
Relatório 3

Coeficiente de Absorção Sonora com Tubo de Impedância

Técnicas Experimentais em Acústica e Vibrações

Aluno:

José Pedro de Santana Neto - 201505394

Professor: **Arcanjo Lenzi, PhD.**

13 de novembro de 2015

1 Introdução

Várias técnicas de controle de ruído foram desenvolvidas nesses últimos tempos visando oferecer ao ouvido humano um ambiente agradável, principalmente em ambientes de salas nas quais aspecto reverberante é bastante evidente.

Com esse determinado fim, o uso de materiais de absorção de ondas sonoras é amplamente utilizado. Esses materiais, normalmente porosos, ficam nas extremidades de uma sala reverberante amortecendo e dissipando em forma de energia térmica o som. Em vista desse aspecto todo material que visa esse objetivo possui um coeficiente de absorção sonora e o mesmo é levado em consideração para o controle de ruído numa sala por exemplo.

Em vista do que foi exposto, esse trabalho tem como objetivo analisar o coeficiente de absorção sonora de uma amostra de um material poroso através da câmara de reverberação. Para isso, utilizou-se como base a norma ISO 354:2003, que estabelece os procedimentos que devem ser feitos para determinar tal parâmetro em uma câmara reverberante

2 Fundamentação Teórica

Em vista do que se expõe em (BISTAFA, 2011), o som é a aceleração de partículas de ar que se chocam, transformando a pressão estática do ar numa pressão oscilatória. Essa pressão oscilatória entre em contato com os ouvidos do ouvinte fazendo com que essa variação de pressão seja percebida e escutada. Essa variação de pressão que oscila é escutada pelo ser humano a partir da magnitude de pressão de $2 \cdot 10^{-5} Pa$. Qualquer perturbação de pressão que se encaixa nessas condições é denominada som e as perturbações indesejáveis são denominadas de ruído sonoro.

Para se mensurar o nível de pressão sonora deve-se comparar o valor *rms* da pressão coletada pela pressão de referência ($2 \cdot 10^{-5} Pa$), usando a operação de divisão. Como a magnitude dessa divisão é muita alta, a variação das pressões audíveis é de ordem muito alta fazendo assim que se transforme esse valor numa medida logarítmica e multiplicado por 10. A expressão matemática resultante desse processo é

$$NPS = 10 \cdot \log_{10}(p_{rms}^2 / (2 \cdot 10^{-5})^2). \quad (2.1)$$

Tal que *NPS* é o nível de pressão sonora e p_{rms} é o *rms* da pressão coletada.

De acordo com (GAN, 1999), a potência sonora é uma grandeza física que diz respeito à energia acústica total emitida por uma determinada fonte sonora. Dessa forma, a potência sonora depende apenas da própria fonte e independe das características do meio, fazendo com que esse tipo de grandeza física se qualifique como satisfatório para caracterizar uma fonte sonora. Em vista disso a potência sonora é dada pela equação

$$W = I_{max} S. \quad (2.2)$$

Tal que *W* é a potência sonora, I_{max} intensidade sonora máxima e *S* é a área. Como a intensidade sonora máxima (I_{max}) se relaciona com a impedância característica do meio ($\rho \cdot c$) de tal forma que a expressão matemática de denota como

$$I_{max} = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 \cdot c}. \quad (2.3)$$

Dessa forma, dividindo por uma potência de referência $W_o = \frac{p_o^2}{\rho c} S$ a equação da potência pode ser caracterizada por

$$\frac{W}{W_o} = \frac{p_{rms}^2}{p_o^2} \frac{S}{S_o}. \quad (2.4)$$

Aplicando a operação logarítmica na equação 2.4 o resultado final do cálculo da potência é

$$NWS = NPS + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{S_o} \right). \quad (2.5)$$

Para o cálculo dos coeficientes de absorção sonora de um material usando um tubo de impedância, é preciso considerar duas ondas sonoras no duto: ondas de reflexão e ondas de incidência, que trabalham abaixo da frequência de corte. Ambas respectivamente podem ser calculadas através das equações 2.6 e 2.7.

