



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

UM MÉTODO ALTERNATIVO PARA MEDIÇÃO INDIRETA DA POTÊNCIA SONORA TRANSMITIDA POR UMA PAREDE EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

Elisabeth de A. C. Duarte (1); Andy Moorhouse (2); Elvira B. Viveiros (3)

(1) Universidade Federal de Alagoas – curso de Arquitetura e Urbanismo, eacduarte@yahoo.com.br

(2) University of Salford - Acoustics, Audio and Video Engineering, A.T.Moorhouse@salford.ac.uk

(3) Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental, elvira@arq.ufsc.br
Caixa Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-5184

RESUMO

Nos últimos anos, tem-se percebido uma preocupação especial quanto ao isolamento sonoro em baixas frequências em edificações devido ao aumento da quantidade de fontes sonoras em diversas escalas do ambiente construído, seja nas residências, indústrias ou no meio urbano. A relevância do estudo do isolamento sonoro em baixas frequências se justifica pela sua eficiência de propagação, pois esse som percorre grandes distâncias com baixa perda de energia além da pobre atenuação pelos componentes da edificação, como paredes, pisos e forros nessa região do espectro. O procedimento normatizado para medição de isolamento sonoro (ISO 140) apresenta várias deficiências quando se trata de medições em baixas frequências e em ambientes pequenos. Uma delas é a determinação da área de absorção da sala, que requer medições de tempo de reverberação. No entanto, isso é quase impossível em salas pequenas e em baixas frequências, devido às características modais do ambiente. O objetivo do trabalho é desenvolver um método alternativo de medição de isolamento sonoro que atenda à região de baixas frequências. Como método de validação aplicado nesse trabalho, foram realizadas simulações dos modelos teóricos através do software *Matlab*®. Foram conseguidos bons resultados nas validações numéricas, com diferenças de 1-2dB da potência sonora de referência, o que permite a conclusão que o método pode servir como um complemento para a norma ISO 140 para medições em baixas frequências.

Palavras-chave: isolamento sonoro, baixa frequência, potência sonora

ABSTRACT

In recent times, there is an increasing concern about sound insulation in low frequencies in buildings due to the increasing number of sources in many scales of construction, like dwellings, industries and urban centres. The relevance of studies in low frequency can be justified by the efficiency of its propagation as it travels long distances with small loss of energy and also because of the poor sound insulation performance of building elements as walls, floors and ceilings in this frequency range. The current standard for measurement of sound insulation (ISO140) has lots of impediments when low frequency measurements and small rooms are considered. One of these is that the standard requires the receiver room absorption area to be evaluated, for which reverberation time measurements are recommended. However, at low frequencies in small rooms, such measurement is almost impossible because of the modal characteristics of the space. The aim of this research is to develop an alternative to sound insulation measurements to cover the low frequency region. The applied method to validate the theory proposed in this paper was computer simulations of the theoretical model processed by *Matlab*®. Good agreement in numerical validation was achieved, with differences of 1-2dB of the reference power, which permit the conclusion that this method can be a suitable complement to ISO 140 to measurements in low frequencies.

Keywords: sound insulation, low frequency, sound power

1. INTRODUÇÃO

A região de baixas frequências é tema de estudos em diversas áreas da acústica, no entanto, nos últimos anos, tem-se percebido uma preocupação especial quanto ao isolamento acústico em edificações devido ao aumento da quantidade de fontes sonoras em diversas escalas do ambiente construído, seja nas residências, indústrias ou no meio urbano. As partes que compõem a residência, como paredes, pisos e forros, também apresentam pobre atenuação no isolamento sonoro em baixas frequências, principalmente com a construção de partições cada vez mais leves (BENGTSSON, 2004; BERGLUND, 1996). Duarte e Viveiros (2007) discutem sobre a degradação do isolamento sonoro das paredes de edificação da arquitetura brasileira ao longo da história. À medida que o ruído nas cidades aumentou consideravelmente, as casas são construídas com partições mais permeáveis ao ruído.

A relevância do estudo em baixas frequências também se justifica pela sua eficiência de propagação, pois o som nesta faixa de frequência, que percorre grandes distâncias com baixa perda de energia. Quanto mais baixa a frequência, maior sua eficiência de propagação. Para ilustrar o fenômeno, Berglund (1996) mostra que uma onda sonora de 0,1 Hz irá perder apenas 5% de sua energia em uma viagem ao redor da Terra.

Entre as principais fontes de ruído em baixas frequências em residências, estão os sistemas de *home theatres* e aparelhos de som amplificado, além de grande parte dos eletrodomésticos (PAPADOUPOLOS, 2001; MALUSKI, 2000). Em um levantamento feito na Inglaterra sobre as principais reclamações de moradores, a música amplificada é o tipo de ruído mais comum durante a noite, sendo a responsável pelo maior número de reclamações no período entre as 18 horas e 3 horas da manhã (LING, 1999).

