

## **ATENUACIÓN ACÚSTICA EN HORMIGÓN CON PERLAS DE POLIURETANO EXPANDIDO**

REFERENCIA PACS: 43.50.Rq

Colorado Aranguren, David; Abad Toribio, Laura; Couceiro Martínez, Luis; García Martín, Tomás; Magro Andrade, Rafael; Serrano Pérez, Marta

Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio (UAX). Avda. de la Universidad 1. 28691 Villanueva de la Cañada, Madrid. Spain. Teléfono: 918105012. Fax:918109101. Email: [dcoloara@uax.es](mailto:dcoloara@uax.es); [labad@uax.es](mailto:labad@uax.es)

### **ABSTRACT**

The use of acoustic screens has greatly increased for the last decades. As concrete is the most used material in screens fabrication, the better knowledge of its acoustic properties can aid to design more efficient barriers. Using porexpan pearls as an additive included in the concrete, the acoustic insulation of the screen can be improved. At UAX laboratories, an experimental system has been built in order to verify it with scaled models.

### **RESUMEN**

La utilización de pantallas acústicas se ha generalizado durante las últimas décadas, siendo el hormigón el material más utilizado en su fabricación. El conocimiento del funcionamiento acústico del hormigón puede ayudar a diseñar pantallas acústicas más eficientes. La inclusión de perlas de poliuretano expandido en la dosificación del hormigón puede aumentar la atenuación acústica de la pantalla. En la UAX, se ha diseñado un sistema experimental que permite su comprobación mediante ensayos a escala.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El objetivo principal de este proyecto de investigación es modelizar el comportamiento acústico del hormigón, [1], utilizado en pantallas acústicas, en función de tres parámetros: espesor de pantalla, densidad del material y frecuencia de ruido. En la UAX se han fabricado pantallas de hormigón a escala de diversos espesores y densidades con objeto de analizar la variación de la atenuación producida.

La densidad del hormigón se ha ido variando mediante la inclusión de una cantidad variable de perlas de poliuretano expandido (en adelante porexpan), hasta obtener una reducción del 30%.

De esta manera, pantallas de distintos espesores y densidades han sido caracterizadas acústicamente mediante su colocación frente a una fuente de sonido de frecuencia controlada, [2], [3]. Por diferencia de las lecturas de dos sonómetros colocados en la parte anterior y posterior de la pantalla, se obtiene la atenuación producida.

## 2. SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental diseñado, [4], cuenta con dos partes principales: la caja anecoica y las placas de hormigón.

La caja anecoica es una caja de madera de ocumen de dimensiones totales 50x70x52 cm (medidas exteriores), desprovista de una cara lateral y tapa. En el hueco de esa cara lateral se encajan las pantallas de hormigón. En su interior a una altura de 20 cm, se sitúa uno de los sonómetros. Las placas de hormigón, un total de 12, tienen una dimensiones de 45,5x47,5 cm, un espesor variable de 2 y 3 cm y se han fabricado con 6 densidades distintas



Figura nº1: caja anecoica (izquierda), pantallas de hormigón a escala (centro), colocación pantalla-caja anecoica frente a fuente de ruido (derecha)

## 3. METODOLOGÍA DE ENSAYO

El sistema experimental lleva acoplado un dispositivo electroacústico que permite emitir un sonido de frecuencia controlada. El espectro de frecuencias analizado barre desde los 250 Hz hasta los 3000 Hz, intentando reproducir de esta manera el espectro de ruido del tráfico rodado y ferroviario, [5]. La secuencia de ensayos realizada se muestra en la tabla 1

TABLA 1:SECUENCIA DE ENSAYOS			
VARIACIÓN DE ESPESORES Y DENSIDADES			
Nº Ensayo	Nº de Placas	Espesor de pantalla	Densidad (kg/m3)
01	1	2 cm	2040
02	2	3 cm	2040
03	1+2	Espesor 5cm =2+3 cm	2040
04	3	2 cm	1650
05	4	3 cm	1650
06	3+4	Espesor 5cm =2+3 cm	1650
07	5	2 cm	1512
08	6	3 cm	1512
09	5+6	Espesor 5cm =2+3 cm	1512
10	7	2 cm	1720
11	8	3 cm	1720
12	7+8	Espesor 5cm =2+3 cm	1720
13	9	2 cm	1808
14	10	3 cm	1808
15	9+10	Espesor 5cm =2+3 cm	1808
16	11	2 cm	1340
17	12	3 cm	1340
18	11+12	Espesor 5cm =2+3 cm	1340

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante la fase de experimentación en laboratorio se han analizado un total de 108 configuraciones de pantalla (espesor-densidad-frecuencia). Cada una de ellas se ha ensayado 12 veces, con objeto de determinar un valor medio estadístico de cada medida. De esta manera, el cómputo total de ensayos realizados asciende a 1296.

