

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS**  
**LABORATÓRIO DE FÍSICA 2**

**ONDAS ESTACIONÁRIAS**

**JOÃO VICTOR ALCÂNTARA PIMENTA**

**Nº USP: 11820812**

**DAVI GONÇALVES SELLIN**

**Nº USP: 11810522**

**SÃO CARLOS, 2020**

## 1. RESUMO

Com relação à análise de ondas estacionárias em uma corda fundamentada em distintos harmônicos, concluiu-se que a velocidade de propagação assume  $49.5 \pm 0.3 \text{ m/s}$  e a densidade da corda  $0,000243 \pm 0,000003 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$ . Para a geração de harmônicos em função da frequência, obteve-se uma velocidade propagação do som equivalente a  $327 \pm 1 \text{ m/s}$ , diferentemente da velocidade do som no ar obtida variando o comprimento do tubo em questão, a qual assume  $347,0 \pm 0,6 \text{ m/s}$  com um comprimento de onda de  $0,165 \pm 0,006 \text{ m}$ . Em sequência, determinou-se que a velocidade de propagação do som no gás nobre desconhecido é  $924 \pm 4 \text{ m/s}$ , sendo tal resultado compatível com o esperado para o Hélio; finalmente, lançando mão de um tubo de rubens, certificamo-nos de que o som se propaga no GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) com uma velocidade de  $272 \pm 6 \text{ m/s}$ .

## 2. INTRODUÇÃO TEÓRICA

### 2.1. ONDAS PROGRESSIVAS EM CORDAS

Tratando-se da propagação de ondas em uma corda sujeita a uma força de tração constante, caso um dos extremos seja pulsado de maneira periódica, será gerado uma onda harmônica a qual viaja pela corda transversalmente uma vez que sua oscilação e/ou perturbação característica é perpendicular à direção de avanço da mesma. A Imagem I contextualiza a situação em questão, bem como a relação 1 ilustra como a velocidade de propagação da oscilação está intrinsecamente dependente da força de tração em questão ( $F$ ) e da densidade linear da corda ( $\mu$ ).

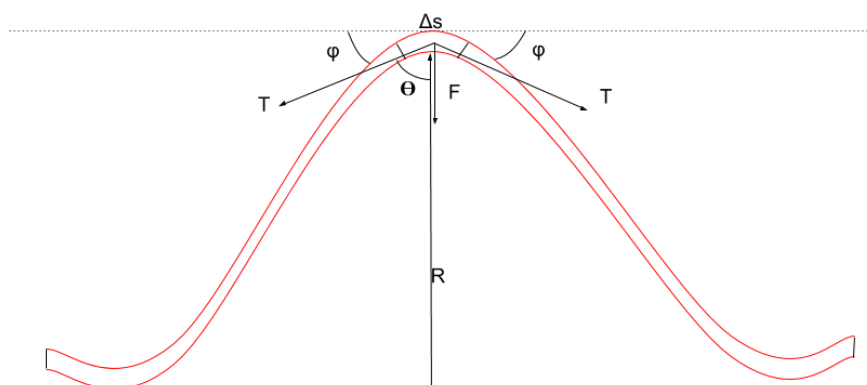


Imagem I : Esquema onda em corda

$$v = \sqrt{\frac{E}{\mu}} \quad (\text{I})$$

Em adição, não se pode menosprezar o fato de que a velocidade de propagação de uma onda também pode ser estimada analisando seu comprimento de onda respectivo ( $\lambda$ ) e sua frequência ( $f$ ), medida em hertz ( $Hz$ ); tal dependência está explicitada pela relação II:

$$v = \lambda f \quad (\text{II})$$

## **2.2. ONDAS ESTACIONÁRIAS EM CORDAS**

Quando tratamos de regimes estacionários em cordas, é de vital importância se atentar à natureza do meio de propagação, a superposição de duas ondas se dá em virtude da organização espacial de suas extremidades, uma vez que a natureza de tal fenômeno é somente consolidada quando estas se encontram fixas, gerando uma onda resultante da soma de duas outras ondas viajando em sentidos opostos e defasadas  $180^\circ$ , acarretando, por conseguinte, a manifestação de cristas que não se deslocam no sentido dos pulsos, mas oscilam verticalmente com frequência  $f$ .

