

## AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO PROPORCIONADO POR DIFERENTES TIPOS DE SUPERFÍCIE

PACS no. 43.55.Br

Diogo Mateus<sup>1</sup>; Hélder Gonçalves<sup>2</sup>; Andreia Pereira<sup>1</sup>; Luís Godinho<sup>1</sup>; Fernando Branco<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CICC, Universidade de Coimbra, e-mail: {diogo, apereira, lgodinho} @dec.uc.pt  
Departamento de Engenharia Civil, Pólo 2, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

<sup>2</sup> Universidade de Coimbra, e-mail: hgoncalves@uc.pt  
Departamento de Engenharia Civil, Pólo 2, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

<sup>3</sup> INESC-Coimbra, Universidade de Coimbra, e-mail: fjbranco@dec.uc.pt  
Departamento de Engenharia Civil, Pólo 2, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

### ABSTRACT

The acoustic performance of scattering surfaces may be assessed using the diffusion coefficient, which represents the spatial distribution of reflection from a surface. This paper aims to address the diffusion capacity provided by different surfaces, using an experimental approach (according to ISO 17497-2) and a numerical model developed using the Boundary Element Method. The advantages and constraints of the experimental approach used in the evaluation of the diffusion coefficient are here discussed, particularly regarding the chamber size, position of the source and microphones and sample size.

### RESUMO

A avaliação do desempenho acústico de superfícies difusoras pode ser efetuada através da determinação do coeficiente de difusão, que representa a medida da distribuição espacial da reflexão de uma superfície. Neste trabalho pretende-se aferir a capacidade difusora proporcionada por diferentes superfícies utilizando uma abordagem experimental (de acordo com a norma ISO 17497-2), bem como fazendo uso de modelação numérica através do Método dos Elementos Fronteira. Exploram-se as vantagens e limitações da abordagem experimental aqui utilizada na avaliação do coeficiente de difusão, designadamente, no que concerne à dimensão do compartimento, à posição da fonte e microfones ou à dimensão da amostra.

### 1. INTRODUÇÃO

A arquitetura atual tem criado alguns constrangimentos na acústica de salas devido à quase inexistente capacidade difusora das superfícies e à acentuação das reflexões especulares. Isso, contudo, tem levado a um aumento do uso de difusores acústicos por forma a resolver problemas com ecos, ecos refletidos, filtragem, entre outros. A utilização de painéis difusores

em conjugação com material absorvente permite ainda que numa sala não sejam perdidas algumas frequências específicas de alguns instrumentos por efeito da absorção sonora dos materiais e ainda manter a energia do campo sonoro e aumentando a inteligibilidade, melhorando assim a qualidade acústica. [1].

As aplicações e tipos de difusores sonoros são muito diversos e podem ir desde o recurso a vegetação, como apresentado no estudo de Y. Smyrnova et al [2], ou de estruturas periódicas como os cristais sónicos em barreiras acústicas como sugerido por J. Redondo et al [3], ambos para uso no exterior, na proximidade a vias de grande tráfego, ou simples painéis de diversas configurações (eventualmente com a forma otimizada aos requisitos) para um determinado espaço [4].

Os fenómenos relativos a dispersão e difusão sonora gerada por diferentes tipos de superfícies têm sido estudados nas últimas décadas, tanto em termos numéricos como utilizando e melhorando procedimentos experimentais.

O desempenho de difusores acústicos pode ser avaliado sob duas formas: através do Coeficiente de Dispersão, que representa a relação entre a energia sonora dispersa de uma forma não especular e a energia total refletida, e através do Coeficiente de Difusão, que mede a uniformidade com que o som é refletido.

Na modelação numérica de difusores acústicos podem ser utilizados vários métodos. O Método dos Elementos Fronteira (BEM) é geralmente a melhor opção, pois modelos como os de elementos finitos (FEM) ou de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) possuem normalmente um tempo computacional significativamente maior [5,6].

