



## III ENCONTRO NACIONAL I ENCONTRO LATINO-AMERICANO

Gramado, RS, 4 a 7 de julho de 1995

### APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE INTENSIDADE SONORA EM EDIFICAÇÕES

**Samir N.Y. Gerges, Ph.D.**

**Universidade Federal de Santa Catarina**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Laboratório de Vibrações e Acústica**

**Cx.P. 476 - Florianópolis - SC - Brasil**

**Tel: (048)2344074 Fax:(048)2341524**

#### RESUMO

A medição da intensidade sonora, usando dois microfones próximos, fornece ao acústico uma importante ferramenta para avaliar a potência sonora total da fonte, localizar regiões de alta irradiação de ruído, facilitar medições de isolamento de ruído e absorção dos materiais. Conseqüentemente, é uma técnica de medição mais especializada do que a da pressão sonora. Neste trabalho serão apresentados os fundamentos da técnica, instrumentação necessária, erros envolvidos, normas de medição e aplicações em edificações.

#### ABSTRACT

Sound intensity measurement, using two microphones, provides the acoustic specialist with an important tool for the evaluation of the total source sound power, for the location of regions of high noise radiation, measurement of sound transmission and sound absorption of materials. Consequently, it is a more specialised measurement technique than that of sound pressure. In this paper are presented the intensity technique, instrumentation, errors involved, standards and applications in building acoustics.

#### PALAVRAS-CHAVE

Intensidade sonora, ruído ambiental, acústica de edificações.

#### 1. GRANDEZAS ACÚSTICAS

O ruído é causado pela vibrações das moléculas do meio com velocidade "**u**"[m/s], através de compressões e rarefações, gerando variação de pressão total. Isto é a **Pressão Sonora "p"** [Pascal]. O número de ciclos por segundo das vibrações das moléculas é chamado "**Frequência**" em [Hz]. As ondas acústica propagam-se com velocidade de som "**c**"[m/s]. No ar, a velocidade de som é dada por:

$c \approx 331 + 0,6 t$ , onde  $t$  é a temperatura em °C, (para 20 °C temos  $c=343$  m/s).

Uma importante propriedade das fontes de ruído é a **Potência Sonora “W” [Watts]**. W é apenas dependente da própria fonte e independente do ambiente ou distância de medição. A **Intensidade Sonora “I” [watts/m<sup>2</sup>]** é definida como razão do fluxo de energia através de uma área unitária normal à direção de propagação. Os valores RMS das grandezas; P, W e I podem ser escritos em escala decibel, como **Nível de Pressão Sonora NPS**, **Nível de Potência Sonora NWS** e **Nível de Intensidade NI**, respectivamente;

$$NPS = 20 \log(P / 2.10^{-5})$$

$$NWS = 10 \log(W / 10^{-12})$$

$$NI = 10 \log(I / 10^{-12})$$

Somas e subtrações de NPS, NWS e NI devem ser feitas considerando-se os valores originais de  $p^2$ , W e I. Isto é, a soma de NPS=90 dB + NPS=90 dB é 93 dB e não 180 dB [Gerges, 1992].

## 2. IMPORTÂNCIA PRÁTICA DE SE MEDIR A INTENSIDADE SONORA

Muitas das quantidades que são especificadas por normas internacionais e nacionais que caracterizam as fontes sonoras, e sistemas de controle de ruído, são energéticas na natureza; por exemplo, a potência sonora, o coeficiente da transmissão sonora (perda da transmissão) e o coeficiente de absorção sonora.

Até bem pouco tempo, nunca fomos capazes de medir tais quantidades diretamente; ao invés disso, tivemos que medir a pressão sonora e daí calcular a intensidade sonora. Pelo fato dessas duas quantidades serem relacionadas apenas sob determinadas condições (ver Figura 1), foi necessário criar e utilizar instalações de testes caras e elaboradas para se implementar estas normas, tais como câmaras anecóicas, difusores incorporados em câmaras reverberantes e locais especiais para testes ao ar livre (ver Figura 2).

Não tem sido possível aplicar normas de potência sonora a muitos itens de máquinas e fábricas industriais, quer por serem eles muito grandes para serem colocados numa sala de teste, por não funcionarem em ambientes silenciosos e livres, quer por formarem uma parte integral de um sistema complexo e não poderem, desse modo, ser operados isoladamente fora deste sistema.

Atualmente é possível fazerem-se medições locais em quase todo item de uma fábrica, ou em edificações, no seu ambiente operacional, contanto que a intensidade externa gerada pela própria fonte e outras fontes presentes não variem muito durante o período de medição. As vantagens econômicas, técnicas e reguladoras deste desenvolvimento são realmente muito grandes : por exemplo, um fabricante, por exemplo de sistema de ar condicionado, pode agora usar seu painel de testes de produção para checar se a intensidade sonora radiada pelo produto está dentro dos padrões estipulados; ele não precisa construir, ou alugar uma instalação de testes especiais.

Uma outra vantagem associada é que a medição da intensidade sonora pode ser usada (por pessoal qualificado) para identificação e quantificação (ranking) das maiores zonas geradoras de ruído num sistema complexo; podem ocorrer, todavia, problemas de má interpretação quando a fonte transmite um ruído de banda estreita ou de tom puro, principalmente em ambiente fechado.

Quanto às investigações sobre as propriedades de transmissão de som de partições, é agora possível não apenas avaliar a perda de transmissão da estrutura completa, mas também determinar a eficácia relativa de diferentes regiões, de modo que a presença de partes fracas e pequenos vazamentos possam ser detectados. Por exemplo: quantificar o vazamento de ruído nas aberturas do divisor. A princípio, é também possível avaliarem-se caminhos de vazamentos (flanking) em edifícios, mas até agora poucas aplicações foram relatadas.