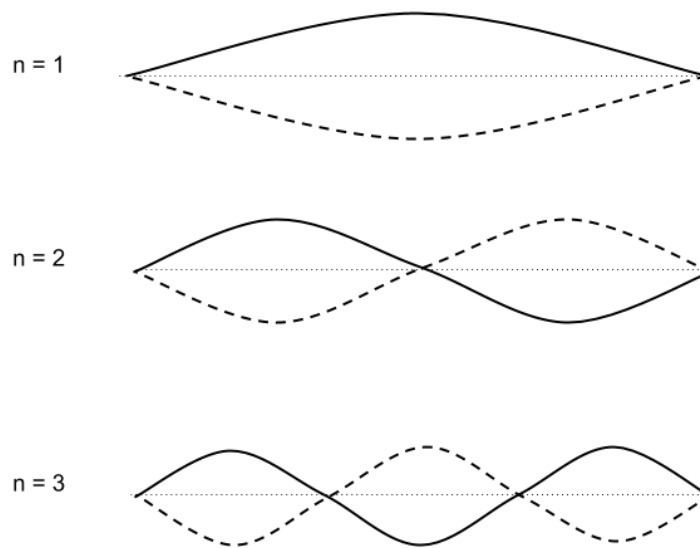
Tratando da perturbação do meio em si, conclui-se que, ao analisar o comportamento da corda, pelo extremos da corda estarem associados aos nós da onda estacionária, os comprimentos de onda  $\lambda_n$  também estão limitados. A imagem I demonstra os primeiros harmônicos atingidos em suas respectivas frequências de ressonância específicas para composição da corda empregada; consequentemente, conclui-se que o  $\lambda_n$  para cada harmônico é calculado conforme a relação III:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (\text{III})$$

A grandeza adimensional  $n$  representa o harmônico gerado na corda; logo, o advento da velocidade na corda depender unicamente de sua composição, combinando as relações II e

III, a frequência de oscilação se manifesta segundo a seguinte manifestação algébrica explicitada pela relação IV:

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (\text{IV})$$



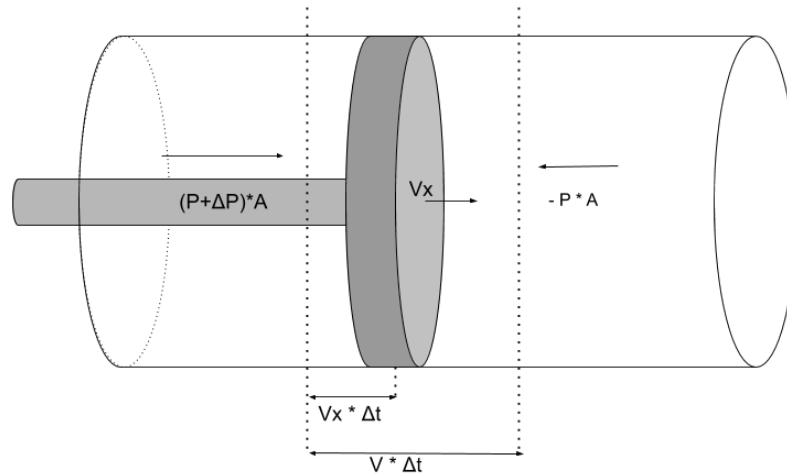
*Imagem I: Primeiros harmônicos com ambas as extremidades fixas*

*Fonte: Elaborado pelos compiladores*

### **2.3. ONDAS DE SOM**

No caso do som, este configura um tipo de onda caracterizado como longitudinal, na qual o deslocamento do meio propagante (compressão e expansão) é paralelo à direção de propagação do pulso, as cristas e vales correspondem, respectivamente, a pontos nos quais a pressão é localmente máxima (compressão do meio) e mínima (expansão do meio) com relação a atmosfera média. A imagem II ilustra claramente a formação de uma onda com as propriedades mencionadas através do movimento de um êmbolo, ocasionando oscilação das moléculas suspensas no fluido em questão ao redor de sua posição de equilíbrio, acarretando

uma reação em cadeia que justifica a presença de uma onda pressão associada à propagação do som.



