



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física Gleb Wataghin
IFGW - Unicamp

TUBO DE KUNDT

F709 - Tópicos do Ensino da Física II
2ºSem/2019

Felipe Pedroso Mack

RA:081335

Orientação: Prof. Dr. Pierre Louis de Assis

Docente Responsável: Prof. Dr. José Joaquin Lunazzi

Campinas/SP, 17 de dezembro de 2019

Resumo

Este trabalho teve como proposta a construção de um *Tubo de Kundt*, uma montagem experimental do sec. XIX desenvolvida para o estudo das ondas sonoras e seus estados de ressonância. O experimento é constituído por um tubo de acrílico, uma barra metálica e um disco metálico (acoplado à barra metálica) de modo a produzir uma fonte sonora com o pistão (barra + disco) e, com ele, ondas sonoras no interior do tubo. Para a geração das ondas sonoras no pistão utilizou-se um arco de violino que, embora tenha produzido ondas sonoras na barra metálica, não possibilitou a geração de ondas com uma amplitude suficiente para a formação dos estados de ressonância (harmônicos) no tubo.

1 Introdução

A Ondulatória é a área da Física dedicada ao estudo das ondas, sejam elas mecânicas, eletromagnéticas ou de matéria. Essa é uma das 5 grandes áreas abordadas no Ensino Regular, ao lado da Mecânica, do Eletromagnetismo (fragmentado em *Eletricidade* e *Magnetismo*), da Termodinâmica (mais tratada por *Termologia*) e da Óptica Geométrica.

A Acústica, por sua vez, encontra-se inserida dentro da Ondulatória, também trabalhada (mesmo que de forma básica) no Ensino Médio. Essa subárea se dedica ao estudo particular das ondas sonoras, das particularidades dos fenômenos ondulatórios associados ao som (como, por exemplo, o *eco*, a *ressonância sonora* e o *Efeito Doppler*) e das fontes sonoras (como, por exemplo, as *cordas vibrantes* e os *tubos sonoros*).

O foco deste relatório será o estudo dos *Tubos Sonoros Fechados* e da discussão a cerca de como desenvolver esse tema em sala de aula, de maneira teórica e prática, esta a partir da montagem do experimento-tema deste trabalho: o **Tubo de Kundt**.

A partir da montagem do experimento e da construção da teórica que o envolve, será possível discutir meios de trazer a Acústica para a sala de aula do Ensino Médio, vencendo a abstração que a cerca e podendo, também, despertar o interesse nessa área repleta de aplicações práticas.

Por fim, serão discutidos outros meios de se trabalhar a Acústica de maneira lúdica de modo tanto a despertar o possível interesse dos alunos na Física como um todo quanto como estratégia diferencial no ensino da física, em contraponto ao tradicionalismo que, muitas vezes, torna o conteúdo inacessível e desinteressante.

2 Contextualização Histórica e Apresentação da Montagem

O *Tubo de Kundt* é uma montagem experimental desenvolvida no século XIX pelo físico alemão August A. E. E. Kundt¹ (1839 - 1894) para elucidar a formação dos harmônicos sonoros em um tubo fechado. Kundt, que inicialmente mostrou interesse pela *astronomia* voltou seus interesses para a *física* influenciado pelo cientista experimental alemão Heinrich Gustav Magnus (1802 - 1870) conhecido, dentre outras razões, por suas pesquisas a respeito dos desvios em trajetórias balísticas, fenômeno hoje conhecido como *Efeito Magnus*.

Em 1866, Kundt desenvolveu a montagem hoje conhecida como *Tubo de Kundt* para medir a velocidade do som nos gases. Kundt utilizou um tubo de vidro com uma pequena quantidade de pó de cortiça e um pistão (constituído por uma haste acoplada a um disco, ambos metálicos). Atritando um pedaço de couro recoberto por resina, Kundt gerou ondas sonoras na haste metálica que, em conjunto com o disco, tornou-se uma fonte sonora. O som gerado, quando em ressonância dentro do tubo, organizou o pó de cortiça em pequenos montes nas posições nodais. Para a busca desses estados de ressonância, Kundt possuía o recurso da variação do comprimento do tubo onde formariam-se os estados de ressonância do som. Esses estados são hoje conhecidos como *harmônicos*.

