

ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE BARREIRAS DE CRISTAIS SÓNICOS ATRAVÉS DE MODELAÇÃO NUMÉRICA 3D

David Montes González ^{1,2}, Paulo Amado Mendes ¹, Luís Godinho ¹, Juan Miguel Barrigón Morillas ², Javier Redondo ³

¹ Universidade de Coimbra, ISE, Departamento de Engenharia Civil, Portugal
{davidmg@unex.es, pamendes@dec.uc.pt, lgodinho@dec.uc.pt}

² INTERRA, Lambda, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Extremadura, Spain
{barrigón@unex.es}

³ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Gandia,
Universitat Politècnica de València, Spain
{fredondo@fis.upv.es}

Resumo

A Diretiva Europeia sobre o Ruído estabelece como um dos seus objetivos evitar, prevenir ou reduzir o impacto da exposição da população ao ruído ambiental. Para o efeito, propõe a utilização de mapas estratégicos de ruído como instrumento de avaliação, a partir dos quais podem ser adotados planos de ação para atenuar os efeitos nocivos do ruído na saúde humana. Este trabalho apresenta um estudo do comportamento de barreiras acústicas com base no conceito de cristais sónicos como solução para reduzir os efeitos do ruído de tráfego rodoviário na população, tendo em conta que, por sua vez, geram menor impacto visual que as barreiras contínuas. Para este fim, um modelo tridimensional desenvolvido com métodos numéricos foi utilizado. A fim de realizar um futuro protótipo em escala real, baseado também no conceito de sustentabilidade ambiental, foram consideradas certas condições no desenho dos dispersores. Os resultados mostram que a implementação deste tipo de solução permite reduzir o impacto do ruído de tráfego rodoviário, mas as perdas por inserção e a gama de frequência de eficácia podem variar em função da estrutura e das dimensões dos dispersores.

Palavras-chave: atenuação do ruído de tráfego rodoviário, propagação sonora, perda por inserção.

Abstract

The European Noise Directive states as one of its objectives to avoid, prevent or reduce the impact of exposure of the population to environmental noise. With this purpose, it proposes the use of strategic noise maps as an assessment tool, from which action plans can be adopted to mitigate the adverse effects of noise on human health. This work presents a study of the behavior of acoustic barriers based on the concept of sonic crystals as a solution to reduce the effects of road traffic noise in the population, bearing in mind that they also produce less visual impact than continuous barriers. For this purpose, a three-dimensional model made with numerical methods was used. In order to realize a future full-scale prototype based also on the concept of environmental sustainability, certain conditions were considered in the design of the scatterers. Results show that the implementation of this type of solution allows reducing the impact of road traffic noise, but the insertion loss and frequency range of effectiveness can vary depending on the structure and dimensions of the scatterers.

Keywords: road traffic noise mitigation, EN 1793, sound propagation, insertion loss.

PACS: 43.50.Gf, 43.28.Js, 43.20.Fn

1 Introdução

A Diretiva Europeia sobre o Ruído [1] estabelece como um dos seus objetivos evitar, prevenir ou reduzir o impacto da exposição da população ao ruído ambiental. Para o efeito, propõe a utilização de mapas estratégicos de ruído como instrumento de avaliação, a partir do qual podem ser adotados planos de ação para atenuar os efeitos nocivos do ruído na saúde humana [2].

Neste sentido, é comum encontrar, na literatura científica, a referência a diferentes tipos de barreiras sonoras, dependendo do ambiente e da fonte sonora. Koussa et al. [3] avaliaram o desempenho acústico das barreiras acústicas de gabiões convencionais e de baixa altura, considerando o ruído de tráfego rodoviário como a principal fonte sonora. Bunn e Zannin [4] propuseram o uso de uma barreira de 5 m de altura e 150 m de comprimento ao longo de uma linha de comboio para reduzir os níveis de ruído nas proximidades. Chen et al. [5] investigaram o uso de uma barreira acústica ativa com fontes secundárias unidirecionais feitas com alto-falantes com diferença de fase pré-ajustada. Ow e Ghosh [6] estudaram a redução do nível de ruído de tráfego rodoviário devido às barreiras naturais projetadas a partir de linhas de árvores.

