

## DIVISÓRIAS AUTOPORTANTES DE DESEMPENHO ACÚSTICO OPTIMIZADO

PACS: 43.55Dt

António P. O. Carvalho; Pedro D. S. Oliveira

Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia, Univ. Porto, 4200-465 Porto, Portugal  
Tel: 351.22508193; Fax: 351.22508140  
carvalho@fe.up.pt; pedro.dan.oliveira@gmail.com

### Resumo

Apresenta-se neste trabalho a concepção de elementos autoportantes de carácter modular, em derivados de madeira, para absorção sonora, funcionando como ressoadores agrupados e/ou como membranas. Estes elementos destinam-se particularmente a espaços de trabalho de tipologia *open space* constituindo soluções versáteis e optimizadas de absorção sonora em largo espectro. É apresentado o estudo experimental analisando o efeito da geometria de furação, da espessura da caixa-de-ar e da presença e espessura de material absorvente.

Palavras-chave: Madeira, correcção acústica, ressoadores, membranas, divisórias.

### Abstract

This paper presents the designing of self sustaining modular elements, built on wood derivatives, for acoustic absorption that function as grouped resonators and/or membranes, to be placed on open space environments such as offices or call centers. They constitute a versatile solution as they are optimized for large spectrum sound absorption. An experimental study is presented where some parameters such as the perforation type, depth of the confined volume behind the panels and presence and positioning of porous materials are analyzed.

Keywords: Wood, acoustic correction, resonators, membranes, open spaces.

## 1. Introdução

Os elementos autoportantes desenvolvidos e aqui apresentados, destinam-se a espaços de trabalho de tipologia *open space* como, por exemplo, zonas de serviços amplos, escritórios de uso colectivo e *call centers*. Nestes espaços as principais fontes de ruído são conversas bem como telefones, teclados e outros equipamentos de escritório [1]. Enquanto o ruído proveniente de conversações está associado com as médias e altas frequências, o mesmo não acontece com o ruído proveniente de computadores e impressoras, pois estes emitem frequentemente ruído também nas baixas frequências [2]. Decidiu-se pois desenvolver um conjunto de elementos destinados especificamente à absorção sonora em largo espectro, actuando através de dois mecanismos distintos de absorção: ressoadores agrupados, para intervenções nas médias e altas frequências, e membranas, para absorção nas baixas frequências.

## 2. Desenvolvimento e Caracterização de Soluções

### 2.1. Conceito

Dado que os espaços de trabalho *open space* são extremamente versáteis e podem ser reconfigurados facilmente, a criação de elementos de difícil mobilidade nestes espaços poderia



A bibliografia [3] sugere que, nos ressoadores agrupados e membranas, a frequência onde a absorção sonora é máxima aumenta com a diminuição da caixa-de-ar. Deste modo, pretendendo-se, no caso dos ressoadores agrupados, direccionar a absorção para as frequências essenciais da palavra (2 a 4 kHz), será necessário diminuir ou utilizar menores espessuras da caixa-de-ar. Deve, no entanto, referir-se que não se pretende que o pico de absorção sonora se situe neste intervalo mas sim imediatamente antes de modo a que a absorção sonora no referido intervalo esteja já maximizada. Deste modo, as espessuras da caixa de ar a ensaiar são 40 e 80 mm sendo que a de 40 pretende ser a espessura próxima da ideal para maximizar a absorção nas altas frequências e 80 mm outra suficientemente diferente para se verificarem diferenças em relação à primeira.

### 2.3. Ressoadores Agrupados

Não havendo vantagens a nível acústico com o aumento da percentagem de perfuração acima de cerca de 25%, os painéis a desenvolver teriam uma percentagem de furação semelhante [3]. Optou-se por desenvolver dois tipos de painéis perfurados de modo a tirar conclusões sobre a influência da forma de furação: um painel com perfurações quadradas (fig. 2) e um painel adicional com perfurações semelhantes a rasgos (fig. 3) indicados daqui em diante como CFQ e CFR. Ambos são em placas de fibra de madeira de média densidade (MDF - *Medium Density Fiberboard*) ignífugas, de 12 mm de espessura com um comprimento máximo de 881 mm e altura de 313 mm. No entanto, quando aplicado nas estruturas apresentam uma dimensão visível de 875 mm de comprimento e 307 mm de altura. Na face posterior foi aplicada uma tela acústica tipo *SoundTex*, proporcionando alguma absorção [4] e impedindo a passagem de fibras provenientes dos materiais absorventes colocados no interior.

