

Condicionamento Acústico Interior. Modelação e Avaliação Experimental da Absorção Sonora de Sistemas com Painéis de Madeira Perfurados



PATRAQUIM, Ricardo (a)
PATRÍCIO, Jorge (b),

(a) Tecniwood-Madeiras Técnicas, Lda., Av. do Brasil, nº200
A, 1700-79 Lisboa, Portugal.

E-mail: ricardo.patraqum@tecniwood.pt

(b) L.N.E.C. - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do
Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

E-mail: jpatricio@lneec.pt

PACS: 43.55.Ev

Abstract

The sound field perceived inside rooms is a combination of direct sound and of sound reflected on room surfaces. Thus, the surface has a primary role in the acoustic quality of enclosed spaces.

In order to enhance the sound absorption area of the room surfaces, ceilings and walls are usually coated using perforates, with an air cavity defined by their surface and the rigid wall. This cavity can be, or not, filled with porous absorbent materials. So, in the development and implementation of these systems one should assess the factors that can affect their acoustic performance.

This paper presents a laboratory study on how physical and geometrical quantities influence the sound absorption of panels, perforated with circular holes. The physical phenomena involved in the propagation of sound waves in these systems, is modeled based on the conversion of acoustic impedance of a single hole in an average value corresponding to the proportion of the open area. Afterwards, using the concept of the transfer matrix, the sound absorption of these systems is theoretically predicted. A parametric experimental study of the panels sound absorption variation, based on successive changes in their assembly, is also presented.

Resumo

O som percebido no interior de salas é uma combinação de som directo (proveniente directamente de fontes sonoras) e de reflexões ocorridas nas superfícies (e objectos) da sala. Assim sendo, o revestimento destas superfícies assume um papel primordial na qualidade acústica das salas.

De modo a incrementar a absorção sonora das superfícies de salas (tectos e paredes) é habitual revesti-las com painéis de madeira perfurados, deixando uma cavidade entre estes e a parede ou tecto de suporte, que pode ser, ou não, preenchida com material poroso. Assim sendo, no desenvolvimento e aplicação destes sistemas importa, pois, avaliar quais os factores que afectam o seu comportamento acústico.

Esta comunicação apresenta um estudo laboratorial sobre as grandezas físicas e geométricas que influenciam a absorção sonora de painéis perfurados, com furos circulares. Inicialmente, modelam-se os fenómenos físicos envolvidos na propagação de ondas sonoras, com base na conversão da impedância acústica de um único furo num valor médio, correspondente à fracção de área aberta do painel. De seguida, utilizando o conceito da matriz transferência, prevê-se teoricamente a absorção sonora proporcionada por estes sistemas. Posteriormente, efectua-se também uma análise paramétrica,

experimental, relativamente à variação da absorção sonora de painéis com perfurações circulares, mas com alterações sucessivas na montagem.

1. Introdução

Os painéis de madeira perfurados são desde há muitos anos utilizados como sistemas para promover a absorção sonora em espaços fechados. Nestes sistemas, definidos pela montagem dos painéis perfurados afastados da parede de suporte de modo a criar uma caixa-de-ar no tardo, que pode ser, ou não, preenchida por um material poroso, o processo de absorção sonora consiste em provocar uma ressonância - a da massa de ar contida nos furos (gargalos) de uma cavidade ressoante - tal como num ressoador de Helmholtz.

No desenvolvimento e aplicação destes sistemas importa avaliar quais os factores que afectam o seu comportamento acústico. Para tal, neste estudo fazem-se duas abordagens, uma pela via da modelação física destes sistemas absorsores sonoros, e a outra, pelos ensaios realizados em câmara reverberante.

Historicamente Morse et al. [1] investigaram a absorção sonora em 1940. Posteriormente, em 1947, Bolt estudou a absorção sonora em painéis perfurados [2], considerados como um sistema absorsores ressonante. Nesse trabalho, Bolt identificou que o diâmetro dos furos, o seu número (densidade), bem como a espessura do painel têm um papel essencial no desempenho do sistema. Em 1951, Ingard e Bolt [3] postularam que a absorção sonora tem uma grande dependência das características do painel perfurado, bem como da caixa-de-ar (sua dimensão e, existência, ou não, de material absorsores sonoro no interior). Posteriormente, em 1953, Ingard [4] publica um dos mais importantes artigos sobre este assunto, cujas conclusões, nomeadamente sobre as correcções à resistência acústica de furos e à interacção entre eles, que são utilizadas na modelação de painéis perfurados.

De acordo com o trabalho experimental desenvolvido por Callaway e Ramer [5], em 1952, demonstrou-se que a caixa-de-ar tem, sem dúvida, grande influência na absorção sonora do sistema ressonante criado.

Outro parâmetro importante no desempenho acústico destes sistemas é a forma do furo. Smits e Kosten apresentaram, em 1951 [6], um trabalho relativamente a placas ranhuradas que, posteriormente, Kristiansen e Vigran [7] utilizaram no seu estudo de desenvolvimento deste tipo de painéis.

Os painéis perfurados, com furos de diâmetro elevado ou ranhuras de grande largura (superiores à camada limite viscosa) têm, inerentemente, pouca resistência acústica, tendo

de se recorrer à utilização de materiais porosos, imediatamente após as aberturas nos furos (ou no interior dos mesmos), de modo a incrementar a absorção sonora. Delany e Bazley em 1969 [8] desenvolveram fórmulas semi-empíricas para modelar a impedância acústica específica destes materiais e Davern [9] investigou experimentalmente a sua utilização, tendo verificado que a sua porosidade, espessura e densidade são os parâmetros fundamentais na caracterização da capacidade de absorção sonora exibida por sistemas deste tipo. Este autor, juntamente com Dunn [10], desenvolveu a modelação de absorsores multicamada.

2. Modelação da absorção sonora de painéis perfurados

Os métodos de modelação da absorção sonora de painéis perfurados baseiam-se na conversão da impedância acústica de um único furo num valor médio correspondente à área aberta do painel. Considera-se o painel perfurado como um conjunto de tubos curtos, de comprimento idêntico à espessura do painel, e a parte não perfurada é feita de um material muito denso e rígido, e, portanto, perfeitamente reflector. Assume-se ainda que o comprimento de onda do som que se propaga é suficientemente grande quando comparado com a dimensão da secção transversal do tubo (*i.e.*, furo). Este método inclui os termos devidos à viscosidade do ar, à radiação (de um orifício num plano) e aos efeitos da reactância da caixa-de-ar.

Estes sistemas acústicos são então estudados utilizando o conceito de matriz transferência, método que permite determinar a impedância acústica normal (ou superficial) de uma interface de um material recorrendo à continuidade da velocidade da partícula (em ambos os lados da interface) e conhecendo as propriedades acústicas do meio.