Por outro lado, o VII Programa de Ambiente da União Europeia [7] estabelece entre os seus objetivos a proteção da população contra os riscos ambientais para a saúde e o bem-estar, para os quais propõe promover uma economia circular em que os recursos naturais sejam geridos de forma sustentável. Este trabalho apresenta um estudo, com recurso a métodos numéricos, do comportamento de barreiras acústicas com base no conceito de cristais sónicos [8,9] como solução para reduzir os efeitos do ruído de tráfego rodoviário na população, tendo em conta que, por sua vez, geram menor impacto visual do que soluções com barreiras contínuas. O objetivo é realizar uma primeira fase de estudo através de simulação para o desenvolvimento posterior de um protótipo em escala real. Essa barreira seria feita com dispersores construídos a partir de troncos de madeira de secção circular de baixo processamento industrial provenientes de operações de desmatamento e que não são adequadas para aplicações comuns, pois não possuem dimensões adequadas para esse fim.

2 Metodologia

A propagação do som num espaço tridimensional (3D) pode ser expressa matematicamente, no domínio da frequência, pela equação diferencial às derivadas parciais de Helmholtz,

$$\nabla^2 p(\mathbf{x}) + k^2 p(\mathbf{x}) = -\sum_{k=1}^{NS} Q_k \delta(\mathbf{x}_k^f, \mathbf{x}), \quad (1)$$

onde: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; p é a pressão acústica; $k = \omega/c$; $\omega = 2\pi f$; f é a frequência; c é a velocidade de propagação do som dentro do meio acústico; NS é o número de fontes no domínio; Q_k é a magnitude das fontes existentes \mathbf{x}_k^f localizadas em (x_k^f, y_k^f, z_k^f) ; \mathbf{x} é um ponto de campo localizado em (x, y, z) ; e $\delta(\mathbf{x}_k^f, \mathbf{x})$ é a função generalizada do delta de Dirac.

As condições de fronteira para o problema (para \mathbf{x} na fronteira) são dadas por:

$$v_n(\mathbf{x}) = \frac{i}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial n}(\mathbf{x}) = \bar{v}_n(\mathbf{x}) \text{ em interfaces } S_v, \quad (2a)$$

$$p(\mathbf{x}) = \bar{Z}(\mathbf{x})v_n(\mathbf{x}) \text{ em interfaces } S_z, \quad (2b)$$

onde: $\bar{v}_n(\mathbf{x})$ é a velocidade normal da partícula e $\bar{Z}_n(\mathbf{x})$ é a impedância superficial de um possível material absorvente, que se assume serem quantidades conhecidas. A Eq. (2a) representa a condição Neumann e a Eq. (2b) representa a condição de Robin ou condição de impedância de fronteira.

No presente artigo, é utilizada uma forma especial da solução fundamental para problemas acústicos, desenvolvida pelos autores para o caso específico de estruturas periódicas [10], que pode ser altamente eficiente em tal análise. De facto, ao utilizar essa solução fundamental periódica apenas uma parte muito pequena da estrutura necessita de ser modelada, correspondendo à célula unitária que se repete infinitamente ao longo de uma direção.

Na conceção da barreira, em termos da sua estrutura e do tamanho dos dispersores, foi considerado o indicado anteriormente sobre a ideia de fazer um protótipo em tamanho real com troncos de madeira que não podem ser utilizados no mercado para aplicações comuns. Neste sentido, foram utilizados dispersores de secção circular com um raio (r) de 0,06 m e espaçados de 0,18 m entre si (a). Vários ensaios de simulação numérica foram realizados, considerando diferentes alturas (h_B) e números de linhas de dispersores (que poderão apresentar diferentes valores de absorção sonora superficial). Além disso, os dispersores foram dispostos em duas configurações diferentes, com estruturas quadrada e triangular. A Figura 1 ilustra uma vista esquemática em planta das barreiras de cristais sónicos com estrutura quadrada e triangular. Um aspeto a destacar neste modelo tridimensional é que permite a utilização de uma altura finita da barreira, enquanto que, nos modelos bidimensionais, é considerada uma altura infinita dos dispersores.