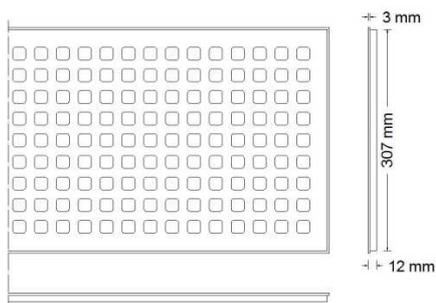


Fig. 2. Vistas esquemáticas de painel tipo CFQ.

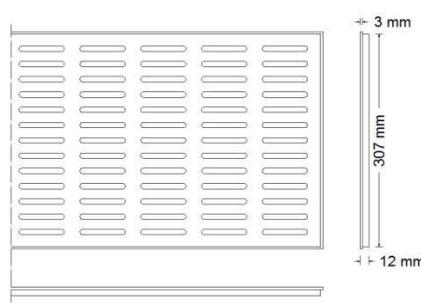


Fig. 3. Vistas esquemáticas de painel tipo CFR.

Enquanto nos painéis CFQ as furações se assemelham a quadrados de 18 mm de aresta (arredondados nos vértices com um arco de circunferência) e as furações estão espaçadas de 12 mm medido entre arestas, as furações do CFR são alongadas na horizontal, assemelhando-se a rectângulos medindo 64 mm de comprimento e 8 mm de largura. Apresenta-se no quadro 1 as informações necessárias à previsão da frequência de ressonância do sistema, aproximada à banda de frequência de  $\frac{1}{3}$  de oitava mais próxima, quando associado às profundidades de caixa-de-ar sugeridas no ponto anterior.

Quadro 1. Previsão da frequência de ressonância dos painéis tipo CFQ.

Tipo de Painel	Profundidade da caixa-de-ar (cm)	Área de uma furação (cm <sup>2</sup> )	Raio equivalente (cm)	Espessura do painel (cm)	Percentagem de furação (%)	Banda de frequência de ressonância (Hz)
CFQ	4/8	3,1	1,0	1,2	29	800/630
CFR		5,0	1,3		24	800/500

### 2.4. Membranas

As membranas apresentam um modo de funcionamento distinto no qual a sua massa superficial e a profundidade da caixa-de-ar são parâmetros condicionantes da frequência de

absorção máxima. Este painel (em MDF com uma massa volúmica de cerca de  $800 \text{ kg/m}^3$ ) é executado com as dimensões idênticas às dos painéis anteriores de modo a beneficiar do mesmo sistema de encaixe mas não apresentando furações. Com uma espessura de 3 mm a massa superficial dos painéis tem o valor de  $2,4 \text{ kg/m}^2$ . No quadro 2 são apresentadas algumas informações relativamente a estes painéis e à frequência de ressonância previsível do sistema, aproximada à banda de frequência de terço de oitava mais próxima.

Quadro 3. Previsão da frequência de ressonância dos painéis tipo M.

Tipo de Painel	Profundidade da caixa-de-ar (cm)	Massa superficial ( $\text{kg/m}^2$ )	Banda de frequência de ressonância (Hz)
M	4/8	2,4	200/125

### 3. Ensaio em Câmara Reverberante

#### 3.1. Disposições

Os protótipos foram ensaiados na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da U. do Porto (FEUP). Tendo à sua disposição cinco elementos modulares constituindo uma área real de absorção de cerca de  $3,5 \text{ m}^2$ , foram ensaiados na sua forma acoplada, constituindo uma barreira elementar de 1,6 m de altura. Isto constitui melhor o modo real de funcionamento dos elementos. No caso de um ressoador agrupado, pretende-se determinar qual o mais eficaz na gama de frequências da palavra enquanto, no caso de uma membrana pretende-se determinar a configuração mais eficaz para a absorção nas baixas frequências. Para isto fez-se variar o tipo de painel, a espessura da caixa-de-ar e a presença e posição de uma manta de lã de rocha de massa volúmica de  $70 \text{ kg/m}^3$  com 40 mm de espessura. Ensaíram-se igualmente os elementos estruturais isolados (denominados por E no quadro 4) ou seja, sem painéis frontais, com espessuras de cavidade de 40 e 80 mm bem como uma situação em que a única diferença é a colocação da placa vertical de acrílico no topo do último elemento modular de modo a comprovar que a sua presença não interfere nos resultados esperados. Todos os restantes ensaios foram executados sem a referida placa.