Os montes de pó de cortiça delimitam as posições nodais das ondas, ou, também, *nós* ou *nodos*. Sabe-se, porém, que dois nodos delimitam uma semionda, o que possibilita a determinação do comprimento de onda da onda sonora formada dentro do tubo. O estado de ressonância, por sua vez, depende do comprimento do tubo que pode ser regulado por meio da movimentação do pistão.

Conhecendo-se a frequência do som emitido é possível determinar a velocidade do som no interior do tubo. Por outro lado, conhecendo-se a velocidade do som no interior do tubo é possível determinar a velocidade com o qual o som se propaga na barra metálica. Alguns das referências consideradas neste relatório atestam que o objeto principal de Kundt era, na verdade, a determinação da velocidade do som na haste metálica e não sua velocidade no ar.

A reprodução dessa montagem experimental é bastante comum em laboratórios de ensino de Ciências sofrendo, porém, alterações em virtude dos novos recursos. O uso de falantes e geradores de frequência, por exemplo, faz com que a busca pelos harmônicos no tubo aconteça em virtude da regulagem eletrônica da frequência emitida. A imagem a seguir indica uma montagem moderna do Tubo de Kundt.

¹ August Adolf Eduard Eberhard Kundt (1839 - 1894) foi um físico alemão. Kundt iniciou seus estudos em Leipzig mas terminou-os na Universidade de Berlim, onde tornou-se professor. Alguns anos mais tarde, tornou-se professor do Instituto Politécnico Federal de Zurich. Em 1888 voltou para Berlim onde assumiu a cadeira de diretor no Instituto de Física de Berlim, sucessor de Hermann von Helmholtz. Morreu Lübeck em 21 de maio de 1894.



Figura 1: Montagem moderna para o Tubo de Kundt utilizada em atividades realizadas durante um mestrado profissional na Universidade Federal Rural de Pernambuco. Ref [3].

Podemos notar, a partir da imagem, que essa montagem conta com um gerador de frequência (celular), um amplificador ligado a um auto-falante e um tubo de acrílico de comprimento regulável (por meio de um pistão). Embora eficiente, essa montagem distoa da montagem original não só pelos materiais utilizados como, também, pela utilização dos recursos eletrônicos.

3 Formulação Teórica

3.1 Tubos Sonoros Fechados

A medição da velocidade do som utilizando-se o Tubo de Kundt faz-se possível em virtude do estudo matemático das ondas estacionárias. Consideraremos o Tubo de Kundt como um *tubo sonoro fechado* para a representação das ondas estacionárias.

Emitindo-se uma onda (no caso, sonora) no tubo, ela irá refletir na parede do tubo. Caso a emissão seja constante, teremos pontos fixos de interferência construtiva e de interferência destrutiva. As posições de interferência construtiva serão chamadas de *ventres*, enquanto as de interferência destrutiva, de *nodos* (ou, em alguns livros didáticos, *nós*).

O primeiro estado de ressonância ocorre com a formação de *1 nodo* e *1 ventre*, criando um padrão correspondente a *um quarto de onda*, como na figura a seguir.

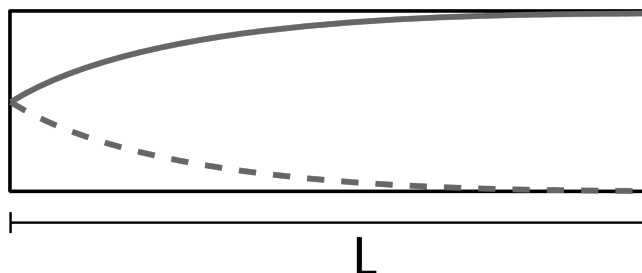


Figura 2: Formação do 1º estado de ressonância em um tubo sonoro fechado de comprimento L .

A esse estado de ressonância damos o nome de *1º Harmônico* ou de *Harmônico Fundamental*. Formado um padrão de um quarto de onda nesse tubo, podemos escrever

$$L = \frac{\lambda}{4}$$

A *Equação Fundamental da Ondulatória*, por outro lado, nos diz que, para uma velocidade de propagação v da onda e com frequência f , temos a relação

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

em que λ é o comprimento de onda dessa onda.

