seja, disponíveis apenas a quem possuía o link e ocultos para buscas (não público). Desta forma, acreditamos que o número de acessos de alunos de fora da UFRJ foi limitado.

As aulas Tratamento de Dados e Incertezas, Gráficos e Ajuste Linear, são uma revisão do conteúdo abordado na disciplina de Física Experimental I, que é pré-requisito para Física Experimental II. Na versão presencial do curso, esse conteúdo é revisado em uma única aula teórica. Portanto, esse conjunto de videoaulas corresponde ao conteúdo de uma aula presencial de revisão,

particionado em um número maior de vídeos de menor duração. Nota-se que esses vídeos têm menor audiência que os demais. Possivelmente, porque se referem a um conteúdo de revisão e também porque não há nenhuma atividade de avaliação subsequente associada a eles.

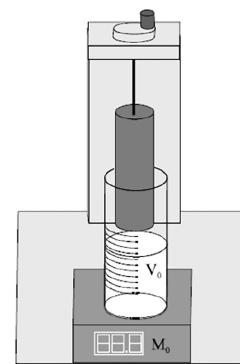
O andamento da disciplina experimental não segue sempre em consonância com a disciplina teórica. Assim, todas as videoaulas dos experimentos incluem uma breve introdução teórica. O conteúdo abordado nessas aulas faz parte da apostila de Física Experimental II usada no curso presencial. Em especial, para os experimentos de Oscilador Harmônico Simples e Ondas Sonoras, ambos com duas partes para execução (ver seções 5 e 6), a introdução teórica foi colocada separadamente para diminuir o tempo de cada vídeo. Essas duas aulas teóricas foram sistematicamente menos assistidas do que as aulas que abordam a parte experimental correspondente. De maneira geral, o número de visualizações é comparável ao número de alunos da disciplina. O tempo médio por visualização é consistentemente menor do que a duração das aulas.

A apostila completa do Curso de Física Experimental II [4], em formato remoto, contém todas as informações sobre o curso, breve revisão de conceitos básicos, além dos roteiros e modelos de relatório propostos para cada experimento.

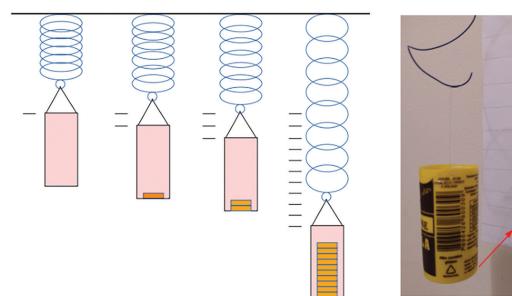
### 3. Empuxo

O principal objetivo pedagógico desta prática é explorar experimentalmente o Princípio de Arquimedes. Paralelamente, os estudantes familiarizam-se com o conceito de densidade e com processos de medição de massa e volume. Do ponto de vista de tratamento de dados, esta prática envolve um ajuste linear, que pode ser realizado tanto de forma gráfica (manual) quanto pelo método de mínimos quadrados.

Na versão presencial da disciplina, o objetivo prático desta atividade é a determinação da densidade de um fluido. Os alunos dispõem de uma balança de precisão, uma proveta graduada, um objeto cilíndrico, um suporte com uma haste móvel e dois fluidos (normalmente, água e glicerina). O experimento consiste em mergulhar progressivamente o cilindro em cada um dos fluidos e realizar medições da variação de volume e do peso aparente do conjunto durante o procedimento. Para tal fim, o líquido é colocado na proveta e esta, por sua vez, é colocada sobre uma balança de precisão, que mede a massa (reação normal no prato da balança, ou peso aparente, dividida pela aceleração da gravidade). O objeto cilíndrico é pendurado em uma haste móvel a fim de mergulhá-lo controladamente no fluido (Figura 1). Por último, o ajuste linear da variação da massa como função da variação do volume nos proporciona o valor da densidade do fluido. Na prática, o aluno é provido de objetos de distintos materiais (alumínio e latão) e diferentes seções transversais (quadrada e circular).



**Figura 1:** Esquema do experimento de empuxo do curso presencial.



**Figura 2:** Processo de calibração do dinamômetro. Define-se um ponto de referência no recipiente de moedas (no caso da figura, trata-se do topo do recipiente) e marca-se na tira de papel (que está grudada na parede) as alturas deste ponto de referência para cada valor da quantidade de moedas nos recipiente.

Isto permite a constatação de que a força de empuxo independe tanto da forma do objeto como do material do objeto mergulhado. A precisão dos resultados é limitada principalmente pela precisão da medida do volume.

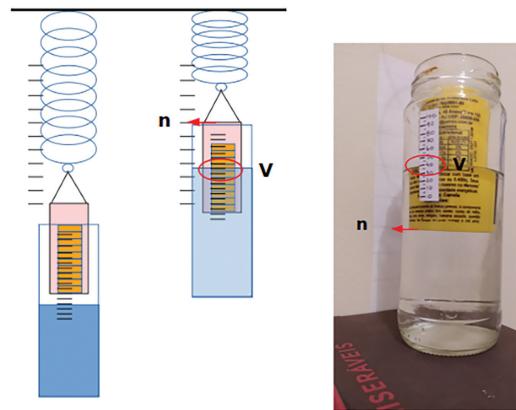
Para a versão remota do curso modificamos o experimento a fim de utilizar materiais de fácil acesso, sem que isto prejudicasse os objetivos pedagógicos da prática. Desta forma, propomos a fabricação de uma proveta caseira utilizando um frasco de vidro e algum elemento de medição de pequenos volumes, como uma seringa ou um dosador de xarope. A balança foi substituída por um dinamômetro caseiro, construído a partir de um fio de arame, enrolado à mão e calibrado em unidades de massa de uma moeda específica (Figura 2). Ao fazer o gráfico da massa nestas unidades contra o volume de líquido deslocado, o coeficiente angular do ajuste linear é igual à densidade do fluido dividida pela massa da moeda ( $a = \rho/m_{moeda}$ ). Preferimos definir como objetivo do experimento a determinação da massa das moedas conhecendo o valor da densidade do fluido (água), porém a escolha oposta também pode ser feita sem grandes dificuldades.

O procedimento pode ser dividido em três partes: fabricação da proveta, fabricação de um dinamômetro e o experimento em si onde se determina a massa

das moedas. O processo de fabricação da proveta é simples (ver anexos), requerendo apenas um cuidado especial na escolha do frasco de vidro onde o líquido será colocado, que será determinante para a precisão final do experimento. Recomenda-se usar um vidro de cerca de 20 cm de altura e 5 cm de diâmetro (como um frasco de azeitonas, por exemplo). Quanto menor o seu diâmetro, maior será a precisão na medição do volume. Por outro lado, se o frasco for muito estreito, não permitirá que sejam feitas medidas com muitas moedas, reduzindo a precisão no ajuste linear. Um outro elemento que influencia o número de moedas a ser utilizado são as dimensões do recipiente das moedas. Por tal motivo é necessário verificar que o recipiente é capaz de deslocar o volume de água equivalente ao peso das moedas antes de encostar no fundo da proveta e antes de que a água entre no recipiente, garantindo que o peso do volume de líquido deslocado seja igual à variação de peso medida no dinamômetro.

