

Avaliação do isolamento sonoro aéreo de elementos de vedação na construção civil

Evaluation of sound insulation from airborne noise of partition elements in construction

Danielly Borges Garcia
Marco Antônio de Mendonça Vecchi
Francisco Carlos Rodrigues

Danielly Borges Garcia
Curso de Arquitetura e
Urbanismo
Centro Universitário do Leste
de Minas Gerais
Av. Presidente Tancredo de
Almeida Neves, 3500 - Bairro
Universitário
Coronel Fabriciano - MG - Brasil
CEP 35170-056
Tel.: (31) 3841-7280
E-mail:
daniellybgarcia@gmail.com

**Marco Antônio de
Mendonça Vecchi**
Escola de Engenharia
Universidade Federal de Minas
Gerais
Av. Contorno, 842 - Centro
Belo Horizonte - MG - Brasil
CEP 30110-060
Tel.: (31) 3238-1970
E-mail: vecchi@dees.ufmg.br

Francisco Carlos Rodrigues
Escola de Engenharia
Universidade Federal de Minas
Gerais
E-mail: francisco@dees.ufmg.br

Recebido em 02/02/07
Aceito em 14/02/08

Resumo

Neste trabalho é apresentada uma análise do isolamento sonoro do ruído aéreo entre elementos de vedação utilizados na construção civil, sendo esses sistemas convencionais ou painéis industrializados. Esta análise é feita a partir de um estudo experimental do isolamento sonoro dos painéis e por um procedimento analítico, baseado em revisão bibliográfica, visando expressões que atendam às diferentes tipologias de painéis de vedação. O resultado é a possibilidade de utilização de algumas expressões para prever o isolamento sonoro de painéis de vedação maciços, duplos com camada de ar interna ou sanduíches.

Palavras-chave: Pré-fabricação. Isolamento sonoro. Industrialização da construção.

Abstract

This article presents a comparative analysis of sound insulation from airborne noise provided by conventional partition systems or industrialized panels used in construction. The analysis was based on an experiment on the sound insulation provided by the panels, and on a literature review, aiming to obtain equations that could be use for different panel typologies.. These equations could be use to predict the sound insulation of single and double leaf panels, either with or without infill.

Keywords: Pre-fabrication, Partitions. Sound insulation. Construction industrialization.

Introdução

Atualmente, vários componentes e sistemas construtivos industrializados vêm sendo utilizados na construção civil brasileira. Trata-se de um ganho em qualidade e produtividade para a construção, mas é necessário avaliar o desempenho desses novos sistemas ante os convencionais.

No caso das vedações das edificações, é utilizada a alvenaria de blocos cerâmicos, cujos desempenhos térmico e acústico, entre outros itens, são, do ponto de vista do usuário, satisfatórios. Partindo desse princípio, o desempenho de novos componentes de vedação deve ser compatível com a alvenaria tradicional, para serem aceitos pela população. Entretanto, os painéis de vedação que, na construção convencional, são maciços e de maiores espessuras, vêm sendo substituídos por painéis de pouca espessura, formados por elementos leves, alterando, entre outras características, o isolamento acústico do sistema de vedação.

A previsão analítica do isolamento sonoro de painéis maciços pode ser feita através de expressões matemáticas conhecidas, mas a previsão do isolamento de novas tipologias, principalmente os painéis ditos “sanduíches”, ainda não é adequada (GARCIA, 2004). Outra forma de determinar o isolamento sonoro de componentes de edificações é mediante testes em câmaras reverberantes, o que não é simples, já que necessitam de um ambiente de características específicas.

Dentro desse contexto, objetiva-se avaliar a aplicação de expressões existentes na literatura para prever o isolamento sonoro de diferentes tipologias de painéis e, dessa forma, possibilitar o desenvolvimento de novos painéis e a previsão matemática do isolamento sonoro. Para tal, compararam-se resultados da perda por transmissão de painéis obtidos através de expressões analíticas e experimentalmente.

Este trabalho é parte da dissertação de mestrado intitulada “Análise do isolamento sonoro de sistemas construtivos residenciais estruturados em aço” (GARCIA, 2004).

Desenvolvimento da pesquisa

Os modelos de painéis de vedação utilizados neste trabalho foram escolhidos pela crescente utilização na construção civil. Os elementos de vedação avaliados neste trabalho foram bloco de concreto celular autoclavado, painel de PVC + EPS + lã de rocha, painel de concreto com recheio em EPS, painel de EPS e chapa zincada, e painel de gesso acartonado. Esses painéis se enquadraram em três

tipologias: painéis maciços, painéis duplos e painéis “sanduíche”.

A análise do desempenho de isolamento sonoro dos painéis foi feita em duas etapas; análise experimental e previsões analíticas. Posteriormente, os resultados experimentais e analíticos foram comparados a fim de avaliar a possibilidade de utilização das equações estudadas.

A análise experimental da perda por transmissão dos painéis divisórios e elementos de fachada foi feita através de procedimento previsto pela Norma ISO 140-5, e a previsão do índice de redução sonora ponderada através do procedimento da ISO 717-1. A utilização da Norma ISO 140-5 é devida à disponibilidade de construção de uma câmara reverberante que se enquadra ao descrito nesta norma.

As previsões analíticas foram baseadas em expressões encontradas na literatura desde o período de 1960 até os dias de hoje.

Previsão analítica

A previsão do isolamento sonoro através de expressões analíticas vem sendo amplamente estudada visando resultados que traduzam a transmissão do som pelos painéis que se aproximem dos resultados experimentais.

Para analisar os painéis maciços utilizou-se a Lei da Massa, apresentada aqui na Equação 1, nas frequências que se localizam entre a frequência de ressonância e a frequência de coincidência (FAHY, 1998; GERGES, 2000; KINSLER, 1982). Expressões específicas são utilizadas para representar os fenômenos da coincidência e da ressonância (Equações 3 e 4). Além da Lei da Massa, utilizaram-se outras expressões adaptadas por Callister (1999) às diferentes faixas de frequências (Equações 6 e 8), retiradas nos trabalhos de Cremer (1942), Sewell (1970) e Sharp (1978). A comparação entre essas expressões e resultados experimentais apontou os intervalos de frequências em que essas proposições se adequaram melhor.

