



## IMPEDÂNCIAS ACÚSTICAS : APLICAÇÕES

**Zemar M. Defilippo Soares**

zmsoares@inmetro.gov.br

INMETRO - Av. N. Sra. das Graças, 50 - Xerém, Duque de Caxias, RJ, 25250-020

**Walter E. Hoffmann**

wehoffmann@inmetro.gov.br

INMETRO - Av. N. Sra. das Graças, 50 - Xerém, Duque de Caxias, RJ, 25250-020

**Resumo** - *A modelagem de sistemas acústicos é fortemente dependente de pequenas estruturas físicas que, quando bem combinadas, podem descrever com bastante exatidão um sistema acústico. Estas pequenas estruturas são bem definidas pela física e quando aplicadas na acústica são denominadas impedâncias acústicas. A impedância acústica resistiva é largamente usada para modelar perdas, amortecimento e absorção de energia. A impedância acústica reativa pode ser decomposta em duas: a impedância acústica capacitiva, a qual pode modelar um sistema acústico onde a energia potencial é a única que se propaga por este sistema e a impedância indutiva que pode modelar um sistema acústico onde a energia cinética é a única energia propagante. Este trabalho visa contribuir com segmentos da área de acústica que desejem iniciar projetos de modelagem e construção de dispositivos acústicos onde faz-se necessário a aplicação das impedâncias acústicas. O trabalho descreve algumas modelagens utilizando impedâncias acústicas em dispositivos acústicos conhecidos, tais como, microfones capacitivos de medição, ouvidos artificiais, pistonphones e absorvedores de placa microperfurada.*

**Palavras-chave:** *Admitância, reatância, compliância, indutivo, capacitivo*

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 Impedância Acústica de Tubos Capilares

A impedância acústica de tubos capilares é talvez a mais importante característica a ser dominada, visto que suas propriedades podem influir em diversos dispositivos acústicos. Assim, por exemplo, os microfones capacitivos se beneficiam da propriedade acústica do tubo capilar para propiciarem um amortecimento na ressonância da membrana e permitir a equalização da pressão atmosférica com o interior do microfone. Mais detalhes sobre estes efeitos serão discutidos no item 2.1.

Outras aplicações para os tubos capilares utilizam suas propriedades para permitir que um ouvido artificial possa ter uma resposta em frequência semelhante a do ouvido humano. Materiais porosos tais como espuma são modelados como vários tubos capilares em paralelo por área de amostra, permitindo assim previsões quanto a absorção do material. Outra aplicação crescente é a utilização da impedância acústica de tubos capilares para a modelagem de painéis microperfurados, utilizados como materiais absorvedores de energia sonora. Maiores detalhes serão apresentados no item 2.4.

Algumas equações são fundamentais para a continuidade do estudo. Segundo Beranek (1954) a impedância de um furo é:

$$Z = \frac{(8\omega\rho_0\eta)^{1/2}}{\pi r^2} \left(1 + \frac{l}{2r}\right) + j\omega\rho_0 \left(\frac{l+1.7r}{\pi r^2}\right) \quad (1)$$

onde:

$\eta$  é a viscosidade de cisalhamento do ar (Pa.s),  $\rho_0$  é a densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>),  $r$  é o raio do tubo capilar (m) e  $l$  é o comprimento do tubo (m),

Uma solução mais exata adotada pela IEC 61094-2 (1992) para modelar a impedância acústica de tubos capilares mas que despreza a impedância de radiação na extremidade aberta do tubo capilar é descrita pela Eq (2).

$$Z_c = Z_t \tanh(\xi l) \quad (2)$$

onde:

$Z_t = \left[ \frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2} \right]^{1/2}$  é a impedância característica complexa de um capilar com comprimento infinito;

$\xi = \left[ \dot{A}_1 \dot{A}_2 \right]^{1/2}$  é o coeficiente de propagação complexo

De maneira a simplificar o entendimento desta equação é possível decompor  $\dot{A}_1$  e  $\dot{A}_2$  como descrito por Rasmussen (1982):

$$\dot{A}_1 = R + j\omega L \quad \text{e} \quad \dot{A}_2 = G + j\omega C$$

onde:

$R+j\omega L$  representa o termo de impedância relacionado à energia cinética e ao movimento de onda longitudinal no tubo;  $R$  corresponde às perdas viscosas na parede do duto e  $L$  à inércia do meio por unidade de comprimento;

e  $G+j\omega C$  representa o termo de admitância relacionada à energia potencial e ao movimento de onda radial;  $G$  corresponde às perdas por condução de calor nas paredes do duto e  $C$  à compliância do meio por unidade de comprimento.