No caso de existência de material absorsores na caixa-de-ar é importante determinar as características de propagação de ondas planas nesse meio, tornando-se necessário conhecer o número de onda complexo, k_a , e a impedância característica complexa, Z_{ca} . Na impossibilidade de os avaliar experimentalmente, pode-se recorrer aos modelos empíricos macroscópicos, tais como o proposto por Delany e Bazley [8].

A partir do conhecimento da impedância acústica é possível determinar o coeficiente de absorção sonora para incidência normal, e, posteriormente, estimar o respectivo valor para campo difuso.

2.1 Reflexão de ondas planas numa superfície e relação da impedância acústica com a absorção sonora

O efeito que uma superfície (ou descontinuidade no meio de propagação) tem na propagação de ondas sonoras

pode ser caracterizado por quatro grandezas inter-relacionadas: a impedância característica do meio (Z_c), a admitância (β), o factor de reflexão (R) e o coeficiente de absorção sonora (α). As primeiras três grandezas dão informação como a magnitude e a fase da onda sonora incidente se altera ao encontrar uma superfície. A última, o coeficiente de absorção, apenas dá informação como a energia sonora se atenua com a reflexão.

Quando as ondas sonoras interagem com os materiais expostos, parte da energia contida na onda incidente é reflectida, outra é transmitida e a restante é dissipada no interior dos materiais. Neste contexto, quando se considera a absorção sonora, a parte da energia incidente que interessa é a que não foi reflectida, escrevendo-se o balanço da energia do seguinte modo:

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_{t+a}}{E_i} \quad (1)$$

onde E_{t+a} é a energia não reflectida, E_i a energia incidente e E_r a energia reflectida.

Como a intensidade de uma onda plana é proporcional ao quadrado da pressão sonora ($I \propto p^2$), a intensidade da onda reflectida é menor que a incidente de um factor $|R|^2$ (onde R , factor de reflexão, é um número complexo). Assim, o coeficiente de absorção sonora, α , é dado por:

$$\alpha = \frac{E_{t+a}}{E_i} = 1 - |R|^2 \quad (2)$$

Admite-se que a superfície do material é plana e suficientemente grande (quando comparada com o comprimento de onda com interesse).

Em alternativa, as propriedades acústicas de uma superfície podem ser descritas pela sua impedância (*wall impedance*) Z_s . Esta é definida como a relação entre a pressão sonora no ponto de superfície e a componente normal à superfície da velocidade de *partícula*, v_x , no mesmo ponto:

$$Z_s = \left(\frac{p}{v_x} \right)_{x=0} \quad (3)$$

Geralmente esta grandeza é complexa, uma vez que a pressão sonora e a velocidade normal da partícula não estão em fase.

Normalmente relaciona-se a impedância da superfície (impedância superficial) com a impedância característica do ar, $Z_0 = c_0 \rho_0 \approx 416 \text{ N s} / \text{m}^3$, num parâmetro chamado

de impedância superficial específica (*specific wall impedance*):

$$\xi = r + ix = \frac{Z_s}{Z_0} \quad (4)$$

No caso de se considerar a propagação de ondas planas harmónicas, pode-se relacionar a impedância acústica superficial com o factor de reflexão e, consequentemente - expressão (2) -, com a absorção sonora, através de:

$$Z_s = \frac{Z_c}{\cos \theta_0} \left(\frac{1+R}{1-R} \right) \Leftrightarrow R = \frac{Z_s \cos \theta_0 - Z_c}{Z_s \cos \theta_0 + Z_c} = \frac{\xi \cos \theta_0 - 1}{\xi \cos \theta_0 + 1} \quad (5)$$

onde $Z_c = c_{\text{meio}} \rho_{\text{meio}}$ é a impedância característica do meio e θ_0 é o ângulo de incidência. Deste modo, a expressão (2) pode ser reescrita:

$$\alpha(\theta_0) = 1 - \left| \frac{\xi \cos \theta_0 - 1}{\xi \cos \theta_0 + 1} \right|^2 = \frac{4r \cos \theta_0}{(r \cos \theta_0 + 1)^2 + (x \cos \theta_0)^2} \quad (6)$$

onde r e x são, respectivamente, a resistência acústica específica e a reactância acústica específica da superfície.

Assim, para se determinar a absorção sonora de uma superfície basta conhecer a impedância da mesma.

2.2 Absorvedores localmente reactivos

Para incidência oblíqua de ondas planas distinguem-se dois tipos de sistemas absorvedores: *i)* localmente reactivos (*locally reacting*); e *ii)* não-localmente reactivos (*bulk-reacting* ou *extended reacting*).

Num absorvedor localmente reactivo a velocidade normal à superfície só depende da pressão sonora nesse ponto (e não da distribuição da pressão sonora sobre a superfície, *i.e.*, da pressão sonora noutros pontos da superfície). Uma vez que a onda sonora plana que atinge a superfície com uma incidência oblíqua não excita todos os pontos da superfície com a mesma fase (estas diferenças de fase dependem do ângulo de incidência), apenas as superfícies localmente reactivas apresentam uma impedância superficial independente do ângulo de incidência. Nos absorvedores localmente reactivos a propagação paralela à superfície é inibida como, por exemplo, em ressoadores Helmholtz com o volume compartimentado ou em absorvedores porosos encostados a uma caixa-de-ar compartimentada.

A reacção local é uma boa aproximação à modelação do comportamento de absorvedores com uma resistividade relativamente elevada, obrigando a que a onda sonora transmitida

através da superfície seja forçada a redireccionar-se na direcção normal à superfície.

2.3 Coeficiente de absorção sonora para campo difuso

O coeficiente de absorção sonora para incidência aleatória, *i.e.* campo difuso, também chamado de coeficiente de absorção sonora estatístico, é dado pela expressão [11]:

$$\alpha_{st} = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (7)$$

O princípio em que assenta a análise estatística tem em consideração que a superfície absorvora é infinita e que a distribuição mais provável da energia sonora numa sala é aquela em que a densidade de energia é a mesma em todos os pontos, sendo o fluxo de energia em qualquer direcção o mesmo (campo difuso). Na expressão (7), a introdução da função seno traduz a probabilidade da energia provir de uma dada direcção e a função co-seno a projecção da área receptora na respectiva direcção ortogonal.