Conforme já dito, entre a região de ressonância e a frequência crítica, a perda de transmissão, PT , do sistema de vedação maciço atende à Lei da Massa, descrita pela Equação 1, onde os parâmetros utilizados são a frequência (f), em Hz, a densidade superficial (m), em kg/m^2 , a densidade do ar (ρ_0), em kg/m^3 , e a velocidade do som no ar (c_0), em m/s, de acordo com a Equação 1, a seguir.

$$PT = 10 \log \left(\frac{mf\pi}{\rho_0 c_0} \right)^2, \quad (1)$$

De acordo com Ljunggren (1991), abaixo da frequência de coincidência, o número de onda incidente, k , é menor que o número de onda de flexão no painel, k_f , existindo a predominância de ondas forçadas. O número de onda à flexão k_f é definido pela Equação 2.

$$k_f = \frac{f^2 m}{2\pi D}, \quad (2)$$

À medida que aumenta a frequência, o número de onda incidente se aproxima do número de onda de flexão do painel. Quando a projeção do comprimento de onda incidente (onda plana) é igual ao comprimento de onda livre à flexão, ao longo da parede, e a velocidade de propagação da onda incidente se iguala à velocidade de propagação da onda de flexão, ocorre o efeito de coincidência. A frequência em que ocorre esse fenômeno é denominada frequência crítica, e surge um eficiente mecanismo de transferência de energia entre o ar, a superfície sólida e o ar do outro lado da superfície. Dessa forma, o isolamento da parede é reduzido, resultando em uma queda na curva da perda por transmissão. Nessa frequência, a perda por transmissão é determinada pela Equação 3, de acordo com Gerges (2000):

$$PT = 10 \log \left(1 + \frac{mf\eta}{4\pi\rho c \sec\phi} \right)^2, \quad (3)$$

onde m é a densidade superficial do elemento, f , a frequência de coincidência, e η , o amortecimento do material. Acima da frequência crítica, Gerges (2000) recomenda o uso da Equação 4, abaixo:

$$PT = 10 \log \left[1 + \left(\frac{Dk_f^4 \cos^4 \phi \sec \phi}{4\pi\rho f} \right)^2 \right], \quad (4)$$

onde D é a rigidez da placa à flexão, em kg/m^2 , k_f , o número de onda de flexão livre, adimensional, obtido pela Equação 2, e ϕ , o ângulo da coincidência em radianos. O ângulo de coincidência é determinante na perda por transmissão. À medida que o ângulo se aproxima de 90° , a perda por transmissão aumenta. Para obter a rigidez da placa à flexão D , utiliza-se a Equação 5, proposta por Gerges (2000):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (5)$$

onde E representa o módulo de elasticidade do material, em kg/m^2 , h , a espessura do painel em metros, e ν , o coeficiente de Poisson.

Utilizando-se as Equações 1 a 5 é possível prever o comportamento do isolamento sonoro em todas as frequências, contemplando os fenômenos da ressonância e coincidência.

No trabalho de Callister foram analisadas equações utilizadas por Cremer, Sharp e Sewell, em que se identificaram os intervalos de frequência a que cada uma das equações melhor se adaptava.

Em frequências abaixo da metade da frequência de coincidência, Sewell descreve uma expressão que, segundo Callister, se aproxima mais dos resultados experimentais que a Lei da Massa (Equação 6). Para o modelo de Sewell é considerada a transmissão forçada, onde $k_f > k$, ou seja, o número de onda de flexão do painel é maior que o da onda incidente.

$$PT = -10 \log \left[\frac{\left[\ln(k\sqrt{A}) + 0,16 - U(\Lambda) \right] + 1/(4\pi A k_f^2)}{((m\pi)/\rho_0 c_0)(1 - f^2/f_c^2)} \right], \quad (6)$$

onde A é a área da superfície da placa em m^2 , e $U(\Lambda)$ é um fator de correção de forma, utilizado quando as placas não forem quadradas. É interessante observar que a equação proposta por Sewell, Equação 6, considera as dimensões e a geometria do painel, o que não é contemplado nas outras expressões aqui apresentadas. O termo $U(\Lambda)$ pode ser calculado de acordo com a Equação 7:

$$U(\Lambda) = -0,0000311\Lambda^3 + 0,000941\Lambda^2 - 0,0107\Lambda + 0,0526\Lambda^2 - 0,0407\Lambda - 0,0534, \quad (7)$$

Entre a metade da frequência crítica e esta frequência, Callister sugere a interpolação linear entre a lei das massas e a equação proposta por Cremer para campo difuso, Equação 8, que é o modelo proposto para a faixa acima da frequência crítica.

$$PT = 20 \log \left(\frac{\mu\pi f}{\rho_0 c_0} \right) + 10 \log \left(\frac{2\eta f}{f_c} \right) + 10 \log \eta - 2 \quad (8)$$

Para determinar a perda por transmissão, é necessário identificar o tipo de campo sonoro no painel. De acordo com Fahy (1998), abaixo da frequência crítica, as expressões apresentadas para a perda por transmissão para a incidência oblíqua

devem ser ajustadas conforme a Equação 9, a seguir.

$$PT_{(\phi)} = PT + 20\log(\cos\phi), \quad (9)$$

onde ϕ é o ângulo de incidência, que deve ser diferente de 90° . A partir da relação da Equação 9 observa-se que as equações apresentadas por Gerges, Sewell e Cremer, Equações 1, 3, 4, 6 e 7, foram desenvolvidas considerando-se a incidência normal, 0° .

Quando o campo sonoro é formado pela reflexão das ondas sonoras advindas de várias superfícies, o campo se aproxima do difuso, e as ondas se propagam em todas as direções em probabilidades iguais (FAHY, 1998). Para esse caso, a perda por transmissão é descrita pela Equação 10.

$$PT_d = PT - 10\log(0,23PT), \quad (10)$$

Entretanto, a partir de resultados comparativos já realizados e apresentados na literatura (CALLISTER, 1999), definiu-se o tipo de incidência como de campo, cuja perda de transmissão é descrita de acordo com a Equação 11:

$$PT_c = PT - 5, \quad (11)$$

Para a comparação dos resultados é utilizada a Equação 11, que identifica a incidência de campo.

No caso de painéis duplos, a forma construtiva ou a montagem dos painéis constantemente deixa flancos que diminuem sua capacidade isolante. Além disso, as tramas estruturais devem ser consideradas no isolamento, já que são meios diferenciados de transmissão do som, conforme ilustrado na Figura 1. Na previsão analítica devem existir formas de expressar essas ligações. Craik (2000) realizou um estudo sobre a perda por transmissão em painéis duplos compostos de materiais leves, em que aponta a importância de se observarem as ligações existentes entre as placas constituintes e a variação da perda por transmissão. Nas baixas frequências o painel pode ser modelado como um subsistema simples, enquanto nas altas

frequências deve se subdividir em vários subsistemas interconectados.

A camada interna de ar entre duas placas finas gera uma ressonância massa/ar/massa que enfraquece o isolamento, sendo este menor que o correspondente à soma do isolamento de cada placa. Essa frequência pode ser conhecida pela Equação 12.

$$f_{\text{mam}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{d} \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)}, \quad (12)$$

As equações utilizadas para painéis duplos são apresentadas por Gerges (2000), diferenciadas por faixas de frequência.

