

ESTUDO NUMÉRICO DE SOLUÇÕES OTIMIZADAS DE ABSORÇÃO SONORA MULTICAMADA PARA MITIGAÇÃO DE RUÍDO FERROVIÁRIO

Laura Lourenço de Sousa^{1*}

Luís Godinho¹

Paulo Amado Mendes¹

¹ University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal

RESUMO

Materiais absorventes sonoros, tais como materiais porosos ou ressonantes, são utilizados em várias aplicações de engenharia. Estes são usados, por exemplo, para mitigar ou controlar níveis de ruído, reflexões ou difrações acústicas, e as condições acústicas em espaços com recetores sensíveis. Quando colocados sobre suporte de superfície rígido, esses materiais podem atingir uma alta absorção sonora, numa gama de frequências relativamente altas, se o comprimento de onda for mais reduzido do que a espessura do material absorvente. Por outro lado, as barreiras acústicas são medidas comuns de mitigação de ruído, geralmente implementadas próximo de estradas ou ferrovias, com eficiência comprovada. Em geral, estas soluções incorporam também materiais fonoabsorventes para reduzir a reflexão da energia sonora. Com o objetivo de mitigar o ruído ferroviário, este trabalho debruça-se sobre o estudo de materiais absorventes sonoros com base em soluções multicamada otimizadas, materializadas a partir de formulações de betão poroso. O método da matriz de transferência (TMM) é usado para prever e simular o desempenho desses materiais.

ABSTRACT

Sound absorbent materials, such as porous or resonant materials, are used in various engineering applications. They are used, among other uses, to mitigate or control noise levels, acoustic reflections or diffractions, and acoustics in critical receiver spaces. When placed with stiff surface backing, these materials can achieve high sound absorption over a broad range of relatively high frequencies if wavelengths are shorter than the material thickness. On the other hand, noise barriers are common noise mitigation measures usually implemented near roads or railways, with proven efficiency. In general, these solutions also incorporate sound absorbent materials to reduce the reflection of sound energy. In order to mitigate railway noise, this work focuses

on researching absorbent materials based on optimized multilayer solutions, materialized using porous concrete formulations. The transfer-matrix method (TMM) is used to design and simulate the acoustic performance of these materials.

Palavras Chave— Materiais absorventes porosos, Soluções acústicas multicamada, Absorção sonora

1. INTRODUÇÃO

Os níveis excessivos de ruído relacionados com a infraestrutura ferroviária, tanto durante a sua construção como na sua utilização, não são negligenciáveis e causam preocupação ao longo de todo o seu ciclo de vida. Principalmente quando próximo de áreas habitadas e áreas de proteção ambiental, essas preocupações são da maior importância, pois, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a exposição ao ruído prejudica gravemente a saúde humana e interfere nas suas atividades diárias [1]. Medidas de mitigação para reduzir o efeito destas fontes de ruído podem ser implementadas: na fonte sonora, através do desenvolvimento e valorização de estratégias de minimização do ruído gerado por estas fontes, quer ao nível do ruído aéreo e da propagação em meios sólidos, na via de transmissão, principalmente com sistemas isolantes, absorvedores e atenuantes, protegendo assim os múltiplos recetores [2]. Barreiras acústicas são medidas de mitigação amplamente utilizadas, devido à sua comprovada eficiência na proteção dos recetores sensíveis [3, 4]. A estas podem-se adicionar materiais fonoabsorventes, gerando assim um sistema de barreiras absorventes, que contribuem para a resolução de dois problemas particulares das barreiras acústicas, as reflexões duplas de veículos em barreiras laterais altas em galeria e as reflexões de barreiras de um lado da via. A adição de sistemas absorventes em um barreiras acústicas provou ser uma medida eficaz [5, 6].

* **Autor de contacto:** lrlldsousa@uc.pt

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Os sistemas absorventes podem ser constituídos, por exemplo, por materiais porosos. Estes são amplamente utilizados de modo a melhorar as condições acústicas ambiente, através das suas propriedades de absorção sonora. Existem vários tipos de materiais porosos, incluindo celulares, fibrosos e granulares, e alguns exemplos são polímeros porosos, fibras minerais e betão poroso [7].

