

ANÁLISE PRELIMINAR DA VIABILIDADE DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ ADAPTÁVEIS PARA OPTIMIZAÇÃO DA RESPOSTA ACÚSTICA DE SALAS PEQUENAS

Albano Neves e Sousa¹, Ricardo Patraquim²

¹UTL - Universidade Técnica de Lisboa, IST, DECivil, ICIST, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal
(albano.nsousa@civil.ist.utl.pt)

²Castelhano e Ferreira, S.A., Zona Industrial da Barosa, Apart. 254 – E.C. Marrazes, 2416-903 Leiria, Portugal
(patraquim@castelhano-ferreira.pt)

Resumo

Em salas com volumes inferiores a 50 m³, a utilização de fontes sonoras com elevado conteúdo energético na gama das baixas frequências produz respostas tipicamente modais, com elevada variabilidade espacial e espectral da pressão sonora. Uma vez que a resposta acústica das salas depende da sua configuração geométrica, da potência da fonte sonora e da sua localização, bem como da localização do receptor, os absorvedores sonoros a utilizar (tipicamente constituídos por painéis ressonantes ou ressoadores de Helmholtz) terão de ser definidos individualmente para cada sala, aumentando a dificuldade de desenvolver tais produtos na indústria.

No presente artigo foi desenvolvido um modelo baseado em análise modal teórica para previsão da resposta acústica de pequenas salas de teste equipadas com este tipo de dispositivos, de modo a avaliar a viabilidade da utilização de ressoadores de Helmholtz com frequência natural ajustável.

Palavras-chave: salas pequenas, baixas frequências, absorção sonora, ressoador de Helmholtz, ajustável.

Abstract

In rooms with volumes lower than 50 m³, the use of sound sources with high energy content in the low frequency range yields typically modal responses, with high spatial and spectral variability of sound pressure. Since the acoustic response of rooms depends on the geometrical configuration, the power of the sound source and its location, as well as the location of the receiver, the sound absorbers to be used (which are typically resonant panels or Helmholtz resonators) must be defined individually for each room, thus increasing the difficulty of developing such products in industry.

In this paper, a model based on theoretical modal analysis has been developed for prediction of the acoustic response of small test rooms equipped with this type of devices, in order to assess the viability of using Helmholtz resonators with adjustable natural frequency.

Keywords: small rooms, low frequencies, sound absorption, Helmholtz resonator, adjustable.

PACS no. 43.55.Dt, 43.55.Ev

1 Introdução

Salas com volumes inferiores ou iguais a 50 m^3 apresentam campos sonoros com elevada variabilidade espacial e espectral para frequências inferiores a 200 Hz. A mitigação deste comportamento fortemente modal passa pela utilização de absorvedores, para redução dos efeitos de ressonância e anti-ressonância (variabilidade espectral da pressão sonora), e de difusores sonoros, para homogeneização do campo sonoro (redução da variabilidade espacial). No presente artigo é considerado apenas o primeiro tipo de intervenção.

Tradicionalmente, a absorção sonora na gama das baixas frequências é efectuada por intermédio de painéis ressonantes, ressoadores de Helmholtz ou sistemas combinados. No entanto, as dimensões destes sistemas absorvedores dependem das características modais da sala e, portanto, da sua configuração geométrica.

Cada sala apresenta uma combinação única de modos acústicos e ressonâncias a absorver, o que dificulta muito a produção em série deste tipo de sistemas absorvedores. No presente artigo é estudada uma forma de fazer face a esta dificuldade através da utilização de um sistema de painel perfurado com caixa de ar adaptada a diferentes volumetrias e furação de dimensão variável. O sistema foi testado através de um modelo baseado em análise modal teórica para previsão da resposta acústica de pequenas salas com volumes entre 20 e 60 m^3 .

2 Painel perfurado de dimensões ajustáveis

Tendo em conta que numa sala com absorção sonora bem distribuída, os tempos de reverberação mais elevados ocorrem para frequências correspondentes a modos acústicos normais, considerou-se como hipótese de partida que o sistema a desenvolver deveria cobrir as frequências correspondentes aos três primeiros modos acústicos normais em cada direcção.

Para validar esta opção foram consideradas salas com cinco volumes tipo (V): 20; 30; 40; 50; e 60 m^3 . Para cada volume tipo foram considerados cinco valores do pé-direito (a): 2,40; 2,50; 2,60; 2,70; e 2,80 m. Para cada pé-direito foram consideradas dimensões em planta b e c com razões b/c variando entre 1 e 2. Para cada uma das 125 configurações geométricas resultantes foram calculadas as frequências f_{lmn} (Hz) correspondentes aos três primeiros modos acústicos normais em cada direcção ($f_{1,0,0}$; $f_{0,1,0}$; e $f_{0,0,1}$), as quais são dadas, para salas paralelepípedicas, por

$$f_{lmn} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{c}\right)^2}, \quad (1)$$

onde c_0 (m/s) é a velocidade de propagação do som no ar. Os resultados obtidos foram os indicados na Tabela 1, os quais validam a opção inicial.

