

A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA NO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO

PACS: 43.55.Ev

Patraquim, Ricardo J.¹; Luz, Paulo F. C.²; Patrício, Jorge V.³

¹ Madeicávado Madeiras S.A., Est. Nac. 1 – Ota, 2580-243 Alenquer, Portugal;

Tel.: +351 263 749 196; Fax: +351 263 740 062; ricardo.patraquim@madeicavado.pt

² PFLuz, Lda e Universidade de Évora, R. José Elias Garcia, 54, 1º 2830-486 Barreiro, Portugal;

Tel./Fax: +351 210 801 638; paulo.luz@iol.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Tel. +351 218 443 000; jpatricio@lnec.pt

ABSTRACT

The wood is used in the construction for its qualities and nobility. This communication presents which is the paper that the wood have in the acoustic conditioning, having in attention to the physical aspects that influence the room acoustics, nominated the absorption and the diffuse reflections in surfaces. It is also presented the goals and difficulties in the development of wooden systems and it's the design parameters.

Keywords: *Wood, Panels, Absorption, Diffuse Reflections.*

1 - INTRODUÇÃO

As características do campo sonoro estabelecido no interior de um espaço fechado são condicionadas pela concepção arquitetural (geometria e volume), revestimentos, mobiliário, equipamento e pessoas, no seu interior. Espaços nobres, como salas de conferências, de espectáculos, auditórios, etc., requerem condições especiais visando a adequação das características acústicas à função pretendida. Assim a madeira, material de excelência nos revestimentos, assume papel determinante no desempenho acústico destes locais, podendo ser utilizada para promover a absorção sonora ou as reflexões difusas (dispersão sonora), condicionando desta forma o campo sonoro estabelecido no interior das mesmas. Tendo em vista o estudo da aplicação da madeira no condicionamento acústico, importa avaliar os factores que afectam o desempenho dos sistemas utilizados, de forma a desenvolver soluções tecnologicamente avançadas, economicamente competitivas e associadas a processos construtivos concebidos para possibilitar resultados de excepcional qualidade.

2 – A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA COMO ABSORSOR SONORO

Os materiais ou sistemas absorventes sonoros, tendo em consideração os mecanismos que conduzem à dissipação de energia, estão agrupados em três tipologias distintas: materiais porosos (fibra de vidro; lã de rocha; etc.); painéis ou membranas absorventes; e absorsores de cavidade ou ressoadores de Helmholtz. Tipicamente a madeira é utilizada nas duas últimas tipologias.

2.1 – Membranas Absorventes

Um painel sólido não perfurado, instalado sobre um suporte rígido com lâmina de ar intercalada entre o painel e o suporte, funciona como membrana absorvente (sistema massa-mola animado de movimento vibratório). A energia incidente neste painel é dissipada por amortecimento, devido à rigidez do meio (espessura da cavidade), ligações existentes e ao amortecimento interno do painel, cujo máximo ocorre para a frequência de ressonância, a qual, pode ser estimada, ignorando a presença de material absorvente sonoro na cavidade, através da expressão:

$$f_{ress} = \frac{c}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \quad [2.1]$$

Sendo **c** – velocidade do som no ar, **ρ** - densidade do ar; e considerando que a espessura da cavidade – **d**, é muito menor que o comprimento da onda sonora incidente. Do acréscimo de espessura da lâmina de ar resulta a redução do valor da frequência para a qual ocorre a ressonância do sistema [1][2]. Numa membrana absorvente, **m** (Kg/m²) é simplesmente a massa do painel obtendo-se para frequência de ressonância:

$$f_{ress} = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad [2.2]$$

Valor correcto caso a cavidade esteja apenas preenchida por ar, se a cavidade estiver preenchida por material absorvente poroso, o sistema deixa de se poder considerar adiabático, sendo introduzido mais amortecimento no sistema, o que favorecerá a absorção sonora [3]. Salienta-se ainda, que muitas vezes estas formulações simplificadas conduzem a resultados incorrectos dado não considerarem os modos de vibração de ordem superior e não terem em conta as reais condições de fronteira ou ligação [4].

Sendo possível, na prática, tirar-se partido da utilização de painéis com massas superficiais distintas, ou dispostos a diferentes distâncias do suporte, para estender a eficácia do sistema a uma gama de frequências mais alargada.

