



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE INOVAÇÃO - INOVA USP
Curso de Ciências Moleculares



ALICE ALVES BOZZI
BRUNA RODRIGUES DA SILVA
LUIZA LUCCHETTI ODDI LOURENÇO
SOFIA FIGUEIREDO FORTI

Nota: 9,6/10

RELATÓRIO Nº5 DE AULA PRÁTICA:

Som

SÃO PAULO,
2025

ALICE ALVES BOZZI
BRUNA RODRIGUES DA SILVA
LUIZA LUCCHETTI ODDI LOURENÇO
SOFIA FIGUEIREDO FORTI

RELATÓRIO Nº5 DE AULA PRÁTICA:

Som

Relatório referente à aula prática ministrada no dia 12/05/2025 na disciplina CCM0122 - Física II do Curso de Ciências Moleculares da Universidade de São Paulo, na modalidade de bacharelado, como requisito parcial avaliativo para aprovação semestral.

Orientador: Prof. Dr. Caetano Rodrigues Miranda

SÃO PAULO,
2025

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	4
2	OBJETIVOS.....	5
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
	1. Diapasão e coluna d'água;.....	5
	2. Figuras de Chladni;.....	6
	3. Tubos de Rijke;.....	7
	4. Corda;.....	7
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
	1. Diapasão e coluna d'água;.....	8
	2. Figuras de Chladni;.....	9
	3. Tubos de Rijke;.....	10
	4. Corda;.....	11
5	CONCLUSÃO.....	12
6	REFERÊNCIAS.....	13

1 INTRODUÇÃO

A sequência de experimentos apresentada neste relatório tem como objetivo ilustrar algumas propriedades físicas das ondas e os diversos modos como elas se propagam. Ondas são perturbações que transportam energia através do espaço ou de um meio material, sem o transporte de massa. Elas podem ser classificadas como transversais, como a radiação eletromagnética, ou longitudinais, como o som. Dessa forma, as ondas estão presentes em praticamente todas as áreas da Física: ondas sonoras na acústica, ondas eletromagnéticas no eletromagnetismo e ondas superficiais na dinâmica dos fluidos, por exemplo.

Independentemente do tipo, todas as ondas compartilham certas características fundamentais: comprimento de onda λ , frequência f , velocidade de propagação v , amplitude A e número de onda k . Além disso, elas apresentam regiões específicas como nós (pontos de mínima oscilação) e ventres (pontos de máxima oscilação). A semelhança entre os diferentes tipos de ondas se reflete na existência de uma equação geral da onda, que descreve matematicamente o seu comportamento:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t + \phi)$$

Equação 1: Equação da onda senoidal.

Nesta equação, x representa a posição no espaço, t representa o tempo, A a amplitude da onda, ω a frequência angular, k o número de onda e ϕ a fase inicial. Quando uma onda apresenta periodicidade, diz-se que ela é harmônica. Ondas harmônicas têm frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental, e sua superposição pode gerar padrões de ressonância. O som é uma onda harmônica, e têm fenômenos de ressonância amplamente observados na acústica, como em instrumentos musicais e tubos de ar.

A maior parte dos experimentos realizados neste relatório envolvem ondas sonoras que, por serem ondas longitudinais, necessitam de um meio material para se propagar. A propagação ocorre por meio de compressões e rarefações sucessivas das partículas do meio, como o ar; por isso, o som é caracterizado ao mesmo tempo como uma onda de pressão e uma onda de deslocamento. Quando esse padrão de variação de pressão atinge nossos ouvidos, é percebido como som. Assim, o som pode ser gerado, por exemplo, ao imprimir um pulso em uma corda tensionada, pode-se gerar uma onda sonora: a vibração da corda causa compressões e rarefações no ar ao redor. Existe, assim, uma correspondência direta entre a onda na corda e a onda sonora resultante. O som também pode ser gerado por variações abruptas de temperatura, que criam diferenças de pressão; e suas ondas podem fazer com que vibrações em superfícies gerem padrões geométricos visíveis devido à movimentação do material.