Quadro 4. Configurações de elementos autoportantes ensaiadas.

Denominação	Tipo de painel (furação)	Espessura da caixa-de-ar (mm)	Presença e posição de 40 mm de lã de rocha	Placa de acrílico no topo
E 40	-	40	-	Não
E 80	-	80	-	Não
CFQ 40, 0	Quadrado	40	Não	Não
CFQ 40, 40	Quadrado	40	Sim	Não
CFQ 80,0	Quadrado	80	Não	Não
CFQ 80, 40 F	Quadrado	80	Frente	Não
CFQ 80, 40 T	Quadrado	80	Tardoz	Não
CFR 40, 0	Rasgos	40	Não	Não
CFR 40, 40	Rasgos	40	Sim	Não
CFR 40, 40, A	Rasgos	40	Sim	Sim
CFR 80,0	Rasgos	80	Não	Não
CFR 80, 40 F	Rasgos	80	Frente	Não
CFR 80, 40 T	Rasgos	80	Tardoz	Não
M 40, 0	Membrana (s/ furação)	40	Não	Não
M 40, 40	Membrana (s/ furação)	40	Sim	Não
M 80,0	Membrana (s/ furação)	80	Não	Não
M 80, 40 F	Membrana (s/ furação)	80	Frente	Não
M 80, 40 T	Membrana (s/ furação)	80	Tardoz	Não

### 3.2. Resultados

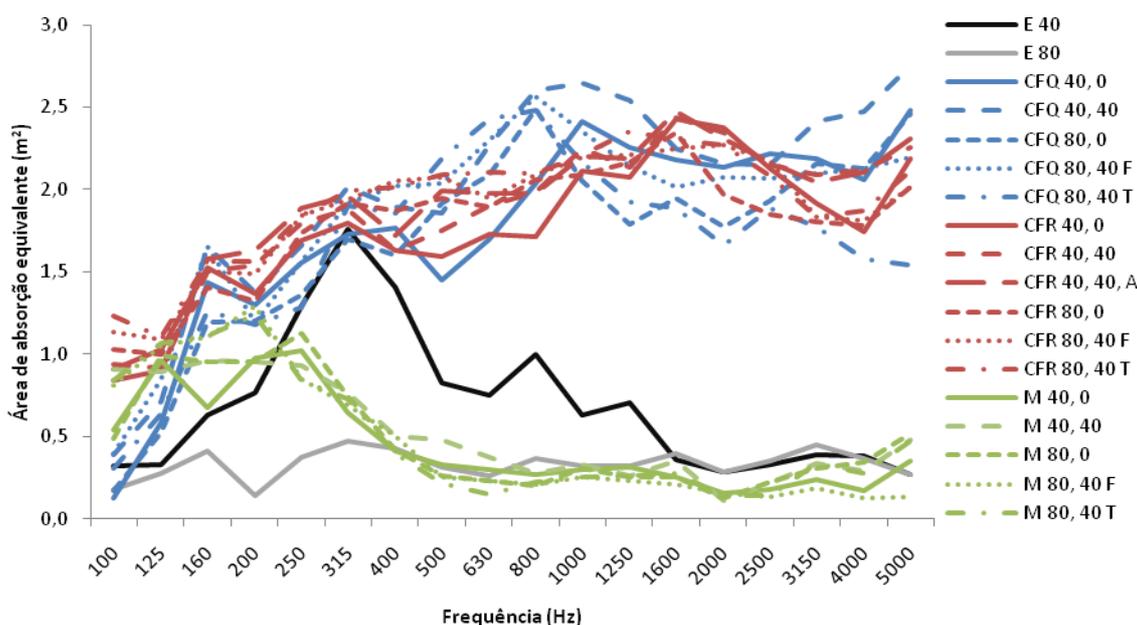


Fig. 4. Áreas de absorção sonora equivalente,  $A_T$ , em  $m^2$ , de uma barreira (5 elementos) em cada configuração.

