



CONSTRUÇÃO DE UM TUBO DE IMPEDÂNCIA

Ricardo de Vasconcelos Salvo

UFU - Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC - Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila 2121 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M // 38400-902 - Uberlândia - MG.
ricardo_salvo@mec.ufu.br

Marcelus Tadeu Ferreira Mairink

marcelustfm@yahoo.com.br

Ethel Caires de Oliveira

ethelcaires2003@yahoo.com.br

Elias Bitencourt Teodoro, PhD

teodoro@mecanica.ufu.br

Resumo: O tubo de onda estacionária, também conhecido como tubo de impedância, é um equipamento que permite determinar o coeficiente de absorção e a impedância acústica dos materiais. Esses valores são essenciais para a escolha de produtos que melhor satisfazem as necessidades de um projeto de tratamento acústico, seja em ambientes fechados, máquinas, dutos ou silenciadores. Neste trabalho, apresentam-se os detalhes construtivos de um tubo de impedância fabricado com materiais alternativos e a um custo bastante reduzido.

Palavras-chaves: tubo de impedância, absorção acústica, técnica de um microfone

1- INTRODUÇÃO

Nos projetos de adequação acústica de ambientes ou controle de ruído de locais específicos, a absorção é um dos fenômenos físicos do som que deve ser levado em conta, principalmente quando se pretende avaliar o tempo de reverberação do local. A grande dificuldade que o projetista encontra é conhecer, por exemplo, o coeficiente de absorção do material a ser empregado no projeto. Em geral, as fontes de referências são escassas, nem sempre contêm materiais nacionais empregados no dia a dia e ainda não existe por parte dos fabricantes, a preocupação em informar ao usuário sobre as características de seus materiais (haja visto, que em catálogos ainda se confundem materiais isolantes térmicos com acústicos).

O coeficiente de absorção sonora “ α ” é difícil de ser medido, principalmente porque “ α ” depende da maneira na qual o material será instalado, do ângulo de incidência sonora no caso de amostras pequenas, das características da sala, entre outros. Vários métodos, segundo Beranek (1988), foram desenvolvidos para a determinação do coeficiente de absorção, sendo os mais usados: o método da câmara reverberante e o método de tubo de onda estacionária. Ambos os métodos têm normas internacionais que os descrevem.

O método de câmara reverberante é o mais usado, porém, o mais caro, pois depende de laboratórios que possuam câmara reverberante e equipamentos adequados. O método economicamente mais acessível é o de tubo de onda estacionária, onde já é possível adquirir o equipamento completo para as medidas. Para um projetista, ainda assim, o tubo de onda estacionária ou tubo de impedância, como também é conhecido, é caro.

O caráter didático e a falta de recursos motivaram o desenvolvimento deste trabalho, tendo como ponto de partida, a dissertação de mestrado de Giampaoli (1987). Dessa forma, construiu-se um tubo de impedância utilizando materiais de baixo custo e adaptando equipamentos para as medidas dos coeficientes de absorção sonora.

2- FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

Serão desenvolvidos neste item os fundamentos matemáticos necessários para a realização da determinação do coeficiente de absorção acústica de materiais, em um tubo de ondas estacionárias, envolvidos no método da função de transferência com uso de um microfone.

2.1. Absorção Acústica Pelo Método de um Microfone:

O tubo de impedância consiste de um tubo de parede rígida onde numa das extremidades é colocado um alto-falante e na outra a amostra do material a ser testado. Dentro do tubo é estabelecido um modelo de ondas estacionárias, devido às ondas que vão em direção da amostra e retornam.

O método consiste, basicamente, em excitar o tubo com um ruído “branco” de banda larga e medir a pressão sonora, no interior do tubo, em duas posições pré-determinadas. Os sinais obtidos são processados por um analisador digital de frequência, com dois canais, e posteriormente pós-processados em um programa computacional específico para se determinar a curva de absorção acústica do material, em função da frequência.