Para $f > c/2\pi d$, Gerges utiliza a Equação 13:

$$PT = PT_1 + PT_2 + 6,0, \quad (13)$$

Para $f_{\text{mam}} < f < c/2\pi d$, Gerges utiliza a Equação 14:

$$PT = PT_1 + PT_2 + 20\log 2kd, \quad (14)$$

onde d é a distância entre os painéis, e k , o número de onda.

Para $\rho c/\pi(m_1+m_2) \ll f \leq f_{\text{mam}}$, Gerges utiliza a Equação 15.

$$PT = 20\log(m_1 + m_2) f - 47,4, \quad (15)$$

Outra variação quanto à composição dos painéis recentemente utilizados na construção civil são os “painéis sanduíches”.

De acordo com Moore (1991), para o estudo de painéis sanduíches devem ser observadas a espessura das camadas externas do painel e a ortotropia ou isotropia dos materiais componentes.

A propagação das ondas nesses painéis pode ocorrer na forma simétrica e antissimétrica. Se as placas das faces forem idênticas e o material do miolo for isotrópico, então os modos simétricos e antissimétricos de propagação são desacoplados, conforme está ilustrado na Figura 2.

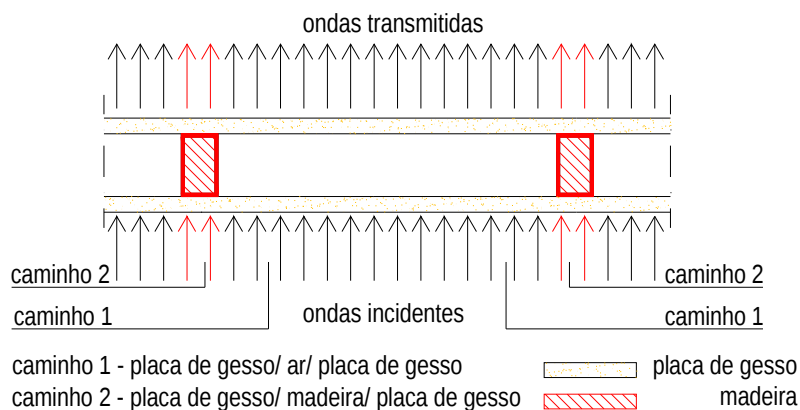
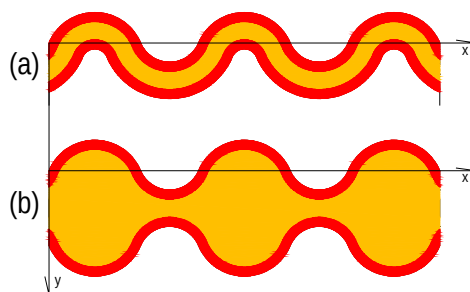


Figura 1 – Meios de propagação do som em painéis duplos



Fonte: Garcia (2004), adaptado de Moore (1991)

Figura 2 – (a) Propagação antissimétrica; (b) propagação simétrica

Essas formas de propagação provocam surgimento de tensões de flexão, tensões normais de deformação do plano nas placas das faces e tensões de cisalhamento, devido à interface das camadas externas e ao miolo do painel. No núcleo do painel ocorrerá dilatação, compressão e cisalhamento. Devido a essas condições, as velocidades das ondas mecânicas dilatacionais e de cisalhamento no material podem ser expressas pelas Equações 16 e 17 respectivamente (MOORE, 1991):

$$c_d = \frac{\omega}{k_d} = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}}, \quad (16)$$

$$c_s = \frac{\omega}{k_s} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (17)$$

onde c_d e c_s são velocidades de propagação dilatacional e de cisalhamento, respectivamente, em m/s; λ e μ são as constantes de Lamé; ρ , a densidade da camada interna em kg/m³; e k_d e k_s são os números de onda dilatacional e de cisalhamento.

As tensões existentes na camada interna do painel sanduíche estão relacionadas aos deslocamentos por uma matriz de impedância 4 x 4, cujos valores também determinam o coeficiente de transmissão do painel sanduíche. O coeficiente de transmissividade dos painéis é expresso pela Equação 18 (MOORE, 1991):

$$\tau = \left[\frac{\left(\frac{\rho_s c_s}{\cos \theta} \right) (Z_i - Z_s)}{\left(Z_i + \frac{\rho_s c_s}{\cos \theta} \right) \left(Z_s + \frac{\rho_s c_s}{\cos \theta} \right)} \right]^2, \quad (18)$$

onde Z_s é a impedância do modo de propagação simétrico do painel, e Z_a , a impedância do modo de propagação antissimétrico. Em um caso particular de orientação da onda incidente no plano do painel e de igualdade entre a velocidade de propagação da onda incidente e a velocidade de propagação da onda no painel, a impedância do modo de propagação antissimétrico (Z_a) pode ser nula, sendo a equação da transmissividade apresentada pela Equação 19 (MOORE, 1991):

$$\tau = \left[\frac{(Z_s)}{\left(Z_s + \frac{\rho_s c_s}{\cos \theta} \right)} \right]^2, \quad (19)$$

No caso em que a impedância do modo de propagação simétrico for bem maior que a parcela relativa à impedância característica e ao cosseno do ângulo de incidência $(\rho_s c_s / \cos \theta)$, o coeficiente de transmissão sonora se aproxima da unidade. Entende-se, portanto, que nessa frequência houve uma transmissão total, e o painel atingiu a coincidência.

Os valores das impedâncias dos modos de propagação antissimétricos e simétricos são descritos em função dos termos da matriz de impedância, Z_{11} , Z_{12} , Z_{13} , Z_{14} , Z_{33} e Z_{34} , e dos termos R_a e R_s , que representam taxas de deslocamentos das direções “x” e “z”, para os modos simétricos e antissimétricos respectivamente. Essas relações são descritas nas Equações 20 e 21:

$$Z_s = D \left(\frac{k^4}{-i\omega} \right) - i\rho\omega + Z_{11} + Z_{12} + \left(\frac{ikt}{2} \right) (Z_{13} - Z_{14}) + R_s (Z_{13} - Z_{14}), \quad (20)$$

$$Z_a = D \left(\frac{k^4}{-i\omega} \right) - i\rho\omega + Z_{11} - Z_{12} + \left(\frac{ikt}{2} \right) (Z_{13} + Z_{14}) + R_s (Z_{13} + Z_{14}), \quad (21)$$

onde D é a rigidez das placas da face à flexão, k, o número de onda de incidência, e t, a espessura da camada externa do painel. Os termos da matriz de impedância e a relação entre os deslocamentos verticais e horizontais simétricos e antissimétricos são descritos em função dos números de onda transversal, obtidos através da relação entre os números de onda dilatacional e de cisalhamento e o número de onda de incidência livre, conforme as Equações 22 e 23 (MOORE, 1991).