2 OBJETIVOS

Este relatório tem como finalidade determinar experimentalmente a velocidade de propagação do som no ar analisando a relação entre a altura de uma coluna de água num tubo e a ressonância de certa frequência sonora emitida por um diapasão; identificar os fatores físicos (como frequência, geometria da placa e modos vibratórios) que definem a formação das Figuras de Chladni e quantificar o número de padrões possíveis; analisar os mecanismos termoacústicos no tubo de Rijke, comparando-os com o comportamento sonoro de tubos abertos e fechados, além de investigar o efeito da orientação do tubo (horizontal/vertical) na propagação das ondas; e, por fim, avaliar experimentalmente como a variação da densidade linear de uma corda afeta sua velocidade e frequência de propagação de ondas, relacionando teoria e prática para validar os princípios físicos estudados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

1. Diapasão e coluna d'água;

O experimento do diapásão foi realizado com um tubo de vidro, chamado tubo ressonante (Figura 1A), pois as ondas sonoras têm a capacidade de ressonância dentro do mesmo; um recipiente contendo água, conectado ao tubo de vidro por uma mangueira fina; e três diapasões de metal (Figura 1B), que ressoavam ao serem tocados, emitindo ondas de som de frequência específica, cada um dos três correspondiam às frequências: 512, 384 e 256 Hertz (Hz).

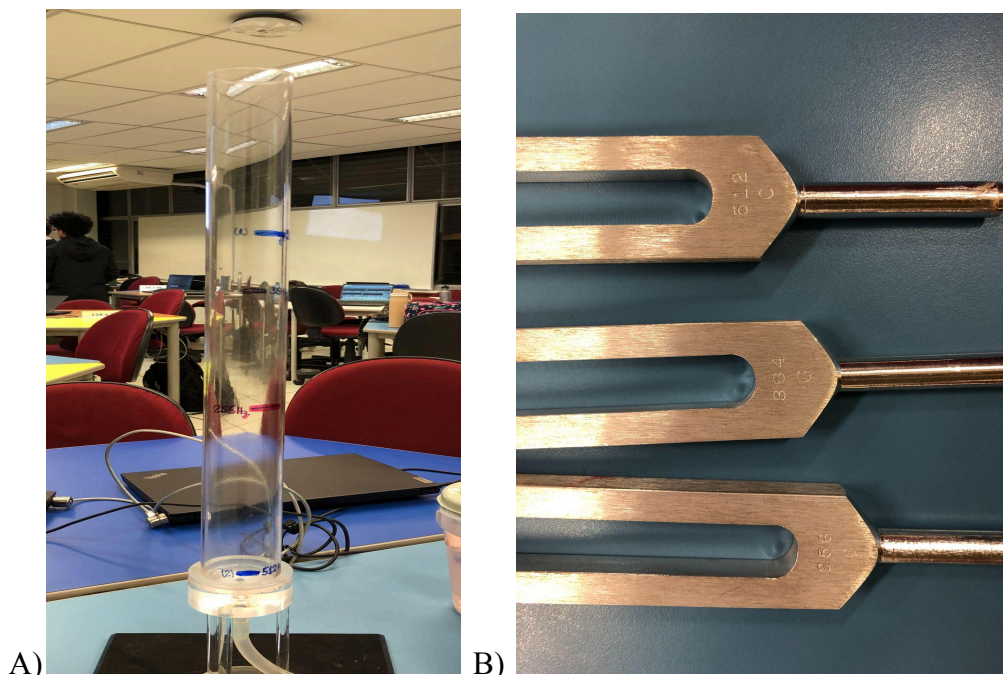


Figura 1: A) Tubo Ressonante; B) Diapasões de metal.

Fonte: Autores.

O tubo foi colocado verticalmente, parcialmente preenchido com água; havia marcações nele que indicavam o nível que a coluna de água deveria estar para que ocorresse a ressonância, dependendo da frequência que se desejava ressoar. Havia duas marcações distintas para a frequência de 512 Hz, a primeira há 15 cm da borda do tubo e a outra há 48,5 cm; uma marcação para a frequência de 256 Hz e outra para 384 Hz.

