

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE DIFUSORES CURVILÍNEOS BASEADOS EM FUNÇÕES DE BASE RADIAL E OPTIMIZADOS UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

PACS: 43.55.Ev

PATRAQUIM, Ricardo¹; GODINHO, Luís¹; AMADO MENDES, Paulo¹.

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

Palavras-Chave: Difusores acústicos; Formas orgânicas; Optimização da performance acústica; RBF; BEM; Algoritmos genéticos; Norma ISO 17497-2: 2012.

ABSTRACT

The authors, in previous works, proposed an alternative technique to define new shapes for efficient sound diffusion based on the use of radial basis functions (RBF) and, using a genetic algorithm (GA), optimized those curvilinear surfaces, maximizing the diffusion coefficient. This parameter is computed within the optimization procedure using the Kirchoff integral equation and the Boundary Element Method (BEM). In this work, some solutions developed according to the proposed methodology are presented and the experimental evaluation of some prototypes is carried out, in accordance with ISO Standard 17497-2: 2012, in order to validate the method.

RESUMO

Os autores, em trabalhos anteriores, propuseram uma técnica alternativa para definir novas formas para dispersar eficientemente o som com base no uso de funções de base radial (RBF) e, utilizando um algoritmo genético (AG), optimizaram deste modo difusores com superfícies curvilíneas, maximizando o coeficiente de difusão. Este é calculado, no interior da rotina de optimização, resolvendo a equação integral de Kirchoff utilizando o método numérico dos elementos fronteira (BEM). Neste trabalho, apresentam-se algumas soluções desenvolvidas de acordo com a metodologia proposta e procede-se à avaliação experimental de alguns protótipos, de acordo com a Norma ISO 17497-2:2012, procurando desta forma validar o método sugerido.

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 uma acústica adequada, sem absorções excessivas e espalhando o som mais uniformemente pela sala, eliminando ao mesmo tempo defeitos acústicos como ecos ou zonas-sombra. Apesar da optimização de difusores ser um tema de pesquisa intensa nos últimos anos, grande parte dos difusores existentes no mercado ainda corresponde a soluções do tipo

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Schroeder, QRD ou MLS, ou derivadas dessas, com geometrias angulosas, baseados em sub-elementos paralelepípedicos e associados numa dada sequência numérica, mas cujo aspecto muitas vezes não é do agrado dos arquitectos.

Embora já existam algumas metodologias de desenvolvimento, modelação e optimização de difusores, os autores apresentaram em anteriores trabalhos [1,2] uma metodologia de desenvolvimento de superfícies mais orgânicas (i.e., curvilíneas), que poderão ser esteticamente mais apreciados e melhor aceites e que estejam optimizadas para dispersar uniformemente o som nelas incidente. Assim, nesses trabalhos, demonstrou-se a possibilidade de desenvolver soluções inovadoras de difusores acústicos com desempenho acústico maximizado, cuja forma é gerada pelo uso de funções de base radial (RBF) e que são baseadas nas mais modernas técnicas de modelação numérica alicerçadas no método dos elementos fronteira (BEM) e de optimização (Algoritmos Genéticos).

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma validação experimental de algumas soluções obtidas através da metodologia proposta. Das diversas possibilidades que o método apresentado em [2] permite, o critério subjacente à escolha das soluções a avaliar experimentalmente foi o que permitisse avaliar os objectivos da optimização na câmara semi-anecóica do DEC/FCTUC – daí serem difusores que foram optimizados para serem utilizados individualmente (optimização de **1 módulo** apenas) e apenas para **incidência normal** (e não para 3 módulos e 5 ângulos de incidência como é referido na Norma ISO 17497-2:2012 [3]).

Por outro lado, como se pretende que estes protótipos sirvam para avaliar a capacidade de fabricar futuros produtos comerciais, optou-se por escolher difusores optimizados cujos pontos extremos tenham a mesma altura e que o declive da curva seja igual, de modo a permitir uma utilização conjunta de diversos módulos sem haver descontinuidades na curvatura conjunta assim definida.