Este modelo de ensaio apresenta ainda algumas diferenças em relação à utilização prática destes elementos. A referida barreira deverá ser colocada, de acordo com as recomendações de Egan [2], associada a outras de modo a constituir uma barreira de desenvolvimento longitudinal igual a pelo menos o dobro da altura. Nesta configuração, as faces laterais dos elementos não estariam à vista, ou estaria apenas uma, no caso de se tratar de um dos elementos da ponta. No entanto, o elemento foi ensaiado com essas faces visíveis, pelo que as mesmas contribuíram para a absorção do elemento e tal não corresponde à utilização prática dos mesmos. Questionando-se quanto à influência da absorção das referidas faces laterais no resultado final, decidiu-se efectuar uma correcção dos valores das áreas de absorção sonora equivalente medidas bem como dos valores do coeficiente de absorção sonora daí decorrentes. O cálculo das referidas correcções não é apresentado nesta comunicação [5], concluindo-se, no entanto, que a importância relativa da absorção das faces laterais em relação à absorção total é muito pequena não havendo praticamente alteração dos valores da área de absorção sonora equivalente com uma cada vez menor influência à medida que a área de absorção sonora aumenta, isto é, nas frequências onde os sistemas são mais eficazes. Por outro lado, quando analisados os valores do coef. de absorção sonora, verificou-se que, após as correcções, os dito valores têm tendência a aumentar. Isto deve-se ao facto do coef. de absorção sonora medido funciona como uma média ponderada entre o coef. de absorção efectivo da barreira e aquele admitido para as faces laterais. Neste caso, as variações dos valores do coef. de absorção sonora encontram-se na ordem dos 20% para os painéis perfurados, nas frequências acima dos 125 Hz.

Apresentam-se, na fig. 4, os valores corrigidos (a menos das configurações E 40 e E 80) da área de absorção sonora equivalente,  $A$ .

## 4. Análise de Paramétrica de Soluções

### 4.1. Influência da espessura da caixa-de-ar

Existe alguma diferença na absorção sonora das barreiras quando a espessura da caixa-de-ar varia (fig. 5). Ela não é tão demarcada quanto se esperaria, tendo-se verificado em apenas um caso a translação da frequência de absorção máxima com a variação da espessura da caixa-de-ar conforme o esperado e estabelecido pelas fórmulas de previsão de ressoadores.

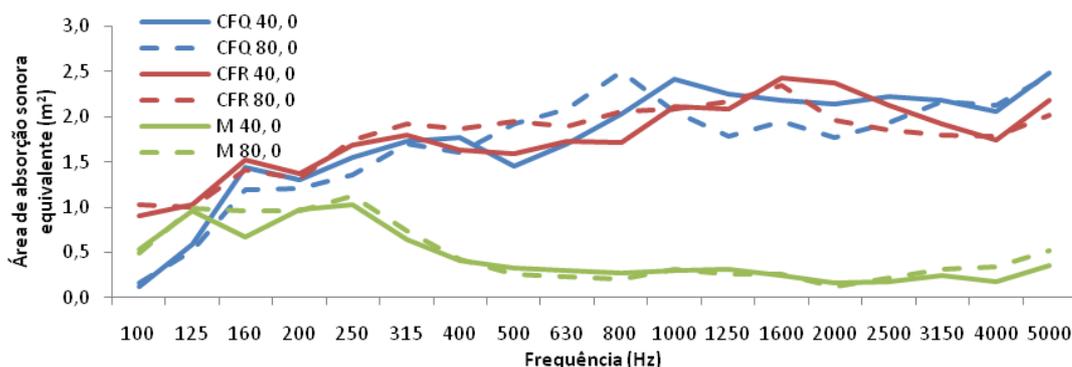


Figura 5. Áreas de absorção sonora equivalente,  $A_T$ , em  $m^2$ , de uma barreira (5 elementos) nas configurações de painéis com diferentes espessuras de caixa-de-ar, sem material absorvente no interior.