O experimento foi arranjado de modo que a altura da coluna de água no tubo pudesse ser alterada, bastando que se alterasse a altura do reservatório conectado ao tubo por uma mangueira. Quando a altura do nível de água era alterada até a marcação desejada, ao mesmo tempo em que um diapasão era tocado próximo da abertura do tubo, o som propagado pelo diapasão se intensificava evidentemente.

2. Figuras de Chladni;

O experimento foi conduzido a fim de observar a formação de figuras de Chladni, padrões bidimensionais que surgem na superfície de uma placa vibrante de metal coberta por pó fino. Para isso, foram utilizadas duas placas metálicas finas e planas, uma de latão em formato triangular e outra de alumínio em formato quadrangular, fixadas pelos seus respectivos centros geométricos, como mostra a Figura 2.



Figura 2: Aparato experimental das Figuras de Chladni.

Fonte: Autores.

Sobre as placas, posicionadas horizontalmente, foi polvilhada uma camada uniforme de areia. Com o sistema montado, a emissão de ondas sonoras em frequências variáveis foi realizada ao encostar o dedo em uma das arestas da placa e movimentar o arco de um violino verticalmente, de baixo para cima, em algum outro ponto dela até que figuras simétricas de areia fossem exibidas.

3. Tubos de Rijke;

O experimento dos tubos de Rijke foi feito com tubos abertos em ambas as extremidades e com grades de metal na metade inferior de seu interior. Foram utilizados três tubos diferentes, dois de vidro, sendo um de menor e outro de maior circunferência e comprimento e um de metal de maior circunferência e comprimento, mostrados na Figura 3. Com o auxílio de uma lamparina a álcool aqueceu-se o interior do tubo até que a grade de metal ficou incandescente, e após retirar o tubo da fonte de calor, observou-se o fenômeno.

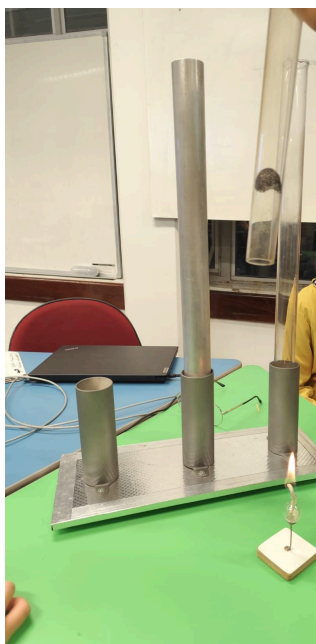


Figura 3: Aparato experimental dos tubos de Rijke.

Fonte: Autores.

4. Corda;

Para esse experimento foi utilizada uma caixa acústica de madeira para amplificar o som, com uma corda de aço tensionada por um peso pendente. O peso era constituído por discos de 100 gramas removíveis. Uma peça de madeira podia ser movida ao longo da corda para que o som fosse observado, ao beliscar-se a corda. A ideia era simular o mecanismo de funcionamento de um violão ou piano. O aparelho descrito pode ser visto na Figura 4.



Figura 4: Experimento para análise de tensão da corda.

Fonte: Slides de aula.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Diapasão e coluna d'água;

A velocidade do som no ar possui um valor bem conhecido, que depende apenas das propriedades do meio em que se propaga, podendo variar de acordo com a temperatura ou pressão do ar. Ou seja, sabemos que a velocidade do som não se altera, pelo menos num ambiente bem conhecido, e a diferença entre diferentes tons sonoros escutados se deve a uma variação do comprimento de onda λ e da frequência f , que são inversamente proporcionais, segundo a equação:

$$v = f \cdot \lambda$$

Equação 2: Velocidade da onda.