No próximo ponto, tendo por base [1,2], é apresentado de forma muito breve o método proposto. E, em seguida, são apresentados os provetes construídos e são comparados os dados obtidos em laboratório com os resultados calculados numericamente.

2. METODOLOGIA IMPLEMENTADA

2.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

Como se pretende obter “formas orgânicas”, ou seja, geometrias suaves e curvilíneas com forma natural, propôs-se a utilização de um conjunto de funções matemáticas designadas por “funções de base radial” (usualmente designadas por RBF, do inglês *radial basis functions*) como base de interpolação entre um determinado número de pontos de controlo NC , eles próprios situando-se na superfície do difusor acústico. Embora exista um conjunto muito alargado de funções deste tipo que poderiam ser usadas, a escolha recaiu sobre as funções do tipo MQ RBF (*Multi-Quadratics*). Estas funções, tal como a generalidade das RBFs, dependem apenas da distância entre um ponto de origem (centro da RBF) e um ponto de destino, r , e de um parâmetro livre, c , tomando a seguinte forma:

$$\phi_j(\underline{x}) = \sqrt{r^2 + c^2} \quad (1)$$

Considerando um número NC de pontos de controlo, que definem a superfície do difusor, com coordenadas (x_i, y_i) , um possível esquema de interpolação é assemblado recorrendo a um conjunto de NC RBFs, cada uma delas centrada num ponto de controlo, de forma a que:

$$\sum_{j=1}^{NC} A_j \phi_j(x_i) = y_i, \text{ para cada } i=1\dots NC \quad (2)$$

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Aplicando a equação (2) a cada ponto de colocação, constrói-se um sistema de NC equações e NC incógnitas, cuja solução fornece as amplitudes de cada RBF, A_j .

Mais detalhes sobre o modo como se obtém aquelas curvas podem ser encontrados em [1,2].

2.2 COEFICIENTE DE DIFUSÃO

O desempenho de um difusor acústico, para uma dada incidência angular da fonte sonora, θ , pode ser quantificado através do coeficiente de difusão, d_θ , tal como definido na Norma ISO 17497-2:2012 [3], medindo este valor a capacidade do difusor espalhar o som homoganeamente em todas as direcções em seu redor. Este parâmetro é calculado através da sua resposta polar (diagrama com os níveis de pressão, L_i , nos recetores em volta do difusor), utilizando a seguinte expressão:

$$d_\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10} \right)^2} \quad (3)$$

Para normalizar este coeficiente, é comparado com o coeficiente de difusão de uma placa plana com a mesma dimensão (neste caso comprimento) do difusor em análise. O propósito desta normalização é remover os efeitos da difracção nos bordos do difusor, uma vez que o mesmo é finito. O coeficiente de difusão normalizado é dado por [4]:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_\theta - d_{\theta,flat_plate}}{1 - d_{\theta,flat_plate}} \quad (4)$$

Neste trabalho o cálculo numérico do coeficiente de difusão normalizado foi obtido determinando o nível de pressão sonora, nos diferentes receptores distribuídos em torno do difusor, (L_i), utilizando o método numérico dos elementos fronteira (BEM). Para mais informações sobre o modelo BEM implementado consultar [1,2,4,5].

2.3 ALGORITMO DE OPTIMIZAÇÃO DA FORMA DA SUPERFÍCIE

Com base na descrição das metodologias de análise atrás apresentadas, e na estratégia de definição de geometrias suaves proposta, apresenta-se agora o algoritmo de optimização para se obter formas orgânicas de difusores optimizadas. O algoritmo de optimização encontra-se descrito em [1,2] e incorpora a utilização de um “algoritmo genético” como peça fundamental no processo de optimização (Figura 1).

Os algoritmos genéticos distinguem-se dos outros métodos de optimização por trabalharem com a codificação dos parâmetros de entrada (e não com os próprios parâmetros), por operarem um conjunto de indivíduos (população), utilizando uma função de custo (ou de mérito) para os classificar e por se basearem em regras de iteração probabilísticas (operadores genéticos: “**Seleção**”, “**Mutação**” e “**Crossover**”) para fazer evoluir a população (as soluções).