O processo de fabricação do dinamômetro envolve por sua vez duas partes: a fabricação da mola e o processo de calibração (Figura 2). Para a fabricação da mola, pode-se trabalhar com um fio de arame galvanizado ou com uma espiral de caderno. No caso do arame galvanizado, sugerimos enrolar um fio de três metros de comprimento num objeto cilíndrico de aproximadamente 6 cm de diâmetro. A mola resultante terá aproximadamente 12 espiras de 8 cm de diâmetro (valores aproximados). Caso seja utilizada espiral de caderno, a situação é um pouco mais delicada uma vez que as propriedades do arame variam de um caderno para outro. Neste caso, sugerimos tomar como ponto de partida uma mola enrolada num objeto cilíndrico de 2.5 a 3 cm de diâmetro, com isto a mola resultante terá espiras de aproximadamente 3.5 cm (o número de espiras irá depender do comprimento do arame utilizado, e quanto maior, melhor). Se for necessário, a mola pode ser desenrolada e enrolada novamente variando o diâmetro das espiras. Tenha em consideração que, diâmetros maiores diminuem a constante  $k$  da mola aumentando a precisão do dinamômetro. Porém, o número de moedas comportadas no regime linear (Lei de Hooke) da mola é diminuído, o que acaba diminuindo a precisão do ajuste linear. De fato, foi observado durante o curso que, para molas feitas com espirais de caderno, era em geral necessário diminuir o número de moedas sob consideração (de 7 a 8 moedas). Por tal motivo, é preciso ter especial atenção com a mola fabricada pelos alunos e, se necessário, orientá-los a fim de produzir uma mola mais adequada para o experimento.

O processo de calibração do dinamômetro (ver material anexo) é conceitualmente simples mas também envolve algumas sutilezas. O primeiro passo consiste em pendurar a mola próxima à superfície de uma parede onde será colada uma tira de papel para construir a escala de medição do dinamômetro. É importante que a mola fique bem próxima à parede para facilitar tanto

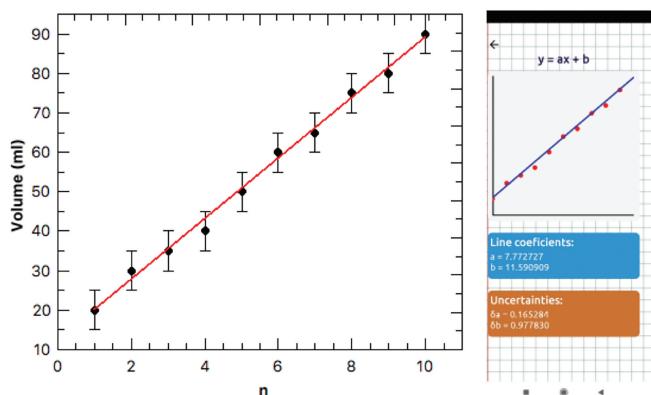


**Figura 3:** Processo de medição. O frasco com água é elevado até que o recipiente de moedas alcance uma das marcações  $n$  do dinamômetro, mantendo esta posição é realizada a leitura correspondente do volume.

a construção da escala quanto a leitura posterior dos valores medidos, mas também devemos evitar que a mola encoste na parede, já que isto alteraria a medição da massa durante o experimento. Outro cuidado necessário está relacionado à verificação do regime linear da mola fabricada, lembrando que, ao ultrapassar este limite, a mola muito provavelmente sofrerá uma deformação que pode alterar sua constante elástica. O recomendável é orientar os alunos para começar a fazer as marcações colocando o número máximo de moedas no recipiente e ir retirando-as uma a uma. Caso percebam uma mudança considerável na distância entre as marcações (o que indica um comportamento não linear) é recomendável recomeçar o procedimento com um número menor de moedas. É interessante chamar atenção para o fato da escala de massa do dinamômetro ser construída em unidades de massa da moeda sob consideração. Isto pode ser utilizado com fins pedagógicos, para abordar a arbitrariedade das unidades de medida.

Por último, descrevemos o processo de medição (Figura 3). Deve-se mergulhar o recipiente com moedas na proveta e medir simultaneamente a “massa aparente” (indicada pela altura do mesmo ponto de referência no recipiente de moedas que foi usado para calibrar a mola) e o volume de fluido deslocado na proveta (frasco de vidro). Para isso, é necessário ter algum mecanismo que permita mergulhar o recipiente com as moedas no fluido de forma estável. Uma opção é utilizar livros empilhados para variar a altura do frasco.

A partir do conjunto de dados de massa vs. volume do fluido, realiza-se a análise e tratamento de dados. Trata-se de um procedimento simples, que pode ser realizado em um computador, celular ou inclusive à mão (utilizando papel milimetrado). Na Figura 4 apresentamos uma amostra dos resultados obtidos. Do lado esquerdo mostramos a análise dos dados utilizando o programa Qtiplot [5] e, à direita, usando o aplicativo para celular



**Figura 4:** Resultados do experimento: gráfico do volume vs a massa sustentada pela força de empuxo, em unidades da massa da moeda. Esquerda com Qtiplot e direita com o aplicativo LeastSquare.

LeastSquares [6]. A partir do ajuste linear,  $V = an + b$ , onde  $V$  é o volume indicado pela marcação no frasco de vidro e  $n$  é o nível na escala de massa indicado pela altura do recipiente de moedas, os alunos determinam o coeficiente angular e considerando a densidade da água  $\rho = (0,997 \pm 0,001)$  g/cm<sup>3</sup> determinam a massa da moeda utilizada. Para o resultado da Figura 4, onde  $a = (7,7 \pm 0,2)$  cm<sup>3</sup>, temos:

$$m_{moeda} = a\rho = (7,7 \pm 0,2) g \quad (1)$$

Comparando este valor com a massa tabelada das moedas utilizadas (50 centavos de Real, 2<sup>a</sup> família, posteriores a 2002)  $m_{moeda} = 7,81$  g observamos que os valores são compatíveis. A discrepância relativa ficou em 2% o que aponta uma adequada implementação do experimento. Além disso, a incerteza relativa do resultado é de 3% mostrando uma precisão muito boa considerando as limitações experimentais e os materiais utilizados.

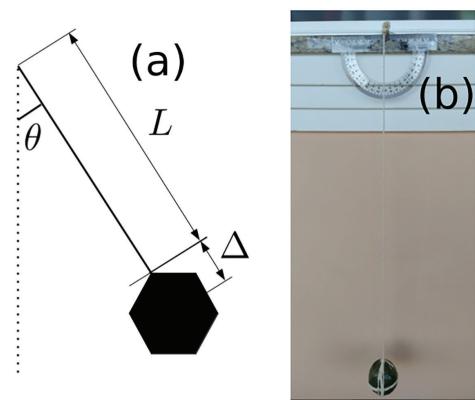
#### 4. Pêndulo Simples

O objetivo dessa prática é a análise do movimento pendular. Tanto em versões anteriores do curso quanto na versão remota a montagem experimental consiste em um objeto preso a um fio de comprimento  $L$  como indicado na Figura 5. Vamos considerar também que a distância do centro de massa do objeto até a extremidade do fio seja  $\Delta$  e que o ângulo entre o fio e uma reta vertical que passa pelo eixo de rotação seja  $\theta$ .

