



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON
ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA DIFUSÃO SONORA DE PAINÉIS
DIFUSORES DE MADEIRA**

43.20.GP

Alarcão, Diogo; Fafaiol, Carlos; Bento Coelho, J. L.

CAPS, Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1
P-1049-001 Lisboa
Portugal
Tel: +351 21 841-9392
e-mail: diogo.alarcao@ist.utl.pt

ABSTRACT

A comparative assessment of the diffusion performance of three real-sized diffusers, made of solid wood, was undertaken in free field conditions. The measurements were carried out in the anechoic chamber of CAPS – Instituto Superior Técnico whose dimensions posed some constraints to the setup used. The measurement microphone was fixed through a rigid arm to a step-wise controllable rotating turntable that allowed obtaining the polar responses of the scattered sound for each of the wooden diffusers. The angular resolution chosen for the polar diagrams was equal to 10°. Three distinct directions for the incident sound were used, namely 0°, +40° and -40°. The used data acquisition system was based on the MLS technique for determining the impulse responses corresponding to the different scattering directions. These impulse responses were post-processed in order to separate the wanted reflected signals from the direct sound signal. The resulting signals were transposed via FFTs to the frequency domain and from this data information in 1/3 octave and 1/1 octave bands was obtained.

RESUMO

Procedeu-se à avaliação comparativa da difusão sonora de três painéis difusores de madeira maciça, em tamanho real, em condições de campo livre. As medições acústicas foram levadas a cabo na câmara anecóica do CAPS - Instituto Superior Técnico, cujas dimensões põem alguns constrangimentos às condições dos ensaios. O microfone de medida foi fixo a um braço rígido ligado a uma mesa rotativa controlada passo a passo por um sistema de *gating* temporal de precisão que permitiu a aquisição das respostas polares de difusão para cada provete de madeira. A resolução angular escolhida para as respostas polares foi de 10°, tendo-se usado três direcções distintas de incidência do som relativamente à normal dos difusores. Utilizou-se um sistema de aquisição de dados baseado na técnica MLS (sequências de comprimento máximo) para a determinação das respostas impulsivas para as diferentes direcções de registo, as quais foram depois pós-processadas de modo a separar as respostas reflectidas do som incidente bem como a reduzir a influência do ruído da cadeia de medida. Os sinais resultantes, correspondentes a reflexões por parte dos difusores, foram transpostos para o domínio da frequência através de FFTs, utilizando-se um software de cálculo matemático tendo, no final, sido obtida a informação em bandas de frequência de 1/3 de oitava e de oitava.

1. INTRODUÇÃO

A assinatura acústica de um dado espaço fechado é fortemente influenciada pelos materiais utilizados dentro do mesmo, tanto em termos da sua absorção sonora, como pela capacidade dos materiais usados na superfície conseguirem dispersar as ondas sonoras incidentes em várias direcções que não apenas a especular. Esta última característica permite aumentar o campo difuso dentro do espaço e correspondentemente a preferência subjectiva de audição ao criar um maior envolvimento e uma maior dissimilaridade binaural [1].

A difusão, e/ou dispersão, gerada por diferentes tipos de superfícies tem sido estudada nas últimas quatro décadas. Trabalhos teóricos e de simulação numérica permitiram compreender melhor os fenómenos complexos envolvidos no processo e um cuidado trabalho experimental permitiu a elaboração de procedimentos padrão a ter em conta nos ensaios experimentais. No entanto, a caracterização experimental de provetes de tamanho real tem sido realizada apenas em poucos casos e continua a haver poucos dados quantitativos disponíveis.

Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos a partir de ensaios realizados em câmara anecóica para três difusores de madeira de tamanho real. Estes três difusores correspondem a três *designs* distintos desenvolvidos a fim de serem instalados num importante auditório em Lisboa, alvo de trabalhos de remodelação e de requalificação. O objectivo do trabalho consistiu em se obter dados comparativos para os três difusores e assim permitir escolher-se o *design* que melhor se adapta ao desempenho pretendido. A análise comparativa é apresentada em termos dos diagramas polares e dos gráficos dos coeficientes de difusão para os três painéis difusores de madeira.