Mesmo sendo um problema que incomoda a muitos, o ruído não é, na maioria das vezes, um parâmetro priorizado na hora de investir na compra de um imóvel. Muitas vezes, isso pode ser justificado pela falta aplicação dos conceitos de isolamento sonoro nas construções, mas também porque o isolamento sonoro não é uma característica visível, visto que é resultado da eficiência dos componentes da edificação. Nesse caso, um respaldo técnico para a avaliação do espaço é de extrema importância. Como afirmam Polli e Viveiros (2007), o isolamento sonoro, por ser um atributo invisível, só passa a ser valorizado após a compra do imóvel e não antes. No entanto, posteriormente, é um dos atributos mais requisitados pelo usuário. Em uma pesquisa na Alemanha, Kuerer (1997) aplicou um questionário onde enumerou 13 possibilidades de investir financeiramente para construir uma nova casa. O isolamento sonoro foi a última opção considerada pela população. No entanto, o mesmo autor percebeu que em avaliações pós-ocupação, o ruído é o principal motivo encontrado para se reclamar da vizinhança.

Em ambientes de trabalho, principalmente em indústrias, as baixas frequências também estão presentes e se destacam como fontes com maior concentração de energia sonora. Entre os principais exemplos, têm-se: sistemas de ventilação, aquecimento e ar-condicionado, instalações de computadores, bombas de ar, máquinas a diesel e compressores (BENGTSSON, 2004; WAYE, 2002). O ruído em ambientes de trabalho é perigoso, pois pode prejudicar a comunicação entre as pessoas e as atividades de precisão, podendo causar sérios acidentes. BENGTSSON (2002) comprovou que o ruído em baixas frequências é mais difícil de ignorar ou de se habituar se comparados com outros tipos de ruídos. O mesmo autor, em outro trabalho (BENGTSSON, 2004), identificou que as baixas frequências prejudicam a execução de duas atividades que exigem maior concentração, reduzindo principalmente a atenção na leitura.

Entre os principais requisitos para promover um bom isolamento sonoro de um ambiente, destacam-se os métodos que quantificam adequadamente o seu desempenho. No entanto, por vários motivos (HOPKINS, 2005; MALUSKI, 2004; BRAVO, 2004; OSIPOV, 1997), a medição do isolamento sonoro em baixas frequências está associada a um alto grau de incerteza e variância. A pobre reprodutibilidade e repetitividade das medições de isolamento sonoro em baixas frequências pode se tornar um obstáculo para se conseguir um melhor controle de qualidade. As normas atuais de isolamento sonoro (ISO140-3/4) requerem medições que exigem a medição do tempo de reverberação da sala receptora, no entanto, para salas pequenas esse procedimento pode ser um problema devido às características modais do espaço, já que toda a teoria do tempo de reverberação é adequada para salas que apresentam um campo sonoro difuso. Com ambientes cada vez menores, é mais comum encontrar salas com volume, muitas vezes, menor que 20m³, o que torna quase impossível aplicar a atual norma de medição de isolamento sonoro. Este trabalho propõe um método alternativo para medições de baixa frequência a fim de melhorar a acuracidade de medições de isolamento sonoro. O método pode ser aplicado como um complemento para as normas em isolamento sonoro para a região de baixas frequências, já que o conjunto de normas para medição de isolamento sonoro, ISO 140, apresenta problemas de medição em baixa frequência que ainda não se encontram totalmente resolvidos.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é desenvolver um método alternativo de medição de isolamento sonoro que atenda à região de baixas frequências através da obtenção indireta da potência sonora transmitida em uma sala por uma parede vibrante, evitando, dessa forma, a medição do tempo de reverberação.

3. MÉTODO

Sabe-se que o coeficiente de transmissão sonora de uma partição é a razão entre a potência transmitida e a incidente. O objetivo da medição de isolamento sonoro é obter o Índice de Redução Sonora (do inglês, *Sound Reduction Index, SRI*) de uma partição. Considerando-se a relação entre potências transmitida (W_t) e incidente (W_i), a expressão do índice de redução sonora pode ser expressa matematicamente por:

$$R = 10 \log \frac{W_i}{W_t} \text{ dB} \quad \text{Equação 1}$$

Na teoria clássica para campo difuso, as potências incidente e transmitida não são alcançadas diretamente. A ISO 140 propõe uma forma de consegui-las implicitamente, pois a potência sonora está relacionada aos níveis de pressão sonora na sala emissora e na sala receptora e à área de absorção para a sala receptora. É a potência transmitida que requer a área de absorção, o que demanda a medição do tempo de reverberação, o que é problemático na região de baixas frequências, já que a teoria de cálculo de baseia na premissa de existir um campo difuso. Para campo difuso, a equação utilizada pela ISO 140 é:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \text{ dB} \quad \text{Equação 2}$$

onde L_1 e L_2 são a média do nível de pressão sonora na sala emissora e receptora respectivamente, S é a área da partição analisada em metros quadrados, A é a absorção sonora equivalente na sala receptora em metros quadrados. A absorção equivalente A é geralmente avaliada pela medição do tempo de reverberação. O foco desse trabalho é buscar uma forma de se medir a potência sonora transmitida da sala sem o conhecimento do tempo de reverberação.

O Método do Envelope, nome dado ao método proposto, é apresentado em seguida e pretende simplificar a medição do isolamento sonoro propondo uma forma de não medir o tempo de reverberação e obter a potência sonora incidente, W_i .