$$p_i = \hat{p}_i e^{\mathbf{j}kx}, \quad (2.6)$$

$$p_r = \hat{p}_r e^{-\mathbf{j}kx}, \quad (2.7)$$

Dos quais \hat{p}_i e \hat{p}_r são as magnitudes de p_i e p_r em um plano de referência ($x = 0$). Portanto a pressão sonora total é caracterizada pela soma entre a pressão sonora incidente e a pressão sonora refletida.

$$p = \hat{p}_i e^{\mathbf{j}kx} + \hat{p}_r e^{-\mathbf{j}kx} \quad (2.8)$$

O sistema possui duas incógnitas, as amplitudes das pressões complexas, tanto incidente como refletida. Portanto, para solucionar esse sistema de equações é necessário obter dois dados de pressão sonora.

$$p_1 = \hat{p}_i e^{\mathbf{j}kx_1} + \hat{p}_r e^{-\mathbf{j}kx_1} \quad (2.9)$$

$$p_2 = \hat{p}_i e^{\mathbf{j}kx_2} + \hat{p}_r e^{-\mathbf{j}kx_2} \quad (2.10)$$

Pode-se ainda relacionar esses dois dados de pressão sonora através de uma função de transferência, definida pela equação 2.11.

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \quad (2.11)$$

Para se obter maior precisão na função de transferência, é necessário fazer duas medições: uma com os microfones numa dada posição padrão e outra com eles trocados de posição. Desse modo pode-se retirar a diferença de fase entre os dois microfones aplicando a equação 2.12.

$$H_{\text{corrigida}} = \frac{\sqrt{H_{\text{posicao}1}}}{\sqrt{H_{\text{posicao}2}}} \quad (2.12)$$

De forma análoga, obtêm-se funções de transferências para as pressões sonoras incidentes e para as pressões sonoras refletidas, conforme as Equações 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$H_I = \frac{p_{i2}}{p_{i1}} = e^{-\mathbf{j}k(x_1-x_2)} = e^{-\mathbf{j}ks} \quad (2.13)$$

$$H_R = \frac{p_{r2}}{p_{r1}} = e^{-\mathbf{j}k(x_1-x_2)} = e^{\mathbf{j}ks} \quad (2.14)$$

onde s é a distância entre os dois transdutores utilizados para medir a pressão sonora no duto.

Através dessas funções de transferências pode-se obter o fator de reflexão sonora r em um plano de referência ($x = 0$), conforme a equação 2.15.

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2\mathbf{j}kl}, \quad (2.15)$$

Por fim, o cálculo do coeficiente de absorção sonora α para uma onda de incidência normal a superfície do material pode ser calculado através da equação 2.16.

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.16)$$

3 Experimento e Equipamentos

O método baseia-se na norma ISO 10534-2:1998, que descreve a utilização de dois microfones em um duto de superfícies rígidas, denominado tubo de impedância, de posse de um analisador digital de sinais é possível determinar o coeficiente de absorção sonora de materiais para uma onda sonora de incidência normal, impedâncias superficiais e admitâncias de materiais absorventes.

Em uma das terminações do tubo está posicionada a fonte sonora, e na outra terminação a amostra do material a ser analisado. Nesse método as ondas planas são geradas por uma fonte de ruído, e a decomposição entre a onda incidente e refletida é feita através da medição com dois transdutores fixos é uma determinada posição, de modo que é feita a aquisição da função de transferência entre os microfones. A Figura 1 e a Tabela 1 exibem e listam, respectivamente, como é feita a montagem da bancada para a determinação do coeficiente de absorção sonora de um material em um tubo de impedância.