Recentemente Chu (1986) descreveu que o processo pode ser considerado estacionário e concluiu que os sinais dos microfones não precisam ser simultaneamente processados. Assim, propôs eliminar um dos microfones e utilizar, apenas, um único microfone para efetuar as medições nas duas posições selecionadas. Esta técnica elimina qualquer erro sistemático de diferença de amplitude e de fase, ou outros possíveis erros, devido a possíveis diferenças de fase entre os dois microfones, tornando desnecessário, portanto a aplicação de funções de correção, eliminando, portanto algumas complicações computacionais adicionais.

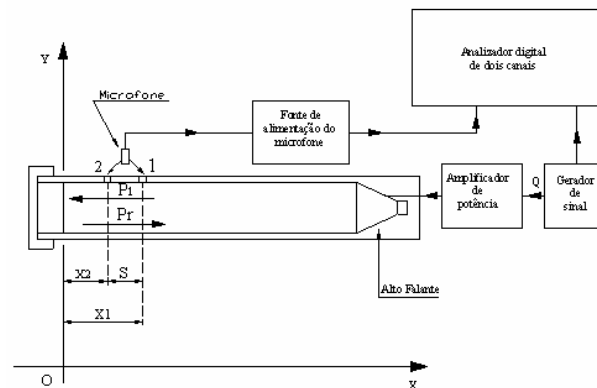


Figura 1: Esquema de montagem do sistema de medição para a determinação do coeficiente de absorção, usando a técnica de um microfone.

Onde:

P_i - pressão acústica complexa incidente [Pa]; P_r - pressão acústica complexa refletida [Pa];

B - posição do microfone mais próxima da amostra;

A - posição do microfone mais afastada da amostra;

x_B - distância entre a amostra e a posição mais próxima do microfone [m];

x_A - distância entre a amostra e a posição mais afastada do microfone [m];

s - distância entre as duas posições do microfone [m]; Q - sinal do gerador.

Pode-se calcular no interior do tubo o NPS - Nível de Pressão Sonora. A pressão total no interior do tubo é:

$$P = P_i + P_r = A e^{i(wt+kx)} + B e^{i(wt-kx)} \quad (1)$$

Onde:

A - amplitude de P_i [m]; B - Amplitude de P_r [m]; w - frequência da onda [m/s²];
 k - w/c = número de onda; c - velocidade de propagação do som no ar [m/s²].

Para as posições 1 e 2, tem-se:

$$P_1 = e^{iwt} [A e^{ikx_1} + B e^{-ikx_1}] \quad (2)$$

$$P_2 = e^{iwt} [A e^{ikx_2} + B e^{-ikx_2}] \quad (3)$$

A função de resposta em frequência ou função de transferência entre os sinais obtidos nas posições 1 e 2 é dada por:

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{[A e^{ikx_2} + B e^{-ikx_2}]}{[A e^{ikx_1} + B e^{-ikx_1}]} = \frac{[e^{ikx_2} + (B/A)e^{-ikx_2}]}{[e^{ikx_1} + (B/A)e^{-ikx_1}]} \quad (4)$$

A partir da Equação (4) pode-se obter a expressão do módulo da razão das amplitudes, conforme está descrito na Equação (5):

$$|B/A| = \left| \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{-iks} - H_{12}} \right| \quad (5)$$

Como o coeficiente de reflexão acústica pode ser expresso como a relação da intensidade acústica refletida pela incidente, e sabendo que é possível demonstrar que o coeficiente de absorção acústica pode ser encontrado por :

$$\alpha_R = \frac{I_R}{I_I} = \frac{|P_r|^2}{|P_i|^2} = \frac{|B|^2}{|A|^2}; \quad \alpha_A = 1 - \left| \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{-iks} - H_{12}} \right|^2 \quad (6)$$

Observando-se a expressão (6) pode-se notar que uma vez definida a distância entre as duas posições de medição, s , deve-se determinar a função de resposta em frequência, H_{12} , para que o coeficiente de absorção, como função de frequência, seja obtido.