Se o elemento absorvora for considerado localmente reactivo, então, combinando as expressões (4), (6) e (7) obtém-se [12]:

$$\alpha_{st} = \frac{8r}{r^2 + x^2} \left[1 - \frac{r}{r^2 + x^2} \ln(1 + 2r + r^2 + x^2) + \frac{1}{x} \frac{r^2 - x^2}{r^2 + x^2} \arctan\left(\frac{x}{1+r}\right) \right] \quad (8)$$

A partir da expressão anterior verifica-se que o valor máximo que atinge um elemento absorvora localmente reactivo é

$$\alpha_{st} = 0.955, \text{ que ocorre quando } |\xi| = 1.6 \text{ e } \arctan\left(\frac{x}{r}\right) \approx \pm 30^\circ.$$

Para absorvora de reacção extensa, a expressão (7) só pode ser calculada numericamente, podendo o integral ser aproximado por:

$$\alpha_{st} = 2\pi \sum_{m=1}^M [\alpha(\theta_m) \sin(\theta_m) \cos(\theta_m) \Delta\theta] \quad (9)$$

onde M é um número inteiro e:

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{2M}$$

Vários trabalhos, designadamente [13], referem que existe pouca concordância entre os resultados de ensaios laboratoriais para a medição da absorção sonora em câmaras reverberantes, α_{Sab} , e o valor calculado através da expressão (7), nomeadamente na baixas frequências. Existem várias razões para tal, como sejam a dimensão finita das amostras e a difracção das ondas sonoras ocorrida nas arestas das mesmas, bem como o facto de, por vezes, o campo sonoro estabelecido no interior das câmaras reverberantes não ser “ab-

solutamente” difuso, particularmente nas baixas frequências. Aliás, estas são algumas das causas para que, frequentemente, em ensaios laboratoriais se obtenham valores para a absorção sonora superiores à unidade ($\alpha_{Sab} > 1.0$).

2.4 Impedância acústica superficial do sistema

A impedância acústica superficial do painel perfurado, representado na figura 1, é dada por:

$$Z_{sistema} = Z_{s\text{painel}} + Z_{s\text{interior}} \quad (10)$$

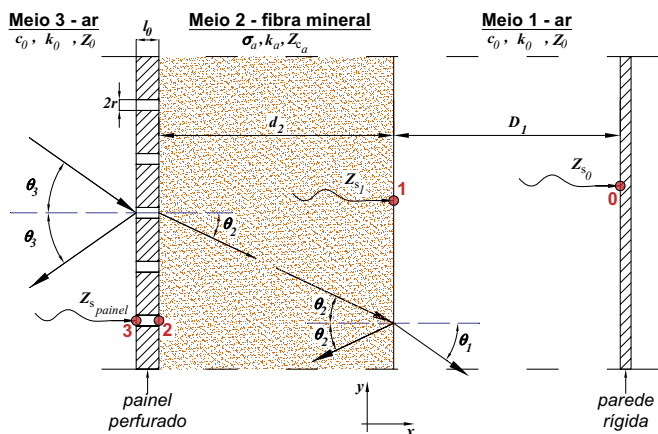


Figura 1. Sistema composto por painel perfurado e caixa-de-ar parcialmente preenchida.

Se ϵ representar a fracção de área aberta do painel, a impedância acústica superficial do painel relaciona-se com a impedância acústica de um furo através de:

$$Z_{s\text{painel}} = \frac{Z_{s\text{tubo}}}{\epsilon} \quad (11)$$

A impedância acústica de um tubo circular de raio r e de comprimento $l_0 < \lambda$ é dada pela expressão ([14], [15]):

$$Z_{s\text{tubo}} = i\omega\rho_0 l_0 \left[1 - \frac{2 J_1(x\sqrt{-i})}{(x\sqrt{-i}) J_0(x\sqrt{-i})} \right]^{-1} \quad (12)$$

sendo $x = r \sqrt{\frac{\omega\rho_0}{\eta}} = \sqrt{2} \frac{r}{d_v}$, um parâmetro que

indica a importância das forças de inércia relativamente às forças de origem viscosa e onde:

η é a viscosidade do ar ($\eta \approx 1.84 \times 10^{-5}$ poiseuille);

l_0 é o comprimento do tubo;

ρ_0 é a densidade do ar ($\rho_0 = 1.21 \text{ kg m}^{-3}$);

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular;

J_n é a função de Bessel de ordem n ;

$dv = \sqrt{\frac{2\eta}{\omega\rho_0}} \approx \frac{2.2mm}{\sqrt{f}}$ é a dimensão da camada limite viscosa;

Baseado nas simplificações de Crandall [15], obtêm-se as seguintes expressões:

a) Para $x < 1$, fazendo a expansão em série das funções de Bessel e utilizando apenas os dois primeiros termos:

$$x < 1 \Rightarrow Z_{s_{tubo}} \approx \frac{8\eta l_0}{r^2} + i \frac{4}{3} \omega\rho_0 l_0 \quad (13)$$

b) Para utilizando o facto de $x \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{J_1}{J_0} \rightarrow -i$:

$$x > 10 \Rightarrow Z_{s_{tubo}} \approx \sqrt{2\omega\rho_0\eta} \frac{l_0}{r} + i \left(\sqrt{2\omega\rho_0\eta} \frac{l_0}{r} + \omega\rho_0 l_0 \right) \quad (14)$$

c) Para valores intermédios, Maa [16] propõe a seguinte expressão:

$$1 < x < 10 \Rightarrow Z_{s_{tubo}} \approx \left(\frac{8\eta l_0}{r^2} \right) \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + i \omega\rho_0 l_0 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{x^2}{2}}} \right) \quad (15)$$

2.5 Termos correctivos

Estas expressões só são aplicáveis a tubos de comprimento infinito. Para o caso de tubos (furos) de comprimento finito (placas perfuradas) deverão ser adicionados termos correctivos, quer à componente resistiva (parte real), quer à reactiva (parte imaginária), devidos essencialmente aos efeitos da viscosidade em torno do orifício e no interior dos tubos, e da impedância radiativa dos orifícios. Se se considerar a existência de vários destes tubos (furos) próximos uns dos outros, também se deve incluir os efeitos de interacção entre eles. Deste modo obtêm-se o seguinte termos correctivos:

$$Correct = \left(2\sqrt{2\omega\rho_0\eta} + \rho_0 c \pi^2 \left(\frac{2r}{\lambda} \right)^2 + i \omega\rho_0 \delta \right) \quad (15)$$

O primeiro termo, deduzido por Ingard [4], contabiliza a dissipação da energia, devido à viscosidade η , que ocorre perto dos orifícios de entrada e no interior dos tubos. Os dois últimos termos representam a radiação acústica, e foi deduzido por Morse e Ingard [17]. O parâmetro δ no termo imaginário da expressão (15) representa a correcção à inércia

mássica à saída dos orifícios e, se se tiver em consideração a interacção entre eles, é dada por ([18], [11]):

$$\delta = \frac{16r}{3\pi} \cdot \left(1 - 1.47\sqrt{\epsilon} + 0.47\sqrt{\epsilon^3} \right) \quad (16)$$

Deste modo, para painéis acústicos perfurados, de espessura de 12 mm e com furos de 8 mm de diâmetro, espaçados de 32 mm, a expressão simplificada, válida para $f > 15$ Hz, é dada por:

$$Z_{s_{tubo}} \approx \left[\sqrt{8\omega\rho_0\eta} \left(1 + \frac{l_0}{2r} \right) + \rho_0 \frac{(2r\omega)^2}{16c} \right] + i \left[\sqrt{8\omega\rho_0\eta} \left(1 + \frac{l_0}{2r} \right) + \omega\rho_0 (l_0 + \delta) \right] \quad (17)$$

