



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

Nota: 9/10

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 5 - Som

São Paulo

2025

SUMÁRIO

1. DEMONSTRAÇÃO 1: Diapasão em um tubo fechado.....	3
1.1. Metodologia.....	5
1.2. Resultados.....	6
1.3. Discussão.....	7
1.4. Conclusão.....	8
2. DEMONSTRAÇÃO 2: Figuras de Chladni.....	9
2.1. Metodologia.....	9
2.2. Resultados.....	10
2.3. Discussão.....	10
2.4. Conclusão.....	11
3. DEMONSTRAÇÃO 3: Tubo de Rijke.....	11
3.1. Metodologia.....	12
3.2. Resultados.....	13
3.3. Discussão.....	13
3.4. Conclusão.....	16
4. DEMONSTRAÇÃO 4: Uma corda.....	16
4.1. Metodologia.....	17
4.2. Resultados.....	18
4.3. Discussão.....	19
4.4. Conclusão.....	19
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20

1. DEMONSTRAÇÃO 1: Diapasão em um tubo fechado

O experimento consistiu na montagem e análise do comportamento de uma coluna de ar vibrante em um tubo com uma extremidade fechada, permitindo a observação do fenômeno de ressonância acústica e a formação de ondas estacionárias. A montagem foi composta por um tubo vertical, com uma das extremidades fechada pela superfície de um reservatório de água e a outra aberta para a entrada de som, sendo a coluna de ar variável de acordo com a altura da água dentro do tubo, a qual foi ajustada progressivamente (Figura 1).

Figura 1: Sistema formado para a variação da coluna de água presente no tubo fechado por meio da variação de altura de uma



Fonte: Autoria Própria.

Para a excitação do sistema, foram utilizados três diapasões de frequência fixa iguais a 512 Hz, 384 Hz e 256 Hz, os quais podem ser observados na figura 2, que ao serem golpeados por um martelo geraram uma onda sonora longitudinal que se propagava pela coluna de ar do tubo, penetrando o mesmo pela sua extremidade aberta.

Figura 2: Diapasões utilizados no experimento



Fonte: Autoria Própria.

Quando as ondas sonoras propagadas pelo diapasão atingiam a superfície da água, elas eram refletidas de volta, gerando uma interação entre as ondas incidentes do diapasão e as refletidas pela água, gerando uma interferência entre as ondas, em que caso as ondas que se encontram possuem a mesma frequência, ocorre a produção de um novo modo de oscilação, denominado como onda estacionária (HALLIDAY *et al.*, 2020). Ressaltando que as ondas estacionárias só podem ser formadas a partir de uma sequência específica de onde, a qual é conhecida como frequência de ressonância.

Esse fenômeno ocorre porque, em tubos com uma extremidade fechada, como o utilizado no experimento, forma-se obrigatoriamente um nó de deslocamento na extremidade fechada, representada pela superfície da água, pois o ar não pode se movimentar nessa região, e um ventre de deslocamento na extremidade aberta, permitindo que o ar vibre livremente, sendo que essa configuração impõe uma limitação natural nos comprimentos possíveis da coluna de ar para que ocorra ressonância, permitindo apenas que determinados comprimentos específicos sejam compatíveis com a formação de ondas estacionárias, sendo que o menor comprimento possível corresponde a um quarto do comprimento de onda, ou seja, a primeira ressonância ocorre quando o comprimento da coluna de ar é igual a $\frac{1}{4} \lambda$ (YOUNG *et al.*, 2015).

Durante a prática, foram identificadas duas posições distintas da coluna de ar em que o som no tubo apresentava intensidade forte em comparação a outras alturas, sendo estas: a primeira ressonância, que corresponde ao comprimento fundamental da coluna, com o

comprimento da coluna de ar sendo equivalente a um quarto do comprimento de onda, e a segunda ressonância, com o comprimento da coluna de ar igual a três quartos do comprimento de onda, essa configuração faz com que apenas alguns comprimentos específicos da coluna de ar permitam a ressonância, sendo estes sempre múltiplos ímpares de um quarto do comprimento de onda.

Por meio da diferença entre as posições ressonantes identificadas em um tubo com uma extremidade aberta e a outra extremidade fechada, torna-se possível determinar experimentalmente o comprimento de onda do som e, a partir disso, utilizando a equação fundamental das ondas (Equação 1) (HALLIDAY *et al.*, 2020), calcular a velocidade do som no meio.

