

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MATERIAL CONSTITUINTE NO DESEMPENHO DE DIFUSORES QRD

PACS no. 43.55.Ev

PATRAQUIM, Ricardo¹; SANTOS, Pedro Gil¹; GODINHO, Luís²; AMADO MENDES, Paulo²;
MATEUS, Diogo²

¹ Departamento de Eng.^a Civil da Universidade de Coimbra,
Rua Luís Reis Santos, Pólo II da FCTUC, 3030-788 Coimbra, Portugal
{ uc2013166890@student.uc.pt, uc2006107489@student.uc.pt }

² ISISE, Dep. Eng. Civil Univ. de Coimbra, Portugal
Rua Luís Reis Santos, Pólo II da FCTUC, 3030-788 Coimbra, Portugal
{ lgodinho@dec.uc.pt, pamendes@dec.uc.pt, diogo@dec.uc.pt }

ABSTRACT

There are several acoustic diffuser solutions, using different materials and configurations. However, the intrinsic characteristics of the materials constituting the diffusers (density, sound absorption, etc.) may significantly influence the performance of these solutions. In the present work, the performance of the same diffuser (a QRD type) configuration is studied, making use of three different types of materials. The chosen materials are XPS, cork agglomerate and wood, which are studied conducting laboratory tests. In addition, a numerical model (BEM) is used to better understand the phenomena involved and validate the methodologies used.

Keywords: Acoustic diffusers; Diffusion coefficient; ISO 17497-2; Boundary Element Method.

RESUMO

Existem, actualmente, diversas soluções de difusores acústicos, recorrendo a diferentes materiais. No entanto, as características intrínsecas do material que os constitui (densidade, absorção sonora, etc) podem influenciar de forma significativa o desempenho destas soluções. No presente trabalho, é estudado o desempenho de uma mesma configuração de difusor, do tipo QRD, fazendo uso de três tipos de materiais distintos, designadamente XPS, aglomerado de cortiça e madeira, através da realização de ensaios laboratoriais. Complementarmente, é utilizado um modelo numérico (BEM) de forma a melhor compreender os fenómenos envolvidos e validar as metodologias utilizadas.

Palavras-chave: Difusores acústicos; Coeficiente de difusão; Norma ISO 17497-2; Método dos Elementos de Fronteira.

1. INTRODUÇÃO

Os difusores acústicos são correntemente utilizados no condicionamento acústico de espaços com maiores exigências acústicas (estúdios, salas de espectáculos, etc), servindo, sobretudo, para garantir um campo sonoro adequado, sem absorção sonora excessiva e espalhando o som mais uniformemente pela sala, eliminando ao mesmo tempo defeitos acústicos como ecos ou zonas “de sombra” [1]. Grande parte dos difusores existentes no mercado corresponde a

soluções do tipo Schroeder, conhecidas por QRD (*quadratic residue diffuser*), cujas profundidades dos elementos são baseadas numa dada sequência de resíduos quadráticos.

No mercado existem variações deste tipo de difusores, muitas vezes mais por motivos estéticos do que propriamente como resultado de uma otimização do desempenho. Por outro lado, por uma questão de custo, quer na sua produção quer no transporte, esses difusores são fabricados em materiais muito diversos, desde de diferentes tipos de “plásticos” à madeira maciça. No presente trabalho pretende-se avaliar a influência do tipo de material que constitui o difusor, nomeadamente a influência da densidade. Para tal, foram construídos 3 difusores, à escala real, do tipo QRD7, desenhados para a frequência de 1400 Hz, constituídos por três diferentes materiais, madeira maciça, aglomerado de cortiça e poliestireno extrudido (XPS).

Como alguns dos modelos existentes no mercado também dispensam a utilização de guias-de-onda, por uma simplificação de construção, neste trabalho também se pretendeu avaliar a influência da sua utilização. Deste modo, foram construídos e avaliados dois difusores em madeira maciça em que um possuía guias-de-ondas e outro não.

Para além da avaliação de um único difusor, foi ainda avaliada a utilização conjunta de dois difusores idênticos, correspondendo a um período $p=2$.