Este tipo de material tem sido utilizado em inúmeras aplicações, nomeadamente como camada fonoabsorvente em barreiras acústicas próximas de rodovias e ferrovias, de modo melhorar a eficiência deste tipo de dispositivo de mitigação sonora. É composto por uma parte sólida e outra fluida, sendo que a dissipação da energia sonora ocorre devido à interação entre estas duas fases [5, 7]. Para estudar os materiais porosos podem ser utilizadas várias abordagens, nomeadamente experimentais e teóricas.

Modelos de fluido-equivalentes têm sido apresentados, considerando o módulo de compressibilidade complexo (“bulk modulus”) e a densidade fluido-equivalente para representar o comportamento absorvente dos materiais porosos estudados [5, 8-12]. Neste trabalho, o modelo de fluidos equivalentes proposto por Horoshenkov-Swift [8] é utilizado para calcular a absorção sonora a partir dos parâmetros macroscópicos medidos. Este modelo representa o comportamento das amostras porosas com base em quatro parâmetros macroscópicos: a resistividade ao fluxo de ar, a tortuosidade, a porosidade aberta e o desvio padrão do tamanho dos poros.

Diversos autores, como Pereira et al [13], que estudaram a influência de vários parâmetros, como a espessura, a proporção de água e o tamanho do grão no desempenho de absorção de sonora do betão poroso, têm utilizado este modelo de fluido equivalente. Sousa et al [14, 15] realizaram estudos comparativos entre resultados experimentais e teóricos de betão poroso, validando o modelo proposto por Horoshenkov-Swift, para o material em estudo.

Neste trabalho, apresenta-se uma otimização dos parâmetros macroscópicos, dos quais dependem a densidade e do módulo de compressibilidade de um material, num sistema poroso multicamada e, deste modo determinar a respetiva curva absorção sonora otimizada.

Metamateriais acústicos são considerados candidatos promissores para absorção sonora de banda larga sintonizável em toda a gama de frequências [16]. Neste trabalho é proposto um metamaterial acústico absorvente com multicamada. A célula unitária metaabsorvente compreende múltiplas camadas de betão poroso, associadas numa configuração em série. Portanto, o meta-absorvedor acústico montado poderá ser reconfigurável para possuir diferentes características de absorção.

O modelo analítico que se utiliza para estimar o comportamento das metassuperfícies aqui estudadas é baseado no método da matriz de transferência [9]. É implementado usando representações de fluido equivalente no sistema multicamada considerado.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho surge no seguimento de um conjunto de estudos mais alargado [13-15, 17]. Realizou-se previamente um estudo de amostras de betão poroso, que foi acusticamente caracterizado, quer experimentalmente e numericamente. Primeiro, os parâmetros macroscópicos do material foram determinados experimentalmente, utilizando um modelo de fluido equivalente para estimar a absorção sonora em condições de incidência normal. De seguida, o coeficiente de absorção sonora foi determinado para condições de incidência normal utilizando um tubo de impedância e para condições em campo difuso em câmara reverberante.

Através de regressões lineares procurou-se estabelecer uma relação entre a porosidade, a densidade e os restantes parâmetros macroscópicos, que permitisse obter a curva de absorção sonora através apenas dos primeiros parâmetros, que são de simples determinação experimental.

No seguimento deste objetivo, era também objetivo obter um sistema multicamada poroso, em que se faz variar os parâmetros macroscópicos de cada camada, de modo a otimizar a curva de absorção sonora, consoante a gama de frequências de interesse.

Tem-se como objetivo final da investigação em curso, a aplicação deste sistema multicamada numa barreira acústica, na face exposta ao ruído da ferrovia, de modo a melhorar a capacidade mitigadora de ruído da mesma, quando comparada com a solução sem sistema absorvente.

2.1. Algoritmo de inversão

Em Pereira et al. [13] utilizou-se um método inverso, baseado num algoritmo genético, para estimar teoricamente os parâmetros macroscópicos e obter uma nova curva de absorção sonora. Os parâmetros macroscópicos necessários para representar os materiais obtidos através do modelo de Horoshenkov e Swift obtiveram-se através de um método de inversão baseado num algoritmo genético, onde a função objetivo (1) se obtém a partir da soma do erro quadrático entre os resultados analíticos e experimentais, em todo o domínio da frequência:

$$Fu_{\alpha} = \sum_{i=1}^{nf} |\alpha_s^a - \alpha_s^e|^2, \quad (1)$$

onde: nf é o número de frequências discretas analisadas, α_s^a é o coeficiente de absorção obtido com o modelo de Horoshenkov e Swift, e α_s^e é o coeficiente de absorção experimental.