Uma população inicial de n_{pop} indivíduos (difusores) pode ser formada aleatoriamente ou ser fixa e as características de cada indivíduo são determinadas pelos seus genes. Ao desenhar difusores, os genes são simplesmente um conjunto de números que descrevem a superfície: pontos de controlo (**Control Points**) das RBF. No presente caso, como se estabeleceu que os pontos de controlo estão uniformemente distribuídos ao longo da largura do difusor (por definição $L=0.6$ m), a codificação de cada indivíduo é apenas referente à altura (“y”) de cada um deles. A

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

codificação utilizada foi a binária sendo utilizados “3 bit” de modo a permitir 8 patamares (2^3), variando de “0” até um valor máximo definido pelo utilizador (*refv*).

Cada indivíduo (ou a forma do difusor) possui um valor de aptidão que indica quão bom ele se comporta em dispersar o som: o **Coefficiente de Difusão**, que é avaliado conforme referido na secção anterior (com recurso ao BEM).

Através dos operadores genéticos, **selecção**, **crossover** (cruzamento) e **mutação**, a adequação das sucessivas populações melhoraram no processo de iterativo de optimização. Este processo iterativo continua até que seja atingido um número limite de gerações (de iterações) ou que a população se torne suficientemente adaptada, cujo difusor produzido com a melhor forma não se altere ao longo de várias gerações e, desse modo, possa ser classificado como óptimo. No final, o processo de optimização proposto conduz a uma geometria suave, optimizada para uma dada banda de frequência (ou bandas de frequências), para uma ou mais posições da fonte sonora e que permitirá um desempenho máximo.

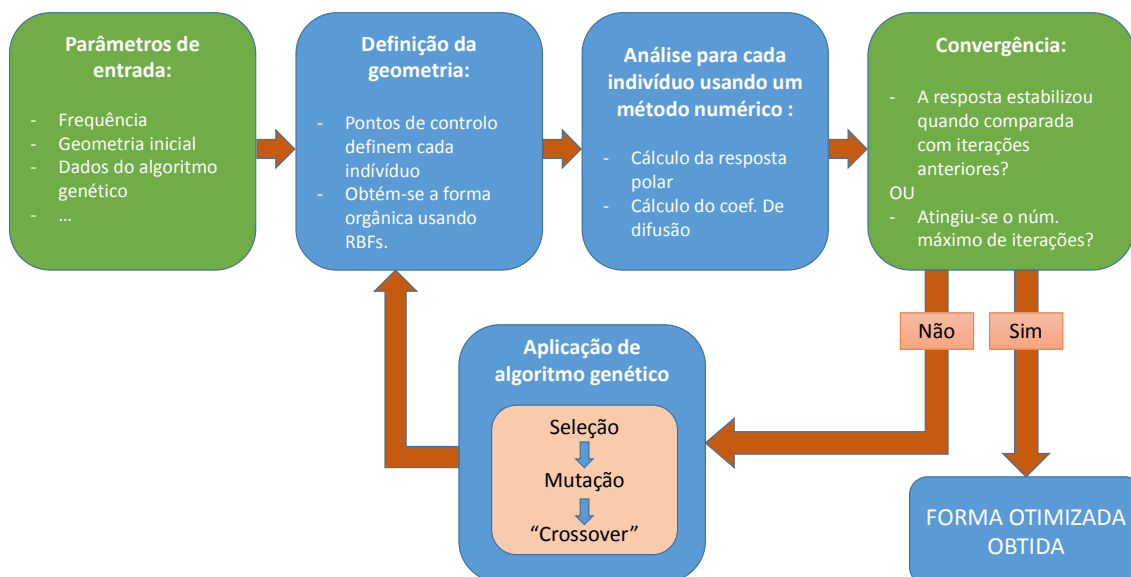


Figura 1 - Diagrama de fluxo do algoritmo de análise e optimização proposto.