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Onde:

v: velocidade do som no meio;

f: frequência da fonte sonora;

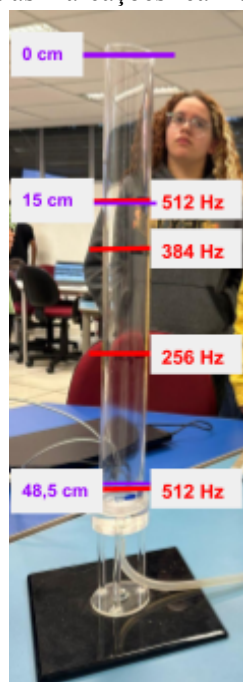
λ : comprimento de onda.

Podendo, deste modo, relacionar diretamente como a variação do comprimento da coluna de ar em um tubo afeta os parâmetros físicos característicos da propagação sonora.

1.1. Metodologia

O sistema utilizado no experimento foi composto por um tubo colocado na posição vertical, com uma das extremidades fechada pela presença da água, enquanto a outra extremidade permanecia aberta, permitindo a entrada das ondas sonoras produzidas pelo diapasão. Esse tubo estava conectado a um reservatório, o que possibilitou variar de maneira controlada a altura da coluna de ar acima da superfície da água, ajustando assim o comprimento efetivo da coluna de ar que participava da propagação sonora, como apresentado anteriormente na figura 1, o tubo utilizado havia quatro marcações em sua superfície, sendo estas referentes a valores de frequência sonora em uma determinada altura do tubo, estas marcações são apresentadas na figura 3. A fonte sonora utilizada foi um diapasão com frequência fixa de 512 Hz, que, ao ser golpeado com o martelo, passou a vibrar e gerar ondas sonoras longitudinais que entravam pela extremidade aberta do tubo.

Figura 3: Destaque para as marcações realizadas na superfície do tubo



Fonte: Autoria própria.

Após a excitação do diapásão, a extremidade vibrante foi posicionada próxima à boca do tubo, fazendo com que as ondas sonoras propagadas penetrassem na coluna de ar e, ao alcançar a superfície da água, fossem refletidas, criando um sistema fechado para a propagação do som. O nível da água foi sendo ajustado gradualmente, modificando o comprimento da coluna de ar até que água ocupasse as marcações realizadas na superfície do tubo (Figura 3), até que se pôde perceber, em determinados comprimentos específicos, uma intensificação clara no som ouvido, indicando que nessas posições ocorria o fenômeno de ressonância no sistema. As alturas correspondentes a essas intensificações sonoras sendo registradas as posições de ressonância nos comprimentos de 15,0 cm e 48,5 cm a partir da extremidade aberta do tubo, sendo as alturas correspondentes para a frequência sonora igual a 512 Hz.

1.2. Resultados

Durante a realização do experimento com a coluna de ar vibrante, observou-se que ao aproximar o diapásão da extremidade aberta do tubo e variar a altura da água, o som produzido apresentava uma intensificação perceptível em duas posições específicas, sendo a primeira quando a coluna de ar tinha um comprimento de 15,0 cm e a segunda quando o comprimento atingia 48,5 cm, sendo estas as posições onde o fenômeno de ressonância ocorreu com maior clareza, o que indicou que nessas alturas específicas a coluna de ar

vibrava de maneira mais intensa e eficiente, produzindo o som mais forte e audível durante o experimento.

A partir dessas duas medições, foi possível perceber que a diferença entre elas correspondia exatamente à meia onda sonora, pois a primeira ressonância ocorreu com a coluna de ar igual a um quarto do comprimento de onda, enquanto a segunda ressonância ocorreu quando a coluna de ar atingiu três quartos do comprimento de onda, e com isso, ao subtrair as duas medidas, encontra-se que esta diferença é igual a meio comprimento de onda, encontrou-se a diferença de 33,5 cm, valor que representa metade do comprimento de onda da onda estacionária que se formou no interior do tubo, e a partir disso, determinou-se que o comprimento de onda total do som gerado era de 67,0 cm, ou 0,670 m. O procedimento matemático para calcular tal valor é apresentado a seguir:

Variação da altura = Variação do comprimento de onda $\Rightarrow$

$$48,5 \text{ cm} - 15 \text{ cm} = \frac{3}{4} \lambda - \frac{1}{4} \lambda \Rightarrow$$

$$33,5 \text{ cm} = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow \lambda = 67 \text{ cm}$$

Em seguida, com o comprimento de onda conhecido e a frequência fixa do diapasão de 512 Hz, aplicou-se a equação fundamental das ondas (Equação 1), ao realizar o cálculo, determinou-se que a velocidade de propagação do som no ar durante o experimento foi de aproximadamente 343 m/s. O procedimento matemático para calcular tal valor é apresentado a seguir:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 0,670 \text{ m} \cdot 512 \text{ Hz} \Rightarrow v = 343,04 \text{ m/s}$$