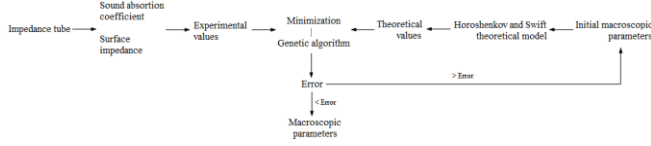


Figura 1. Diagrama do método de inversão utilizado para obtenção dos parâmetros macroscópicos.

Apresentaram-se valores de resistividade ao fluxo de ar e tortuosidade obtidos através do uso de um algoritmo de inversão, em função da densidade e da razão entre densidade e porosidade (ver (2) e (3)),

$$\sigma = 135.55e^{0.005\rho} \quad (2)$$

$$\alpha_\infty = 0.9655e^{0.000452\frac{\rho}{\phi}} \quad (3)$$

$$\sigma_p = 0.25 \quad (4)$$

onde: σ é a resistividade ao fluxo de ar, ϕ é a porosidade, ρ a densidade e σ_p é o desvio padrão do tamanho dos poros, que foi considerado constante.

Estabeleceram-se ainda a relações entre a porosidade e a densidade (ver Figura 1) para três misturas experimentais distintas de betão poroso (equações (5), (6) e (7), para os materiais 1, 2 e 3, respetivamente).

$$\rho = -1013.4\phi + 1133.1 \quad (5)$$

$$\rho = -1533.6\phi + 1131.8 \quad (6)$$

$$\rho = -1517.3\phi + 1182.6 \quad (7)$$

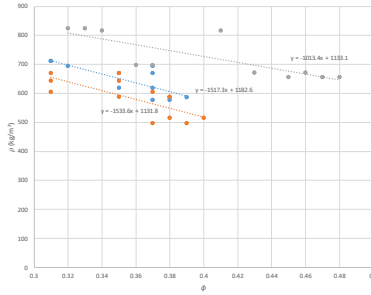


Figura 2. Relações entre a porosidade e a densidade para três misturas distintas de betão poroso.

2.2. Modelo de Horoshenkov e Swift

Os materiais porosos são constituídos por duas fases, sólida e fluida, tornando possível prever o seu comportamento através de modelos numéricos como fluidos equivalentes [5, 8, 9, 18]. Utilizou-se o modelo de Horoshenkov - Swift para materiais porosos granulares, adequado para amostras de betão poroso, como as estudadas. O modelo permite estimar o comportamento acústico a partir das propriedades macroscópicas do material. A partir desses parâmetros e considerando que o material poroso se comporta como um fluido equivalente, é possível determinar a impedância

característica e o número de onda do material. Os parâmetros considerados foram a porosidade, ϕ , a resistividade ao fluxo de ar, σ , a tortuosidade, α_∞ , e o desvio padrão do tamanho dos poros, σ_p . Os autores sugerem determinar a densidade volumétrica e o módulo de compressibilidade com as equações (8) e (9), respetivamente:

$$\rho = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \left(\rho_0 - \frac{j\phi\sigma}{\omega\alpha_\infty} \tilde{F}(\omega) \right), \quad (8)$$

$$C = \frac{\phi}{\gamma P_0} \left(\gamma - \frac{\rho_0(\gamma-1)}{\rho_0 - j\frac{\sigma\phi}{\omega\alpha_\infty N_{pr}} \tilde{F}(N_{pr}\omega)} \right), \quad (9)$$

onde: ω é a frequência angular, γ é a razão dos calores específicos, P_0 é a pressão atmosférica e N_{pr} é o número de Prandtl, e $\tilde{F}$ é a função de correção da viscosidade, que pode ser apresentada na forma de uma aproximação de Padé como em (10):

$$\tilde{F}(\omega) = \frac{1+a_1\epsilon+a_2\epsilon^2}{1+b_1\epsilon}. \quad (10)$$