3. PROVETES TESTADOS

Foram escolhidos três difusores para serem produzidos provetes e avaliados laboratorialmente, na câmara semi-anecóica do DEC/FCTUC, de acordo com a norma ISO 17497-2: 2012 [3]. Dadas as restrições dimensionais da referida câmara, foram escolhidos difusores que foram optimizados para serem utilizados individualmente (optimização de **1 módulo**) e apenas para **incidência normal** (a metodologia proposta permite optimizar para “n” módulos idênticos e para várias incidências).

Por outro lado, como se pretende que estes protótipos sirvam para avaliar a capacidade de fabricar futuros produtos comerciais, optou-se por escolher difusores optimizados cujos pontos extremos tenham a mesma altura e que o declive da curva nesses pontos seja igual, de modo a permitir uma utilização conjunta de diversos módulos sem haver descontinuidades na curvatura conjunta assim definida.

A largura do difusores foi de $L=0.6$ m pois a dimensão standard dos difusores existentes no mercado é 0.6 m x 0.6 m. Foram utilizados apenas 5 pontos de controlo pois, como foi visto em

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

[2], são suficientes para se obter coeficientes de difusão elevados. Por outro lado, como os provetes são construídos em contraplacado, a utilização de mais pontos de controlo poderia originar superfícies demasiado “enrugadas” que dificilmente poderiam ser fabricadas deste modo. A altura máxima possível para os pontos de controlo foi $refv=0.121$ m, pois pretendia-se difusores não muito profundos. Como foi referido anteriormente, a altura dos pontos de controlo foi codificada em 3 bits, permitindo que estes pudessem tomar 8 alturas possíveis durante o processo de optimização. Partiu-se de uma população inicial de 22 indivíduos cujas ordenadas de todos os pontos de controlo eram $y=0$ m (superfícies planas) e os difusores optimizados correspondem ao indivíduo “mais apto” ao fim de 150 iterações.

O primeiro difusor a ser escolhido (Figura 2) foi um que foi optimizado apenas para uma banda de oitava (e para incidência normal) e cuja espessura máxima não era muito elevada. Deste modo, foi escolhido um difusor optimizado para a banda de oitava centrada nos 1000 Hz. Lembra-se que no processo de optimização para uma banda de oitava, para o cálculo do coeficiente de difusão, apenas são tomados em consideração 5 frequências discretas, igualmente espaçadas no interior da banda de frequência [1,2]. O valor obtido para este parâmetro de optimização foi $d_0=0,991$. Este difusor será denominado por “**1000 Hz**”.

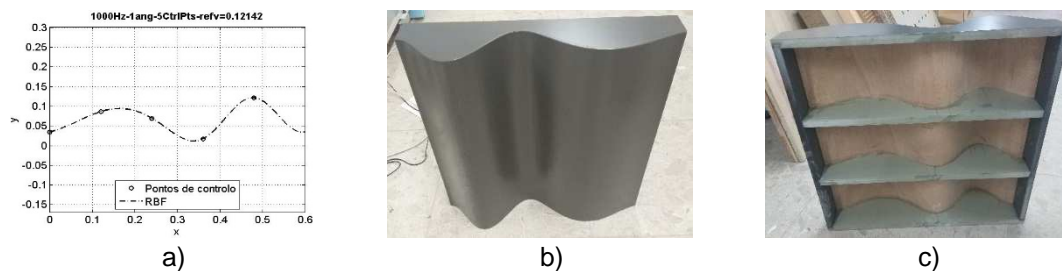


Figura 2 – Difusor “**1000 Hz**”. a) Curva RBF; b) Superfície frontal; c) Tardoz.