*Imagem II : Esquema onda de som*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

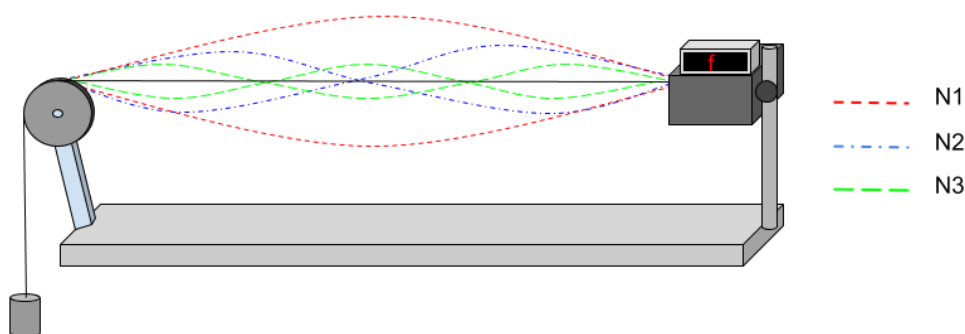
Bem como a condição de estacionaridade em uma corda, ondas sonoras também estão sujeitas a tal regime, constatando sua veracidade ao dispor um alto falante no interior de um tubo fechado em suas extremidades, a onda emitida irá refletir ao final do tubo invertendo sua fase, superpondo-se à incidente e formando uma onda resultante cujas cristas oscilam verticalmente apenas, estando horizontalmente estacionadas.

Seu comprimento de onda, em função do harmônico em questão e de sua frequência de ressonância respectiva são similarmente estimados pelas relações III e IV.

### **3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

#### **3.1. EXPERIMENTO 1**

O experimento 1 se faz com a seguinte montagem:



*Imagem III : Experimento 1, montagem*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

Uma corda tracionada pela massa pendurada na extremidade esquerda, será estimulada a oscilar. Esse estímulo será dado por uma frequência fornecida pelo equipamento a direita, ligado à ponta da corda.

Mede-se primeiro o comprimento da seção da corda onde há vibração ( $L$ ). A massa responsável pela tração na corda será medida, o será também a massa de um pedaço da mesma corda utilizada, para que seja possível determinar sua densidade, importante na comparação a se fazer no final. O último parâmetro necessário, é dado pelo frequencímetro, que vai alterar a frequência da vibração durante o experimento, em busca dos harmônicos.

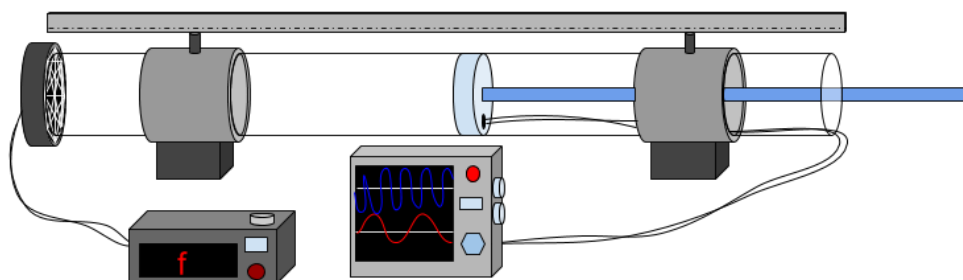
Registrados as frequências responsáveis pelos primeiros harmônicos, pode-se fazer algumas inferências. A primeira coisa a se fazer é usar o comprimento da onda e sua frequência para deduzir a velocidade correspondente. Em posse agora da velocidade, faz-se o cálculo da densidade correspondente para a velocidade e tração da situação.

Por último compara-se os resultados da densidade da corda com o número obtido a partir das medidas diretas da massa e comprimento se uma seção do objeto.