O conhecimento acerca dos harmônicos de ondas sonoras nos fornece as relações necessárias para obter o valor de λ correspondente à frequência 512 Hz. Foi considerado que quando o nível de água distava $L_1 = 15$ cm da abertura do tubo, a onda formada era a do primeiro harmônico, isso nos permite obter a seguinte relação: $\lambda_1 = 4 L_1$. Similarmente, quando o nível estava à $L_3 = 48,5$ cm, era formada a onda do terceiro harmônico onde $\lambda_3 = \frac{4}{3} L_3$. Os harmônicos formados foram os primeiros harmônicos ímpares porque um tubo fechado, como o do experimento, não emite harmônicos de ordem par.

Tabela 1: Associação das medidas do tubo fechado com os harmônicos do som.

Medidas fornecidas (cm)	Comprimento de onda λ (cm)	v_{som} (m/s)
$L_1 = \lambda_1 / 4 = 15$	$\lambda_1 = 60$	307,2
$L_3 = 3 \lambda_3 / 4 = 48,5$	$\lambda_3 = 64,7$	331,1
—	$\lambda_m = 62,4$	317,44

Idealmente, era esperado que a relação entre as medidas fornecidas fosse: $L_3 = 3 L_1$, mas como isso não é verificado, obtivemos diferentes v_{som} , considerando os comprimentos de onda individualmente obtidos. Realizando uma média entre estes λ_1 e λ_3 , obtemos um valor intermediário λ_m . Entretanto, nenhum dos três valores obtidos se igualou ao esperado; comparando as velocidades com o valor de referência da literatura, $v_{som} = 343$ m/s, válido à 20°C, vemos que nenhum deles se aproxima o suficiente do valor real. A incerteza proveniente das medições de L_1 e L_3 não seria suficiente para justificar tal discrepância, mas há uma argumentação que justifica essa diferença.

Sobre o tubo fechado e seus modos harmônicos; para que os harmônicos se formem com os nós nas marcações esperadas, na extremidade aberta do tubo fechado a pressão total deve permanecer constante e igual à pressão atmosférica; isso garante que na extremidade aberta haja um nodo da onda de pressão do som, e analogamente, haja um antinodo de deslocamento. Porém, para um tubo real recebendo ondas sonoras, a pressão só se anula um pouco adiante da extremidade aberta, pois a coluna de ar vibrante se estende um pouco além da abertura. Logo, há uma correção necessária para a posição real de formação do nódulo; que equivale a acrescentar $\approx 0,6 R$ ao comprimento efetivo do tubo, onde R é o raio do mesmo. Isso nos garante que λ_1 e λ_3 devem ser maiores que os valores obtidos, e é condizente com o fato de a velocidade do som calculada ser menor que o esperado.

2. Figuras de Chladni;

A cada frequência aplicada, determinadas regiões da placa vibravam intensamente, culminando no acúmulo de areia onde não havia vibração, as regiões nodais, permitindo a observação da formação de padrões específicos na superfície da placa, como ilustra a Figura 5.

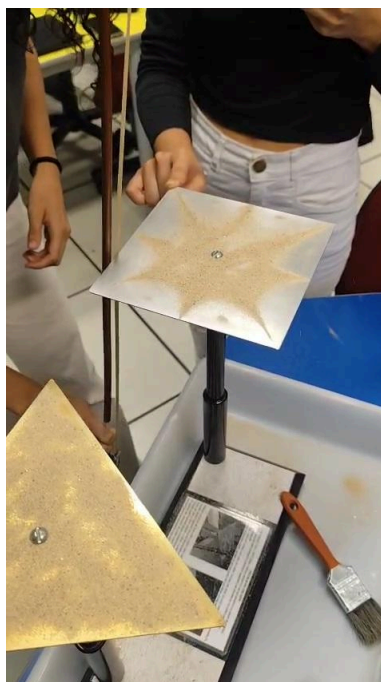


Figura 5: Formação de figuras de Chladni na placa de alumínio.

Fonte: Autores.

Ajustes finos permitiram identificar frequências nas quais o sistema entra em ressonância. A variação da frequência de vibração resultou na formação de diferentes padrões geométricos sobre a superfície da placa, confirmando a presença de figuras de Chladni. Em sons mais graves, isto é, frequências mais baixas, os padrões observados eram relativamente simples, com poucas linhas nodais, formando formas retas ou levemente curvas. À medida que a frequência aumentava, os padrões tornaram-se mais complexos, com o aparecimento de múltiplas regiões nodais que se cruzavam e formavam figuras simétricas e intrincadas.