$$k^2 + k_{sd}^2 = k_s^2 \quad (22)$$

$$k^2 + k_{sa}^2 = k_s^2 \quad (23)$$

Os termos da matriz de impedância e a expressão correspondente a Δ , utilizada para o cálculo dos termos da impedância, podem ser obtidos através das Equações 24 a 30:

$$Z_{11} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} [(k^2 k_{sa} \cos(k_{sa} L) \text{sen}(k_{sd} L)) + k_{sa}^2 k_{sd} \text{sen}(k_{sa} L) \cos(k_{sd} L)], \quad (24)$$

$$Z_{12} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} [(k_{sa}^2 k_{sd} \cos(k_{sa} L)) + k^2 k_{sa} \text{sen}(k_{sd} L)], \quad (25)$$

$$Z_{33} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} [(k_{sa}^2 k_{sa} \cos(k_{sa} L) \text{sen}(k_{sa} L)) + k^2 k_{sa} \text{sen}(k_{sa} L) \cos(k_{sa} L)], \quad (26)$$

$$Z_{34} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} [(k_{sa} k^2 \text{sen}(k_{sa} L)) + k_{sa}^2 k_{sa} \text{sen}(k_{sa} L)], \quad (27)$$

$$Z_{13} = \frac{k}{\omega\Delta} \left[\begin{aligned} &(k_{sa} k_{sd} (4\mu k^2 - \rho\omega^2) \\ &(1 - \cos(k_{sa} L) \cos(k_{sa} L)) + \\ &\text{sen}(k_{sa} L) \text{sen}(k_{sa} L) \\ &(2\mu(k^4 + k_{sa}^2 k_{sa}^2) - \rho\omega^2 k^2) \end{aligned} \right], \quad (28)$$

$$Z_{14} = \frac{\rho\omega k k_{sa} k_{sa}}{\Delta} [\cos(k_{sa} L) - \cos(k_{sa} L)], \quad (29)$$

$$\Delta = 2k^2 k_{sa} k_{sa} [1 - \cos(k_{sa} L) \cos(k_{sa} L)] + (k^4 + k_{sa}^2 k_{sa}^2) \text{sen}(k_{sa} L) \text{sen}(k_{sa} L), \quad (30)$$

onde L é a espessura do material do núcleo do painel, k_{sd} e k_{zs} , os números de onda transversais obtidos nas Equações 22 e 23. Ainda para o cálculo das impedâncias, é necessário conhecer as relações dos deslocamentos vertical e horizontal u/w nos modos simétricos e antissimétricos de propagação, descritas nas Equações 31 e 32:

$$\frac{u_s}{w_s} = R_s = \frac{(Z_{13} - Z_{14} - \frac{ikt}{2} (Z_{33} - Z_{34}))}{E_{11}^s t \frac{k^2}{-i\omega} - i\rho\omega + Z_{33} - Z_{34}}, \quad (31)$$

$$\frac{u_a}{w_a} = R_a = \frac{(Z_{13} + Z_{14} - \frac{ikt}{2} (Z_{33} + Z_{34}))}{E_{11}^s t \frac{k^2}{-i\omega} - i\rho\omega + Z_{33} + Z_{34}}, \quad (32)$$

onde E_{11}^s é o módulo de elasticidade aparente da placa da face correspondente a $E/(1-\nu^2)$.

A aplicação das expressões analíticas apresentadas neste tópico aos painéis estudados considera algumas simplificações, já que o objetivo principal deste trabalho não é aprofundar-se nas expressões para os diferentes tipos de painéis divisórios. Assim, não foram considerados os elementos estruturantes dos painéis, como tramas de madeira e os possíveis flancos existentes na montagem dos sistemas, o que acarretaria uma análise mais aprofundada, seguindo outras formulações e estudos, como a Análise Estatística de Energia (PRICE; CROCKER, 1970).

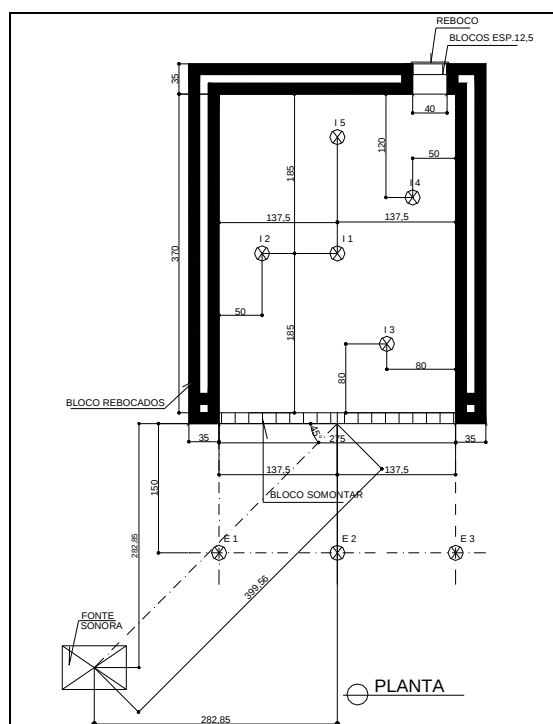
Análise Experimental

Para a determinação das perdas por transmissão de alguns painéis divisórios foram realizados ensaios de campo em câmaras isoladas acusticamente em todas as superfícies, com exceção da área do componente sob ensaio. As medições foram feitas de acordo com procedimento previsto na norma ISO 140/V. Dessa forma, definiu-se o R_{45} , que é o índice de redução sonora a 45° , sendo este o ângulo de incidência da fonte sonora com a normal mediatrix do painel a ser ensaiado.

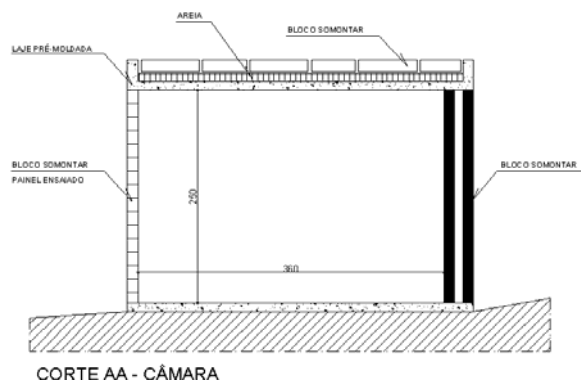
Cada ensaio foi realizado em câmaras construídas pelos fabricantes dos painéis ensaiados. O bloco de concreto celular autoclavado foi ensaiado na câmara 1, com volume de $25,95 \text{ m}^3$, de $2,75 \text{ m} \times 3,70 \text{ m}$, e pé direito médio de $2,50 \text{ m}$ (Figura 3 e Figura 4). O painel de chapa zincada com miolo em EPS, bem como o painel de concreto com miolo em EPS foram ensaiados na câmara 2, de dimensões de $3,70 \text{ m} \times 3,06 \text{ m} \times 2,50 \text{ m}$ (Figuras 5, 6 e 7).