No que respeita aos ensaios experimentais, o Coeficiente de Dispersão é medido segundo a metodologia da norma ISO 17497-1 [7] e o Coeficiente de Difusão através da metodologia descrita no documento técnico AES-4id-2001 [8] que deu origem à norma ISO 17497-2 [9]. À parte das metodologias normalizadas de ensaio têm sido apresentadas algumas metodologias simplificadas, como é o caso da metodologia para determinação *in-situ* do Coeficiente de Difusão apresentada por P. Robinson [10]. Contudo, é importante perceber a potencialidade dos dois métodos de avaliação da difusão de painéis. Enquanto os ensaios experimentais poderão ser interessantes numa fase final de caracterização, a modelação numérica permite obter informações rápidas e com custo muito menores.

Com este trabalho pretende-se avaliar o desempenho de um difusor QRD 7 através de abordagem experimental (de acordo com a norma ISO 17497-2) e numérica (através do método dos Elementos Fronteira) para obter o Coeficiente de Difusão respectivo. Exploram-se as vantagens e limitações da abordagem experimental utilizada no que concerne à dimensão do compartimento, à posição da fonte e microfones e à dimensão da amostra.

## 2. METODOLOGIA DE ENSAIO

A caracterização experimental utilizada neste trabalho incidiu na avaliação do Coeficiente de Difusão, pois pretende-se medir a uniformidade com que o som é refletido, e foi realizada segundo a norma ISO 17497-2. O procedimento de ensaio exige a medição em condições de campo livre, pelo que os ensaios devem preferencialmente ser realizados em câmaras anecóicas ou semi-anecóicas.

A medição do Coeficiente de Difusão foi realizada num espaço com condições semi-anecóicas existente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Este espaço (Figura 1) possui dimensões de 4.20x3.50x2.35 m<sup>3</sup> e está revestido nas paredes e teto com material que apresenta um coeficiente de absorção próximo de 1.0 a partir da banda de terços de oitava de 160 Hz e apresenta um nível de ruído de fundo  $LA_{[100-5000]Hz}=17$  dB(A) a que corresponde um NR 18.

Tendo em conta as dimensões da sala e dos painéis QRD testados, foi adotada a configuração de ensaio apresentada na Figura 2, estando os microfones colocados numa semi-circunferência com 1.50 m e a fonte a uma distância de 3,60 m em relação ao plano frontal da superfície difusora. Foi ainda adotada uma resolução angular de 10°, obtendo-se 19 respostas

de impulso entre  $+90^\circ$  e  $-90^\circ$ . Para a fonte sonora foram definidos dois ângulos de incidência em relação à direção normal do painel difusor,  $-25^\circ$  e  $0^\circ$ . Esta configuração de ensaio permitiu que para amostras de comprimento 0.30, 0.60, 0.90 e 1.20 m, os microfones estejam fora da zona de reflexão especular nas seguintes percentagens: 95%, 84%, 74% e 63% respetivamente.



Figura 1 – Câmara semi-anecóica utilizada para medir coeficientes de difusão.

As respostas impulsivas foram obtidas através da técnica de MLS (Maximum-Length-Sequences), com o máximo das seqüências definido por  $2^{14}-1=16383$  e uma duração de 20.5s.

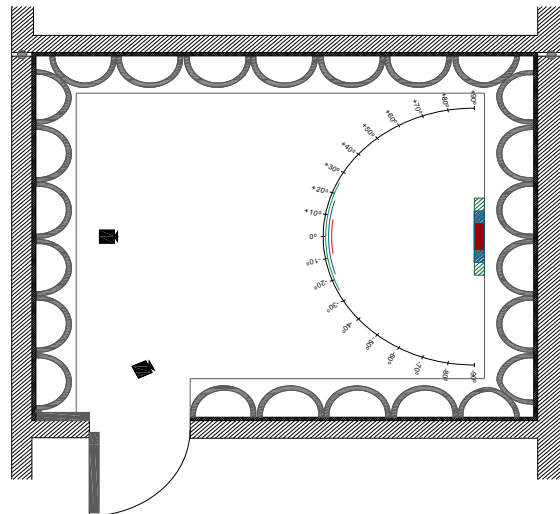


Figura 2 – Configuração do ensaio de determinação do coeficiente de difusão em câmara semi-anecóica.

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 direcional (para cada ângulo de incidência de fonte) e para cada frequência é então obtido através da seguinte expressão:

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

Nesta expressão  $\theta$  é o ângulo de incidência,  $L_i$  é o nível de pressão sonora (em dB) na posição de receptor  $i$  obtido na resposta polar, e  $n$  é o número de receptores.

