

APLICACIÓN Y DESARROLLO DE NUEVAS CONFIGURACIONES DE DISEÑO EN BARRERAS ACÚSTICAS MEDIANTE DIFUSORES QRD

43.50.Gf

Prieto Gajardo, Carlos¹; Godinho, Luís²; Amado-Mendes, Paulo²; Barrigón Morillas, J. Miguel¹

¹Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Departamento de Física Aplicada.

Avda. de la Universidad s/n, 10071 Cáceres, España

Tel: +34 927 257 195 Fax: +34 927 257 203

E-mail: carlosprieto@unex.es, barrigon@unex.es

²CICC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Rua Luís Reis Santos – Pólo II da Universidade, 3030-790 Coimbra, Portugal

Tel: +351 239 797 198

E-mail: lgodinho@dec.uc.pt, pamendes@dec.uc.pt

ABSTRACT

Acoustic barriers are a well-known environmental noise mitigation solution, which is widely used nowadays. In this work, it is expected to contribute to the body of knowledge regarding the physical and technical behavior of those barriers by developing and implementing a set of models that allow an accurate analysis of noise barriers with new configuration types (sQRD). A 2.5D boundary-only numerical model is developed and implemented, and simulation analyses are performed in order to compare different surface profiles of those acoustic devices. The particular case in which two acoustic barriers are used, one at each side of the road, is addressed.

RESUMEN

En la actualidad, el uso de barreras acústicas para reducir los problemas de contaminación acústica es una solución muy comúnmente adoptada. En este trabajo, se analiza y compara el comportamiento técnico y físico de tales barreras cuando son diseñadas a partir de nuevas configuraciones (denominadas sQRD) basadas en difusores de Schroeder. Para ello, se implementa y desarrolla un modelo numérico (con elementos de contorno) en 2.5D que permite simular y analizar diferentes configuraciones y diseños. El caso particular bajo estudio trata de dos barreras paralelas, una a cada lado de la carretera, a 10 m de distancia y con 4 m de altura.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico y social en las ciudades desarrolladas han contribuido durante las últimas décadas a incrementar los niveles de contaminación por ruido ambiental derivados principalmente de los medios de transporte [1]. A raíz de esta problemática, la Organización Mundial de la Salud (OMS) elaboró una serie de recomendaciones [2] para evitar y paliar los efectos negativos que el ruido tiene sobre la salud de las personas [3-6].

Una solución frecuentemente adoptada para combatir el ruido derivado del tráfico es utilizar barreras acústicas ubicadas entre la fuente emisora y los receptores. En condiciones normales, las pérdidas de inserción asociadas a este tipo de barreras pueden alcanzar entre 5 y 10 dB, dependiendo de su geometría y sus características de difusión y absorción [7].

Para estudiar el comportamiento de las barreras acústicas, algunos autores han desarrollado modelos matemáticos para calcular las pérdidas de inserción [8-10], teniendo en cuenta, entre otros factores, métodos basados en la difracción producida por la barrera en presencia de otros obstáculos [11] y modelando geometrías de dos y tres dimensiones [12]. A mediados del pasado siglo se desarrollaron técnicas basadas en la teoría de elementos finitos haciendo posible el estudio de la difracción de las ondas sonoras en barreras planas delgadas [13].

En algunos trabajos de Monazzam y Lam [14, 15] el método de elementos de contorno (2D BEM) es utilizado para analizar las pérdidas de inserción proporcionadas por la barrera, evaluando la influencia de su forma y de las características de absorción de la superficie en el comportamiento de la propagación de la onda sobre el medio. Duhamel [16] desarrolló un método numérico (también basado en BEM) para calcular la presión sonora en 3D alrededor de la barrera a partir de soluciones 2D. Posteriormente, el método fue mejorado teniendo en cuenta la absorción producida por la superficie del suelo [17].

Simulaciones numéricas con diferentes configuraciones de barreras acústicas fueron estudiadas por Monazzan, demostrando que el uso de barreras tipo *T* e *Y*, con sus cumbreras diseñadas utilizando difusores tipo QRD ("Quadratic-Residue Diffusers", el más común de los difusores de Schroeder), pueden ser muy eficientes y las pérdidas de inserción pueden ser incrementadas (alrededor de 1 dB para la frecuencia de diseño del QRD de 400 Hz), cuando se comparan con las pérdidas producidas por la típica barrera tipo *T* utilizando material absorbente. Otra característica importante de las barreras diseñadas con difusores tipo QRD es que su frecuencia de trabajo puede ser modificada simplemente cambiando la frecuencia de diseño del difusor QRD. Por lo tanto, la frecuencia de diseño que mejor se ajusta al espectro frecuencial del ruido de tráfico (principal fuente de ruido en la ciudad) es la de 400 Hz (comparada con 500 y 1000 Hz) [14].