A função de transferência é, por definição:

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{G_{12}}{G_{11}} = \frac{P_1^* P_2}{2} / \frac{P_1 P_1^*}{2} = \frac{P_1^* P_2}{P_1 P_1^*} = H_{1Q} H_{Q2} \quad (7)$$

Onde:

G_{12} é o espectro cruzado de P_1 e P_2 ;

G_{11} é o espectro de potência de P_1 ;

* é o complexo conjugado;

Q é o sinal do gerador, responsável pelo campo acústico no interior do tubo;

H_{1Q} é a função de transferência entre o sinal do microfone na posição 1 e o sinal do gerador;

H_{Q2} é a função de transferência entre o sinal do gerador e o sinal do microfone na posição 2.

Assume-se o processo como estacionário, então não é necessário calcular H_{1Q} e H_{Q2} simultaneamente. Portanto, um único microfone poderá ser utilizado para medir, seqüencialmente, a pressão nas posições 1 e 2. A função H_{12} , necessária para a determinação do coeficiente de absorção na Equação (6), é obtida através da Equação (7).

2.2 Função Coerência γ^2_{12}

Outro importante parâmetro que deve ser determinado durante as medições do coeficiente de absorção acústica é a função de coerência. Esta função que varia entre 0 e 1, mede o grau de causalidade entre dois sinais quaisquer. Neste estudo, ela pode ser usada para verificar a validade da função de transferência, H_{12} , obtida. Segundo Bodén (1984) e Chu (1986), pode ocorrer um significativo erro aleatório na função de transferência, em frequências para as quais a coerência, entre as duas medições feitas no tubo de ondas estacionárias, apresenta um valor muito baixo.

Portanto, através da função de coerência pode-se quantificar a confiança no cálculo da função H_{12} e conseqüentemente, na curva de absorção determinada. Conforme ocorre com a função de transferência, quando se utiliza a técnica de um microfone não é possível determinar a função de coerência de forma direta. A função coerência é dada por:

$$\gamma^2_{12} = \frac{|G_{12}|^2}{G_{11} G_{22}} = \frac{|G_{1Q}|^2}{G_{11} G_{QQ}} \frac{|G_{Q2}|^2}{G_{QQ} G_{22}} = \gamma^2_{1Q} \gamma^2_{Q2} \quad (8)$$

As funções γ^2_{1Q} e γ^2_{Q2} serão obtidas quando o microfone ocupar respectivamente as posições 1 e 2. A função de coerência γ^2_{12} será determinada pela Equação (8).

2.3 Frequência de Corte do Tubo de Ondas Estacionárias

As técnicas de medição do coeficiente de absorção apresentadas até agora são baseadas na teoria de ondas planas incidentes e refletidas normalmente à superfície da amostra do material em estudo. Portanto, as medições serão válidas somente para a faixa de frequência na qual só existam ondas planas no interior do tubo. Assim, em um duto uniforme de paredes rígidas, em frequências abaixo dessa frequência de corte, somente ondas planas podem propagar-se. Ou seja, acima desta frequência as ondas não podem ser consideradas, pois não são somente ondas planas se propagando.

Em um duto uniforme de seção transversal circular, a menor frequência de corte é dada por:

$$f_c = \frac{1,84 c}{\pi d} \quad (9)$$

Onde:

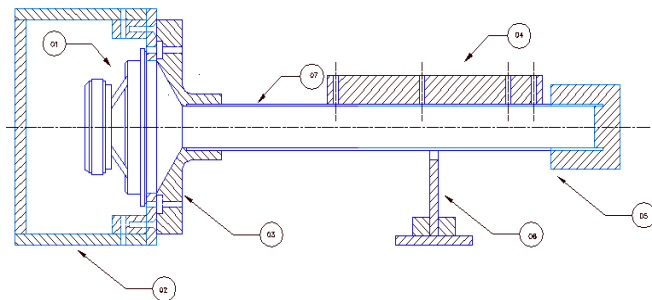
f_c - é a frequência de corte [Hz]; c - é a velocidade do som [m/s];

d - é o diâmetro interno do tubo [m].

