

**Apostila 6.**  
**ÍNDICE**

- Mais sobre Fenômenos Ondulatórios p. 1
  - Lista: Ondas Eletromagnéticas
- Interferência de ondas p. 2
  - Lista: Interferência de ondas
- Ondas estacionárias p. 4
  - Lista: Ondas estacionárias

**MAIS SOBRE FENÔMENOS ONDULATÓRIOS**

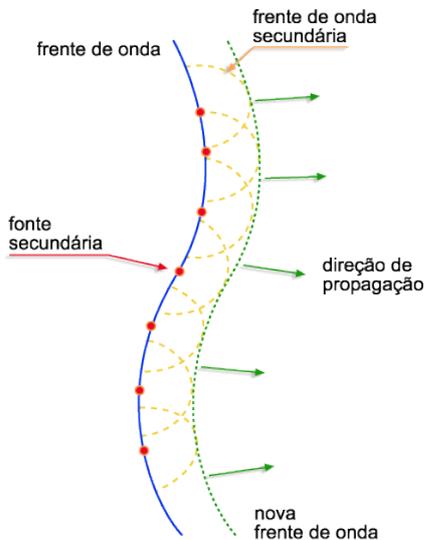
Após observarmos os itens 1 ao 4 abaixo, vamos resolver alguns exercícios da lista "Ondas Eletromagnéticas".

**1. DIFRAÇÃO E ESPALHAMENTO**

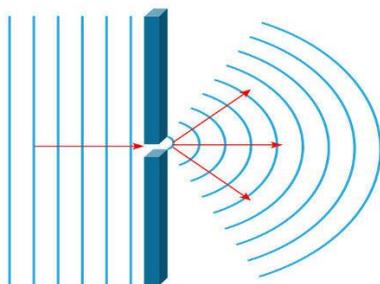
- A difração é a capacidade de contornar objetos de dimensões próximas ao comprimento de onda da onda incidente
- O espalhamento ocorre quando as dimensões dos objetos são muito menores que o comprimento de onda da onda incidente
- Falaremos disso em detalhes mais adiante

**2. PRINCÍPIO DE HUYGENS**

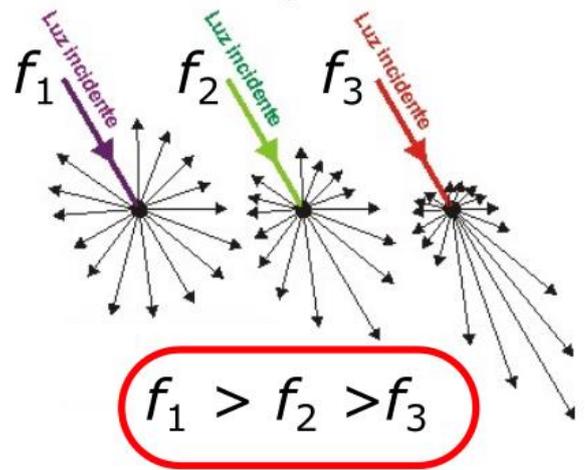
- Cada ponto de uma frente de onda se comporta como se fosse uma fonte de onda



- Podemos explicar o espalhamento e a difração usando este princípio

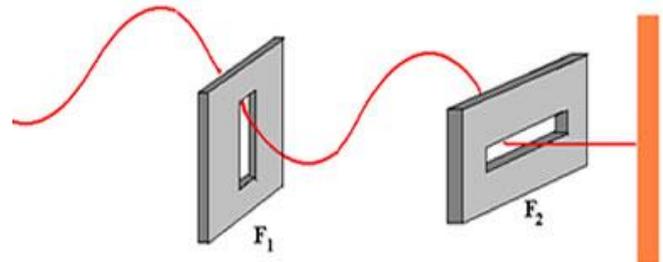


Difração: a fenda se comporta como uma fonte e a parede interromperá as ondas nas laterais.