Zwikker & Kosten (1949) descrevem as expressões teóricas dos termos  $R+j\omega L$  e  $G+j\omega C$  como:

$$\dot{A}_1 = j \frac{\omega\rho_0}{\pi r^2} \left[ 1 - \frac{2J_1(kr)}{krJ_0(kr)} \right]^{-1} \quad \text{e} \quad \dot{A}_2 = j\omega \frac{\pi r^2}{\rho_0 c^2} \left[ 1 + \frac{2}{Bkr} (\gamma - 1) \frac{J_1(Bkr)}{J_0(Bkr)} \right] \quad (3) \text{ e } (4)$$

onde:

$$k = (-j\omega\rho_0/\eta)^{1/2} \text{ é número de onda complexo ( m}^{-1}\text{), } B = [\eta/\rho_0\alpha_t]^{1/2},$$

$\alpha_t$  é a difusividade do gás (m<sup>2</sup>/s),  $J_1$  e  $J_0$  são as funções de Bessel de primeira ordem e de ordem zero, respectivamente.

## 1.2 Impedância Acústica de Cavidades

As impedâncias acústicas de cavidades cilíndricas devem ser bem conhecidas para que se possa projetar pistonphones, calibradores de nível sonoro, ouvidos artificiais e cavidades cilíndricas para calibração de microfones.

Autores como Ballagh (1987) e Jarvis (1987) preferem trabalhar com as admitâncias (inverso das impedâncias) de cavidades cilíndricas para a simplificação das notações matemáticas. Segundo Ballagh (1987), nas médias frequências, onde os movimentos de ondas podem ser negligenciados e

a compressão e a expansão da onda sonora é adiabática, a componente resistiva pode ser desprezada, de forma que a admitância de transferência acústica da cavidade cilíndrica é puramente reativa.

$$Y = j\omega V / \gamma p_0 \quad (5)$$

onde:

$V$  é o volume da cavidade;  $\omega$  é a frequência em radianos;  $\gamma$  é a taxa de calor específico e  $p_0$  é a pressão estática.

Quando a cavidade cilíndrica é excitada com baixas frequências, a compressão e a expansão da onda sonora passa de um processo adiabático para isotérmico, IEC 61094-2 (1992). A consequência deste processo isotérmico é conhecida como condução de calor e, segundo Ballagh (1987), o efeito é um incremento no comprimento efetivo da cavidade, bem como da sua seção transversal efetiva. Esta interpretação evita que uma componente resistiva venha a ser introduzida na função de admitância acústica, permanecendo somente a parcela reativa, devendo uma correção ser aplicada ao volume geométrico,  $V_g$ , da cavidade para se obter o seu volume efetivo,  $V_e$ , como mostrado pela Eq. (6).

$$V_e / V_g = \left\{ 1 + (\gamma - 1)(S / V_g) \sqrt{\alpha_t / 2\omega} \right\} \quad (6)$$

onde  $S$  é área da superfície cilíndrica.

Substituindo-se  $V$  por  $V_e$  na Eq. (5), pode-se obter o valor verdadeiro para a admitância  $Y$  em baixas frequências.

Nas altas frequências a admitância acústica da cavidade cilíndrica é considerada como uma linha de transmissão e sua admitância acústica é dada por:

$$Y = (Y_{a1} + Y_{a2}) \cosh(\xi l) + (Y_c + Y_{a1} Y_{a2} / Y_c) \sinh(\xi l) \quad (7)$$

onde:

$Y_{a1}$  e  $Y_{a2}$  são as admitâncias acústicas nas extremidades da cavidade cilíndrica;

$l$  é o comprimento físico da cavidade cilíndrica e  $r$  é o raio da cavidade cilíndrica;

$Y_c = Y_o \left( 1 + 1/\sqrt{2}(1-j)(1/r) \left\{ \sqrt{(\eta/\omega\rho_o)} - (\gamma-1)\sqrt{\alpha_t/\omega} \right\} \right)$ , com  $Y_o = S/\rho c$  é a admitância característica e

$\xi = \xi_o \left( 1 + 1/\sqrt{2}(1-j)(1/r) \left\{ \sqrt{(\eta/\omega\rho_o)} + (\gamma-1)\sqrt{\alpha_t/\omega} \right\} \right)$ , com  $\xi_o = j\omega/c$  é o coeficiente de propagação complexo da cavidade cilíndrica.