A partir de esta idea y continuando los trabajos de investigación mencionados anteriormente así como sus resultados y conclusiones, el presente trabajo está basado en formulación 2.5D BEM implementada para analizar el campo de presión sonora tridimensional generado por una fuente puntual ubicada entre dos barreras acústicas verticales paralelas, las cuales pueden ser planas o con algún perfil irregular implementado a partir de diseños QRD simplificados (sQRD).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El método de elementos de contorno (conocido como BEM) es, según diversos autores, una de las técnicas numéricas más efectivas para analizar el comportamiento y la propagación de las ondas de presión en medios infinitos [18]. Además, permite una buena descripción del medio, concretamente en las discontinuidades de los materiales. La principal característica que ha popularizado el método, haciéndolo más efectivo que otras herramientas de análisis para espacios infinitos o semi-infinitos, es que solamente es necesario discretizar los contornos en lugar del propio dominio, permitiendo así una descripción muy compacta del medio de propagación. En consecuencia, el tamaño de la matriz del sistema decrece así como el tiempo de cómputo requerido cuando se compara con otras técnicas de discretización de dominios. Por otro lado, dado que las funciones de Green satisfacen las condiciones de radiación de campo lejano, el método BEM no requiere un tratamiento especial para contabilizar el dominio infinito. Añadiendo condiciones de simetría, como la generada por un suelo horizontal rígido, también es posible utilizar las funciones de Green derivadas de la metodología fuente-imagen [19].

Para evaluar el comportamiento de la propagación de la onda en el espacio tridimensional sin discretizar todo el dominio, fue utilizada la transformada espacial de Fourier a lo largo de la dirección en la que la geometría no cambia [16, 20]. Esta transformación de Fourier adopta un número infinito de fuentes virtuales equiespaciadas a lo largo del eje z , requiriendo un espaciado suficientemente largo para evitar la contaminación espacial de la respuesta. El problema es formulado en el dominio de la frecuencia y son utilizadas frecuencias complejas. Posteriormente, se aplica la transformada inversa de Fourier para obtener las respuestas en el dominio del tiempo.

3. ANALISIS DE UN DIFUSOR QRD SIMPLIFICADO (sQRD)

El uso de difusores en espacios cerrados ha sido bastante estudiado y es, hoy en día, una solución técnica frecuentemente utilizada. El origen de la mayoría de las soluciones modernas basadas en difusores se deben, principalmente, a los trabajos de M. Schroeder, que fue quien desarrolló una nueva forma de cuerpos difusores y quien propuso estructuras para mejorar la presión sonora reflejada en una banda ancha de frecuencias, los cuales fueron llamados QRD ("Quadratic Residue Diffuser"). Algunos de los parámetros más importantes a la hora de caracterizar este tipo de difusores son:

- El orden N o número de ventanas por módulo;
- La frecuencia de diseño F_d del difusor QRD;
- El coeficiente de absorción (no tratado en este estudio).

Un difusor QRD se compone de un número de ventanas/pozos (que dependen de su orden N) con diferentes profundidades (ver Figura 1). Esto causará desplazamientos de fase en el sonido incidente y, por lo tanto, una dispersión uniforme de la energía (homogeneizándola) en el espacio tridimensional, consiguiendo un mejor balance de la presión sonora reflejada. Además, el ancho de la ventana o pozo determinará la frecuencia límite superior y la profundidad de la ventana la frecuencia límite inferior de difusión. A medida que el orden N crece, se produce una difusión más uniforme y lisa a lo largo del espectro de frecuencias. En este trabajo, se ha estudiado el comportamiento de los difusores QRD y se han analizado en detalle para evaluar su aplicabilidad en barreras acústicas.