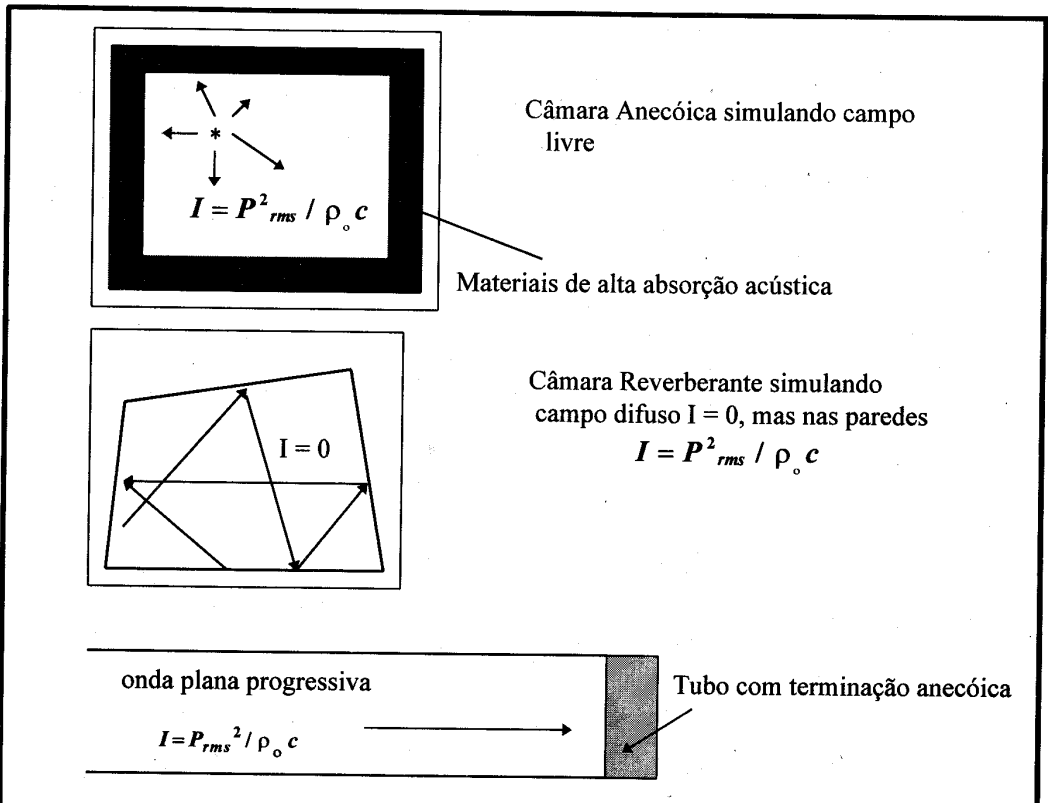


FIGURA 1. Condições sob as quais a intensidade está simplesmente relacionada à pressão

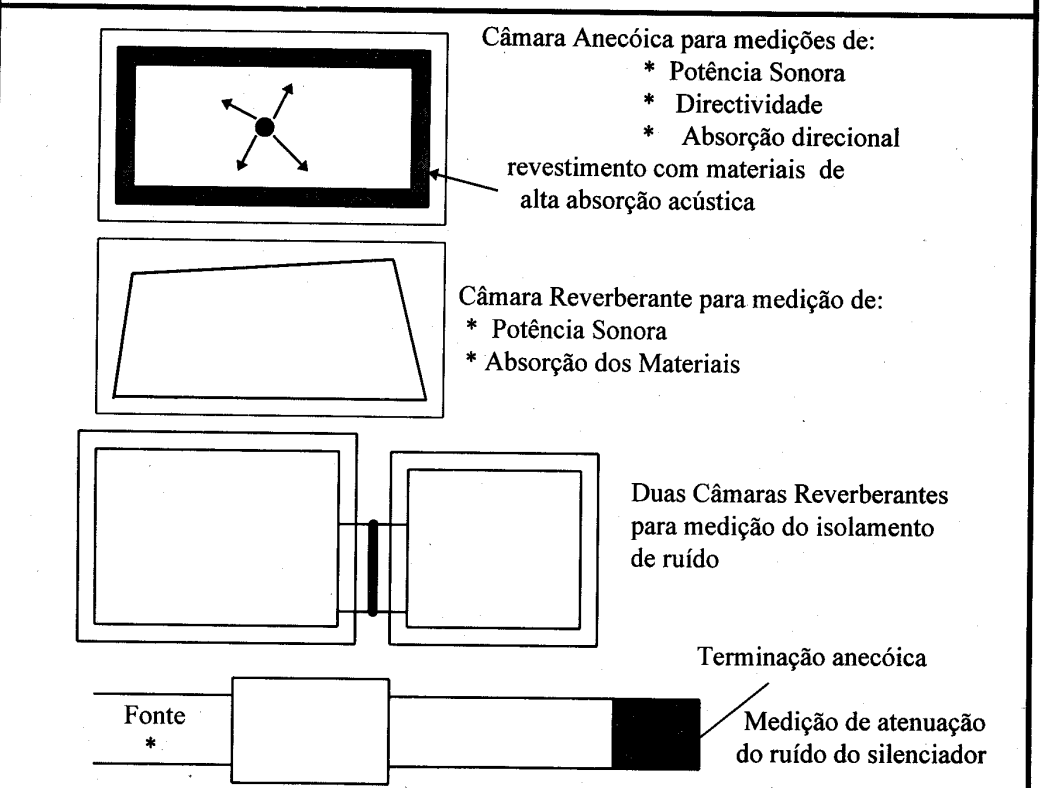


FIGURA 2. Testes especiais: Medições de pressão e estimativa de Intensidade e Potência

Em suma, está claro que o advento da medição da intensidade sonora como uma medição acústica rotineira traz importantes vantagens para o projetista, o fabricante, o fornecedor e para o cliente.

Um grande número de normas internacionais e nacionais, para a determinação da potência sonora usando a medição da intensidade sonora, já foram publicadas ou estão para serem publicadas, e uma norma internacional para instrumentos de medição de intensidade sonora já foi publicada (ver lista de referências).