## 2. APLICAÇÕES

### 2.1. Microfones Capacitivos de Medição

O microfone capacitivo de medição é um sistema acústico onde a modelagem é bastante complexa. Seu desempenho depende de uma boa combinação do projeto de seu sistema elétrico e mecânico.

O objeto deste artigo trata exclusivamente do sistema mecânico, no entanto um breve comentário a respeito do funcionamento elétrico pode esclarecer a presença de algumas partes do sistema mecânico do microfone capacitivo.

Quando uma tensão de polarização é aplicada entre a membrana e a placa fixa uma carga eletrostática é formada entre estas placas (membrana e a placa fixa) e uma capacitância é criada, ver Fig.(1). A tensão de polarização (200 Volts DC) permite que a carga eletrostática nas placas (membrana-placa fixa) se mantenha constante.

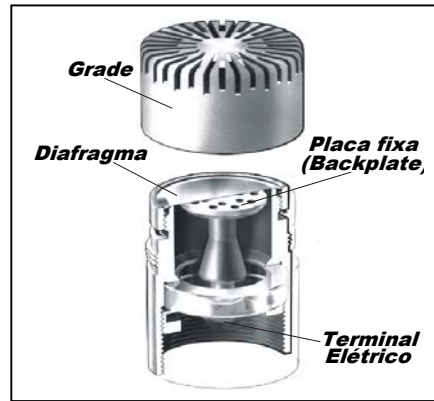


Figura 1. Vista em corte de um microfone capacitivo de medição

Quando uma onda sonora incide sobre a membrana, o movimento desta faz com que a capacitância varie, embora a carga eletrostática entre as placas se mantenha constante. A mudança da capacitância entre as placas faz surgir uma tensão AC que pode ser medida no terminal elétrico do microfone. Esta tensão AC corresponde à onda sonora (mecânica) transduzida para um sinal elétrico.

O sistema mecânico do microfone capacitivo tem a função de manter a resposta do microfone o mais plana possível. Tomando vantagem das impedâncias acústicas de elementos que constituem o microfone capacitivo é possível otimizar sua resposta.

A faixa de frequências em que um microfone capacitivo de medição opera inclui frequências abaixo e acima da frequência de ressonância da membrana. No entanto, em frequências próximas a frequência de ressonância, a resposta do microfone pode apresentar um pico, se a membrana não for suficientemente amortecida. Quando a membrana vibra, esta comprime e expande a camada de ar entre si e a placa fixa, criando uma pressão de reação que se opõe ao movimento da membrana. Esta pressão de reação gera um fluxo de ar o qual induz um amortecimento na própria camada de ar, fenda e os furos da placa fixa. A Eq. (1) é utilizada por Zuckerwar e Wong (1995) para modelar o furo existente na placa fixa e a Eq. (8) modela a fenda existente entre a placa fixa e a carcaça do microfone. A fenda tem um comprimento de  $2\pi a$ , largura  $r$  e profundidade  $l$ .

$$Z = \frac{(2\omega\rho_0\eta)^{1/2}}{\pi ar} \left(1 + \frac{l}{2r}\right) + j\omega\rho_0 \frac{l}{2ar} \quad (8)$$

A dimensão dos furos é calculada para que um forte amortecimento venha ocorrer na faixa de frequências em torno da ressonância. Este parâmetro é muito importante no projeto do microfone capacitivo. Caso a opção de projeto seja a construção de um microfone com resposta plana em campo livre (classificação funcional *Free field*), o amortecimento da membrana deverá ser suficientemente forte para que a ressonância da mesma não proporcione um pico em sua resposta. Já para os microfones capacitivos cuja resposta deva ser plana em campo de pressão (classificação funcional *pressure field*), o amortecimento deverá ser menor. Para exemplificar, a Fig.(2) mostra a curva de resposta em frequência de um microfone B&K 4180 (classificação funcional *pressure field*), quando operando em campo de pressão e em campo livre.