1.3. Discussão

O comportamento observado no experimento pode ser explicado com base no fenômeno físico da ressonância acústica, que ocorre quando as ondas sonoras produzidas pelo diapasão, ao entrarem pela extremidade aberta do tubo, se propagam pela coluna de ar até atingir a superfície da água, onde são refletidas, e, ao retornarem, interagem com as ondas que continuam sendo geradas pelo diapasão, e essa interação, quando acontece em determinadas condições específicas, permite que as ondas se sobreponham de forma construtiva, formando assim uma onda estacionária, que é caracterizada pela existência de pontos fixos, chamados de nós, onde não há deslocamento do ar, e pontos de máxima vibração, chamados de ventres.

No caso específico do tubo utilizado neste experimento, que possui uma extremidade fechada e outra aberta, a extremidade fechada, representada pela superfície da água, funciona como um nó de deslocamento, pois o ar ali não consegue se movimentar, enquanto a extremidade aberta, por onde o som entra, funciona como um ventre de deslocamento, permitindo a livre vibração do ar, e essa configuração impõe uma limitação natural sobre os padrões de ondas estacionárias que podem se formar dentro do tubo, permitindo apenas aqueles que se ajustam ao comprimento da coluna de ar de forma que ele seja um múltiplo ímpar de um quarto do comprimento de onda, ou seja, $\frac{1}{4} \lambda$, $\frac{3}{4} \lambda$, $\frac{5}{4} \lambda$ e assim sucessivamente.

Durante o experimento, ao ajustar gradativamente a altura da coluna de ar, foi possível perceber que o som se intensificava quando a coluna de ar atingia os comprimentos de 15,0 cm e 48,5 cm, o que indica que nesses comprimentos ocorreu a formação de ondas estacionárias que respeitam as condições impostas pelo sistema, sendo a primeira dessas posições correspondente ao primeiro harmônico, onde a coluna de ar equivale a um quarto do comprimento de onda, e a segunda, ao terceiro harmônico, com a coluna igual a três quartos do comprimento de onda, e com isso, a diferença entre esses dois comprimentos, de 33,5 cm, foi utilizada para calcular indiretamente o comprimento de onda total, que resultou em 67,0 cm.

Em seguida, aplicou-se a equação fundamental das ondas, que relaciona a velocidade de propagação do som no meio com a frequência da fonte sonora e o comprimento de onda, determinou-se que a velocidade do som no ar, nas condições em que o experimento foi realizado, é de aproximadamente 343 m/s, valor este que está em concordância com os valores tabelados para a velocidade do som em condições normais de temperatura e pressão.

1.4. Conclusão

A realização do experimento possibilitou a observação clara do fenômeno de ressonância acústica em uma coluna de ar com uma extremidade fechada, demonstrando que as ondas sonoras incidentes, ao se refletirem na superfície da água, interagem de forma construtiva com as ondas geradas pelo diapasão, formando ondas estacionárias em comprimentos específicos da coluna de ar, que correspondem a múltiplos ímpares de um quarto do comprimento de onda, sendo que a partir das medições realizadas foi possível determinar de maneira prática o comprimento de onda e a velocidade de propagação do som

no ar, confirmando a validade da equação fundamental das ondas e proporcionando uma aplicação concreta dos conceitos teóricos estudados em sala de aula sobre acústica e ondulatória.

2. DEMONSTRAÇÃO 2: Figuras de Chladni

As Figuras de Chladni são padrões geométricos visíveis formados por grãos de material granulado, como areia ou sal, dispostos sobre placas finas que vibram em determinadas frequências sonoras. Esses padrões resultam da formação de ondas estacionárias, que ocorrem quando a placa é excitada em suas frequências naturais de ressonância. Nessas condições, as ondas incidentes e refletidas interagem, criando regiões onde a amplitude de vibração é nula — as chamadas linhas nodais — e outras onde a vibração é máxima, os antinodos. Os grãos tendem a se acumular nas regiões nodais, onde não há movimento, revelando os padrões característicos (SANTOS et al., 2017).

O fenômeno foi sistematicamente explorado pelo físico e músico alemão Ernst Chladni (1756–1827), considerado o "pai da acústica". Chladni aperfeiçoou observações anteriores feitas por Robert Hooke, no século XVII, que já havia notado padrões semelhantes ao friccionar um arco de violino na borda de uma placa de vidro coberta com farinha. Em 1787, Chladni publicou o livro *Entdeckungen über die Theorie des Klanges* (Descobertas sobre a Teoria do Som), no qual apresentou de forma sistemática os experimentos com placas vibratórias e seus respectivos padrões (PUBLIC DOMAIN REVIEW, 2024).