Tabela 1 – Valores máximos e mínimos de f_{lmn} obtidos para as 125 configurações da sala.

$V \text{ (m}^3\text{)}$	$f_{lmn,min} \text{ (Hz)}$	$f_{lmn,max} \text{ (Hz)}$
20	42	274
30	35	223
40	30	216
50	27	216
60	25	216

Nestas condições, foi necessário definir um sistema de painel absorvedor aplicável a cada volume tipo e capaz de se ajustar, em cada local de instalação, às frequências naturais da sala. Consideraram-se

assim painéis com espessura t_{pan} de 13 mm e caixa de ar de espessura t_{cav} variável em função do volume tipo da sala, de acordo com a Figura 1.

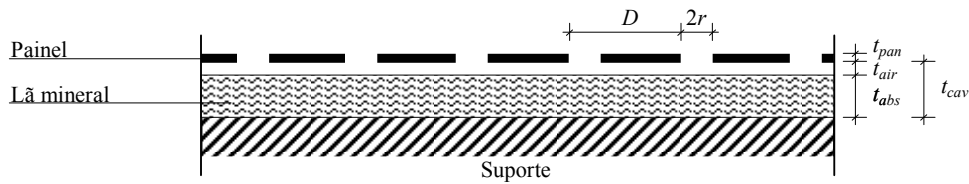


Figura 1 – Esquema construtivo do painel perfurado.

A dimensão da furação pode variar, sendo equivalente em área a furos circulares com raio r entre 1,0 e 9,5 mm de acordo com a Tabela 2. Considerou-se a caixa de ar parcialmente preenchida por lã mineral com resistividade média ao fluxo de ar de 23.250,00 rayls/m. A espessura da camada de lã mineral, t_{abs} , é também indicada na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões do painel perfurado para cada volume tipo da sala.

V (m ³)	D (mm)	r (mm)	t_{cav} (mm)	t_{abs} (mm)	t_{air} (mm)
20	65	1,0-6,0	65	60	5
30	75	1,0-7,0	75	60	15
40-50	85	1,0-8,0	85	80	5
60	95	1,0-9,5	95	80	15

Foram testadas duas posições para a camada de lã mineral: colada à superfície de suporte, tal como indicado na Figura 1; e colada directamente ao painel perfurado. De acordo com a formulação apresentada por Cox e D'Antonio [1], a colocação da camada de lã mineral junto ao suporte permite obter maiores coeficientes de absorção sonora, α , nas frequências de ressonância dos painéis, conduzindo, no entanto, a espectros mais estreitos, com a absorção sonora mais concentrada em torno dessas frequências. As Figuras 2 e 3 ilustram este comportamento para os painéis a aplicar numa sala com volume $V=abc=2,50 \times 4,01 \times 2,99 \approx 30 \text{ m}^3$.

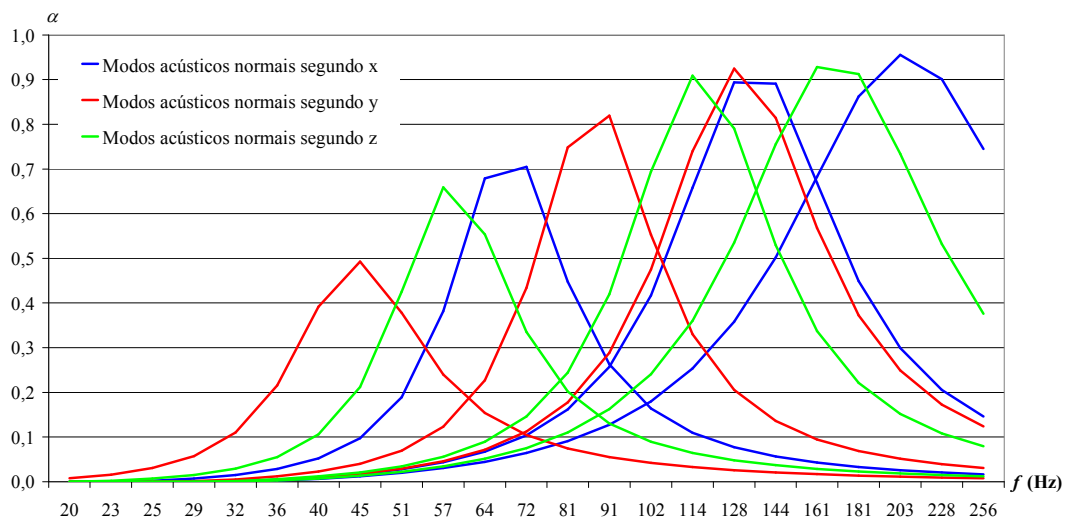


Figura 2 – Espectros de absorção sonora dos painéis absorsores aplicados numa sala com volume $V \approx 30 \text{ m}^3$ considerando a camada de lã mineral colada ao painel.