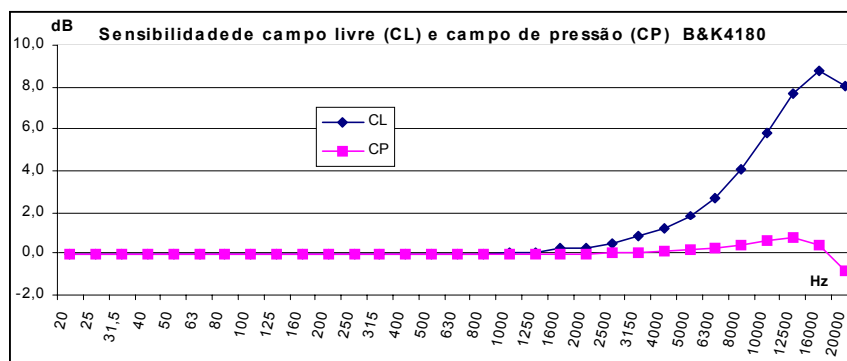


Figura 2. Respostas típicas de um microfone de pressão em campo livre e em campo de pressão

Como mostrado na Fig.(2) quando o microfone B&K 4180 é exposto ao campo livre sua sensibilidade é modificada. Na região em torno da freqüência de ressonância existe um ganho na sensibilidade de até 9 dB, isto acontece porque os microfones de classificação funcional *pressure field* possuem um fraco amortecimento da membrana. Da mesma forma que acontece um ganho na sensibilidade do microfone pode ocorrer o contrário, como por exemplo, quando um microfone de classificação funcional *free field* venha operar no campo de pressão.

Outro comentário importante a respeito de projetos de microfones é a existência de uma terceira classe funcional, *diffuse field*, cuja construção é bastante semelhante a do *pressure field*. A Figura (3) mostra as curvas de resposta em freqüência de um microfone de classificação funcional *free field* quando exposto ao campo livre, campo difuso e campo de pressão.

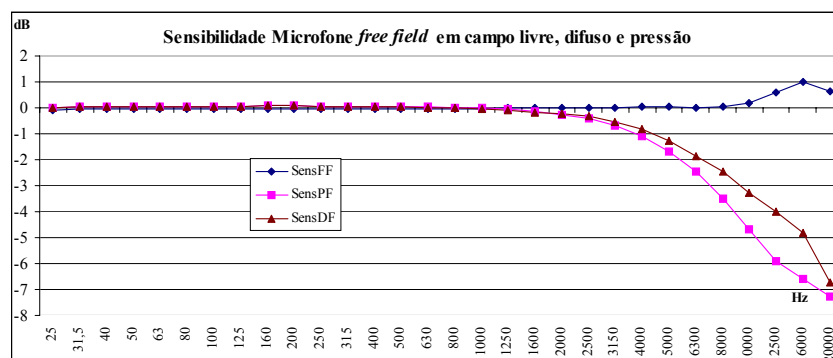


Figura 3. Respostas típicas de um microfone de campo livre em campo livre, em campo difuso e em campo de pressão

Um outro componente mecânico utilizado em microfones capacitivos é um tubo capilar cuja função é a equalização da pressão barométrica externa ao microfone com a pressão interna. A Equação (1) modela este efeito. O projeto deste tubo capilar é tal que sua impedância reativa seja desprezível para ondas sonoras de freqüências muito baixas até o DC, aumentando entretanto à medida em que a freqüência aumenta, elevado-se ao ponto de bloquear a passagem da onda sonora para o interior do microfone. Este mecanismo faz a sensibilidade do microfone manter-se estável ao longo de todo espectro de áudio. Próximo à freqüência onde a impedância reativa diminui significativamente (4 Hz ou 5 Hz), a sensibilidade do microfone cai drasticamente.

## 2.2. Calibradores de Nível Sonoro e Pistonphones

Os calibradores de nível sonoro são dispositivos eletroacústicos usados para ajustar o ganho do conjunto microfone, pré-amplificador e medidor de nível sonoro para um nível conhecido. A necessidade de se utilizar este dispositivo antes de cada medição deve-se à possibilidade de variação das condições atmosféricas podendo modificar a função de transferencia do microfone capacitivo.

Como a sensibilidade do microfone é função, principalmente, da pressão barométrica e da temperatura e como a variação destas alteram a compliância da membrana e da cavidade atrás da placa fixa, fica evidente a necessidade de se garantir, através de algum dispositivo, o nível de pressão sonora indicado em uma determinada medição.