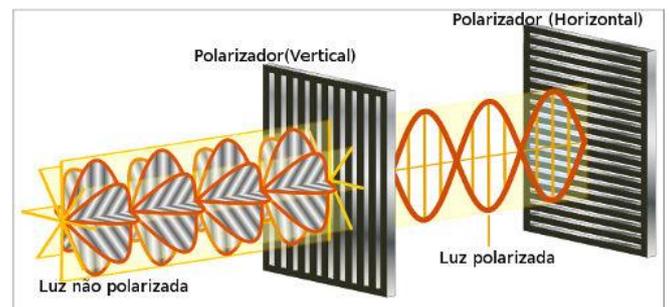


Quanto maior a frequência maior o espalhamento. Os pontos entorno das partículas se comportam como fontes.

**3. POLARIZAÇÃO**



- Só podemos polarizar ondas transversais
- Um polarizador funciona como um filtro permitindo a passagem de uma parte da onda que oscila em direção específica
- É muito usado em óptica (display de calculadora, lentes etc.)



- Digamos que uma onda eletromagnética incide oscilando em uma direção z e haja uma lente polarizadora inclinada de um ângulo  $\theta$  em relação à essa direção. Se a intensidade do campo incidente é  $E_0$ , a intensidade que atravessa é

$$E_{passa} = E_0 \cdot \cos \theta$$

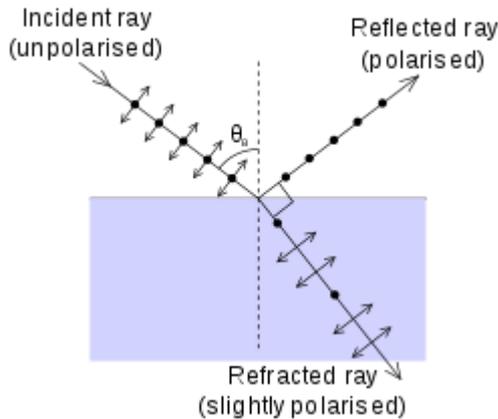
- Lembre-se que a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude (seção 12)

$$I_{passa} = I_0 \cdot \cos^2 \theta$$

PROFESSOR DANILO

INTERFERÊNCIA E ONDAS ESTACIONÁRIAS – 3º ANO E ENGENHARIA – 22/09/2023

- A polarização pode ocorrer por reflexão: quando o raio refratado forma um ângulo de 90° com o ângulo refletido, a polarização é máxima.



- Esta condição implica na chamada lei de Brewster.

#### 4. REFLETÂNCIA E TRANSMITÂNCIA

- Como vimos, quando a luz atinge uma interface ela pode sofrer reflexão e transmissão
- Sendo  $I_0$  a intensidade da onda incidente,  $I_T$  a intensidade da onda transmitida e  $I_R$  a intensidade da onda refletida podemos definir a

Transmitância:

$$T = \frac{I_T}{I_0}$$

e

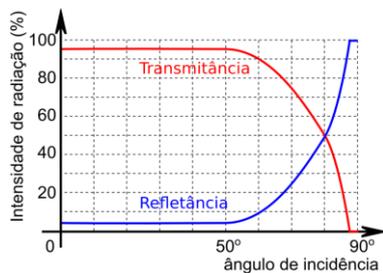
Refletância:

$$R = \frac{I_R}{I_0}$$

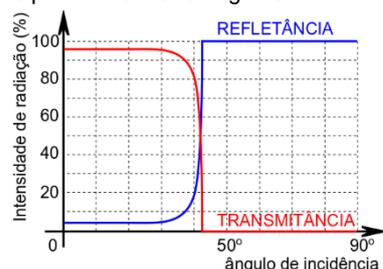
Note que se não houver absorção:

$$I_0 = I_T + I_R \Leftrightarrow 1 = T + R$$

O gráfico a seguir representa a transmitância e a refletância, de forma qualitativa, para um ângulo de incidência que varia de 0° à 90° quando a luz vai do meio menos refringente para o mais refringente.



