



Isolamento Acústico – Resultados Analíticos Versus Experimentais

Julieta António, António Tadeu e Diogo Mateus

Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Polo II – Pinhal de Marrocos, 3030-290, Coimbra, julieta@dec.uc.pt

RESUMO: Neste trabalho, comparam-se valores de isolamento acústico, em painéis simples e duplos, obtidos através de um método analítico, com valores obtidos experimentalmente. O método analítico de previsão foi previamente desenvolvido pelos autores e tem em conta a completa interação entre o sólido e o ar. Este método também não impõe restrições à espessura dos painéis ao contrário das formulações de Kirchhoff ou de Mindlin. Apresentam-se resultados de isolamento acústico obtido para painéis de vidro, painéis de aço e painéis de betão. Da análise dos resultados verifica-se que as soluções analíticas se aproximam bastante dos resultados experimentais excepto quando a área do painel é pequena e a frequência de excitação baixa.

ABSTRACT: The acoustic insulation values, obtained for single and double panel walls, using an analytical model, previously developed by the authors, are compared with experimental results. The analytical model takes into account the full interaction solid-fluid. In this method, the panel thickness has no restriction otherwise the Kirchhoff or Mindlin theories oblige. In this work, sound insulation results, for panels made of different materials, are presented, namely for glass, steel and concrete panels. The analytical findings have showed a good agreement with the experimental data apart from the case when the panel area is very small and for low frequencies.

1. INTRODUÇÃO

O interesse em conhecer o comportamento acústico de painéis leves tem vindo a aumentar, resultado do incremento da sua aplicação em diversas áreas da engenharia, desde a construção de edifícios, à indústria automóvel, à construção de navios até à indústria aeroespacial. Vários investigadores têm-se dedicado ao desenvolvimento de métodos analíticos e numéricos com vista a determinar o comportamento acústico desses elementos. A construção destes modelos é muitas vezes complexa e torna-se difícil devido ao número de variáveis que a transmissão sonora envolve (propriedades do material como a rigidez e o amortecimento, natureza e posição da fonte sonora, número de painéis, vibração dos compartimentos, etc.). Muitas vezes opta-se por construir modelos mais simples, mas que, devido às suas limitações, não oferecem uma solução fiável, o que leva a recorrer a trabalho experimental para a determinação do isolamento sonoro.

O modelo simplificado mais conhecido para painéis simples é o da lei da massa [1] que não consegue simular a existência de quebras do isolamento devido a fenómenos dinâmicos. A modelação de painéis duplos com caixa de ar torna-se ainda mais complicada devido ao aumento de fenómenos de ressonância envolvidos. London [2] propôs um modelo para painéis duplos de massa igual para estimar a transmissão sonora controlada pela massa para a

incidência de ondas planas com frequência abaixo da frequência crítica. Beranek [3] modificou este modelo de forma a incluir o efeito de ressonância do conjunto. É usual incluir-se material absorvente na caixa de ar em painéis duplos. Fahy [4], e Gösele [5], desenvolveram modelos que simulam este efeito.

O método Análise Estatística da Energia (Statistical Energy Analysis - SEA) tem-se mostrado útil para prever a transmissão sonora de divisórias [6].

Existem outros métodos numéricos capazes de simular a transmissão sonora de forma bastante rigorosa, como por exemplo o Método dos Elementos Fronteira (BEM) o Método dos Elementos Finitos (FEM) [7] ou métodos híbridos que combinam FEM e BEM [8] ou combinam SEA e FEM [9]. Outros modelos com as formulações mais diversas têm surgido para estudar a transmissão do som através de partições. Uma publicação recente de Mechel [10] apresenta uma compilação bastante útil de diferentes métodos para serem utilizados na análise do isolamento sonoro de diferentes tipos de paredes.

Neste trabalho estuda-se o comportamento acústico de painéis simples de vidro, aço e betão e painéis duplos de vidro. Compara-se o isolamento sonoro medido experimentalmente, na Universidade de Coimbra, com os resultados obtidos utilizando um modelo analítico já apresentado pelos autores [11, 12].