2.2. O Método do Envelope

Esse estudo vem da pesquisa de Pinnington (1986) que propôs obter a potência sonora a partir de dois pontos em placas. Entretanto, Moorhouse (2008) sugere que essa mesma teoria pode ser adaptada para volumes maiores, contanto que apresente um sistema de soma de modos normais. Nesse caso, a teoria foi aplicada para a escala arquitetônica.

A potência sonora transmitida em uma sala por uma fonte pontual em uma parede é dada por:

$$W(\omega) = \Re(p(\omega)^* Q(\omega)) \quad \text{Equação 3}$$

onde p é a pressão sonora no ponto de excitação [Pa] e Q , a velocidade de volume da fonte [m^3/s]. A pressão sonora dissipada no ambiente pode ser expressa pela soma modal:

$$p = iQ\omega\rho c^2 \sum \frac{\varphi_n(r)\varphi_n(r_0)}{(\omega^2 - \bar{\omega}_n^2)K_n} \quad \text{Equação 4}$$

onde ρ_o é a densidade do ar (kg/m^3), ω é a frequência (rad/s), φ_n são as formas dos modos, $r = (x, y, z)$ é uma posição arbitrária na sala e r_o é a posição da fonte. No denominador, $\bar{\omega}_n$ e ω são as frequências dos modos (complexas quando o amortecimento é considerado) e a frequência de excitação respectivamente.

$K_n = \int_V \varphi_n^2 dV$ é o fator de normalização. Com a introdução do fator de perda η , tem-se:

$$\bar{\omega}_n^2 = \omega_n^2(1 + j\eta)$$

Equação 5

Substituindo na Equação 4:

$$p = jQ\omega\rho c^2 \sum \frac{\varphi_n(r)\varphi_n(r_0)}{(\omega^2 - \omega_n^2 + j\eta\omega_n^2)K_n}$$

Equação 6

$$p = Q\omega\rho c^2 \sum \frac{\varphi_n(r)\varphi_n(r_0)[\eta\omega_n^2 + j(\omega^2 - \omega_n^2)]}{\left[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + \eta^2\omega_n^4\right]K_n}$$

Equação 7

Substitui-se agora o valor de p no ponto de excitação na Equação 3:

$$W = \omega\rho c^2 |Q|^2 \Re \left(\sum \frac{\varphi_n^2(r_0)[\eta\omega_n^2 + j(\omega^2 - \omega_n^2)]}{\left[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + \eta^2\omega_n^4\right]K_n} \right)$$

Equação 8

Chega-se, então à expressão da potência transmitida em uma sala:

$$W = \omega\rho c^2 |Q|^2 \sum \frac{\varphi_n^2(r_0)\eta\omega_n^2}{\left[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + \eta^2\omega_n^4\right]K_n}$$

Equação 9

Se um único modo domina, então um único termo da série é suficiente:

$$W = \omega\rho c^2 |Q|^2 \frac{\varphi_n^2(r_0)\eta\omega_n^2}{\left[(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + \eta^2\omega_n^4\right]K_n}$$

Equação 10

2.2.1. Correlação cruzada da pressão sonora

Na posição j , a pressão sonora pode ser dada por:

$$p_j = jQ\omega\rho c^2 \sum \frac{\varphi_n(r_i)\varphi_n(r_0)}{(\omega^2 - \omega_n^2 + j\eta\omega_n^2)K_n}$$

Equação 11

Uma equação similar pode ser aplicada na posição k . Logo, obtem-se a correlação cruzada:

$$G_{jk} = p_j^* p_k = |Q|^2 \omega^2 \rho^2 c^4 \left(\sum \frac{\varphi_n(r_i)\varphi_n(r_0)}{(\omega^2 - \omega_n^2 + j\eta\omega_n^2)K_n} \right)^* \left(\sum \frac{\varphi_n(r_k)\varphi_n(r_0)}{(\omega^2 - \omega_n^2 + j\eta\omega_n^2)K_n} \right)$$

Equação 12

Se um único modo domina, então um único termo da série é suficiente para descrever a soma.

$$G_{jk} = |Q|^2 \omega^2 \rho^2 c^4 \frac{\varphi_n(r_i)\varphi_n(r_k)\varphi_n^2(r_0)}{\left((\omega^2 - \omega_n^2)^2 + \eta^2\omega_n^4\right)K_n^2}$$

Equação 13

2.2.2. Envelope da impedância de transferência

Em um teste separado, uma fonte calibrada de velocidade de volume é colocada na mesma posição k e a pressão sonora é medida no ponto j . A impedância de transferência é obtida a partir desta relação:

$$Z_{jk} = p_j / Q_{cal} = j\omega\rho c^2 \sum \frac{\varphi_n(r_i)\varphi_n(r_k)}{(\omega^2 - \omega_n^2 + j\eta\omega_n^2)K_n} \quad \text{Equação 14}$$

Para se obter a parte real e imaginária, tem-se:

$$Z_{jk} = \omega\rho c^2 \sum \frac{\varphi_n(r_i)\varphi_n(r_k)[j(\omega^2 - \omega_n^2) + \eta\omega_n^2]}{((\omega^2 - \omega_n^2)^2 + \eta^2\omega_n^4)K_n} \quad \text{Equação 15}$$