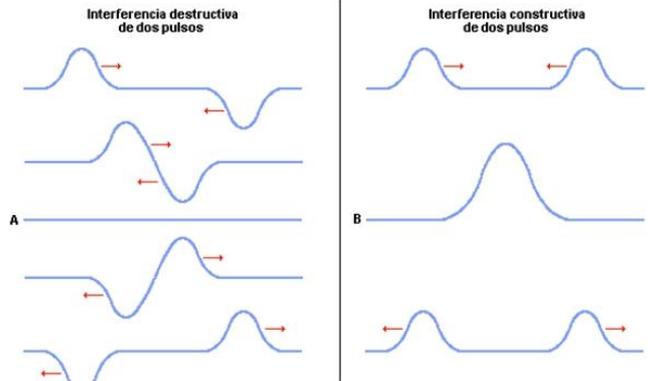
O gráfico a seguir representa a situação em que a radiação vai do meio mais para o menos refringente.



Observe neste exemplo que o ângulo limite é um pouco maior que 40°.

### INTERFERÊNCIA DE ONDAS

- Sabemos que uma onda pode ser descrita matematicamente através de funções
- Da experiência, sabemos que quando duas ondas se superpõem, o resultado equivale à soma das duas funções que descrevem as duas ondas
- Não faremos isso matematicamente, apenas geometricamente



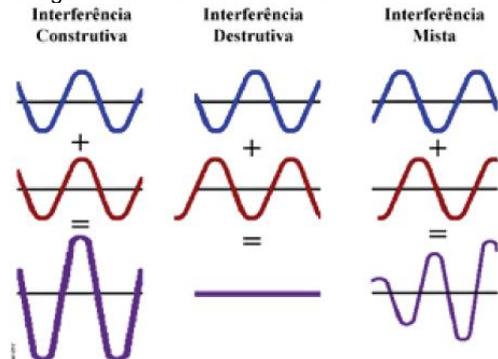
- Quando duas ondas estão em fase e se interferem, a amplitude final será a soma das duas ondas e chamamos isso de **interferência construtiva**
- Quando duas ondas estão em oposição de fase se superpõem (interferem), a amplitude resultante será a diferença das duas amplitudes e a isso chamamos de **interferência destrutiva**. Particularmente, se as duas ondas possuem a mesma amplitude, quando a amplitude resultante é zero, chamamos isso de **interferência totalmente destrutiva**.
- É importante destacar que a interferência é local: as duas ondas seguirão seus caminhos, após interagirem uma com a outra, como se nada tivesse acontecido.
- Se as duas ondas que interferirem possuírem frequências próximas, ocorrerá um fenômeno chamado de batimento cuja frequência será  $f_{bat}$ .

$$f_{bat} = |f_1 - f_2|$$

Enquanto a onda resultante terá frequência  $f_{result}$  dada por

$$f_{result} = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

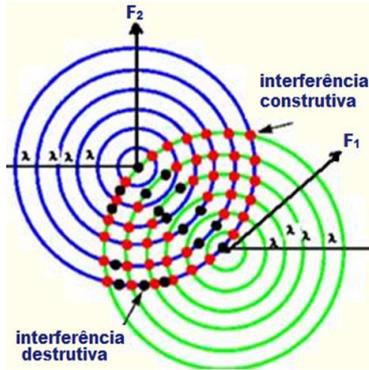
Observe alguns casos de interferências:



Em representação bidimensional, os vales são representados por linhas pontilhadas e as cristas por linhas cheias

PROFESSOR DANILO

INTERFERÊNCIA E ONDAS ESTACIONÁRIAS – 3º ANO E ENGENHARIA – 22/09/2023



Sabemos que ondas podem ser descritas matematicamente, assim a interferência entre duas ondas corresponde à soma das funções que descrevem ambas as ondas.

Quando temos ondas unidimensionais, a solução é mais simples: basta sobrepormos as duas ondas. Já no caso de interferência bidimensional, a situação é um pouco mais complicada.