Por lo tanto, se han seleccionado y analizado un número de configuraciones y diseños mediante cálculo numérico. Con el fin de estudiar la mayoría de los difusores de ordenes altos, y siempre desde un punto de vista práctico en términos de construcción e ingeniería, los órdenes N y frecuencias de diseño del QRD evaluados en este trabajo fueron $N = 11$ y 17 , y $F_d = 400, 500$ y 1000 Hz, respectivamente. En la Figura 1 se presenta un corte transversal de un módulo QRD con frecuencia de diseño de 1000 Hz y órdenes de $N = 11$ y 17 .

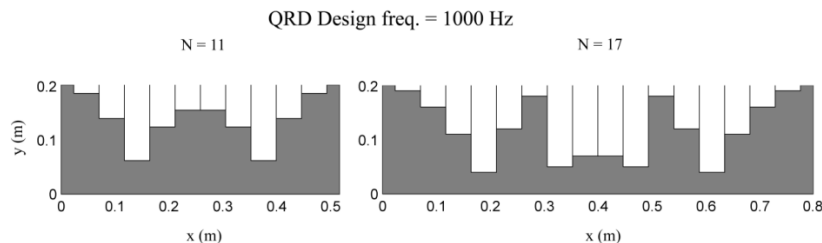


Fig. 1. Sección transversal de un módulo QRD ($N = 11$ y $N = 17$). Frecuencia de diseño de 1000 Hz.

Como se puede observar, el ancho del difusor es proporcional al orden N . En cambio, cuando la frecuencia de diseño del QRD se incrementa, la altura del módulo decrece.

Desde un punto de vista práctico, la presencia de las paredes laterales que separan cada ventana/pozo añade una complejidad significativa a la hora de construir estos difusores. Una configuración simple de los difusores QRD, denominados aquí como sQRD, son propuestos simplemente eliminando estas paredes. Esta configuración simplificada del QRD puede conducir a beneficios adicionales cuando son aplicados a barreras acústicas (como se pretende en el presente trabajo), obteniendo soluciones de gran estabilidad, fuerza mecánica y resistencia a impactos, además de garantizar fácil mantenimiento y durabilidad. En la Figura 2, se muestra un corte transversal de un módulo QRD y un sQRD con ordenes $N = 11$.

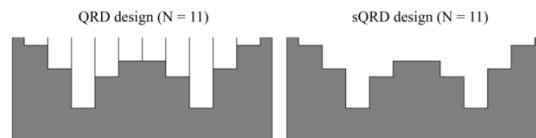


Fig. 2. Diseño 2D de un QRD y un QRD simplificado (sQRD) de orden $N = 11$.

4. IMPLEMENTACIÓN DE DIFUSORES sQRD EN BARRERAS ACÚSTICAS

En este apartado, y con el fin de entender mejor el comportamiento de los paneles difusores compuestos con sQRD, se ha propuesto un caso práctico de estudio. Dos barreras paralelas a lo largo de una vía de tráfico rodado y una fuente de presión puntual. De esta manera, las aproximaciones numéricas propuestas en 2.5D son utilizadas para evaluar y comparar el comportamiento de barreras paralelas compuestas con difusores sQRD y con barreras planas cuando la propagación del sonido es simulada sobre un suelo rígido (reflectante).

Se han considerado dos barreras acústicas, espaciadas 10 m entre ellas y una a cada lado de la vía de tráfico. La geometría de la barrera permanece constante a lo largo de la dirección en la que se alinea la carretera. Dos paneles difusores distintos han sido modelados, correspondiendo al previamente descrito sQRD con órdenes $N = 11$ y $N = 17$, y frecuencias de diseño de 400 Hz. Además, una barrera plana con la misma altura es utilizada para comparar el comportamiento con las sQRD. La altura asignada a las barreras es de 4 m. En la Figura 3 se presenta un esquema tridimensional de un segmento de las barreras.

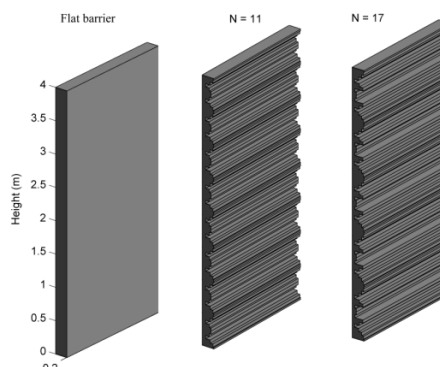


Fig. 3. Configuraciones 3D de barrera plana y sQRD ($N = 11$ & $N = 17$).