A relação entre o período de oscilação e o comprimento do fio para oscilações de baixa amplitude é

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

O objetivo desta prática é analisar a dependência do período de oscilação com o comprimento do fio e



**Figura 5:** (a) Esquema de montagem experimental do pêndulo simples e (b) um exemplo de montagem experimental feita por um aluno durante o PLE.

realizar um ajuste com a equação (2) de forma a obter a aceleração local da gravidade e comparar com o valor de referência. Para isso os alunos necessitaram de:

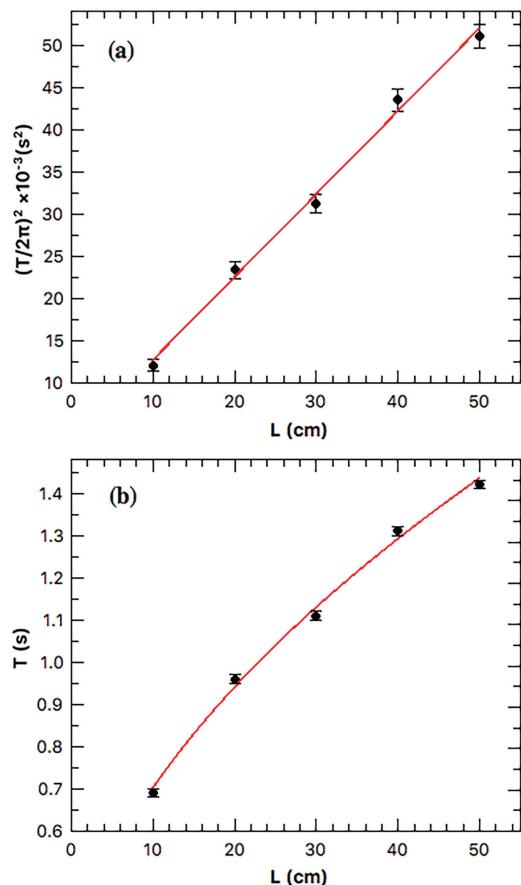
- Cronômetro: a maioria dos alunos utilizou o cronômetro no próprio celular que geralmente apresenta uma precisão instrumental de 0,01 s.
- Barbante ou fio de cerca de 1m de comprimento.
- Trena, régua ou metro de costura para medir a distância do centro de rotação até o objeto.
- Um objeto para ficar preso ao fio e cujas dimensões sejam bem menores que o comprimento do fio utilizado para assegurar que o raio de giro do objeto é bem menor do que  $L+\Delta$  (veja o apêndice).

No experimento, para um dado comprimento do fio os alunos mediram o período de oscilação. Como cada medida de período está sujeita a erros humanos na hora de se iniciar e finalizar a contagem do cronômetro, recomendamos que os alunos fizessem a medida do tempo de cinco períodos e depois dividissem esse valor por cinco para diminuir essa incerteza. Além disso, os alunos realizaram dez medidas independentes do período e com esses valores determinaram a média do período e sua incerteza que é dada por  $\delta = \sigma/\sqrt{N}$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão desses dez valores e  $N$  é número total de medidas.

Uma vez obtido o conjunto de dados de comprimento de fio e médias de período e suas incertezas os alunos podem realizar um ajuste de mínimos quadrados não linear utilizando a equação 2 ou um ajuste linear rescrevendo essa equação como:

$$\frac{T^2}{(2\pi)^2} = \frac{L}{g} + \frac{\Delta}{g} \quad (3)$$

Por meio dos parâmetros obtidos pelos ajustes os alunos obtiveram a aceleração da gravidade que deveria ser comparada com um valor de referência e o parâmetro  $\Delta$  que deveria ser comparado com as dimensões do objeto utilizado.



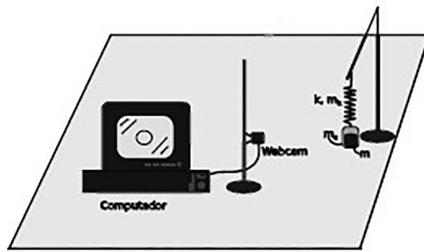
**Figura 6:** Exemplo de ajuste linear (a) e não linear (b) para os dados de média do período. No ajuste linear o valor obtido para aceleração da gravidade foi  $g = (103 \pm 5) \times 10 \text{ cm/s}^2$ , enquanto no ajuste não linear o valor obtido foi  $g = (101 \pm 4) \times 10 \text{ cm/s}^2$ .

O principal cuidado na medição de período é garantir que a amplitude de oscilação é suficientemente pequena. Isso ocorre usando a aproximação  $\sin(\theta) \approx \theta$  que é válida para ângulos menores que 10 graus, onde essa diferença relativa é cerca de 2%. Para garantir a aproximação de ângulos pequenos, foi recomendado aos alunos que usassem amplitudes que fossem as menores possíveis, mas de forma que eles ainda conseguissem identificar as oscilações, o que se torna mais difícil quanto menor for o comprimento do pêndulo.

A maioria dos alunos não mostrou dificuldades na execução do experimento. As incertezas típicas para medidas de média de período foram de  $10^{-2}$  s a  $10^{-1}$  s. Na Figura 6 mostramos um exemplo de ajuste linear e outro não linear, onde os valores de aceleração da gravidade obtidos são compatíveis com o valor de referência ( $978,7 \text{ cm/s}^2$ ) considerando as incertezas obtidas.

## 5. Oscilações Harmônicas

Oscilações harmônicas estão presentes em diversos sistemas, sendo capazes de descrever vários fenômenos físicos. Nesta prática, o objetivo é estudar, experimentalmente,



**Figura 7:** Esquema do experimento de oscilações harmônicas do curso presencial.

oscilações harmônicas em sistemas compostos por um objeto massivo preso a uma mola de constante elástica  $k$ .

No curso presencial, são estudados sistemas que imitam um oscilador harmônico simples (OHS) e um oscilador harmônico amortecido (OHA). São disponibilizados um conjunto de molas comerciais e massas padronizadas para escolha do aluno. Para fazer o experimento, o sistema massa-mola é fixado a um suporte e colocado para oscilar (Figura 7). Todo o movimento do sistema é registrado por uma webcam e posteriormente analisado com o auxílio de um programa de processamento de imagem adequado.

Uma parte do experimento tem por objetivo estudar a dependência do período de oscilação do sistema em função da massa. São capturados os movimentos oscilatórios, que devem ser mantido em uma dimensão, para diferentes valores de massa  $m$ . O movimento deve ser restrito à pequenas oscilações em torno da posição de equilíbrio.

Os dados do experimento relativos à posição em relação ao tempo podem ser exportados para um programa de análise. No nosso caso, recomenda-se a utilização do software Qtiplot. Após realizar um ajuste por uma função harmônica é possível obter o valor do período de oscilação do sistema.

O valor da constante elástica da mola  $k$  também pode ser obtido repetindo-se o experimento estático para diferentes valores de massa e verificando o deslocamento da mola a partir de uma posição de equilíbrio.