2. PAINÉIS DIFUSORES DE MADEIRA

A capacidade de difusão sonora de três painéis difusores construídos em madeira maciça, medindo 0,90 m x 0,90 m, foi caracterizada através de ensaios acústicos em campo livre:

- Painel difusor de madeira do tipo QRD7 – “*reflection phase grating, quadratic residue diffuser*”, com período $N=7$:



Figura 1 – Painel difusor de madeira do tipo QRD7

- Painel difusor de madeira do tipo QRD7 modificado – “*reflection phase grating, quadratic residue diffuser*”, com período $N=7$, mas com poços adicionais:



Figura 2 – Painel difusor de madeira do tipo QRD7 modificado

- Painel difusor de madeira do tipo hemicilindros – composto por diferentes hemicilindros com diferentes raios:



Figura 3 – Painel difusor de madeira do tipo hemicilindros

3. METODOLOGIA

A metodologia adoptada para a medição e caracterização dos painéis difusores seguiu as boas práticas de Engenharia Acústica referentes aos ensaios em laboratório, nomeadamente em câmara anecóica, em conjunto com as orientações específicas para a caracterização da difusão sonora por superfícies, incluídas no documento relevante AES 2001 [2] e também na norma recentemente publicada ISO 17497 [3]. Informação adicional relevante incluída nas referências [4-6] foi também tida em consideração.

3.1 Procedimento Experimental

Os ensaios experimentais foram realizados na câmara anecóica do Grupo de Acústica e Controlo de Ruído do CPAS - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, cujas dimensões são aproximadamente iguais a 5.25 m x 3.75 m x 3.85 m. Estas dimensões colocam alguns constrangimentos à caracterização em campo livre de difusores do tipo 1-D de tamanho real.

A configuração do sistema de medição encontra-se ilustrada na Figura 4. O conjunto pré-amplificador/microfone foi preso a um braço rígido que foi por sua vez fixado a uma mesa rotativa de accionamento eléctrico controlada passo a passo através de um sistema de *gating* temporal de precisão, permitindo uma resolução angular arbitrária. O eixo de rotação da mesa foi alinhado com o centro geométrico da face frontal de cada um dos difusores de tamanho real. O microfone descreveu assim circunferências nos planos de máxima difusão, perpendiculares às faces frontais dos painéis difusores de madeira. A fonte sonora (coluna altifalante *full range*) foi colocada em 3 posições diferentes dentro da câmara anecóica correspondentes a 3 ângulos de incidência do som nos provetes, nomeadamente +40°, 0° e -40° com referência à direcção normal às faces dos painéis difusores, tal como mostrado na Figura 5.

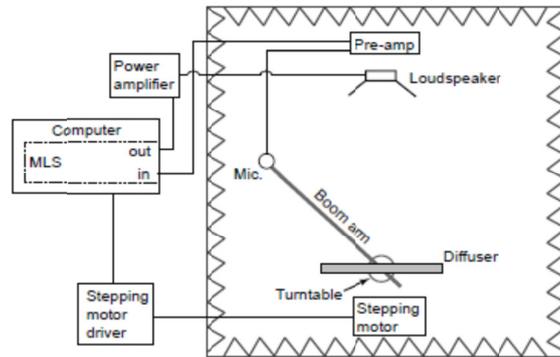


Figura 4 – Configuração do sistema de medição (de ref.^a [4])

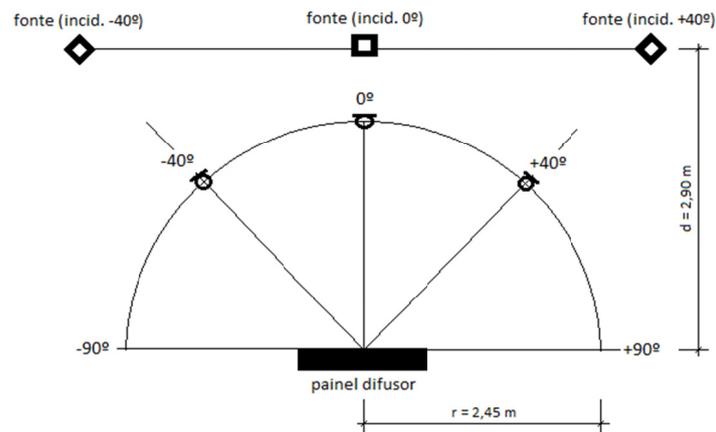


Figura 5 – Montagem das medições experimentais

A resposta impulsiva para cada par fonte-microfone foi medida usando-se um sistema baseado na técnica MLS (*maximum length sequences*). O comprimento das sequências foi definido como igual a $2^{12} - 1 = 4095$, com uma média de 256 amostras para cada aquisição individual de uma resposta impulsiva, que durou assim aproximadamente 20,5 segundos. O varrimento angular do microfone decorreu entre os $+90^\circ$ e os -90° graus, em passos de 10° obtendo-se para cada posição da fonte, e para cada painel difusor, exactamente 19 respostas ao impulso ($90^\circ, 80^\circ, 70^\circ, 60^\circ, \dots, 0^\circ, \dots, -80^\circ, -90^\circ$). Estas respostas foram adquiridas pelo sistema MLS e depois registadas para pós-processamento como descrito a seguir.