### 3. PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO DA INTENSIDADE SONORA

É necessário gerar sinais proporcionais à velocidade da partícula acústica “u” e pressão acústica “p” em um ponto num fluido, normalmente ar ou água. A velocidade da partícula é obtida dos dois sinais de pressão [Gerges, 1992].

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho_0 \frac{\partial u_r}{\partial t}$$

onde r, refere-se aqui, a uma direção **arbitrária** no espaço, t é o tempo, e  $\rho_0$  é a densidade do meio. Produtos da integração de tempo fornece;

$$u_r = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt \quad \text{ou} \quad u_r \approx -\frac{1}{\rho_0} \frac{\int \Delta p}{\Delta r'} \Delta t$$

na qual existe uma diferença de pressão  $\Delta p$  entre pontos ao longo do eixo r, separado pela distância  $\Delta r$ . A diferença entre os dois sinais emitidos dos dois microfones nominais idênticos p1 e p2, cujos centros dos elementos sensores estão distanciados em  $\Delta r$ , pode ser eletricamente integrada para produzir um sinal proporcional à velocidade da partícula. Os sinais de pressão são somados para produzir uma **aproximação** duas vezes maior que a pressão normal.

Então:

$$p \approx \frac{p_1 + p_2}{2} \quad \text{e} \quad u_r \approx -\frac{1}{\Delta r \rho_0} \int_{-\infty}^t (p_2 - p_1) dt$$

então;

$$I_r(t) = p u_r \approx \frac{(p_1 + p_2)}{2 \rho_0 \Delta r} \int_{-\infty}^t [p_2 - p_1] dt$$

O equivalente no domínio de frequência é [Fahy, 1989]:

$$\bar{I}_r(\omega) \approx -\frac{\text{Im}\{G_{12}(i\omega)\}}{\rho_0 \omega \Delta r} \quad \text{ou} \quad \bar{I}_r(\omega) \approx \frac{\text{Re}\{G'_{12}(i\omega)\}}{\rho_0 \Delta r}$$

onde  $G_{12}$  é a densidade espectral cruzada de dois sinais de pressão.

e  $G'_{12}$  é a densidade espectral cruzada do sinal integrado no tempo do primeiro transdutor de pressão e o sinal não integrado, do segundo transdutor de pressão. A medida logarítmica de I é o nível de intensidade sonora, dada por:

$$L_I = 10 \log_{10} \left[ \frac{I}{I_{\text{ref}}} \right] \text{dB, onde a intensidade sonora de referência } I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$$

### 4. INTEGRAL NA SUPERFÍCIE DO COMPONENTE NORMAL DE INTENSIDADE

É claro que, pela própria definição de intensidade sonora, a integral sobre uma superfície de fonte estável contínua, do componente de intensidade **normal** à superfície, é equivalente à potência sonora gerada pela fonte, considerando que o volume fechado não contenha elemento absorvente (ver figura 3). Assim temos:

$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS = \int_S \bar{I}_n dS$$

A princípio, esta igualdade permite que a energia sonora de fontes específicas possa ser determinada mesmo na presença de outras fontes, uma vez que a integral exclui a energia produzida por outras fontes externas ao volume fechado. O mesmo princípio pode ser aplicado na determinação de potência sonora absorvida pelos corpos ou pelas superfícies (ver normas ISO 9614-1 e 9614-2).

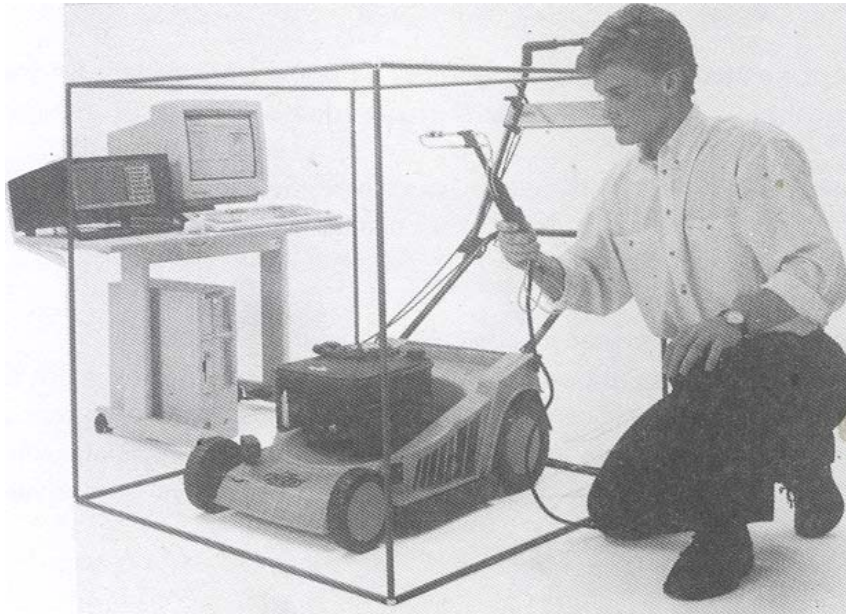


FIGURA 3. O Princípio da determinação de potência sonora

## 5. ERROS NAS MEDIÇÕES DE INTENSIDADE SONORA

As principais fontes de erros na medição da intensidade sonora num ponto fixo de um campo sonoro estacionado no tempo, usando-se dois microfones são:

(a) Erros de diferença finita e aproximação de soma. Estes são inerentes ao princípio da técnica. Este erro depende claramente da natureza do campo acústico e da separação dos microfones. Erros nas estimativas de intensidade para onda plana são mostrados na figura 4. O erro pode exceder em muito o valor das ondas planas para campo próximo de fonte complexa [Fahy, 1989] e [Gerges, 1983].