Os ensaios de laboratório utilizam uma técnica de utilização de duas câmaras e são governados pelas normas internacionais ISO140-1 [13] e ISO140-3 [14]. O modelo analítico considera a interação total entre o sólido e o fluido e não impõe restrições à espessura do painel como acontece com outros modelos (Kirchhoff ou Mindlin). O problema é formulado no domínio da frequência e considera-se que o painel tem uma extensão infinita. A fonte de pressão é modelada como a sobreposição de fontes harmónicas e sinusoidais lineares.

2. MODELO ANALÍTICO

O modelo analítico [3, 4] tem em conta a completa interacção entre o painel sólido e o fluido e não impõe limitações de espessura. Neste modelo uma fonte pontual de pressão é escrita como o somatório de fontes de pressão harmónicas com variação sinusoidal. Este modelo usa potenciais de deslocamento no sólido e potenciais de pressão no fluido. Esses potenciais são expressos como um integral correspondente à sobreposição de ondas planas, de acordo com o método usado por Lamb [15] para o caso bidimensional, e Bouchon [16] e Kim et al. [17] na avaliação do campo tridimensional através de uma representação discreta do número de onda. Os integrais contínuos podem ser discretizados considerando a existência de um número infinito de fontes virtuais colocadas ao longo da direcção x , igualmente espaçadas de L_x . A distância L_x deve ser suficientemente grande para evitar a contribuição das cargas virtuais para a resposta.

As fronteiras sólido-fluido geram termos de superfície correspondentes às reflexões nessas fronteiras. A solução final para uma parede simples ou dupla pode ser expressa como a soma dos termos da fonte (campo incidente em campo infinito) com os termos de superfície necessários à satisfação das condições de continuidade de deslocamentos e tensões normais e ainda de tensões tangenciais nulas na fronteira sólido-fluido.

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram executados em duas câmaras acústicas, para a determinação do isolamento sonoro a sons aéreos, de acordo com as normas ISO 140-1 [13] e ISO140-3 [14]. O índice de redução Sonora (R) foi calculado de acordo com a norma ISO 140-3 [14], tendo em conta os fenómenos de reverberação nas câmaras. O tempo de reverberação, medido de acordo com a norma ISO 354 [18] é utilizado na fórmula de Sabine para determinar a área de absorção equivalente. O tempo de reverberação, para cada registo foi calculado integrando a energia de acordo com a abordagem de Schroeder [19].

Testaram-se provetes em vidro, aço e betão com as dimensões $0.60 \times 0.60 \text{ m}^2$, $1.20 \times 1.20 \text{ m}^2$ e $1.80 \times 1.80 \text{ m}^2$. Ensaíram-se painéis com áreas diferentes para verificar a influência da area na posição e na amplitude da quebra associada com o efeito de coincidência. Os painéis de maior dimensão foram também usados para comparar os resultados analíticos com os experimentais em bandas de frequência em que os painéis têm poucos modos próprios. As propriedades dos materiais utilizadas nas modelações numéricas são as que constam da Tabela I. O factor de perdas dos materiais também listados na Tabela I foram retirados de Cremer et al. [20].

Tabela 1 – *Propriedades dos materiais.*

Material	Módulo de elasticidade	Coefficiente de Poisson	Massa volúmica	Factor de perdas
Vidro	$E = 72 \text{ GPa}$	$\nu = 0.22$	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$	$\eta = 4 \times 10^{-3}$
Aço	$E = 210 \text{ GPa}$	$\nu = 0.3$	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	$\eta = 2 \times 10^{-3}$
Betão	$E = 29 \text{ GPa}$	$\nu = 0.15$	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$	$\eta = 6 \times 10^{-3}$

4. RESULTADOS ANALÍTICOS E EXPERIMENTAIS

No modelo analítico, a fonte foi colocada a 2.0 m da parede, e uma grelha de 63x3 receptores foi colocada em ambos os lados da parede, de acordo com a Figura 1.