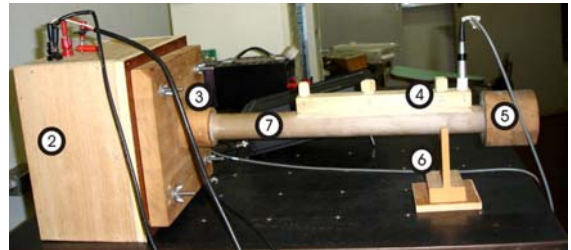
3. SISTEMA DE MEDIÇÃO

3.1 Projeto e Montagem do Sistema de Medição

O sistema de medição foi projetado visando a determinação do coeficiente de absorção de materiais acústicos através da técnica de um microfone e um analisador digital de dois canais. As partes constituintes básicas deste aparelho são: um gerador de sinais, um amplificador de sinais, um amplificador de microfone, um analisador de espectro, uma caixa acústica com o falante, um tubo de ondas estacionárias, com os pontos de acesso para o microfone, um microfone e a terminação, na qual é colocada a amostra a ser avaliada. Na sequência, serão descritos com maiores detalhes alguns desses componentes. A Figura 2 apresenta a vista em corte esquemático do aparelho de ondas estacionárias e ilustra detalhes construtivos do sistema, e uma foto do instrumento construído.



A) - Vista esquemática do tubo de impedância



B) – Foto do tubo construído

Figura 2: Representação esquemática do tubo e foto do protótipo construído.

Sendo:

- | | | |
|---|--------------------------|----------|
| 1) Alto-falante; | 4) Fixação do microfone; | 7) Tubo. |
| 2) Caixa acústica; | 5) Porta amostra; | |
| 3) Conexão entre o tubo e a caixa acústica; | 6) Apoio; | |

3.1.1 Equipamentos utilizados para as medições

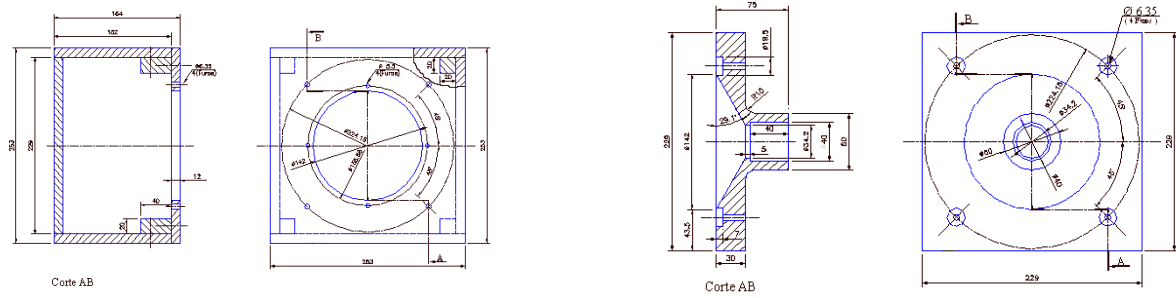
Foi utilizado o gerador de sinais *Sine/Noise Generator Type 1049; Brüel&Kjaer*, o *Power Amplifier; Brüel&Kjaer*, o *Conditioning Amplifier NEXUS da Brüel&Kjaer* e *Spectral Dynamics SD 380 Signal Analyser; Scientific-Atlanta*. Salientamos que o funcionamento destes equipamentos não será descrito neste trabalho.

3.1.2 Caixa Acústica e Conexões

A caixa acústica, que constitui a fonte geradora do campo acústico formado no interior do tubo de ondas estacionárias, é constituída de placas de aglomerado de aproximadamente 12 mm de espessura. O aglomerado foi utilizado devido ao seu baixo custo e peso. A fonte acústica foi um altofalante da marca *Selenium*, modelo *MB64* que tem o diâmetro nominal de 152,4 mm. O alto-falante é montado com o cone voltado para a base da caixa e afastado de 69,2 mm desta.

Foi utilizado um tubo PVC com diâmetro externo de 40 mm, uma parede com 2,9 mm de espessura, e um diâmetro interno de 34,20 mm. Uma extremidade é acoplada à conexão e a outra extremidade é acoplada à terminação (porta amostra). Para possibilitar o encaixe perfeito entre o tubo e o falante foi necessário construir uma conexão. As conexões foram feitas em madeira (castanheira) devido à facilidade de fabricação e ao baixo peso, além das boas propriedades de usinagem do material.