O segundo difusor escolhido (Figura 3) foi um que, para incidência normal, estava optimizado para 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências, da banda dos 400 Hz à banda dos 2500 Hz. Esta optimização para várias bandas de terço de oitava corresponde à maximização da média aritmética do valor do coeficiente de difusão em cada uma das bandas (que é obtido utilizando 5 frequências discretas igualmente espaçadas no interior da respectiva banda de 1/3 oitava), à qual se subtrai o desvio padrão de modo a valorizar difusores com uma média (dos coeficientes de difusão) elevada, porém com valores mais constantes (menor desvio padrão!). O valor obtido para este parâmetro de optimização foi $d_{average_corrig}=0,797$. Este difusor será denominado por “**9fALL**”.

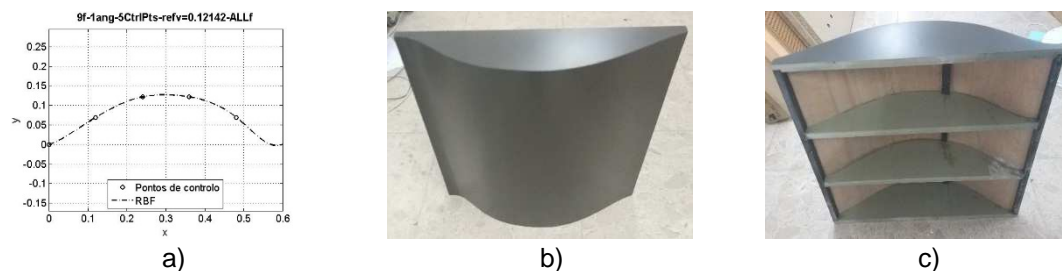


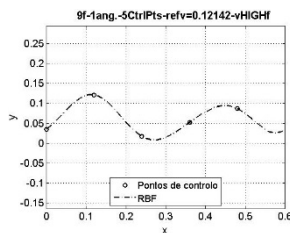
Figura 3 – Difusor “**9fALL**”. a) Curva RBF; b) Superfície frontal; c) Tardoz.

O último difusor escolhido (Figura 4) resulta da optimização de um difusor para as altas frequências. Foi obtido pela maximização da média ponderada dos coeficientes de difusão em 9

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

bandas de terço de oitava, centradas dos 800 Hz aos 5000 Hz, cujos pesos nas bandas dos 3150Hz, 4000Hz e 5000Hz eram, respectivamente, “6”, “7” e “8”, e “1” nas restantes 6 bandas. A esta média ponderada foi subtraído o valor do desvio padrão ponderado com o objectivo de não só se obter difusores com valores elevados nas altas frequências, como estes sejam mais constantes (menor desvio padrão ponderado). O valor obtido para este parâmetro de optimização foi $d_{average_corrig}=0,781$. Este difusor será denominado por “**9fvHIGH**”.



a)



b)



c)

Figura 4 – Difusor “**9fvHIGH**”. a) Curva RBF; b) Superfície frontal; c) Tardoz.

Embora mantendo-se o mais fiel possível às curvas RBF (apesar da existência de eventuais pequenos erros de construção), as superfícies foram deslocadas de modo a que, relativamente à base do difusor ($y=0.0$ m), o ponto mais alto de cada um dos provetes tivesse uma ordenada de $y=0.15$ m, de modo a que a espessura total de cada um dos provetes fosse 0.15 m. A Figura 5 ilustra este facto.



Figura 5 – Os três provetes utilizados para a validação experimental, com altura máx. idêntica de 0.15 m.

Analisando os resultados numéricos obtidos por bandas de oitava (Figura 6a), verifica-se claramente que os pressupostos das respectivas optimizações foram atingidos: O difusor “**1000Hz**”, optimizado apenas para a banda de oitava centrada nos 1000 Hz, é bastante eficaz nessa frequência, melhor que os restantes; o difusor “**9fALL**”, que foi optimizado para ter valores elevados nas bandas de terço de oitavas nas médias frequências (que correspondem às bandas constituintes das bandas de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz), tendo em atenção não só o seu valor elevado como a menor dispersão dos seus valores, tem valores elevados praticamente constantes; O difusor “**9fvHIGH**”, que foi optimizado para ter valores elevados e constantes nas bandas de terço de oitava nas altas frequências, também cumpre os seus objectivos, sendo o difusor mais eficiente na banda de oitava centrada nos 5000 Hz, tendo, contudo, valores elevados desde a banda dos 1000 Hz (cumprindo os seus objectivos, pois 800 Hz é a primeira banda de terço de oitava que constitui a banda de oitava dos 1000 Hz).