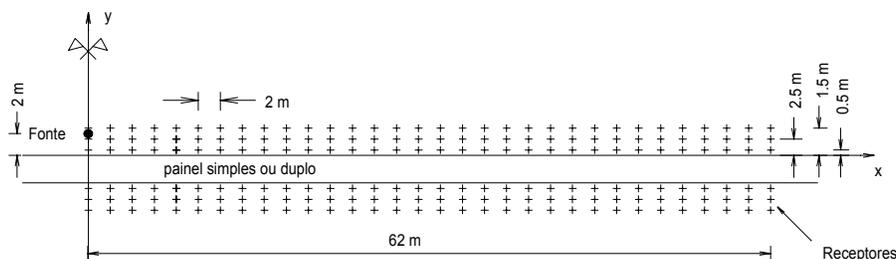


Figura 1 – *Posição da fonte e dos receptores.*

Os cálculos foram efectuados no domínio da frequência no intervalo [10 , 6000 Hz], com um incremento de 10 Hz. O isolamento sonoro foi calculado através da diferença das amplitudes da pressão, obtidas em ambos os lados.

Os resultados experimentais são apresentados em bandas de 1/10 de oitava de forma a existir uma maior discretização do sinal e uma comparação mais eficiente com os resultados analíticos.

4.1 Painéis de vidro

Ensaíram-se três amostras: painéis simples de 4 mm e 8 mm, e um painel duplo de 4+4 mm com caixa de ar de 12 mm. Os resultados apresentam-se nas Figuras 2, 3 e 4.

Quando se observam os resultados verifica-se que as curvas de isolamento são influenciadas pela criação de campos estacionários no interior das câmaras acústicas, especialmente nas frequências baixas. Verifica-se a existência de quebras e flutuações no isolamento devido a este efeito, no entanto este comportamento começa a ser menos visível com o aumento da frequência.

Algumas das quebras observadas nas curvas de isolamento devem-se ao movimento transversal de flexão do painel. Os modos de vibração associados a este fenómeno dependem do tamanho do painel e das condições de fixação. O modelo analítico não simula as quebras provocadas pelos campos estacionários no interior das câmaras, nem as originadas pelo movimento de flexão transversal do painel, pois o modelo analítico é para um único painel com extensão infinita.

A Figura 2 apresenta o isolamento obtido, em bandas de 1/10 de oitava, para um painel simples de 8 mm de espessura e para diferentes dimensões: 0.60x0.60 m², 1.20x0.60 m², 1.20x1.20 m² e 1.80x1.80 m².

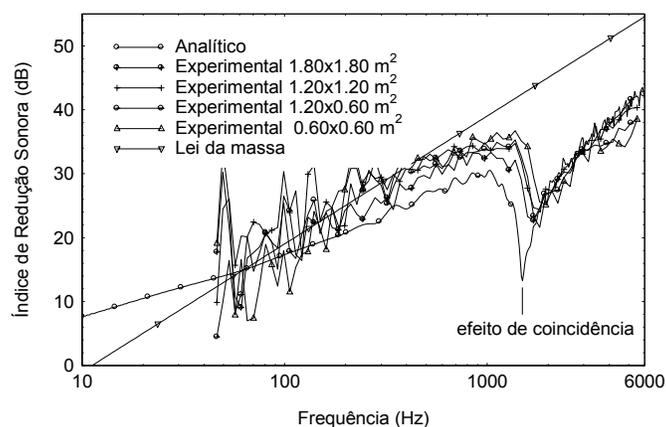


Figura 2 – Índice de redução sonora para um painel de vidro de 8 mm de espessura.