Q. 1 – DIFERENÇA DE FASE INICIAL: FONTES EM FASE

Q. 2 – DIFERENÇA DE FASE INICIAL: OPOSIÇÃO DE FASE

Q. 3 – DIFERENÇA DE FASE DEVIDO À DIFERENÇA DE CAMINHO

Q. 4 – DIFERENÇA DE FASE DEVIDO À REFLEXÃO

Q. 5 – DIFERENÇA DE FASE TOTAL

RESUMO:

- Dadas duas fontes, a diferença de fase total é:
  - Devido à diferença de caminho:

$$\Delta\varphi_{\text{caminho}} = \frac{|d_1 - d_2|}{\lambda} \cdot 2\pi$$

- Devido às reflexões:

$\Delta\varphi_{\text{reflexão}} = \pi$  para cada reflexão com inversão de fase

- A diferença de fase total será:

$$n \cdot \pi$$

- Se  $n$  for par, a interferência é construtiva
- Se  $n$  for ímpar, a interferência é destrutiva
- Soma-se uma fase dependendo das condições iniciais do problema.
- A diferença total de fase será, portanto:

$$\Delta\varphi_{\text{TOTAL}} = \Delta\varphi_{\text{caminho}} + \Delta\varphi_{\text{reflexão}} + \Delta\varphi_{\text{inicial}} = n \cdot \pi$$

PROFESSOR DANILO

INTERFERÊNCIA E ONDAS ESTACIONÁRIAS – 3º ANO E ENGENHARIA – 22/09/2023

**INTERFERÊNCIA DA LUZ**

- Filmes finos
- Iridescência
- Dupla fenda de Thomas Young

$$x = k \frac{\lambda D}{y}$$

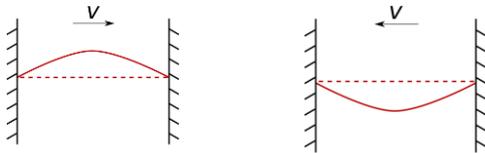
- Experimento do fio de cabelo



Veja teoria abaixo e discussão com o professor utilizando programa gráfico. Vamos ver mais detalhes em exercícios.

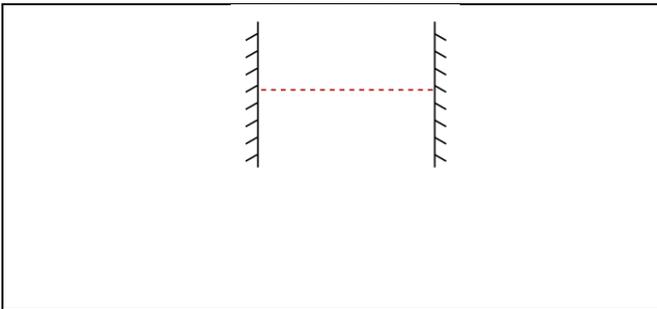
**AMBAS AS EXTREMIDADES FIXAS**

- Imagine uma onda produzida em uma corda com ambas as extremidades presas
- Quando refletida ela volta com inversão de fase

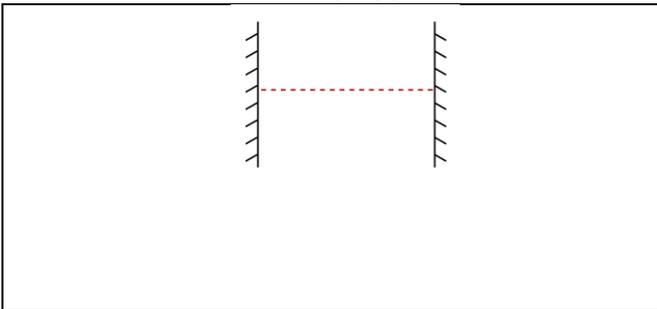


- Se o comprimento do fio tiver tamanho adequado dizemos que a onda no fio é uma onda estacionária, pois vemos a onda como se estivesse parada
- Vamos estudar os harmônicos nesse caso