2.6 Impedância acústica superficial da cavidade ressonante

Para se determinar a impedância acústica superficial na face oculta do painel perfurado (ponto 2, da figura 1), utiliza-se o conceito da matriz de transferência, que permite determinar a pressão sonora e a velocidade de partícula num ponto ($i+1$), conhecendo os seus valores noutro ponto (i), distanciados de d_i , num meio caracterizado por uma impedância característica Z_{c_i} e por uma constante de propagação (ou número de onda complexo) k_i :

$$\begin{bmatrix} p_{i+1} \\ v_{x_{i+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_{x_i} d_i) & j \frac{Z_{c_i} \sin(k_{x_i} d_i)}{\cos\theta_i} \\ j \frac{\cos\theta_i \sin(k_{x_i} d_i)}{Z_{c_i}} & \cos(k_{x_i} d_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_i \\ v_{x_i} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Em que k_{x_i} é dado pela Lei de Snell:

$$k_{x_i} = \sqrt{k_i^2 - (k_{i+1} \sin\theta_{i+1})^2} \quad (19)$$

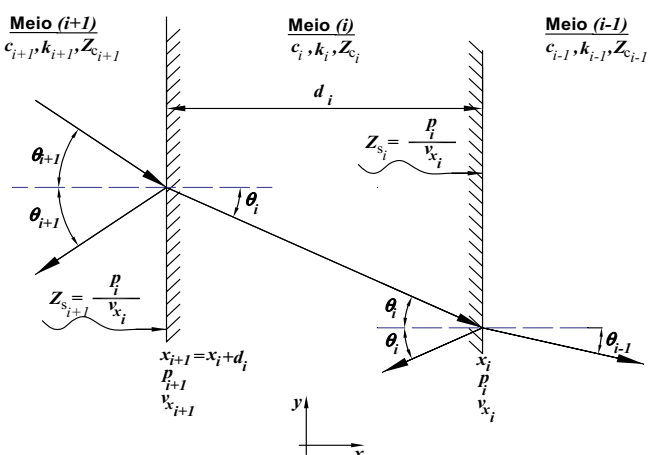


Figura 2. Geometria para modelação da matriz transferência para vários meios

Conhecidas a impedância característica e a constante de propagação de um meio, o método da matriz transferência permite converter essa informação na impedância superficial específica do meio. Para tal, só se tem de dividir a expressão de P_{i+1} pela expressão de $v_{x_{i+1}}$, obtendo-se:

$$Z_{s_{i+1}} = \frac{Z_{c_i}}{\cos\theta_i} \cdot \frac{Z_{s_i} + j \frac{Z_{c_i}}{\cos\theta_i} \tan(k_{x_i} d_i)}{\frac{Z_{c_i}}{\cos\theta_i} + j Z_{s_i} \tan(k_{x_i} d_i)} \quad (20)$$

Para o caso de existirem apenas dois meios em série e adjacentes em x_i a uma parede rígida tal que $Z_{s_i} = \infty$, a impedância específica do meio imediatamente adjacente à parede é dada por:

$$Z_{s_{i+1}} = -j \frac{Z_{c_i}}{\cos\theta_i} \cot(k_i \cos\theta_i d_i) \quad (21)$$

2.7 Resultados experimentais

Apresenta-se a análise comparativa entre o comportamento teórico estimado pela modelação apresentada e os resultados de ensaios realizados em laboratório, para painéis acústicos perfurados, de espessura de 12 mm, com furos de 8 mm de diâmetro, espaçados regularmente de 32 mm, nas duas direcções XY, em arranjo quadrangular, com uma fracção de área aberta de $\varepsilon = 4.5\%$.

Comparam-se apenas algumas configurações de montagem dos painéis perfurados, analisando-se a influência dos seguintes elementos:

- Dimensão da caixa-de-ar;
- Utilização da lã de rocha no interior da caixa-de-ar;
- Posicionamento da lã de rocha no interior da caixa-de-ar.

Para avaliar a modelação exposta anteriormente apresentaram-se também resultados obtidos por um programa comercial, *WinFLAG*, Versão 1.0 [19].

As comparações apresentadas representam as estimativas para incidência normal, salvo quando em contrário indicado.

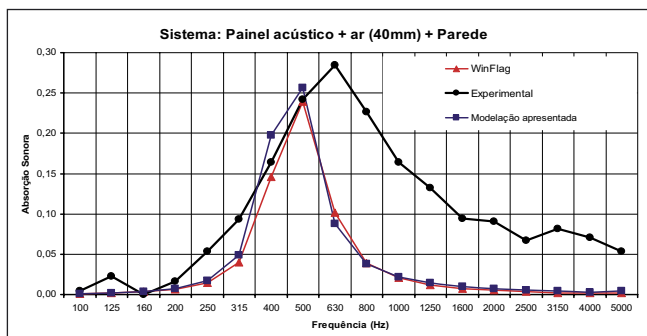


Figura 3. Comparação entre resultados experimentais e teóricos; caixa-de-ar: 40 mm

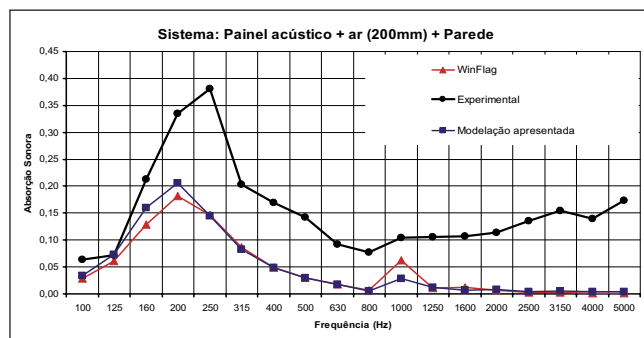


Figura 4. Comparação entre resultados experimentais e teóricos; caixa-de-ar: 200 mm

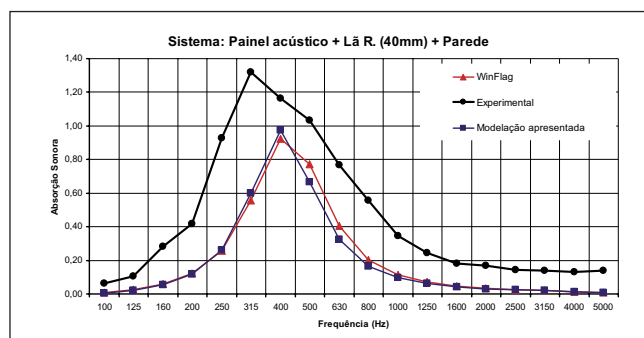


Figura 5. Comparação entre resultados experimentais e teóricos; caixa-de-ar: 40 mm