A quebra de isolamento devido ao efeito de coincidência é visível em todos os casos. Note-se que essa quebra de isolamento não se situa exactamente na mesma frequência para os quatro painéis. Também se verifica que o modelo analítico apresenta a mesma quebra com amplitude

maior e para frequências mais baixas do que os resultados experimentais. Os resultados experimentais aproximam-se do resultado analítico com o aumento da área dos painéis. No entanto, mesmo para o painel maior ainda se observam algumas diferenças essencialmente devido à dimensão finita do painel ensaiado. Nas frequências acima da zona onde se verifica o efeito de coincidência os resultados teóricos e experimentais são concordantes.

Neste gráfico incluiu-se também a curva prevista pela lei da massa, a qual considera que o painel é infinito e se comporta como se fosse constituído por uma sequência de massas justapostas com deslocamentos independentes e com forças de amortecimento nulas.

Nas baixas e nas altas frequências os resultados são bastante diferentes dos previstos pela lei da massa. Para baixas frequências a lei da massa prevê valores de isolamento mais baixos, enquanto que para as altas frequências prevê valores mais altos que os previstos analiticamente ou obtidos experimentalmente.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados obtidos para o painel simples de 4 mm com uma área de $1.80 \times 1.80 \text{ m}^2$. Mais uma vez as curvas experimental e analítica seguem a mesma tendência à medida que a frequência aumenta. Na zona do efeito de coincidência, a curva analítica, mais uma vez, prevê uma quebra mais acentuada que ocorre para frequências mais baixas do que no caso experimental.

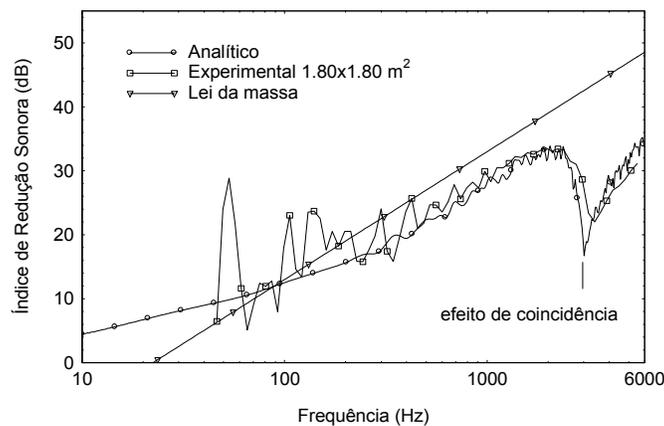


Figura 3 – Índice de redução sonora para um painel de vidro de 4 mm de espessura.

Os resultados obtidos para o painel duplo com área de $1.20 \times 1.20 \text{ m}^2$ apresentam-se na Figura 4. Em ambas as curvas, é evidente a influência do efeito de coincidência e da ressonância do conjunto (painéis e caixa de ar), devido às quebras de isolamento que produzem. As ressonâncias no interior da caixa de ar ocorreriam em frequências acima do limite superior ao apresentado no gráfico. Verifica-se também, que nas baixas frequências os resultados experimentais evidenciam o efeito dos modos de vibração por flexão transversal e dos campos estacionários criados no interior das câmaras. Devido à extensão limitada do painel a quebra de isolamento devido ao efeito de coincidência surge na curva experimental para frequências acima das previstas na curva analítica. Acima desta zona as duas curvas de isolamento seguem quase o mesmo percurso.

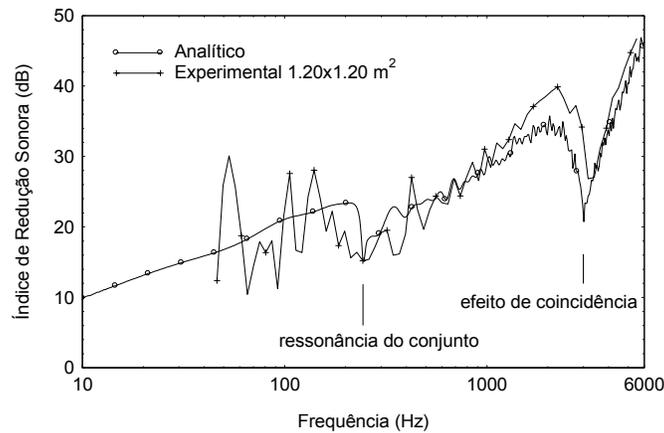


Figura 4 – Índice de redução sonora para um painel de vidro duplo $[4 + (12) + 4]$ mm .