## **3.2. EXPERIMENTO 2**

### **3.2.1. ONDAS DE SOM**

O experimento 2 será feito com a seguinte montagem:



*Imagem IV : Experimento 2, onda de som no ar*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

O experimento consiste em um tubo preenchido com um gás sendo oscilado a partir de um alto-falante com uma frequência específica. Essa frequência é controlada por um frequencímetro conectado ao alto-falante. Já a amplitude, e mesmo a frequência, é medida por um microfone, alocado no pistão móvel no outro lado do tubo e conectado a um oscilometro.

O experimento propriamente dito será dividido em dois métodos.

#### **3.2.1.1. MÉTODO 1**

No primeiro método, se fixará o pistão em uma distância definida do alto-falante e vai-se alterando vagarosamente a frequência do som emitido, buscando os harmônicos. Estes se caracterizam pela máxima amplitude observada no oscilometro.

Tendo em mãos o harmônico correspondente a cada frequência dada, junto ao comprimento do tubo, fixo, pode-se, com algumas observações, determinar a velocidade da onda. Isto se faz plotando a frequência por (IV), que terá como inclinação da reta formada pela regressão das observações, a velocidade.

#### **3.2.1.2. MÉTODO 2**

No primeiro método, se fixará a frequência emitida e vai-se alterando vagarosamente a distância do pistão que contém o microfone, buscando os harmônicos. Estes se caracterizam pela máxima amplitude observada no oscilometro.

Tendo em mãos o harmônico correspondente a cada par frequência e comprimento, pode-se, com algumas observações, determinar a velocidade da onda. Isto se faz plotando o comprimento por  $\frac{n}{2f}$ , que terá como inclinação da reta formada pela regressão das observações, a velocidade.

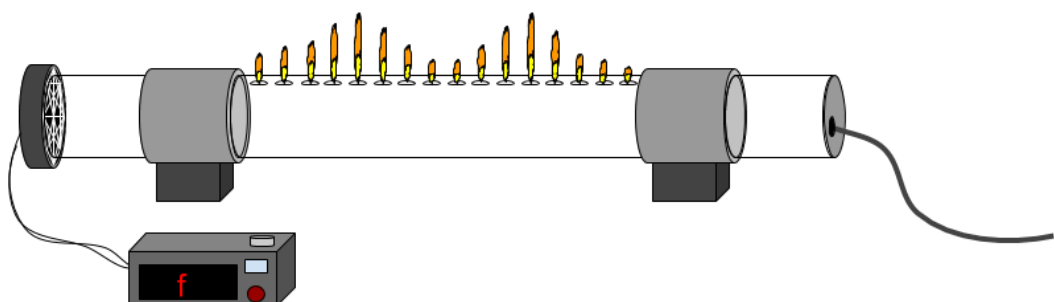
### 3.2.1.3. GÁS DESCONHECIDO

Repete-se o método 2, mas agora somente para o achar o primeiro harmônico e em um gás onde não se conhece as propriedades físicas. Logo, fixada a frequência, varia-se o comprimento até cumprir o objetivo.

Achado o comprimento correspondente ao harmônico procurado, a velocidade de propagação vai ser dada por  $v = 2 \times L \times f$ . Sabe-se que se trata de um gás nobre.

### 3.2.2. TUBO DE RUBENS

A montagem usado sobre o Tubo de Rubens é a seguinte:



*Imagem V : Tubo de Rubens*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*



O Tubo de Rubens é uma interessante montagem para visualização dos pontos de pressão dentro do tubo preenchido de gás. O funcionamento aqui é similar ao das primeiras montagens do experimento. Um tubo preenchido de gás, dessa vez inflamável, é colocado para oscilar com um alto-falante controlado por um frequencímetro.

A medida que se altera a frequência colocada no tubo pelo alto-falante, se identifica os harmônicos pela formação do fogo acima do tubo, que demonstra a amplitude das ondas dentro do tubo graças a pressão interna. Assim pode-se definir os harmônicos e deduzir a velocidade do som nesse gás.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. EXPERIMENTO 1

Algumas grandezas que serão necessárias para o experimento são introduzidas. A primeira a se discutir é a densidade da corda usada. Pesou-se uma seção de corda com comprimento de  $(22,97 \pm 0,01) m$  e obteve-se  $(5,52 \pm 0,01)g$ . Isso permite dizer que a densidade ( $\rho$ ) da corda é:

$$\rho = (0,0002403 \pm 0,0000005) \frac{Kg}{m}$$

A massa responsável pela tensão sobre a corda foi determinada como  $(60,67 \pm 0,01)g$ , logo a tração deve ser:

$$T = (0,5952 \pm 0,0001) N$$

O comprimento utilizado no experimento é de  $(1,36 \pm 0,01)m$ .