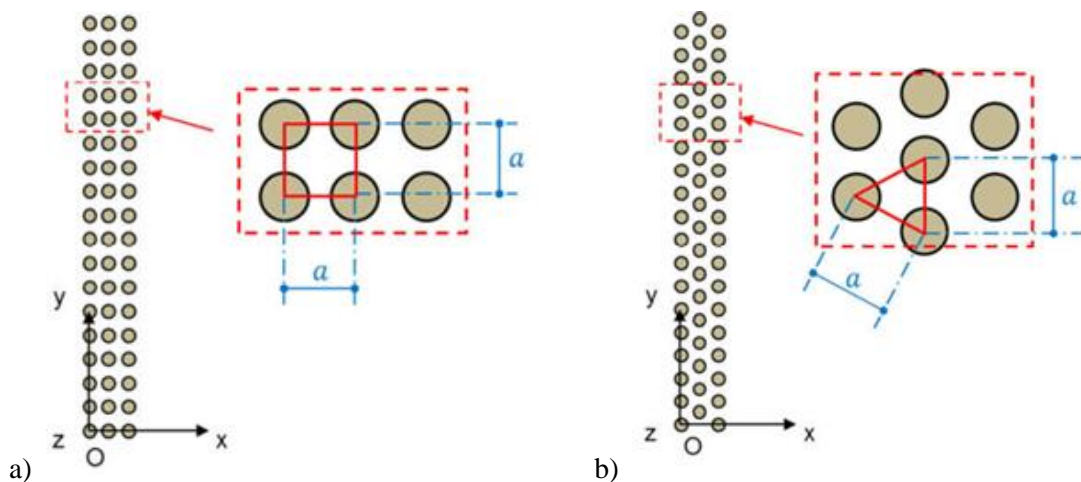


Figura 1 – Barreiras de cristais sónicos com estruturas a) quadrada e b) triangular [11].

Em relação às características da fonte sonora utilizada nas simulações numéricas, foi localizada uma fonte linear a 10 m da barreira e a uma altura de 0,05 m acima do solo [12]. No outro lado da barreira, os recetores foram espaçados de 0,1 m, num intervalo de distâncias entre 0,25 e 1,25 m desde a barreira, segundo o eixo x , e de alturas entre 0 e 1,5 m do chão (eixo z). Segundo o eixo y , a distância entre os recetores foi de 0,045 m ($a/4$). As figuras 2 e 3 ilustram esquematicamente, em planta e alçado, a disposição dos elementos nos modelos numéricos.

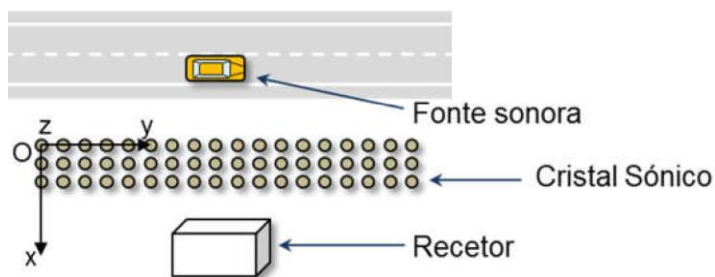


Figura 2 – Esquema geral, em planta, da disposição dos elementos nas simulações numéricas [11].

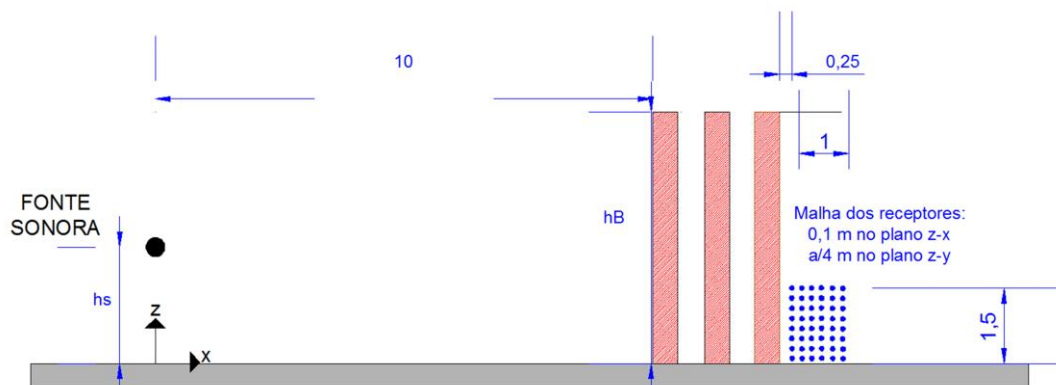


Figura 3 – Esquema geral, em alçado, da disposição dos elementos nas simulações numéricas.