A Figura 6 mostra uma fotografia da montagem experimental dentro da câmara anecoica do IST. A fotografia mostra o painel difusor do tipo hemicilindros com a mesa rotativa alinhada com o centro geométrica da face frontal do painel, à qual se encontra preso o braço rígido com o sistema pré-amplificador/microfone suspenso. A posição da fonte sonora corresponde à incidência do som segundo a direcção normal à face do provete.



Figura 6 – Montagem experimental – painel difusor “hemicilindros” – incidência a 0°

3.2 Pós-processamento

As respostas impulsivas registadas pelo sistema de aquisição de dados foram convertidas para o formato “wave” (51.2 kHz, 32 bits). Os sinais áudio resultantes foram posteriormente importados para um software de cálculo matemático onde se efectuaram as diferentes operações de processamento digital de sinal. Uma janela temporal rectangular foi aplicada aos sinais importados de modo a isolar-se as componentes reflectidas pelos painéis difusores do sinal directo no microfone devido à fonte sonora. Para cada conjunto completo de respostas impulsivas, correspondentes às 19 direcções angulares do microfone, foi aplicada a mesma janela (com início e duração constantes) de modo a se obter um conjunto coerente de reflexões difusas por parte de cada provete.

A Figura 7 mostra um exemplo da aplicação da janela temporal a uma dada resposta impulsiva particular e o sinal resultante que corresponde apenas às componentes reflectidas pelo painel difusor.

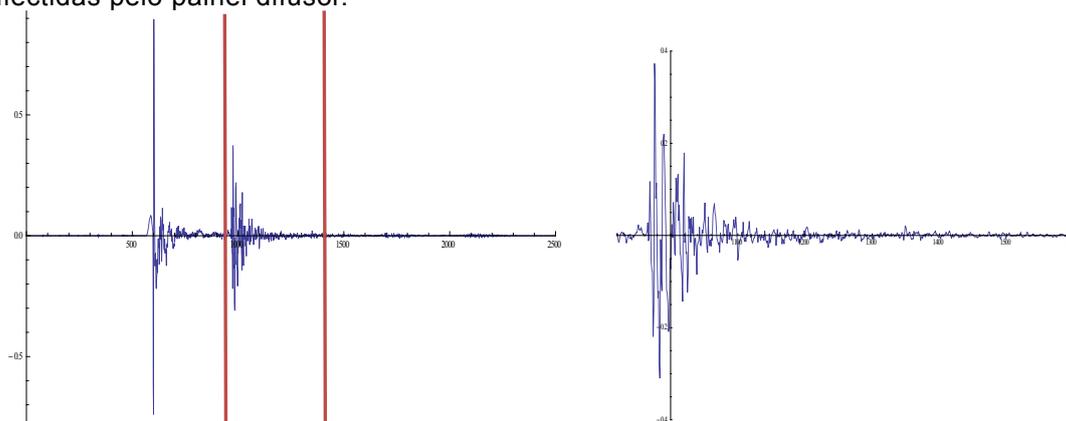


Figura 7 – Esquerda: filtragem por janela temporal. Direita: sinal resultante (reflexão)

Para os sinais resultantes, que contêm apenas as componentes reflectidas, calcularam-se FFTs com um comprimento igual a $2^{13} = 8192$ pontos, permitindo uma resolução de $(55200\text{Hz}/2)/(8192/2) \approx 6.74\text{Hz}$ no domínio da frequência. Uma operação de “zero-padding” foi aplicada aos sinais antes do cálculo das FFTs de modo a terem o comprimento correcto. A Figura 8 mostra um exemplo de uma FFT calculada para o sinal ilustrado na Figura 7 à direita.