A abordagem do estudo foi essencialmente experimental, com a determinação do Coeficiente de Difusão de acordo com a metodologia descrita no documento técnico AES-4id-2001 [2] que deu origem à norma ISO 17497-2 [3]. Porém, também foi utilizado o Método dos Elementos Fronteira (BEM) para modelação numérica dos difusores acústicos e obtenção do respectivo Coeficiente de Difusão, conforme descrito em [4], mais na perspectiva de validar os resultados experimentais devido a alguns constrangimentos existentes na sala semi-anecóica utilizada.

2. DESCRIÇÃO DOS DIFUSORES TESTADOS

Foram construídos três difusores, idênticos em termos geométricos, mas constituídos por materiais diferentes:

- Madeira maciça: $m_v=456 \text{ kg/m}^3$
- Aglomerado de Cortiça: $m_v=173.6 \text{ kg/m}^3$
- Poliestireno Extrudido (XPS): $m_v=28.3 \text{ kg/m}^3$



Figura 1: da esq^a para a dir^a, QRD em madeira maciça; sQRD em madeira maciça (sem guias-de-onda); QRD em aglomerado de cortiça e QRD em XPS

A dimensão dos difusores é de aproximadamente 80mm x 300mm x 600mm (profundidade x largura x altura). As profundidades das reentrâncias foram calculadas de modo que a frequência de projecto seja $f_p \approx 1400 \text{ Hz}$ e a largura das mesmas são de forma a que a frequência de corte é $f_c \approx 4300 \text{ Hz}$.

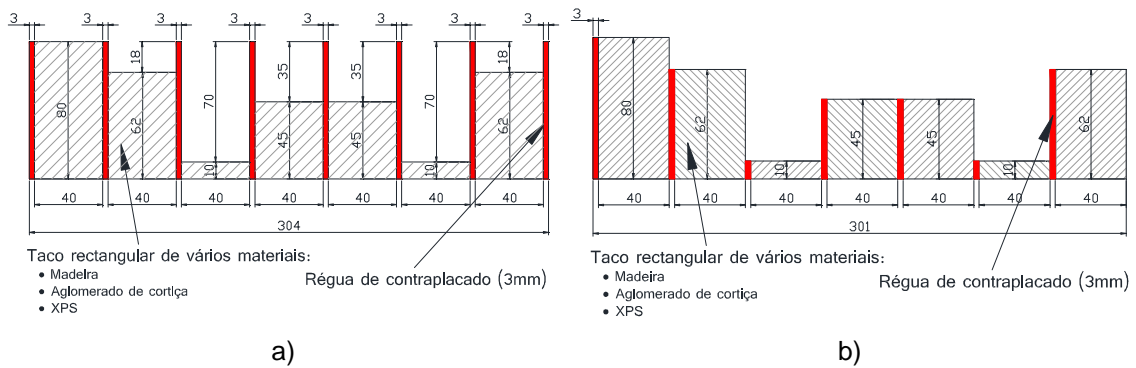


Figura 2: a) difusor QRD7 com guias-de-onda; b) Difusor sQRD7 sem guias-de-onda.

3. METODOLOGIA DE ENSAIO

Para permitir a realização dos ensaios para a medição do coeficiente de difusão de acordo com a Norma ISO 17497-2 [3] uma sala de 5.0 x 4.3 x 2.7 m³ do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra foi adaptada para o efeito. Para tal, foi aplicado um revestimento absorvente ($\alpha \approx 1.0$, para frequências superiores a 160Hz), nas paredes e no tecto, mantendo-se o pavimento reflector, para assegurar condições acústicas que se aproximam das de um campo livre, - uma descrição detalhada deste espaço semi-anecóico pode ser encontrada em Pereira et al [5].

Tendo em conta as dimensões da sala e dos difusores a serem ensaiados, foi adoptada a configuração de teste, como mostrado na Figura 3, com o microfone colocado em um semicírculo com um raio de 1,90 m, alinhado com o plano frontal da superfície do difusor, e o altifalante, colocado a 3,0 m, centrado a 0° em relação à normal da superfície do difusor (incidência normal).