Figura 3 – Câmara de ensaio I



(a)



(b)

Figura 4 – (a) Planta e (b) corte da câmara de ensaio (unidades em centímetros)



Figura 7 – Câmara de ensaio II

Os equipamentos utilizados para as medições foram: Analisador de Frequências em Tempo Real, marca Hewlett Packard, modelo HP3569A, microfone de pressão marca ACO Pacific, modelo ACOJ701XX, e pré-amplificador marca ACO PACIFIC, modelo ACOP 4012XX. Esses equipamentos são classificados como do tipo 0, conforme padrões estabelecidos pela norma ANSI S1.42-1986, com erros máximos de leitura de 0,7 dB na faixa de 1/3 de oitava centrada entre 100 Hz e 4.000 Hz. Também foi utilizado um calibrador de nível de pressão sonora marca CIRRUS, modelo CRL 511E, tipo 1L, em conformidade com a classificação IEC942/1988.

O bloco de concreto celular autoclavado utilizado no ensaio possui dimensões de 48 cm x 28 cm x 12,5 cm. O assentamento é feito sem argamassa pelo sistema de encaixe do tipo “macho/fêmea”, em todo o perímetro do bloco. A área ensaiada possui dimensões de 2,75 m x 2,55 m, revestida em ambos os lados. A face voltada para a incidência do som foi revestida com argamassa, e a face interna, revestida com gesso, ambas com espessura de 3 mm. Essa vedação foi ensaiada na câmara 1. A fonte sonora emitiu o ruído rosa, posicionada a 4 m do centro geométrico da vedação, com direção de incidência a 45° do eixo normal ao plano do painel, passando pela mediatriz do mesmo. A diferença entre a excitação sonora da câmara e o ruído de fundo foi superior a 10 dB, não necessitando de qualquer correção.

O microfone foi posicionado externamente a 1,5 m do painel, conforme representado na Figura 3 por

E1, E2 e E3. A medição do ruído de fundo foi realizada nos três pontos externos, e a medição de nível sonoro equivalente contínuo, Leq, efetuada nos mesmos três pontos, com três leituras por ponto. Internamente, foram definidos cinco pontos com uma distância mínima das paredes de 0,50 m e de 0,87 m entre os pontos. Cada ponto foi medido em três alturas distintas: 1,0 m, 1,2 m e 1,4 m de altura. O tempo de integração da medição foi de 30 segundos, e foram registradas três medições por ponto, um para cada altura do microfone.

A absorção sonora foi medida nos cinco pontos internos, com três medições em cada ponto. Utilizou-se como excitação sonora o ruído rosa com interrupção automática, emitido pelo próprio Analisador de Frequências HP 3569A e integração inversa. Na Figura 3 estão indicadas as posições dos microfones utilizadas na medição da absorção interna da câmara reverberante.

O painel de concreto ensaiado possui 6 cm de espessura, sendo duas faces de concreto maciço de 2 cm cada e o miolo em EPS, com 2 cm. O painel sanduíche formado por duas chapas de aço zincado, espessura de 0,5 mm, e preenchido internamente por poliestireno expandido, foi ensaiado na câmara 2. Os dois painéis foram ensaiados na câmara 2. As medições internas do nível de pressão sonora foram efetuadas em sete pontos, com tempo de integração de 30 s, e o procedimento foi repetido três vezes por ponto. A cada repetição da medição a altura do microfone foi alterada. As medições foram realizadas com o microfone a 1,00 m, 1,20 m e 1,40 m de altura

respectivamente. As medições externas foram feitas a 1,50 m em três pontos (E1, E2, E3) equidistantes e dispostos paralelamente ao painel. As medições externas também tiveram a recorrência de três vezes por ponto, todas com o microfone a 1,20 m de altura. A fonte sonora, assim como a câmara onde foi ensaiado o bloco de concreto celular autoclavado, foi alimentada com ruído rosa, neste caso localizada a 5,80 m do eixo do painel posicionado, como na câmara 1, a uma direção de 45° formados com a normal mediatriz do painel. As primeiras medições foram do ruído de fundo, sendo feitas duas vezes em cada um dos pontos E1, E2, e E3. As Figuras 5 e 6 representam os pontos de medição, as dimensões da câmara e a localização da fonte sonora em planta e em corte. Os equipamentos utilizados na medição foram os mesmos utilizados na medição do bloco de concreto celular autoclavado, já descritos anteriormente.

Utilizou-se a Equação 34, extraída da norma ISO 140/V para tratamento dos dados coletados em campo, onde é calculado o índice de redução sonora a 45°.

$$R_{45} = D_1 - D_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ dB}, \quad (34)$$

onde D1 é a média aritmética dos níveis de pressão sonora medidos nos pontos externos em dB, D2, a média dos níveis de pressão sonora dos pontos internos em dB, e o termo em logaritmo é relativo à absorção do ambiente receptor, com T sendo a média dos tempos de reverberação em segundos e T₀, um valor de referência igual a 0,5 s. O resultado desse procedimento é um espectro da perda por transmissão por terças de oitava, apresentado nas Tabelas 1 a 3.

Terças de bandas de oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
R _{w45}	36	35	34	36	37	35	35	39	38	40	44	44	46	52	54	59	59	63	65	68	72

Tabela 1 – Espectro da perda por transmissão do bloco de concreto autoclavado

Terças de bandas de oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
R _{w45}	23	26	22	22	25	23	21	24	17	22	26	23	29	28	29	30	33	37	39	42	45

Tabela 2 – Espectro da perda por transmissão do painel de concreto com miolo em EPS

Terças de bandas de oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
R _{w45}	23	26	22	22	25	23	21	24	17	22	26	23	29	28	29	30	33	37	39	42	45

Tabela 3 – Espectro da perda por transmissão do painel de chapa zincada+EPS

Comparação entre resultados experimentais e modelos analíticos

Dos painéis estudados, o cálculo do isolamento sonoro do bloco de concreto celular autoclavado foi feito através das equações de painéis maciços propostas por Gerges (Equações 1, 3 e 4) e Sewell e Cremer (Equações 6 e 8). O painel de concreto com miolo de EPS, painel de PVC, lã de rocha e EPS, e o painel de chapa zincada e EPS foram modelados como painéis sanduíches, seguindo o modelo de Moore (Equação 19). Por último, o painel de gesso acartonado segue o modelo de painéis duplos, combinando as equações para painéis maciços de Gerges (Equações 13, 14 e 15) e de Sewell e Cremer (Equações 6 e 8) com a de paredes duplas de Gerges (Equações 13, 14 e 15).