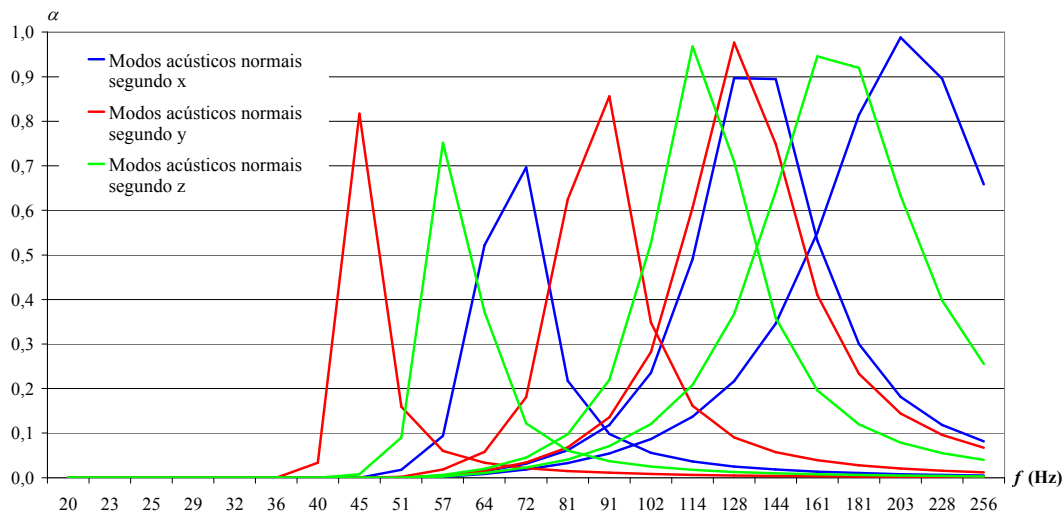


Figura 3 – Espectros de absorção sonora dos painéis absorvedores aplicados numa sala com volume $V \approx 30 \text{ m}^3$ considerando a camada de lã mineral colada ao suporte.

Considerou-se que, devido à presença de objectos encostados às superfícies e de envidraçados nas fachadas, bem como devido à dificuldade de aplicar painéis perfurados em pavimentos, a área ocupada pelos painéis absorvedores nas direcções x , y e z é de 50 % da área total das superfícies da sala com normais orientadas nessas direcções. Admitiu-se que os restantes 50 % da superfície envolvente não tratada acusticamente apresentam, na gama das baixas frequências, valores do coeficiente de absorção sonora iguais a 0,02.

Foram testadas duas formas de distribuir a absorção sonora pela envolvente das salas. Na distribuição tipo 1, foram colocados, em cada direcção, painéis com distribuição homogénea e equitativa da absorção nas três primeiras frequências naturais correspondentes a modos acústicos normais na direcção considerada, *i.e.*, para cada área de furação do painel foi considerado, no total, um terço da área total da superfície envolvente com normal nessa direcção. Na distribuição tipo 2, optou-se por testar a colocação, em cada direcção, de painéis com distribuição homogénea e equitativa da absorção nas nove frequências naturais correspondentes aos três primeiros modos acústicos normais nas três direcções x , y e z . Neste caso, para cada área de furação do painel, foi considerado, no total, um nono da área total da superfície envolvente com normal em cada direcção. Com esta solução esperava-se tirar partido do contributo das superfícies laterais para a absorção de modos acústicos na direcção paralela ao plano dessas superfícies.

3 Resposta acústica das salas

Sabe-se que, na gama das baixas frequências, a resposta acústica de salas pequenas é muito dependente da sua configuração geométrica e também da posição do emissor e do receptor. Assim, com o objectivo de excitar o maior número possível de modos acústicos e, dessa forma, obter uma boa leitura do comportamento modal da sala, considerou-se em todos os casos de estudo a colocação da fonte sonora num canto inferior da sala. A resposta da sala foi avaliada em posições prováveis do receptor, nomeadamente as posições $(x,y,z)=(a/2,b/2,c/2)$ e $(x,y,z)=(8a/11,8b/11,8c/11)$, e também, para efeitos de comparação, num canto a 20 cm de distância de cada superfície.