Foi adoptada uma resolução angular de 10° obtendo desta forma 19 respostas de impulso entre +90° e -90°. Com estas posições, para o teste de um único difusor (cuja largura é de 30cm) é possível garantir que 94,7% dos receptores estão fora da zona especular (no caso de 2 difusores é garantido 84,2%). As respostas impulsivas foram obtidas através da técnica de MLS (*Maximum Length Sequences*), com o máximo das sequências definido por $2^{14}-1 = 16383$ e uma duração de 20.5s.

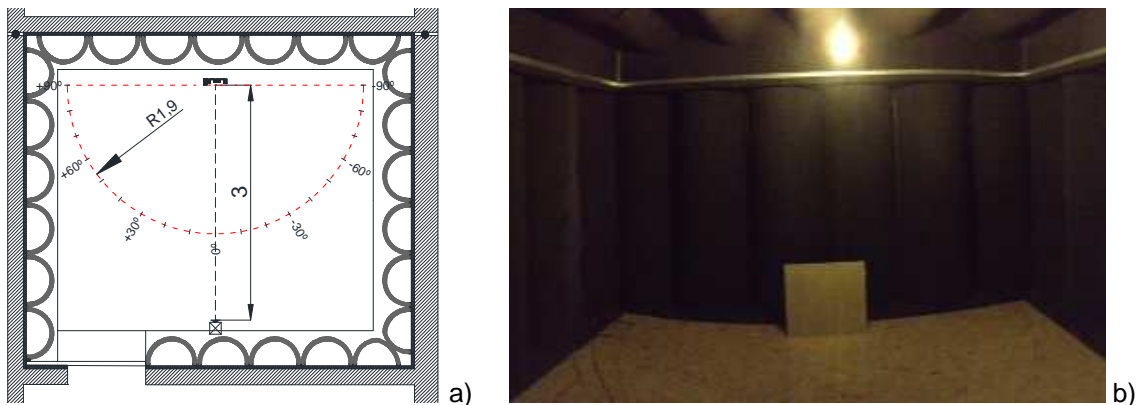


Figura 3: a) layout do ensaio; b) Foto da câmara semi-anecóica utilizada nos ensaios.

O processo de medição dos coeficientes de difusão passa pela determinação da resposta impulsiva, realizando uma medição nas posições de microfone definidas, sem a superfície de ensaio presente ($h_2(t)$) e outra medição com a superfície de ensaio presente ($h_1(t)$). Posteriormente, é isolada a resposta reflectida pelo difusor a partir da subtracção entre o registo com difusor e o registo sem difusor, ($h_1(t) - h_2(t)$). Para obter as respostas no domínio da frequência é aplicada a transformada de Fourier aos sinais impulsivos referentes a cada posição de microfone. Com a integração destas respostas em bandas de 1/3 de oitava é então

possível obter as respostas polares com intensidades sonoras L_i geradas pela superfície difusora. O Coeficiente de Difusão Direccional (para cada ângulo de incidência de fonte) e para cada frequência é então obtido através da seguinte expressão:

$$d_{\theta} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10} \right)^2} \quad (1)$$

Nesta expressão θ é o ângulo de incidência, L_i é o nível de pressão sonora (em dB) na posição do receptor i obtido na resposta polar e n é o número de receptores (neste caso, 19).

O Coeficiente de Difusão Normalizado pode ser obtido através da expressão seguinte:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_{\theta} - d_{\theta,pp}}{1 - d_{\theta,pp}} \quad (2)$$

onde é o d_{θ} Coeficiente de Difusão Direccional do difusor e $d_{\theta,pp}$ é o Coeficiente de Difusão Direccional de uma placa plana de referência, com a mesma dimensão do difusor em avaliação. Este processo de normalização permite retirar o efeito da difracção nas arestas laterais do difusor.

Foi verificado que o processo de isolar a resposta reflectida pelo difusor a partir da subtracção $(h_1(t)) - (h_2(t))$ através do ajuste da janela temporal (que remove as reflexões residuais irrelevantes) tem influência nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão direccional, nomeadamente nas baixas frequências ($f < 315\text{Hz}$). Mas, mais importante ainda, é que o método de medição acima descrito é sensível às condições higr-térmicas da sala, logo, é importante obter as respostas $h_1(t)$ e $h_2(t)$ nas mesmas condições ambientais.