A construção dos calibradores de nível sonoro variam de fabricante para fabricante, embora a essência do projeto é o domínio do conhecimento da admitância da cavidade acústica formada pelas paredes do corpo do calibrador e a superfície da membrana do microfone.

A Equação (5) descreve a admitância para os pistonphones que são calibradores de nível sonoro cuja pressão sonora,  $P$ , gerada no interior da cavidade é função da área deslocada  $A_p$  de um dos dois pequenos pistões montados diametralmente opostos no interior da cavidade. A Equação (9) descreve a pressão sonora gerada pelo pistão no interior da cavidade.

$$P = \gamma p_o \frac{2A_p B}{\sqrt{2V}} \quad (9)$$

onde  $V$  é o volume efetivo da cavidade;  $\gamma$  é a taxa de calor específico;  $p_o$  é a pressão estática e  $B$  é a amplitude da excetricidade do came cuja equação de movimento  $r(\alpha)$  é fornecida na Technical Documentation B&K (1992):

$$r(\alpha) = A + B \sin 4\alpha - C \cos 8\alpha \quad (10)$$

onde  $A$ ,  $B$ ,  $r$  e  $\alpha$  são mostrados na Fig. (4). O termo  $C \cos 8\alpha$  é responsável pela compensação do segundo harmônico.

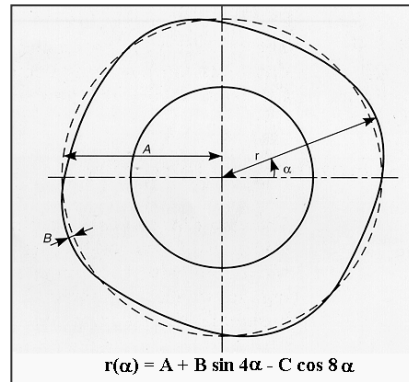


Figura 4. Esboço do formato senoidal do came

Desta forma, o nível de pressão sonora efetivo,  $NPS_E$ , projetado para um pistonphone é dado por:

$$NPS_E = NPS_N + \Delta L_p + \Delta L_v + \Delta L_H \quad (11)$$

onde:

$$NPS_N = 20 \log(P / P_{ref}); \quad \Delta L_p = 20 \log(p_o / p_{o,ref}); \quad \Delta L_v = -20 \log\left(\frac{V_{carga} + V_g}{V_e}\right);$$

$\Delta L_H$  é a correção da umidade do ar;

$V_e$  é o volume efetivo nominal da cavidade, igual à soma do volume geométrico da cavidade com o volume adicional devido ao efeito da condução de calor.

$V_{carga}$  é o volume frontal do microfone adicionado ao seu o volume equivalente.

$P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$  Pa,  $p_o$  é a pressão barométrica e  $p_{o,ref}$  é a pressão barométrica de referência (1013.25 hPa).

### 2.3 Ouvidos Artificiais

Ouvidos artificiais são dispositivos acústicos projetados para apresentar uma função transferência mais próximo possível à do ouvido humano. Estes dispositivos utilizam as propriedades físicas descritas pelas Equações (1), (5), (6) e (7).

Os ouvidos artificiais mais frequentemente utilizados para as verificações de desempenho de audiômetros são os de cavidade cilíndrica cujo volume é  $6 \text{ cm}^3$ . A utilização destes ouvidos artificiais é conveniente para a realização de calibrações de alguns tipos de fones de ouvidos, cujo limiar equivalente de referência do nível de pressão sonora é conhecido, não existindo entretanto correlação entre a resposta do fone acoplado à cavidade de  $6 \text{ cm}^3$  e aquela quando acoplado a um ouvido humano, pois não existe similaridade acústica e geométrica entre o ouvido humano e a cavidade de  $6 \text{ cm}^3$ . A impedância acústica de um ouvido artificial de cavidade cilíndrica de  $6 \text{ cm}^3$  é modelada de acordo com as Equações (5), (6) e (7).

Para avaliação de desempenho de fones de ouvidos é necessário submetê-lo à uma carga cuja impedância é muito próxima a do ouvido humano. Infelizmente o nível de pressão sonora emitido por transdutores eletrodinâmicos ou eletrostáticos são fortemente dependentes da carga acústica a que são submetidos. Delany (1964) em seu estudo sobre impedância acústica do ouvido humano reporta algumas combinações de fones de ouvido com 23 ouvidos humanos quando aplicadas diferentes forças sobre os fones.