A resposta acústica das salas foi avaliada, em regime permanente, através da função de transferência entre a pressão sonora $p(x,y,z)$, em Pa, e a velocidade volumétrica Q (m^3/s) de uma fonte sonora pontual aplicada em (x_0,y_0,z_0) , a qual é dada por

$$\frac{p(x,y,z)}{Q} = -i\omega\rho_0 c_0^2 \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi_{lmn}(x,y,z)\varphi_{lmn}(x_0,y_0,z_0)}{[\omega^2 - (\omega_{lmn} + i\delta)^2] A_{lmn}}, \quad (2)$$

onde: ρ_0 (kg/m^3) é o valor estático da massa volúmica do ar; ω (rad/s) é a frequência angular de análise; ω_{lmn} (rad/s) é a frequência angular correspondente ao modo acústico (l,m,n) , cuja função de forma é dada por $\varphi_{lmn}(x,y,z)=\cos(l\pi x/a)\cdot\cos(m\pi y/b)\cdot\cos(n\pi z/c)$ para salas paralelepípedicas; A_{lmn} são constantes dadas por

$$A_{lmn} = \int_V \varphi_{lmn}^2(x,y,z) dV = \frac{abc}{\varepsilon_l \varepsilon_m \varepsilon_n} \quad \text{com} \quad \begin{cases} \varepsilon_{l,m,n=0} = 1 \\ \varepsilon_{l,m,n>0} = 2 \end{cases}; \quad (3)$$

e δ é uma constante temporal de absorção sonora que depende do tempo de reverberação da sala de acordo com

$$\delta = \frac{6,9}{T} = \frac{6,9}{0,16V} \cdot \frac{\varepsilon_l A_x + \varepsilon_m A_y + \varepsilon_n A_z}{2}, \quad (4)$$

sendo A_x , A_y e A_z (m^2) as áreas de absorção sonora das superfícies da envolvente da sala com normal segundo x , y e z , respectivamente [2 a 5].

3.1 Análise em banda estreita

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ calculadas no canto de salas com volumes $V_1=abc=2,40\times 3,48\times 2,39\approx 20 \text{ m}^3$ e $V_2=abc=2,50\times 4,01\times 2,99\approx 30 \text{ m}^3$, respectivamente, considerando a ausência de tratamento acústico e também as alternativas de tratamento descritas em 2.

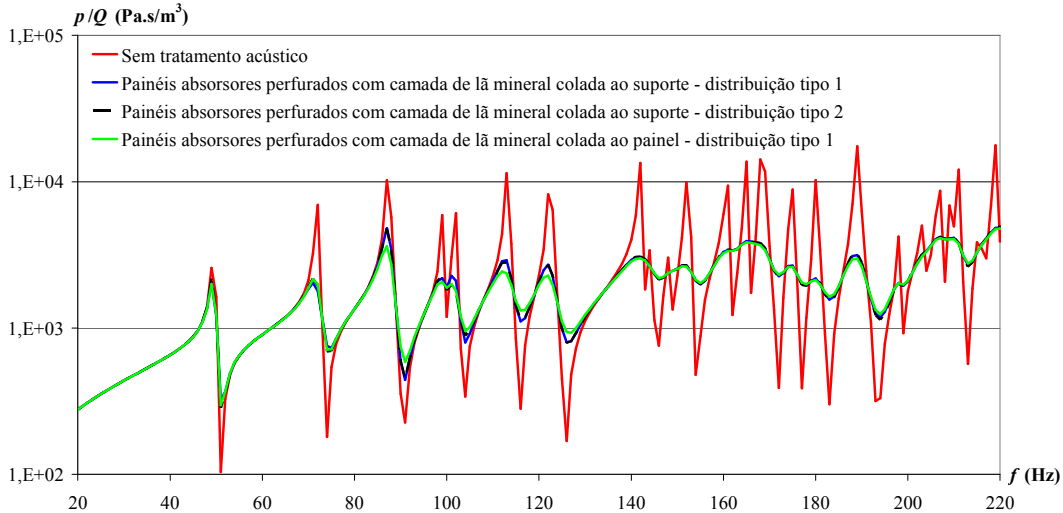


Figura 4 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ no canto de uma sala com $V=abc=2,40\times 3,48\times 2,39\approx 20 \text{ m}^3$ para as diferentes soluções de tratamento acústico.

Observa-se que, apesar dos maiores valores do coeficiente de absorção sonora apresentados pela solução de painéis absorvedores perfurados com a camada de lã mineral colada à superfície do elemento de suporte, uma vez que esta solução apresenta espectros de absorção sonora com forma mais estreita, *i.e.*, com a capacidade de absorção sonora mais concentrada em torno da frequência natural do ressonador, conclui-se que a solução de painéis absorvedores perfurados com camada de lã mineral colada directamente ao painel perfurado é mais eficiente. Esta conclusão aplica-se igualmente aos restantes volumes estudados.

Observa-se também que a melhoria conferida pela distribuição 2 da absorção sonora pela superfície envolvente é, em geral, muito pouco significativa ou inexistente.