A importância das Figuras de Chladni transcende sua beleza visual: elas são uma representação física concreta de fenômenos acústicos complexos, permitindo o estudo da vibração de superfícies, a análise modal de estruturas e a compreensão da física por trás do funcionamento de instrumentos musicais (SILVA; TORRIANI, 2004). Além disso, os experimentos têm grande potencial didático, pois tornam visível o invisível — transformando o som em imagem — e estimulam a compreensão intuitiva de conceitos como frequência, ressonância, modos normais de vibração e ondas estacionárias (SANTOS et al., 2017).

2.1. Metodologia

Para realizar o experimento das Figuras de Chladni, foi utilizado uma placa de metal, fixada em um centro de apoio, mantendo-se rígida nesta parte e com as extremidades livres para vibrar. Em seguida, material granulado foi polvilhado (areia) sobre a superfície da

placa. A placa foi então posta a vibrar, utilizando um arco de violino para friccionar em sua borda.

2.2. Resultados

Os resultados observados são os padrões visuais distintos formados pelo material granulado, como é possível observar na figura 4.

Figura 4: Padrões visuais resultados da vibração da placa de metal.



Fonte: Autoria própria.

Quando a placa atinge uma frequência de ressonância específica, os grãos se movem e se acumulam ao longo das linhas nodais, revelando o modo vibracional da placa naquela frequência. Cada frequência de ressonância corresponde a um padrão diferente. Alterar a posição onde a placa é excitada ou reduzir a vibração em certos pontos (por exemplo, colocando um dedo) também revela figuras diferentes (NERES, et al., 2024).

2.3. Discussão

No experimento das Figuras de Chladni, diversos fatores físicos e operacionais influenciam diretamente a forma dos padrões formados. O principal fator é a frequência sonora aplicada à placa, uma vez que os padrões surgem nas frequências de ressonância, cada uma correspondendo a um modo vibracional específico. À medida que a frequência aumenta, os padrões se tornam progressivamente mais complexos, evidenciando modos com maior número de nós e ventres.

As propriedades físicas da placa também são determinantes. Aspectos como o material (vidro, alumínio, aço etc.), a geometria (formas circulares, quadradas, retangulares ou mesmo formatos irregulares), o tamanho e a espessura da placa influenciam diretamente a

rigidez e a distribuição das ondas estacionárias. A rigidez flexural, por exemplo, define a facilidade com que a placa se deforma sob excitação, afetando o tipo de figura observada.

Além disso, as condições de contorno, ou seja, a maneira como a placa é fixada ou apoiada, alteram significativamente os modos possíveis de vibração. Um exemplo comum é a fixação central com bordas livres, que permite a observação de padrões simétricos. A posição do ponto de excitação (onde se aplica a vibração ou se fricciona o arco) também pode modificar o modo excitatório, revelando diferentes figuras mesmo para uma mesma frequência.

Outros fatores incluem o método de excitação (como arco de violino, excitadores eletromagnéticos ou geradores de vibração) e o material granulado utilizado para visualizar os nós (como areia ou pó fino), que pode influenciar a nitidez e definição dos padrões.

Quanto ao número de figuras possíveis, teoricamente é infinito, já que uma placa é um sistema contínuo com infinitas frequências naturais (autovalores), cada uma associada a um modo de vibração distinto. Na prática, o número de figuras observáveis é limitado pelos equipamentos disponíveis e pela capacidade de excitação das frequências. No entanto, como demonstrado por Chladni em seu trabalho original de 1787, em apenas 11 placas foi possível registrar 166 figuras diferentes, mostrando a imensa variedade de padrões possíveis (NERES et al., 2024).

2.4. Conclusão

O experimento das Figuras de Chladni é uma demonstração visual dos princípios da acústica e da física ondulatória. Ele permite "ver" os modos de vibração de uma superfície, ilustrando conceitos como ressonância e ondas estacionárias. A forma e a complexidade dos padrões são determinadas por uma combinação de fatores, incluindo a frequência de excitação, as propriedades físicas da placa e as condições de contorno.

3. DEMONSTRAÇÃO 3: Tubo de Rijke

O experimento com o tubo de Rijke tem como objetivo observar um fenômeno físico onde energia térmica é convertida em som. Trata-se de um sistema ressonante no qual a convecção natural do ar aquecido promove oscilações acústicas sustentadas. Esse experimento permite uma conexão direta entre os conceitos de termodinâmica (convecção), acústica (ressonância), transferência de calor e ondas estacionárias.