### 5.1. Oscilador Harmônico Simples

Para viabilizar o curso remoto, foi necessário fazer adaptações no experimento. Supomos que o aluno não possui balança e molas comerciais em sua residência. Assim, o experimento foi planejado utilizando materiais acessíveis que podem ser encontrados em sua residência ou obtidos facilmente. Para suprir a necessidade da balança, substituímos as massas por um recipiente que é preenchido gradualmente com água. Com relação à mola, optamos por sugerir a utilização de espirais de caderno. As espirais de plástico (utilizadas em encadernamento de apostilas) são mais recomendadas por deformarem de forma controlada para valores menores de massa em comparação com as espirais de metal.

Inicialmente, o objetivo é determinar a constante elástica da mola  $k$ . Esse valor pode ser obtido em experimentos estáticos ou dinâmicos.

No caso do experimento estático, com uma garrafa pet presa à mola e usando um frasco coletor como medidor de volume, o aluno deve acrescentar repetidamente uma certa quantidade de água na garrafa pet, esperar o sistema parar de oscilar e marcar a altura da base da garrafa em uma parede próxima. A quantidade adequada de água para fazer o experimento é altamente dependente da mola que está sendo utilizada. É necessário ter cuidado para não deformar a mola indevidamente devido ao excesso de peso que a desloca.

O valor da constante elástica  $k$  da mola pode ser obtido utilizando-se um ajuste linear do gráfico da deformação da mola em relação a uma posição de equilíbrio ( $\Delta x$ ) em função dos valores de massa de água ( $m$ ) utilizados, de acordo com a equação (4):

$$\Delta x = \frac{mg}{k} \quad (4)$$

Os valores de volume de água podem ser convertidos em valores de massa utilizando-se o valor tabelado da densidade da água. Este gráfico pode ser feito tanto no computador ou celular como em papel milimetrado e realizando o ajuste manual. É importante que o aluno estime as incertezas de todas as grandezas envolvidas no experimento.

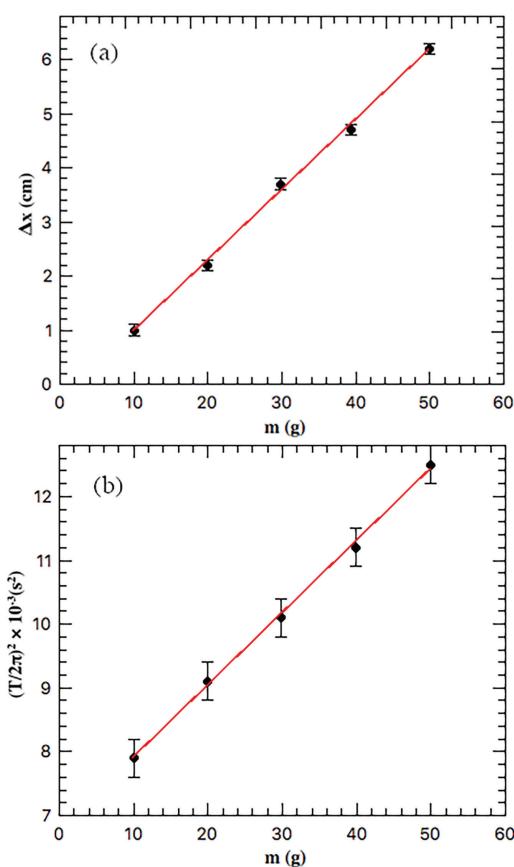
Para realizar o experimento dinâmico, o sistema é colocado para oscilar para diferentes valores de massa de água colocados na garrafa pet. Esse experimento permite avaliar a dependência do período de oscilação do sistema massa-mola em função das propriedades da mola e da massa do sistema. A tomada de dados necessita de alguns cuidados muito importantes. Primeiramente, é importante notar que a elasticidade da mola depende da sua forma espiral. É desejável que essa propriedade seja mantida durante a medida, ou seja, a mola não pode ser muito distendida ou comprimida. Em outras palavras, é necessário manter o movimento do sistema para pequenas amplitudes de oscilação em torno da posição de equilíbrio. Além disso, desejamos estudar oscilações harmônicas em uma dimensão e, portanto, devem ser evitados quaisquer movimentos na horizontal. Para obter o valor da constante elástica da mola através do experimento dinâmico, é recomendado que o aluno organize os dados em uma tabela contendo os valores das massas e dos períodos com suas respectivas incertezas. É proposto que a dependência do período de oscilação do sistema massa-mola em função da massa do sistema seja linearizada para que seja possível obter o valor de  $k$  a partir de um ajuste linear, de acordo com a equação (5):

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = \frac{m}{k} \quad (5)$$

Nesta equação, o valor de  $m$  se refere à soma das massas de água, do recipiente e  $1/3$  da massa da mola.



**Figura 8:** Montagem experimental de um aluno do Curso de Física Experimental para os experimentos estático e dinâmico.



**Figura 9:** (a) Gráfico da deformação da mola em função da massa de água para o experimento estático e (b) Gráfico de  $(T/2\pi)^2$  em função da massa de água obtidos com o experimento dinâmico.

As Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, a montagem experimental feita por um aluno e os resultados obtidos por ele para os experimentos estático e dinâmico. Os valores obtidos para a constante elástica da mola com os experimentos estático ( $k_e = (76 \pm 2) \times 10^2$  g/s<sup>2</sup>) e

dinâmico ( $k_d = (88 \pm 7) \times 10^2$  g/s<sup>2</sup>) são compatíveis entre si, considerando o critério de  $2\sigma$ . Valores incompatíveis são, na maioria dos casos, explicados pela quantidade excessiva de água utilizada no experimento dinâmico, gerando deformações indevidas da mola.

## 5.2. Oscilador Harmônico Amortecido

O experimento do oscilador harmônico amortecido (OHA) tem como objetivo a determinação das constantes de tempo características de um sistema oscilatório sujeito a uma força de atrito. Uma pequena variação no método experimental, em relação ao experimento do OHS, permite observar o decaimento exponencial das amplitudes de oscilação em um amortecimento sub-crítico. A análise dos dados de posição, velocidade ou aceleração em função do tempo permitem determinar os tempos de relaxação ( $\tau$ ) e de meia vida ( $t_{1/2}$ ) do oscilador. Matematicamente, podemos escrever a equação de movimento de um oscilador harmônico amortecido com a adição de um termo de força de atrito proporcional à velocidade que, em primeira aproximação, descreve o movimento em meio viscoso como:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\gamma \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0 \quad (6)$$