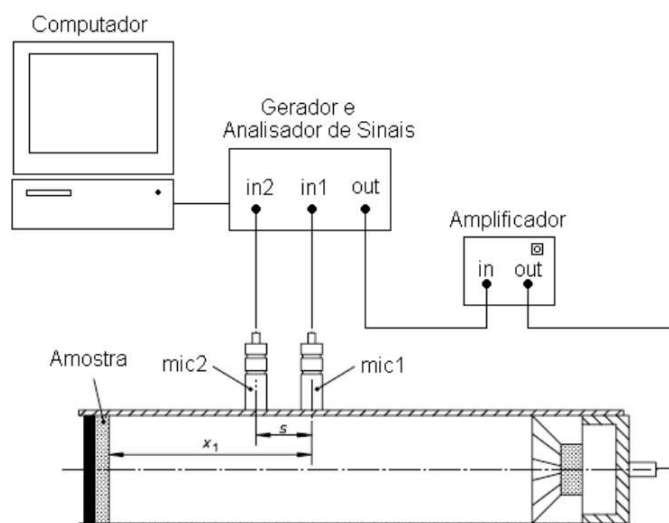


Figura 1: Equipamentos utilizados para a medição a determinação do coeficiente de absorção sonora de um material em um tubo de impedância. Fonte (MAREZE et al., 2013)

Tabela 1: Equipamentos utilizados na medição.

Item	Descrição do Equipamento
1	Analisador de sinais B&K Pulse
2	Computador com o programa Pulse LabShop
3	Amplificador B&K 2619
4	Microfones de 1/2" modelo B&K 4189
5	Calibrador 200 Larson Davids

O material poroso analisado foi uma lâ de vidro produzido pela empresa *Rockfibras*, conforme a Figura 2. Primeiramente foi feita a medição da função de transferência entre os microfones sem a presença do material poroso com o intuito de verificar se há absorção sonora nas superfícies do tubo, visto que as superfícies não são idealmente rígidas.



Figura 2: Lã de rocha utilizada para o ensaio.

Posteriormente foi recortada três (3) amostras de lâ de vidro do mesmo material, porém com espessuras h ligeiramente diferentes, exibidas na Tabela 2. O objetivo foi medir separadamente cada uma das amostras e verificar se o coeficiente de absorção sonora teve resultados semelhantes para os três ensaios.

Para cada medição foi extraído como resposta as funções de transferências H_{12} através de um *template* programado no software Pulse LabShop. Como já foi discutido anteriormente, a partir das funções de transferência entre os microfones

Tabela 2: Espessuras das amostras ensaiadas

Item	Espessura (mm)
Amostra 1	25.2
Amostra 2	25.8
Amostra 3	25.6

é possível extrair o coeficiente de absorção sonora por incidência direta de um material.

Outra técnica utilizada nesse trabalho foi o intercâmbio entre as posições dos microfones, essa técnica é utilizada para corrigir a diferença de fase entre os microfones. Para tanto, calcula-se uma nova função de transferência H''_{12}

$$H'_{12} = \frac{p_{\text{mic1}}}{p_{\text{mic2}}}, \quad \text{e} \quad H''_{12} = \frac{p_{\text{mic2}}}{p_{\text{mic1}}}, \quad (3.1)$$

onde H'_{12} é a função de transferência sem intercâmbio de microfones e H''_{12} é a função de transferências com intercâmbio de microfones.

Por fim, a Figura 3 é exposta para exibir a bancada de onde foi extraída as funções de transferência entre os microfones para a determinação do coeficiente de absorção α do material poroso.

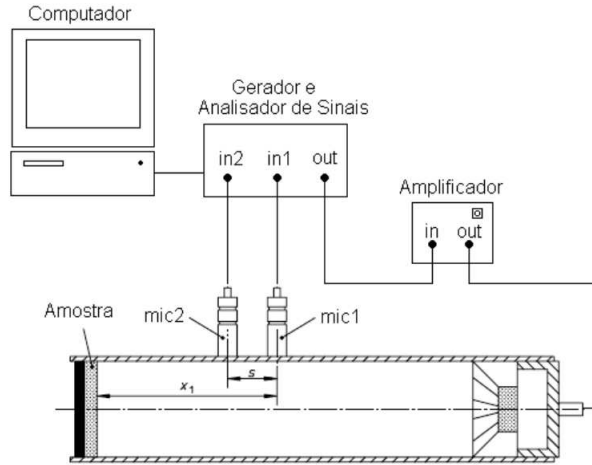


Figura 3: Tubo de impedância utilizado para a determinação dos coeficientes de absorção sonora das amostras.