As características utilizadas para o procedimento numérico foram módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, amortecimento mecânico, densidade superficial e a geometria dos painéis. A partir delas, outras propriedades foram calculadas, como as frequências fundamentais, a frequência crítica e a rigidez à flexão.

No cálculo da perda por transmissão da vedação composta de blocos de concreto celular autoclavado, com 12,5 cm de espessura, densidade superficial de $56,5 \text{ kg/m}^2$, $E=1,7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\eta=0,015$, a frequência crítica resultou em 84 Hz, tanto pela equação de Sewell e Cremer (Equações 6 e 8) quanto pela equação de Kinsler (Equação 1). Foi utilizada a taxa de amortecimento (η) de 0,015.

Observa-se no gráfico apresentado na Figura 8 uma aproximação entre as expressões propostas por Sewell e Cremer (Equações 6 e 8) e o procedimento experimental nas frequências acima de 500 Hz. Abaixo dessa frequência, as equações propostas por Gerges (Equações 13, 14 e 15) e Sewell e Cremer (Equações 6 e 8) apresentam resultados compatíveis entre si, mas que não se aproximam do experimental, estando abaixo deste. O fato de essa componente ensaiada apresentar frequência crítica baixa (84 Hz) faz com que as equações utilizadas sejam a Equação 8, proposta no trabalho por Cremer, e a Equação 4, proposta por Gerges, para a faixa de frequência acima da coincidência. Nessa região, a rigidez à flexão e os ângulos de coincidência possuem maior influência

que a densidade superficial. A curva medida da perda de transmissão não apresenta nenhuma frequência com queda acentuada, já que existem várias frequências com valores mais baixos, tais como em 160, 400 e 630 Hz. Após 630 Hz há um crescimento da curva, sugerindo que esta seja a frequência crítica, o que não é confirmado nos cálculos teóricos.

Conforme já mencionado, a perda por transmissão do painel composto de PVC+EPS+lã de rocha foi calculada a partir da equação de Moore (Equação 19). Para tal, utilizou-se o módulo de elasticidade do EPS, de $2,28 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$, a densidade de 1.500 kg/m^3 , o coeficiente de Poisson de 0,33, além da espessura da camada de EPS de 0,025 m. Na face interna, constituída de lã de rocha, foram utilizados os mesmos parâmetros para o cálculo, que tinham os seguintes valores: módulo de elasticidade $12,24 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, densidade de 64 kg/m^3 , o coeficiente de Poisson de 0,19 e a espessura da camada de 0,04 m. Para esse procedimento foi desconsiderada a trama de madeira que estrutura o painel e a lâmina de PVC que reveste o mesmo.

Pode-se observar, a partir do gráfico da Figura 9, uma aproximação entre o modelo experimental e o analítico nas frequências até 500 Hz. A partir dessa frequência o resultado do procedimento analítico aponta uma diferença muito grande com o experimental. A perda por transmissão resultante do procedimento analítico é superior ao resultado experimental nas altas frequências. As simplificações feitas para o cálculo a partir da equação de Moore (Equação 19) podem ser um dos motivos da discrepância existente entre os resultados das perdas por transmissão.

Outro painel sanduíche aqui apresentado é o painel de concreto com miolo de EPS. Esse elemento divisório apresenta as três camadas componentes de espessuras iguais. As expressões analíticas para painéis sanduíches partem do pressuposto de que as placas das faces externas são menos espessas se comparadas com o núcleo. Tendo em vista a dificuldade de se encontrarem expressões analíticas para esse tipo de painel, foi utilizado o mesmo modelo de Moore (Equação 19) e analisado o comportamento da mesma placa caso fosse composta apenas de uma camada de 6 cm de concreto, a partir das equações utilizadas para paredes simples.

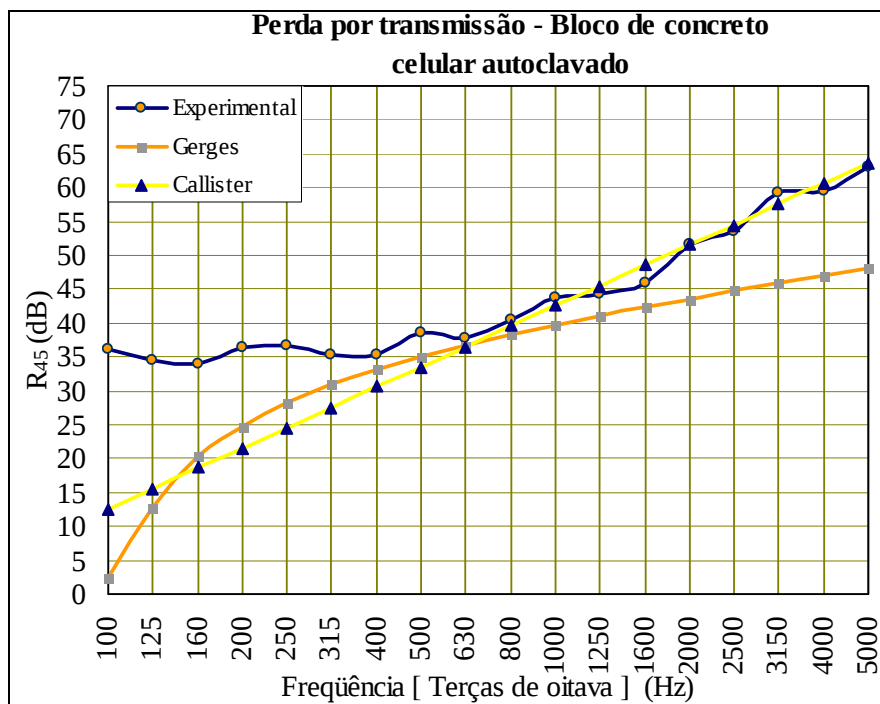


Figura 8 – Resultado da perda por transmissão da vedação constituída de blocos de concreto celular autoclavado

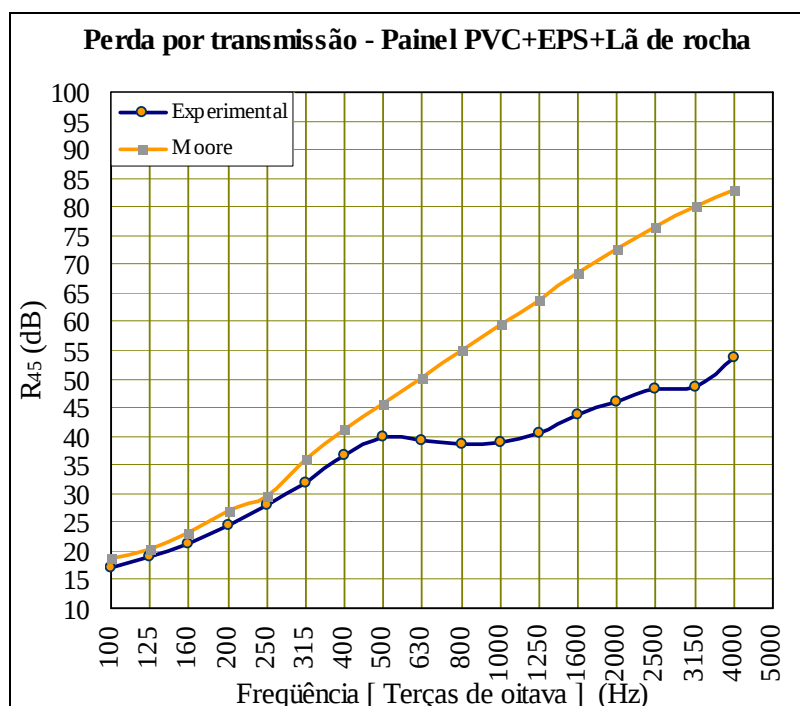


Figura 9 – Resultado comparativo da perda por transmissão do painel constituído de PVC+EPS+lã de rocha