3 Resultados e discussão

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para as perdas por inserção, em dB, para barreiras de cristais sónicos com estruturas a) quadrada e b) triangular, com uma altura da barreira (h_B) de 3 m e um número diferente de linhas de dispersores. Para a mesma altura de barreira e o mesmo número de dispersores, as perdas por inserção (IL) das barreiras de cristais sónicos, no caso da estrutura quadrada, são mais elevadas do que no caso da estrutura triangular. Esta diferença pode ser de até aproximadamente 2,5 dB na gama de maior atenuação (800-1000 Hz). Também deve ser mencionado que, com a estrutura quadrada, há uma segunda banda de atenuação mais elevada em torno de 2 kHz. Por outro lado, com a estrutura triangular, esta gama de atenuação é deslocada para 2,5 kHz. A diferença nos valores máximos de atenuação da barreira, nesta segunda zona, é de maior magnitude com a estrutura quadrada do que com a triangular, existindo diferenças entre 4,5 e 9,5 dB, aproximadamente para a mesma altura de barreira e o mesmo número de linhas de dispersores.

Com o objetivo de analisar a influência da altura da barreira (h_B), as perdas por inserção para barreiras de cristais sónicos com estruturas quadrada e triangular e três linhas de dispersores de diferente altura (h_B) foram estudadas. Como pode ser observado na Figura 5, no caso da barreira quadrada, há um ligeiro aumento nas perdas por inserção das barreiras de cristais sónicos à medida que a altura da barreira aumenta entre 2 e 4 m nas gamas com maior atenuação (800-1000 Hz e 2000 Hz). No entanto, no caso da barreira com uma estrutura triangular, não há praticamente nenhuma variação nas perdas por inserção quando a altura da barreira varia.

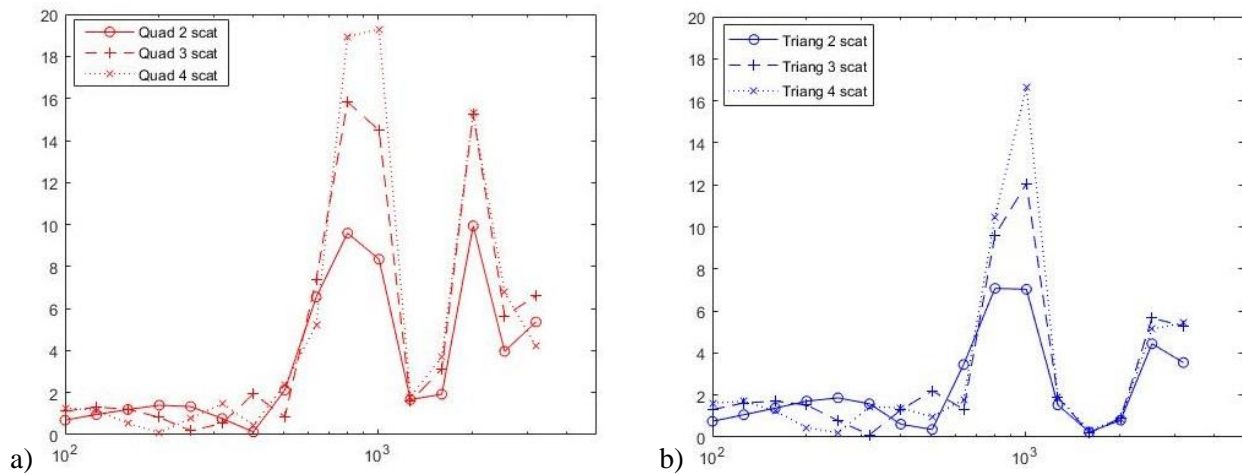


Figura 4 – Perdas por inserção, em dB, para barreiras com estruturas a) quadrada e b) triangular, com uma altura da barreira (h_B) de 3 m e um número diferente de linhas de dispersores (2, 3 e 4).