A IEC 60318 partes 1 e 2 (1998) descreve como deve ser um ouvido artificial para que este possa ter uma impedância acústica o mais próximo quanto possível do ouvido humano. Trata-se de um conjunto de 3 cavidades cilíndricas acopladas entre si por meio de tubos capilares como mostra a Fig.(5). Desta maneira, é possível obter um sistema acústico com graus de liberdade suficiente para se obter uma resposta em frequência semelhante a de um ouvido humano. O circuito elétrico análogo ao mecânico é mostrado na Fig. (6).

Das Equações (1), (5) e (6) é possível aplicá-las a cada elemento do circuito elétrico apropriado. Por exemplo uma cavidade é assumida ser uma compliância pura ou um capacitor e o tubo capilar é assumido ter uma parte resistiva mais uma componente indutiva, como descrito nas respectivas equações. É importante salientar que a pressão exercida sobre os fones de ouvido é muito significativa para a boa reprodução da impedância acústica do ouvido humano. Quando o contato entre a superfície do fone de ouvido e do ouvido artificial não é suficiente, orifícios ou fendas milimétricos podem surgir e, principalmente em baixas frequências segundo as Equações (1) e (8). Vazamentos podem comprometer a medição da resposta do fone de ouvido devido à baixa repetibilidade da medição.

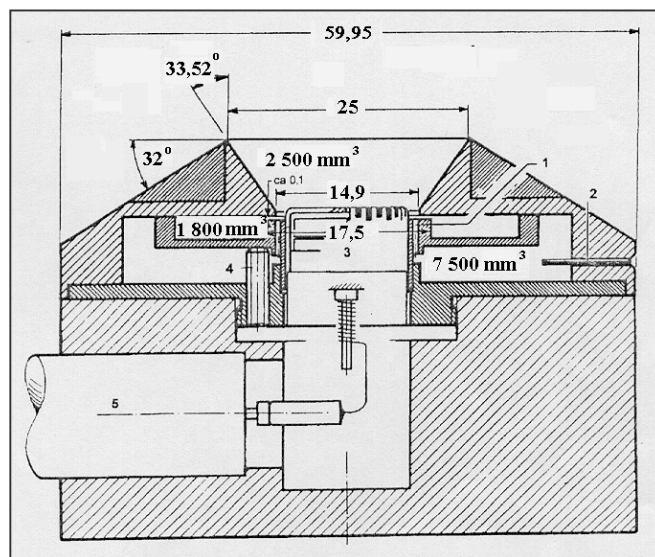


Figura 5. Ouvido artificial segundo a IEC 60318-1

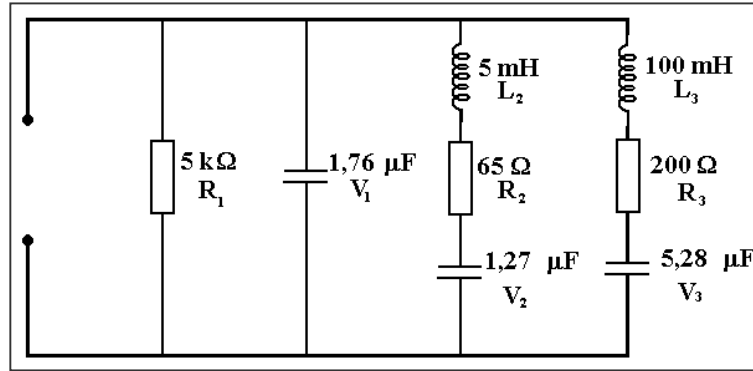


Figura 6. Circuito elétrico análogo ao mecânico do ouvido artificial, segundo a IEC 60318-1

## 2.4. Painéis Microperfurados

O uso de painéis perfurados vem sendo utilizado como cobertura de proteção para materiais porosos, por exemplo, fibra mineral e lã de vidro. No entanto, a necessidade de se empregar um material absorvente em ambientes onde materiais fibrosos ou porosos se mostraram inadequados, fez com que o desenvolvimento de um material robusto surgisse.

No início os furos do painel eram de diâmetro entre o milímetro e o centímetro. Mas a necessidade de se obter uma resistência acústica eficiente para absorção sonora e uma reatância de massa acústica baixa propiciando uma maior banda absorvedora resultou em diâmetros de furos na faixa de 0,5 – 1 mm.