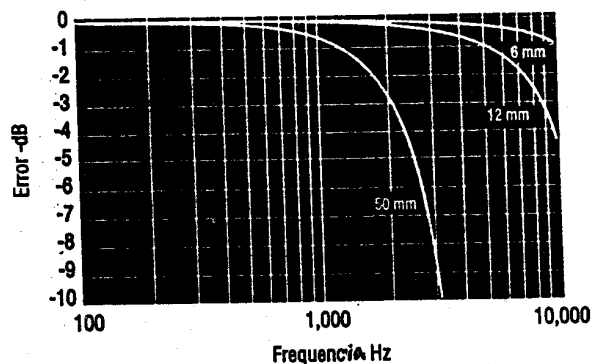


FIGURA 4. Erro de diferença finita para campo de onda plana

(b) Efeitos de difração dos microfones causando distorção do campo sonoro. Tal erro é minimizado pelos fabricantes, mas coloca um limite na frequência superior.

(c) Erros de diferença de fase entre os canais de medição (microfones, pre-amplificadores, analisador, etc.). Dois indicadores são envolvidos neste erro:

Indicador **Pressão-Intensidade  $\delta_{pi}$** , medido em campo sonoro arbitrário, dado por;

$$\delta_{pi} = L_p - L_{li} \quad \text{dB}$$

E indicador **Pressão-Intensidade Residual  $\delta_{pio}$** , para campo sonoro uniforme nos dois microfones, medido com calibrador de intensidade ( $I=0$ ) dado por;

$$\delta_{pio} = L_p - L_{lo} \quad \text{dB}$$

Então, a diferença entre  $\delta_{pio}$  e  $\delta_{pi}$  é a medida do erro de diferença de fase e é chamada "**L= Índice de Erro de Fase**", para erro normalizado de intensidade de  $\leq \pm 1$  dB,  $\delta_{pio} - \delta_{pi} \geq 7$  dB. E para  $\leq \pm 0,5$  dB,  $\delta_{pio} - \delta_{pi} \geq 10$  dB.

O efeito do mal casamento pode ser eliminado, efetivamente, tirando-se metade da diferença com a sonda em duas posições de 180 graus. Este processo de reversão manual não é satisfatório devido à necessidade de precisão.

(d) Erros de estimativa de espectro, devido a uma inadequada média temporal.

Este erro é relacionado ao número de amostras utilizado para cálculo de média nas estimativas de espectro cruzado do analisador FFT. Geralmente, os maiores erros aleatórios acontecem para uma fonte de banda estreita em ambiente reverberante na presença de outras fontes não correlatas. Nestes casos, um tempo de média de até um minuto é necessário para reduzir os erros aleatórios a valores aceitáveis.

## 6. CALIBRAÇÃO DA SONDA

Os dois microfones da sonda devem ser calibrados individualmente com calibrador ("pistonphone"). Há norma IEC 1043 para calibração dos microfones condensadores para fabricantes e usuários. A calibração da sonda é feita por "Calibrador de Intensidade Sonora", por exemplo Brüel&Kjaer 3541 (ver figura 5), onde os microfones são submetidos à mesma pressão, neste caso a velocidade da partícula e a intensidade devem ser zero. A diferença de fase pode então ser medida.

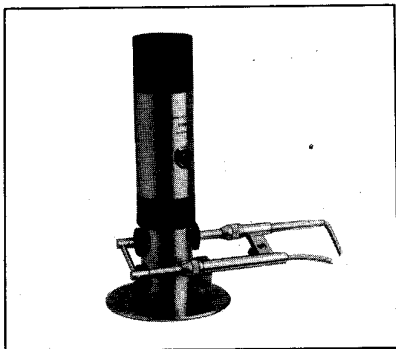


FIGURA 5. Calibrador de intensidade sonora Brüel & Kjaer 3541

## 7. QUALIDADE DE INSTRUMENTAÇÃO

O índice  $\delta_{pio}$  é uma medida de diferença de fase de instrumentação, enquanto a verdadeira diferença de fase do campo sonoro medido deve exceder em muito este valor. O índice de Erro da Fase ( $L = \delta_{pio} - \delta_{pi}$ ) deve ser maior do que 7 dB para 95% de confiança com um intervalo de  $\pm 1$  dB, e maior do que 10 dB para  $\pm 0,5$  dB.

Na prática,  $\delta_{pi}$  é medido numa base global (média de amostragem) para obtenção de L. Notar que  $\delta_{pio}$  e portanto L são dependentes de frequência. Normalmente  $\delta_{pio}$  tem valor máximo na metade da banda de frequência, como está mostrado na figura 6 (Na norma ISO CD 9614-2,  $\delta_{pi}$  é chamado Fpi).

O cruzamento dos  $\delta_{pio}$  (medido com calibrador) e  $\delta_{pi}$  (medido no campo em questão) na frequência, fornece a banda de frequência válida (ver figura 6).

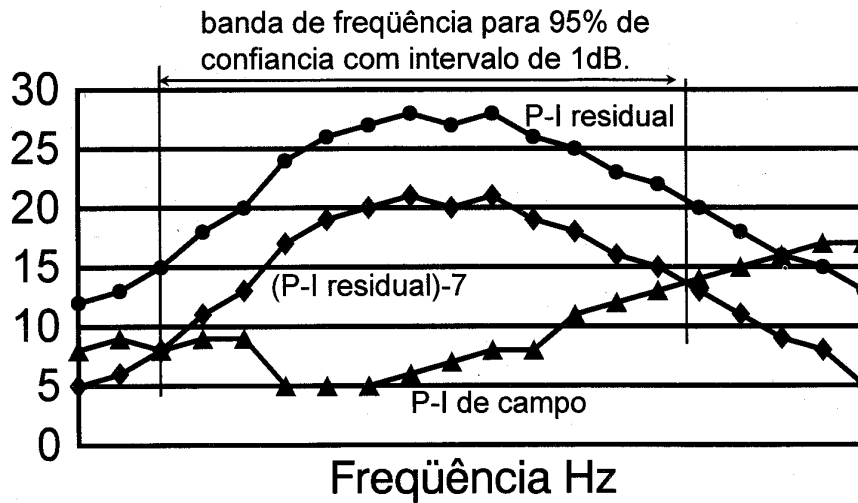


FIGURA 6. A capacidade dinâmica de instrumentação.