Tendo essas duas grandezas definidas, foram feitas as seguintes observações:

Observação	Harmônico	Nós	$\lambda (\pm 0,01)(m)$	$f (\pm 0,1) (Hz)$	$v \pm 0,5$
1	1º	2	2,72	18	49,0

2	2°	3	1,36	36,4	49,5
3	3°	4	0,91	54,8	49,9
4	4°	5	0,68	73,2	49,8
5	5°	6	0,54	91,4	49,4

*Tabela I: Medidas experimento 1*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

As velocidades em todas as medidas são consistentes. Consequentemente, pode-se fazer uma regressão para se definir uma velocidade condizente com todas as medidas:

$$49.5 \pm 0.3 \text{ m/s}$$

Logo, empregando a relação (XX), deduz-se a densidade da corda em questão:

$$0,000243 \pm 0,000003 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$$

Por mais que os registros efetuados pela *tabela 1* indicam valores levemente distintos, o erro relativo de aproximadamente 0,61% garante sua veracidade e autenticidade.

## 4.2. EXPERIMENTO 2

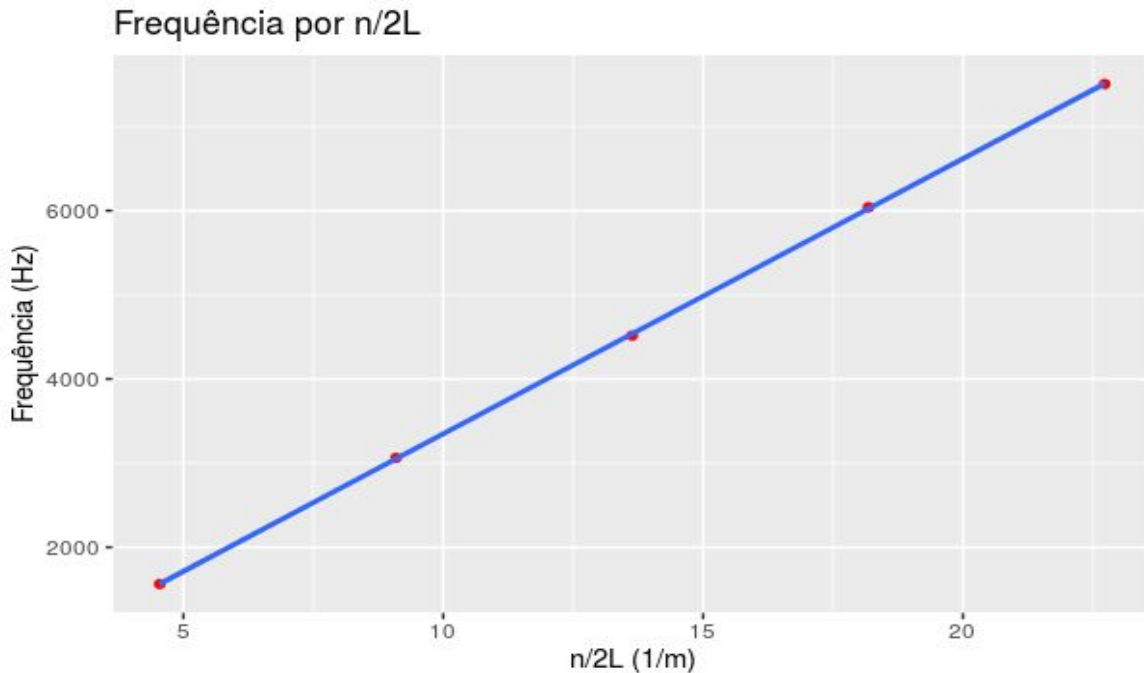
### 4.2.1. MÉTODO 1

Faz-se o registro das frequências com seus correspondes harmônicos em um tubo com comprimento  $(0,1100 \pm 0,0001)\text{m}$ .