Para o *Harmônico Fundamental*, então, podemos escrever:

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad (2)$$

em que f_1 é a frequência de vibração da onda sonora nesse estado.

O segundo estado de ressonância decorre do acréscimo de um nodo no padrão formado dentro do tubo, como na figura a seguir.

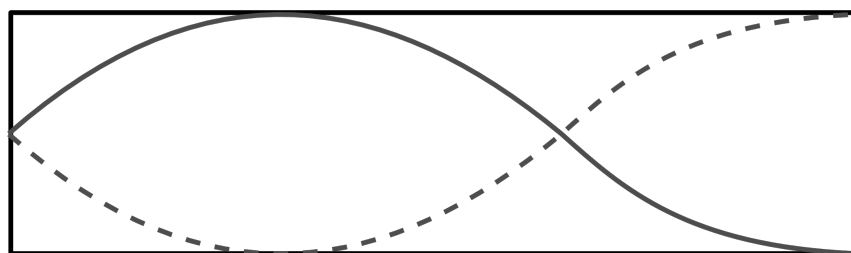


Figura 3: 2ª forma de ressonância formada nos tubos fechados.

Devemos notar que, neste caso, temos um padrão de *três quartos* de onda, o que nos leva a escrever:

$$L = \frac{3\lambda}{4}$$

que nos dá, a partir da Eq. (1), uma frequência f' dada por:

$$f' = \frac{3v}{4L} \quad (3)$$

É importante notarmos que $f' = 3f_1$, de modo que podemos escrever $f' = f_3$. Esse estado será chamado, então, de *3º Harmônico*. Vale o destaque de que, nos tubos sonoros fechados o *2º Harmônico*, de frequência $f_2 = 2f_1$ não se forma.

De maneira análoga, o próximo estado de vibração contará com a formação de mais um nodo, o que nos dará um padrão de *cinco quartos* de onda e uma frequência correspondente, f'' , dada por

$$f'' = \frac{5v}{4L}$$

ou seja, tal que $f'' = 5f_1$. Esse estado será conhecido, portanto, como *5º Harmônico* e terá frequência $f'' = f_5 = 5f_1$. É possível, por fim, generalizarmos a frequência do *n-ésimo* Harmônico formado no tubo sonoro pela expressão

$$f_n = \frac{nv}{4L}, \text{ para } n = 1, 3, 5, \dots \quad (4)$$

o que nos dá, finalmente, uma expressão para a velocidade do som no tubo com a formação do *n-ésimo* Harmônico:

$$v = \frac{f_n \cdot 4L}{n}, \text{ para } n = 1, 3, 5, \dots \quad (5)$$

3.2 Determinação de v a partir do Tubo de Kundt

Suponhamos que, com a geração de uma onda sonora dentro de um Tubo de Kundt contendo pó de cortiça sejam formados agrupamentos ("montes") de cortiça, como na figura a seguir:

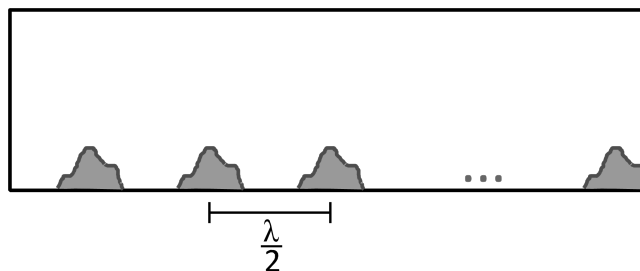


Figura 4: Agrupamentos de cortiça em um tubo de Kundt a partir da geração de uma onda de frequência f conhecida.

Os agrupamentos de cortiça ocorrerão nos nodos formados pela onda estacionária, de modo que a distância entre eles seja igual a $\lambda/2$, em que λ é o comprimento de onda associado à onda gerada nesse tubo.