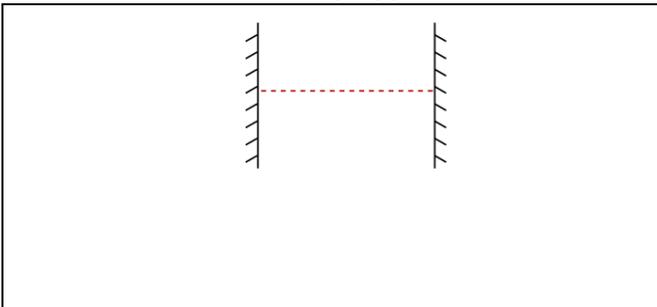
**Q. 6 – ONDA ESTACIONÁRIA EM CORDAS – PRIMEIRO HARMÔNICO**



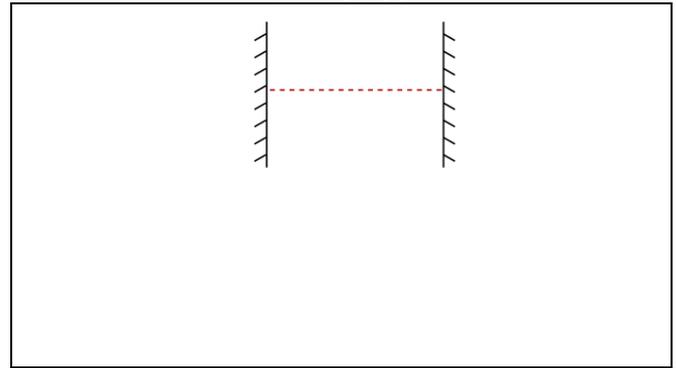
**Q. 7 – ONDA ESTACIONÁRIA EM CORDAS – SEGUNDO HARMÔNICO**



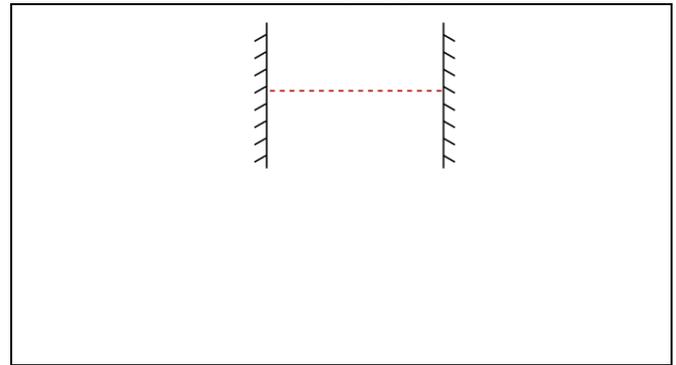
**Q. 8 – ONDA ESTACIONÁRIA EM CORDAS – TERCEIRO HARMÔNICO**



**Q. 9 – ONDA ESTACIONÁRIA EM CORDAS – QUARTO HARMÔNICO**



**Q. 10 – ONDA ESTACIONÁRIA EM CORDAS – n-ÉSIMO HARMÔNICO**



**RESUMINDO O QUE APRENDEMOS:**

	1º Harmônico	$\lambda_1 = \frac{2L}{1}$
	2º Harmônico	$\lambda_2 = \frac{2L}{2} = L$
	3º Harmônico	$\lambda_3 = \frac{2L}{3}$
	4º Harmônico	$\lambda_4 = \frac{2L}{4} = \frac{L}{2}$
...	...	...
	nº Harmônico	$\lambda_n = \frac{2L}{n}$