Observação	Harmônico	Frequência (KHz)
1	1°	1,563
2	2°	3,062
3	3°	4,515
4	4°	6,041
5	5°	7,505

*Tabela II: Medidas experimento 1*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

Plotando as grandezas e fazendo uma regressão, pode-se deduzir a velocidade de propagação do som no ar, uma vez que se observa uma relação de linearidade não só esperada mas também coerente com as equações que fundamentam as ondas estacionárias.



*Imagem VII: Gráfico experimento 2, método 1*

*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

A velocidade da onda sonora é dada por  $(327 \pm 1) \text{ m/s}$ . Um resultado razoável.

O coeficiente linear obtido ( $79 \pm 19 \text{ Hz}$ ) difere do esperado, uma vez que tendo em mente a velocidade do som padronizada ( $343 \text{ m/s}$ ), a expectativa era de se obter um coeficiente linear próximo de zero.

Finalmente, para a conferência sobre o primeiro harmônico basta iniciar o pistão a uma distância mínima do alto-falante. A frequência anotada foi de  $1486 \pm 6 \text{ Hz}$ , diferentemente da aplicada pelo oscilador no laboratório. Contudo, levando em conta a inclinação da reta resultante representada pelo *Gráfico experimento 2* e o coeficiente linear explicitado acima, é-se passível de afirmação a confiabilidade dos dados exibidos, visto que por mais que esperava-se atingir a frequência em questão para o primeiro harmônico com o som possuindo uma velocidade de propagação no ar de  $343 \text{ m/s}$ , os dados obtidos conferem a viabilidade do experimento, estando em conformidade não só com a relação de linearidade

esperada tanto para o primeiro harmônico quanto para os demais subsequentes mas também com as relações características que fundamentam a geração de ondas estacionárias.

#### 4.2.2. MÉTODO 2

Para a frequência constante de 2,000 KHz, se fazem as seguintes medidas:

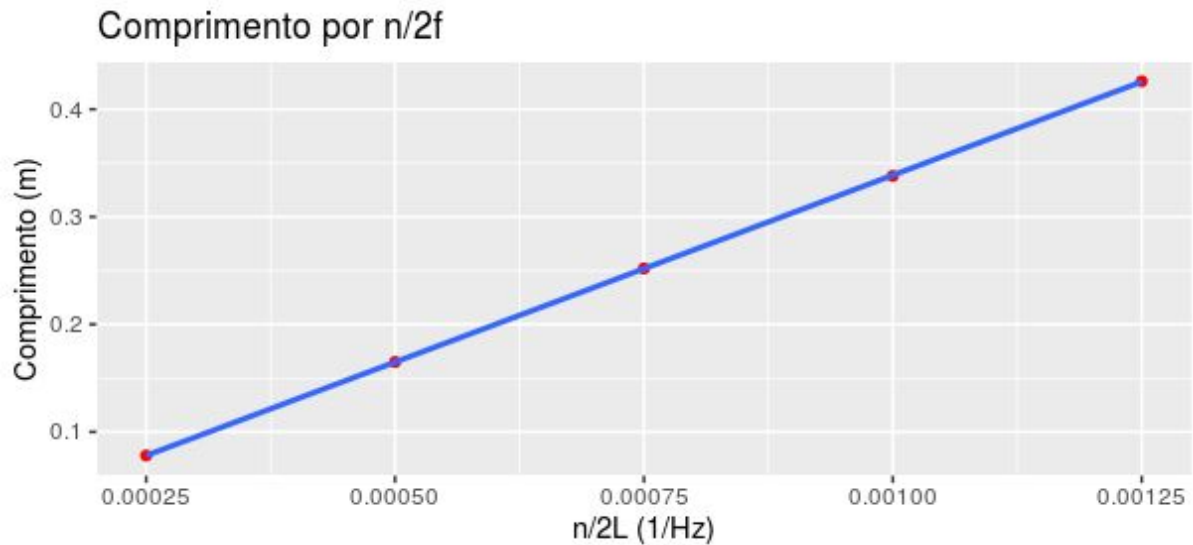
Observação	Harmônico	Comprimento(m)	$L_{n+1} - L_n$ (m)
1	1º	0,078	-
2	2º	0,165	0,087
3	3º	0,252	0,087
4	4º	0,338	0,086
5	5º	0,426	0,088