Teoricamente, o tubo funciona como um ressonador acústico aberto nas duas extremidades, apresentando modos de vibração característicos de tubos abertos, onde a frequência fundamental é dada pela equação 2 a seguir.

$$f = \frac{v}{2L} \quad (2)$$

Onde:

v: velocidade do som no meio;

f: frequência da fonte sonora;

L : comprimento do tubo.

A importância do experimento reside em sua capacidade de demonstrar um tipo de auto-oscilador térmico, com aplicações em sistemas termoacústicos modernos, como refrigeração sem compressor e geradores termoacústicos. Historicamente, o tubo foi estudado por Julius Rijke em 1859 e marca um dos primeiros exemplos de geração de som sem parte mecânica em movimento.

Espera-se observar que, ao aquecer uma malha metálica no interior de um tubo vertical, o sistema emite som devido à interação entre a convecção do ar quente e os modos naturais do tubo. Quando o tubo é colocado na horizontal, o som cessa, evidenciando o papel crucial da convecção.

3.1. Metodologia

A montagem experimental foi constituída por três tubos de comprimentos diferentes, abertos em ambas as extremidades, fixados verticalmente em uma base de alumínio como mostra a figura 5. Dentro de cada tubo, foi posicionada uma malha metálica aproximadamente a um quarto de sua altura total. A fonte de calor utilizada foi uma vela comum, colocada sob o tubo de forma a aquecer a malha metálica até o ponto de incandescência.

O experimento foi realizado seguindo o seguinte procedimento: primeiramente, a malha metálica foi aquecida pela chama da vela até se tornar visivelmente incandescente. Em seguida, a vela foi retirada e o tubo mantido na posição vertical. Nesse momento, foi possível observar auditivamente a emissão sonora característica do fenômeno de Rijke. Este procedimento foi repetido para tubos de diferentes comprimentos, com o objetivo de investigar a relação entre comprimento do tubo e frequência do som emitido. Posteriormente, os mesmos testes foram realizados com os tubos na posição horizontal, observando-se a

ausência de emissão sonora, confirmando a importância do fluxo convectivo natural para a manutenção da oscilação.

Figura 5: Tubos usados para o experimento.



Fonte: autoria própria

3.2. Resultados

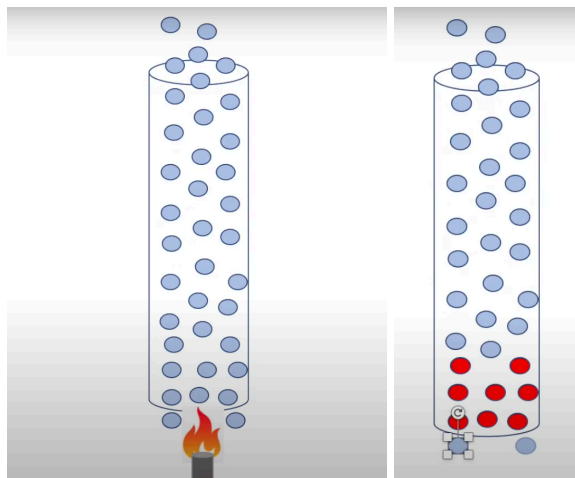
Durante a realização do experimento, observou-se que, após aquecer a malha metálica com a vela e retirar a fonte de calor, os tubos emitem um som contínuo e audível enquanto permaneciam na posição vertical. Esse som variava de tonalidade conforme o comprimento de cada tubo, sendo mais agudo nos tubos curtos e mais grave nos tubos longos. Em todos os casos, a emissão sonora cessava completamente quando o tubo era colocado na posição horizontal.

Essa diferença clara entre as duas orientações reforça a dependência do fenômeno da convecção natural do ar, que só ocorre de forma eficaz com o tubo na vertical. Além disso, foi possível perceber que, após certo tempo de emissão, o som diminuía de intensidade, o que indica o resfriamento gradual da malha e a consequente interrupção da transferência de calor necessária para manter a oscilação. Esse comportamento foi consistente em todas as repetições.

3.3. Discussão

Os resultados confirmaram que o som emitido depende diretamente do comprimento do tubo e da posição vertical conforme a figura 6, como previsto pela teoria da ressonância em tubos abertos, tubos mais longos emitiram sons mais graves, consistentes com a equação 2.

Figura 6: Tudo na posição vertical mostrando o sistema de convecção natural.



Fonte: YEANY, Bruce. *Singing Rijke Tubes // Homemade Science with Bruce Yeany*. YouTube, 2019.

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0VvXBjBqv7o>. Acesso em: 23 maio 2025.

A ausência de som na posição horizontal demonstra a dependência do sistema à convecção natural do ar, ausente nessa orientação. Pequenas discrepâncias nos valores de frequência podem ser atribuídas a fatores como variação de temperatura ambiente, imprecisão na localização exata da malha e tempo de aquecimento dialogando com o comportamento de ondas estacionárias em tubos sonoros, e a propagação do som em meios materiais.