2.2 – Absorsores de Cavidade

Os absorsores de cavidade, também designados ressoadores de cavidade ou de Helmholtz, consistem num volume de ar no interior de uma cavidade, ligado à atmosfera geral através de um pequeno volume de ar semelhante ao contido no gargálo de uma garrafa. As ondas sonoras ao incidirem na superfície de entrada do gargálo imprimem deslocamentos alternados à massa de ar contida no mesmo, acompanhados de dissipação de energia devido ao atrito do ar contra as suas paredes. A determinação da frequência de ressonância, correspondente à amplitude máxima do deslocamento da massa de ar contida no gargálo, tomando também valor máximo a amplitude da variação de pressão da massa de ar no corpo do sistema, permite delimitar com precisão a gama de frequências onde o sistema é efectivo. Esta pode estimar-se através da expressão:

$$f_{ress} = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{S}{\sqrt{v \cdot V}} = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{l \cdot V}} \cong \frac{55 \cdot S}{\sqrt{v \cdot V}} \quad [2.3]$$

Com **S** (m²) - secção recta do gargálo e **l** (m) - comprimento do gargálo ou **v** (m³) - volume do gargálo e **V** (m³) - volume da cavidade [1][5][6].

Painéis de madeira perfurados, montados a uma certa distância da superfície rígida funcionam como ressoadores agrupados. A frequência de ressonância, nesta situação, pode obter-se através da seguinte expressão de cálculo, válida para $f \cdot d < 3400 \text{ Hz} \cdot \text{cm}$ [2]:

$$f_{ress} = \frac{10 \cdot c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6 \cdot r) \cdot d}} \quad [2.4]$$

Em que **P** (%) - área perfurada; **e** (cm) - espessura da placa perfurada; **r** (cm) - raio da perfuração; **d** (cm) – espessura da cavidade. A absorção sonora aumenta, para as mesmas condições de aplicação, com o aumento da percentagem de perfuração das placas, atingindo o seu máximo para cerca dos 25% de área aberta [2]. Verifica-se uma grande selectividade do

absorvedor de cavidade, simples ou múltiplo, para frequências próximas da frequência de ressonância, podendo este último, actuar como um conjunto de ressoadores com diferentes frequências de ressonância, no caso de apresentar um conjunto de aberturas de diferentes dimensões.

Nas baixas frequências, para se ter uma boa absorção sonora para uma incidência aleatória, a cavidade deverá ser subdividida em compartimentos estanques, de modo a evitar propagação paralela ao painel [4]. A utilização de materiais porosos na cavidade atenua este efeito e também aumenta a largura de banda de eficiência dos painéis, embora reduza a absorção máxima para a frequência de ressonância.

Outro exemplo deste tipo de ressoadores, são os painéis ranhurados ou de ripas. Estes poderão ter a vantagem de, em alguns casos, as fendas serem mais fáceis de produzir (e com menores custos), no entanto o seu comportamento é semelhante ao dos painéis perfurados.

Se as dimensões das perfurações forem suficientemente pequenas, da ordem de grandeza da camada limite (dimensões sub-milimétricas), então a dissipação de energia será devido à viscosidade do ar, sendo este tipo de absorvedores, denominados de microperfurados. No entanto, os custos associados à produção deste tipo de painéis são muito mais elevados.

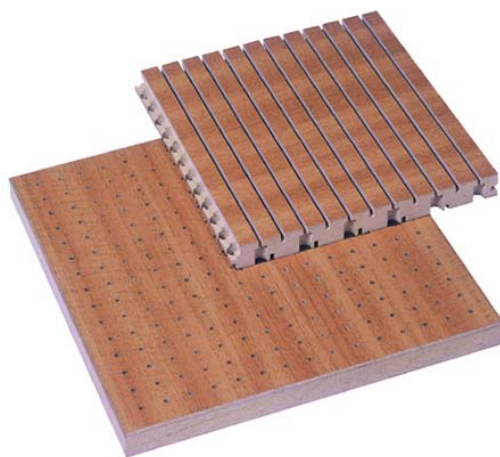


Figura 1 – Painéis acústicos típicos.

2.3 – O Projecto de Painéis Absorvedores em Madeira

Na generalidade, todos estes sistemas são relativamente selectivos (banda de frequência operacional estreita). Para obviar este problema pode-se conjugar no mesmo sistema os diversos tipos de absorvedores, conforme ilustrado na fig.2 [5]. Como já referido, os parâmetros de projecto são essencialmente a % de área aberta (diâmetros dos furos e espaçamento, no caso de painéis perfurados; largura, comprimento e espaçamento entre as ranhuras, no caso de painéis ranhurados – quaisquer destes parâmetros estão condicionados ao tipo de tecnologia de maquinaria existente), a espessura dos painéis, o material que constitui o painel (tipo de madeira: maciça, contraplacado, aglomerado de partículas ou MDF, etc.), fixação, distância ao paramento e a utilização (ou não) de material poroso. Jogando com estas variáveis, é possível projectar painéis que cubram uma banda de frequência alargada com eficiência, utilizando numa primeira fase as expressões apresentadas e, posteriormente, para se estimar a absorção, α , poder-se-à recorrer à modulação apresentada em [4].