Os resultados mostraram uma correlação direta entre a frequência aplicada e a complexidade do padrão formado: cada frequência ressonante revelava uma nova configuração estável de linhas nodais, que decorria do fato de frequências diferentes terem comprimentos de onda diferentes, e por isso seus nós são formados em pontos diferentes, evidenciando a sensibilidade do sistema às condições de ressonância e proporcionando uma visualização clara da propagação de ondas estacionárias em superfícies bidimensionais e dos princípios físicos envolvidos na vibração de corpos sólidos.

3. Tubos de Rijke;

~~Qualitativamente~~, observou-se que o tubo começa a produzir um som intenso e sustentado, ao retirá-lo da fonte de calor, demonstrando um fenômeno termoacústico, onde energia térmica é convertida em energia sonora através da interação entre o calor fornecido pela tela e uma onda

sonora estacionária estabelecida no interior do tubo. Ao colocar o tubo na horizontal, ou tapar sua abertura superior, o som parou de ser emitido.

Os tubos de Rijke funcionam como ressonadores termoacústicos. Como eles são abertos em ambas as extremidades, as extremidades funcionam como nós de pressão: pontos onde a variação de pressão é mínima, pois a pressão é próxima à pressão atmosférica; e as extremidades também funcionam como ventres de deslocamento, onde as partículas de ar exibem máxima amplitude de vibração. O tubo, então, ressoa em frequências específicas que permitem a formação desses padrões de ondas estacionárias. A frequência mais grave e geralmente mais proeminente é a frequência fundamental, determinada pela Equação 1, onde v é a velocidade do som no ar dentro do tubo e L é o seu comprimento. O som ouvido corresponde a uma dessas frequências de ressonância do sistema.

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

Equação 3: Frequência fundamental.

Pela Equação 1, observa-se que o som emitido depende do tamanho do tubo, pois a frequência diminui quando o comprimento L aumenta. Isso foi confirmado experimentalmente pelo som mais grave emitido pelos tubos maiores.

O fenômeno termoacústico ocorre por uma dinâmica de movimento do ar e transferência de calor. Há um fluxo ascendente contínuo de ar causado pela corrente de convecção gerada pelo aquecimento da grade de metal, sobre o qual se superpõe o movimento oscilatório da onda sonora estacionária. Esse acoplamento entre os fluxos térmico e acústico segue um padrão cíclico, como mostra a Figura 6. Durante a primeira metade do ciclo vibratório, o ar flui para dentro do tubo pelas extremidades até que a pressão atinja seu valor máximo; na segunda metade, o fluxo se inverte, com o ar sendo expelido até que a pressão atinja seu mínimo.

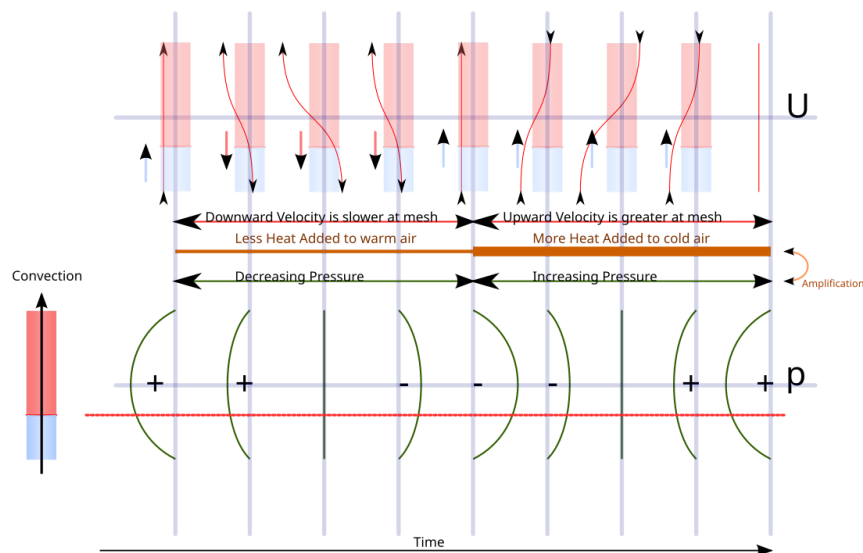


Figura 6: Funcionamento dos tubos de Rijke.