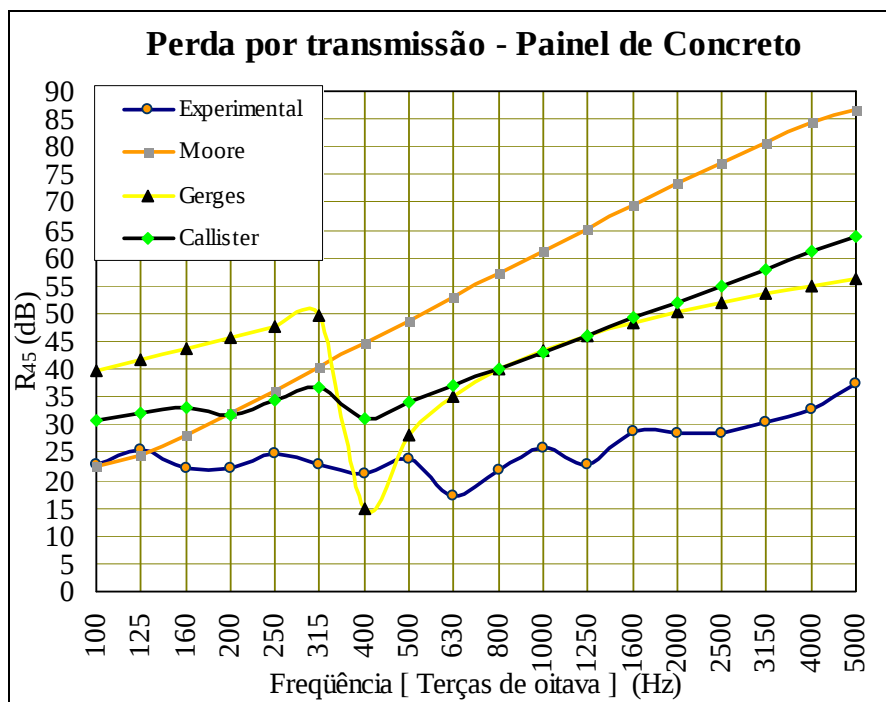


Figura 10 – Resultado comparativo da perda por transmissão do painel concreto+EPS

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 10 indicam que existe uma discrepância entre a solução analítica de Moore (painel sanduíche) e o resultado experimental. Mais uma vez a perda de transmissão resultante da equação de Moore (Equação 19) e do resultado experimental apenas se aproximou nas baixas frequências. Nesse caso, essa aproximação ocorreu nas frequências de 100 e 125 Hz, e acima dessas frequências houve uma diferença muito maior entre os resultados da perda por transmissão. Avaliando os resultados das expressões analíticas para painéis maciços, sugerindo um painel de concreto, era de se esperar que o resultado numérico fosse superior ao experimental. Entretanto, pode-se observar que a variação da perda por transmissão com o aumento da frequência correspondeu ao resultado experimental. A queda na perda por transmissão, que nas equações de Sewell e Cremer (Equações 6 e 8) e Gerges (Equações 1, 3 e 4) ficou próxima de 400 Hz, no resultado experimental foi próxima de 630 Hz. Pode-se dizer que, para esse modelo de painel divisório, a comparação dos resultados não foi satisfatória.

Por fim, o painel composto de EPS revestido de chapa zincada foi avaliado por meio da equação para painéis sanduíches e das equações para painéis simples. Neste caso, o núcleo do painel, constituído de EPS, corresponde à maior parcela da espessura do sistema, e as chapas de aço

zincado possuem 0,50 mm de espessura. Sendo assim, considerou-se que o painel não se comporta como um sanduíche, mas como um painel maciço, com uma lâmina de revestimento.

Pode-se observar, a partir do gráfico da Figura 9, uma aproximação entre o modelo experimental e o analítico nas frequências até 500 Hz. A partir dessa frequência o resultado do procedimento analítico aponta uma diferença muito grande com o experimental. A perda por transmissão resultante do procedimento analítico é superior ao resultado experimental nas altas frequências. As simplificações feitas para o cálculo a partir da equação de Moore (Equação 19) podem ser um dos motivos da discrepância existente entre os resultados das perdas por transmissão.

Outro painel sanduíche aqui apresentado é o painel de concreto com miolo de EPS. Esse elemento divisório apresenta as três camadas componentes de espessuras iguais. As expressões analíticas para painéis sanduíches partem do pressuposto de que as placas das faces externas são menos espessas se comparadas com o núcleo. Tendo em vista a dificuldade de se encontrarem expressões analíticas para esse tipo de painel, foi utilizado o mesmo modelo de Moore (Equação 19) e analisado o comportamento da mesma placa caso fosse composta apenas de uma camada de 6 cm de concreto, a partir das equações utilizadas para paredes simples.