Na máxima ressonância ($\omega^2 - \omega_n^2 = 0$) e assumindo que um único modo domina, a Equação 15 pode ser expressa por:

$$\hat{Z}_{jk} = \omega\rho c^2 \frac{\varphi_n(r_i)\varphi_n(r_k)}{(\eta\omega_n^2)K_n} \quad \text{Equação 16}$$

Dividindo a Equação 13 pela Equação 16 tem-se:

$$\frac{G_{jk}}{\hat{Z}_{jk}} = |Q|^2 \omega\rho c^2 \frac{\varphi_n^2(r_0)\eta\omega_n^2}{((\omega^2 - \omega_n^2)^2 + \eta^2\omega_n^4)K_n} \quad \text{Equação 17}$$

Comparando a Equação 17 com a Equação 10, percebe-se que os segundos membros das equações são idênticos. Logo:

$$W = \frac{G_{jk}}{\hat{Z}_{jk}} \quad \text{Equação 18}$$

Apesar da Equação 18 estar estritamente relacionada às frequências de ressonância, Pinnington (1986) mostrou que o espectro contínuo pode ser obtido ao substituir \hat{Z}_{jk} pelo envelope dos picos de impedância. A partir desta equação, pode-se obter a potência sonora a partir da medição da correlação cruzada da pressão sonora em dois pontos da sala e o valor máximo da impedância de transferência entre os mesmos dois pontos. Neste trabalho, esse método é chamado de Método do Envelope, pois ele utiliza os valores máximos – o envelope – da impedância para se chegar à solução final. Na figura 1 tem-se, de forma resumida, um esquema sobre os equipamentos necessários para medir cada parte da equação proposta. A parte experimental de validação do método será tema dos próximos estudos. O presente trabalho apresenta a validação numérica do método, que será apresentada em seguida.

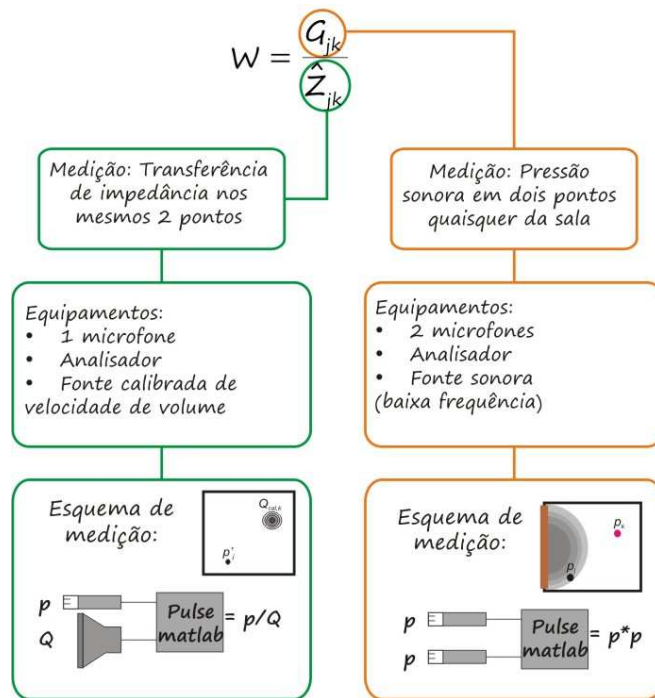


Figura 1 - Medições e equipamentos necessários para realizar o Método do Envelope.

4. RESULTADOS

A Equação 18 mostra que, na teoria, a potência transmitida em uma sala pode ser obtida pela medição de dois parâmetros em dois pontos da sala. Os parâmetros são: a correlação cruzada da pressão e o envelope da impedância de transferência entre esses pontos.

No sentido de testar o método proposto, algumas simulações numéricas foram realizadas através do programa *Matlab*® utilizando métodos clássicos para se obter a pressão sonora em salas retangulares com paredes rígidas (KUTTRUFF, 1979). O modelo de sala utilizado possui as seguintes dimensões: $l_x = 4,315\text{m}$; $l_y = 3,775\text{m}$; $l_z = 2,98\text{m}$. O coeficiente de absorção é de 0,04, valor aproximado de uma sala sem tratamento acústico.

O teste pode ser separado em dois estágios:

- 1) Cálculo da correlação cruzada da pressão sonora em dois pontos da sala: uma fonte pontual foi colocada em um dos vértices da sala e diferentes grupos de 2 (dois) pontos foram posicionados no modelo testado (G_{jk}), conforme ilustra esquema na Figura 2.
- 2) Cálculo do envelope da impedância em uma sala: a fonte de velocidade de volume foi colocada na mesma posição de um dos pontos com $Q = 1$ e o envelope dos picos de impedância entre os dois pontos foi calculado (\hat{Z}_{jk}), como mostra a Figura 3,

A potência sonora transmitida é calculada pela divisão dos dois espectros: a correlação cruzada da pressão (G_{jk}) e o envelope da impedância de transferência (\hat{Z}_{jk}).