### 3. MODELO NUMÉRICO

Considere-se uma superfície difusora rígida, de comprimento infinito segundo a direção do eixo  $z$ , inserida num meio acústico infinito (Figura 3), excitado por uma fonte de pressão cilíndrica posicionada em  $\underline{x}_F = (x_F, y_F)$ , oscilando com a frequência angular  $\omega$ , cujo campo incidente é dado por:

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

Nesta expressão a abreviatura *inc* representa o campo incidente,  $A$  é a amplitude da onda,  $\alpha$  a velocidade do ar,  $i = \sqrt{-1}$ ;  $k_c = \omega / \alpha$  (com  $\text{Im} k_c < 0$ ), sendo o número de onda efetivo e  $H_n^{(2)}(\dots)$  a função de Hankel do segundo tipo, de ordem  $n$ .

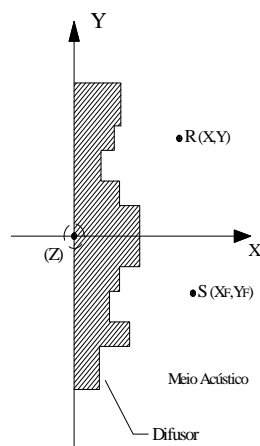


Figura 3 – Geometria do modelo numérico

O campo refletido bidimensional produzido pela fonte cilíndrica ao longo da direção  $z$ , que atua no meio acústico, na presença de um elemento de difusor, é calculado no domínio da frequência utilizando o Método de Elementos de Fronteira (BEM). É usada uma abordagem clássica de BEM que pode ser descrita pela seguinte equação integral de fronteira, assumindo que  $\Gamma$  representa a interface do difusor que será discretizado:

$$c p(\underline{x}_0, \omega) = - \int_{\Gamma_2} H(\underline{x}, \nu_n, \underline{x}_0, \omega) p(\underline{x}, \omega) d\Gamma + p^{inc}(\underline{x}, \underline{x}_F, \omega) \quad (3)$$

Nesta equação,  $H$  é a função de Green para uma região acústica infinita que permite que a derivada da pressão ( $q$ ) seja obtida no ponto  $\underline{x}$  da fronteira quando a fonte harmónica virtual atua 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;  $\nu_n$  refere-se ao vector normal para o exterior da fronteira;  $p^{inc}(\underline{x}, \underline{x}_F, \omega)$  indica o campo incidente quando a fonte é colocada em  $\underline{x}_F$ . O campo incidente é obtido através da expressão (1).

A equação Integral de fronteira é resolvida depois da discretização da interface  $\Gamma$  em  $N$  elementos de fronteira constantes. As integrações resultantes são calculadas utilizando um esquema de quadratura de Gauss. A resolução do sistema resultante torna possível obter a pressão nodal. O campo reflectido em qualquer ponto do domínio pode então ser calculado através da aplicação da equação Integral de fronteira.

### 4. RESULTADOS

A norma ISO 17497-2 referente ao ensaio de difusão apresenta alguns requisitos no que respeita às dimensões exigidas de câmara anecóica ou semi-anecóica de forma a garantir as

condições de campo livre afastado, à percentagem de receptores fora da zona de reflexão especular 8 (a norma recomenda que deverá ser superior a 80%) e ainda ao mínimo de repetições completas da amostra a testar que corresponde a 4 períodos. Dadas as limitações de espaço da câmara semi-aneecóica em que foram realizados os ensaios, foram testadas amostras à escala real e à escala 1:2, permitindo por um lado, avaliar qual o tamanho de amostra que melhor representa o desempenho óptimo teórico obtido através da modelação com BEM, e por outro lado, no caso de amostras à escala reduzida verificar também qual o número de repetições que mais se adequa às condições específicas de ensaio.

As amostras utilizadas referem-se a um difusor QRD 7 (Figura 4) projetado para a frequência dos 500Hz e a uma superfície plana rígida (que corresponde à situação de referência), ambos em madeira. O difusor QRD7 foi projetado para a frequência dos 500Hz e foi testado à escala real (com dimensões 0.60x0.60x0.21 m) e à escala 1:2 (com dimensões 0.30x0.30x0.1 m), tendo sido realizado o mesmo com as amostras planas.