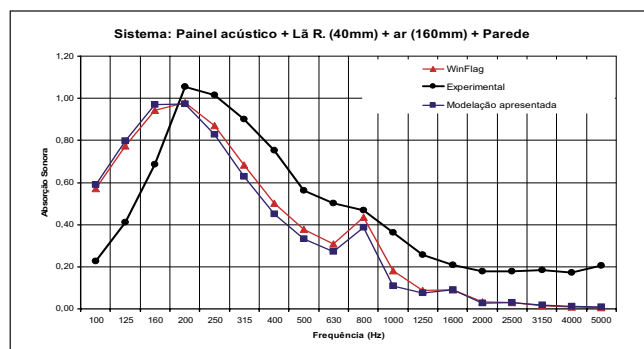


Figura 6. Comparação entre resultados experimentais e teóricos; caixa-de-ar: 200 mm; lã de rocha encostada ao painel

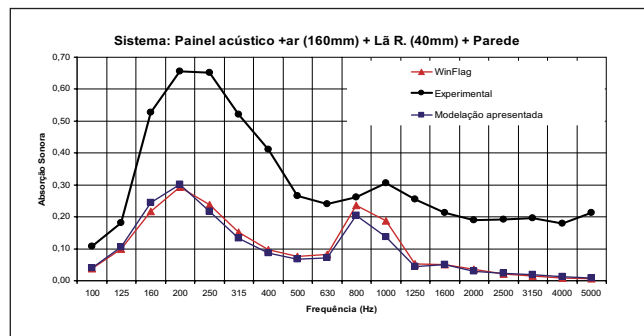


Figura 7. Comparação entre resultados experimentais e teóricos; caixa-de-ar: 200 mm; lã de rocha no pavimento da câmara

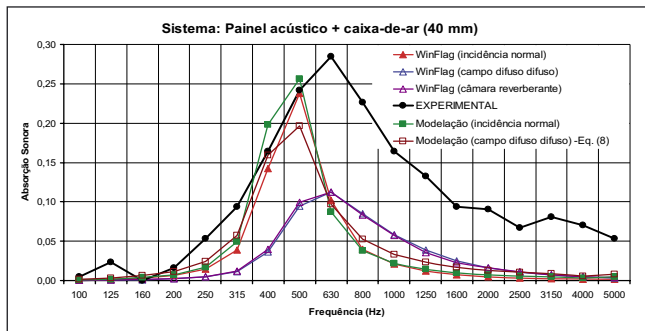


Figura 8. Comparação entre os coeficientes de absorção sonora para incidência normal e campo difuso – caixa-de-ar: 40 mm – Vazia

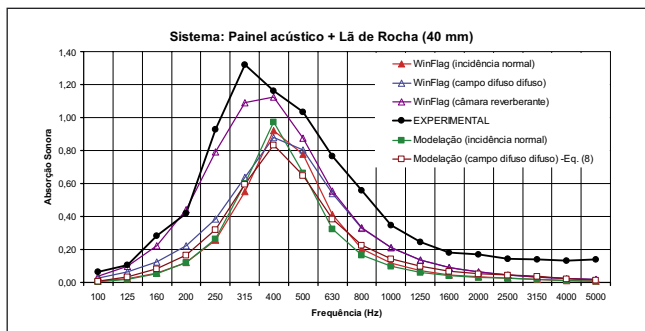


Figura 9. Comparação entre os coeficientes de absorção sonora para incidência normal e campo difuso – caixa-de-ar: 40 mm – preenchida com lâ de rocha

3. Estudo paramétrico experimental

Como a absorção sonora proporcionada pelos painéis perfurados depende fortemente das condições de utilização em obra (montagem), avaliou-se experimentalmente a influência de diversos elementos que constituem o sistema ressoador, realizando um estudo paramétrico, tendo em atenção os seguintes parâmetros:

- Profundidade da caixa-de-ar;
- Utilização (e posição) de lâ de rocha no interior da caixa-de-ar;
- Compartimentação da caixa-de-ar;
- Utilização de tela acústica como elemento resistivo;
- Área aberta dos painéis.

3.1 Set-up experimental

Os painéis acústicos perfurados, utilizados, são constituídos por placas quadrangulares (600 mm X 600 mm) de MDF, revestidas com papel melamínico com 12mm de espessura, e

com existência de dupla perfuração concêntrica: 8 mm de diâmetro na face exposta e 10 mm na face oculta (figura 10). Estes furos são espaçados regularmente de 32 mm, nas duas direcções XY, em arranjo quadrangular, com uma área aberta de 4.5%. De acordo com o requerido na citada norma, foram utilizados 10,08m² (28 painéis) dispostos a formarem um rectângulo de 2,4 m x 4,2 m.

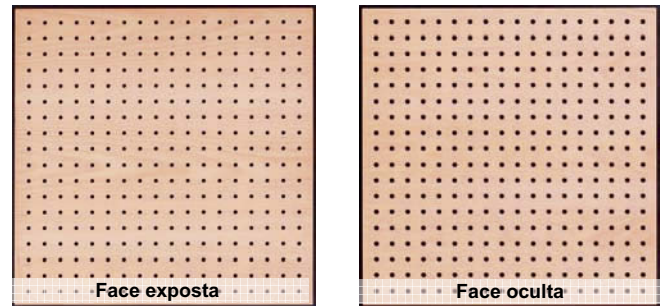


Figura 10. Painéis acústicos utilizados.

3.2 Ensaios realizados

Os painéis acústicos foram assentes sobre uma estrutura de madeira apoiada no pavimento da câmara reverberante, tendo-se variado as condições de montagem.

3.2.1 Profundidade da caixa-de-ar

Foram utilizadas duas estruturas de madeira que proporcionam a montagem dos painéis a uma distância do pavimento de 40 mm e 200 mm, respectivamente.



Figura 11. Estruturas de suporte dos painéis.

3.2.2 Utilização (e posição) de lâ de rocha no interior da caixa-de-ar

A lâ de rocha utilizada tem espessura de 40 mm e massa volumica de 40 e 70 kg/m³. No caso da caixa-de-ar de 200 mm, colocou-se a lâ de rocha em duas posições distintas,

junto ao painel e junto ao pavimento (deixando uma camada de ar entre o painel e a superfície da lã de rocha), conforme ilustrado na figura 12.



Figura 12. Aplicação de lã de rocha no interior da caixa-de-ar.

3.2.3 Compartimentação da caixa-de-ar

Nos ensaios de avaliação da influência da compartimentação da caixa-de-ar foi-se colocando ripas divisórias de modo a dividir sucessivamente a caixa-de-ar em espaços mais pequenos, conforme ilustrado na figura 13. Na nomenclatura utilizada para identificar o ensaio realizado, (1/2), (1/4), (1/8), (1/16), (1/32) e (1/64), o denominador da fracção indica o número de vezes que uma caixa-de-ar foi subdividida (considera-se uma caixa-de-ar a cavidade “estanque” de 600 mm X 2400 mm).