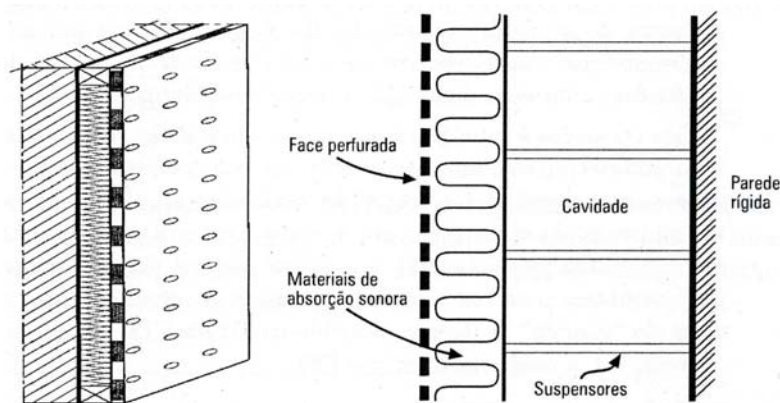


Figura 2 – Ilustração esquemática de sistema associando diferentes processos de absorção sonora.

3 – A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA EM DIFUSORES

3.1 – Reflexões Difusas e Campo Difuso

Em muitas situações em acústica de salas é necessário minimizar a utilização de absorção sonora, e.g. salas de concertos, de forma a não retirarmos energia sonora e, ao mesmo tempo, para garantir a correcta difusão da mesma. Nestas situações, é necessário criar um campo sonoro difuso, i.e., que o som seja envolvente e que a energia do campo reverberante chegue por igual, em todas as direcções, aos receptores [5]. Até meados dos anos 70, os elementos que contribuíam para esse objectivo eram essencialmente constituídos por formas geométricas (muitas vezes com a função decorativa). As reflexões nessas protuberâncias (com dimensões comparáveis ao comprimento de onda do som incidente) tendem a misturar o som reflectido, no entanto, o efeito destes elementos é difícil de prever e quantificar, e para se promover reflexões difusas nas baixas frequências obrigaria à utilização de elementos de grande dimensão [7]. Reflexões não-especulares também podem ocorrer em superfícies lisas (sem irregularidades), mas desde que tenham uma impedância acústica não uniforme (e.g., absorção sonora variável) [4].

O termo *Reflexão Difusa* aplica-se a reflexões em que a Lei de Snell não se aplica, i.e., quando a onda incidente numa superfície é reflectida em várias direcções (difusão espacial) e quando chegam ao receptor espaçadas no tempo (difusão temporal) [8]. Assim, um difusor ideal deverá redireccionar o som incidente (independentemente do ângulo de incidência e da frequência) uniformemente, tendo uma resposta espacial (polar) semicircular [4].

Nos últimos 30 anos, após o trabalho pioneiro de Manfred R. Schroeder [9], muita investigação foi desenvolvida no sentido de projectar, otimizar e quantificar difusores cada vez melhores (e.g. QRD's) [4] e, actualmente, os difusores baseados nesses princípios têm vantagens significativas em relação aos de formas geométricas (maior largura de banda de utilização, dispersão mais uniforme e quantificação da eficácia em fase de projecto) embora o custo de produção seja mais elevado. Um difusor de Schroeder é uma estrutura periódica constituída por ranhuras de igual largura mas de profundidade diferente (ditadas por sequências matemáticas que têm a propriedade de a transformada de Fourier dos seus valores ser constante), separadas por paredes rígidas mas muito estreitas (comparada com a largura das ranhuras). O princípio físico subjacente a estes difusores é a interferência de ondas sonoras. Quando uma onda sonora incide na superfície do difusor, ondas planas propagam-se em cada uma das ranhuras em direcção ao fundo, reflectindo-se aí. À entrada das ranhuras, as ondas reflectidas, por terem percorrido comprimentos diferentes (profundidades das ranhuras), não possuem a mesma fase – se estas diferenças de fase estiverem correctamente determinadas, as ondas reflectidas interferirão de modo que a estrutura reflectirá o som uniformemente em todas as direcções. A frequência de projecto e a largura de banda destes difusores é ditada pelas dimensões geométricas das ranhuras. São também susceptíveis à qualidade do

acabamento, devendo ser utilizados materiais de elevada impedância acústica, serem bastante rígidos e não possuírem frechas ou orifícios negligentes.