Uma comparação interessante pode ser feita entre os tubos utilizados no experimento de Rijke (abertos nas duas extremidades) e tubos fechados em uma das extremidades, como os observados em outras atividades do curso. Em tubos abertos, como os do tubo de Rijke, a ressonância ocorre com antinodos de pressão nas extremidades. Um antinodo de pressão é um ponto onde a variação de pressão é máxima — ou seja, a pressão oscila muito entre alta e baixa durante a propagação da onda sonora. Já em termos de deslocamento do ar, esses pontos são nós (o ar praticamente não se move). A frequência fundamental nesses tubos segue a equação 2 .

Já em tubos fechados em uma extremidade e abertos na outra, como o tubo com coluna de água mostrado em outro experimento da disciplina, a ressonância ocorre com um nó de pressão na extremidade fechada (pressão constante) e um antinodo de pressão na extremidade aberta, resultando em uma frequência fundamental menor, dada por $f = \frac{v}{4L}$.

Essa diferença influencia diretamente na tonalidade do som emitido. Assim, para um mesmo comprimento, um tubo fechado em uma extremidade emitirá um som mais grave do

que um tubo completamente aberto. No caso do tubo de Rijke, a condição de tubo aberto é essencial, pois permite a interação da onda sonora com o meio externo e facilita a formação da onda estacionária que será amplificada pelo aquecimento e pela convecção.

Além disso, há uma correção prática: o nó de pressão na extremidade aberta não ocorre exatamente na borda do tubo, mas um pouco além, devido ao efeito da radiação sonora para fora do tubo. Essa "correção de extremidade" é da ordem de $0,6 R$, onde R é o raio do tubo, e deve ser considerada para obter maior precisão nos cálculos.

Além disso, é fundamental compreender que as ondas sonoras que se propagam nos tubos são longitudinais, compostas por regiões alternadas de compressão e rarefação do ar. Essas variações são geradas pela vibração periódica de uma fonte (no caso do tubo de Rijke, pelo fluxo convectivo interagindo com a malha aquecida), e se propagam ao longo do tubo transmitindo energia sem transporte de matéria.

O som audível, portanto, depende de um meio material para se propagar, e sua natureza ondulatória é evidenciada por fenômenos como reflexão, interferência e difração, observados também em ondas mecânicas e eletromagnéticas. O tubo de Rijke funciona, nesse contexto, como uma cavidade ressonante — ou seja, um meio que seleciona certas frequências naturais de oscilação do ar confinado.

Um aspecto notável é que as ondas de pressão e de deslocamento das partículas de ar estão em quadratura de fase, ou seja, defasadas em 90° . Isso significa que o máximo deslocamento das partículas (antinodo de deslocamento) coincide com um ponto de pressão constante (nó de pressão), e vice-versa. Essa relação é crucial para entender a localização dos nós e antinodos ao longo do tubo.

A propagação do som no tubo também obedece à equação de onda unidimensional, e sua velocidade está relacionada à compressibilidade do ar.

Adicionalmente, é interessante destacar a relação entre o tubo de Rijke e o tubo de Sondhauss. Este último é um dispositivo semelhante que também converte calor em som, porém com uma extremidade fechada. Diferente do tubo de Rijke, o tubo de Sondhauss opera como um ressonador de um quarto de onda e não depende de convecção contínua. A geração do som ocorre quando o ar quente confinado próximo à extremidade fechada se expande e contrai ciclicamente, produzindo oscilações audíveis. Ambos os dispositivos são exemplos clássicos de motores termoacústicos, nos quais o calor é diretamente convertido em vibração

sonora por meio da interação entre fluxo térmico e dinâmica de compressões e rarefações do ar.

3.4. Conclusão

O experimento com o tubo de Rijke permitiu verificar a conversão de energia térmica em som por meio da convecção do ar e da ressonância acústica.

Observou-se que o som só é produzido quando o tubo está na posição vertical, destacando o papel essencial da convecção natural do ar aquecido.

A comparação entre tubos abertos e fechados e o entendimento da distribuição de nós e antinodos, tanto de pressão quanto de deslocamento, enriqueceram a análise física envolvida. Variações do experimento, como o uso de tubos com diferentes configurações (como o tubo de Sondhauss), podem ampliar ainda mais a compreensão dos efeitos termoacústicos.