Na equação (6),  $\gamma = \frac{\beta}{2m}$  é a constante de amortecimento ( $\beta$  é uma constante que depende da natureza da interação que produz o atrito) e  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  é a frequência angular do oscilador harmônico simples. A solução da equação de movimento do OHA tem a seguinte forma:

$$y(t) = A(t) \sin(\omega t + \phi) \quad (7)$$

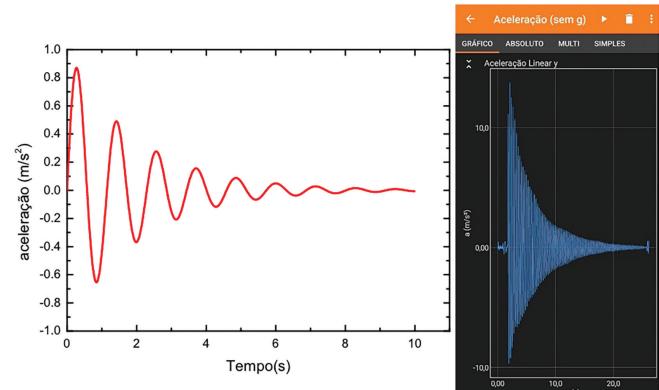
A partir da solução dada pela equação (7), é fácil notar que a velocidade,  $v(t)$ , e a aceleração,  $a(t)$ , são descritas também por equações que apresentam um comportamento oscilatório, com amplitudes que variam no tempo com a mesma taxa de decaimento exponencial. No presente experimento, como veremos mais adiante, nós mediremos a aceleração em função do tempo. Em todos os casos, a frequência de oscilação ( $\omega$ ) é dada por:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad (8)$$

Enquanto a amplitude de oscilação no OHS é esperada ser constante, no OHA a amplitude de oscilação na equação (7) é uma função que decai exponencialmente com o tempo:

$$A(t) = A_0 e^{-\gamma t} \quad (9)$$

Para  $\gamma < \omega_0$ , o comportamento da oscilação é tal que ao mesmo tempo são observadas oscilações de frequência  $f = 2\pi/\omega$  e o decaimento exponencial da amplitude. Nesse caso, temos o regime sub-crítico de oscilação, que é ilustrado na Figura 10. O tempo de relaxação é definido por  $\tau = 1/\gamma$ . Matematicamente,  $\tau$  é o tempo necessário



**Figura 10:** Gráfico da aceleração em função do tempo do oscilador harmônico amortecido. Esquerda: exemplo para um amortecimento sub-crítico. Direita: tela do app Phyphox com os dados coletados da aceleração no eixo y em função do tempo.

para que a amplitude de oscilação caia a  $(1/e)$  do valor inicial  $A_0$ . Da mesma forma, o tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ), é o tempo para que a amplitude caia a metade do valor inicial  $A_0$ , o que nos permite concluir que:

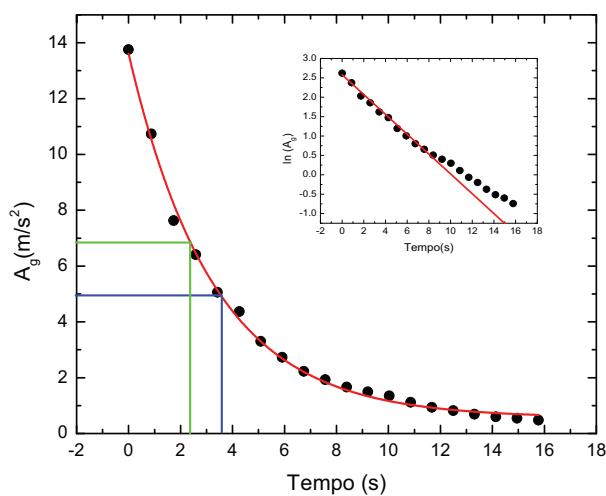
$$t_{1/2} = \tau \ln(2) \quad (10)$$

No curso presencial, o experimento do OHA é realizado fazendo um pequeno ajuste em relação ao material utilizado no OHS. Acopla-se um disco (tipo CD) ao suporte utilizado para colocar as massas padronizadas com a finalidade de aumentar a área de contato com o ar. Para o curso remoto, foi proposto utilizar um celular acoplado à mola, pendurado por um barbante de forma que pudesse oscilar livremente. O próprio celular desempenha o papel do disco do curso presencial e, ao mesmo tempo, como equipamento que realiza as medições com o uso do aplicativo Phyphox instalado pelo próprio aluno. O app Phyphox usa os sensores disponíveis no próprio aparelho para coletar sua aceleração. Foi sugerido aos alunos acoparem o celular à mola, de maneira que a sua maior área ficasse perpendicular ao movimento, levando a um maior coeficiente de atrito e, consequentemente, um maior amortecimento do sistema massa-mola. Apesar desta sugestão, verificou-se que mesmo com o celular na posição vertical é possível observar o amortecimento de forma satisfatória. O experimento é iniciado com o disparo da coleta de dados no app e com um pequeno deslocamento do celular no eixo vertical, fazendo o sistema oscilar. É necessário observar se o sistema apresenta movimento no plano xy ou mesmo outros modos de vibração. Este último, se não for observado durante a coleta de dados, pode ser facilmente detectado durante a análise dos dados. Outro fator importante a ser notado é o tempo necessário para que o sistema pare de oscilar, que está associado ao inverso da constante de amortecimento e, portanto, é proporcional à massa do sistema. Caso sejam observadas poucas oscilações, recomenda-se que seja adicionada massa ao sistema celular-mola.

A Figura 10 mostra a tela do aplicativo Phyphox com uma coleta de dados típica da aceleração no eixo vertical y. Como padrão, o app mostra o resultado na forma de uma gráfica em função do tempo, permitindo uma análise preliminar do movimento oscilatório. Após verificar qualitativamente os dados, verificando a ocorrência de algum erro sistemático, o aluno pode exportar os dados para um arquivo em formato de planilha, permitindo a análise quantitativa em um computador.

A Figura 11 mostra o gráfico da aceleração em função do tempo, obtido por um aluno, após análise dos valores da amplitude dos picos de aceleração no conjunto de dados coletados. Os tempos de relaxação e meia vida do sistema estudado podem ser obtidos através de um ajuste exponencial. Uma análise mais cuidadosa, destacada na figura, mostra o ajuste linear realizado após a linearização dos dados de amplitude de aceleração em função do tempo. É possível verificar que o comportamento, neste caso, não é descrito somente por uma exponencial decrescente. A partir de 9 s, aproximadamente, a reta ajustada não mais descreve os pontos experimentais. Esse fato pode ter sido causado pela existência de uma outra força dissipativa atuando no sistema ou pela força de arrasto não ser linear com a velocidade do movimento do sistema massa-mola, conforme descrito pelo modelo teórico proposto neste experimento (equação 6). No entanto, nada impede o professor de discutir outros modelos teóricos com os alunos. Este foi escolhido por ser o mais abordado nos livros texto de Física 2. Entretanto, não foi observado que esse desvio seja significativo ao ponto de inviabilizar o experimento.

A maior dificuldade observada nesse experimento é a escolha do sistema massa-mola adequado. Não são todas as espirais de caderno que se comportam como



**Figura 11:** Gráfico dos picos de amplitude de aceleração em função do tempo. Linha vermelha é o ajuste exponencial, linha verde é estimativa para tempo de meia-vida e linha azul é a estimativa para o tempo de relaxação. No detalhe é mostrado o ajuste de reta após linearização.

osciladores harmônicos e em alguns casos batimentos foram observados. Além de algumas espirais deformarem muito com pequenos valores de massa. É necessário que o aluno faça uma análise qualitativa dos dados obtidos, logo após a coleta inicial dos dados, a fim de avaliar se possui um sistema massa-mola adequado. Diferentemente do curso presencial, não é possível prever qual tipo de movimento oscilatório será obtido pelo aluno no experimento dinâmico. Dessa forma, o professor precisa estar preparado para discutir os resultados obtidos em qualquer cenário.