Para perceber porque razão a diferença entre os resultados obtidos não é tão visível quanto esperado, observaram-se mais aprofundadamente os resultados das configurações E 40 e E 80, referentes aos ensaios de absorção das barreiras sem qualquer painel frontal (só a estrutura base). Enquanto na configuração E 80 a área de absorção é muito baixa ao longo de todo o espectro, como seria de esperar pois não existe qualquer mecanismo de absorção sonora presente, o mesmo não acontece na configuração E 40. Os resultados dessa configuração sugerem que o mecanismo utilizado para diminuir a espessura da caixa-de-ar não funcionou tanto como elemento rígido mas mais como membrana ressonante proporcionando absorção adicional ao sistema. Isto alterou os resultados obtidos distorcendo-os em relação ao comportamento esperado. Ainda assim, notou-se que existem, de facto, ganhos de absorção em configurações de ressoadores agrupados (CFQ e CFR) nas altas frequências quando a espessura da caixa de ar diminui concluindo-se que as caixas de ar de 40 mm aparentam proporcionar, em geral, melhores resultados do que aquelas de 80 mm.

#### 4.2. Influência da colocação de material absorvente

A bibliografia sugere que a introdução de material absorvente na caixa de ar conduz a uma diminuição da absorção sonora na frequência de ressonância do sistema bem como a um aumento da mesma nas frequências em torno da ressonância, sendo esse ganho tanto menor quanto maior for a distância à frequência de ressonância. No entanto, enquanto o segundo efeito é visível nos resultados obtidos (fig. 6), o mesmo não se pode afirmar em relação à suposta menor absorção sonora na frequência de ressonância do sistema com a colocação de material absorvente.

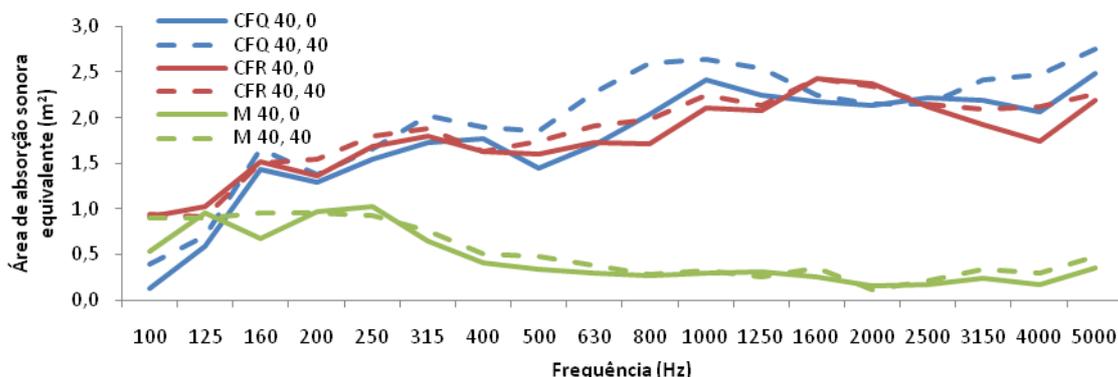


Figura 6. Áreas de absorção sonora equivalente,  $A_T$ , em  $m^2$ , de uma barreira (5 elementos) nas configurações de painéis, com e sem material absorvente, com caixa-de-ar de 40 mm.

Este fenómeno pode ser, em parte, explicado se se compreender que a tela acústica tem propriedades de absorção sonora semelhantes aos materiais porosos [4]. Nesta eventualidade as combinações referentes às caixas-de-ar sem material absorvente não apresentam o comportamento esperado. A introdução de material absorvente, para além da tela acústica

sempre presente, melhora as características de absorção proporcionando um aumento da gama de frequências onde ocorre absorção. Esta deverá ser uma característica da solução final.