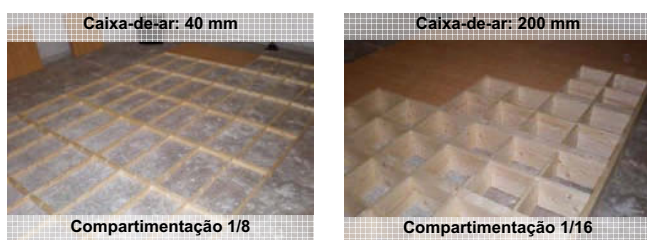


Figura 13. Exemplos da compartimentação do interior da caixa-de-ar.

3.2.4 Utilização de tela acústica como elemento resistivo

Foi utilizada uma tela de fibra de vidro semelhante à existente em alguns painéis de lã de rocha (que evitam a desagregação das fibras), colada na face oculta dos painéis perfurados. De acordo com o fabricante, este material tem uma resistência de fluxo de 190 Nsm⁻³, uma espessura de 0,22 mm e uma massa superficial de 62 g/m². Para avaliar a influência da aplicação da tela, realizaram-se ensaios com a utilização da tela com, e sem, lã de rocha no interior da caixa-de-ar.

3.2.5 Área aberta dos painéis

Foi avaliada a influência da área aberta dos painéis, tendo sido ensaiados painéis com diferentes valores de densida-

de de furação. Para o ensaio comparativo utilizaram-se painéis perfurados com furos de 8 mm, espaçados de 16 mm, correspondendo a uma percentagem de área aberta de 18,1%.

Analogamente, também se avaliou a influência da dupla perfuração - identificada nos gráficos de resultados como DP, e a posição das faces dos painéis. Para tal ensaiaram-se os painéis DP nas duas posições possíveis: com o furo de menor dimensão (8 mm) virado para o campo sonoro incidente – DP 8+10/32, e com o furo de maiores dimensões, 10 mm, exposto ao campo sonoro incidente – DP 10+8/32.

3.3 Análise comparativa

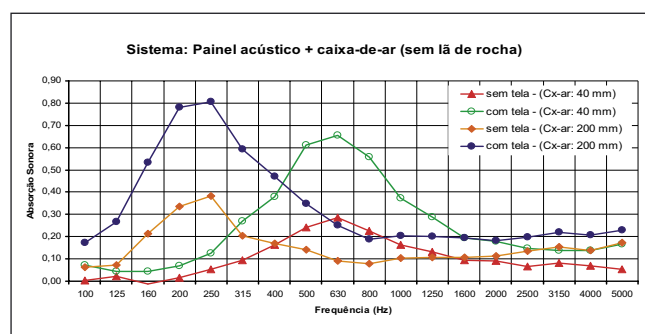


Figura 14. Variação de α com a utilização da tela acústica e com a dimensão da caixa-de-ar.

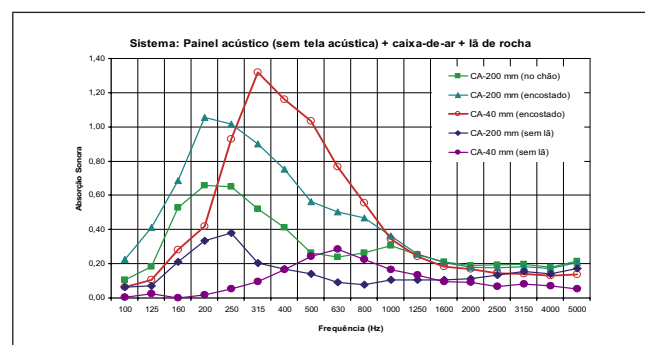


Figura 15. Variação de α com a utilização e posicionamento da lã de rocha na caixa-de-ar.

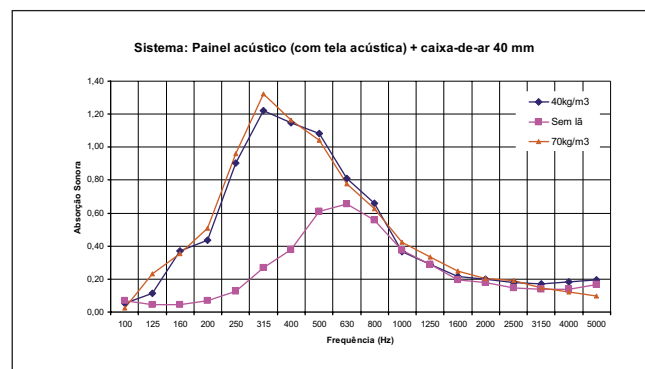
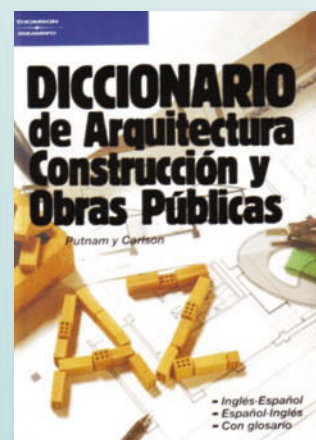
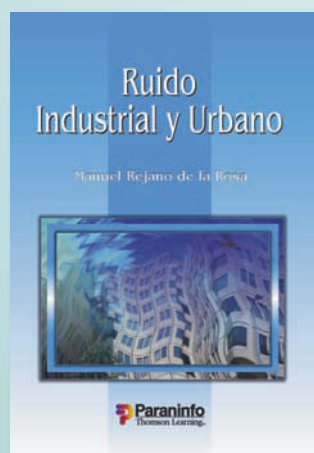
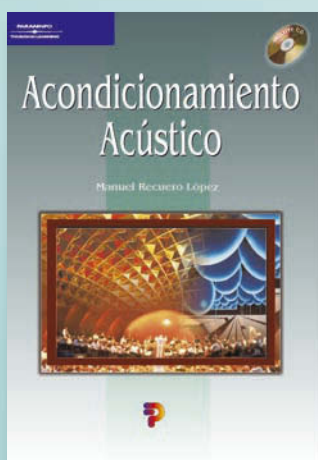


Figura 16. Influência da densidade da lã de rocha na absorção sonora.