El medio de propagación es aire (densidad 1.22 kg/m^3) y la velocidad del sonido es de 340 m/s. El punto de presión sonora se ubica a 0.6 m del suelo rígido, en el plano vertical $z = 0 \text{ m}$, y en el centro de las dos barreras paralelas, en el punto con coordenadas (5 m, 0.6 m, 0 m).

4.1. Análisis en el dominio de la frecuencia y el tiempo

En la Figura 4 puede observarse la respuesta acústica del sistema para las frecuencias de incidencia de 500 y 1000 Hz en las barreras paralelas planas y con perfiles sQRD.

En dos mallas de receptores numéricos, para $z = 0$ m y $z = 10$ m, la dispersión de los niveles de presión sonora son evaluados mediante la expresión $SPL_{scat} = 20 \log(|p_{scat}|/2 \times 10^{-5})$ y mostrados a lo largo de dos planos verticales.

En la primera columna se muestra el patrón de dispersión del SPL para la frecuencia más baja. Se pueden observar cambios significativos entre las tres configuraciones geométricas, principalmente en el plano vertical que contiene la fuente. Cuando se utilizan perfiles difusivos, donde la profundidad de los pozos varía a lo largo de la barrera, la dispersión de los pulsos propagados en múltiples direcciones produce un campo de onda más difuso que el observado con barreras planas. Cuando los receptores se colocan alejados de la fuente (en $z = 10$ m), las diferencias en la dispersión del SPL son inferiores entre las configuraciones geométricas pero, aun así, muestran el carácter 3D del sistema acústico.

Para la frecuencia superior de 1000 Hz, se observa un marcado efecto de difusividad en la presencia de perfiles sQRD, con el efecto resultante más pronunciado de interacciones múltiples del pulso, de nuevo, a lo largo del plano vertical $z = 0$ m. También se puede apreciar que los patrones de dispersión presentan alguna dependencia con el orden N del sQRD, aunque ambos diseños muestran comportamientos similares.