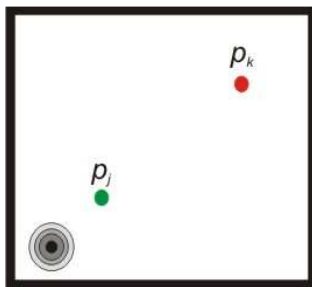


Figura 2 - Esquema – estágio 1: correlação cruzada da pressão sonora em dois pontos

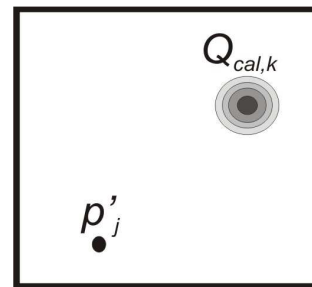


Figura 3 - Esquema – estágio 2: impedância de transferência entre dois pontos

O resultado do primeiro estágio de simulação é mostrado na Figura 4. Uma fonte monopolo com $Q=1$ foi posicionada em um dos vértices do modelo para representar uma parede vibrante e a pressão sonora em dois pontos aleatórios foi calculada. O comportamento modal pode ser observado principalmente nas

frequências mais baixas. Existe uma pequena variação de pressão nas duas posições até, aproximadamente, a frequência de 80 Hz. Isso acontece porque esses pontos estão localizados em posições relativamente simétricas em lados opostos da sala (como mostra o esquema dos pontos na Figura 2), sendo assim, o desenho dos modos são aproximadamente iguais. À medida que a frequência aumenta mais modos começam a contribuir na resposta e p_k reduz em comparação com p_j , porque este está mais distante da fonte.

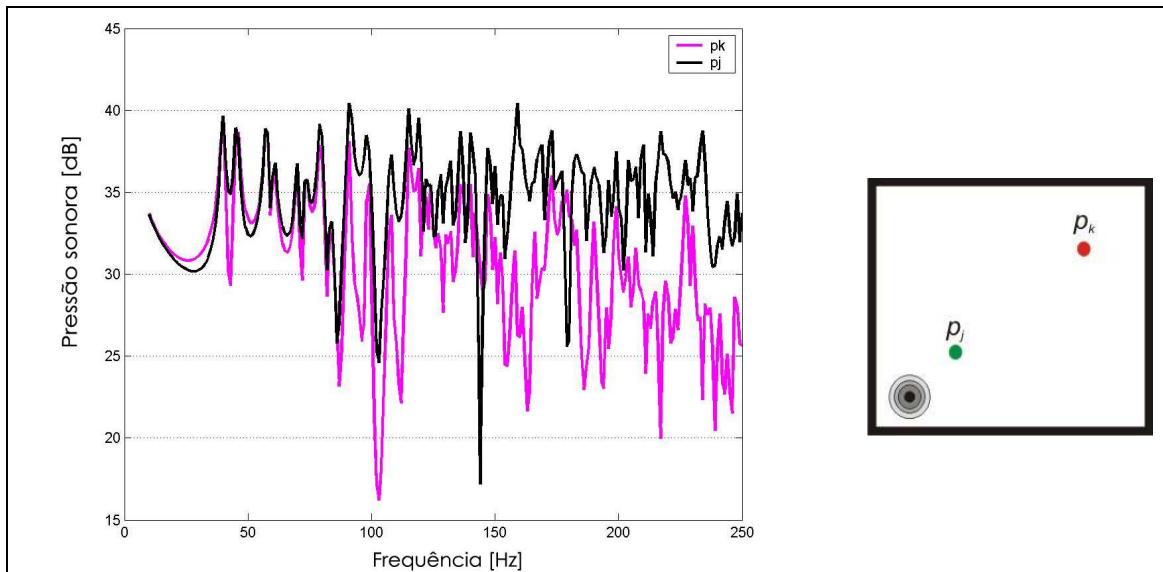


Figura 4 - Nível de pressão sonora simulado para dois pontos da sala.

No segundo estágio, foi simulado o envelope da impedância de transferência, onde uma fonte monopolo foi colocada no lugar de p_k na posição k e a pressão sonora na posição p'_j . A impedância mostra os picos de ressonância e outros vales anti-ressonantes, como esperado. Na figura 5, em linha rosa pontilhada está o envelope dos picos da impedância, que é o espectro utilizado no cálculo da potência sonora transmitida no Método do Envelope.