PROFESSOR DANILO

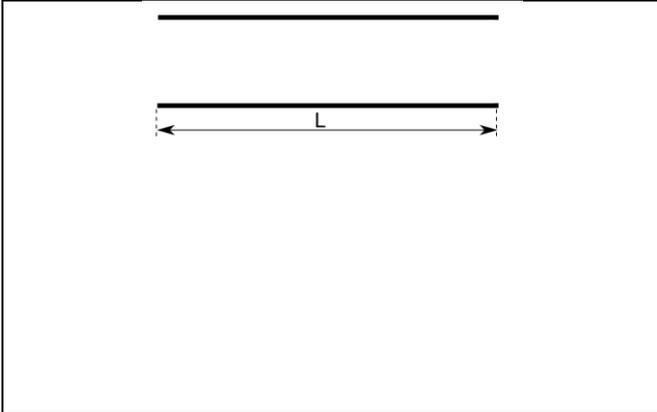
INTERFERÊNCIA E ONDAS ESTACIONÁRIAS – 3º ANO E ENGENHARIA – 22/09/2023

**TUBOS SONOROS**

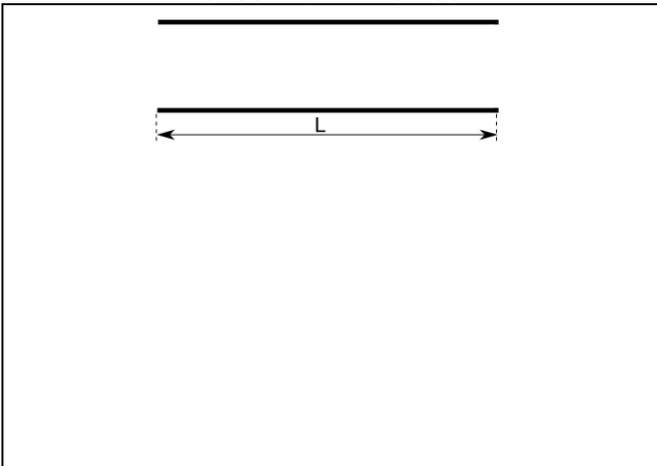
- Instrumentos musicais cujo som é produzido por sopro segue a mesma lógica
- Em geral um dos lados é aberto e o outro é ou aberto ou fechado
  - Quando ambos os lados são abertos, chamamos de tubo aberto;
  - Quando uma extremidade é fechada e a outra aberta chamamos de tubo fechado.

**AMBAS AS EXTREMIDADES ABERTAS/LIVRES**

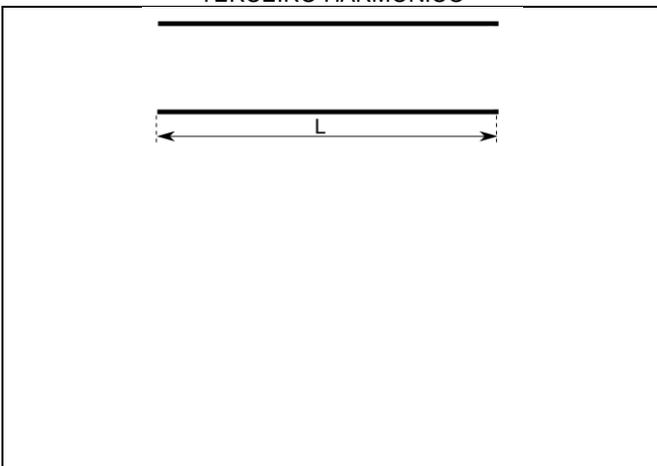
Q. 11 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – PRIMEIRO HARMÔNICO



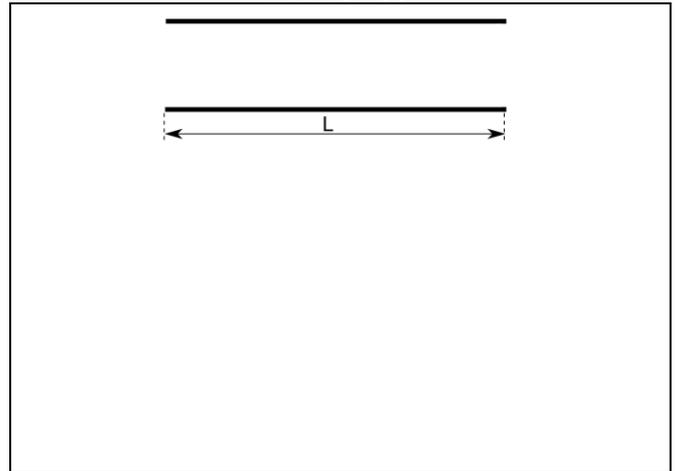
Q. 12 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – SEGUNDO HARMÔNICO