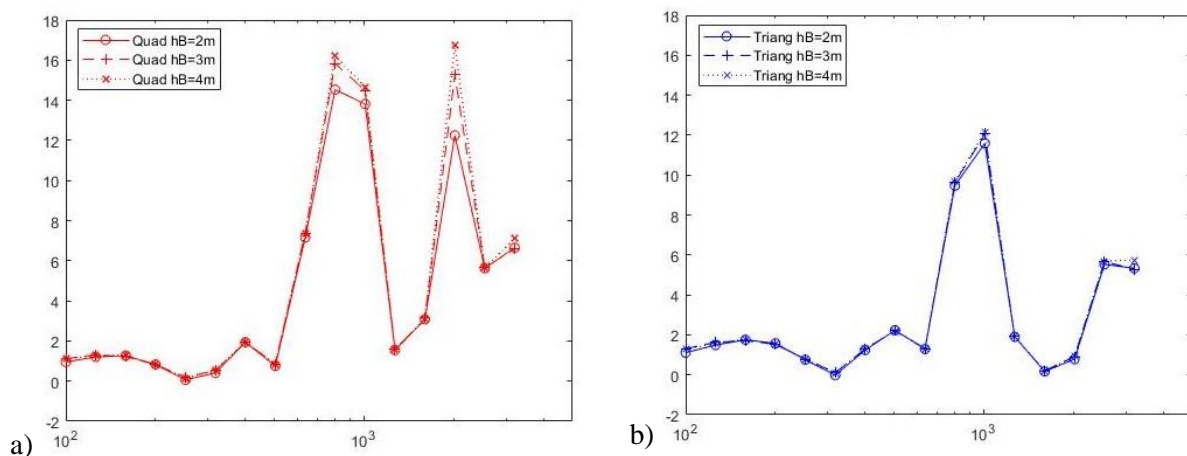


Figura 5 – Perdas por inserção, em dB, para barreiras com estruturas a) quadrada e b) triangular, com três linhas de dispersores de diferente altura (h_B).

Foi ainda considerado de interesse estudar a possível influência da altura da fonte sonora nas perdas por inserção. Nesse sentido, foram realizadas simulações de barreiras de cristais sónicos com estruturas quadrada e triangular, com três linhas de dispersores de 3 m de altura (h_B), variando a altura da fonte sonora (h_s) entre os valores de 0,05 m e $h_B/2$, segundo as indicações da Diretiva Comunitária [12] e da norma de avaliação de desempenho *in situ* [13], respetivamente. Tendo em conta os resultados apresentados na Figura 6 para as estruturas a) quadrada e b) triangular, para a configuração considerada da barreira de cristais sónicos e recetores e a distância de 10 m entre fonte e barreira, pode concluir-se que praticamente não é encontrada nenhuma diferença para as perdas por inserção (IL) da barreira acústica quando se modifica a altura da fonte sonora linear de 0,05 m acima do solo para uma altura da fonte correspondente a metade da altura da barreira.