Caso seja possível medir a frequência, f , gerada no interior da barra, a partir da determinação do comprimento de onda, λ , teremos a velocidade do som dada, a partir da equação fundamental, por

$$v = \lambda \cdot f$$

4 Montagem Experimental

O projeto inicial para a montagem do *Tubo de Kundt* contava com a utilização de:

- Tubo de Acrílico de 1 m de comprimento por 15 cm de diâmetro;
- Pistão metálico de nióbio de 1,20 m de comprimento;
- Disco Metálico de zinco de 14 cm de diâmetro;
- Bolinhas de isopor;
- Braçadeira para fixação da haste metálica;
- Auto-falante para a geração da onda sonora.

Após análise do projeto, o prof. Dr. José J. Lunazzi, docente responsável pela disciplina, exigiu que o tubo não utilizasse recursos eletrônicos, com finalidade da melhor compreensão a respeito da geração das ondas sonoras e da real dificuldade de realização do experimento.

Em virtude dessa exigência, o auto-falante foi substituído por um arco de violino com a finalidade de, com o atrito entre a crina do arco e a haste, produzir a onda sonora.

A montagem do tubo seguiu majoritariamente a montagem da Ref. [4] que pode ser vista na imagem a seguir:

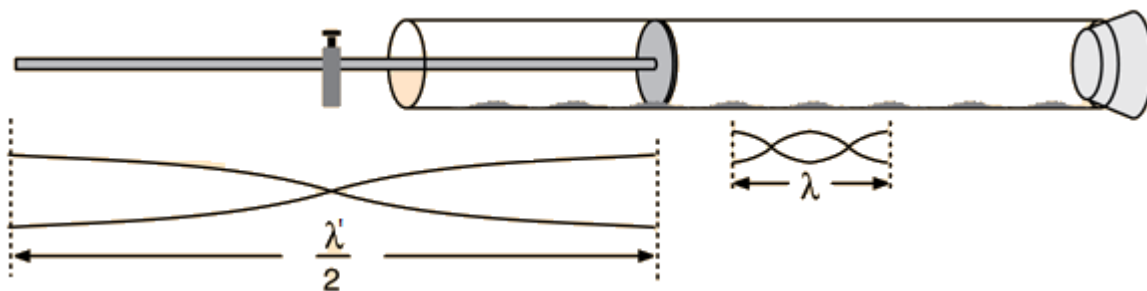


Figura 5: Representação da montagem do Tubo de Kundt. Imagem adaptada da Ref. [4].

Com o atrito entre a crina do arco de violino e a haste metálica, esta vibra em seu estado fundamental (*1º harmônico*), de modo que seja formado um nodo na braçadeira e uma onda sonora de comprimento λ' na haste. De acordo com a figura, sendo L o comprimento da haste, temos a relação

$$L = \frac{\lambda'}{2}$$

A ressonância da onda sonora no tubo, por sua vez, é responsável pela formação dos montinhos de cortiça. De acordo com a figura, o comprimento de onda, λ , da onda sonora no

tubo é a distância entre os extremos do "segmento" formado por três montinhos consecutivos, o que nos leva a determinar que, na verdade, a distância entre dois montinhos consecutivos é igual a $\lambda/2$, como já havíamos descrito.

Ainda de acordo com a Ref. [4], a partir da velocidade do som no ar (que pode ser estimada em $v_{ar} = 331,4 + 0,6T_C$ [m/s], sendo T_C a temperatura ambiente e tendo em vista que a frequência da onda refratada da haste para o disco e do disco para o tubo se mantém inalterada, temos:

$$f = \frac{v_{ar}}{\lambda} = \frac{v_{haste}}{\lambda'}$$

o que nos dá

$$v_{haste} = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot v_{ar}$$

dados conhecidos, a partir da estimativa da velocidade do som no ar e da possível medição do comprimento da haste e da distância entre os montes de cortiça.

De início, o trabalho projetado tinha por objetivo a ciência da frequência da fonte emissora podendo-se, com isso, determinar a velocidade de propagação do som no ar. Sem a utilização de recursos eletrônicos, porém, o experimento poderia trazer dados concretos apenas a partir da utilização do valor da velocidade do som.