4.2 Painéis de aço

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o painel simples de aço com 10 mm de espessura e $1.20 \times 1.20 \text{ m}^2$ de área. Assim como aconteceu para os casos anteriores, as curvas analítica e experimental são próximas para as frequências mais elevadas, em especial acima da quebra associada ao efeito de coincidência. Na curva analítica essa quebra tem uma amplitude maior do que na curva obtida experimentalmente. Nas baixas frequências, os resultados experimentais continuam a mostrar a influência dos campos de ondas estacionários gerados nas câmaras, e dos modos de vibração transversal por flexão.

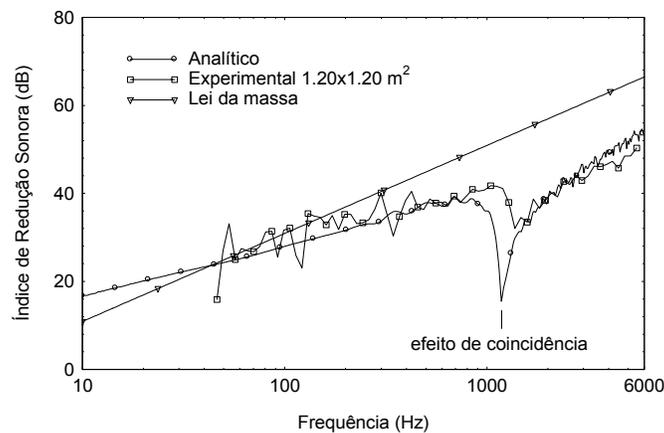


Figura 5 – Índice de redução sonora para um painel de aço de 10 mm de espessura.

4.3 Painéis de betão

A Figura 6 ilustra os resultados analíticos e experimentais para um painel de betão com 40 mm de espessura. Nos ensaios experimentais utilizou-se um painel com área de

1.80x1.80 m². A comparação das duas curvas mostra, como nos casos anteriores, uma boa concordância à medida que a frequência aumenta.

A curva analítica apresenta uma quebra de isolamento devido ao efeito de coincidência, mas esta quebra não é clara nos resultados experimentais. O tamanho do painel e as restrições ao movimento na sua fronteira de apoio justificam estes resultados.

Nesta figura também se incluiu a curva obtida aplicando a lei da massa. Continuam a existir diferenças entre esta curva e a curva analítica, mas são agora menores do que no caso dos outros painéis. A maior massa deste painel explica este facto. Sabe-se que os níveis de isolamento sonoro preconizados pela lei da massa se aproximam de resultados experimentais quando os painéis são pesados.

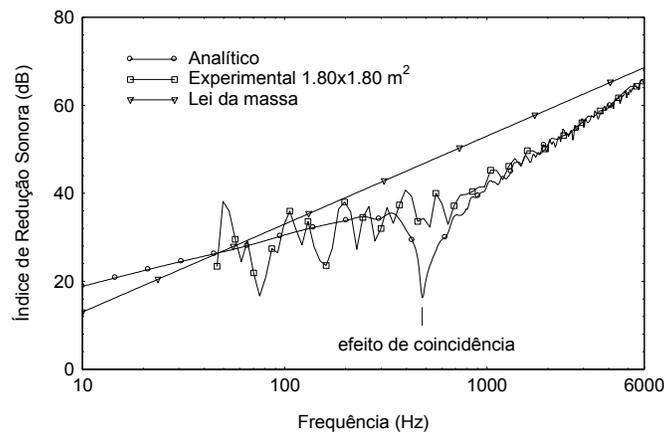


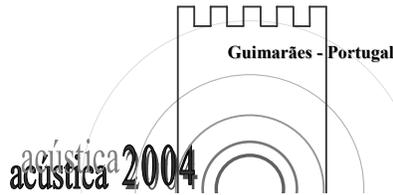
Figura 6 – Índice de redução sonora para um painel de betão de 40 mm de espessura.