#### 4.3. Influência da posição do material absorvente na caixa-de-ar

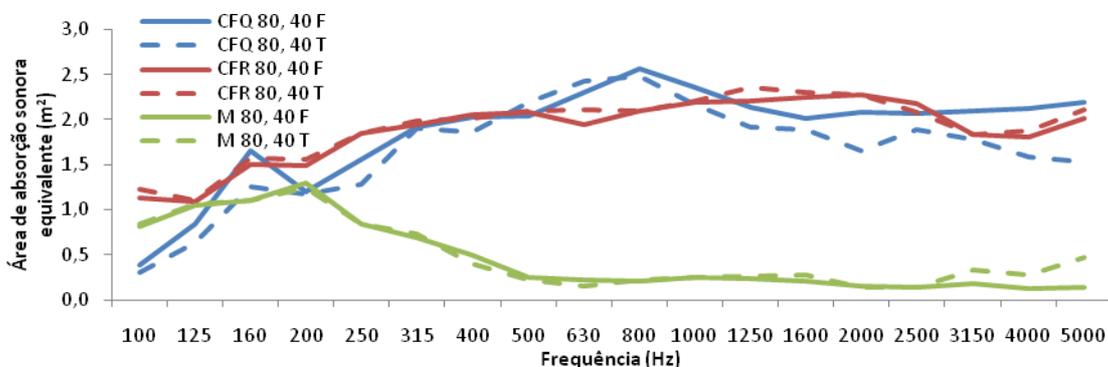


Figura 7. Áreas de absorção sonora equivalente,  $A_T$ , em  $m^2$ , de uma barreira (5 elementos) nas configurações de painéis, com caixa-de-ar de 80 mm e material absorvente na frente ou no tardoz.

Esperar-se-ia, em primeiro lugar que a colocação do material na frente (F) da caixa de ar impediria, em certa medida, a vibração da membrana motivando uma menor absorção nessa configuração (fig. 7). Tal não se verificou. Por outro lado, nas combinações com ressoadores agrupados, os resultados obtidos indicam comportamentos diferentes, não facilmente explicáveis. Com o painel CFQ a posição do material absorvente influenciou a absorção da barreira. Com o CFR o mesmo não se verificou. A única variável teórica entre os dois tipos de barreira foi o tipo de furação pelo que não parece razoável atribuir-lhe a responsabilidade por tal disparidade.

#### 4.4. Influência do tipo de furação e da colocação de placa de acrílico no topo da barreira

Enquanto na configuração com painéis CFQ a curva de absorção apresenta baixa absorção nas baixas frequências com ganhos à medida que a frequência aumenta, sendo máxima com a ressonância do sistema, com uma espécie de patamar de absorção com o aumento da frequência daí em diante, o mesmo não acontece com a configuração com painéis CFR. Esta apresenta um melhor comportamento nas baixas frequências e um aparente ganho mais baixo de absorção com o aumento de frequência. Isto indicará que nas configurações com painéis CFR se tenham estabelecido outros mecanismos de absorção, como por exemplo, os mesmos estarem menos rigidamente ligados à estrutura e funcionarem simultaneamente como membrana. No entanto, os resultados apresentados são relativamente próximos daqueles referentes aos painéis CFQ e constituem, a par dos mesmos, uma solução viável e eficaz.

Conclui-se que a colocação de uma placa vertical de acrílico no topo da barreira não influencia a absorção sonora do sistema.

### 5. Solução Final

O NRC e  $\alpha_w$  constituem uma ferramenta de análise da capacidade global de absorção de sistemas absorventes sonoros e foram obtidos a partir dos coeficientes de absorção sonora corrigidos (quadro 5). De acordo com as análises anteriores, as configurações com caixa-de-ar de 40 mm tendem a obter melhores resultados. A presença de material absorvente na caixa-de-ar conduz a melhores resultados de absorção sonora. Nesta óptica, escolheram-se as configurações que obtiveram maiores valores de NRC e  $\alpha_w$  e, ao mesmo tempo, cumprem pelo menos uma das disposições anteriores. São elas: CFQ 40, 40; CFQ 80, 40 F; CFR 40, 40 e CFR 80, 40 F. Pode-se afirmar que as CFQ 40, 40 e CFR 40, 40 apresentam os melhores comportamentos para absorção sonora numa larga gama de frequências, entre as quais aquelas destinadas à palavra (fig. 8). Estas configurações apresentam, em geral, melhor

comportamento do que as respectivas com maior espessura de caixa-de-ar. Destaca-se a CFQ 40, 40 com alguma vantagem nas médias e muito altas frequências em relação à CFR 40, 40.

Quadro 5. Valores de NRC e  $\alpha_w$  (e respectiva classe) obtidos para cada configuração.