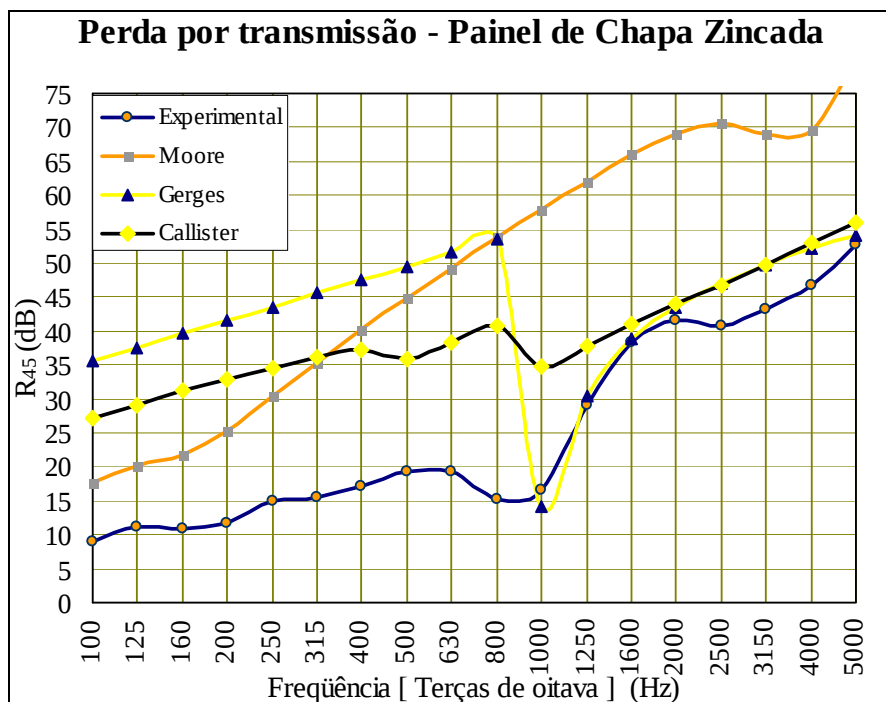


Figura 11 – Resultado comparativo da perda por transmissão do painel de EPS revestido de chapa zincada

O resultado apresentado no gráfico da Figura 11 não identifica nenhuma das curvas como a mais adequada a esse modelo de elemento divisorio. Porém, pode-se perceber que existe uma aproximação entre a frequência dita “crítica”, expressa nas equações de Sewell e Cremer (Equações 6 e 8) e Gerges (Equações 1, 3 e 4), e uma queda existente na perda por transmissão medida. Abaixo da frequência crítica, o modelo de painel sanduíche se aproxima mais do experimental, mas existe ainda uma diferença na perda por transmissão. Acima da frequência crítica, os modelos de paredes simples se aproximam do experimental.

Discussões e considerações finais

Para painéis maciços e duplos espaçados com uma camada de ar interna, foi possível observar uma boa concordância entre as expressões analíticas propostas por Sewell e Cremer (Equações 6 e 8) e Gerges (Equações 1, 3 e 4) e os resultados experimentais. Entretanto, para painéis sanduíche, os resultados experimentais não se aproximam satisfatoriamente das expressões analíticas disponíveis na literatura.

O estudo de painéis sanduíches não apresenta o grau de desenvolvimento dos painéis duplos e simples. No caso dos painéis sanduíches, o mecanismo de transmissão do som é mais

complexo e, tendo em vista que o seu uso como sistema de vedação é mais recente, existem poucos trabalhos que apresentem resultados experimentais comparados aos analíticos.

As aproximações entre resultados experimentais e analíticos mostram que as expressões não podem ser utilizadas como únicos indicativos da perda por transmissão desses elementos, tornando-se necessário o procedimento *in situ* para determinar o isolamento sonoro do sistema construtivo. Mesmo os resultados experimentais devem ser questionados, já que a construção do elemento na edificação pode mudar a condição de isolamento sonoro desse elemento. Para se obter o isolamento sonoro do elemento construtivo, é realmente necessário ensaiar as condições construtivas de montagem e interações entre o elemento em questão e outros adjacentes, como janelas, portas e estrutura, por exemplo.

Através deste trabalho é possível constatar que a determinação da perda por transmissão dos elementos construtivos não é uma tarefa simples. No método experimental é exigido o uso de equipamentos e câmaras de ensaio específicas, levando um tempo considerável para a montagem e a realização dos ensaios. No procedimento analítico é necessária a determinação apropriada do modelo numérico a ser seguido. Tendo em vista os cuidados que devem ser tomados para a realização de ensaios, a determinação da perda por

transmissão de elementos divisórios através de equações pode resultar em uma diferença grosseira entre o isolamento real e o previsto.

As diferenças entre os resultados dos procedimentos analíticos e experimentais demonstram a dificuldade em prever o isolamento de um componente construtivo através de equações. Em nenhuma das equações estão contemplados os possíveis flancos, que reduzem o isolamento do elemento analisado. Entretanto, algumas aproximações positivas como a comparação de resultados experimentais e analíticos do bloco de concreto celular autoclavado, por exemplo, demonstram que essas expressões podem ser um indicativo do comportamento do isolamento sonoro de alguns elementos, como os painéis maciços.

A complexidade dos elementos divisórios, tornando os painéis leves e de pouca espessura, e geralmente compostos de mais de um material ou de elementos estruturantes, torna o processo analítico da perda por transmissão também uma tarefa complexa. Os resultados comparativos para painéis sanduíches demonstram que as equações pesquisadas para esse tipo de material não podem ser utilizadas para prever o isolamento nem para indicar o comportamento de isolamento sonoro desses painéis. Para isso, é necessário que desenvolver equações que contemplem a complexidade compositiva dos elementos divisórios, como o que ocorre no cálculo da perda por transmissão baseada em simulações numéricas fundamentadas em Análise Estatística de Energia.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Norma CB 02:**

136.01.001. Desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2004.

CALLISTER, J. R.; GEORGE, A. R.; FREEMAN, G. E. An empirical scheme to predict the sound transmission of single thickness panels. **Journal of Sound and Vibration**, v. 222, n. 1, p. 145-151, 1999.

CRAIK, R. J. M.; SMITH, R. S. Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: airborne sound. **Applied Acoustics**, n. 61, p. 223-245, 2000.

PRICE, A. J.; CROCKER, M. J. Sound transmission through double panels using statistical energy analysis. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 47, n. 3 (parte 1), p. 684-693, 1970.

CREMER, L. **Theorie de Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall**. Akust, Z. 81-102, 1942.

FAHY, Frank; WALKER, John. **Fundamentals of noise and vibration**. Londres: E&FN Spon, 1998. 518 p.

GARCIA, Danielly Borges. **Análise do isolamento sonoro de sistemas construtivos residenciais estruturados em aço**. 2004. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

GERGES, Samir N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis: NR, 2000. 600 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Buildings Elements – Part V: Field Measurements of Airborne Sound Insulation of facades elements and facades**. ISO-140/5, 1978.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics – Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room**. ISO-354, 1978.

KINSLER, Lawrence E.; FREY, Austin R.; COPPENS, Allan B.; SANDERS, James V. **Fundamental of acoustics**. Nova York: John Wiley & Sons, 1982. 480 p.

LJUNGGREN, Sten. Airborne sound insulation in thin walls. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 89, n. 5, p. 2324-2337, 1991.

MOORE, J. A.; LYON, R. H. Sound transmission loss characteristics of sandwich panel construction. **Journal of Acoustics Society of America**, v. 89, n. 2, p. 777-791, 1991.

SEWELL, E. C. Transmission of sound transmission through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. **Journal of Sound and Vibration**, n. 12, p. 21-32, 1970.

SHARP, B. H. Prediction methods for the sound transmission of building elements. **Noise Control Engineering**, n. 11, p. 53-73, 1978.