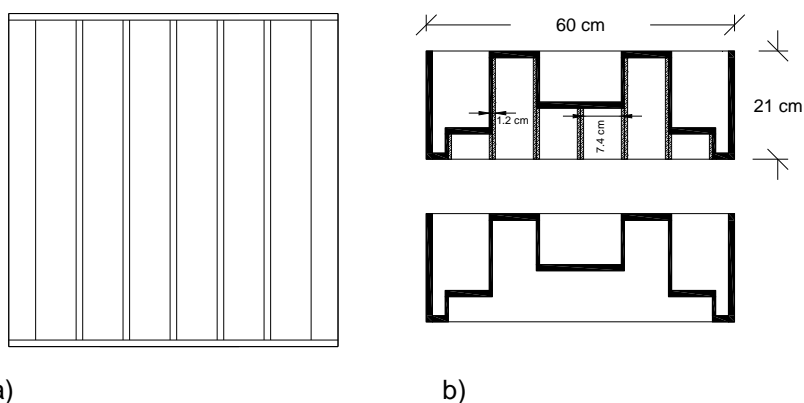


Figura 4 – Difusor QRD 7 testado: a) vista de frente; b) secção com separadores (em cima) e sem separadores de degraus (em baixo).

Primeiramente foram realizados ensaios com as amostras à escala real e apenas com um elemento, por forma a garantir para um afastamento de microfones e fonte respetivamente de 1.50 e 3.60 m que 84% dos microfones estivessem fora da zona de reflexão especular. Foram assim ensaiados um difusor QRD 7 com separadores de degraus, um difusor QRD 7 sem separadores de degraus e uma superfície plana rígida, sendo os resultados apresentados na Figura 5. Através da análise desta figura é possível observar os diferentes desempenhos das três superfícies, notando-se que ambos os difusores testados nesta fase apresentam melhor desempenho que a superfície lisa a partir dos 315 Hz e que o difusor QRD com separadores apresenta melhor comportamento nas médias frequências. Nas baixas frequências os resultados mostram alguma oscilação que não seria de esperar, contudo, isso poderá dever-se a efeitos de difracção nos bordos da amostra que no caso dos difusores de menores dimensões se apresenta com alguma importância.

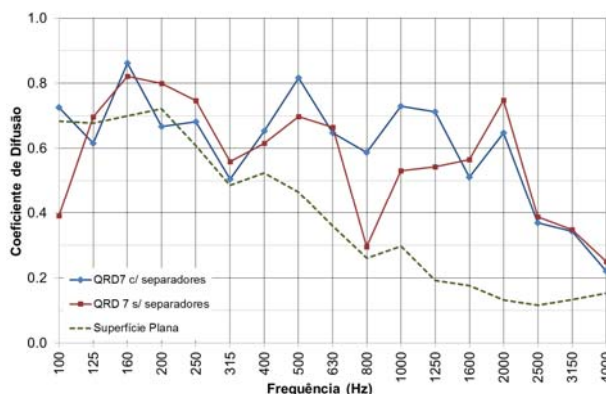


Figura 5 – Coeficientes de difusão de um difusor QRD 7 com e sem separadores de degraus e de uma superfície plana com dimensões 0.60x0.60 m, para incidência a 0°.

Seguidamente, foi ensaiada nas mesmas condições uma amostra à escala 1:2 do mesmo difusor QRD 7 e superfície lisa e foram comparados os resultados (Figura 6a), notando-se que os valores dos coeficientes de difusão são muito próximos e as curvas mostram o mesmo andamento, sendo que na amostra à escala os valores são ligeiramente inferiores e no caso da superfície lisa apresenta também uma maior linearidade, o que se pode dever a neste caso 95% dos microfones estarem fora da zona de reflexão especular. Também no caso da amostra à escala verificam-se, nas baixas frequências, oscilações entre o coeficiente de difusão do difusor e da superfície plana que não seriam espectáveis.