*Tabela III: Medidas experimento 1*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

Como a frequência é mantida, se espera manter o comprimento da onda propagada dentro do tubo, assim, a cada harmônico identificado, pode-se entender que dentro do tubo tem-se um comprimento a mais, de tal forma que este assume a seguinte representação algébrica:

$$\lambda = (0,165 \pm 0,006) \text{ m}$$

Que resulta em um gráfico do tipo:



*Imagem VIII: Gráfico experimento 2, método 2*

*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

Sendo a velocidade a inclinação da curva, pela regressão ela pode ser definida como  $(347,0 \pm 0,6) \text{ m/s}$ . Um ótimo resultado, visto que este se aproxima mais do esperado para a velocidade de propagação do som tratada recorrentemente:  $343 \text{ m/s}$ .

Tal resultado exprime uma leve diferença em comparação com o registrado na seção 4.2.1:  $(327 \pm 1) \text{ m/s}$ .

### 4.2.3. GÁS DESCONHECIDO

Nesta parte do experimento apenas uma medida é tomada com as seguintes especificações. A frequência usada foi de  $(2,000 \pm 0,001) \text{ KHz}$  e o comprimento do primeiro harmônico é de  $(0,231 \pm 0,001) \text{ m}$ , que significa um comprimento de onda de  $(0,462 \pm 0,002) \text{ m}$ . Assim, a velocidade no gás deve ser de:

$$v = (924 \pm 4) \text{ m/s}$$

É uma boa sugestão que o gás em questão seja o Hélio.

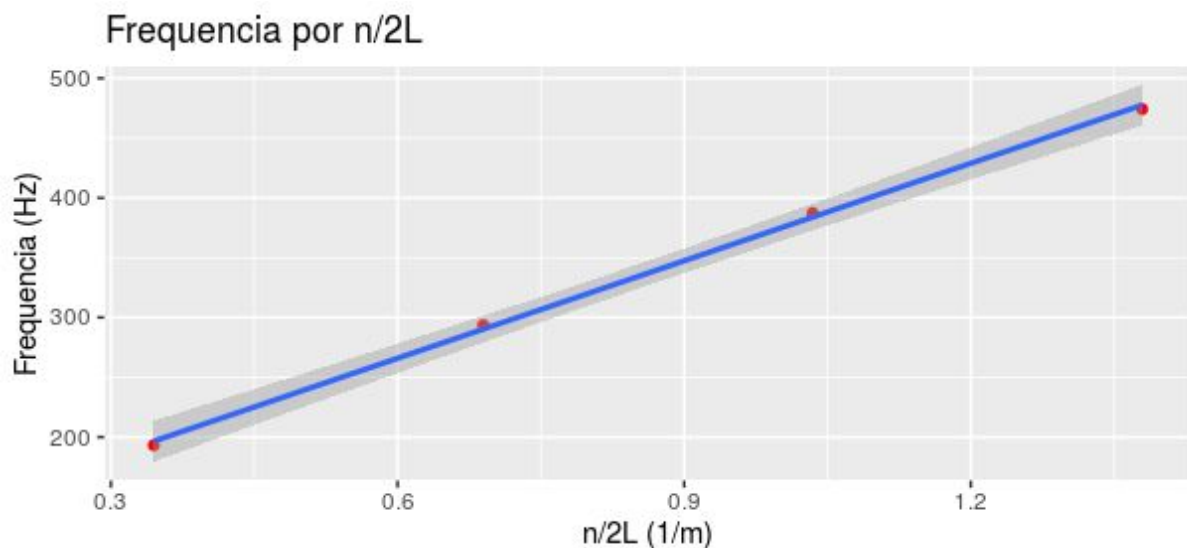
#### 4.2.4. TUBO DE RUBENS

As seguintes observações foram feitas no experimento com o Tubo de Rubens de comprimento  $(1,45 \pm 0,01)m$  :