## 8. INSTRUMENTAÇÕES PARA MEDIÇÃO DE INTENSIDADE SONORA

A instrumentação para a medição da intensidade sonora atualmente se enquadra em três categorias : cada uma pode ser usada para processar sinais de sonda de dois microfones, ou de uma sonda de um microfone e um sensor de velocidade de partícula diretamente. As três categorias são:

- 1- Instrumentos analógicos; como por exemplo B&K 4344;
- 2- Instrumentos de filtros digitais; como por exemplo B&K 2133
- 3- Analisadores FFT de dois canais; como por exemplo B&K 2144.

## 9. APLICAÇÕES

A figura 7 mostra várias aplicações da medição da intensidade sonora tais como:

- 9.1- determinação da potência sonora de fontes em ambientes arbitrários;
- 9.2- determinação de isolamento acústico de partições;
- 9.3- determinação da absorção sonora;
- 9.4- determinação da perda de transmissão do silenciador, absorção e impedância dos materiais sonora em dutos;
- 9.5- localização e quantificação das fontes de ruído.

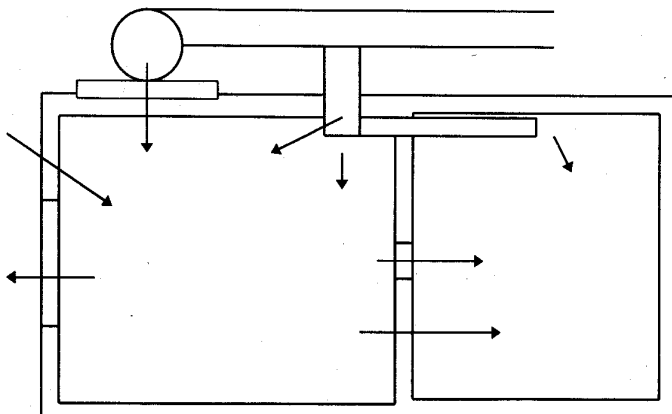


FIGURA 7. Aplicações da medição da intensidade sonora.

## 9.1 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA DE FONTES EM AMBIENTES ARBITRÁRIOS

A equação mostrada na seção 4. indica que a potência sonora gerada por uma fonte sonora contínua e estável, ou parte dela, pode, a princípio, ser determinada integrando-se o componente normal da intensidade por uma superfície que encerre completamente a região da fonte. Na prática, a integral é substituído por um somatório sobre um número de pontos de medida discretos, cada um associado a uma porção da superfície escolhida, ou por uma série de "sweeps" sobre porções contíguas daquela superfície (método de varredura); durante uma varredura o sistema de medição da intensidade realiza um processo de integração no tempo (espaço). A fonte é definida pela superfície de medição (Figura 8).

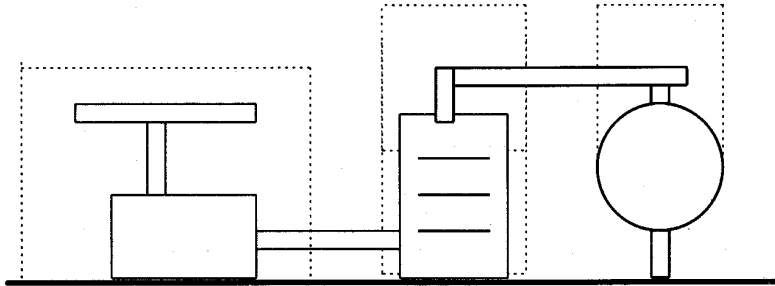


FIGURA 8: A superfície de medição de potência sonora para cada fonte (linha traçada).

A princípio, tais procedimentos produzem uma estimativa de potência radiada que independe das propriedades acústicas do ambiente da fonte, e exclui a influência de fontes de ruído externas que operam por fora do volume circunscrito pela superfície escolhida (ruído de fundo). Na prática, a precisão de uma determinação da potência sonora de uma fonte depende dos seguintes fatores:

- (i) O processo de amostragem de campo de intensidade normal (i.e. a escolha da superfície de medição, distribuição de pontos de medição ou processo de varredura).
- (ii) Qualidade do instrumento em relação à natureza de campo de intensidade e orientação da sonda (capabilidade dinâmica ver seção 7).
- (iii) Natureza, nível e estabilidade da intensidade na superfície de medição gerada por fontes que estão fora desta superfície (fontes externas ou ruídos de fundo).
- (iv) Quantidade de absorção sonora dentro da superfície de medição junto com o nível de potência sonora externa passando para dentro do volume de medição.

Estes fatores são tratados em detalhe no "Internacional Standard ISO 9614 - Acoustics": Determinação dos níveis de potência sonora de fontes usando-se medidas da intensidade sonora : Parte I - Medições em pontos discretos. Um esboço para uma norma de varredura (scanning) CD 9614-2 foi distribuído para membros da ISO para comentários.

Uma superfície inicial de medição a uma distância média da superfície da fonte de não menos do que 200mm é geralmente usada e definida ao redor da fonte.

## 9.2 DETERMINAÇÃO DE ISOLAMENTO ACÚSTICO DE PARTIÇÕES

A figura 9 mostra os dois princípios de medição de transmissão; método clássico usando duas câmaras reverberantes (norma ISO 140/IV) e com técnica de intensidade.





Figura 9: Medição de transmissão; método clássico com duas câmaras reverberantes e com técnica de intensidade

A determinação da potência sonora transmitida através de partições em ambientes fechados não é, em princípio, diferente daquela de se determinar a potência sonora de qualquer fonte; neste caso a superfície vibrante que irradia no espaço receptor é a fonte. Não é suficiente que simplesmente se escolha a intensidade normal num plano paralelo à superfície da fonte, os lados da caixa devem também ser incluídos na superfície de medição (e amostragem).