4. MODELO NUMÉRICO

Com o objectivo de comparar os resultados obtidos através do procedimento experimental e realizar algumas simulações iniciais, foi utilizado o Método dos Elementos Fronteira (BEM) para a modelação numérica dos difusores acústicos e para obter o respectivo Coeficiente de Difusão. Para este modelo BEM, considerou-se uma superfície rígida, de comprimento infinito segundo a direcção do eixo z , inserida num meio acústico infinito (figura 4), excitado por uma fonte de pressão sonora cilíndrica posicionada em $\underline{x}_F = (x_F, y_F)$, oscilando com a frequência angular ω , cujo campo incidente é dado por:

$$p_{inc}(\omega, \underline{x}, y) = \frac{-iA}{2} H_0^{(2)} \left(k_c \sqrt{(x - x_F)^2 + (y - y_F)^2} \right) \quad (3)$$

Nesta expressão a abreviatura *inc* representa o campo incidente, A é a amplitude de onda, $i = \sqrt{-1}$, $k_c = \omega/\alpha$ (com $\text{Im}k_c < 0$), sendo o número de onda efectivo, α a velocidade de propagação do som no ar, e $H_n^{(2)}(\dots)$ a função de Hankel do 2º tipo, de ordem n .

O campo reflectido bidimensional produzido pela fonte sonora cilíndrica (ao longo da direcção z), que actua no meio acústico, na presença de um elemento difusor, é calculado no domínio da frequência utilizando o Método de Elementos de Fronteira (BEM). É utilizada uma abordagem clássica BEM que pode ser descrita pela equação integral de fronteira (4), assumindo que Γ representa a interface do difusor que será discretizado.

$$c \cdot p(\underline{x}_0, \omega) = - \int_{\Gamma_2} H(\underline{x}, \underline{v}_n, \underline{x}_0, \omega) \cdot p(\underline{x}, \omega) d\Gamma + p^{inc}(\underline{x}, \underline{x}_F, \omega) \quad (4)$$

Nesta equação H é a função de Green para uma região acústica infinita que permite que a derivada da pressão sonora (q) seja obtida no ponto \underline{x} da fronteira Γ quando a fonte harmónica virtual actua em \underline{x}_0 da fronteira; c depende da geometria da fronteira no ponto e é

igual a $1/2$ se $\underline{x}_0 \in \Gamma$ e a fronteira é suave; \underline{v}_n é o vector normal exterior da fronteira; $p^{inc}(\underline{x}, \underline{x}_F, \omega)$ é o campo incidente quando a fonte está posicionada em \underline{x}_F , obtido através da equação (3).

A equação (4) é resolvida após a discretização da interface Γ em N elementos de fronteira constantes. As integrações resultantes são calculadas utilizando um esquema de quadratura de Gauss e a resolução do sistema de equações resultante permite obter a pressão nodal. O campo sonoro reflectido em qualquer ponto do domínio pode então ser calculado através da aplicação da equação integral de fronteira.

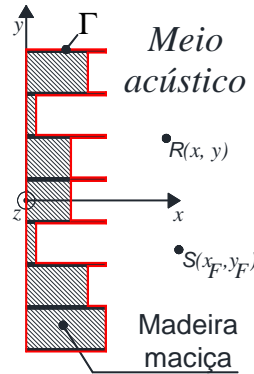


Figura 4: Geometria do modelo numérico implementado.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Foram testados difusores com a mesma configuração geométrica mas constituídos por materiais diferentes (ver ponto 2). Foi ainda avaliada a influência dos guias-de-onda (somente nos difusores de madeira maciça).

Ensaíram-se ainda placas planas com a mesma dimensão dos difusores, de modo a comparar o desempenho dos difusores com o de uma superfície plana (com a mesma dimensão).

Todos os ensaios foram realizados com a fonte sonora apenas na posição perpendicular às superfícies dos difusores (incidência normal, $\theta = 0^\circ$)

5.1 Influência do material

Na figura 5 estão representados os resultados obtidos para os difusores constituídos pelos diferentes materiais descritos no ponto 2. Pode-se observar que, no caso da avaliação de apenas um difusor, que o mais denso (madeira maciça) tem um coeficiente de difusão mais elevado. Contudo, o mesmo já não se verifica no ensaio com dois difusores. Em todos os casos, os difusores têm melhor desempenho que uma placa plana a partir dos 630Hz e 800Hz, respectivamente. Também se verifica que apenas no difusor de madeira maciça é visível a frequência de projecto $f_p \approx 1400\text{Hz}$ corresponder ao valor máximo de d_θ .