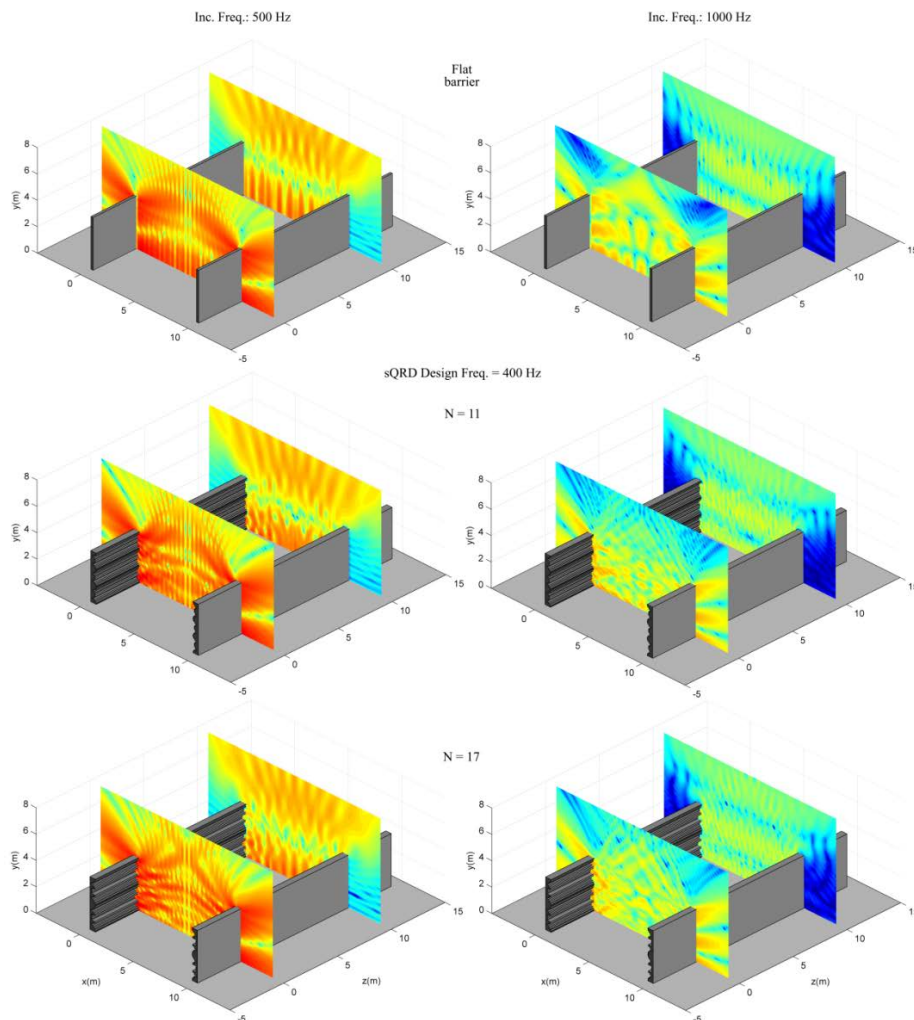


Fig. 4. Comportamiento frecuencial en 3D para barreras planas y sQRD. SPL representados en las mallas verticales de receptores para $z = [0, 10]$ m.

El efecto de las barreras acústicas sQRD en la propagación 3D de un pulso esférico y la dispersión de su campo de onda fue también evaluado para el dominio del tiempo. Para conseguir estos análisis, un conjunto de 128 frecuencias fue utilizado en el rango de 10 a 1280 Hz. La frecuencia de paso adoptada fue de 10 Hz, haciendo posible definir un tiempo máximo de ventana de 0.1 s. Se aplicó la transformada inversa de Fourier a los resultados en el dominio de la frecuencia para obtener las respuestas en el dominio del tiempo en los receptores numéricos. La evolución en el tiempo del pulso emitido corresponde al pulso de Ricker, con frecuencia central de 500 Hz. Los resultados corresponden al campo de presión sonora total, resultante del campo incidente de la fuente y la dispersión de los contornos rígidos y obstáculos del sistema físico. A continuación, se muestran dos instantes de tiempo para las mismas configuraciones de barreras descritas anteriormente.