Na sala receptora o Índice Pressão Intensidade  $\delta p_i$  é dado por [Fahy, 1989];  
 $\langle \delta p_i \rangle \approx 10 \log \{4/3 \alpha\}$  dB

onde  $\alpha$  é o coeficiente de absorção média das paredes da sala receptora. A fim de limitar  $\langle \delta p_i \rangle$  a valores menores de 10,  $\alpha$  deve ser maior que 0,13. Então deve-se adicionar materiais absorventes na sala receptora para aumentar a confiabilidade das medições.

Infelizmente não é possível avaliar-se a intensidade incidente sobre uma partição porque o instrumento mede a intensidade total (incidente menos refletida). A principal vantagem do uso da intensidade sonora sobre um método convencional é que a distribuição de energia transmitida sobre uma partição não uniforme pode ser determinada: daí vazamentos sonoros podem ser revelados. Na realidade, a determinação quantitativa de potência sonora transmitida através de uma fenda ou um buraco pequeno é difícil, porque os gradientes espaciais de intensidade normal são grandes.

Aqueles que tentarem usar medição de intensidade para detectar trajetória de transmissão “flanking” devem saber que a interferência entre campos incidentes e refletidos produz um fluxo de energia circulatório numa sala, e que a linhas de fluxo fazem uma curva muito fechada perto de uma superfície rígida, dando a impressão de absorção por aquela superfície ou de radiação da mesma (ver figura 10). Apenas amostragem espacial mostra a não existência de fluxo de energia

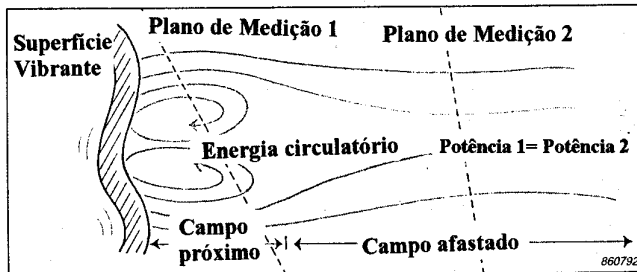


Figura 10: Fluxo de energia sonora circulatório

Medições feitas no campo por [ Torben, 1986] são mostradas na figura 11. O índice de redução de ruído  $R$  medido em duas câmaras reverberantes com a norma ISO 140/IV é muito próximo ao valor medido com a técnica de intensidade. Além disso, a técnica de intensidade fornece a contribuição de cada parcela de transmissão, isto é a transmissão direta da partição e as duas transmissões através das paredes laterais (“flanking”).

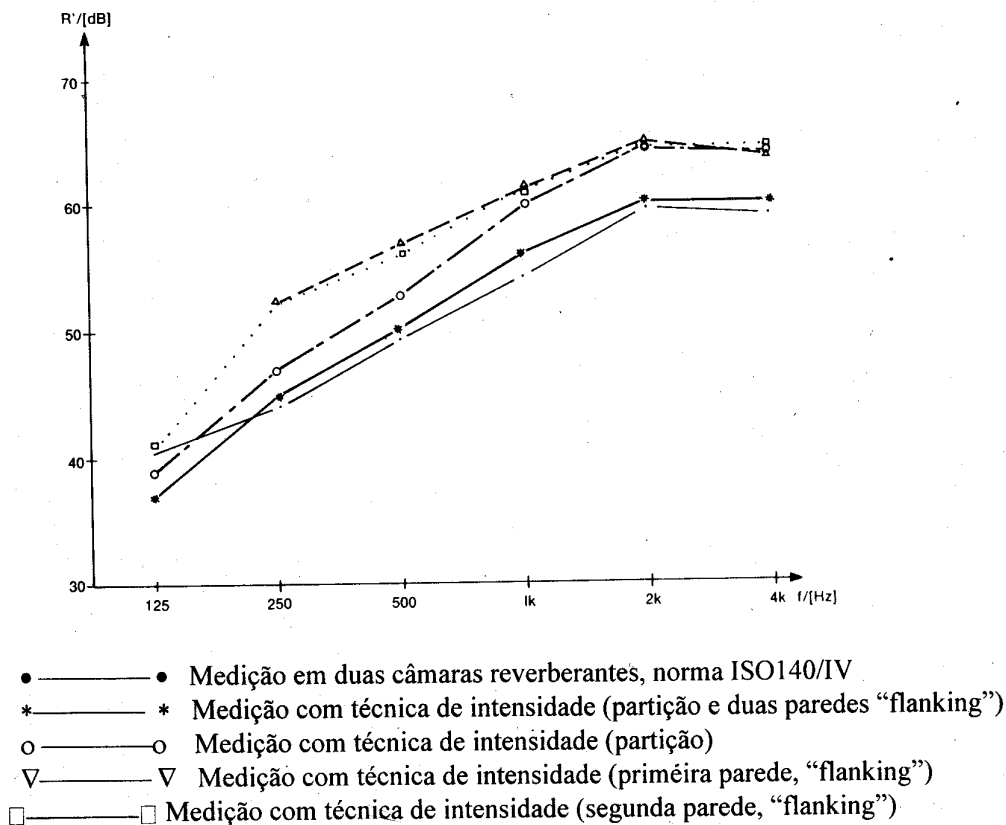


Figura 11: Resultados de medição com técnica clássica e intensidade [Torben, 1986].

### 9.3 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA

Antes do desenvolvimento dos sistemas de medição de intensidade sonora, era impossível avaliar com precisão absorção de cada elemento no ambiente, porque o valor do tempo de reverberação é determinada pela total absorção presente no ambiente. A princípio, a equação da seção 4 pode ser aplicada tanto para a determinação de energia absorvida como de energia irradiada; a superfície de medição é especificada de modo a incluir completamente a superfície absorvente.