Para o processamento digital e aplicação dos cálculos das informações obtidas, foi desenvolvido um script do MATLAB. Segue o mesmo:

```

1 % Codigo do experimento do duto de impedancia
  clear('all');
3 close all;
  clc;
5 format longe;

7 % Definindo constantes
  % [K] – Temperatura do Ambiente de Medicao
9 temperatura_ambiente = 25+273.15;
  % [m/s] – Velocidade do Som no Ar
11 velocidade_som = 343.2*sqrt(temperatura_ambiente/293);
  % Constante para o Calculo da Freq. de Corte
13 constante_frequencia_corte = 0.5;
  % [m] – Diametro Interno do Tudo
15 diametro_tubo_interno = 0.027;
  % [m] – Distancia do Microfone mais Distante a Amostra em Teste
17 distancia_microfone_distante = 0.0673;
  % [m] – Distancia entre os Dois Microfones
19 distancia_entre_microfones = 0.024;
  % [m] – Distancia da Amostra ao Microfone mais Proximo
21 distancia_microfone_perto = distancia_microfone_distante –
    distancia_entre_microfones;
  % [Hz] – Frequencia de Corte do Tubo de Impedancia, para esta
    Configuracao de Teste.
23 frequencia_corte_tubo = (1.84*velocidade_som)/(pi*
    diametro_tubo_interno);

25 % Captando os mifrofones para primeira medicao
  %% Primeira posicao
27 funcao_transferencia_medicao_1_posicao_1 = ...
    textread('medicaoladerocha1_pos1.txt');
29 frequencias = funcao_transferencia_medicao_1_posicao_1(:,2);
    funcao_transferencia_medicao_1_posicao_1 = ...
31 funcao_transferencia_medicao_1_posicao_1(:,3) + ...
    funcao_transferencia_medicao_1_posicao_1(:,4)*i;

```

```

33 %% Segunda posicao
funcao_transferencia_medicao_1_posicao_2 = ...
35 textread('medicaoladerocha1_pos2.txt');
funcao_transferencia_medicao_1_posicao_2 = ...
37 funcao_transferencia_medicao_1_posicao_2(:,3) + ...
funcao_transferencia_medicao_1_posicao_2(:,4)*i;
39 funcao_transferencia_medicao_1_posicao_2 = ...
funcao_transferencia_medicao_1_posicao_2;
41
% Captando os microfones para segunda medicao
43 %% Primeira posicao
funcao_transferencia_medicao_2_posicao_1 = ...
45 textread('medicaoladerocha2_pos1.txt');
funcao_transferencia_medicao_2_posicao_1 = ...
47 funcao_transferencia_medicao_2_posicao_1(:,3) + ...
funcao_transferencia_medicao_2_posicao_1(:,4)*i;
49 %% Segunda posicao
funcao_transferencia_medicao_2_posicao_2 = ...
51 textread('medicaoladerocha2_pos2.txt');
funcao_transferencia_medicao_2_posicao_2 = ...
53 funcao_transferencia_medicao_2_posicao_2(:,3) + ...
funcao_transferencia_medicao_2_posicao_2(:,4)*i;
55
% Captando os microfones para terceira medicao
57 %% Primeira posicao
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_1 = ...
59 textread('medicaoladerocha3_pos1.txt');
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_1 = ...
61 funcao_transferencia_medicao_3_posicao_1(:,3) + ...
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_1(:,4)*i;
63 %% Segunda posicao
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_2 = ...
65 textread('medicaoladerocha3_pos2.txt');
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_2 = ...
67 funcao_transferencia_medicao_3_posicao_2(:,3) + ...
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_2(:,4)*i;
69 funcao_transferencia_medicao_3_posicao_2 = ...
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_2;
71