As conclusões que se pode retirar da observação da Figura 6b) não são muito diferentes da análise dos resultados em bandas de oitava. Contudo, ressaltam-se os seguintes resultados: o difusor “**1000Hz**” é claramente mais eficiente nas três bandas de terço de oitava que constituem a banda de oitava dos 1000 Hz do que nas restantes bandas; o difusor “**9fALL**”, optimizado para as médias frequências, tem elevada eficiência apresenta algumas oscilações, porém, os valores mínimos não baixam dos 0,7 (e o desvio padrão relativo à média entre os 400 Hz e os 2500 Hz é de 8,9%); o difusor “**9fvHIGH**”, optimizado para as altas frequências, não só tem valores

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

elevados como é bastante constante desde dos 800 Hz aos 5000 Hz (o desvio padrão relativo à média é de apenas 3,6%), sendo particularmente mais eficiente nas bandas dos 4000 Hz e 5000 Hz, para as quais a otimização ponderou de forma mais elevada que as restantes bandas de otimização.

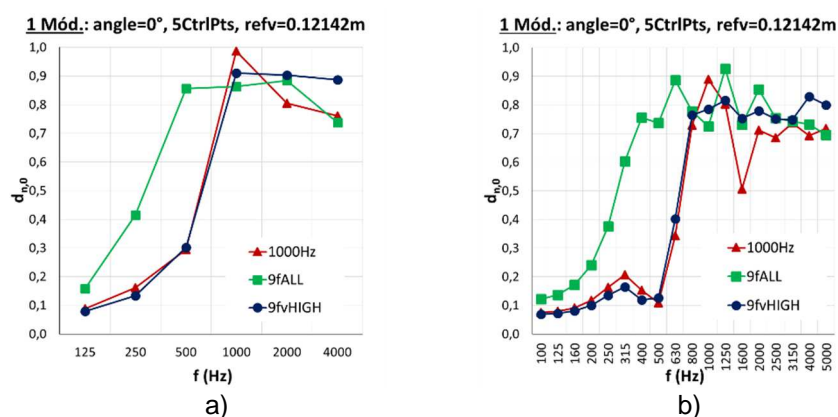


Figura 6 – Resultados numéricos da otimização: coeficiente de difusão normalizado de 1 módulo, para incidência normal: a) em bandas de oitava; b) em bandas de terço de oitava.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios laboratoriais foram realizados para se obter o coeficiente de difusão, para incidência normal, de acordo com a norma ISO 17497-2: 2012 [3] e cujo procedimento já foi abordado em [4,5]. De uma forma rápida, relembra-se a configuração do ensaio (ver Figura 7): a fonte sonora encontra-se alinhada com o ponto central do difusor (incidência normal), situada a 3.0 m de distância. Os microfones são colocados numa semicircunferência centrada no ponto central do difusor com o raio de $r=1.9$ m. Foram realizadas medições com uma discretização angular de 10° , correspondendo a 19 receptores (“19R” nas legendas dos gráficos dos resultados). Conforme é referido em [4,5], esta configuração, para difusores com uma largura de 600 mm, permite ter mais 80% dos receptores fora da região especular, tal como é requerido na supracitada norma.

Para se obter o coeficiente de difusão normalizado também se avaliou experimentalmente uma placa plana com a mesma dimensão dos provetes (0.6 m x 0.6 m). Para mais informações sobre o procedimento experimental, consultar [4,5].