## 6. Ondas

O objetivo desse experimento é medir as frequências dos modos normais de vibração de ondas sonoras que se propagam no interior de tubos cilíndricos e determinar a velocidade do som no ar.

Ondas sonoras, que se propagam no ar, são ondas longitudinais. Quando confinadas a uma região do espaço, as ondas oscilam em frequências bem definidas, formando ondas estacionárias. As frequências permitidas são as frequências de ressonância dos modos normais de vibração. Nesse experimento vamos analisar a propagação de ondas sonoras no interior de tubos cilíndricos para duas situações: tubo aberto nas duas extremidades e tubo fechado em uma extremidade e aberto na outra (tubo semiaberto).

Em um tubo cilíndrico aberto, de comprimento  $L$  e diâmetro da sessão transversal  $D$ , uma onda estacionária é formada quando  $L = n\lambda/2$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $n$  é um número natural. As frequências  $f_n$  dos  $n$  modos normais de vibração são um múltiplo inteiro da frequência do harmônico fundamental ou primeiro harmônico,  $f_1$ :

$$f_1 = \frac{v_S}{\lambda_1} = \frac{v_S}{2(L + 2\Delta L)} \quad (a)$$

$$f_n = nf_1; \text{ com } n = 1, 2, 3, 4, \dots \text{ e} \quad (b) \quad (11)$$

$$(L + 2\Delta L) = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (c)$$

onde  $v_S$  é a velocidade de propagação do som no ar,  $\lambda_n$  é o comprimento de onda do  $n$ -ésimo modo normal de vibração e  $\Delta L$  é um fator de correção devido ao diâmetro finito do tubo que deve ser adicionado ao comprimento  $L$  para cada extremidade aberta, ou seja, somam-se  $2\Delta L$  para o tubo aberto nas duas extremidades. Na prática, a coluna de ar vibrante estende-se um pouco além da extremidade aberta, fazendo com que o comprimento acústico do tubo seja um pouco maior do que seu comprimento geométrico ( $L$ ). O fator de correção é proporcional ao diâmetro do tubo,  $\Delta L = xD$ , com  $x \approx 0,3$  [7].

Em um tubo cilíndrico semiaberto, as frequências  $f_n$  dos  $n$  modos normais de vibração são múltiplos ímpares da frequência do harmônico fundamental  $f_1$  e

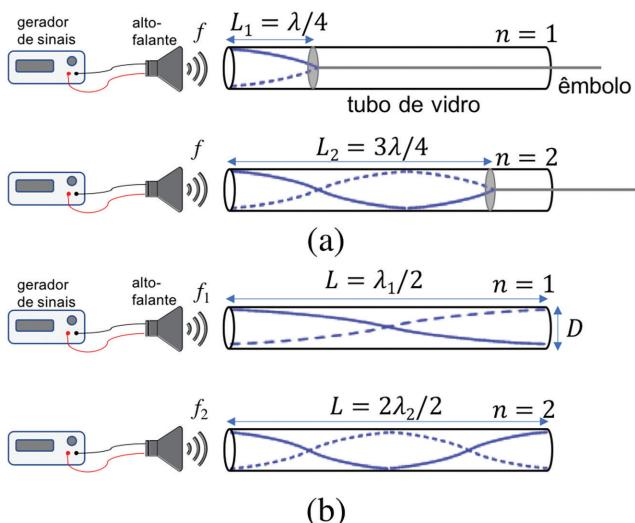
são dadas por:

$$f_1 = \frac{v_S}{\lambda_1} = \frac{v_S}{4(L + \Delta L)} \quad (a)$$

$$f_n = (2n - 1)f_1; \text{ com } n = 1, 2, 3, 4, \dots \text{ e} \quad (b) \quad (12)$$

$$(L + \Delta L) = (2n - 1) \frac{\lambda_n}{4} \quad (c)$$

O Laboratório de Física Experimental II da UFRJ dispõe de duas montagens para o estudo de ondas: ondas em uma corda vibrante e ondas sonoras em tubos cilíndricos. A primeira aborda o estudo dos modos de vibração de uma corda presa nas duas extremidades e é o experimento feito atualmente no curso presencial. Na montagem experimental, uma das pontas da corda é ligada a um oscilador, que oscila com baixa amplitude, alimentado por um gerador de sinais de frequência variável e a outra ponta é tensionada pelo peso de uma massa calibrada. Variando-se a frequência do oscilador, é possível observar os diferentes modos normais de vibração da corda e determinar a velocidade de vibração da onda nesse meio. Embora o experimento da corda vibrante seja bastante simples e visualmente muito bonito, a adaptação para uma versão caseira não é tão direta e optamos por abordar o tema de ondas com um experimento de ondas sonoras. No curso presencial, o experimento de ondas sonoras tem como objetivo determinar a velocidade do som no ar e utiliza uma montagem como a esquematizada na Figura 12. Uma onda senoidal com frequência audível é produzida por um gerador de sinais ligado a um alto-falante que é direcionado para a entrada de um tubo de vidro longo, provocando vibrações na coluna de ar no interior do tubo. Quando a



**Figura 12:** Desenho esquemático da montagem experimental utilizada em laboratório para a determinação da velocidade do som no ar: (a) tubo semiaberto e (b) tubo aberto. A figura mostra ainda as ondas estacionárias para o primeiro e o segundo modo normal de vibração para os dois tipos de tubo (linhas em azul no interior do tubo).

frequência da onda sonora emitida pelo alto-falante for igual à frequência de um dos modos normais de vibração da coluna de ar, ocorre a ressonância. Na ressonância, o sistema passa a vibrar com amplitude progressivamente crescente, resultando em um aumento na intensidade do som produzido, que pode ser naturalmente detectado pelo ouvido humano.

Na montagem do tubo semiaberto (Figura 12.a), o alto-falante é posicionado próximo a uma das extremidades do tubo e a extremidade oposta é fechada com um êmbolo. A frequência do sinal senoidal é mantida fixa enquanto o comprimento total da coluna de ar é alterado movendo-se o êmbolo até que a condição de ressonância seja alcançada para os diferentes harmônicos. No experimento com o tubo aberto, o comprimento  $L$  do tubo é fixo e varia-se a frequência do sinal senoidal até encontrar a ressonância para os diferentes harmônicos (Figura 12.b).

A adaptação do curso para a versão remota consiste em determinar a velocidade de propagação de uma onda sonora no ar através da geração de ondas estacionárias em um copo cilíndrico longo (tubo semiaberto) e em um tubo cilíndrico de papelão (tubo aberto). Dois métodos de medida são propostos. O primeiro método consiste em encontrar a frequência do harmônico fundamental de ressonância para diferentes comprimentos da coluna de ar no copo. O segundo método consiste em medir as frequências dos harmônicos de ressonância do tubo de papelão, excitadas simultaneamente usando um ruído sonoro.