Real Decreto 1027/2007
de 20 de julio



Más información en:
www.paraninfo.es

Recortar el boletín de pedido y enviar a **Paraninfo Cengage Learning** c/Magallanes 25 - 28015 Madrid
También puede hacer su pedido por Fax: **91 445 62 18** o a través de e-mail: clientes@paraninfo.es

No olvide indicar nº de campaña si
el pedido es a través de e-mail

Ruego me envíen los títulos que indico a continuación:

- ISBN: 9788428327992 **Acondicionamiento acústico**. 43,70 Euros
 ISBN: 9788428325714 **Acústica arquitectónica aplicada**. 68,50 Euros
 ISBN: 9788428326360 **BDAISACO**. 219,30 Euros
 ISBN: 9788428329408 **CTE. Código técnico de la edificación**. 48,70 Euros
 ISBN: 9788428315609 **Diccionario de arquitectura, construcción y obras públicas**. 40,10 Euros
 ISBN: 9788428326391 **Ingeniería acústica**. 73,40 Euros
 ISBN: 9788428330206 **RITE. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios**. 10,00 Euros
 ISBN: 9788428326827 **Ruido industrial y urbano**. 20,50 Euros

Campaña 132



PARANINFO
CENGAGE Learning

Nombre y Apellidos _____ DNI/CIF _____
 Calle _____ Nº _____
 Ciudad _____
 Distrito Postal _____ Provincia _____
 Fecha _____ Teléfono _____

Para su pago:
 Remito giro postal de _____ Euros
 Adjunto cheque de _____ Euros
 Envíen a reembolso con gastos a mi cargo
 Efectúen cargo en tarjeta de crédito:
 VISA
 AMERICAN EXPRESS
 Número _____
 Titular _____
 Fecha de caducidad _____
 Firma del titular
 de la tarjeta

Gastos de envío 3 euros (en el caso de reembolso existe una tasa añadida por correos, según sus tarifas vigentes)

De conformidad con lo establecido en la Ley Orgánica 15/99, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal, le informamos de que los datos personales que nos ha facilitado pasarán a formar parte de la base de datos de Cengage Learning Paraninfo S.A., con la finalidad de poder informarle sobre las ofertas, productos y promociones que ofrece Cengage Learning Paraninfo S.A. Usted podrá dirigirse en cualquier momento al departamento de atención al cliente (C/ Magallanes, 25 28015 Madrid) para solicitar la cancelación, rectificación, acceso y oposición de los datos facilitados.

Precios válidos salvo error de impresión

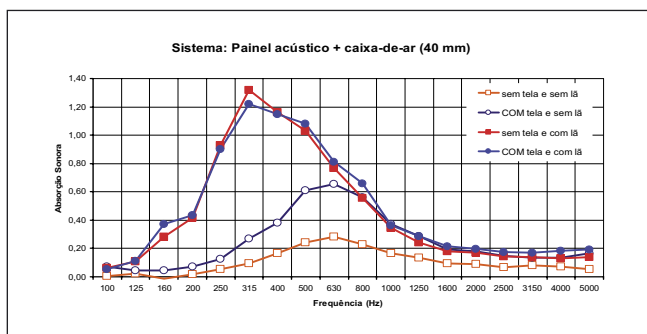


Figura 17. Influência da tela acústica com a utilização de lã de rocha na caixa-de-ar.

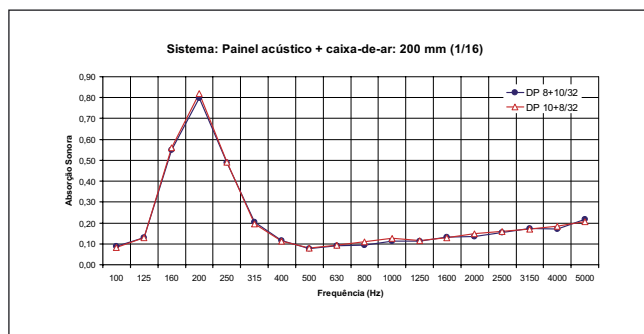


Figura 21. Variação de α com a face exposta dos painéis com dupla perfuração.

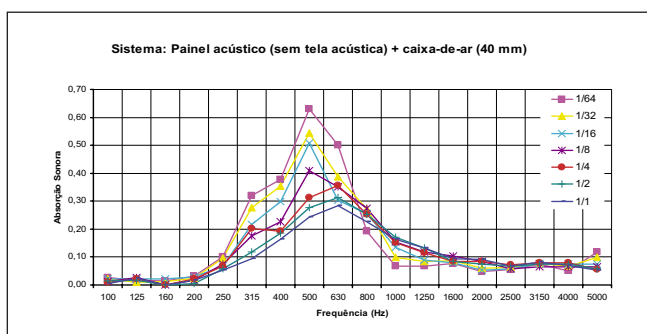


Figura 18. Variação de α com a compartimentação da caixa-de-ar (40mm).

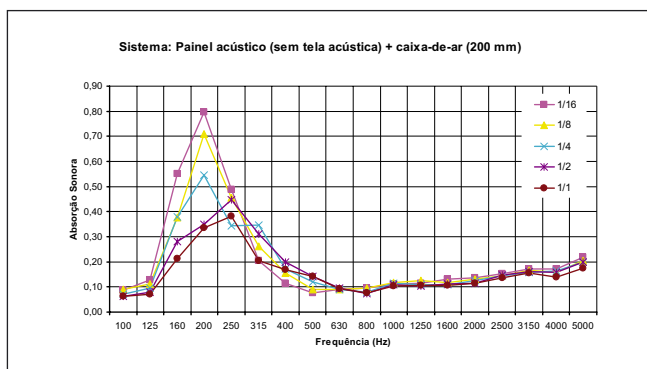


Figura 19. Variação de α com a compartimentação da caixa-de-ar (200mm).

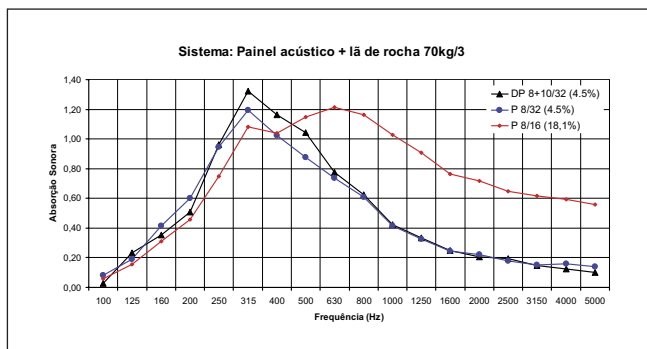


Figura 20. Variação de α com a perfuração.

Conclusões

A modelação de previsão da absorção sonora de sistemas ressonantes constituídos por painéis acústicos perfurados, caixa-de-ar e material absorvedor poroso, permite obter resultados bastante fidedignos.

Algumas discrepâncias encontradas devem-se quer às simplificações inerentes à própria modelação apresentada, quer às condições de ensaio.