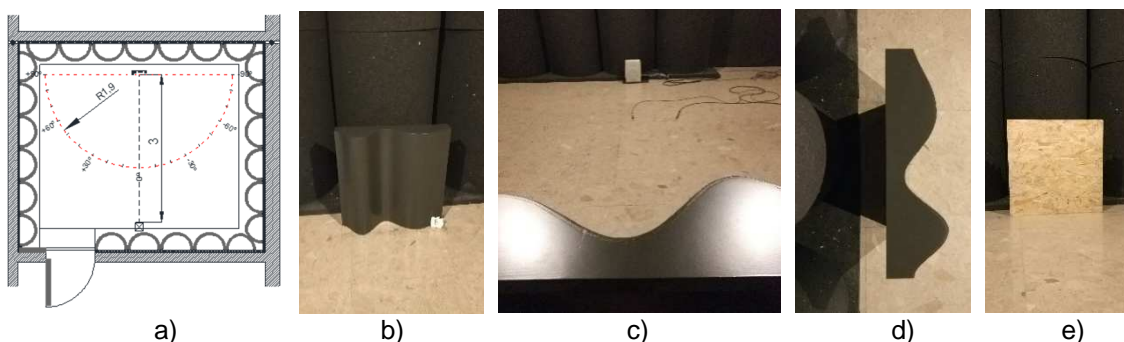


Figura 7 – Procedimento experimental: a) Lay-out da câmara semi-anequica; b) Posição do provete; c) Posição relativa da fonte sonora; d) Vista de cima do provete; e) Placa plana.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Para aumentar a reprodutibilidade dos resultados experimentais, foram realizados vários ensaios e os resultados que de seguida se apresentam correspondem à sua média (“av” na legenda dos gráficos).

Conforme é referido em [4,5], para se obter o coeficiente de difusão “laboratorial” é necessário realizar uma FFT à diferença entre as respostas impulsivas “com” e “sem” o difusor (após a utilização de uma janela temporal que permita remover reflexões residuais que não sejam oriundas do difusor em análise). Com os parâmetros utilizados nos ensaios para a obtenção das respostas impulsivas foi possível obter uma discretização “fina” em frequência (as respostas impulsivas foram obtidas através da técnica de MLS, com o máximo de sequências definidas por $2^{14}-1=16383$, com uma duração de 1,2794 s, que corresponde a uma frequência de amostragem de 12806 Hz e uma discretização em frequência inferior a 1 Hz, $\Delta f=1.2794^{-1}$ Hz) [4,5].

Para se comparar os resultados obtidos em laboratório (“L” nas legendas das figuras seguintes) com os resultados numéricos (“N” nas legendas das próximas figuras), teve de se recalculer o coeficiente de difusão normalizado numérico tendo em consideração também uma discretização fina em frequência (≈ 1 Hz, “ff” nas legendas das figuras) em vez de se utilizar apenas 5 frequências discretas, como foi feito anteriormente no âmbito da optimização. No recálculo dos resultados numéricos também foi tido em atenção que os resultados laboratoriais foram obtidos a partir de 19 posições de microfone (“19R”) e não de 180 receptores, como foi utilizado no processo de optimização.

5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

As figuras seguintes apresentam a comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais, em bandas de oitava (Figura 8) e em bandas de terço de oitava (Figura 9).

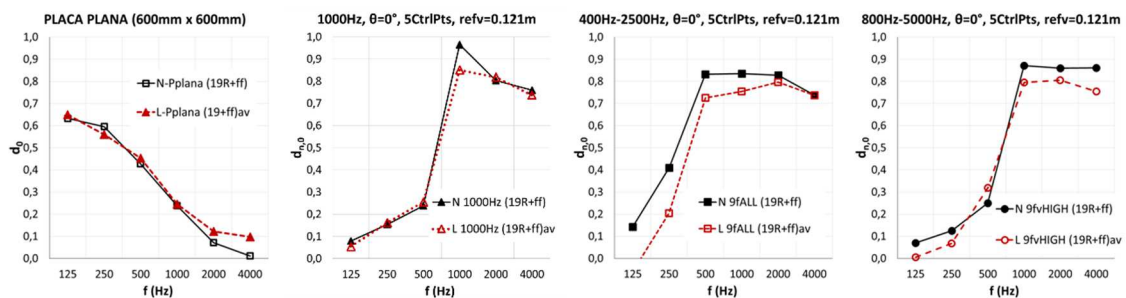


Figura 8 – Comparação entre resultados numéricos e laboratoriais do coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de oitava (avaliação de 1 módulo): a) Placa plana. Difusor optimizado; b) “1000 Hz”; c) “9fALL”; d) “9fvHIGH”.