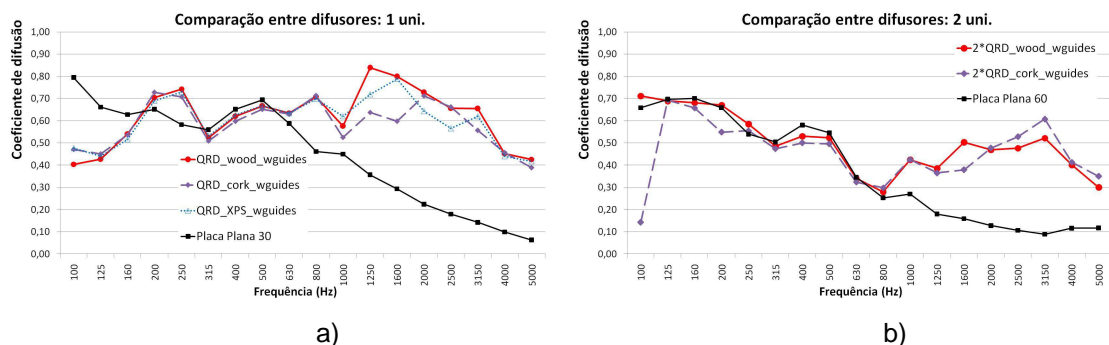


Figura 5: Comparação de difusores de materiais diferentes – a) Um difusor); b) Dois difusores.

5.2 Influência das guias-de-onda

Na figura 6 estão representados os resultados obtidos para difusores de madeira maciça com e sem guias-de-onda. Nos mesmos gráficos também se apresentam os resultados obtidos para as respectivas placas planas.

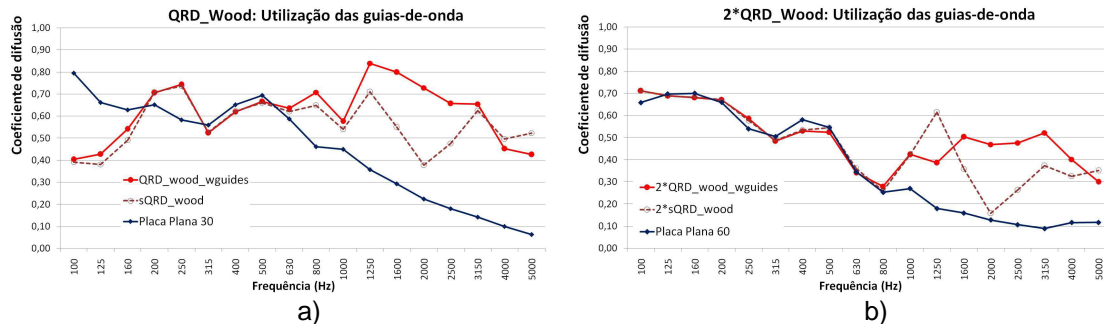


Figura 6: Influência dos guias-de-onda - a) Um difusor); b) Dois difusores.

É visível, de uma forma generalizada, que a utilização dos guias-de-onda conduz a coeficientes de difusão mais elevados sendo notório que os valores máximos do coeficiente de difusão ocorrem entre as bandas de terço de oitava dos 1250Hz e 1600Hz e entre as dos 2500Hz e 3150Hz (que corresponde à frequência de projecto, f_p , e a $2*f_p$). A ausência de guias-de-onda altera os valores da frequência para os quais são atingidos os valores máximos de d_θ . Mas a maior consequência da não utilização dos guias-de-onda é a quebra acentuada do d_θ na banda dos 2000Hz.