A montagem final do tubo foi, então, construída a partir da montagem retratada na Fig. (5), retratada na figura a seguir:



Figura 6: Montagem do Tubo de Kundt realizada na sala LF 10 no IFGW.

Dentro do tubo foram colocadas pequenas bolinhas de isopor na espera de que estes delimitassem as regiões nodais das ondas sonoras dentro do tubo. Podemos ver esse material na imagem a seguir.

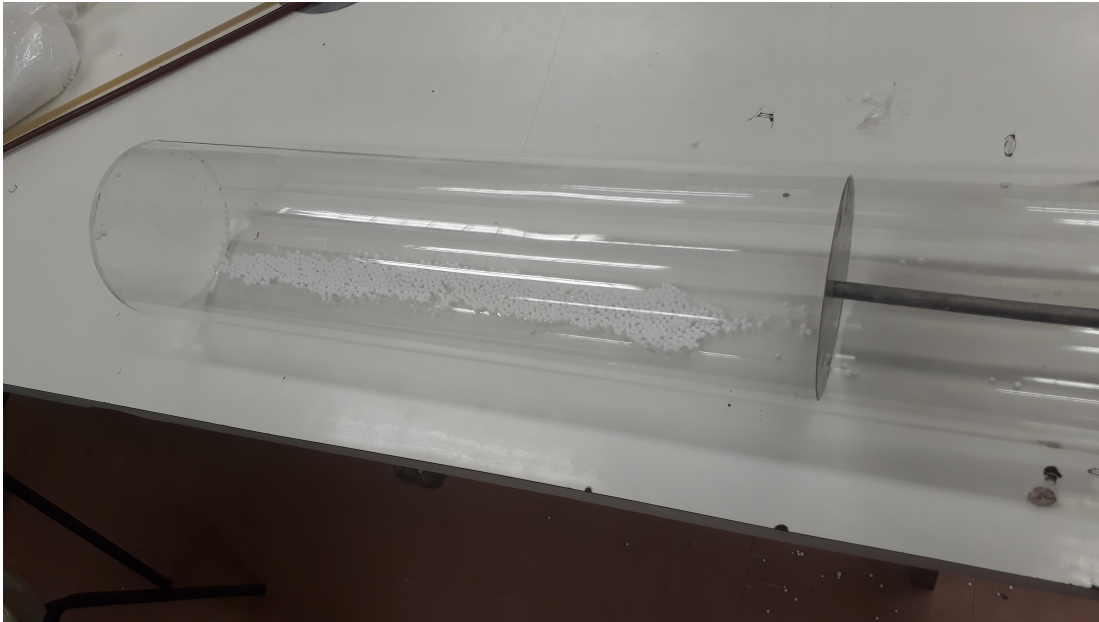


Figura 7: Bolinhas de isopor no interior do tubo cercadas pela extremidade do tubo e pelo disco metálico do pistão.

5 Discussão e Resultados

Esperava-se que, com o atrito entre a crina do arco e a haste metálica, a onda sonora produzida pudesse refratar para o disco e que este pudesse produzir a onda sonora dentro do tubo. A produção da onda sonora de fato ocorreu no entanto não houve separação das bolinhas de isopor.

Em testes informais, utilizou-se uma caixa de som portátil de potência 10W e com resposta de 65 Hz a 20 kHz e um aplicativo de celular chamado *Function Generator* para a geração das ondas sonoras. Com essa montagem, conseguiu-se uma separação parcial das bolinhas projetando uma boa estimativa da velocidade do som (uma vez conhecida a frequência do som e a distância entre dois montinhos consecutivos de bolinhas de isopor).

Foi possível, também, variando-se a posição da caixa de som dentro do tubo determinar posições consecutivas de interferência construtiva. Lembrando que as posições de interferência construtiva apresentam uma diferença de percurso de $\lambda/2$ foi possível, também, estimar a velocidade do som no tubo, obtendo sempre valores próximos a 340 m/s.