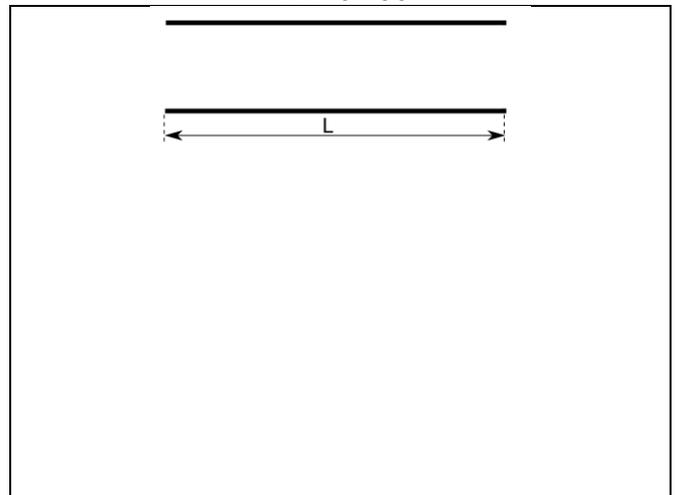
Q. 13 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – TERCEIRO HARMÔNICO



Q. 14 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – QUARTO HARMÔNICO



Q. 15 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – n-ÉSIMO HARMÔNICO



**RESUMINDO O QUE APRENDEMOS:**

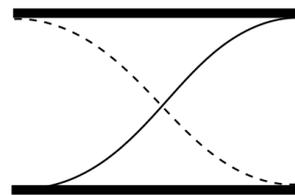
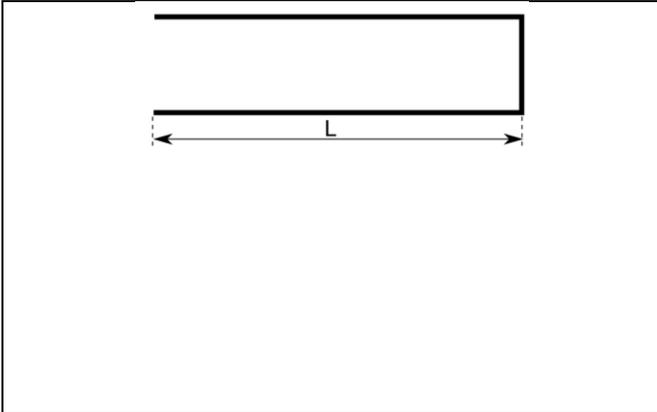


Figura 1: Representação de um tubo sonoro com ambas as extremidades abertas e em seu primeiro harmônico

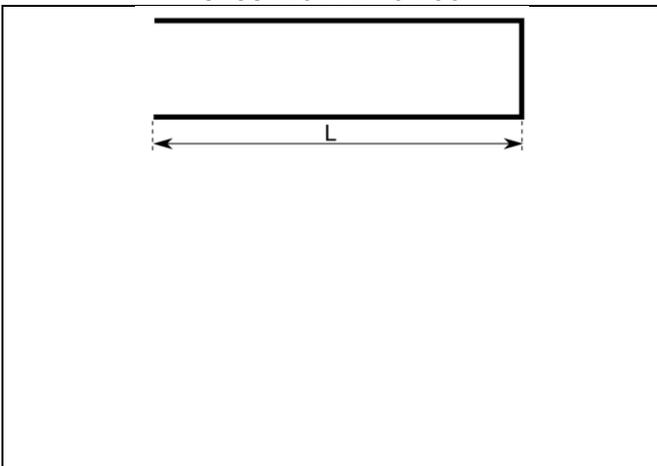
1º Harmônico	$L = 2 \frac{\lambda_1}{4} \Rightarrow \lambda_1 = \frac{4L}{2} \Rightarrow \lambda_1 = \frac{4L}{2 \cdot 1}$
2º Harmônico	$L = 4 \frac{\lambda_2}{4} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{4L}{2 \cdot 2}$
3º Harmônico	$\lambda_3 = \frac{4L}{2 \cdot 3}$
4º Harmônico	$\lambda_4 = \frac{2L}{4}$
...	...
nº Harmônico	$\lambda_n = \frac{2L}{n}$