Observação	Harmônico	Nós	$\lambda (\pm 0,01)(m)$	$f (\pm 0,1)(Hz)$
1	1º	2	2,90	193,21
2	2º	3	1,45	293,62
3	3º	4	0,97	387,27
4	4º	5	0,73	474,23

*Tabela IV: Medidas Tubo Rubens*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

Para que se defina a velocidade é possível fazer o seguinte arranjo e regressão:



*Imagem IX: Gráfico Tubo Rubens*  
*Fonte: Elaborado pelos Compiladores*

Demonstrado pela *imagem IX*, há uma relação de linearidade entre os dados presentes no eixo das abscissas e os presentes no eixo das ordenadas, coerente e compatível com as relações que definem a geração de ondas estacionárias.

Por fim, conclui-se que a velocidade de propagação do som no GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) é de  $(272 \pm 6)m/s$ .

## 5. CONCLUSÃO

Como conclusão, constatou-se para o experimento 1 a efetividade da relação I para o cálculo da densidade linear do meio no qual uma onda transversal se propaga, estando em conformidade com a razão de massa por comprimento usualmente empregada.

Fazendo menção ao experimento 2, método 1 e 2, obteve-se a relação de linearidade esperada e compatível com as equações que fundamentam ondas estacionárias nos seus primeiros harmônicos, contudo, a diferença de velocidade resultante das regressões lineares efetuadas são fruto do comprimento do tubo em questão, uma vez que em um primeiro momento, em virtude da experimentação sob um comprimento fixo e do fato do ar ser um fluido compressível, deduz-se que a velocidade de propagação de  $(327 \pm 1)m/s$  é fruto de um regime de compressibilidade imposto ao ar contido no tubo experimental, aumentando a densidade do fluido e o momento de inércia das partículas nele contidas, acarretando em uma diminuição na velocidade de propagação som submetida a tais condições laboratoriais. Tais propriedades físicas não interferem no método 2 pois em função da variação do comprimento do tubo varia, a densidade do ar assemelha-se muito da encontrada em condições ambientes, autenticando a validação do experimento no advento de a velocidade de propagação calculada de  $(347,0 \pm 0,6)m/s$  ser relativamente próxima da mesma convencionalmente definida de  $343 m/s$ , tendo suas discrepâncias baseadas na propagação de erros oriundas das incertezas de outras medidas e principalmente da regressão linear efetuada.

Para a velocidade de propagação no gás nobre desconhecido, deduziu-se que este possui propriedades físico-químicas muito similares às do gás Hélio, a lacuna presente entre o resultado em questão e o tabelado também se deve à densidade empregada no momento dos registros experimentais, visto que esta pode interferir explicitamente na velocidade de propagação do som aumentando ou diminuindo o momento de inércia das moléculas e partículas constituintes. Em particular, observou-se um aumento do momento do momento de

inércia em função de um aumento na densidade do meio em questão, diferindo da velocidade de propagação do som no gás Hélio calculada para uma densidade específica.

Finalmente, esboçou-se uma relação de linearidade esperada e compatível com as equações que fundamentam a geração de ondas estacionárias no GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), conferindo propriedades específicas e condizentes para a velocidade de propagação do som no mesmo.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Paul A. Tipler e Gene Mosca. Física para cientistas e Engenheiros, Vol. 2, 6ªEdição, LTC, 2008.

Raymond, John Serway and W. Jewett. Princípios de Física, Vol. 2, Cenage Learning, 5ªEdição, 2014.

Sears, Zemansky, Young and Freedman, Física Universitária, Vol. 2, 14ªEdição, 2014.

Moysés Nussenzveig, Curso de Física Básica, Vol. 2, Edgar Blucher, Edição de 2008, 2008.

TIMONER, A.; MAJORANA, F. S.; E HAZOFF, W. Manual de laboratório de Física: mecânica, calor e acústica. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.

RUMBLE, J. Handbook of Chemistry and Physics. Edição 98. Estados Unidos: CRC Press, 13 de junho de 2017