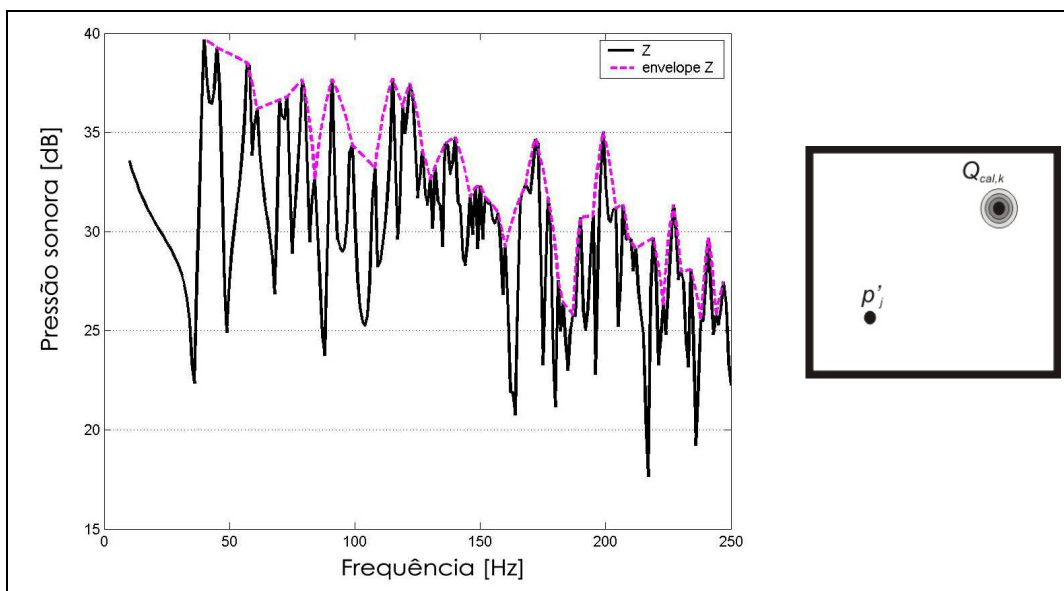


Figura 5 - Impedância de transferência entre dois pontos.

Cumpridos os dois estágios, os resultados foram divididos de acordo com a Equação 18 para obter a potência sonora transmitida pelo Método do Envelope, conforme mostra a Figura 6. A curva em preto é o valor da potência sonora calculado de acordo com a Equação 18 e em rosa está o resultado obtido pelo Método do Envelope (G/Z). Em frequências mais altas, quando o campo vai se tornando mais difuso, as curvas se distanciam, como era esperado, já que a teoria assume que existe um único modo dominante. Sendo assim, o método se mostra eficiente para os primeiros modos da sala. Nas depressões entre os picos de ressonância, as duas curvas não ficam muito próximas, pois vários modos contribuem para a resposta da sala

nesta região. Contudo, nos picos das ressonâncias mais baixas o Método do Envelope se mostra adequado para prever a verdadeira potência sonora transmitida com uma diferença de aproximadamente 1 dB para grande parte dos picos até uma região próxima a 150 Hz. Estes picos são ressonâncias isoladas, logo a suposição de que um único modo é dominante pode ser aplicada.

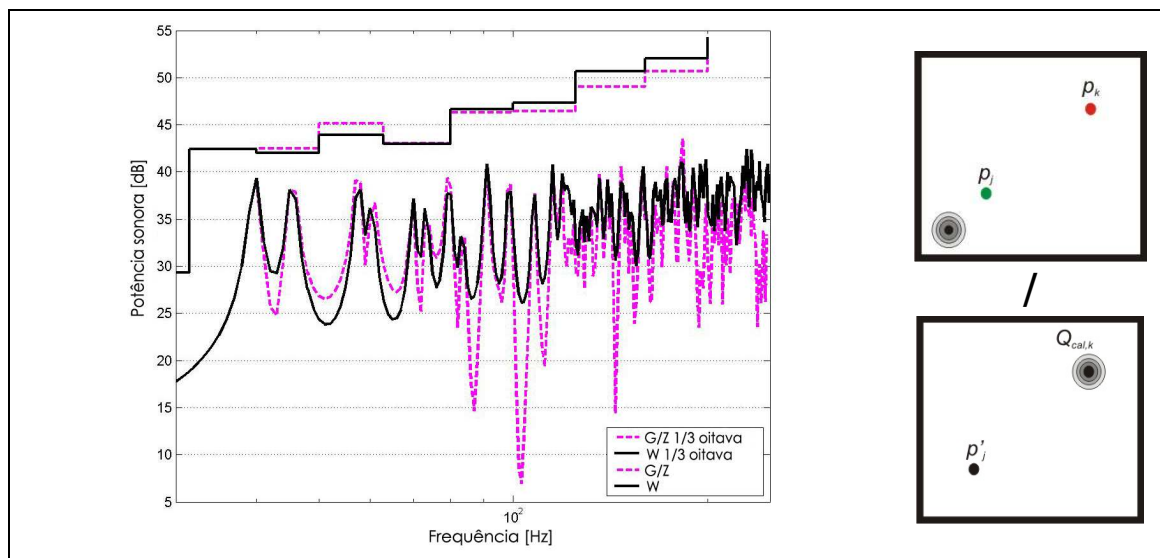


Figura 6 - Potência sonora estimada através do Método do Envelope utilizando um par de pontos e comparada com a potência sonora calculada de acordo com Equação 18.

O método mostra bons resultados em frequências únicas e em bandas de baixa frequência exatamente quando os métodos para campo difuso não são adequados. Além disso, em bandas de terços de oitava, os picos de ressonância prevalecem mostrando melhores resultados. Logo, pode-se afirmar que o método pode ser um complemento aos métodos de campo difuso existentes.

Pinnington (1986) afirma que podem acontecer erros significativos no resultado se um ou dois pontos forem colocados próximos aos nós dos modos da sala. Neste caso, o modo não irá apresentar na resposta de pressão o real valor da potência transmitida na sala. Para evitar esse erro, o autor sugere a média de vários pares em pontos diferentes da sala com o intuito de evitar um resultado que mascare o real comportamento da sala. Nas simulações, foi visto que o número de três pares é o ideal para resultados adequados. Acima desse valor, o resultado não é tão diferente, principalmente nos picos de ressonância, como mostra a Figura 7. A média entre 3 (três) pares – 6 (pontos) – está mostrada na Figura 8.