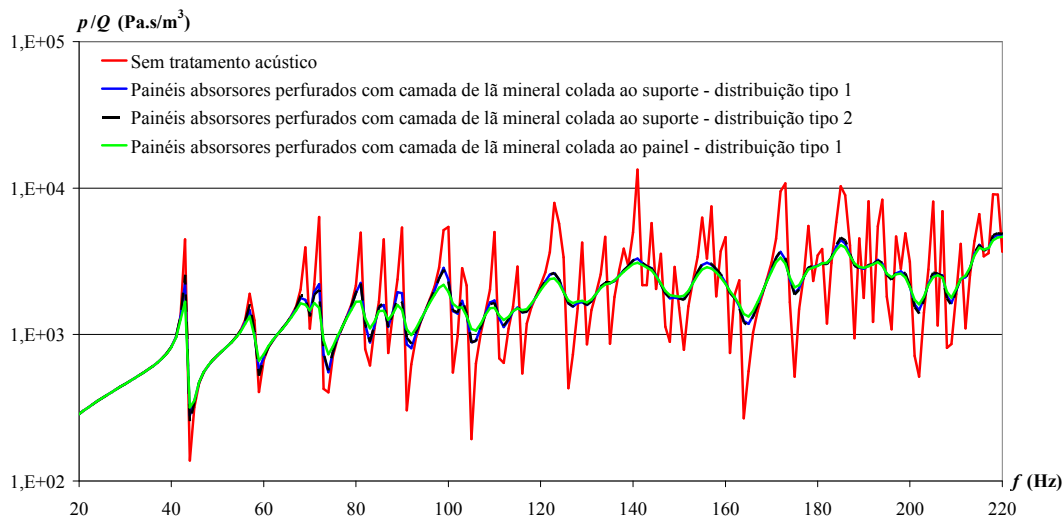


Figura 5 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ no canto de uma sala com $V=abc=2,50 \times 4,01 \times 2,99 \approx 30 \text{ m}^3$ para as diferentes soluções de tratamento acústico.

Na Figura 6 são apresentadas as funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ calculadas no canto de uma sala com volume $V=abc=2,80 \times 6,17 \times 3,48 \approx 60 \text{ m}^3$, considerando, mais uma vez, a ausência de tratamento acústico e também as três alternativas de tratamento descritas na secção 2. A Figura 6 confirma as conclusões anteriores e também mostra que o efeito da absorção sonora, associado à redução das frequências naturais do campo sonoro nas salas maiores, conduz a uma redução das características modais das salas e, portanto, a uma melhor distribuição do nível sonoro.

3.2 Análise em bandas de terços de oitava

Esta conclusão é reforçada pelas Figuras 7 a 11, onde se apresentam, para cinco salas com volumes de 20 a 60 m^3 , os espectros em bandas de terços de oitava das funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ calculadas, nas três posições de controle (num canto; exactamente a meio da sala; e numa posição próxima do centro da sala não coincidente com planos nodais dos primeiros modos acústicos), na ausência de tratamento acústico da envolvente e após a aplicação de painéis absorvedores perfurados com a camada de lã mineral colada directamente ao painel e com a área de furação de acordo com a distribuição tipo 1. As Figuras 7 a 11 mostram o aumento da eficiência dos painéis absorvedores perfurados com o volume da sala, não só em termos de redução do nível sonoro mas também em termos da distribuição dos níveis sonoros na sala. No entanto, as características modais do comportamento acústico das salas ainda permanecem, mesmo nas salas maiores, pelo que serão sempre necessárias outras medidas para incrementar a difusão sonora.

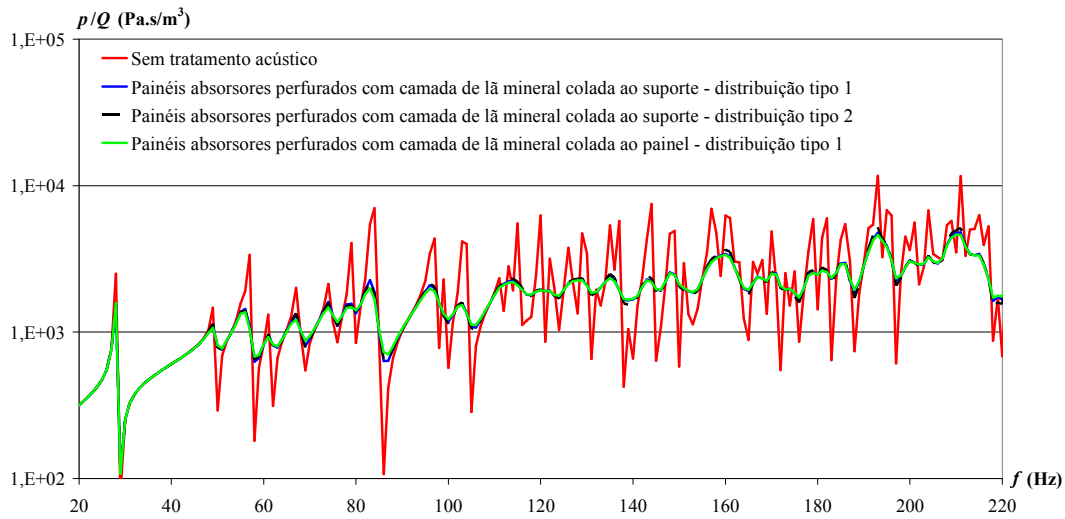


Figura 6 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ no canto de uma sala com $V=abc=2,80 \times 6,17 \times 3,48 \approx 60 \text{ m}^3$ para as diferentes soluções de tratamento acústico.

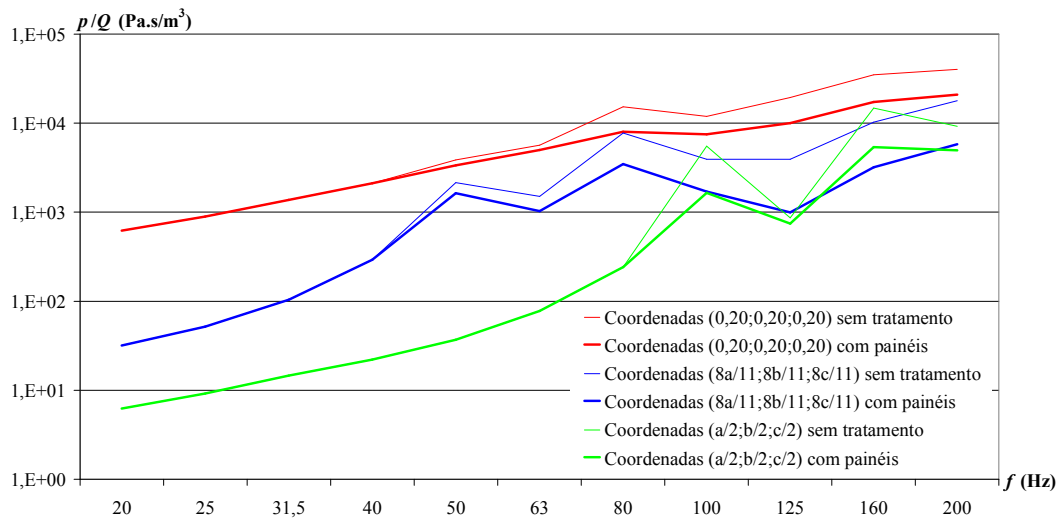


Figura 7 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ em três posições de controle numa sala com $V=abc=2,40 \times 4,01 \times 2,99 \approx 20 \text{ m}^3$ com e sem painéis absorsores perfurados com camada de lã mineral colada ao painel e absorção sonora com distribuição tipo 1.

No seu conjunto, as Figuras 2 a 11 mostram também que, apesar de ser possível afinar o sistema de absorção de modo a apresentar coeficientes de absorção sonora elevados em frequências entre 25 a 50 Hz, a resposta acústica das salas nessas frequências, correspondentes ao primeiro modo acústico na direcção mais longa, apresenta, em geral, pequenas diferenças relativamente à situação de ausência de tratamento acústico.

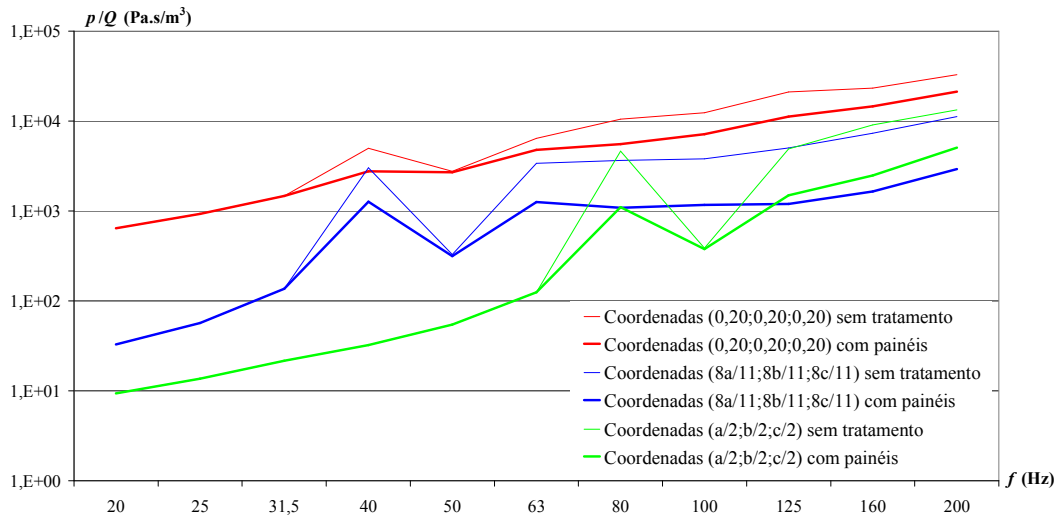


Figura 8 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ em três posições de controle numa sala com $V=abc=2,50 \times 3,48 \times 2,39 \approx 30 \text{ m}^3$ com e sem painéis absorvedores perfurados com camada de lã mineral colada ao painel e absorção sonora com distribuição tipo 1.

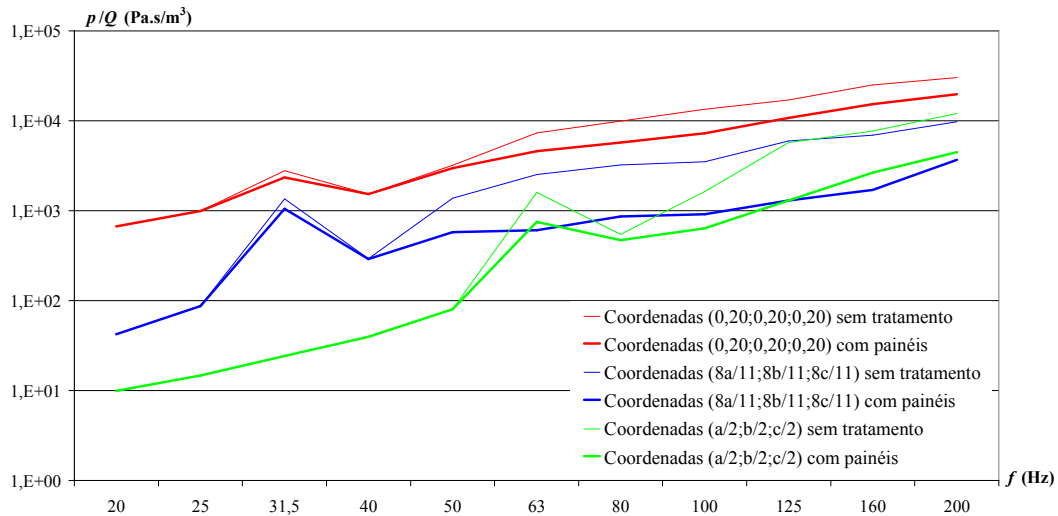


Figura 9 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ em três posições de controle numa sala com $V=abc=2,60 \times 4,89 \times 3,15 \approx 40 \text{ m}^3$ com e sem painéis absorvedores perfurados com camada de lã mineral colada ao painel e absorção sonora com distribuição tipo 1.

4 Conclusões

No presente artigo foram relatados os estudos preliminares de uma pesquisa visando o desenvolvimento de painéis absorvedores perfurados aplicáveis a salas com volumes entre 20 e 60 m³, independentemente da configuração geométrica da sala.

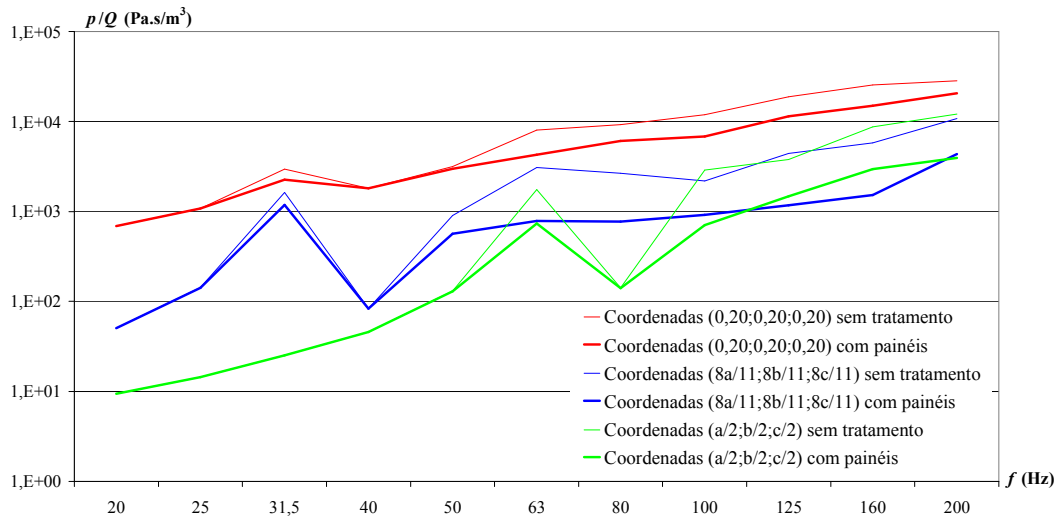


Figura 10 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ em três posições de controle numa sala com $V=abc=2,70 \times 5,54 \times 3,35 \approx 50 \text{ m}^3$ com e sem painéis absorvedores perfurados com camada de lã mineral colada ao painel e absorção sonora com distribuição tipo 1.

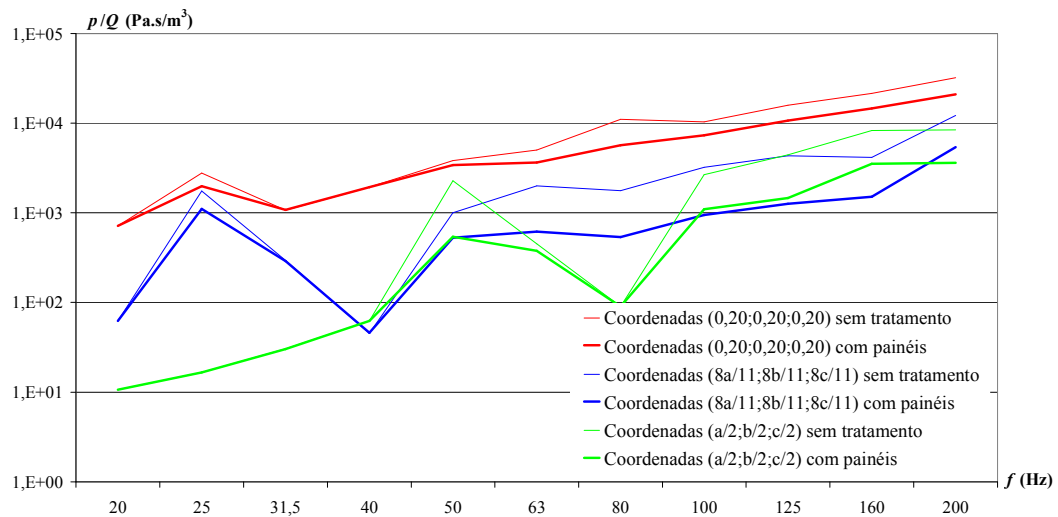


Figura 11 – Funções de transferência $p(x,y,z)/Q$ em três posições de controle numa sala com $V=abc=2,80 \times 6,17 \times 3,48 \approx 60 \text{ m}^3$ com e sem painéis absorvedores perfurados com camada de lã mineral colada ao painel e absorção sonora com distribuição tipo 1.

Mostrou-se que:

1. Os painéis devem apresentar uma distribuição homogênea e equitativa da absorção sonora nas frequências correspondentes aos três primeiros modos acústicos normais na direcção considerada;
2. A caixa de ar dos painéis e a distância entre furos depende apenas do volume da sala, podendo ser desenvolvidas apenas quatro soluções de base para volumes entre 20 e 60 m³;

3. A caixa de ar deverá estar parcialmente preenchida por uma camada de lã mineral com espessura disponível comercialmente, sendo preferível a sua colagem directamente ao painel perfurado;
4. A melhoria conseguida na frequência correspondente ao modo acústico normal na direcção mais longa da sala é, em geral, pequena;
5. Para frequências superiores, a melhoria é significativa, conseguindo-se também melhorar a distribuição de níveis sonoros nas salas;

Este trabalho carece de mais investigação, em particular na validação experimental das conclusões acima listadas e também na avaliação dos efeitos causados no desempenho do painel pelo sistema de ajustamento da área perfurada. Este sistema pode ser constituído pela justaposição, em cada sector do painel perfurado, de um outro painel igualmente perfurado, o qual poderá estar, ou não, totalmente alinhado com o painel principal (nesta situação obtém-se a máxima área de abertura). Esta justaposição de painéis com furações parcialmente alinhadas conduz a um aumento da espessura média da abertura, o que obrigará a aumentar ligeiramente os raios de abertura de modo a manter as frequências naturais do sistema. A presença de furações desalinhadas cria também um aumento de rugosidade com efeitos do desempenho acústico nas altas frequências, o que poderá também ser estudado.

Referências

- [1] Cox, T.; D'Antonio, P. *Acoustic absorbers and diffusers – Theory, design and application*, Taylor & Francis, 2009.
- [2] Kinsler, L.; Frey, A.; Coppens, A.; Sanders, J. *Fundamentals of acoustics*, John Wiley & Sons, EUA, 2000.
- [3] Cremer, L.; Heckl, M.; Ungar, E. *Structure-borne sound – structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*, Springer-Verlag, Alemanha, 1973.
- [4] Kuttruff, H. *Room acoustics*, Elsevier Applied Science, EUA, 1991.
- [5] Gerges, S. *Ruído – Fundamentos e Controle*, NR Editora, Brasil, 2000.