Fonte: Wikipedia.

Pelo Critério de Rayleigh, um princípio fundamental que rege a conversão termoacústica, a amplificação eficiente de oscilações sonoras requer que o calor seja fornecido ao fluido preferencialmente durante as fases de compressão ou aumento de pressão. No Tubo de Rijke, a grade metálica, além de fornecer a energia térmica necessária, tem uma inércia térmica que introduz um retardamento estratégico na transferência de calor, garantindo que a maior parte da energia seja liberada precisamente quando a onda sonora atinge seu máximo de pressão na região da tela. Quando o balanço entre esse reforço energético e as perdas por dissipação se torna positivo, estabelece-se a oscilação auto-sustentada que percebemos como o som característico do tubo.

Este processo explica por que o som não é emitido quando a chama está diretamente aquecendo a grade, já que todo o ar que chega à tela já está pré-aquecido, eliminando o gradiente térmico necessário para as variações repentinas de pressão que sustentam a oscilação. Também são explicadas as observações experimentais de que ao tapar a extremidade superior do tubo ou posicioná-lo horizontalmente, o fluxo de ar contínuo é impedido e por isso, o tubo deixa de produzir som.

4. Corda;

A velocidade de propagação de uma onda sobre uma corda depende apenas das propriedades físicas a qual ela está sujeita e de suas características próprias, como ilustrado pela equação:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Equação 4: Velocidade da onda numa corda.

Onde v é a velocidade, T é a tensão à qual a corda está submetida e μ é sua densidade linear, que é constante para um material e consistências uniformes, tal como a corda que foi utilizada. No experimento, variar o peso atrelado a corda gerava uma variação correspondente na tensão T . Pela equação 4, é evidente que ΔT implica uma variação da velocidade de propagação de um pulso/onda sobre a corda. Pela equação 2, sabemos que variar a velocidade de uma onda implica uma variação de sua frequência. Na Figura 7, entre os pontos (1) e (2), temos o comprimento L tensionado por uma massa m gerando tensão T .

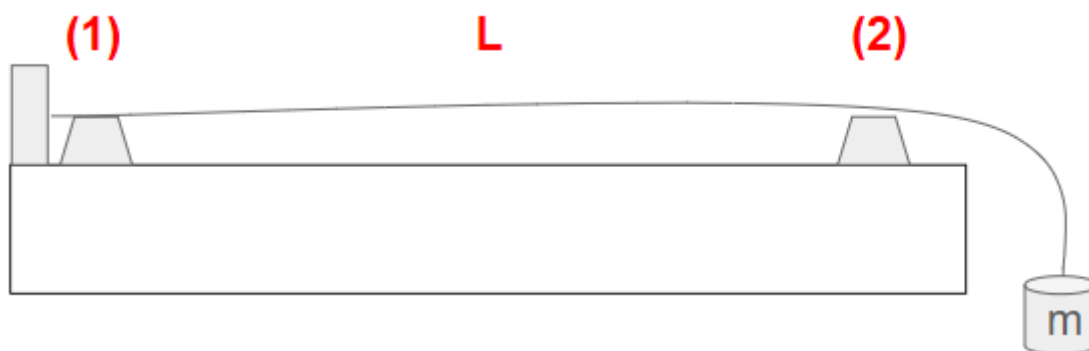


Figura 7: Esquema para análise do experimento da corda.

Fonte: Google Slides.

Além de variar a tensão T , também era possível variar o comprimento L da corda, pois havia no arranjo uma haste móvel. Há uma correspondência entre L e o comprimento de onda λ , assim aumentar L irá fazer λ aumentar e vice-versa. Também pela equação 2, vemos que variar λ de uma onda implica uma variação de sua frequência.