Na Figura 3 apresentamos os desenhos da caixa acústica e da conexão para um tubo de 40 mm de diâmetro externo.



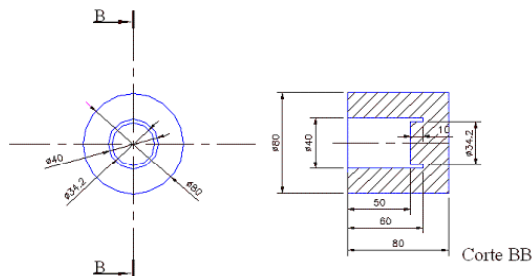
A) - Vista em corte e frontal da caixa acústica

B) – Vista em corte e frontal da conexão

Figura 3: Desenhos da caixa e da conexão.

3.1.5 Terminação

A terminação (porta-amostra) é constituída de uma peça de madeira (castanheira), pelos mesmos motivos da conexão. As dimensões da terminação para um tubo de 40 mm de diâmetro externo podem ser vistas na Figura 4, bem fotos da peça construída.



A) - Vista frontal e em corte da terminação



B) – Foto do tubo aberto, porta amostra e tubo fechado

Figura 4: Desenhos da terminação e fotos do tubo aberto, do porta-amostra e do tubo fechado.

3.1.6 Fixação do Microfone

A peça responsável pelo acoplamento do microfone no tubo, foi feita em madeira (castanheira), e pode ser vista na Figura 5.

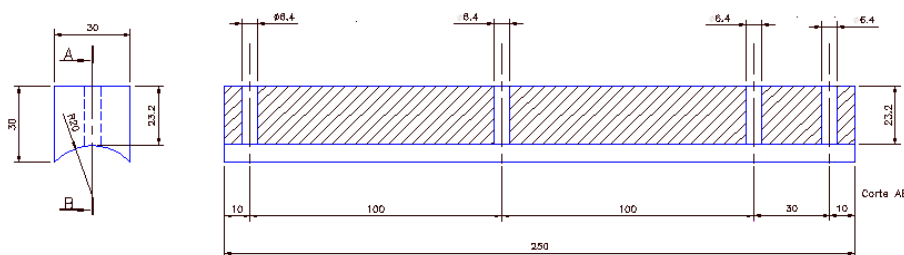


Figura 5: Vista em corte da peça responsável pela fixação do microfone no tubo.

4. AJUSTE E VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Com o sistema devidamente analisado é realizado então a seleção e ajuste dos parâmetros a serem adotados. Para isto o primeiro passo a ser realizado é o calculo da freqüência de corte dos tubos. Para o cálculo das freqüências de corte utiliza-se a Equação (9).

Sabendo-se que c vale 343 m/s, que o tubo de 40 mm de diâmetro externo tem diâmetro interno de 34,20 mm e pode-se chegar ao seguinte valor para a sua freqüência de corte 5.874,03 Hz.

A obtenção da função resposta em frequência, H_{12} , e a conseqüente determinação da curva do coeficiente de absorção, é feita, medindo-se a pressão sonora em duas posições distintas do tubo de ondas estacionárias. As distâncias entre os furos foram predeterminadas sendo que a distância do primeiro furo é variável segundo a espessura da amostra.

Bodén (1984) verificou que o espaçamento entre as posições de microfone define a faixa de frequência na qual as medições terão precisão aceitável, e baseado em dados experimentais, recomenda como faixa de utilização. Pode-se determinar as frequências mínima e máxima da faixa recomendada para uso, em função da distancia entre as posições do microfone adotadas.

$$0,1\pi < ks < 0,8\pi ; \frac{0,1c}{2s} < \text{faixa aceitável} < \frac{0,8c}{2s} \quad (10)$$

Analogamente, pode-se determinar a frequência ideal de trabalho, f_i , em torno da qual espera-se que a curva apresente a menor variância. O valor de f_i é dado por:

$$f_i = \frac{0,5c}{2s} = \frac{c}{4s} \quad (11)$$

4.1 Cálculo dos Valores da Frequência Mínima e da Frequência Máxima para o Tubo de 40 mm de Diâmetro Externo

O tubo de impedância comercial tem diâmetro e comprimento diferenciados para faixas de frequência distintas. Neste trabalho, procurou-se dimensionar um diâmetro e comprimento único para toda faixa de frequência a ser medida (30 Hz a 4.500 Hz). A vantagem é que uma única amostra é usada para se avaliada em todas as faixas de frequência, minimizando os possíveis erros de colocação da amostra.