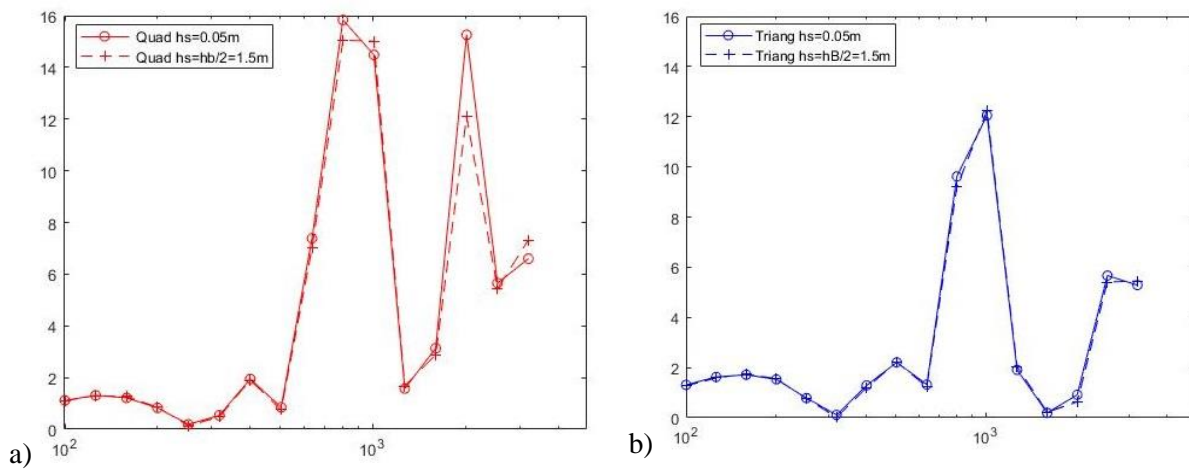


Figura 6 – Perdas por inserção, em dB, para barreiras com estruturas a) quadrada e b) triangular com três linhas de dispersores e uma altura da barreira (h_B) de 3 m, para diferentes alturas da fonte sonora acima do solo.

Para finalizar, foram realizadas simulações numéricas para avaliar o efeito da variação do tamanho da secção circular dos dispersores. Neste caso, realizaram-se simulações de barreiras de cristais sónicos de 3 linhas de dispersores e 3 m de altura, variando o tamanho da secção destes em função da seguinte expressão:

$$r = x \cdot \frac{a}{2} \quad (3)$$

onde r é o raio da secção circular dos dispersores; $a = 0,18$ m e x é o fator de preenchimento (50%, 67.5%, 75% e 90%).

A Figura 7 apresenta as perdas por inserção (IL) de barreiras de cristais sónicos com estruturas a) quadrada e b) triangular. Para as estruturas quadrada e triangular, observa-se um aumento na perda de inserção (IL) das barreiras à medida que o fator de preenchimento, x , aumenta de 50% para 90%. Numa comparação entre as duas estruturas, para o mesmo fator de preenchimento, a barreira de cristais sónicos com a estrutura quadrada apresenta maiores perdas por inserção (IL) do que a da estrutura triangular.

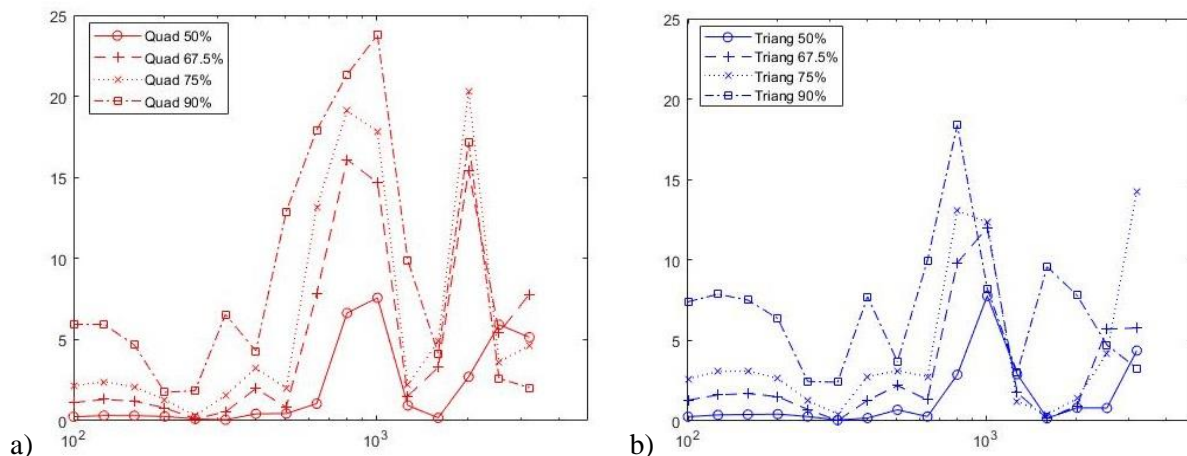


Figura 7 – Perdas por inserção, em dB, para barreiras com estruturas a) quadrada e b) triangular, com três linhas de dispersores e uma altura da barreira (h_B) de 3 m, em função da dimensão dos dispersores (i.e. do grau de preenchimento dos elementos sólidos da estrutura).

4 Conclusões

O presente artigo descreve a análise, através de simulações numéricas com o método de soluções fundamentais (MFS), do comportamento acústico de barreiras com estrutura de cristais sónicos. Esta constitui uma etapa preliminar para o desenvolvimento de um protótipo em tamanho real, utilizando troncos de madeira que poderão ser facilmente utilizados neste tipo de aplicações, devido às suas dimensões e aproveitamento.