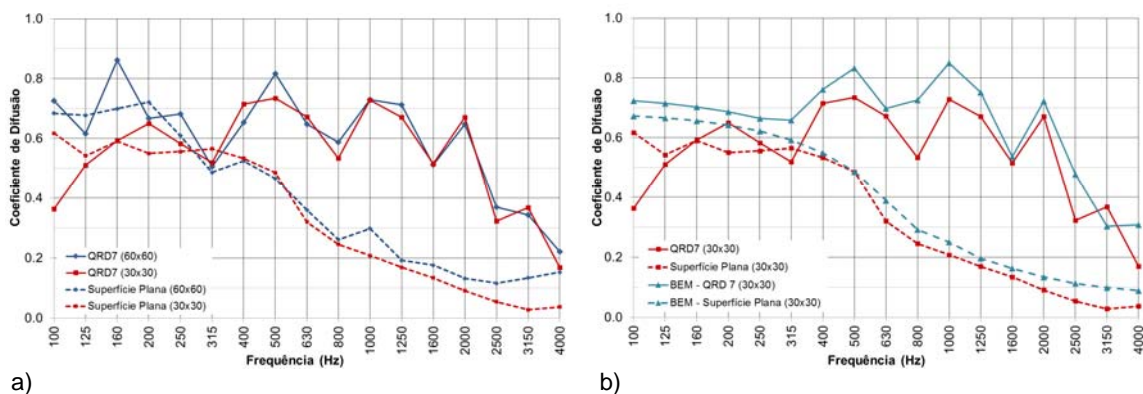


Figura 6 - Coeficientes de difusão de um difusor QRD 7 e de uma superfície plana para incidência a 0°: a) resultados experimentais com amostras à escala real (0.6x0.6 m) e à escala 1:2; b) resultados experimentais e numéricos para uma amostra à escala 1:2.

Quando comparadas as curvas experimentais dos coeficientes de difusão das superfícies à escala com as curvas teóricas obtidas através da simulação numérica usando as mesmas condições dos ensaios laboratoriais (Figura 6b) verifica-se que, à exceção da curva do difusor nas baixas frequências, as curvas apresentam o mesmo andamento, validando os resultados dos ensaios laboratoriais para as condições específicas em que decorreram os ensaios.

Embora a utilização de um maior número de repetições da superfície difusora permita uma melhor representação das condições de aplicação reais em parte pela redução do efeito de bordo dos painéis, simular uma grande quantidade de painéis exige instalações laboratoriais de grande dimensão para garantir as distâncias entre os painéis, fonte e recetores. Assim, por forma a perceber qual o número de repetições da superfície difusora que melhor caracterizam o seu desempenho e numa tentativa de aproximação das condições de ensaio prescritas na norma ISO 17497-2, foram ensaiados uma sequência de dois e três painéis difusores e superfícies lisas (Figuras 7a e 7b), garantindo que respetivamente 84% e 74% dos microfones da semi-circunferência estão fora da zona de reflexão especular. Verifica-se com isso que os resultados para duas e três amostras apresentam-se mais próximos dos resultados numéricos que quando se ensaia apenas uma amostra, sendo especialmente notório nas frequências mais baixas.