Tabela 2: Valores de $f_{\min}$, $f_{\max}$ e f_i , em função de “s” para o tubo de 40 mm de diâmetro.

Frequência de corte do tubo (40 mm) = 5874,03 Hz				
Nmic	s[mm]	$f_{\min}$ [Hz]	$f_{\max}$ [Hz]	f_i [Hz]
1-2	29,5	576,27	4.610,17	2.881,35
1-3	133,1	127,72	1.021,79	638,62
1-4	228,1	74,53	596,23	372,64
2-3	103,6	164,10	1.312,74	820,46
2-4	198,6	85,60	684,79	427,99
3-4	95,0	178,94	1.431,58	894,74

Onde:

Nmic: é o numero dos microfones em consideração;

S: é a distância entre os dois microfones em consideração;

$f_{\min}$: é a frequência mínima de análise; $f_{\max}$: é a frequência máxima de análise;

f_i : é a frequência ótima de análise.

5. CONCLUSÕES

A construção do tubo de onda estacionária proporcionou muito mais do que a possibilidade de se ter um equipamento para medidas de coeficiente de absorção, mas permitiu inúmeras discussões teóricas sobre os princípios acústicos envolvidos e a crítica ao método de medida em si. Ressaltou

as qualidades e as limitações do método (tamanho da amostra, incidência normal, repetibilidade das medidas).

Quanto ao desempenho do sistema de medidas, o resultado foi altamente satisfatório e o próximo passo será medir amostras-padrão do INMETRO para validar o equipamento aqui construído para medições de coeficiente de absorção sonora de amostras.

Embora o método de tubo de onda estacionária seja limitado para caracterizar completamente a absorção de uma amostra, ele pode ser muito útil para desenvolvimento de novos materiais absorventes acústicos, pois permite uma avaliação das variações da absorção, relativamente segura ao se variar o material.

Quanto ao custo final do equipamento, estima-se que seu valor ficou em torno de um vinte avos menor do que o encontrado no mercado.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte oferecido pelo LVA – Laboratório de Vibrações e Acústica, na aquisição do material necessário a construção do tubo de impedância.

7. REFERÊNCIAS

- Beranek, L.L. “Acoustical Measurements”, American Institute of Physics. Cambridge, 1988.
- Bóden, Hans e Abom, Mats. “Two microphone measurements in the plane wave region of ducts influence of errors”. Stockholm, Royal Institute of Technology, 1984. 86p.
- Chu, W. T., “Transfer function technique for impedance and absorption measurements in the impedance tube using a single microphone”. Journal of Acoustical Society of America, New York, 80 (2): 555-60, Aug. 1986.
- Giampaoli, Eduardo, “Características de absorção acústica de tijolos transformados em absorventes de ruídos de baixa frequência”. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis, Julho de 1987.

BUILDING AN IMPEDANCE TUBE

Ricardo de Vasconcelos Salvo

UFU - Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC - Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila 2121 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M // 38400-902 - Uberlândia - MG.
ricardo_salvo@mec.ufu.br

Marcelus Tadeu Ferreira Mairink

marcelustfm@yahoo.com.br

Ethel Caires de Oliveira

ethelcaires2003@yahoo.com.br

Elias Bitencourt Teodoro, PhD

teodoro@mecanica.ufu.br

Abstract: *The impedance tube is an equipment that allows the measurement of acoustic absorption coefficient and the acoustic impedance of materials. These values are essentials to choose which product is better to satisfy the necessities of an acoustic treatment project, both in closed and in opened spaces. This paper presents the constructive details of an impedance tube manufactured with alternative materials, with minimum cost.*

Keywords: *impedance tube, acoustic absorption, single microphone technique.*