Os resultados obtidos para as perdas por inserção das barreiras mostram um comportamento mais seletivo em frequência do que as barreiras contínuas convencionais, apresentando uma zona de atenuação máxima na gama entre 800 e 1000 Hz. Também dispõem de um segundo pico de atenuação máxima entre 2 e 2,5 kHz, dependendo da estrutura dos dispersores.

Para a configuração estudada neste trabalho, as barreiras com dispersores cilíndricos, dispostos em estrutura quadrada mostram, em geral, um melhor comportamento acústico em termos de perdas por inserção (IL) do que colocados em arranjo periódico numa estrutura triangular. Nesse sentido, o desempenho acústico da barreira regista variações muito ligeiras quando a altura dos dispersores varia entre 2 e 4 m ou quando a altura da fonte varia entre 0,05 m e $h_B/2$. No entanto, observa-se, para ambas as estruturas, um aumento das perdas por inserção quando aumenta o número de linhas de dispersores ou o tamanho da secção circular destes elementos, mantendo o afastamento entre os respetivos centros.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito da unidade de investigação “*Institute for sustainability and innovation in structural engineering - ISISE*” (UIDP/04029/2020), e por fundos do Programa Operacional Regional CENTRO2020, no âmbito do projeto CENTRO-01-0145-FEDER-000006 (SUSpENsE).

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto POCI-01-0247-FEDER-033691 – HLS - *Hybrid Log Shield*, suportado por fundos FEDER, através do Programa Portugal-2020 (PT2020), no âmbito do SII&DT, e pelo Programa POCI.

Este trabalho foi também financiado pela Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital da Junta de Extremadura, União Europeia e Fundo Social Europeu (FSE), através de bolsas para o reforço da I+D+i através da mobilidade de investigadores pós-doutorados (PO17014) onde a Universidade da Extremadura foi a entidade beneficiária.

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

JUNTA DE EXTREMADURA
Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital

Fondo Social Europeo
Una manera de hacer
Europa



Referências

- [1] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise (END). Official Journal L, 189. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union, 0012–0026; 2012.
- [2] WHO. Environmental Noise Guidelines for the European Region. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, 2018.
- [3] Koussa, F.; Defrance, J.; Jean, P.; Blanc-Benon, P. Acoustic performance of gabions noise barriers: Numerical and experimental approaches. *Applied Acoustics*, Vol. 74, 2013, pp. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.07.009>
- [4] Bunn, F.; Zannin, P.H.T. Assessment of railway noise in an urban setting. *Applied Acoustics*, Vol. 104, 2016, pp. 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.10.025>
- [5] Chen, W.; Rao, W.; Min, H.; Qiu, X. An active noise barrier with unidirectional secondary sources. *Applied Acoustics*, Vol. 72, 2011, pp. 969–974. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.06.006>
- [6] Ow, L.F.; Ghosh, S. Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. *Applied Acoustics*, Vol. 120, 2017, pp. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.007>
- [7] Decision 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 ‘Living well, within the limits of our planet’. Official Journal of the European Journal.
- [8] Fredianelli L.; Del Pizzo A.; Licitra G. Recent Developments in Sonic Crystals as Barriers for Road Traffic Noise Mitigation. *Environments*, Vol. 6 (2), 2019, 14. <https://doi.org/10.3390/environments6020014>
- [9] Morandi F.; Miniaci, M.; Marzani, A.; Barbaresi, L.; Garai, M. Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties. *Applied Acoustics*, Vol. 114, 2016, pp. 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.028>
- [10] Godinho, L.; Redondo, J.; Amado-Mendes, P. The method of fundamental solutions for the analysis of infinite 3D sonic crystals. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 98, 2019, pp. 172–183.
- [11] Mário Miguel de Abreu Martins. Contribuição para o estudo de atenuação seletiva do ruído de tráfego rodoviário. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra, 2014.

[12] Directive 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council. Official Journal L, 168. Brussels: The European Commission, 0001–0823; 2015.

[13] EN 1793-6:2018, 2018. Road Traffic Noise Reducing Devices - Test Method for Determining the Acoustic Performance - Part 6: Intrinsic Characteristics - in Situ Values of Airborne Sound Insulation under Direct Sound Field Conditions. European Committee for Standardization, Brussels.