Da observação das Figuras 8 e 9 pode-se concluir que existe uma boa concordância entre os resultados numéricos e os resultados experimentais. De uma forma geral, os resultados experimentais são ligeiramente inferiores, contudo, seguem de perto a “tendência” dos resultados numéricos. Ou seja, pode-se dizer que, embora não haja uma concordância (absoluta) em termos quantitativos, há uma boa concordância em termos qualitativos.

Desta forma, pode-se considerar que estes ensaios validam o processo de optimização proposto neste trabalho e as conclusões dele retiradas, nomeadamente, as tecidas em [1,2] e ao longo das secções anteriores.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

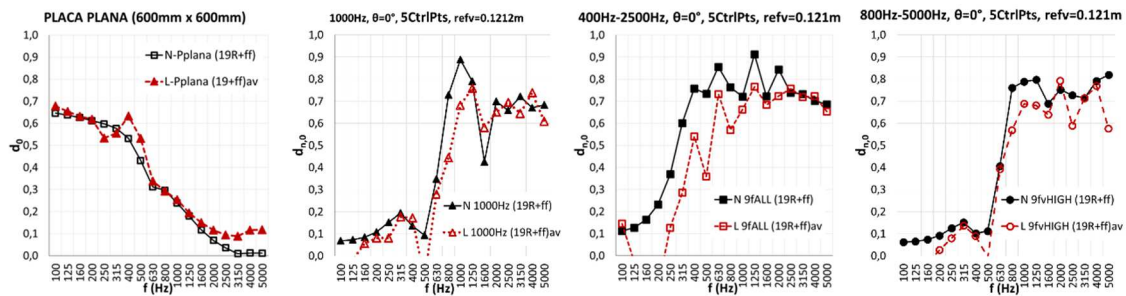


Figura 9 – Comparação entre resultados numéricos e laboratoriais do coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de terço de oitava (avaliação de 1 módulo): a) Placa plana. Difusor otimizado: b) “1000 Hz”; c) “9fALL”; d) “9fvHIGH”.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa “Castelhana & 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.

Este trabalho foi igualmente financiado pelos fundos do FEDER através do Programa Operacional dos Factores de Competitividade - COMPETE e pelos fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-007633 e através do Programa Operacional Regional CENTRO2020 no âmbito do projeto CENTRO-01-0145-FEDER-000006 (SUSpENSE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Patraquim, R., Godinho, L., Amado Mendes, P., “RBF-based shapes optimized with genetic algorithms for sound diffusion”. Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics - ICA 2016, 5 to 9 September, 2016, Buenos Aires, Argentina.
- [2] Patraquim, R., Godinho, L., Amado Mendes, P., Redondo, J., “Design and optimization of sound diffusers using RBF-based shapes and genetic algorithms”. Tecniacústica 2017, A Coruña, Espanha, Atas em CD-Rom, Outubro 2017.
- [3] ISO 17497-2:2012 “Measurement of sound scattering properties of surfaces — Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field”.
- [4] Patraquim, R., Santos, P., Godinho, L., Amado Mendes, P., Mateus, D., Pereira, A., “Behaviour of mixed absorptive-diffusive panels based in pseudo-random sequences”. Proceedings of the 22nd International Congress of Sound and Vibration - ICSV22, 12 to 16 July, 2015, Florence, Italy.
- [5] Patraquim, R., Santos, P., Godinho, L., Amado Mendes, P., Mateus, D., “Estudo da influência do material constituinte no desempenho de difusores QRD”. Tecniacústica 2015, Valência, Espanha, Atas em CD-Rom, Outubro, 2015.