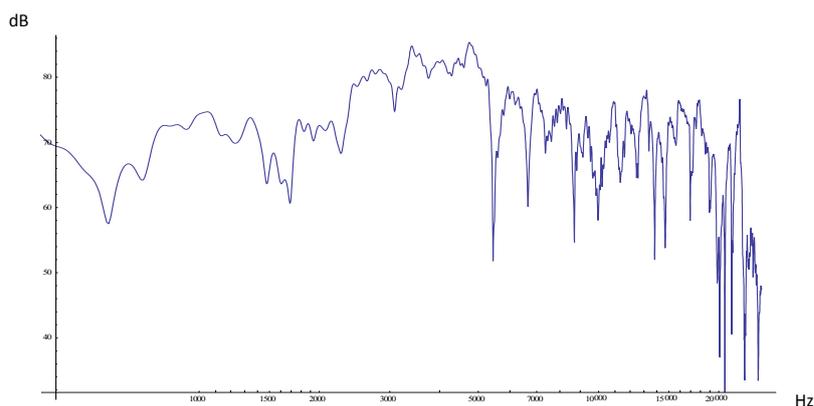


Figura 8 – Espectro de potência da FFT calculada para o sinal da Figura 7 à direita

As componentes espectrais dos espectros de potência das FFTs foram depois somadas energeticamente em bandas de 1/3 de oitava para todas as frequências centrais de interesse, nomeadamente entre 400 Hz e 10 kHz. As mesmas componentes espectrais foram também usadas para a obtenção de dados em termos de bandas de oitava, neste caso para as frequências centrais de 500 Hz a 8 kHz.

O pós-processamento descrito foi aplicado a cada conjunto completo de respostas impulsivas, correspondendo às 19 posições do microfone, obtendo-se assim os

diagramas polares para as bandas de 1/3 e de 1/1 de oitava, para cada uma das 3 direcções de incidência do som nos painéis difusores. No final, os coeficientes de difusão não-normalizados (com referência a uma superfície perfeitamente plana) foram calculados a partir das respostas polares em bandas de 1/3 de oitava, para todos os painéis difusores. A seguinte expressão foi utilizada [2, 3]:

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

4. RESULTADOS

As Figuras 9 a 11 mostram os coeficientes de difusão obtidos para os três painéis difusores, relativos às três direcções de incidência do som (+40°, 0°, -40°).

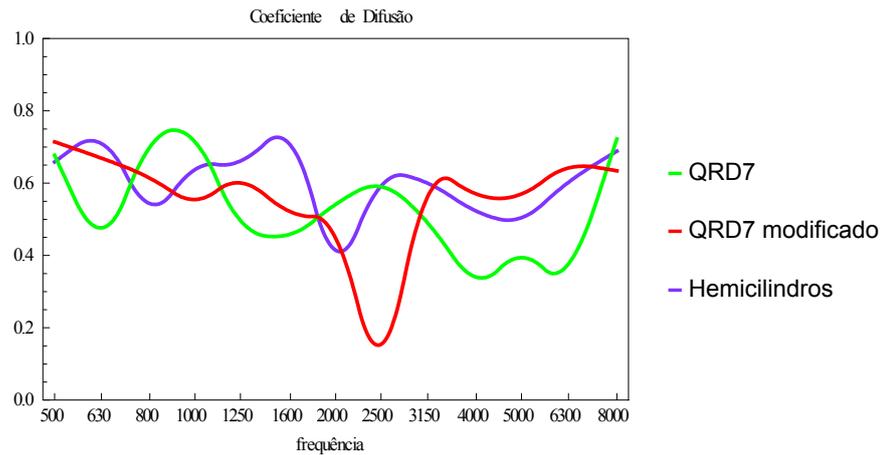


Figura 9 – Coeficientes de difusão para incidência segundo a direcção normal (0°)

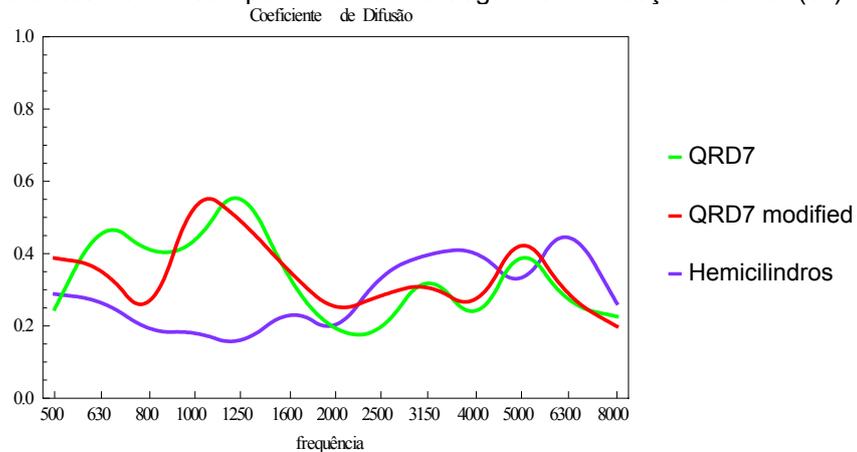


Figura 10 – Coeficientes de difusão para incidência segundo a direcção oblíqua (+40°)