O funcionamento de um violão se baseia, em suma, nestes dois fatos; a variação da tensão de suas cordas, e a variação do comprimento de vibração L . A vibração das cordas do violão é o que produz o som, mas o que determina a frequência desse som gerado é a frequência do pulso imprimido sobre a corda. De modo geral, e a frequência na qual um instrumento de corda vibra é o que determina a frequência do som emitido pelo mesmo. Por isso, a velocidade do pulso imprimido sobre a corda, regulada pela tensão aplicada, e o comprimento de onda λ , que é regulado pela haste móvel, são os fatores que determinam a frequência do som escutado.

Além disso, instrumentos como o violão possuem frequências características associadas a cada modo de vibração; assim, variar as frequências emitidas permite atingir harmônicos distintos. Sabe-se que $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{nv}{2L}$, onde ω é a frequência do n-ésimo modo de vibração e quando $n = 1$, o primeiro harmônico, $f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$ é a frequência fundamental, aplicada a uma corda de densidade linear μ .

5 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados permitiram uma compreensão integrada dos fenômenos ondulatórios, em especial da ressonância acústica, da formação de ondas estacionárias e da propagação de vibrações em meios físicos diversos.

A investigação com o diapasão e a coluna d'água possibilitou a determinação experimental da velocidade do som no ar, cuja estimativa mais próxima obtida foi de 331 m/s, porém que ainda sim corresponde a um valor abaixo do esperado ($v_{som} = 343$ m/s); porém isso é devido às diferenças citadas entre o modelo teórico e o modelo prático, logo, tal discrepância era prevista. A observação das figuras de Chladni ofereceu uma visualização clara dos modos normais de vibração em superfícies bidimensionais. As variações na frequência revelaram padrões complexos, evidenciando a maneira como fatores como a forma geométrica da placa, o material e a frequência aplicada influenciam a formação das linhas nodais. Este experimento demonstrou de forma visual os princípios fundamentais das ondas estacionárias e da ressonância em superfícies rígidas.

No caso dos tubos de Rijke, foi possível identificar um fenômeno termoacústico marcante, em que a energia térmica se converte em som audível por meio da interação entre calor, movimento do ar e formação de ondas estacionárias. O experimento se mostrou de acordo com o Critério de Rayleigh, aprofundando a compreensão de mecanismos que sustentam as oscilações acústicas. Por fim, o experimento com a corda demonstrou a influência do comprimento da corda e da tensão na frequência de uma onda, confirmando que o aumento da tensão e a diminuição do comprimento resultam em maiores frequências. Essa parte do estudo reforçou a aplicação direta das equações que regem o comportamento vibratório em sistemas unidimensionais.

Em conjunto, os experimentos reforçaram os conceitos teóricos de ondas e ressonância, demonstrando, na prática, como diferentes configurações físicas e parâmetros interferem na propagação e no comportamento de ondas mecânicas e sonoras. A abordagem multidimensional, com superfícies, tubos e cordas, promoveu uma compreensão mais palpável da física ondulatória.

6 REFERÊNCIAS

FÍSICA E VESTIBULAR. **Tubos sonoros.** [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://fisicaevestibular.com.br/novo/ondulatória/acustica/tubos-sonoros/>. Acesso em: 23 maio 2025.

NUSSENZVEIG, Moysés. Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Ondas estacionárias em uma corda. Vitória: UFES, [s.d.]. Disponível em: https://fisica.ufes.br/sites/fisica.ufes.br/files/field/anexo/exp-b4_ondasestacionariasemumacorda.pdf. Acesso em: 25 maio 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Ondas estacionárias em tubos sonoros.** Porto Alegre: IF-UFRGS, [s.d.]. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis01044/Exper2.pdf>. Acesso em: 23 maio 2025.

WIKIPEDIA. Tubo de Rijke. Disponível em: https://en-m-wikipedia-org.translate.goog/wiki/Rijke_tube?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc. Acesso em: 24 maio 2025.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física 2: termodinâmica e ondas. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2016.