### 6.1. Tubo semiaberto

Na adaptação da prática com o tubo semiaberto para o experimento caseiro, o gerador de funções e o alto-falante foram substituídos pelo celular com o aplicativo gratuito Gerador de Sinais [2] para gerar ondas sonoras de frequência pura. Em lugar do tubo de vidro, foi sugerido o uso de um copo cilíndrico longo (copo de vela ou copo de refrigerante) onde a variação do comprimento  $L$  da coluna de ar pode ser feita adicionando-se água ao copo. A Figura 13 ilustra exemplos de materiais utilizados e a montagem feita em casa.

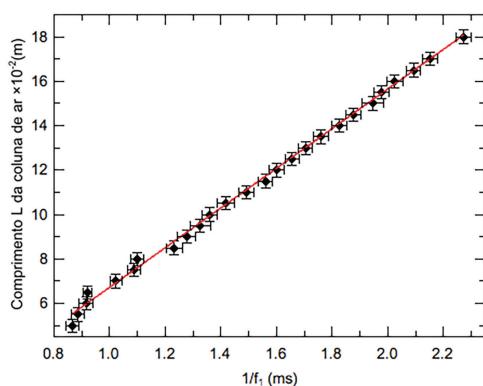
O procedimento experimental consiste em encontrar a frequência do primeiro modo normal de vibração, que corresponde à menor frequência de ressonância, para diferentes valores de  $L$ . Inicialmente mede-se o comprimento  $L$  da coluna de ar com uma régua e, a partir dessa medida, estima-se a frequência de ressonância do primeiro harmônico ( $n = 1$ ) através da equação  $f = v_S/\lambda = v_S/(4L)$ . A frequência estimada é introduzida no aplicativo e, posicionando o celular com o alto-falante voltado para a abertura do copo, faz-se um ajuste fino da frequência, utilizando a audição para identificar o valor de  $f$  para o qual a intensidade do som é máxima.

Note que a estimativa do valor de  $f$  é feita sem usar a correção  $\Delta L$  para o comprimento do tubo e, com esse procedimento, o valor estimado será um limite superior



**Figura 13:** Experimento caseiro do tubo semi-aberto: (a) exemplos de materiais usados na montagem experimental; (b) exemplo de uma medida em execução, utilizando o aplicativo gratuito Gerador de Função para gerar o sinal sonoro de frequência pura.

para o valor medido de  $f$ . Cabe ressaltar que o fator de correção  $\Delta L = 0,3D$ , encontrado normalmente na literatura, é calculado e determinado experimentalmente para altos valores de  $\lambda/D$  [8, 9], o que pode não corresponder às condições do material disponível em casa para os alunos. Assim, para determinar a velocidade do som no ar, optou-se por partir de um ajuste linear do gráfico de  $L \times f^{-1}$ . Nesse caso, o coeficiente angular da reta corresponde a  $v_s/4$  e o coeficiente linear corresponde ao fator de correção  $\Delta L$ , como mostra a equação (12a). A Figura 14 ilustra o resultado de um experimento realizado no Rio de Janeiro, em temperatura ambiente de 28 °C. Levando em conta a dependência da velocidade do som com a temperatura, dada pela equação (13), a discrepância entre o valor obtido no experimento caseiro  $v_s = (356 \pm 4)$  m/s e o valor calculado  $v_s = 348$  m/s é de cerca de 2%. O resultado para o fator de correção foi de  $\Delta L = (0,44 \pm 0,08)D$ .



**Figura 14:** Gráfico do comprimento da coluna de ar em função do inverso da frequência do harmônico fundamental medido a partir de um copo cilíndrico de altura total  $H = (18,0 \pm 0,2)$  cm e diâmetro  $D = (5,0 \pm 0,2)$  cm. A medida foi realizada à temperatura de 28 °C (Rio de Janeiro).

Embora seja um experimento simples, a detecção com a audição requer que sua execução seja feita em local com pouco barulho e que o estudante entenda a diferença entre a intensidade do som e a frequência para identificar corretamente a ressonância.

$$v_s = 331,45 \sqrt{\frac{T}{273,15}} \quad (13)$$

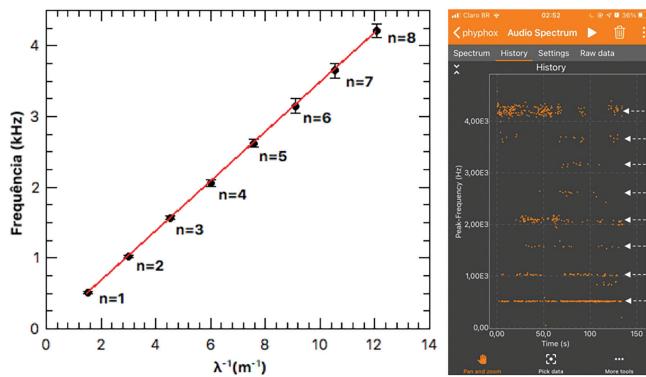
## 6.2. Tubo aberto

No experimento caseiro com o tubo aberto, o tubo de vidro é substituído por um rolo cilíndrico de papelão, do tipo usado como suporte para papel toalha, papel alumínio ou filme de PVC. A excitação dos modos normais de vibração do ar no interior do tubo é feita com um ruído sonoro, sinal que contém um amplo espectro de frequências e soa como um chiado. Dessa forma, é possível excitar, simultaneamente, vários modos normais de vibração da coluna de ar no tubo. As frequências de ressonância são obtidas a partir da análise do sinal de áudio que emana do tubo. A Figura 15 mostra exemplos de materiais usados nesse experimento.

O chiado de um rádio fora de sintonia é um exemplo de ruído e a Figura 15 ilustra a montagem experimental feita com o rádio. Na execução do experimento, o ruído emitido pelo rádio entra por uma das extremidades do tubo e o sinal que emana do tubo é captado pelo microfone do celular, posicionado na extremidade oposta ao rádio. O sinal do microfone é analisado usando o módulo Espectro de Áudio do aplicativo Phypyx [1],



**Figura 15:** Tubo Aberto: (a) exemplos de materiais utilizados no experimento – os rolos de papelão usados como suporte possuem comprimentos  $L$  entre 25 cm – 40 cm e diâmetros  $D$  entre 2,5 cm – 4,0 cm; (b) exemplo de montagem experimental usando um rádio fora de sintonia como fonte de ruído e um celular com o aplicativo Phypyx para analisar o espectro sonoro que emana do tubo de papelão.



**Figura 16:** Tubo Aberto. Direita: gráfico da frequência  $f_n$  do  $n$ -éssimo modo normal de vibração como função do inverso do comprimento de onda. A velocidade do som no ar é dada pelo coeficiente angular da reta ajustada:  $v_S = (349 \pm 3) \text{ m/s}$ . Esquerda: tela do aplicativo Phyphox, mostrando o registro das frequências de ressonância dos oito primeiros modos normais de vibração.

que faz a transformada de Fourier do sinal captado pelo microfone e produz um gráfico das frequências observadas em função do tempo, como ilustra a Figura 16. Para determinar a velocidade do som no ar, é necessário identificar a qual modo  $n$  de vibração corresponde cada uma das frequências medidas. Utilizando o valor de  $v_S$  e as dimensões  $L$  e  $D$  do tubo, calcula-se as frequências dos  $n$ -primeiros modos normais de vibração através da equação (11a). Com isso é possível fazer a correspondência entre as frequências medidas e calculadas. A velocidade do som no ar é obtida através de um ajuste linear do gráfico das frequências medidas para os diferentes valores de  $n$  ( $f_n$ ) como função do inverso do comprimento de onda ( $\lambda_n^{-1}$ ), calculado pela equação (11c). O coeficiente angular da reta corresponde à velocidade do som e a Figura 16 ilustra um exemplo de resultado com  $v_S = (349 \pm 3) \text{ m/s}$ .