onde: $a_1 = \theta_1/\theta_2$, $a_2 = \theta_1$ e $b_1 = a_1$. Assumindo de forma simplificada que a geometria dos poros é circular, leva-se assim aos seguintes fatores de forma: $\theta_1 = \frac{4}{3}e^{4\xi} - 1$, $\theta_2 = \frac{e^{3\xi/2}}{\sqrt{2}}$, onde $\xi = (\sigma_p \ln(2))^2$ e $\epsilon = \sqrt{j\omega\rho_0\alpha_\infty/(\sigma\phi)}$. Com esses 2 parâmetros é possível obter a impedância característica e o número de onda de um material poroso. Que são determinados de acordo com as equações (11) e (12):

$$Z_c = \sqrt{\frac{\rho}{C}}, \quad (11)$$

$$k = \omega\sqrt{\rho C}, \quad (12)$$

2.3. Método da matriz de transferência (TMM)

O método da matriz de transferência (TMM-Transfer Matrix Method) foi adotado para a análise dos parâmetros macroscópicos, bem como do coeficiente de absorção sonora e respetiva otimização para estruturas de múltiplas camadas. Este modelo permite descrever a transmissão e reflexão de ondas sonoras através de um sistema de elementos acústicos, como no caso de materiais porosos com várias camadas [9]. O método permite descrever a transmissão e reflexão de ondas sonoras através de um sistema de elementos acústicos, como condutas, câmaras e materiais porosos. É um modelo que relaciona a pressão acústica e velocidade nas portas de entrada e saída do sistema, tendo em conta as propriedades acústicas de cada elemento e a geometria do sistema. Deste modo, é um excelente método para prever a absorção sonora e a perda por transmissão sonora de materiais multicamada lateralmente infinitos aglomerados em série [9].

A matriz de transferência entre as duas faces de um material 1D homogêneo e isotrópico, estendendo-se de $x = 0$ a $x = l$, é

usada para relacionar a pressão sonora, p , e a velocidade normal das partículas acústicas, v , nas duas faces:

$$\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} \cos(kl) & iZ\sin(kl) \\ i\sin(kl)/Z & \cos(kl) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=l}, \quad (13)$$

na qual o vetor de onda do material é definido como $k = \omega/c = \omega\sqrt{\rho/K}$, ω é a frequência angular, c é a velocidade de propagação do som, ρ é a densidade e K é o módulo de volume. A impedância acústica é definida como $Z = \sqrt{\rho K}$, e $i = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária. Uma convenção de tempo de Fourier $e^{i\omega t}$ é assumida [19]. A matriz de transferência, T , da célula unitária feita de duas subcamadas, A e B, é lida como:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_A \mathbf{T}_B, \quad (14)$$

em que:

$$\mathbf{T}_A = \begin{bmatrix} \cos(k_A l_A) & iZ_A \sin(k_A l_A) \\ i\sin(k_A l_A)/Z_A & \cos(k_A l_A) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_B = \begin{bmatrix} \cos(k_B l_B) & iZ_B \sin(k_B l_B) \\ i\sin(k_B l_B)/Z_B & \cos(k_B l_B) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

2.4. Método de otimização

O método de otimização aplicado tem como objetivo geral melhorar a curva de absorção sonora para um intervalo específico de frequências, mas tendo em conta os parâmetros macroscópicos das diferentes camadas do material absorvente.

Tal significa determinar os valores ideais para a porosidade e densidade, em várias camadas do material, de modo a minimizar o valor calculado pela função objetivo/de custo que depende dos parâmetros de entrada, porosidade e densidade, e de relações com os restantes parâmetros macroscópicos (equações (2) a (7)), obtendo assim melhores configurações do material multicamada, para otimizar o desempenho da metassuperfície.

3. RESULTADOS

Realizou-se um estudo paramétrico abrangente para analisar a otimização dos parâmetros macroscópicos e a determinação de soluções de absorção sonora, em condições de campo difuso, específicas para certos intervalos de frequências específicos. Analisou-se para 2 intervalos em altas frequências, 2 em médias frequências e para um intervalo referente a um espectro de frequências associado ao ruído da ferrovia (400-4000 Hz).

Para a metassuperfície, considerou-se que esta é composta por camadas de um material poroso. Fez-se variar o número de camadas do sistema, em 2, 4 e 6. Também se variou a espessura total do sistema multicamada, em 12, 14, 17 e 20 cm. Ainda se fez uma comparação entre as curvas de

absorção sonora dos 3 materiais (ver 2.1. Algoritmo de inversão).

Na Figura 3, apresentam-se resultados de parâmetros macroscópicos e densidade do material 1, otimizados para um sistema com 4 camadas (numeradas de 1 a 4 desde a camada rígida de suporte até à camada exterior à superfície) e uma espessura total de 20 cm e, na Figura 4, as respetivas curvas de absorção sonora inicial e otimizada. Neste caso, a otimização foi realizada na gama de frequências dos 400 aos 4000 Hz.

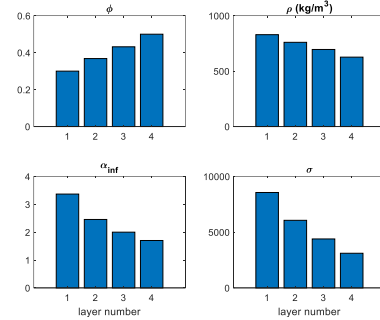


Figura 3. Parâmetros macroscópicos e densidade, otimizados para cada uma das 4 camadas (1 é a camada mais interior e 4 a camada mais superficial), com espessura total de 20 cm.

Para esta configuração, observa-se que a camada mais superficial (4) é a mais porosa e que a porosidade vai diminuindo com as camadas para o interior. Por outro lado, a densidade e a resistividade ao fluxo de ar apresentam um comportamento inverso, isto é, aumentam à medida que a camada se torna mais interior. Quando a otimização é realizada na gama de frequências mais alta as duas camadas interiores tendem a ser muito semelhantes entre si.

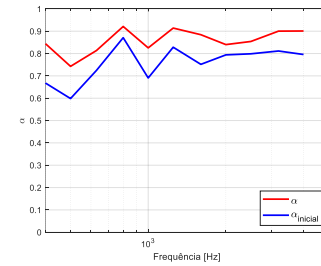


Figura 4. Curvas de absorção sonora inicial e otimizada para uma metassuperfície com 4 camadas e espessura total de 20 cm.

Como esperado, verifica-se que a curva de absorção otimizada apresenta amplitudes de absorção superiores, em todo o espectro de frequências analisado, quando comparada com a curva inicial. Apesar de continuar a apresentar uma quebra considerável entre os 300 e 800 Hz, apresenta valores de absorção consideravelmente superiores.

Realizou-se uma análise comparativa com as curvas de absorção sonora obtidas para o mesmo material, mesma espessura e mesmo número de camadas para diferentes gamas de frequências de interesse (ver Figura 5). Conseguem-se obter valores de amplitude máxima de coeficiente de

absorção sonora superiores na otimização nas altas frequências.

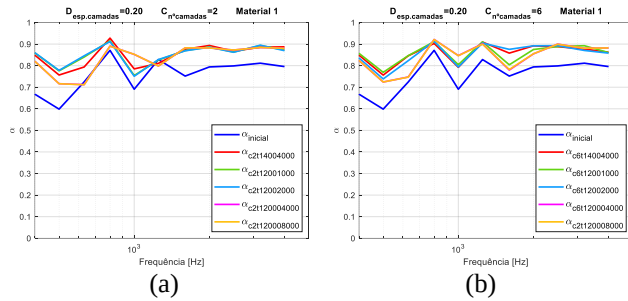


Figura 5. Curvas de absorção sonora para uma espessura de 20 cm, com material 1, para diferentes intervalos de frequências e com número de camadas igual a 2 (a) e 6 (b).

Na generalidade, as curvas otimizadas apresentam curvas de absorção sonora com melhor desempenho que a curva inicial. Na gama de frequências otimizadas, apresentam-se claramente marcadas as zonas de otimização consideradas (Figura 5). Por exemplo, analisando as curvas de absorção referentes à gama de otimização dos 200 aos 1000 Hz, $\alpha_{c2t12001000}$, $\alpha_{c4t12001000}$ (gráfico não apresentado) e $\alpha_{c6t12001000}$, estas apresentam os valores de absorção com maior amplitude quando comparadas às restantes curvas.

Dentro de uma mesma gama de frequências, de 400 a 4000 Hz, e fazendo variar a espessura do sistema, para o material 1 e para número de camadas igual a 2, 4 e 6, analisou-se a influência deste parâmetro. Na Figura 6, apresentam-se os resultados para o número de camadas igual a 2 e 6.

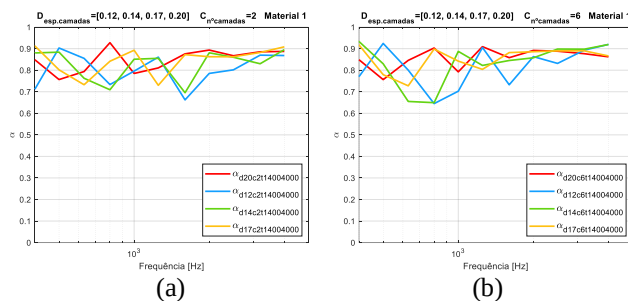


Figura 6. Influência da espessura do sistema para o material 1 e para número de camadas igual a 2 (a) e 6 (b).

Até aos 700 Hz as curvas referentes a espessuras de 14 e 17 cm apresentam amplitudes de absorção sonora superiores às restantes curvas, atingindo picos de amplitude de cerca de 0.9, para número de camadas igual a 2 (a) e 6 (b). Nas altas frequências, as curvas tendem a aproximar-se mais entre elas, para todas as configurações. A primeira quebra observada em todas as curvas parece ser influenciada pela espessura total do sistema, sendo que acontece mais cedo para espessuras do sistema maiores.

Determinaram-se ainda, para as mesmas configurações acima referidas, as curvas de absorção para os três materiais baseados em betão poroso, para os quais se estabeleceram as relações entre a porosidade e a densidade (ver equações (5), (6) e (7)). Apresentam-se, na Figura 7 resultados relativos à configuração com 20 cm de espessura, 4 camadas e gama de frequências dos 400 aos 4000 Hz, para os três materiais.

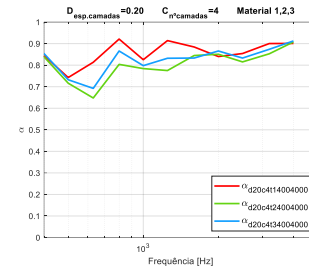


Figura 7. Curvas de absorção sonora para a configuração com 20 cm de espessura e 4 camadas para os três materiais do tipo betão poroso.

Procurou-se ainda analisar a influência do número de camadas nas curvas de absorção sonora (Figura 8).

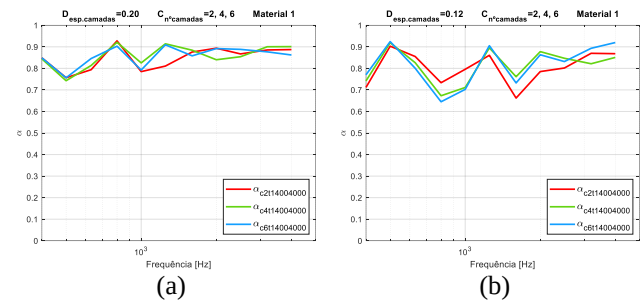


Figura 8. Curvas de absorção sonora para a configuração com 20 (a) e 12 cm (b) de espessura, com 2, 4 e 6 camadas.

Quando comparadas as curvas de absorção para diferentes números de camadas, observa-se que as curvas referentes às configurações com 2 camadas de material poroso apresenta um comportamento mais distinto, em geral com menores amplitudes de absorção sonora, em relação às restantes curvas. Por outro lado, verifica-se que as curvas referentes a sistemas com 4 e 6 camadas apresentam comportamentos semelhantes, sobretudo para as espessuras de 20, 17 (não apresentado) e 12 cm. É assim possível observar que não é necessário um número elevado de camadas para obter uma boa relação camada/curva de absorção sonora, permitindo diminuir a quantidade de materiais utilizados.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho tinha como objetivo analisar um sistema absorvente multicamada poroso, em que se variam os parâmetros macroscópicos em cada camada, de modo a

otimizar a curva de absorção sonora, consoante a gama de frequências de interesse. Realizou-se um estudo paramétrico bastante abrangente. Nos resultados obtidos, verificam-se claramente as gamas de frequências em que se realizou a otimização. Verificou-se que as análises para as configurações com 4 e 6 camadas, e restantes parâmetros iguais, resultam em curvas de absorção sonora relativamente semelhantes. Igualmente, para espessuras de sistema com 17 e 20 cm obtém-se curvas de absorção sonora com comportamentos semelhantes, sobretudo nas altas frequências. Tais comportamentos sugerem que uma maior espessura ou quantidade de camadas, não garante necessariamente um melhor desempenho do sistema, permitindo assim desenvolver sistemas absorventes multicamada eficientes e com uso de menores quantidades de materiais.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020, e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE sob referência LA/P/0112/2020, e pelos fundos FEDER através do COMPETE 2020, Portugal 2020, no âmbito dos projetos POCI-01-0247-FEDER-033990 (iNBrail), POCI-01-0247-FEDER-046111 (FERROVIA 4.0) e PTDC/ECI-EGC/3352/2021 (IntRail).

6. REFERÊNCIAS

- [1] WHO. *Health Topics. Environment and health. Noise, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen (Denmark)*, 2021. Available: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/noise>
- [2] R. A. Ibrahim, "Recent advances in nonlinear passive vibration isolators, *Journal of sound vibration*, Vol 314 (3-5), 2008, pp 371-452."
- [3] X. Zhang, R. Liu, Z. Cao, X. Wang, and X. Li, "Acoustic performance of a semi-closed noise barrier installed on a high-speed railway bridge: Measurement and analysis considering actual service conditions, *Measurement*, Vol 138, 2019, pp 386-399."
- [4] S. Kephelopoulou, M. Paviotti, and F. Anfosso-Lédée, *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*, EUR 25379 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.
- [5] T. Cox and P. d'Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*, Crc Press, New York (United States of America), 2nd Edition, 2016.
- [6] D. C. Hothersall, K. V. Horoshenkov, P. A. Morgan, and M. J. Swift, "Scale modelling of railway noise barriers, *Journal of Sound Vibration*, Vol 234 (2), 2000, pp 207-223."
- [7] F. J. Fahy, *Foundations of engineering acoustics*, Academic Press, Southampton (United Kingdom), 1st Edition, 2000.
- [8] K. V. Horoshenkov and M. J. Swift, "The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 110 (5), 2001, pp 2371-2378."
- [9] J. Allard and N. Atalla, *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials*, John Wiley & Sons, Chichester (United Kingdom), 2nd Edition, 2009.
- [10] J. F. Allard and Y. Champoux, "New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 91 (6), 1992, pp 3346-3353."
- [11] R. Panneton, "Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 122 (6), 2007, pp EL217-EL222."
- [12] Y. Champoux and J. F. Allard, "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media, *Journal of Applied Physics*, Vol 70 (4), 1991, 1975-1979."
- [13] M. Pereira, J. Carbajo San Martín, L. Godinho, P. Amado-Mendes, D. Mateus, and J. Ramis-Soriano, "Acoustic behavior of porous concrete. Characterization by experimental and inversion methods, *Materiales de Construcción*, Vol 69 (336), 2019, pp e202."
- [14] L. Lourenço de Sousa, L. Pereira, L. Godinho, and P. A. Mendes, "Acoustic properties of porous concrete-Experiments and modelling, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings 2020*, Seul, Korea, August 23-26, 2020, Vol 261 No 6, pp 127-137, Institute of Noise Control Engineering."
- [15] L. Lourenço de Sousa, L. Pereira, D. Ramos, L. Godinho, and P. A. Mendes, "Acoustic absorption of porous concrete – normal incidence vs diffuse field conditions, *Euronoise Congress and Conference Proceedings 2021*, Madeira, Portugal, October 25-27, 2021, pp 239-248."
- [16] S. Kumar, H. Jin, K. M. Lim, and H. P. Lee, "Comparative analysis of machine learning algorithms on prediction of the sound absorption coefficient for reconfigurable acoustic meta-absorbers."
- [17] L. Sousa, L. Pereira, D. Montes-González, D. Ramos, P. Amado-Mendes, J. M. Barrigón-Morillas, et al., "Experimental Analysis and Simulation of a Porous Absorbing Layer for Noise Barriers," *Applied Sciences*, vol. 13, p. 2638, 2023.
- [18] R. Panneton, N. Atalla, and F. Charron, "A finite-element formulation for the vibroacoustic behaviour of double-plate structures with cavity absorption, *Canadian Aeronautics Space Journal*, Vol 41 (1), 1995, pp 5-12."
- [19] N. Jiménez, O. Umnova, and J.-P. Groby, "Acoustic waves in periodic structures, metamaterials, and porous media," *Ch. the Transfer Matrix Method in Acoustics*, Springer International Publishing, Cham, pp. 103-164, 2021.