4. DEMONSTRAÇÃO 4: Uma corda

O som é um tipo de onda mecânica, ou seja, que depende de um meio de propagação material. Um dos grandes nomes desse ramo científico é Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830), ele desenvolveu a compreensão de que ondas periódicas podem ser decompostas em modelos mais simples, as chamadas séries de Fourier. Isso permitiu que cientistas e músicos pudessem ver o som de outra maneira. (VIOLA, PIOVESAN, 2018)

Seguindo seu trabalho, foi entendido que havia uma frequência fundamental e que seus múltiplos seriam outros tons da mesma nota, denominados de harmônicos, sendo versões mais graves ou agudas. Sendo descrita pela equação (3) (NUSSENZVEIG, 1996) abaixo.

$$f = \frac{1}{(2L)} \cdot \left(\frac{T}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Onde:

f: frequência obtida;

L: o comprimento da corda vibrante;

T: tensão;

μ : densidade linear da corda utilizada.

Tendo ela em vista, é possível compreender os princípios físicos que guiam o comportamento de cordas, sendo observável as relações entre a frequência, o comprimento e

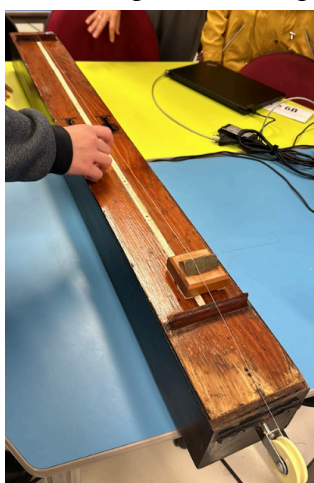
a tensão aplicada. Assim, comprimentos menores tendem a produzir sons mais agudos, enquanto tensões menores tendem a tons mais graves.

Desse modo, o estudo de experimentos em que há variáveis no comportamento de cordas tem a finalidade de compreender os princípios da matemática e a física que fundamentam a música e a própria concepção dos instrumentos.

4.1. Metodologia

O experimento foi executado a fim de investigar os princípios físicos de cordas, nesse sentido, foi observada uma corda isolada e esticada, de modo que é possível pensar no conjunto de cordas que formam instrumentos, como pianos e violões, a partir dela. Para obter a corda única foi utilizada uma tanpura box adaptada (Figura 7).

Figura 7: tanpura box adaptada.



Fonte: autoria própria.

Tal instrumento é tradicionalmente parte da música indiana, sendo composto por uma ou mais cordas esticadas sobre uma caixa de ressonância que amplifica o som, ele é tocado similarmente ao violão. As adaptações feitas foram a presença de uma única corda esticada, um cavalete móvel, e um sistema de roldana com pesos posicionado na extremidade da corda e da caixa.

Assim, a alteração com o cavalete permite o estudo da variação do comprimento da corda vibrante a partir da alteração do ponto de apoio da corda, já as possibilidades de peso possibilitam uma análise dos efeitos de diferentes tensões que podem ser aplicadas à ela. Para a execução, foram utilizados cinco pesos de 200g - de modo que o aumento do peso é

proporcional ao aumento da tensão -, um suporte conectado à extremidade livre da única corda por um gancho, uma caixa ressonante de cerca de 1m e um cavalete móvel.

Assim, primeiro foram testados, com um peso de 1 kg (cinco pesos de 200 g), as diferentes posições do cavalete que mudou diretamente o comprimento vibrante da corda, sendo observado o som emitido ao tocá-la e suas qualidades de timbre e altura. Em seguida, o comprimento foi mantido constante, alterando a tensão da corda a partir da retirada gradual dos pesos, observando as mesmas qualidades do som emitido ao tocar a corda a cada peso retirado.

4.2. Resultados

Ao longo do primeiro experimento, foi observado que quando o cavalete está mais próximo da extremidade acoplada aos pesos, o comprimento da corda vibrante diminui, tornando o som mais agudo. Quando o cavalete foi afastado de tal extremidade, o comprimento aumentou, emitindo um som mais grave, as vibrações, por sua vez, aparentam estar menos intensas.

Tal resultado pôde ser observado conforme a posição do cavalete era alterada, de modo que apresentou um comportamento proporcional a sua distância, estando mais agudo com comprimentos menores.

Na segunda parte, foi perceptível que quanto maior o peso, maior a tensão na corda , o que produziu um som agudo e definido - ou seja, limpo para se ouvir -, ademais a vibração da corda pôde ser bem observada, afinal, o movimento oscilatório teve uma duração suficiente para poder observá-lo. Em seguida, retirando peso, foi obtido que quanto mais leve, menor a tensão na corda, o que dificultou tocá-la, uma vez que ela ficou um pouco solta sobre o cavalete, assim, tendo um som de curta duração e pouca definição, já que o escutado dependeu de uma força aplicada a corda que precisou ser elevada por comparação ao feito anteriormente.