Como as medidas realizadas com o método aplicado ao tubo aberto independem da audição, esse experimento tende a apresentar resultados mais acurados do que os obtidos com o método usado anteriormente para o tubo semiaberto. No entanto, o número de frequências observadas com o app Phyphox depende da qualidade da fonte de ruído e/ou do microfone do celular, e alguns alunos relataram a observação de poucos modos normais de vibração durante um experimento. Para contornar alguns desses problemas, a sugestão é usar diversas fontes de ruído. Podem ser usados: rádio fora de sintonia, ruído produzido ao massar papel próximo à extremidade do tubo, utilizar um segundo celular com um aplicativo para gerar ruído (ex. Gerador de Ruído [3]) e variar o tipo de ruído no aplicativo (branco, marrom, azul). Uma outra opção que resultou bastante efetiva para observar a frequência do harmônico fundamental é soprar na borda do tubo, na direção perpendicular ao eixo central do cilindro.

## 7. Conclusões

O curso em formato remoto se mostrou viável. As adaptações realizadas, utilizando materiais de fácil acesso, permitiram implementar o curso sem prejuízo de conteúdo e aprendizado. Foi possível realizar todos os experimentos usando materiais simples tais como um cronômetro, um copo cilíndrico, uma seringa, uma trena, uma régua, uma espiral de caderno, o aplicativo gratuito Phyphox, um rádio e um celular.

A liberdade de escolha dos materiais utilizados, de acordo com sua disponibilidade, e os roteiros que foram preparados de forma a não detalhar passo-a-passo todas as etapas dos experimentos, permitiram que os alunos pudessem ser mais criativos e propusessem soluções alternativas de materiais e metodologias. Dessa forma, os resultados dos experimentos não são sempre previsíveis, exigindo dos professores domínio total para discutir quaisquer arranjos experimentais e resultados gerados. Vale ressaltar que a precisão alcançada nos experimentos caseiros realizados pelos alunos varia entre 3% e 10%, dependendo da escolha dos materiais utilizados. Esses valores são da mesma ordem de grandeza da precisão alcançada nos experimentos feitos pelos alunos no laboratório.

A estrutura do curso remoto previa duas aulas síncronas de 2 h para cada experimento. As aulas foram planejadas supondo que o aluno já teria assistido os vídeos preparados com os conteúdos teórico e experimental antes da primeira aula. De forma geral, na primeira aula síncrona de cada experimento foram discutidas as dificuldades experimentais encontradas pelos alunos e, na segunda, a análise dos dados obtidos. Os alunos foram estimulados a compartilhar suas telas com os resultados obtidos, permitindo a discussão de seus resultados. A variedade de resultados apresentados viabilizou uma discussão mais ampla entre os estudantes, estimulando o senso crítico.

Como mencionamos, a avaliação do curso remoto foi baseada unicamente nas notas dos relatórios individuais. Não foram aplicadas provas. Os relatórios foram validados com envio de vídeos pelos alunos, onde deveriam apresentar os materiais utilizados, além da montagem e o procedimento experimental utilizados durante a aquisição dos dados. Dessa forma, foi possível avaliar de forma fidedigna a realização do experimento e identificar possíveis erros sistemáticos cometidos pelos alunos.

O mais enriquecedor em um curso remoto é a liberdade dada ao aluno em planejar o experimento em casa, estimulando-o a ter uma atitude mais pró-ativa. O aluno, em um curso dessa modalidade, pode testar o seu planejamento inicial, refazer o experimento com as adaptações necessárias (nem sempre em um curso presencial há tempo hábil para refazer os experimentos) e desenvolver o senso crítico, que é muito mais estimulado com o aluno tendo que pensar no experimento desde a sua concepção.

Na última aula síncrona do semestre remoto, os professores abriram espaço na aula para que os alunos pudessem se manifestar com críticas, sugestões ou elogios. De forma geral, os alunos elogiaram bastante os vídeos assíncronos disponibilizados. Alguns destacaram que ficaram surpresos com a qualidade dos resultados obtidos utilizando materiais tão simples. Apesar de o curso ter sido oferecido em formato remoto, até então desconhecido por eles, a maioria manifestou que gostou de ter cursado Física Experimental II. Uma desvantagem destacada foi a menor interação entre os alunos. Para contornar esse aspecto, recomenda-se estimular a criação de grupos de salas de bate-papo, com número de alunos equivalente ao que aconteceria em uma bancada de experimento em um curso presencial (duplas ou trios). Além da criação de fóruns de discussão entre os alunos em que monitores possam acessar e tirar possíveis dúvidas que fiquem acessíveis a todos.

No retorno às atividades presenciais, planeja-se oferecer o Curso de Física Experimental II no formato híbrido, alternando experimentos caseiros com os realizados em laboratório. Desta forma, as vantagens observadas com o curso oferecido em formato remoto não seriam desperdiçadas e, ao mesmo tempo, seria mantida a interação presencial entre os alunos e com o professor da disciplina. O curso híbrido enriqueceria a discussão dos experimentos em sala de aula, permitindo analisar a precisão e a acurácia obtidas nos dois formatos frente às diferentes montagens experimentais utilizadas.

Por fim, ressaltamos que os índices de evasão e reprovação observados no curso remoto são similares aos obtidos no curso presencial.

## Agradecimentos

Ao professor Mario Leandro Aolita e aos monitores Brenda dos Santos Macedo Rodrigues, Giovanna Amorim Pires Rezende e Diogo Nicolau Gomes da Silva, que fizeram parte da equipe de Física Experimental 2 durante o PLE.

## Material suplementar

O seguinte material suplementar está disponível online:  
Apêndice A: Videoaulas do curso de Física Experimental II.

## Referências

- [1] Phyphox (Physical Phone Experiments), <https://phyphox.org>
- [2] Gerador de Função, <https://ee-toolkit.com/audio-function-generator>
- [3] Gerador de Ruído, <https://www.tmssoft.com/noise-generator>

- [4] Apostila de Física Experimental II – Curso remoto, disponível em: [http://fisexp2.if.ufrj.br/Livro\\_FisEx\\_p2.pdf](http://fisexp2.if.ufrj.br/Livro_FisEx_p2.pdf)
- [5] Qtiplot – Data Analysis and Scientific Visualisation, [www.qtiplot.com](http://www.qtiplot.com)
- [6] Least Square App, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.andrecrappe.LeastSquares&hl=en&gl=US>
- [7] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor* (Editora Edgard Brücher, São Paulo 2002).
- [8] M.C. LoPresto, Physics Education **46**, 437 (2011).
- [9] M.G. Ruys, The Physics Teacher **52**, 74 (2014).