```

```

% Captando os mifrophones para medicao sem amostra
73 %% Primeira posicao
funcao_transferencia_medicao_4_posicao_1 = ...
75 textread('medicaosemamostra2_pos1.txt');
funcao_transferencia_medicao_4_posicao_1 = ...
77 funcao_transferencia_medicao_4_posicao_1(:,3) + ...
funcao_transferencia_medicao_4_posicao_1(:,4)*i;
79 %% Segunda posicao
funcao_transferencia_medicao_4_posicao_2 = ...
81 textread('medicaosemamostra2_pos2.txt');
funcao_transferencia_medicao_4_posicao_2 = ...
83 funcao_transferencia_medicao_4_posicao_2(:,3) + ...
funcao_transferencia_medicao_4_posicao_2(:,4)*i;
85 funcao_transferencia_medicao_4_posicao_2 = ...
funcao_transferencia_medicao_4_posicao_2;
87
% Correcao da fase para todas as medicoes
89 %% medicao 1
funcao_transferencia_medicao_1_corrigida = ...
91 (funcao_transferencia_medicao_1_posicao_1.^0.5)./ ...
(funcao_transferencia_medicao_1_posicao_2.^0.5);
93 %% medicao 2
funcao_transferencia_medicao_2_corrigida = ...
95 (funcao_transferencia_medicao_2_posicao_1.^0.5)./ ...
funcao_transferencia_medicao_2_posicao_2.^0.5;
97 %% medicao 3
funcao_transferencia_medicao_3_corrigida = ...
99 (funcao_transferencia_medicao_3_posicao_1.^0.5)./ ...
funcao_transferencia_medicao_3_posicao_2.^0.5;
101
% Calculo das Funcoes de Transferencia: ondas incidentes
103 numero_onda_por_frequencia = (2*pi.*frequencias)/velocidade_som;
% Constante de incidencia
105 constantes_incidencia = exp(-1*i* ...
numero_onda_por_frequencia*(distancia_entre_microfones));
107 % Constante de reflexao
constantes_reflexao = exp(i* ...
109 numero_onda_por_frequencia*(distancia_entre_microfones));

```

```

111 % Calculo coeficientes de reflexao
    % Medicao 1
113 %r1 = ((H_12-H_Ii)./(H_Ri-H_12)).*exp(2*i*k0*x1);
    coeficientes_reflexao_medicao_1 = ...
115 ((funcao_transferencia_medicao_1_corrigida - constantes_incidencia)
        ...
        ./(constantes_reflexao - funcao_transferencia_medicao_1_corrigida)).*
        ...
117 exp(2*i*numero_onda_por_frequencia*distancia_microfone_distante);
    % Medicao 2
119 coeficientes_reflexao_medicao_2 = ...
    ((funcao_transferencia_medicao_2_corrigida - constantes_incidencia)
        ...
121 ./(constantes_reflexao - funcao_transferencia_medicao_2_corrigida)).*
        ...
        exp(2*i*numero_onda_por_frequencia*distancia_microfone_distante);
123 % Medicao 3
    coeficientes_reflexao_medicao_3 = ...
125 ((funcao_transferencia_medicao_3_corrigida - constantes_incidencia)
        ...
        ./(constantes_reflexao - funcao_transferencia_medicao_3_corrigida)).*
        ...
127 exp(2*i*numero_onda_por_frequencia*distancia_microfone_distante);

129 % Calculo do Coeficiente de Absorcao da La de Vidro (verde)
    % Medicao 1
131 coeficientes_absorcao_medicao_1 = ...
    1 - (abs(coeficientes_reflexao_medicao_1)).^2;
133 % Medicao 2
    coeficientes_absorcao_medicao_2 = ...
135 1 - (abs(coeficientes_reflexao_medicao_2)).^2;
    % Medicao 3
137 coeficientes_absorcao_medicao_3 = ...
    1 - (abs(coeficientes_reflexao_medicao_3)).^2;
139 %% medicao 4
141 funcao_transferencia_medicao_4_corrigida = ...
    (funcao_transferencia_medicao_4_posicao_1.^0.5)./ ...
143 (funcao_transferencia_medicao_4_posicao_2.^0.5);