Como os efeitos das reflexões difusas são fundamentais na acústica de salas, a ausência de dados sobre as propriedades difusoras das superfícies de diferentes materiais (ao contrário da caracterização da absorção sonora) tem sido um problema [10] para a simulação computacional da acústica de salas. Nos últimos anos foram desenvolvidas metodologias para avaliar a uniformidade da dispersão (*coeficiente de difusão, d* : mede a semelhança entre a resposta polar de uma superfície com uma distribuição uniforme) [11] e a quantidade de energia dispersada (*coeficiente de dispersão, s* : mede a relação entre a energia reflectida não-especular com a energia total reflectida) [12]. Enquanto que o primeiro parâmetro é fundamental no desenvolvimento e optimização de superfícies difusoras (e para comparar os méritos de diferentes difusores), o segundo parâmetro tem uma grande importância para os modelos geométricos de acústica de salas [13], sendo, a par do coeficiente de absorção, α , um dos parâmetros de entrada fundamentais. Seria útil, mas ambos os coeficientes não têm uma relação simples e directa entre eles, embora tenha sido proposto um método para se obter s a partir das respostas polares [14].

3.2 – O Projecto de Difusores em Madeira

Tradicionalmente, os painéis difusores de madeira são constituídos por irregularidades geométricas (prismáticos ou paralelepípedicos) com dimensões consideráveis. Embora não sejam muito eficientes e de difícil estimação do comportamento, poderão ser económica e esteticamente atraentes. Ainda dentro dos painéis difusores “clássicos”, a madeira poderá ser utilizada sob a forma de painéis policilíndricos, que são superfícies convexas, que para além de serem uma mais-valia em termos estéticos, possuem boas características difusoras (e se forem montados de forma correcta poderão ter boas propriedades de absorção sonora nas baixas frequências, funcionando desta forma como sistemas híbridos). Não sendo este tipo de solução nova, é um sistema bastante interessante pois são relativamente fáceis de instalar, economicamente atraentes e com bom desempenho acústico. No entanto, carecem de serem estudadas em profundidade de forma a serem caracterizadas e optimizadas as suas características acústicas.



Figura 3 – Difusores policilíndricos.

A madeira é o material de excelência na construção e desenvolvimento de modernos difusores de Schroeder, pelas suas propriedades mecânicas, e com possibilidades de serem comercializáveis em kit, abrindo assim o mercado destes difusores a novos clientes.

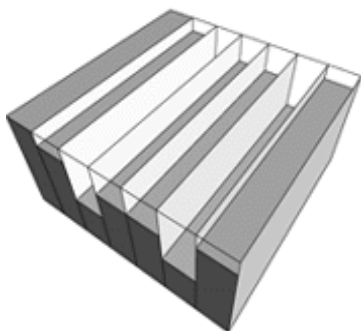


Figura 4 – Ilustração esquemática de um difusor de Schroeder (esq.) e sua aplicação (dta.)

Poderão ainda ser desenvolvidos sistemas híbridos (absorvedores/difusores) se forem perfilados com irregularidades geométricas superficiais ou flexionados (painéis policilíndricos) de forma a dotá-los também de algumas características de superfícies difusivas. Também os difusores de Schroeder, que foram inicialmente desenhados para se alcançar bons desempenhos nas reflexões difusas, podem ser otimizados para se transformarem em absorvedores [4] e [15]. De facto, difusores de Schroeder construídos de forma descuidada, com rigidez insuficiente e possuindo frechas negligentes no fundo das ranhuras, apresentam absorção sonora significativa nas baixas frequências [16], [17].

4 – CONCLUSÕES

A madeira é, sem dúvida, um material de excelência para espaços nobres onde a performance acústica e a estética são condições fundamentais, tais como, salas de concerto, auditórios, teatros, etc. Embora as soluções correntes estejam amplamente divulgadas, existe ainda espaço para o desenvolvimento e comercialização de novas soluções e para a optimização do binómio custo - benefício.