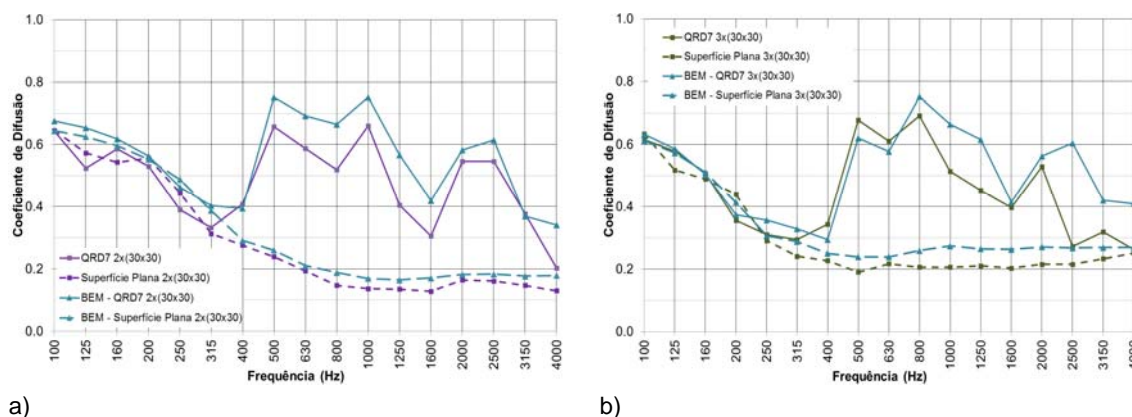
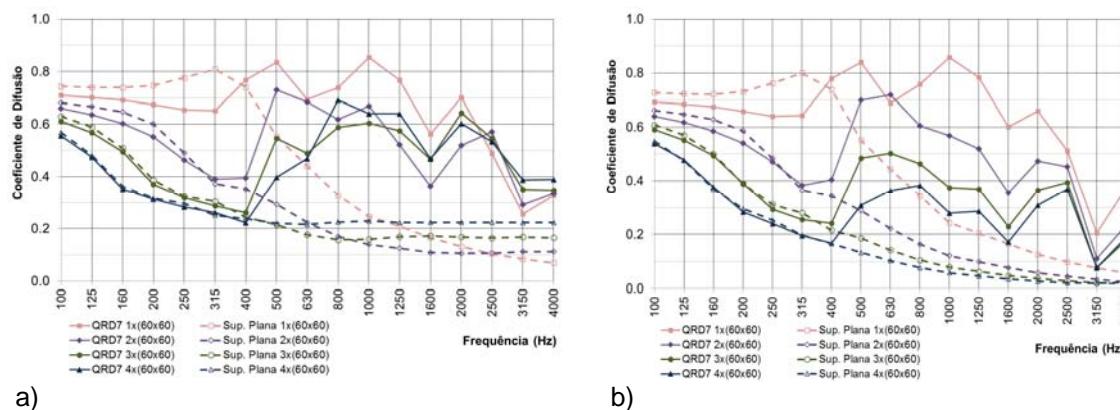


Figura 7 – Coeficientes de difusão experimentais e numéricos de dois (Figura 7a) e três difusores (Figura 7b) QRD 7 e superfícies planas à escala 1:2, para incidência a 0°.



Sabe-se que para avaliar o desempenho de superfícies difusoras a partir de diferentes resultados deve partir-se sempre das mesmas condições de ensaio ou numéricas, pois os coeficientes de difusão podem variar significativamente com as condições de ensaio. Pretendeu-se neste trabalho avaliar a importância das condições de ensaio, tendo por isso sido determinados os coeficientes de difusão através da modelação numérica utilizando o método dos elementos fronteira para raios de fonte e microfones respetivamente de: 10 e 5 m (Figura 8a) e de 100 e 50 m (Figura 8b) por serem as condições ótimas para a obtenção destes coeficientes, tal como referido por T. Cox et al [1]. A modelação numérica tanto do difusor QRD7 como da superfície plana permitem perceber, tal como seria espectável, que à medida que os raios de fonte e microfone aumentam os coeficientes de difusão diminuem e torna-se mais visível a frequência de projeto no caso dos difusores. O aumento do número de repetições da amostra produz também uma redução nas amplitudes dos coeficientes.



a) b)  
 Figura 8 – Resultados numéricos dos coeficientes de difusão para um difusor QRD 7 e superfície plana para um raio de fonte e microfones de 10 e 5 m (esquerda) e de 100 e 50 m (direita), para incidência 0°.

Por fim, foram ensaiadas três unidades de difusores QRD 7 e superfícies planas à escala mas agora para incidência a  $-25^\circ$  (Figura 9) de forma a poder observar-se e comparar os resultados com os anteriormente descritos (para incidência a  $0^\circ$ ). Nota-se então que para uma incidência não normal à superfície difusora, embora as frequências de pico se mantenham, nas altas frequências a difusão é consideravelmente superior do que quando analisado para incidência normal, apresentando assim uma difusão mais constante ao longo do espectro de frequências.

Com interesse em verificar a difusão do difusor QRD 7 quando os separadores se encontram orientados na horizontal (usualmente aplicado por forma a conseguir difusão em 2D), foram ensaiadas três amostras à escala para incidência normal (Figura 10). Pela análise da curva do coeficiente de difusão verifica-se que enquanto nas baixas frequências e até à frequência de projeto do difusor os coeficientes são praticamente iguais, a partir daí há uma quebra muito acentuada da difusão no painel.