A medição do coeficiente de absorção dos materiais em câmara reverberante é feito através de caimento do nível de pressão sonora (tempo de reverberação). A figura 12 mostra um set-up para medição do coeficiente de absorção usando a técnica de intensidade. A intensidade sonora incidente numa superfície de material dentro da câmara (campo sonoro difuso), pode ser medido através da média espacial de pressão sonora, é dado por;

$$I_i = P^2_{rms} / \rho_0 c$$

A intensidade absorvida pelo material ( $I_a$ ), que é a diferença entre a intensidade incidente ( $I_i$ ) e a intensidade refletida ( $I_r$ ), pode ser medida com medidor de intensidade fazendo-se média espacial acima da superfície do material ( $I_a$ ). Então o coeficiente de absorção é dado por:

$$\alpha = I_a / I_i$$

Resultados obtidos por [Mahabir, 1985] mostram uma boa coerência entre os valores obtidos por técnica de intensidade e o método clássico, dentro uma faixa de frequências de 400 Hz a 4KHz.

Entretanto, a técnica pode ser de grande valia na localização de regiões de alta absorção, como nos estúdios de gravação e transmissão, e em auditórios. É particularmente poderosa para detecção os mecanismos de absorção do ressonador de Helmholtz.

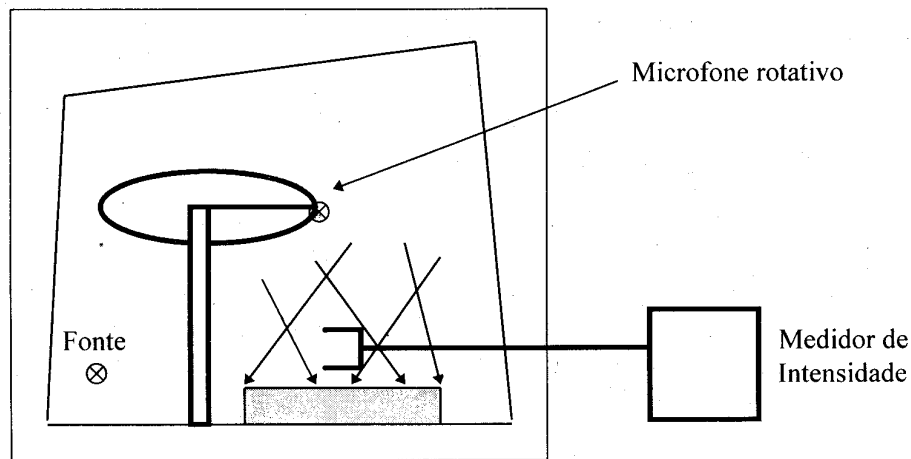


Figura 12 Medição do coeficiente de absorção com medidor de intensidade

#### 9.4 DETERMINAÇÃO DA PT DO SILENCIADOR, ABSORÇÃO e IMPEDÂNCIA EM DUTOS

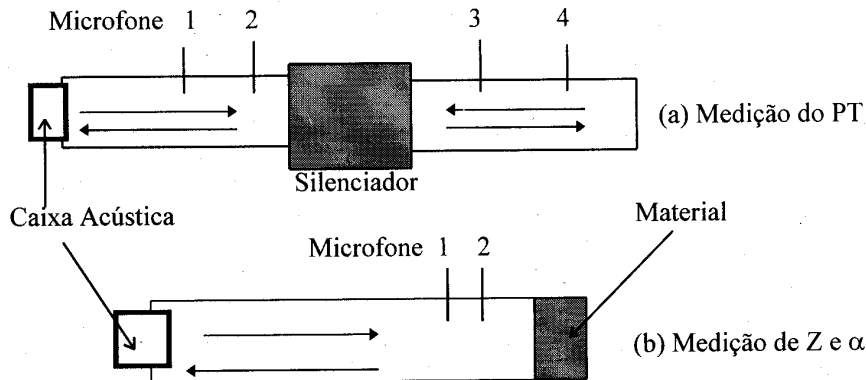


Figura 13: Medição de (a) perda de transmissão, (b) impedância e coeficiente de absorção usando técnica de dois posições de microfones antes e depois com analisador FFT de dois canais.

Abaixo da frequência de corte do duto, existem apenas ondas planas, incidente e refletida. O uso de quatro microfones, dois antes e outros dois após o silenciador (ver figura 13a) permite a medição da perda de transmissão PT [Marcio, 1994];

$$PT = 20 \log \left| \frac{e^{iks} - H_{12}}{e^{iks} - H_{34}} \right| + 10 \log \left| \frac{S_{aa}}{S_{dd}} \right| + 10 \log \left| \frac{A_a}{A_d} \right|$$

onde:

$H_{12}$  e  $H_{34}$  são as funções de transferência medidas nas posições (1,2) e (3,4) respectivamente;

$k$  é o número da onda;

$s$  é a distância entre os dois microfones;

$S_{aa}$  e  $S_{dd}$  são os autoespectros antes e depois do silenciador respectivamente;

$A_a$  e  $A_d$  são as áreas dos dutos antes e depois do silenciador respectivamente.

Também é possível realizar medições de coeficiente de absorção  $\alpha$  e a impedância acústica  $Z$  dos materiais (ver figura 13b) através dos dois sinais dos microfones [ISO/TC 43/SC 2/WG 14];

$$\alpha = 1 - \left| \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}} \right|$$

$$Z = \frac{1 + R}{1 - R}$$

onde:

$$R = \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}} e^{2ikx}$$

$x$  é a distância entre o material e o primeiro microfone.

A faixa de frequências para a qual a técnica dos dois microfones fornece resultados satisfatórios é dada por  $0,1 c/2s \leq f \leq 0,8 c/2s$ , onde  $c$  é a velocidade de som.