```

```

% Medicao 4
145 coeficientes_reflexao_medicao_4 = ...
    ((funcao_transferencia_medicao_4_corrigida - constantes_incidencia)
    ...
147 ./ (constantes_reflexao - funcao_transferencia_medicao_4_corrigida)).*
    ...
    exp(2*i*numero_onda_por_frequencia*distancia_microfone_distante);
149 % Medicao 4
    coeficientes_absorcao_medicao_4 = ...
151 1 - (abs(coeficientes_reflexao_medicao_4)).^2;

153 figure;
    colors{1} = 'blue';
155 colors{2} = 'red';
    colors{3} = 'green';
157 colors{4} = 'black';
    for grafico = 1:4
159     plot(frequencias, ...
        eval(['coeficientes_absorcao_medicao_', num2str(grafico)]), ...
161     colors{grafico}, 'linewidth', 2);
        hold on;
163     ylim([0 1]);
    end
165 legend('Amostra 1: 25.2 mm', ...
    'Amostra 2: 25.8 mm', ...
167 'Amostra 3: 25.6 mm', 'Coeficientes Sem Amostra');
    title('Coeficientes de Absorcao', 'FontSize', 22);
169 xlabel('Frequencia (Hz)', 'FontSize', 22);
    ylabel('Coeficiente de Absorcao \alpha', 'FontSize', 22);
171 set(gca, 'FontSize', 22);
    grid on;

```

4 Resultados

4.1 Coeficiente de Absorção

Ao analisar o gráfico 4 é possível observar a variação coerente do coeficiente de absorção sonora, crescendo para as altas frequências e ficando abaixo do valor de 1, ou seja, 100% de absorção. Também é possível observar os 3 tamanhos de espessuras diferentes, esse fato, somando a outros fatores, faz com que os coeficientes de absorção sejam ligeiramente diferentes.

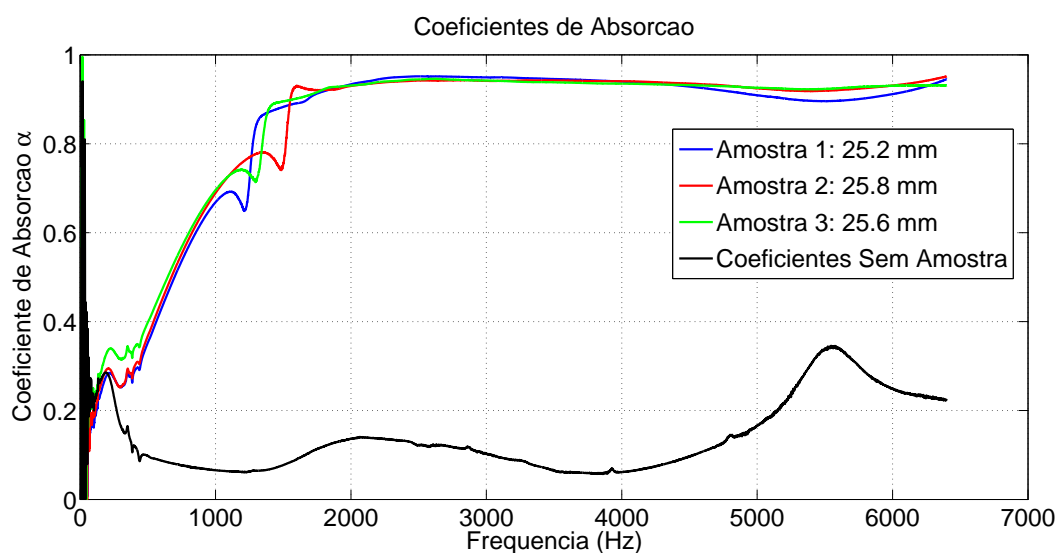


Figura 4: Coeficiente de absorção do material lâ de rocha. Fonte: autoria própria.

5 Conclusões

Em vista do que foi apresentado, a realização dos ensaios no tubo de impedância originou resultados que constam de acordo com a teoria vigente visto que o coeficiente de absorção do material aumenta ao longo da frequência até num nível máximo 1 (100% de absorção), e esse fato se repete para as 3 tipos de amostras consolidando um claro comportamento da absorção do material poroso.

Referências

BISTAFA, S. R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. [S.l.]: 2ª edição – São Paulo, 2011. Citado na página [2](#).

GAN, J. Scanning paths for estimating sound power of noise sources by sound intensity scanning method. *Chinese Journal of Acoustics*, v. 18, n. 4, p. 353–359, 1999. Citado na página [2](#).

MAREZE, P. H. et al. Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida. 2013. Citado na página [5](#).