**UMA EXTREMIDADE ABERTA E OUTRA FECHADA**

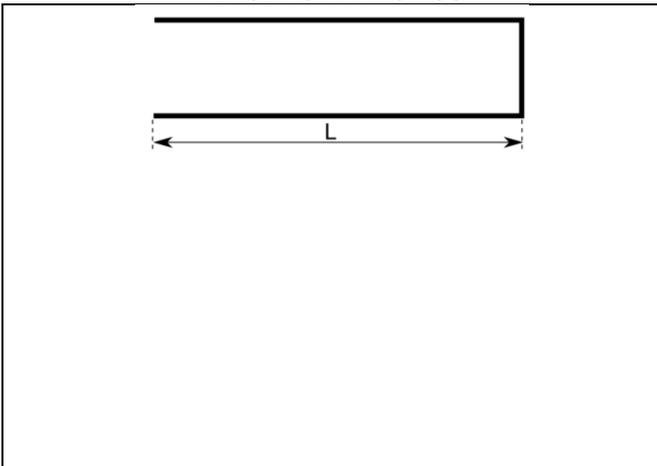
Q. 16 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – PRIMEIRO HARMÔNICO



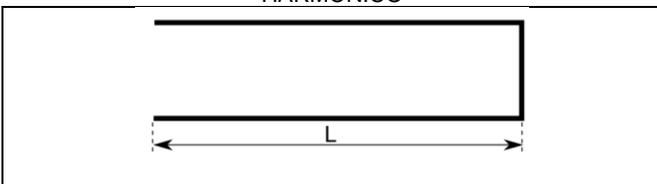
Q. 17 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – SEGUNDO HARMÔNICO



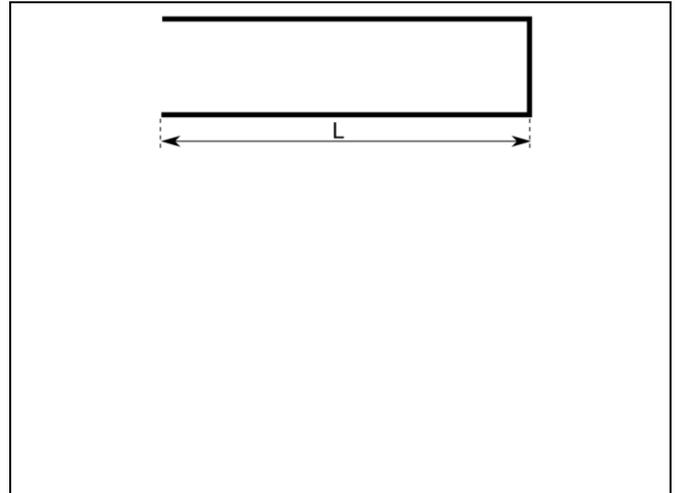
Q. 18 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – TERCEIRO HARMÔNICO



Q. 19 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – QUARTO HARMÔNICO



Q. 20 – ONDA ESTACIONÁRIA EM TUBO ABERTO – n-ÉSIMO HARMÔNICO



**RESUMINDO O QUE APRENDEMOS:**

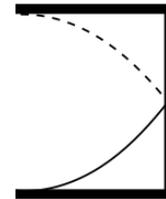


Figura 2: Representação de um tubo sonoro com uma extremidade fechada e outra aberta. Como tubos sonoros com ambas as extremidades fechadas é impossível para um instrumento musical, dizemos que isso é um **tubo fechado**

1º Harmônico	$L = 1 \frac{\lambda_1}{4} \Rightarrow \lambda_1 = \frac{4L}{1}$
2º Harmônico	Não existe
3º Harmônico	$\lambda_3 = \frac{4L}{3}$
4º Harmônico	Não existe
...	...
nº Harmônico	$\lambda_n = \frac{4L}{n}$

- Note que não existe os harmônicos pares

Veja animações bem interessantes, clicando ou lendo o QR-Code:

