

CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA DE UM MICROFONE

Roberto Outa¹ Fábio Roberto Chavarette²

¹ Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – FATEC Araçatuba

¹ Prof. Me curso de Biocombustíveis FATEC Araçatuba, SP ² Prof. Dr. Dep. Matemática, UNESP Ilha Solteira, SP
e-mail ¹ robertoota@hotmail.com ² fabioch@mat.feis.unesp.br

Resumo

Este trabalho de pesquisa demonstra a caracterização de um experimento baseando-se na aplicação da técnica da norma ISO 10534-1(1996) do tubo de impedância de um microfone. Os resultados das diferentes pressões sonoras calculadas no modelo teórico e adquiridas no modelo experimental demonstram similaridade entre elas, e também é possível analisar situações de limitações do experimento.

1. Introdução

A história da acústica advém de relatos da época do antigo Egito, anterior a 3 100 a.C. Os primeiros registros sobre acústica ocorreram no período entre 341 a.C. e 335 a.C., quando Aristóteles passava em frente a uma ferraria e observou que os sons da batida de diferentes martelos produziam timbres diferentes, e estes sons se propagavam a longas distâncias. Desde então, estudiosos entre o século XVIII e XIX, como Young, Fresnel, Fourier, Poisson, Laplace, Euler, D'Alambert entre outros, continuaram a desenvolver os conceitos e teoria acústica que são utilizadas atualmente em diferentes áreas, como medicina, fisiologia, música, arquitetura, engenharia, oceanografia, entre outros, afirma Malecki (1969) e Bistafa (2011). Dentre estes conceitos desenvolvidos, diversos equipamentos foram desenvolvidos e em específico, o tubo de impedância, cujo primeiro modelo é o modelo que utiliza um microfone, e após, foi desenvolvido um segundo modelo com o uso de dois microfones. A ISO10534-1 especifica o método para a determinação do coeficiente de absorção sonora, fator de reflexão e impedância de superfície e foi preparada pelo comitê técnico ISO/TC 43, Acústica, subcomitês SC e Construções Acústicas. Esta norma foi dividida em duas partes com o título *Acoustic-Determination of Sound Absorption coefficient and Impedance in Impedance Tubes*, sendo a parte 1: Método utilizando ondas estacionárias; e a parte 2: Método usando dois microfones. Na norma ISO 10534-1(1996) são encontrados ainda os anexos A, B e C na forma integral da ISO10534, e o anexo D é apenas informação.

No método utilizando dois microfones, norma ISO10534-2(1998), é utilizado a mesma montagem da norma ISO10534-1(1996), porém a diferença é a aplicação de dois microfones para a medição do coeficiente de absorção sonora. Neste método são geradas ondas planas por meio de uma fonte sonora, e a medição da pressão acústica é feita por dois microfones localizados na transversal do tubo. Após a aquisição da pressão acústica é efetuado o cálculo da função de

transferência, do coeficiente de absorção, e por fim das impedâncias acústicas. Este método para a aquisição da pressão sonora é mais rápido, se comparado ao da ISO10534-1(1996).

O objetivo motivacional deste trabalho é demonstrar a caracterização de um experimento do tubo de impedância de um microfone, utilizando a norma ISO 10534-1(1996). Para efetuar a caracterização do experimento foi utilizado um modelo teórico numérico da norma ISO10534-1(1996), cujos resultados obtidos das frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz, foram comparados a um resultado numérico adquirido da aplicação do experimento do tubo de impedância de um microfone.

2. Metodologia e Materiais

Gerges (2000) e Kinsler et al (1999) comentam que a técnica ISO10534-1(1996) prevê o posicionamento de um alto falante vedado em uma das extremidades do tubo, e na extremidade oposta é posicionado uma tampa com um furo centralizado. Por meio de um furo, uma sonda com microfone embutido se movimenta ao longo do tubo linearmente, captando a pressão sonora. No interior do tubo, de fonte constante, a pressão sonora captada é chamada de onda estacionária, formada pela superposição das ondas incidentes e reincidentes. A Figura 1, mostra na parte superior o desenho esquemático de um experimento do tubo de impedância, e na parte inferior, o comportamento da onda estacionária, interna ao tubo, incidindo no material oposta à fonte, cuja amplitude é máxima ou mínima dependendo do tipo de material absorvedor. Esta condição é relacionada diretamente ao coeficiente de absorção sonora do material em estudo.

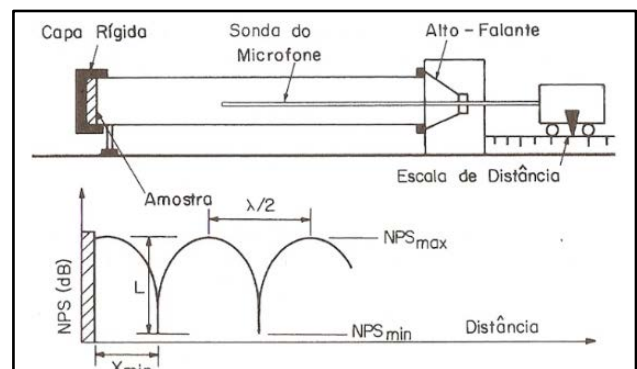


Figura 1 - Experimento do tubo de impedância e o comportamento da onda estacionária interna ao tubo.

2.1. Conceito de MHS e Propagação de onda

Balachandran e Magrab (2011 p. 2) descrevem “oscilação como movimentos alternados de avanço e recuo, o qual é utilizado como sinônimo de vibração.” Crocker (2007, p. 1) define que a “oscilação vibracional é conhecida como movimento harmônico simples, e podem ser representados em um gráfico por uma forma senoidal no tempo.” Considerando que um ponto qualquer P se desloca com movimento curvilíneo e uniforme, no sentido anti-horário, a trajetória curvilínea de P , após um determinado tempo t , forma um ângulo θ em relação à referência de origem, o qual $\theta = \omega t$, sendo a velocidade angular ω multiplicada pelo tempo t em um instante qualquer. A Figura 2 mostra, do lado esquerdo, a representação do deslocamento curvilíneo do ponto P em diferentes instantes, formando o ângulo em relação à origem. O lado direito da figura 2 mostra o mesmo deslocamento curvilíneo de P representado em um plano cartesiano, com P se movimentando na direção de propagação horizontal no sentido para a direita em diferentes instantes.

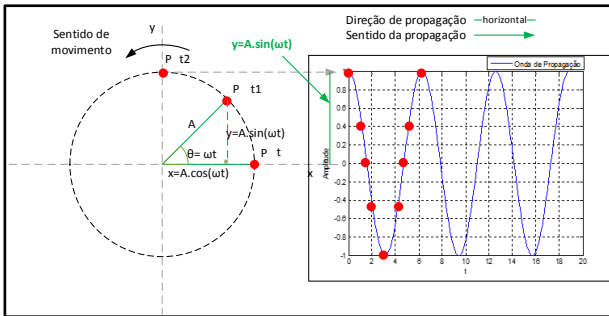


Figura 2 – Representação gráfica de um MHS.

Observa-se ainda no lado esquerdo da figura 2, que por meio de um movimento constante de P no instante t_1 , forma-se uma figura geométrica, um triângulo, e pelo conceito trigonométrico, o ponto P pode ser representado nos eixos x e y considerando as equações,

$$y(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

$$x(t) = A \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (2)$$

Ambas as equações (1) e (2) são equações que tem o formato de uma onda senoidal. Se somadas as equações 1 e 2, teremos uma equação de uma função no tempo que descreve o movimento do ponto P , assim,

$$f(t) = A(\text{cos}(\omega t) + j\text{sen}(\omega t)) \quad (3)$$

Que também pode ser escrito como,

$$f(t) = A \cdot e^{j\omega t} \quad (4)$$

Observa-se, portanto, que a oscilação de P pode ser escrita matematicamente, cujas funções no tempo pertencem a um movimento harmônico simples MHS.

Uma onda se propaga por meio de dois choques entre as moléculas, cujas energias potencial e cinética são

transmitidas uma a uma, até se dissiparem no meio de propagação e/ou serem retidas em barreiras, afirma Crocker (2007). Portanto, o movimento da onda, pode ser descrito no plano cartesiano, na figura 2, recorrente ao movimento de P . Esta onda tem período T , frequência f , velocidade de propagação u , deslocamento x , comprimento de onda λ , e o número de onda k . Matematicamente, as equações podem ser escritas como,

$$T = \frac{1}{f} \quad (5)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (6)$$

$$u = \frac{x}{t} \quad (7)$$

$$\lambda = u \cdot T \quad (8)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (9)$$

Para Knobel (2011) e Crocker (2007) a equação geral da onda ou equação de solução geral da onda pode ser escrita como,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \frac{1}{k^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \frac{1}{\omega^2} \quad (10)$$

2.2. Princípio de reflexão e transmissão de um meio

Para Kinsler et al.(1999) e Gerges (2000) o conceito acústico de ondas de pressão sonora que se propagam em dois meios, demonstra que existem diferentes tipos de situações de reflexão e transmissão de um meio para o outro, na região de contorno da barreira sonora. As condições da incidência da onda de pressão sonora na região de contorno são a onda de pressão sonora incidente, P_i , onda de pressão sonora refletida, P_r , e a onda de pressão sonora transmitida, P_t . A Figura 3 mostra o conceito de reflexão e transmissão de um meio.

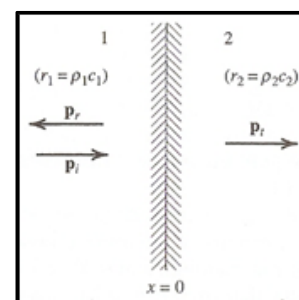


Figura 3 – Pressões incidentes e refletidas no meio I, e a pressão transmitida no meio II, cuja impedância é diferente nos dois meios.

Na Figura 3 do lado esquerdo, meio I, P_i incide em um meio qualquer, desta incidência uma parte da onda de pressão sonora é refletida P_r , e a outra parte é

transmitida P_t no meio II. A impedância acústica no meio I é $r_1 = \rho_1 + c_1$, no meio II é $r_2 = \rho_2 + c_2$.

Considera-se que P_{ia} é a amplitude da onda incidente, e P_{ra} é a amplitude da onda refletida, P_{ta} é a amplitude da onda transmitida, assim as equações das pressões incidentes P_i , refletidas P_r , e transmitidas P_t , são escritas como,

A equação da pressão incidente P_i é,

$$P_i = P_{ia} \cdot e^{j(\omega t)} \quad (11)$$

A equação da pressão refletida P_r é,

$$P_r = P_{ra} \cdot e^{j(\omega t)} \quad (12)$$

E a equação da pressão transmitida P_t é,

$$P_t = P_{ta} \cdot e^{j(\omega t)} \quad (13)$$

2.3. Frequência de corte e Comprimento de onda

A equação da frequência de corte utilizada em corpos cilíndricos, como o caso deste trabalho, é um estudo derivado da acústica de ambientes fechados, cuja geométrica é retangular e apresenta limites de campos sonoros como a câmara reverberante e campo livre em câmara anecóica, segundo Gerges (2000). Matematicamente a frequência de corte é o resultado da solução da equação da onda de coordenadas cilíndricas, da aplicação da função de Bessel. A equação da frequência de corte, neste experimento, é utilizada para prover dados na composição da montagem do experimento, cumprindo a norma ISO10534-1(1996). Portanto, a equação da frequência de corte, equação 14, mostra um resultado que deve ser analisado com atenção, pois o resultado determina a máxima frequência permitida no experimento, ou seja, os valores acima deste resultado provavelmente estão fora da análise, então,

$$f_c = \frac{1,84 \cdot c}{\pi \cdot d} \quad (14)$$

O qual c é a velocidade do som no ar, e d é o diâmetro do tubo. O resultado do cálculo da frequência de corte, com o diâmetro do tubo de 100 mm é $f_c = 2.014,77 \text{ Hz}$, portanto as frequências que podem ser utilizadas neste trabalho de pesquisa são as inferiores ao valor calculado.

Considerando que uma onda senoidal, em movimento harmônico, é a representação gráfica de uma forma de onda, a distância entre duas amplitudes sucessivas, é chamada comprimento de onda. Portanto, o comprimento de onda é a distância que se repete sucessivamente da forma da onda ao longo do tempo, afirma King (2009). A equação do comprimento de onda, equação 15, quando aplicada, apresenta um resultado cujo comprimento de onda não pode ser maior que o comprimento do tubo, limitando assim a aplicação da frequência no experimento, então,

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (15)$$

A Tabela 1 mostra os valores do cálculo do comprimento de onda,

Tabela 1- Relação do comprimento de onda com a frequência

Descrição	Frequência utilizada no Projeto de Pesquisa (Hz)						
	62,5	125	250	500	1000	2000	4000
Comprimento de Onda (m)	5,50	2,75	1,38	0,69	0,34	0,17	0,09

Observa-se que o comprimento de onda não pode ultrapassar o comprimento do tubo de 1,00m, portanto as frequências que podem ser utilizadas são as de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.

Utilizando como referências a f_c e λ , neste trabalho de pesquisa, utilizaremos as frequências de 500 Hz, 1000 Hz, e 2000 Hz.

2.4. Modelo teórico

O modelo teórico do tubo de impedância utiliza a teoria acústica conjuntamente com a norma ISO10534-1(1996), a equação 16, quando aplicada, resulta em diferentes pressões sonoras, de mínima amplitude, que mostram a localização frente à referência de incidência (lado oposto à fonte de emissão).

$$x_{min,n} = \frac{(2n-1)\lambda_0}{4}, \text{ para } n = 1,2, \dots, n \quad (16)$$

2.5. Modelo experimental

A montagem do experimento foi feita considerando a norma 10534-1(1996), que quando aplicado obtém diferentes pressões sonoras, captadas pela sonda, que se locomove ao longo do tubo e internamente a este. Na Figura 4 é mostrada esquematicamente a montagem do experimento bem como os respectivos equipamentos utilizados.

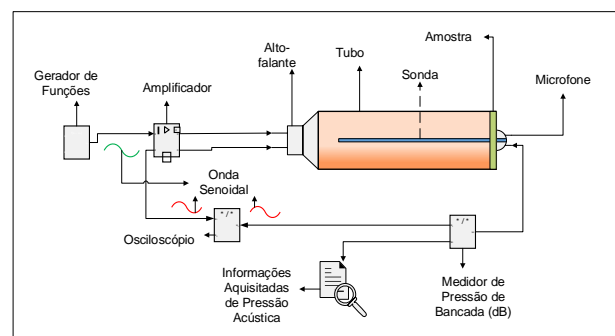


Figura 4 - Desenho esquemático da montagem do experimento de bancada - tubo de impedância.

O experimento é composto de equipamentos de bancada, gerador de função, amplificador, medidor de pressão sonora, osciloscópio e acessórios. Acoplado ao tubo encontram-se o autofalante, tubo, sonda, microfone, tampa e acessórios.

Na etapa inicial é feito um teste, o qual a fonte sonora ligada, emite um sinal de frequência qualquer amplificado e constante, que é captado por um microfone. Ligados ao amplificador e ao medidor de pressão sonora está o osciloscópio que monitora o sinal emitido e recebido, que deve ter o comportamento, em ambas as condições, de uma onda senoidal. A partir desta análise, o processo de medição da pressão sonora se inicia medindo-se no interior do tubo a cada 10 mm por meio de um microfone. Esta medição é feita considerando que todos os equipamentos estão devidamente calibrados, e este procedimento de captação da pressão sonora é repetido no mínimo por três vezes para garantir que os erros sejam mínimos. Assim, é possível estabelecer que exista um padrão das pressões sonoras coletadas. Para cada frequência foram adquiridas trinta e sete medições de pressão sonora no interior do tubo de impedância.

3. Conclusões

O resultado da localização da pressão mínima do modelo teórico é considerado “ideal (sem perda)”, e se comparado ao modelo experimental tem uma diferença numérica que pode ser causada por um erro experimental sistemático ligado à calibração do arranjo experimental. A diferença média entre os pontos teóricos e os medidos nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz, e 2000 Hz é de 4 cm. A Tabela 2 mostra a comparação entre estes valores do modelo teórico e do modelo experimental.

Tabela 2 – Comparação da posição dos pontos de pressão mínima

Comparação dos pontos de pressão mínima no interior do tubo								
500Hz			1000Hz		2000Hz			
Ponto Medido	posição da pressão mínima (m)		Ponto Medido	posição da pressão mínima (m)		Ponto Medido	posição da pressão mínima (m)	
	teórico	experim.		teórico	experim.		teórico	experim.
3	0,86	0,81	5	0,77	0,73	9	0,73	0,69
				6	0,95		0,91	10
						11	0,90	0,87
						12	0,99	0,96

O método de análise do erro foi aplicado para o nível de confiança 2 – 95%, e utilizado a equação do cálculo amostral finito, cujo resultado mostra que para se ter 95% de confiança é necessária uma amostra de tamanho 36,4748, sendo a amostra coletada de tamanho 37, este valor é maior que 36,4748 e isso representa que o erro é de 2%. A Tabela 3 mostra o índice de confiança dos pontos medidos do modelo experimental e modelo teórico.

Tabela 3 – Índice de confiança dos pontos medidos do modelo experimental e teórico.

Hz	Modelo	Média ± desvio padrão (m)
500 Hz	teórico	0,516 ± 0,281
	experimental	0,416 ± 0,294
1000 Hz	teórico	0,516 ± 0,294
	experimental	0,485 ± 0,290
2000 Hz	teórico	0,516 ± 0,297
	experimental	0,520 ± 0,276

Analisando os resultados conclui-se que a caracterização do experimento é correta, pela similaridade dos valores. Portanto o experimento está caracterizado e validado para aplicações futuras, o qual os resultados de impedância, coeficiente de absorção sonora, entre outros, podem ser feitos com referências qualitativas e quantitativas padronizadas, mesmo com aplicações em diferentes materiais.

4. Referências

BALACHANDRAN, B.; MAGRAB, E. B. **Vibrações mecânicas**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 616 p.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. São Paulo: Edgard Blucher, 2011. 380 p.

CROCKER, M. J. **Handbook of noise and vibration control**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 1569 p.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controles**. Florianópolis: NR Editora, 2000. 696 p.

KING, G.C. **Vibrations and waves**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 228 p.

KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of acoustics**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1999. 548 p.

KNOBEL, R. **An introduction to the mathematical theory of waves**. Providence: American Mathematical Society, 2000. 196 p.

MALECKI, I. **Physical foundations of technical acoustic**. London: Pergamon Press, 1969. 743 p.