Assim, foi visto que conforme o peso e a tensão, por consequência, aumentaram, a qualidade e a definição do som, o quão agudo era, o tempo de sustentação do movimento e das vibrações aumentaram progressivamente.

4.3. Discussão

Partindo da equação que fornece a frequência fundamental (Equação 3), **tenho** **que** como foi usada uma corda apenas, a densidade linear foi uma constante, assim, foi possível observar os efeitos da variação de L e T no som produzido pela corda.

No experimento em que o comprimento variou, **tenho que** apenas L mudou, o observado foi que conforme o comprimento aumenta, o som fica mais grave, ou seja, a frequência diminui, pois o divisor aumenta, o que reforça a relação inversamente proporcional entre o comprimento da corda vibrante e a frequência. Assim, é possível criar sons com diferentes frequências a partir da variação do comprimento de corda apenas, algo que pode ser observado na harpa e no piano, ou no violão mesmo, já que ao pressionar a corda em casas maiores, o comprimento diminui, o que deixa as notas mais agudas, por exemplo.

Na segunda demonstração, a tensão variou a partir da diferente quantidade de pesos colocada, assim, ao aumentar a massa na extremidade da corda, **aumentei** T proporcionalmente. Na equação **tenho** que T é diretamente proporcional à frequência, foi observado que com o aumento da tensão houve um aumento da frequência, ou seja, o som ficou mais agudo. Ademais, foi visto que, com mais peso, a corda ficou mais estável e foi necessário fazer menos força para a obtenção de um som alto, algo que comumente é desejado em instrumentos musicais, sendo desejável, então, cordas com maior tensão.

4.4. Conclusão

Os experimentos realizados com o auxílio da tanpura box adaptada permitiu a análise através da prática do comportamento de uma corda e os princípios físicos envolvidos em sua vibração quando seu comprimento e tensão variam.

Ao diminuir o comprimento da corda vibrante, foram obtidos sons mais agudos, por diminuir a frequência de vibração da onda, corroborando com o afirmado na equação 3. Assim, foi concluído que é possível estudar de forma eficaz modelos simples de uma corda como forma de compreender sistemas físicos complexos como pianos, violões e harpas.

Ademais, na demonstração que variou a tensão os pesos apresentaram resultados coerentes com a fórmula (Y), onde o aumento da tensão causou o aumento da frequência, resultando em notas mais agudas o que indica sua eficiência para a compreensão do comportamento de cordas que deve ser considerado ao estruturar um instrumento musical.

Portanto, tanto o cavalete móvel quanto o sistema de pesos, são meios relevantes ao estudo da física envolvida no comportamento de onda em instrumentos musicais de corda, reforçando os conceitos estabelecidos por Fourier.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Rijke tube. Disponível em:
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rijke_tube&oldid=1291799209> Acesso em: 23 mai. 2025.

HOMEMADE SCIENCE WITH BRUCE YEANY. Singing rijke tubes // homemade science with Bruce yeany. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=hMf8Rn4bdME> . Acesso em: 23 mai. 2025.

NERES, T. S.; SOUZA, E. A.; SANTA-HELENA, E. L. *Estudo dos padrões estacionários de Chladni*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, e20230354, 2024. DOI:
<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0354>. Acesso em: 22 mai. 2025.

PUBLIC DOMAIN REVIEW. *Chladni Figures (1787)*. Disponível em:
<https://publicdomainreview.org/collection/chladni-figures-1787/>. Acesso em: 20 mai. 2025.

SANTOS, R. S. dos; CAMARGO FILHO, P. S.; ROCHA, Z. F. D. C. Descobertas sobre a teoria do som: a história dos padrões de Chladni e sua contribuição para o campo da acústica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, e248, 2017. DOI:
<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0248>. Acesso em: 24 mai. 2025.

SILVA, J. C.; TORRIANI, I. *Relatório de Física Experimental: Figuras de Chladni*. Instituto de Física da Unicamp, 2004. Disponível em:
http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2004/009027JulioC_IrisTorriani_F809_RF.pdf. Acesso em: 22 mai. 2025.

VIOLA, Olavo; PIOVESAN, Erick. Música: um estudo físico matemático sobre o som através da série de Fourier. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.40, n.1, e20190046, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/rL4X9n6rVhY6ZJczHNRNjqH/>. Acesso em: 24 mai. 2025.

YOUNG, Hugh *et al.* **Física de Sears & Zemansky**:: termodinâmica e ondas:. 12. ed. São Paulo: Pearson Education, 2015.

HALLIDAY, David *et al.* **Fundamentos de física**: volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2020.