O desempenho acústico dos sistemas (absorvedores, difusores e híbridos) poderá ser optimizado recorrendo a técnicas apresentadas, por exemplo, em [4] e em [18], tendo sempre em atenção os constrangimentos tecnológicos (e.g., maquinaria disponível) e os custos inerentes à produção (e.g., custos *hora-máquina*, *hora-homem*, *matéria-prima*). Deverão também ser potenciadas as características intrínsecas da madeira a utilizar, nomeadamente, a estabilidade dimensional, a reacção ao fogo, o aspecto estético, a compatibilidade com outros componentes - armaduras e suportes, e a susceptibilidade à degradação [6], por forma a garantir o cumprimento das restantes exigências funcionais. Todas as soluções resultantes, disponibilizadas comercialmente, deverão estar avaliadas experimentalmente não só de acordo com EN ISO 20354:1993 [19] (coeficiente de absorção sonora) mas também com a ISO 17497-1:2004 [12] (coeficiente de dispersão), de forma a serem facilmente utilizados pelos projectistas, e os resultados deverão constar nas brochuras técnicas dos sistemas, devendo sublinhar especificamente quais as condições de montagem a que se referem.

O desenvolvimento e aplicação de novas soluções, actualmente, ainda se encontra algo limitada pelo custo da matéria-prima, pela maquinaria (ferramentas) existente e falta de preparação da indústria da madeira. Porém, o estabelecimento de parcerias entre Universidades, Laboratórios e Indústria criará sinergias nesta área, permitirá a endogeneização de conhecimentos e desenvolvimento tecnológico. Poderá ter novos desenvolvimentos se, a montante, a indústria de processamento da madeira e seus derivados for estimulada a criar novos produtos e materiais com performances acústicas significativas e com custos substancialmente inferiores.

5 – BIBLIOGRAFIA

- [1] Martins da Silva, P. – Acústica de edifícios (7ª edição). LNEC, Lisboa, 2003.
- [2] Oliveira de Carvalho, A.P. – Acústica ambiental e de edifícios. FEUP, Porto, 2004.

- [3] Mehta, M. Johnson, J. Rocafort, J. – Architectural acoustics. Principles and design. Merril Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
- [4] Cox, T. J. and D’Antonio, P. - “Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application”, Spoon Press, 2004.
- [5] Patricio, J. – Acústica nos edifícios (2ª edição). LNEC, Lisboa, 2004.
- [6] Domingues, O., – Materiais e sistemas Absorventes sonoros – Coeficientes de Absorção Sonora, LNEC, Lisboa, 2006.
- [7] Architectural acoustics. Principles and design – Mehta, M. Johnson, J. Rocafort, J., M.Sc., Prentice-Hall, 1999.
- [8] Dalenbäck, B.-I., Kleiner, M., & Svensson, P. (1994): “A Macroscopic View of Diffuse Reflection”, Journal of the Audio Engineering Society, 42(10): pp. 793-805, October.
- [9] Schroeder, M. R. (1975): “Diffuse Reflection by Maximum-Length Sequences”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 57(1), pp. 149-150.
- [10] I. Bork: *A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation*. Acustica 86 (2000), pp. 943–956.
- [11] AES 4id 2001. *AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity*. Journal of the Audio Engineering Society, 49(3): pp. 149–165, March 2001.
- [12] ISO Standard 17497-1. Acoustics - *Sound-scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*, 2004.
- [13] T.J.Cox, B.L. Dalenback, P D’Antonio, J.J. Embrechts, J.Y. Jeon, E. Mommertz, M. Vorlander: *A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces*. Acta Acustica united with Acustica, Vol.92 (2006), pp. 1-15.
- [14] E. Mommertz: *Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces*. Applied Acoustics Vol. 60 (2000), pp. 201–203.
- [15] T. Wu, T.J. Cox and Y.W. Lam: *From a profiled diffuser to an optimized absorber*. Journal of Acoust. Soc. Am., Vol.108 (2), pp. 643-650, 2000.
- [16] K. Fujiwara and T. Miyajima, *Absorption characteristics of a practically constructed Shroeder difuser of quadratic-residue type*, Applied Acoustics, vol 35, pp. 149 – 152, 1992.
- [17] K. Fujiwara and T. Miyajima, *A study of the sound absorption of a quadratic-residue type diffuser*, Acustica Vol. 81, pp. 370–378, 1995.
- [18] F.P. Mechel: *Computational optimisation of absorbers*. Acta Acustica united with Acustica, Vol.87 (2001), pp. 513-518.
- [19] EN ISO 20354:1993 – “Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room”.