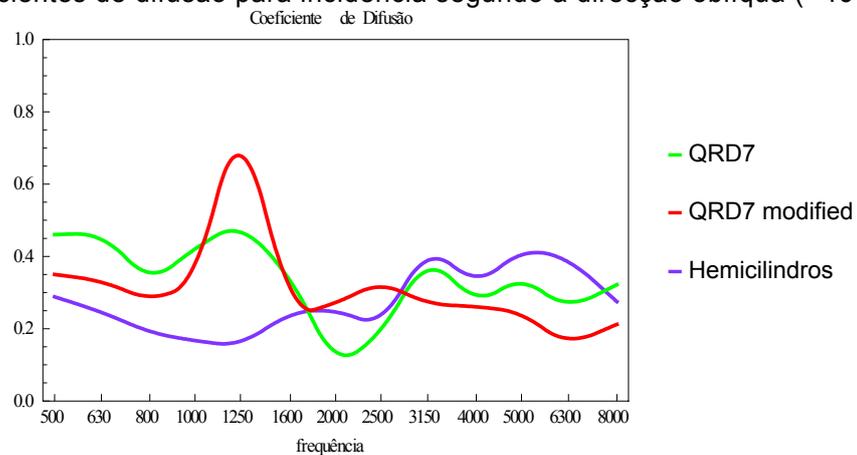
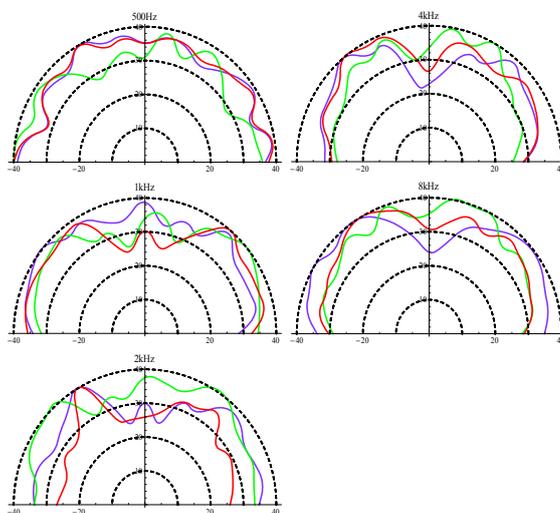


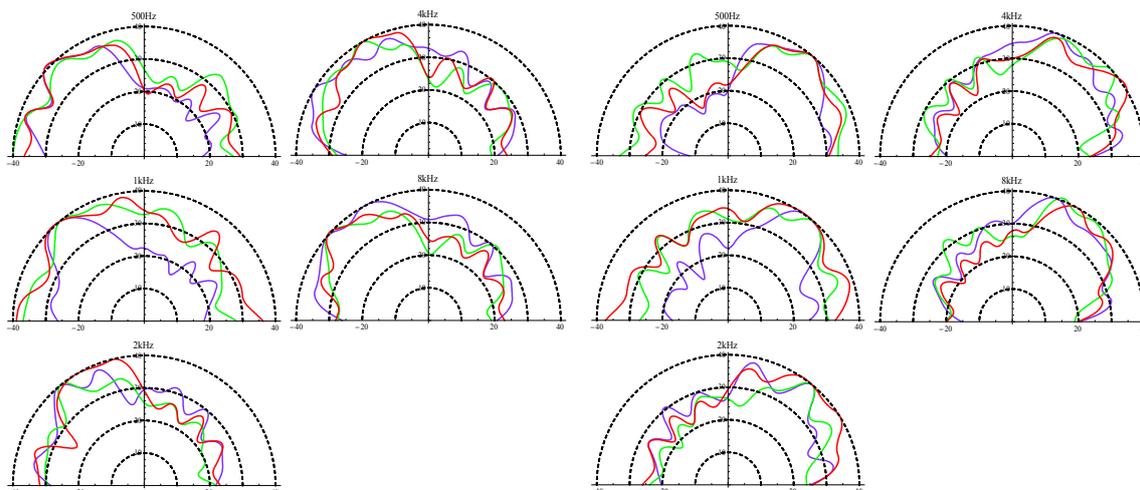
Figura 11 – Coeficientes de difusão para incidência segundo a direcção oblíqua (-40°)