Utilizando-se o arco do violino produziram-se ondas sonoras tanto na haste quanto no interior do tubo. Aproximando-se do tubo fazia-se possível escutar a ressonância sonora em seu interior. Em discussão com os prof. Dr. José J. Lunazzi (responsável pela disciplina) e prof. Dr. Pierre Louis de Assis (orientador desse projeto), algumas hipóteses foram levantadas para o funcionamento parcial do experimento:

1. **Diâmetro da Haste** – A haste utilizada foi encontrada em desuso no *LMBT* do *IFGW*. De acordo com a orientação do prof. J. Lunazzi, materiais em desuso e recicláveis ("sucata", nas palavras do professor), deveriam ser priorizados. Em virtude disso, essa barra foi escolhida para a confecção do pistão. Acreditamos que, por ser uma barra mais grossa do que as que geralmente são utilizadas neste experimento, a amplitude do som produzida por ela não foi suficiente para que a onda sonora no interior do tubo pudesse separar as bolinhas de isopor.
2. **Diâmetro do Tubo** – O tubo utilizado possui 15 cm de diâmetro e acreditamos que esse diâmetro exigiu uma potência acústica superior à produzida pela haste. Como observado pelo prof. Pierre, a energia armazenada na onda estacionária deve ser proporcional ao volume de ar que está sendo comprimido e por isso deve variar com o quadrado do raio do tubo.
3. **Arco de Violino** – Utilizamos, na produção da onda sonora, um arco de violino atritado com a haste metálica. Para tanto, utilizou-se breu² (tanto na crina do arco quanto na haste) mas a amplitude sonora produzida ainda sim não foi suficiente. Em sugestão conjunta dos professores J. Lunazzi e Pierre, talvez obtivéssemos uma onda sonora de maior potência utilizando-se uma membrana de couro, similar ao princípio de funcionamento de uma *cuíca*³.

Outros fatores menores também podem ter impedido que o tubo funcionasse corretamente como, por exemplo, o contato entre o disco metálico e o tubo durante o atrito do arco com a haste metálica, resultando em um amortecimento na vibração do disco; o fato de que as bolinhas, ao serem despejadas no tubo, adquiriram uma pequena carga, gerando uma pequena atração eletrostática entre as bolinhas e o tubo (o que exigia uma amplitude sonora maior para que fossem formados os estados de ressonância); ao fato de a braçadeira criar dois pontos (muito próximos) de contato com a haste, gerando, na verdade, dois pontos nodais e impedindo a formação do harmônico fundamental como na Fig. (5), dentre outros possíveis fatores.

²Breu é uma resina vegetal sólida bastante utilizada por músicos para gerar aderência em instrumentos de arco e corda. Sua matéria prima é a resina da gema do pinheiro, uma mistura viscosa composta de colofônia, terebentina e água, extraída das árvores coníferas.

³A *cuíca* é um instrumento musical semelhante ao tambor, com uma haste de madeira presa no centro da membrana de couro, pelo lado interno. O som é obtido friccionando a haste com um pedaço de pano molhado e a parte externa com o dedo, produzindo um som característico muito utilizado no *samba*.

6 Conclusão

Essa montagem do tubo foi reproduzida no evento de *Consulta à Comunidade*, realizado no IFGW dia 18 de Novembro de 2019. Com a montagem, mais uma tentativa de reprodução do experimento foi realizada e, novamente, as bolinhas de isopor não se separaram como esperado.

O Prof. J. Lunazzi esteve presente e verificou a montagem do tubo bem como auxiliou na tentativa de reprodução do experimento. Verificou a existência da ressonância no interior do tubo e pequenos movimentos de algumas das bolinhas, o que é bastante positivo, embora não possibilite o registro de dados experimentais precisos.

Apesar do insucesso do experimento, foi possível registrar experiências interessantes durante a montagem, a exemplo dos estados da ressonância sonora no tubo (com utilização dos recursos eletrônicos) bem como a possível aproximação da velocidade do som no ar utilizando-se de dados pouco precisos porém observáveis. É válido o destaque também (inclusive feito pelo próprio Prof. J. Lunazzi) de que a experimentação não é marcada sempre por sucessos e que o não funcionamento do experimento revela a imensa dificuldade envolvida nos trabalhos com ondas sonoras. A utilização de recursos eletrônicos mascara essas dificuldades, gerando uma sensação de anacrônica de que experimentos relacionados a esse tema são historicamente menos importantes ou mais simples do que experimentos em outras áreas da Física. A utilização de um pistão acoplado a um disco metálico como um "auto-falante do século XIX", nas palavras dos professores Pierre Louis e Leandro Tessler, mostra de maneira bastante elucidativa o quão árduo pode ter sido o desenvolvimento da Acústica.