O painel microperfurado é considerado um conjunto de pequenos tubos estreitos separados por uma distância maior que seus diâmetros, no entanto, tal distância é pequena comparada ao comprimento de onda incidente.

Crandall (1926) simplificou o tratamento na teoria dos tubos capilares assumindo que para tubos estreitos comparados ao comprimento da onda sonora incidente a impedância acústica  $Z_t$  é dada por:

$$Z_t = j\omega\rho_0 l \left[ 1 - \frac{2}{k\sqrt{-1}} \frac{J_1(k\sqrt{-1})}{J_0(k\sqrt{-1})} \right]^{-1} \quad (12)$$

Onde

$$k = r\sqrt{\rho_0\omega/\eta}$$

$r$  é o raio do tubo,  $J_1$  e  $J_0$  são funções de Bessel de primeira ordem e ordem zero, respectivamente.  $k$  é proporcional a taxa do raio pela viscosidade da estreita camada de contorno dentro do tubo, é chamado de constante de perfuração. Crandall (1926) apresenta valores limites de  $Z_t$  para pequenos e grandes valores de  $k$ .

$$Z_t \rightarrow \frac{4}{3}j\omega\rho_0 l + \frac{32\eta l}{d^2} \text{ para } k < 1 \quad (13)$$

$$Z_t \rightarrow j\omega\rho_0 l + \frac{4\eta l}{d} \sqrt{\frac{\omega\rho_0}{2\eta}} (1 + j) \text{ para } k > 10 \quad (14)$$

No entanto, é muito importante, para painéis microperfurados, obter uma aproximação de  $Z_t$  para valores intermediários de  $k$  ( $1 < k < 10$ ), Dah You Maa (1998) apresenta uma aproximação para  $Z_t$  conforme Eq. (15).



$$Z_t = \frac{32\eta l}{d^2} \left(1 + \frac{k^2}{32}\right)^{1/2} + j\omega\rho_o \left(1 + \left(9 + \frac{k^2}{2}\right)^{-1/2}\right) \quad (15)$$

onde  $l$  é o comprimento do tubo,  $d$  é a distância entre os tubos e  $\eta$  é a viscosidade de cisalhamento do ar.

O artigo publicado por Dah You Maa (1998) descreve alguns parâmetros importantes para se obter uma banda larga de absorção tanto para incidência normal ( $\alpha_n$ ) quanto para incidência aleatória ( $\alpha_d$ ) de um painel microperfurado próximo a uma parede de uma distância  $D$ , conforme abaixo:

$$\alpha_n = \frac{4R}{(1+R)^2 + (\omega m - ctg(\omega D/c))^2} \quad (16)$$

$$\alpha_d = \frac{4R \cos \theta}{(1+R \cos \theta)^2 + (\omega m \cos \theta - ctg(\omega D \cos \theta/c))^2} \quad (17)$$

onde  $R$  e  $m$  são respectivamente as partes resistivas e indutivas das Equações (13), (14) e (15), e o termo  $ctg$  representa a impedância capacitiva da cavidade formada entre o painel e a parede.

O comportamento acústico de um painel microperfurado, tanto para incidência normal quanto difuso, é bastante dependente da constante de perfuração  $k$  e um pouco menos da parte resistiva  $R$ , visto que segundo L.Ke & Dah You Maa (2001)  $R$  tem efeito sobre a magnitude de máxima absorção enquanto que a constante de perfuração  $k$  afeta a magnitude e também a forma da curva de absorção. A Impedância da cavidade formada atrás do painel microperfurado junto com a massa acústica ( $m$ ) afeta a largura de banda.

Coefficientes de absorção para incidência normal e aleatória são apresentados nas Figuras (7) e (8) para alguns valores de  $R$ .