No que respeita ao estudo paramétrico experimental realizado, este permitiu identificar os factores mais importantes para o desempenho acústico da utilização real de painéis acústicos. Assim, confirmou-se a importância da utilização de materiais absorvedores sonoros porosos, no interior da caixa-de-ar, adjacentes à face oculta dos painéis; a relevância das dimensões da caixa-de-ar para o posicionamento da frequência (banda) de ressonância; o efeito que a compartimentação da caixa-de-ar tem no desempenho do sistema, aumentando a absorção sonora e reduzindo a frequência de ressonância e o aumento da absorção sonora na gama das altas-frequências em função área aberta dos painéis acústicos. Verificou-se a irrelevância do efeito da tela acústica, na absorção sonora determinada, quando se utiliza lã de rocha no interior da caixa-de-ar. Contudo, se esta não existir na cavidade, a colagem da tela incrementa significativamente a absorção sonora devido à resistência acústica que introduz nos orifícios. Observou-se ainda a pouca influência na absorção sonora da densidade da lã de rocha, a dupla perfuração e a face exposta dos painéis que a utilizam.

Referências

- [1] Morse, P.M., Bolt, R.H. e Brown, R.L., “Acoustic Impedance and sound absorption”, Journal of the Acoustical Society of America – J.A.S.A., 12-2 (1940), 217-227.
- [2] Bolt, R.H., “On the design of perforated facings for acoustic materials”, J.A.S.A., 19 (1947), 917-921.
- [3] Ingard, K.U. and Bolt, R.H., “Absorption characteristics of acoustic material with perforated facings”, J.A.S.A., 23 (1951), 533-540.
- [4] Ingard, K.U., “On the theory and design of acoustic resonators”, J.A.S.A., 25 (1953), 1037-1062.

- [5] Callaway D.B. and Ramer, L.G., “The use of perforated facings in designing low frequency resonant absorbers”, J.A.S.A., 24-3 (1952), 309-312.
- [6] Smits, J. M. A. and Kosten, C. W., “Sound absorption by slit resonators”, Acustica, 1, 114–122, (1951).
- [7] Kristiansen, U. R. and Vigran, T. E., “On the design of resonant absorbers using a slotted plate”, Applied Acoustics, 43(1), 39–48, (1994).
- [8] Delany, M.E.; Bazley, E.N., “Acoustical properties of fibrous absorbent materials”, Applied Acoustics, 3, 105-116 (1970).
- [9] Davern, W.A., “Perforated facings backed with porous materials as sound absorbers – an experimental study”, Applied Acoustics, 10 (1977), 85-112.
- [10] Dunn, I.P., Davern, W.A., “Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers”, Applied Acoustics, 19, pag. 321 334, 1986.
- [11] Beranek, L. L. and Ver, I. L., “Noise and Vibration Control Engineering”, New York: John Wiley & Sons, 2nd ver. 2005 (ISBN:0471449423).
- [12] Paris, E.T., “On the reflection of sound from a porous surface”, Proc. Roy. Soc. (Lon-don), 115A, 1927, 407.
- [13] London, A., “The determination of reverberant sound absorption coefficients from acoustic impedance measurements”, J.A.S.A., Vol.22 –nº2 (1950), 263-269.
- [14] Lord Rayleigh, “Theory of sound”, McMillan, London, 1894.
- [15] Crandall, I.B., “Theory of vibrating systems and sound”, Van Nostrand, New York, 1926.
- [16] Maa, D-Y, “Microperforated-panel wideband absorbers”, Noise Control Engineering Journal, 29 (1987), 77-84.
- [17] Morse, P.M., Ingard, K.U., “Theoretical acoustics”, 1st Princeton University Press edition, 1986 (ISBN 0-691-02401-4)
- [18] Cremer, L., Muller, H., “Principles and applications of room acoustics: wave theoretical room acoustics”, Applied Science Publishers (1978).
- [19] Vigran, T. E., “WinFLAG – program for calculating absorption impedance and transmission”, version 1.0 (Fev 2003).
- [20] EN ISO 20354:1993 – “Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room”.
- [21] Thomasson, S.I., “On the absorption coefficient”, Acustica, Vol 44 (1980), 265-273.
- [22] Thomasson, S.I., “Theory and experiments on the sound absorption as function of the area”, Report TRITA-TAK-8201, Stockholm may 1982.
- [23] Patrício, J., “Acústica nos Edifícios”, 4ª Edição. Verlag Dashöffer, Lisboa 2008.
- [24] Patraquim, R.. “Painéis acústicos perfurados em madeira: estudo e avaliação experimental de soluções”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng.ª Mecânica, Junho 2008, Instituto Superior Técnico, Portugal..

Envíese a Sociedad Española de Acústica
 C/ Serrano 144 Fax: + 34 91 411 76 51
 28006 Madrid (España)
<http://sea-acustica.es>
 e-mail: secretaria@sea-acustica.org

- ADHESIÓN A LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA
- SUSCRIPCIÓN A LA REVISTA DE ACÚSTICA

Apellidos: Nombre:

Dirección para correspondencia:

C.P.: Ciudad: Provincia: País

Tel: Fax: e-mail:

Centro de trabajo:

Puesto de trabajo:

Dirección:

C.P.: Ciudad: Provincia: País

Tel: Fax: e-mail:

Fecha y firma

Bienvenido al silencio

Soluciones de Aislamiento Acústico para la Edificación

Nuestras soluciones superan las exigencias del nuevo Código Técnico.
15 años de experiencia en la búsqueda del confort acústico y más de 5000 obras, avalan la tecnología desarrollada por nuestro Departamento de I+D.

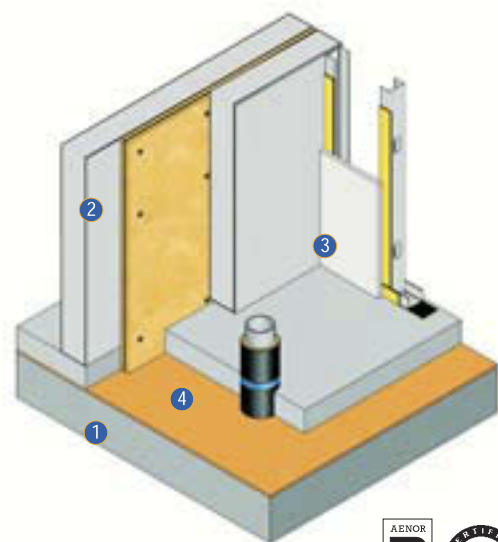
- 

IMPACTODAN
Aislamiento acústico de **forjados** > 50 dBA a ruido aéreo*
< 60 dBA a ruido de impacto*
- 

DANOFON
Aislamiento acústico de **medianeras** > 50 dBA a ruido aéreo*
- 

FONODAN
Aislamiento acústico de **tabiques de cartón yeso** > 4dB de incremento de aislamiento*
- 

ACUSTIDAN
Aislamiento acústico de **bajantes**. < 30 dBA a ruido inmisión*



* Mediciones "in situ" para soluciones constructivas completas. Consulte nuestros catálogos técnicos.



UNE-EN ISO 9001: 2000

Confiamos tu tranquilidad.



Impermeabilizantes



Aislamiento Acústico



Drenajes y Geotextiles

danosa

www.danosa.com 900 211 081