No início do trabalho, era esperado que esse experimento pudesse ser utilizado em sala de aula como um recurso didático. Em vista do seu não funcionamento, penso que talvez não seja válido. Embora isso contrarie o parágrafo anterior – de que o insucesso faz parte da Física Experimental e que isso não é, necessariamente, algo ruim – sua compreensão exige um grau de maturidade científica que talvez não esteja presente entre alunos de 1ª e 2ª séries do Ensino Médio. O insucesso pode estar associado à desconfiança e à descrença e talvez isso não os traga para o estudo da Física, apenas os afaste. Vale lembrar que o Ensino Médio tem suas aulas voltadas para o *vestibular* que é, em sua essência, um conjunto de questões que exigem nada mais do que a memorização de um conjunto extremamente específico de fórmulas e que não reflete, de maneira nenhuma, o que é a Física e o seu caráter científico e experimental. A realização de experimentos que não apresentem resultados concretos (ou, melhor, objetivos) talvez reforce de que a Física apenas funciona em seu aspecto teórico e justifique a aplicação desmedida de fórmulas em situações que mal podem ser compreendidas e imaginadas.

Por outro lado, vale a ressalva de que a experimentação no ensino da acústica faz-se **fundamental**. Experimentos de simples realização como ressonância entre dois diapasões de mesma frequência, ou interferência e batimento (ainda utilizando dois diapasões), estados de ressonância em um tubo com água (utilizando-se, ainda, um diapasão), entre outros, tendem apenas a agregar positivamente nos assuntos trabalhados em sala de aula. Um estudo fenomenológico sem a visualização desse fenômeno tende a distanciar as pessoas da ciência. Em sua primeira aula de F 709, o prof. J. Lunazzi nos questionou em "como havíamos escolhido a Física sem experimentos em sala de aula durante nosso período escolar". Embora esse questionamento tenha sido utilizado no discurso de abertura da disciplina, penso que ele seja ideal para o encerramento dessa conclusão.

7 Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao prof. Dr. Pierre Louis de Assis pela orientação e paciência ao longo desse semestre.

Gostaria de agradecer, também, ao aluno Renan Domingues, também matriculado na disciplina, em virtude do auxílio na busca pelos materiais e na confecção tanto da braçadeira quanto do pistão.

Gostaria de agradecer, por fim, ao prof. Dr. Diego Muraca por ceder o tubo de acrílico e encorajar o projeto.

Referências

- [1] KUNDT, A. *Acoustic Experiments*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Vol. 35 no. 4. UK: Taylor Francis. pp. 41–48. Retrieved 2009-06-25
- [2] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. J. *Fundamentos de Física Volume 2*, 9ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2012.
- [3] NETO, Airton S. M., JÚNIOR, Francisco N. M. *O tubo de Kundt: o ensino de Acústica e sua relação com a música em atividades experimentais no contexto da aprendizagem significativa*. Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE/PE.
- [4] Longitudinal Waves - Kundt's Tube. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Class/PhSciLab/kundt2.html>.
- [5] Kundt's Tube, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Kundt%27s_tube
- [6] Heinrich Gustav Magnus, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
https://pt.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Gustav_Magnus
- [7] August Kundt, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/August_Kundt
- [8] Breu (burseráceas), *Wikipedia, a Enciclopédia Livre*. [https://pt.wikipedia.org/wiki/Breu_\(burser%C3%A1ceas\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Breu_(burser%C3%A1ceas)).
- [9] Cuíca, *Wikipedia, a Enciclopédia Livre*, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Cu%C3%ADca>
- [10] Relatório Parcial de F 609, 1º Semestre/2009. https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2009/AidaT_Tessler_RP.pdf. *Tubo de Kundt*, orientação do prof. Dr. Leandro Tessler, disciplina ministrada pelo prof. Dr. José Joaquin Lunazzi.