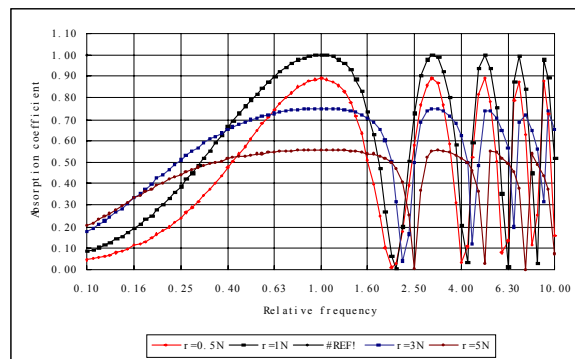


Figura 7. Coeficientes de absorção para incidência normal,  $k=0,5$

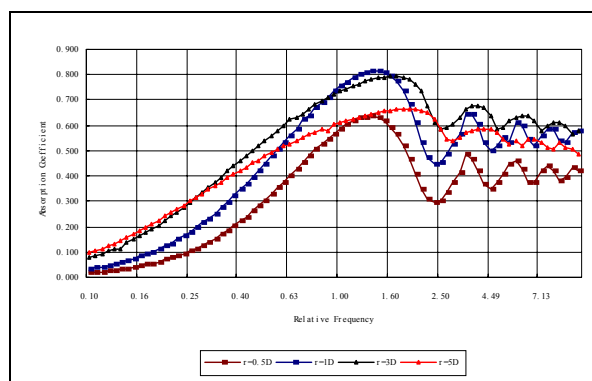


Figura 8. Coeficientes de absorção para incidência aleatória,  $k=0,5$

### 3. REFERÊNCIAS

- Ballagh K.O. , 1987, Acoustical Admittance of Cylindrical Cavities, J.S. and Vibration, 112(3), pp. 567-569.
- Beranek L.L., 1954, Acoustics, McGraw-Hill, pp. 137.
- Crandall I.B., 1926, Theory of Vibration System and Sound, Van Nostrand, New York, pp. 229.
- Dah You Maa, 1998, Potencial of microperforated panel absorber, J. A. S. A, 104 (5), pp.2861-2866
- Delany M.E., 1964, The Acoustical Impedance of Human Ears, J.S. and Vibration, 1(4), pp. 455-467.
- IEC 60318-1, 1998, Simulators of human head and ear – Part 1: Ear simulator for calibration of supra-aural earphones.
- IEC 60318-2, 1998, Simulators of human head and ear – Part 2: An interim acoustic coupler for the calibration of audiometric earphones in the extended high-frequency range.
- IEC 61094-2, 1992, Measurement Microphones – Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique.
- Jarvis D.R. , 1987, Acoustical Admittance of Cylindrical Cavities, J.S. and Vibration, 117(2), pp. 390-392.
- L.Ke & Dah You Maa, 2001, Sound absorption characteristics of microperforated absorbers for random incidence, 17<sup>th</sup> ICA, Roma.
- Rasmussen K., 1992, A Note on the Acoustic Impedance of Narrow Tubes, Acustica, Vol. 51, pp.72-73.
- Technical Documentation B&K, 1992, Pistonphone Type 4228, Capítulo 4, pp.4-2.
- Zuckerwar A. J., Wong G.S.K. & Embleton, 1995, Condenser Microphones Theory, Calibration, and Measurements, AIP Handbook, Capítulo 3, pp.50
- Zwikker C. & Kosten C.W., 1949, Sound Absorbing Materials, Elsevier, New York, capítulo II.

### ACOUSTIC IMPEDANCES: APPLICATIONS

**Zemar M. Defilippo Soares**

zmsoares@inmetro.gov.br

INMETRO - Av. N. Sra. das Graças, 50 - Xerém, Duque de Caxias, RJ, 25250-020

**Walter E. Hoffmann**

wehoffmann@inmetro.gov.br

INMETRO - Av. N. Sra. das Graças, 50 - Xerém, Duque de Caxias, RJ, 25250-020

***Abstract** - The model of an acoustical systems is strongly dependent of small physical structures that, when well combined, can describe with good accuracy an acoustical system. These small structures are well defined by the physics and when applied in the acoustics are known as acoustic impedance. The resistive acoustic impedance is used to model loss, reduction and absorption of energy. The reactive acoustic impedance can be decomposed in two parts: the acoustic capacitive impedance models the potential energy that propagates through this system and the inductive acoustic impedance models the kinetic energy in the system. This work seeks to contribute with segments of the acoustics like acoustical modeling and acoustical devices development, in which the application of the acoustic impedance are necessary. The work describes some models using acoustic impedance in known acoustical devices, such as, measurement condenser microphones, artificial ears, pistonphones and micro perforated panel absorbers.*

***Key words:** Admittance, reactance, compliance, inductive, capacitive*