5.3 Influência do período

A utilização de um maior número de repetições da superfície difusora permite uma melhor representação das condições de aplicação reais dos mesmos, em parte pela redução do efeito da difracção nos bordos dos painéis. Contudo, medir uma grande quantidade de painéis exige instalações laboratoriais de grande dimensão para garantir as distâncias entre os painéis, fonte e receptores. Assim, na sala de ensaio utilizada no presente trabalho, de forma a garantir que mais de 80% dos receptores estão fora da zona especular, apenas foi possível utilizar no máximo 2 difusores à escala real (é possível utilizar provetes à escala 1:2 mas seria necessário caracterizar a absorção sonora, quer da madeira maciça quer do aglomerado de cortiça, de forma a garantir que essas características se mantêm com a duplicação da frequência nos ensaios à escala 1:2).

Na figura 7 estão representados os resultados obtidos para difusores de madeira maciça e de aglomerado de cortiça, ambos com guias-de-onda. Como expectável, o coeficiente de difusão é inferior quando aumenta o período e, consequentemente, a dimensão do provete em avaliação.

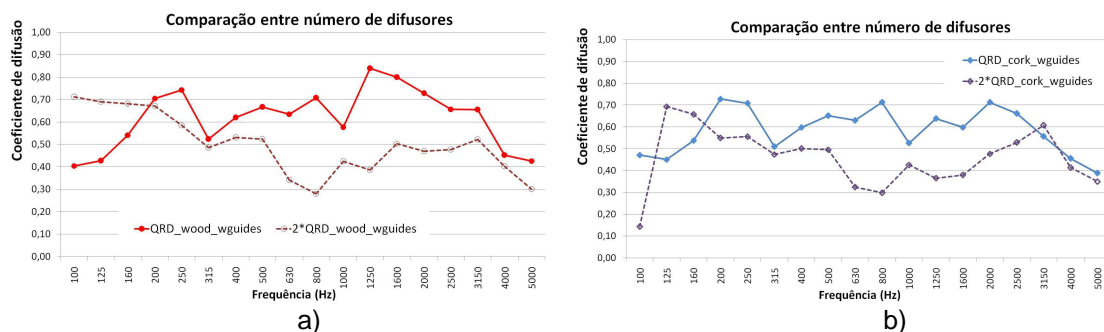


Figura 7: Influência do número de difusores – a) QRD em madeira maciça; b) QRD em aglomerado de cortiça.

5.4 Comparação com o modelo numérico BEM

Para a modelação numérica foi admitido que o material que constitui o difusor é perfeitamente reflector (impedância acústica infinita). Deste modo, as comparações que são apresentadas nas figuras 8 e 9 são referentes ao difusor de madeira maciça. Apresentam-se, ainda, os resultados experimentais e numéricos referentes às placas planas que servem de comparação para o desempenho dos difusores.

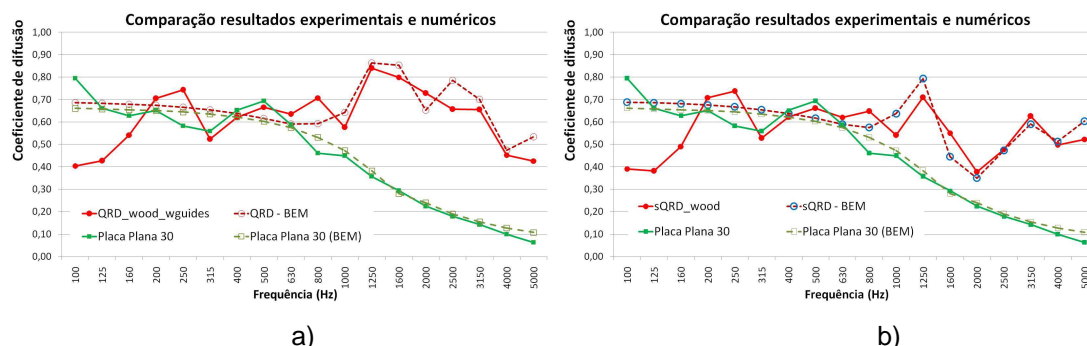


Figura 8: Comparação dos resultados experimentais e numéricos para 1 difusor - a) com guias-de-onda; b) sem guias-de-onda.