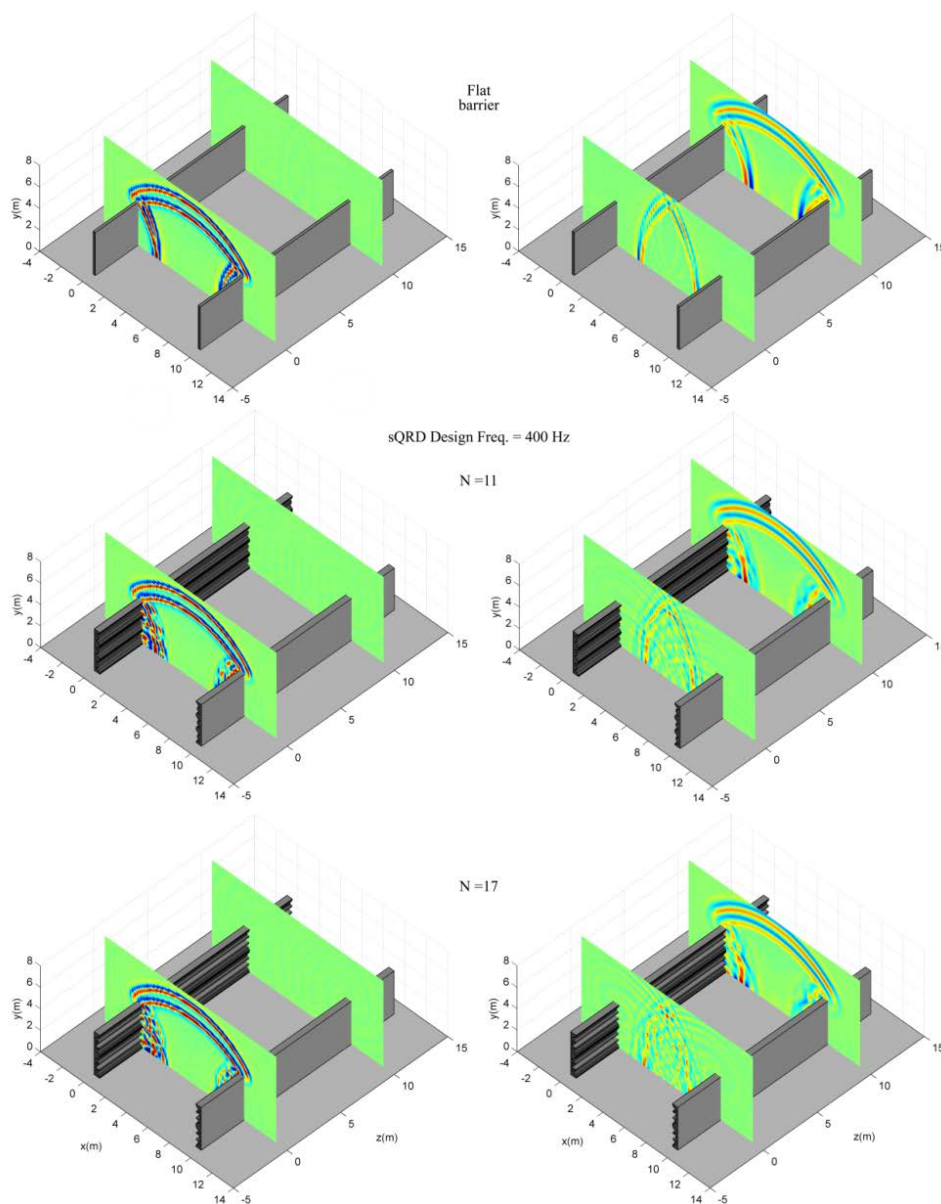


Fig. 5. Respuesta temporal 3D para un pulso incidente con frecuencia central de 500 Hz considerando barreras paralelas planas y sQRD. El campo de presión sonora se representa en mallas verticales de receptores para $z = [0, 10]$ m. La columna izquierda corresponde con $t=17.7$ y la derecha con $t=34.3$ ms.

En la primera columna de la Figura 5 se muestra el campo de onda acústico para el instante $t = 17.7$ ms, para dos mallas de receptores ubicadas en los planos verticales correspondientes a $z = 0$ m y $z = 10$ m. Para el caso de dos barreras planas, se observa una reflexión total con el suelo rígido y, posteriormente, con la cara plana de las barreras. Dado que la fuente se ubica en el centro de las dos barreras paralelas, los pulsos reflejados son simétricos y propagados a través del dominio entre las barreras.

La dispersión de los pulsos de onda en la cumbrera de las barreras es visible en las primeras fases de tiempo. Para este instante de tiempo, los pulsos de onda aún no han alcanzado el plano vertical de $z = 10$ m. Cuando observamos el comportamiento de las barreras sQRD, los pulsos reflejados son significativamente modificados, resultado de múltiples interacciones con la geometría irregular de la cara de la barrera. La dispersión del campo de presión es mucho más compleja y muestra un carácter claramente difusivo (con estas características, siendo ligeramente incrementadas para un orden superior del sQRD).

En la columna derecha de la Figura 5 se muestran las capturas de pantalla del campo de presión en los planos verticales para el instante 34.3 ms. Cuando se utilizan barreras planas, las reflexiones completas continúan propagándose entre las caras reflectantes paralelas y, un patrón similar se observa más allá del plano de la fuente, aunque con un decrecimiento de la amplitud de la onda. En el mismo instante, cuando se utilizan perfiles sQRD, los campos de presión son más complejos, resultantes de las múltiples reflexiones y efectos de difusión de las irregularidades de las barreras. Puede observarse como las interferencias pueden ser atenuadas incorporando perfiles difusores sobre las caras de las barreras.

5. CONCLUSIONES

Las configuraciones propuestas de barreras resultado de una simplificación de los conocidos difusores QRD, eliminando las paredes que delimitan cada ventana, resultan en diseños aquí denominados sQRD. El diseño sQRD permite una producción de paneles mucho más fácil y económica utilizando materiales rígidos como el cemento. Diferentes órdenes de N (17 y 11) para los sQRD fueron simulados comparándolos con las soluciones clásicas de barreras planas, encontrando diferencias relevantes para dimensiones 2D y 3D.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los paneles sQRD muestran mejores comportamientos dentro de ciertas bandas de frecuencia que dependen de la propia frecuencia de diseño (400, 500 y 1000 Hz han sido evaluadas en este trabajo). Nuestros resultados muestran que utilizando diseños sQRD con frecuencias de diseño de 400 o 500 Hz es posible maximizar el efecto de difusión en la banda de frecuencia de aproximadamente los 1000 Hz.