## 9.5 LOCALIZAÇÃO E QANTIFICAÇÃO DAS FONTES DE RUÍDO

Nos primórdios do desenvolvimento da medição da intensidade sonora, pensava-se que o seu uso resolveria o problema de "localização da fonte". A experiência subsequente modificou um pouco esta expectativa, primeiramente porque a complexidade de distribuição de fontes de ruído e de seus campos próximos foi claramente revelada pela nova técnica. A principal dificuldade é que a proporção da intensidade do campo adjacente de superfícies vibrantes não propaga; "escapa" para o campo distante e conseqüentemente não indica a presença de uma "fonte" (fig.14). A extrapolação de vetores de intensidade de campo distante de volta à "fonte" não é necessariamente válida, porque os caminhos do fluxo de energia muitas vezes fazem uma curva ao emergirem do campo adjacente, e em locais refletidos. Quando é necessária a direção do caminho do fluxo local, a sonda deve ser girada ao redor de dois eixos octogonais até que o zero que divide as indicações de intensidade positiva e negativa seja localizado. O vetor de intensidade local é então perpendicular ao eixo da sonda. Sondas de intensidade de eixos múltiplos foram desenvolvidas recentemente; elas permitem determinar diretamente a direção do vetor de intensidade.

A figura 14 mostra a distribuição dos vetores de intensidade medidos em um ônibus. O mapa de intensidade mostra claramente que a maior fonte de ruído é na banda de 250 Hz e não 125 Hz [Oshino,1987].

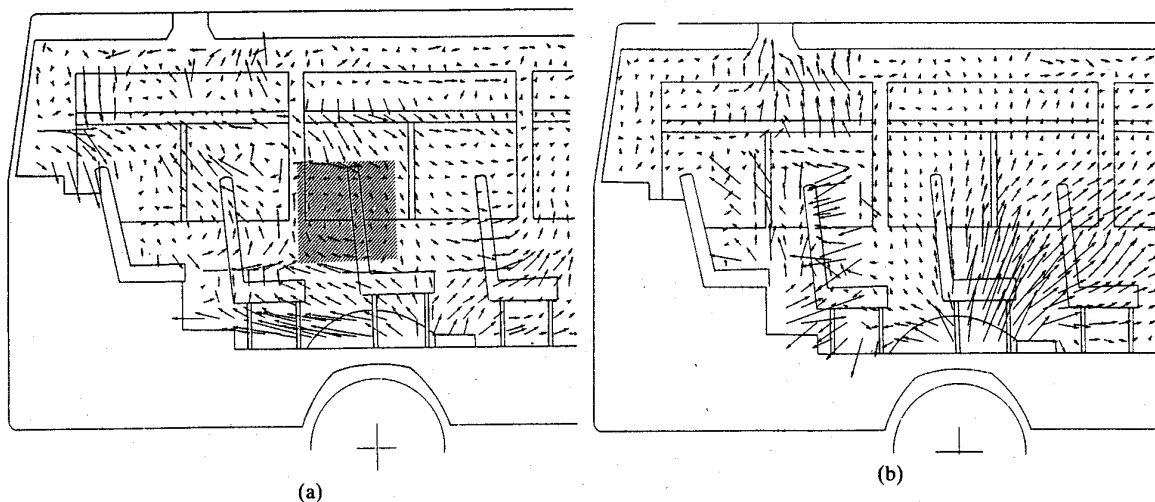


FIGURA 14: Distribuição dos vetores de intensidade medidos dentro de um ônibus nas bandas de frequências de 1/3 de oitava (a) 125 Hz e (b) 250 Hz.

## 10. CONCLUSÃO

A medição da intensidade sonora fornece ao engenheiro acústico uma importante ferramenta para uma avaliação total da potência sonora da fonte, mesmo em ambientes adversos, e, até certo ponto, para a localização de regiões de irradiação principal. É uma técnica que requer que o usuário entenda as diferenças básicas entre potência sonora e pressão sonora, e as condições sob as quais elas podem ser relacionadas quantitativamente. Assim, é também necessário que se tenha um conhecimento da

física dos campos de som. Conseqüentemente, é uma técnica de medição mais especializada do que a da pressão do som, e os operadores, por causa disto, devem ser mais bem treinados, para que se evitem experiências decepcionantes e desalentadoras. Os métodos padrões de medição foram elaborados para minimizar as chances de erro e, em princípio, exigem apenas um bom conhecimento técnico e alguma prática. Junto com o bom senso, é aconselhável sempre se empregar pessoal bem treinado para realizar as medições padronizadas.

## 10. REFERÊNCIAS

**ANDRADE E.B.** Desenvolvimento de Medidor de Intensidade Acústica com Aplicações. M.Sc. dissertação. UFSC, Orientador Prof. Samir N.Y. Gerges, 1985.

**FAHY F.J.** Sound Intensity, Elsevier Science Publishers Ltd. London, 1989.

**FAHY F. J.** Sound Intensity, course notes, 1994.

**GERGES, SAMIR N.Y.** Ruído: Fundamentos e Controle. Livro de 600 paginas. UFSC, 1992.

**GERGES, SAMIR N.Y.** Inherent Errors in Acoustic Intensity Measurements for Piston Type Sources, July 1983, Edinburgh, Inglaterra, Inter-Noise 1983.

**ISO 9614-1** Acoustics: Determination of the sound power levels of sources using sound intensity measurements: Part I- Measurements at discrete points.

**ISO CD 9614-2,** Acoustics: Determination of the sound power levels of sources using sound intensity measurements: Part II- Measurements by scanning.

**ISO/TC 43/SC 2/WG 14** Acoustics: Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer - Function Method

**IEC 1043,** Instruments for the measurements of sound intensity

**Mahabir S. Atwal and Malcolm J. Crocker.** Measurements of the absorption coefficient of acoustical materials using the sound intensity method. II International Congress on Acoustic Intensity. CETIM, pp485-490. 1985.

**Márcio R.M. Kimura, Cristiano Valber e Samir N.Y. Gerges.** Ensaio e simulação acústica de escapamento Veicular. SAE 1994, Paper 942415P.

**Oshino, Y. & Aria T.** Sound intensity in the near field of sources. Proceeding of the symposium on acoustic intensity, Tokyo, pp46-56, 1987.

**TORBEN G. NIELSEN,** Sound insulation measurement using intensity, TR no. 4, Brüel & Kjaer, 1986.