Configuração	NRC	$\alpha_w$	Classe	Configuração	NRC	$\alpha_w$	Classe
CFQ 40, 0	0,65	0,65	C	CFR 80, 0	0,65	0,70	C
CFQ 40, 40	0,75	0,75	C	CFR 80, 40 F	0,70	0,75	C
CFQ 80, 0	0,65	0,65	C	CFR 80, 40 T	0,70	0,75	C
CFQ 80, 40 F	0,70	0,75	C	M 40, 0	0,15	0,10 (L)	-
CFQ 80, 40 T	0,65	0,65	C	M 40, 40	0,15	0,10 (L)	-
CFR 40, 0	0,65	0,65	C	M 80, 0	0,15	0,10 (L)	-
CFR 40, 40	0,70	0,70	C	M 80, 40 F	0,15	0,10 (L)	-
CFR 40, 40, A	0,70	0,70	C	M 80, 40 T	0,15	0,10 (L)	-

As configurações de membrana acabaram por se revelar sem aplicação prática obtendo muito pequena ou nenhuma vantagem em termos de absorção nas baixas frequências em relação aos ressoadores agrupados.

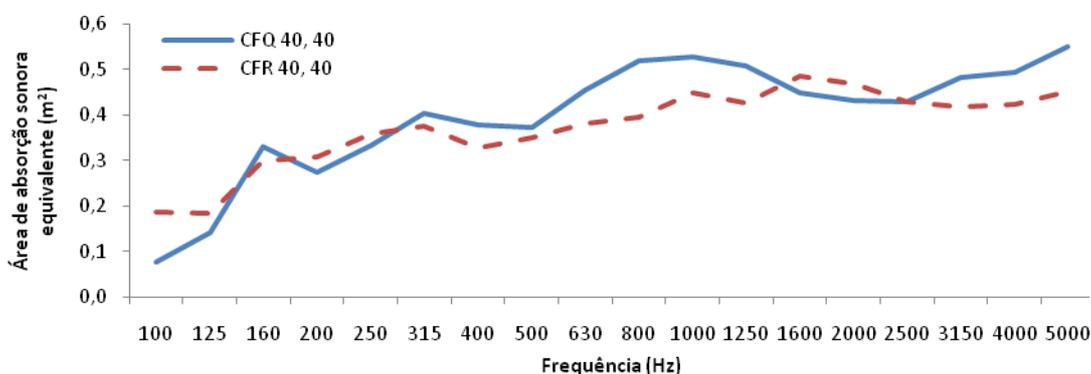


Figura 8. Áreas de absorção sonora equivalente,  $A_{1M}$ , em  $m^2$  e por banda de frequência, de um único elemento modular de configuração CFQ 40, 40 e CFR 40, 40.

As áreas de absorção sonora equivalente aqui apresentadas referem-se a uma barreira individual constituída por cinco elementos modulares. Enquanto é possível fazer uso dos resultados nesta situação para dimensionar a quantidade de área de absorção necessária a utilização dos mesmos implicaria que todas as barreiras teriam a mesma altura. Isso derrota o propósito inicial de versatilidade que se propôs com a criação dos elementos modulares. Como tal, sugere-se que o resultado apresentado seja referente às áreas de absorção equivalente de cada elemento modular. Para se obter uma estimativa da área de absorção sonora equivalente de cada elemento modular, associando-lhe um pequeno erro correspondente a uma porção da absorção sonora devido à face de topo, é apenas necessário dividir as áreas obtidas pelo número de elementos que constituem a barreira (neste caso, cinco). Então, apresentam-se, na figura 8 as áreas de absorção sonora equivalentes ( $A_{1M}$ ) correspondentes a um elemento individual, das duas melhores configurações, e que poderão ser utilizados em termos práticos para o dimensionamento de barreiras acústicas e autoportantes em ambiente *open space*.

## Referências

- [1] American Society of Interior Designers, *Sound Solutions: Increasing Office Productivity through Integrated Acoustic Planning and Noise Reduction Strategies*, 2006.
- [2] M. D. Egan, *Architectural Acoustics*, J. Ross Publishing, Fort Lauderdale, 2007.
- [3] A. P. Oliveira de Carvalho, *Acústica Ambiental e de Edifícios v7.0*, FEUP, 2008.
- [4] R. Patraquim, *Painéis Acústicos Perfurados em Madeira: Estudo e Avaliação Experimental de Soluções*, Dissertação M.Sc., IST, 2008.
- [5] P. Oliveira, *Desenvolvimento e Caracterização Acústica de Elementos Autoportantes para Absorção Sonora em Espaços Tipo Open Space*, M.Sc. – DEC, FEUP, 2009.