5. CONCLUSÃO

Comparou-se o isolamento sonoro obtido experimentalmente, analiticamente e através da lei da massa para painéis simples e duplos de vidro e simples de betão e aço. O modelo analítico apresentado, permitiu obter uma boa previsão do isolamento sonoro conferido por estes painéis. As maiores diferenças entre os resultados numéricos e os experimentais verificou-se nas baixas frequências, nas oscilações da curva de isolamento devido aos modos próprios de vibração do ar das câmaras e à vibração transversal do painel. A dimensão dos painéis ensaiados é uma variável importante na definição das quebras de isolamento associadas com o efeito de coincidência.

REFERÊNCIAS

- [1] A. C. C. Warnock e W. Fasold; Sound Insulation: Airborne and Impact, *Encyclopedia of Acoustics*. A Wiley-Interscience Publication, New York, 1997, 3, pp. 1129-1161.
- [2] A. London; Transmission of reverberant sound through double walls. *J. Acoust. Soc. Am* 1950, 22, pp. 270-279.



- [3] L. L. Beranek; *Noise Reduction*. McGraw-Hill Book Company, 1960.
- [4] F. Fahy; *Foundations of Engineering Acoustics*. Academic Press, 2001.
- [5] K. Gösele; Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen Bauteilen (ohne Verbindung der Schalen). *Acustica* 1980, 45, pp. 218-227.
- [6] R. J. M. Craik, T. R. Nightingale e J. A. Steel; Sound transmission through a double leaf partition with edge flanking. *J. Acoust. Soc. Am.* 1997, 101, pp. 964-969.
- [7] R. Panneton e N. Atalla; Numerical prediction of sound transmission through finite multiplayer systems with poroelastic materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996, 100, pp. 346-354.
- [8] F. C. Sgard, N. Atalla e J. Nicolas; A numerical model for the low frequency diffuse field sound transmission loss of double-wall sound barriers with elastic porous linings. *J. Acoust. Soc. Am.* 2000, 108, pp. 2865-2872.
- [9] J. A. Steel e R. J. M. Craik; Statistical energy analysis of structure-borne sound transmission by finite element methods. *Journal of Sound and Vibration* 1994, 178, pp. 553-561.
- [10] F. P. Mechel; *Formulas of Acoustics*. Springer Verlag, Berlin, 2002.
- [11] A. Tadeu e J. António; Acoustic insulation of single panel walls provided by analytical expressions versus the mass law. *Journal of Sound and Vibration* 2002, 257, pp. 457-475.
- [12] J. António, A. Tadeu e L. Godinho; Analytical evaluation of the acoustic insulation provided by double infinite walls. *Journal of Sound and Vibration* 2003, 263, pp. 113-129.
- [13] Standard ISO 140-1: 1997; Acoustics – *Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements* – Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission.
- [14] Standard ISO 140-3: 1997; Acoustics – *Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements* – Part 3: laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements.
- [15] H. Lamb; On the propagation of tremors at the surface of an elastic solid. *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 1904, A203, pp. 1-42.
- [16] M. Bouchon; Discrete wave number representation of elastic wave fields in three-space dimensions. *Journal of Geophysical Research* 1979, 84, pp. 3609-3614.
- [17] J. Kim e A. S. Papageorgiou; Discrete wavenumber boundary element method for 3-D scattering problems. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 1993, 119, pp. 603-624.
- [18] Standard ISO 354: 1985; Acoustics – *Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room*.
- [19] M. R. Schroder; New Method of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am.* 1965, 37, pp. 409-412.
- [20] L. Cremer, M. Heckl e E. E. Ungar; *Structure-Borne Sound*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.