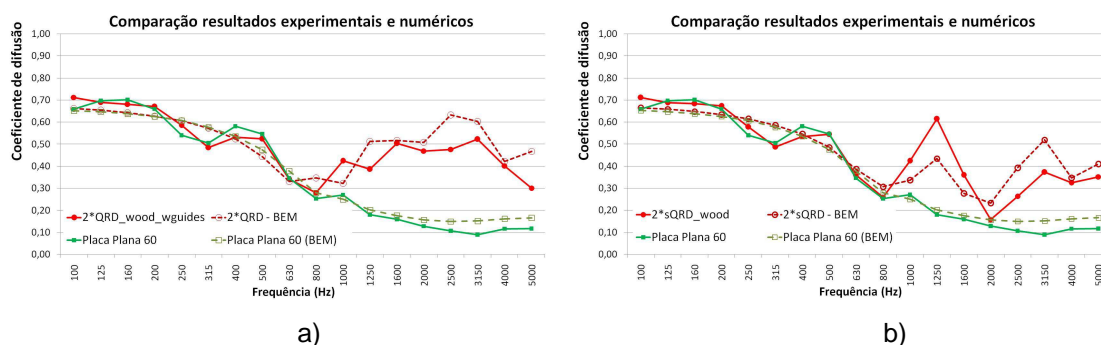


Figura 9: Comparação dos resultados experimentais e numéricos para 2 difusores - a) com guias-de-onda; b) sem guias-de-onda.

Da análise dos resultados apresentados nas figuras 8 e 9, podemos dizer de uma forma geral que os resultados são bastante satisfatórios. Temos de excluir as baixas-frequências, justificadamente quer devido às dimensões da sala de ensaio, quer à janela temporal utilizada para a extracção da reflexão quer ainda devido às diferentes condições higró-térmicas, que não foi possível garantir como constantes durante a realização do trabalho.

O modelo BEM poderá ainda ser afinado de modo a ter a mesma resolução no domínio da frequência que o existente no método de ensaio, permitindo que as somas energéticas realizadas para as bandas de terço de oitavo tenham as mesmas componentes.

6. CONCLUSÕES

Foi demonstrado que os difusores com maior densidade têm maior coeficiente de difusão. Contudo, consegue-se um razoável desempenho com materiais de densidade inferior. Assim, a utilização de materiais mais leves pode ser uma opção viável se for tido em consideração quer o custo de fabrico quer o custo de transporte. A utilização de cortiça poderá ser uma boa hipótese pois sendo um material ecológico e esteticamente atractivo é de fácil mecanização. Para tal, tem de ser avaliada a absorção sonora de dispositivos com este material de forma a não retirarem energia em demasia.

Foi ainda demonstrado que, para QRD's tradicionais, a utilização de guias-de-onda é fundamental não só para que o desempenho seja o expectável em fase de dimensionamento do difusor (manutenção da frequência de projecto) bem como para não diminuir a eficiência do difusor.

O modelo BEM utilizado mostrou ser uma ferramenta de extrema utilidade em fase de desenvolvimento.

A sala semi-anecóica utilizada, dada as suas limitações dimensionais, não permitiu retirar conclusões nas baixas-frequências nem permite a utilização de um elevado número de períodos. Contudo, mostrou ser “consistente” para frequências superiores a 315 Hz, desde que alguns cuidados sejam implementados no protocolo de ensaio. Por outro lado, a utilização de provetes à escala permite a utilização de períodos maiores [4].

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa “Castelhano & Ferreira, S.A.” o apoio disponibilizado para a realização deste trabalho. Este trabalho foi parcialmente suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia âmbito de uma Bolsa de Doutoramento BDE SFRH/BDE/96260/2013 atribuída ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- [1] T.J. Cox, P. D’Antonio: Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application, Spon Press, 2nd Edition, 2009.
- [2] AES-4id-2001. Characterization and measurement of surface scattering uniformity.
- [3] ISO 17497-2: 2012. Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field.
- [4] Diogo Mateus; Hélder Gonçalves; Andreia Pereira; Luís Godinho e Fernando Branco – “Avaliação do coeficiente de difusão proporcionado por diferente tipos de superfície” Tecniacústica 2014, Múrcia, Espanha, Actas em CD-Rom, 29-31 Outubro, 2014.
- [5] Andreia Pereira; Hélder Gonçalves; Diogo Mateus; Luís Godinho e Fernando Branco - “Assessment of the diffusion coefficient provided by wooden panels”, Forum Acusticum, 7 - 12 September, Kraków, 2014.