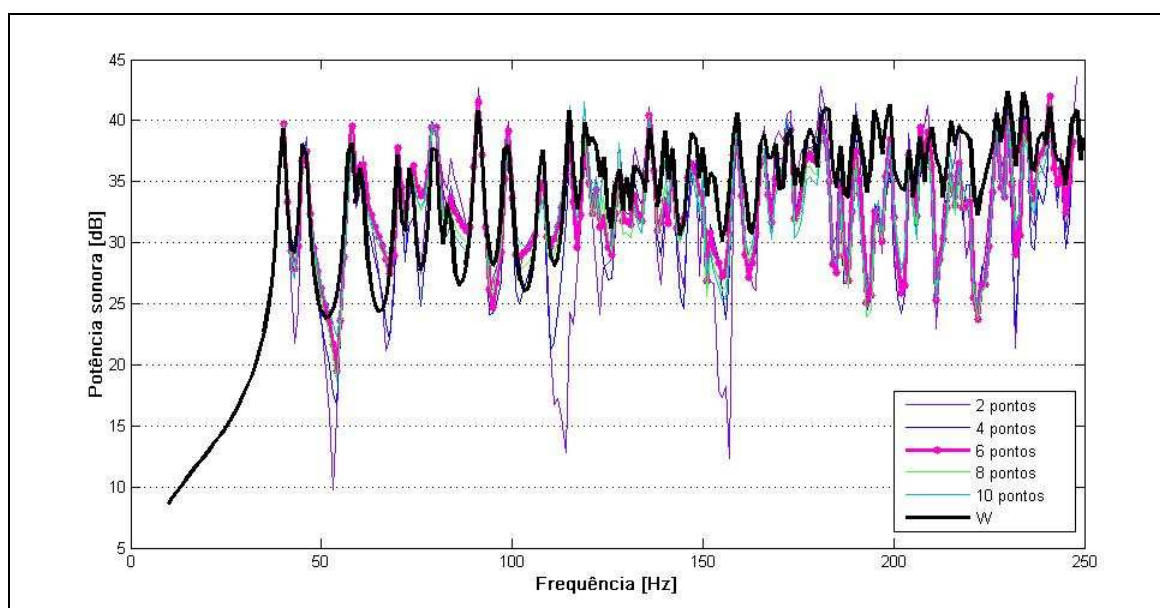


Figura 7 - Potência sonora estimada através do Método do Envelope utilizando diversos pares de pontos e comparada com a potência sonora calculada de acordo com Equação 18 .

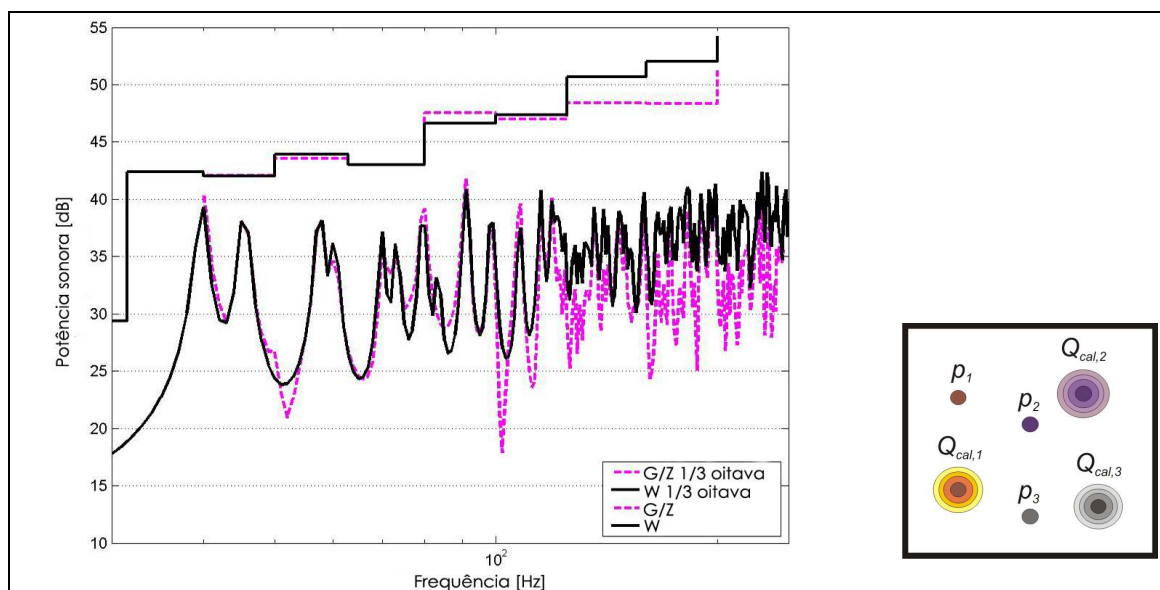


Figura 8 - Potência sonora estimada através do Método do Envelope utilizando três pares de pontos e comparada com a potência sonora calculada de acordo com Equação 18 .