Los resultados obtenidos indican que estas estructuras con órdenes $N = 11$ y $N = 17$ permiten un control sobre el campo sonoro reflejado que ocurre entre las barreras, rompiendo los frentes originales de onda en numerosas ondas con amplitudes inferiores. El decaimiento de la energía dentro del espacio delimitado por las barreras también ha sido analizado observando una diferencia positiva con respecto a las tradicionales barreras planas. Sin embargo, la característica más importante evidenciada por los resultados presentados es la capacidad de establecer un campo más difuso entre las barreras, disminuyendo las amplitudes máximas del campo reflejado de una forma notable.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, del Gobierno de Extremadura, Consejería de Economía, Comercio e Innovación (GR10175) y el Fondo Social Europeo y fondos FEDER. Este trabajo fue también apoyado por fondos nacionales de Portugal a través de la FCT ("Fundação para a Ciência e a Tecnologia", Portugal), bajo el proyecto de investigación PTDC / ECMCOM / 1438/2012 y fondos FEDER a través del "Programa Operacional Factores de Competitividade" - COMPETE.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Monzón, M.J. Guerrero, Valuation of social and health effects of transport-related air pollution in Madrid (Spain), *Science of the Total Environment*, 334-335 (2004) 427-434.
- [2] B. Berglund, T. Lindvall, D.H. Schwela, Guidelines for community noise, in, World Health Organization, Geneva, 1999.
- [3] A. Fyhri, G.M. Aasvang, Noise, sleep and poor health: Modeling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems, *Science of the Total Environment*, 408 (2010) 4935-4942.
- [4] C. Marquis-Favre, E. Premat, D. Aubrée, M. Vallett, Noise and its effects - A review on qualitative aspects of sound. Part I: Notions and acoustic ratings, *Acta Acustica united with Acustica*, 91 (2005) 613-625.
- [5] G. Mohammadi, An investigation of community response to urban traffic noise, *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 6 (2009) 137-142.
- [6] E. Öhrström, Longitudinal surveys on effects of changes in road traffic noise - Annoyance, activity disturbances, and psycho-social well-being, *Journal of the Acoustical Society of America*, 115 (2004) 719-729.
- [7] M. Martins, L. Godinho, L. Picado-Santos, Numerical evaluation of sound attenuation provided by periodic structures, *Archives of Acoustics*, 38 (2013) 503-516.
- [8] T.M. Barry, J.A. Reagan, FHWA highway traffic noise: prediction model. Report FHWA-PD-77-108 and FHWA-PD-96-010, Federal Highway Administration, Washington DC, (1978).
- [9] I.L. Vér, L.L. Beranek, *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications: Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [10] C.E. Hanson, Federal Transit Administration's noise and vibration guidance manual - Updated after 10 years of experience, in, Minneapolis, MN, 2005, pp. 1334-1339.
- [11] Y.W. Lam, Using Maekawa's chart to calculate finite length barrier insertion loss, *Applied Acoustics*, 42 (1994) 29-40.
- [12] A. Muradali, K.R. Fyfe, A study of 2D and 3D barrier insertion loss using improved diffraction-based methods, *Applied Acoustics*, 53 (1998) 49-75.
- [13] T. Terai, On calculation of sound fields around three dimensional objects by integral equation methods, *Journal of Sound and Vibration*, 69 (1980) 71-100.
- [14] M.R. Monazzam, Y.W. Lam, Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers, *Applied Acoustics*, 66 (2005) 709-730.
- [15] M.R. Monazzam, Y.W. Lam, Performance of T-shape barriers with top surface covered with absorptive quadratic residue diffusers, *Applied Acoustics*, 69 (2008) 93-109.
- [16] D. Duhamel, Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier, *Journal of Sound and Vibration*, 197 (1996) 547-571.
- [17] D. Duhamel, P. Sergent, Sound propagation over noise barriers with absorbing ground, *Journal of Sound and Vibration*, 218 (1998) 799-823.
- [18] O. von Estorff, M. Firuziaan, Coupled BEM/FEM approach for nonlinear soil/structure interaction, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 24 (2000) 715-725.
- [19] L. Godinho, J. António, A. Tadeu, 3D sound scattering by rigid barriers in the vicinity of tall buildings, *Applied Acoustics*, 62 (2001) 1229-1248.
- [20] A.J.B. Tadeu, L.M.C. Godinho, Three-dimensional wave scattering by a fixed cylindrical inclusion submerged in a fluid medium, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 23 (1999) 745-755.