A Figura 12 mostra uma amostra dos diagramas polares, em bandas de oitava, para uma incidência do som segundo a direcção normal aos provetes, 0° , enquanto que a Figura 13 mostra os mesmos diagramas polares mas referentes às direcções oblíquas de incidência do som, iguais a $+40^\circ$ e a -40° .



[L [dB] vs. \angle° de recepção]

Figura 12 – Diagramas polares em bandas de oitava – incidência normal do som a 0°



[L [dB] vs. \angle° de recepção]

Figura 14 – Diagramas polares em bandas de oitava. Esquerda: incidência oblíqua do som a $+40^\circ$. Direita: incidência oblíqua do som a -40°

5. CONCLUSÕES

O desempenho de três painéis difusores de madeira de tamanho real e do tipo 1-D foi medido em condições de campo livre usando-se a técnica MLS e pós-processamento digital de sinais. As medições foram efectuadas em câmara anecóica para três direcções de incidência sonora e as respostas impulsivas reflectidas pelos provetes foram adquiridas com uma resolução angular igual a 10° .

Os resultados mostram que os três painéis difusores se comportam de forma bastante semelhante, significando que a uniformidade da difusão por superfície, ilustrada tanto pelos diagramas dos coeficientes de difusão, como pelos diagramas polares, é muito semelhante entre os três difusores. De facto, uma comparação entre os resultados para os três provetes não fornece evidência suficiente de qual o painel difusor que apresenta o

melhor, ou pior, desempenho em termos de difusão sonora.

No caso da incidência do som a 0° , os coeficientes de difusão médios, no intervalo de frequências de interesse, são iguais a 0.54, 0.56 e 0.60, respectivamente para os painéis difusores do tipo QRD7, QRD7 modificado, e hemecilindros. Para os outros dois ângulos de incidência oblíqua, os coeficientes médios são respectivamente iguais a 0.33, 0.34 e 0.28 ($+40^\circ$) e iguais a 0.33, 0.32 e 0.28 (-40°), o que reflecte a simetria da uniformidade da difusão dos difusores do tipo 1-D. Estes coeficientes de difusão são mais pequenos (\approx factor $\frac{1}{2}$) do que os correspondentes a incidência normal a 0° .

Os resultados para os painéis do tipo QRD7 e QRD7 modificado são muito similares apesar de existirem algumas diferenças aparentes. No caso do painel difusor QRD7 modificado, e para uma incidência do som a 0° , o coeficiente de difusão mostra uma diminuição pronunciada em torno dos 2.5 kHz que pode derivar da inclusão dos poços adicionais na estrutura do painel, cujas profundidades são de cerca de 7 cm ($\triangleright \lambda/2$). De forma idêntica, para as direcções de incidência oblíqua, e em particular para a direcção -40° , os coeficientes de difusão para o QRD7 modificado mostram um ligeiro aumento em torno dos 1.25 kHz ($\triangleright \lambda/4$).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio financeiro parcial da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia (Projecto estratégico).

REFERÊNCIAS

- [1] Schröder, M. R., Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion, *Journal of the Acoustical Society of America*, 65 (4), 958-963, (1979).
- [2] AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity, AES-4id-2001, Audio Engineering Society, Inc., (2001).
- [3] ISO 17497-2:2012 - Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field, International Organization for Standardization, (2012).
- [4] Cox, T. J., D'Antonio, P., *Acoustic absorbers and diffusers*, Spon Press, London and New York, (2004).
- [5] Cox, T. J., Dalenbäck, B.-I. , D'Antonio, P., Embrechts, J. J., Jeon, J. Y., Mommertz, E., Vorländer, M., A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces, *Acta Acustica United with Acustica*, 92 (1), 1-15, (2006).
- [6] Rizzi, L., Farina, A., Galaverna, P., Martignon, P., Conti, L., Rosati, A., Surface scattering uniformity measurements in reflection free environments, *Proceedings of the 121st Convention of the Audio Engineering Society*, San Francisco, USA, 5-8 October, (2006).