Vale ressaltar que o método pode ser válido independente da fonte de excitação da sala. Nas simulações, foi utilizada a fonte pontual para simplificar o processo, mas não impede de expandir o método para uma situação mais real. Por exemplo, em um teste de isolamento sonoro, a excitação predominante na sala receptora pode ser uma excitação distribuída por toda a parede que divide duas salas.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um método alternativo para medições de isolamento sonoro em baixas frequências. Foi apresentado o Método do Envelope para a medição indireta da potência transmitida na sala receptora em um teste de isolamento sonoro. O método é baseado na teoria que assume que um único modo contribui para a pressão sonora da sala, sendo essa teoria válida somente para as primeiras ressonâncias de uma sala sem mobiliário.

O Método do Envelope consiste em duas etapas de medição: primeiramente, mede-se a pressão sonora em dois pontos arbitrários da sala e, posteriormente, no lugar de um 'microfone', coloca-se uma fonte calibrada de velocidade de volume. Não se faz necessária a medição do tempo de reverberação.

O método mostra com bons resultados tanto em frequências discretizadas e em bandas de terço de oitava em regiões de baixa frequência exatamente quando os métodos para campo difuso não são adequados. Além disso, em bandas de terços de oitava, os picos de ressonância prevalecem mostrando melhores resultados, com diferenças de 1 a 2dB do modelo de referência.

Os melhores resultados foram conseguidos quando foi feita uma média com três pares de pontos da sala, no entanto, os resultados das simulações também mostraram bons resultados utilizando um número menor de posições. Acima desse valor, o resultado não é tão diferente, principalmente nos picos de ressonância. Deve-se evitar, no entanto, o centro da sala, visto que é a localização provável de alguns nós. O método se mostrou eficiente justamente onde a teoria para campo difuso falha, podendo ser um complemento adequado para as medições propostas pela ISO para isolamento sonoro, principalmente para as bandas de terço de oitavas entre 50 a 250 Hz em salas pequenas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENGTSSON, J.; WAYE, K. P.; KJELLBERG, A. Evaluations of effects due to low-frequency noise in a low demanding work situation. **Journal of Sound and Vibration**, v. 278, p. 83–99. 2004.
- BENGTSSON, J.; WAYE, K. P.; KJELLBERG, A. Sound characteristics in low frequency noise and their relevance for performance effects. In: INTERNOISE, 2002. **Proceedings...** Dearborn, 2002.
- BERGLUND, B.; HASSMEN, P. Sources and effects of low-frequency noise. **J. Acoust. Soc. Am.** May, 1996.
- BRAVO, T.; ELLIOT, S. J. Variability of low frequency sound transmission measurements. **J. Acoust. Soc. Am.** v.115, n.6, June. 2004.
- BS EN ISO 140-3. Acoustics, Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Buildings Elements. Part 3: Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Elements, 1995.
- BS EN ISO 140-4: Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements

- of airborne sound insulation between rooms, 1998.
- DUARTE, E. A. C.; VIVEIROS, E. B. Desempenho acústico na arquitetura residencial brasileira: paredes de vedação. **Revista do Ambiente Construído**, v. 7, p.159 – 171. 2007.
- HOPKINS, C.; TURNER, P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies. **Applied Acoustics**, v.66, p. 1339 – 1382. 2005.
- KUERER, R. C. Classes of acoustical comfort in housing: improved information about noise control in buildings. **Applied Acoustics**, v. 52, p. 197 – 210. 1997.
- KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. Londres: Elsevier Applied Science, 1979.
- LING, M. **Domestic noise complaints**. BRE Report n°204732. December, 1999.
- MALUSKI, S. P. S.; GIBBS, B. M. Application of a finite-element model to low-frequency sound insulation in dwellings. **J. Acoust. Soc. Am.**, v.108, n.4, 2000.
- MALUSKI, S. P. S.; GIBBS, B. M. The effect of construction material, content and room geometry on the sound field in dwellings at low frequencies. **Applied Acoustics**, v.65, p. 31 – 44. 2004.
- MOORHOUSE, A.T. **Power transmitted by a vibrating wall into a room**. Notas de seminários. Salford, 2008.
- OSIPOV, A.; MEES, P.; VEERMEIR, G. Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings. **Applied Acoustics**, v. 52, p. 273 – 288. 1997.
- PAPADOUPOLOS, C. I. Redistributions of the low frequency acoustics modes of a room: a finite element – based optimization method. **Applied Acoustics**, v.62. p. 1267 – 1285. 2001.
- PINNINGTON, R. J. Using the envelope of the frequency response in the measurement of power absorbed by a finite structure. **Journal of Sound and Vibration**. V.109, n.1, p.127 – 139. 1986.
- POLLI, T.; VIVEIROS, E. Quando o preço não faz diferença: a relação entre custo do imóvel e conforto acústico. In: ENCAC, 2007. **Anais...** Ouro Preto, 2007.
- WAYE, K. P. Effects of low frequency noise in occupational environment-present knowledge base. In: INTERNOISE, 2002. **Proceedings...** Dearborn, 2002.