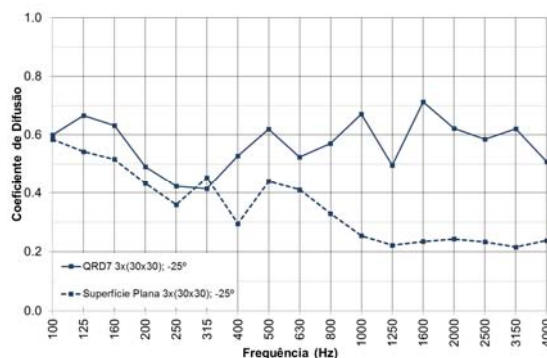


Figura 9 – Coeficientes de difusão de um difusor QRD 7 e uma superfície plana para incidência a  $-25^\circ$ .

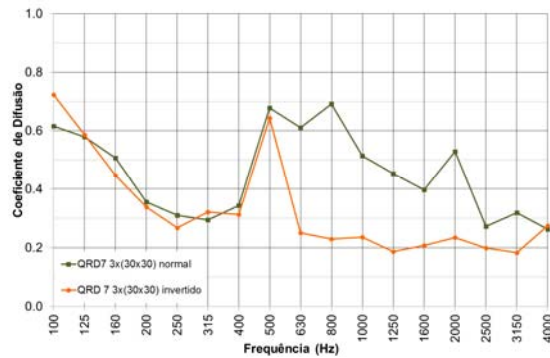


Figura 10 – Coeficientes de difusão de um difusor QRD 7 na posição invertida para incidência a 0°, utilizando três amostras à escala 1:2.

## 5. CONCLUSÕES

Através da comparação dos resultados dos coeficientes de difusão obtidos experimentalmente em câmara semi-anecóica (de acordo com a norma ISO 17497-2) e numericamente (realizados com base na formulação dos elementos fronteira), foi possível perceber algumas vantagens e limitações das condições experimentais disponíveis. No que diz respeito aos ensaios experimentais, os requisitos para obtenção das condições de campo livre e a necessidade de amostras representativas leva à necessidade de se executarem ensaios à escala, podendo assim com alguma facilidade obter-se resultados fiáveis. No que respeita à modelação numérica implementada, foi possível obter resultados ótimos teóricos do desempenho de superfícies difusoras pela possibilidade de obtenção de muito grandes raios, que possibilitaram a determinação de respostas de referência. Contudo, existindo também alguma variabilidade dos coeficientes de difusão em função das condições em que são obtidos, designadamente pelo facto do comportamento vibratório dos painéis poder ser importante, a realização de ensaios experimentais permite obter desempenhos mais aproximados daqueles que se obtêm na realidade.

## AGRADECIMENTOS

Trabalho financiado pelo QREN, no âmbito do Programa Operacional Fatores de Competitividade: projeto FCOMP-01-0202-FEDER-023123 (FunctionalStone).

## REFERÊNCIAS

- [1] T.J. Cox, P. D'Antonio: Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application, Spon Press, 2<sup>nd</sup> Edition, 2009.
- [2] Y. Smyrnova, J. Kang, C. Blackford and C. Cheal: Diffusion coefficient of vegetation: measurements and simulation. Acoustics 2012, Nantes, France.
- [3] J. Redondo, J.V. Sánchez-Pérez, J. M. Fuster, JM Barrigón, P. Atanasio: Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido. TecniAcústica 2013, Valladolid, Spain.
- [4] P. D'Antonio, T. J. Cox: Diffusor application in rooms. Applied Acoustics, 113-42, 2000.
- [5] J. Redondo, R. Picó, B. Roig, M. R. Avis: Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes. Acta Acustica United with Acustica, vol. 93, 611 – 622, 2007.
- [6] T. Perry: The lean optimization of acoustic diffusers: design by artificial evolution, time domain simulation and fractals". Honours Thesis. Faculty of Engineering, University of Victoria, Canada, 2011.
- [7] ISO 17497-1: 2004. Acoustics. Sound scattering properties of surfaces. Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.
- [8] AES-4id-2001. Characterization and measurement of surface scattering uniformity.
- [9] ISO 17497-2: 2012. Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field.
- [10] P. Robinson, N. Xiang: On the subtraction method for in-situ reflection and diffusion coefficient measurements. Journal of the Acoustical Society of America, 127, EL99, 2010.