En las siguientes gráficas se resumen los resultados obtenidos de los ensayos, en función de los distintos espesores, densidades y frecuencias. La relación de la atenuación acústica con el espesor de la pantalla es clara. La figura 2 representa las relaciones espesor-frecuencia-atenuación para cada densidad.

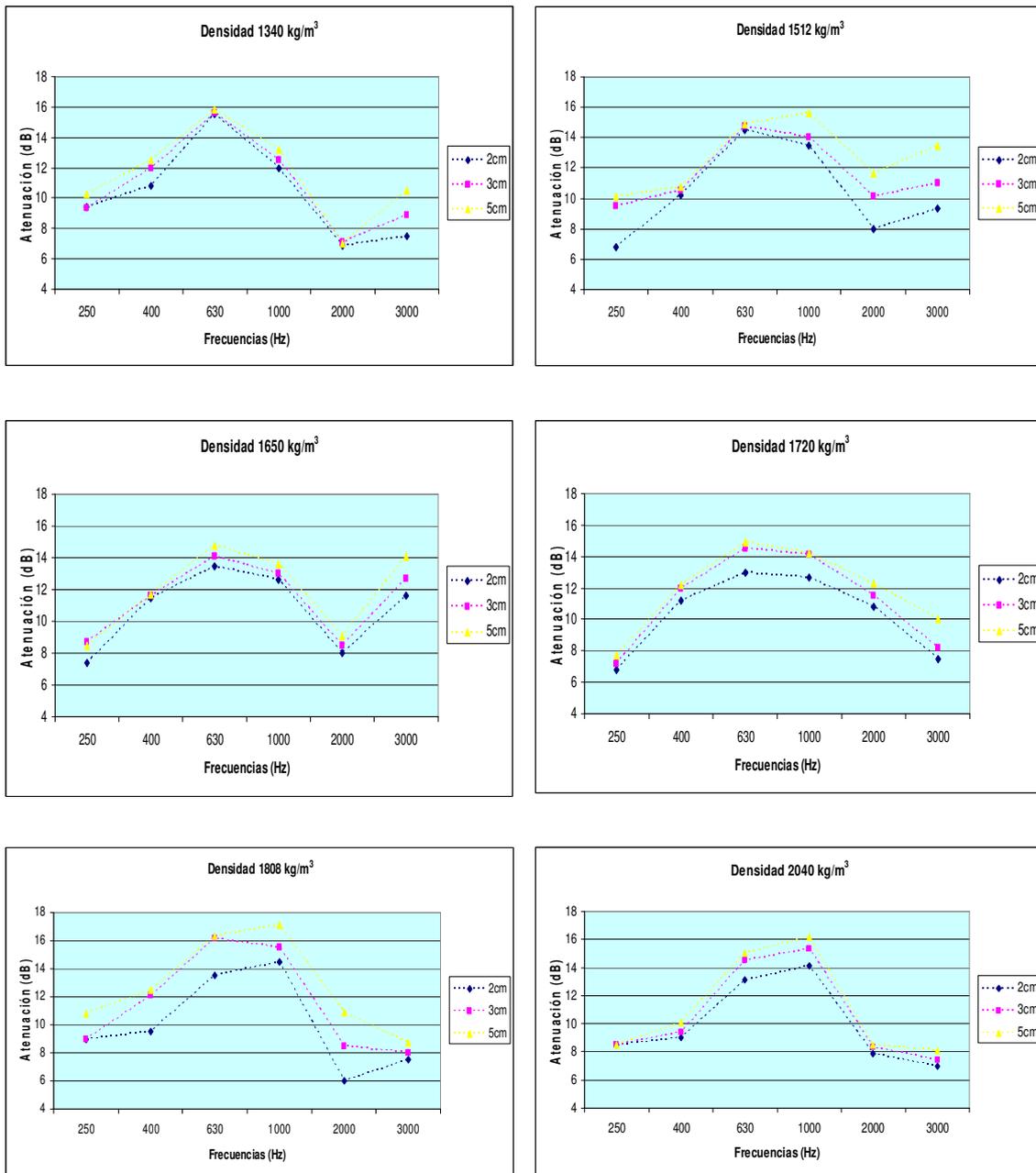


Figura nº2: resumen de resultados obtenidos de los ensayos

Analizando las gráficas, la relación entre densidad-frecuencia y atenuación para cada espesor indica que para una densidad de 1808 kg/m<sup>3</sup> se obtiene un óptimo de funcionamiento acústico. Para una reducción de densidad del 10% (densidad de 1808 kg/m<sup>3</sup>) se mejora el comportamiento acústico alrededor de un 5%, pero sin embargo para una reducción de densidad del 15% (densidad de 1720 kg/m<sup>3</sup>) la atenuación es menor.

Fijando una de las tres variables se puede obtener una representación tridimensional de los resultados. La superficie de respuesta que representa la atenuación acústica viene definida por las coordenadas horizontales frecuencia y densidad y la vertical atenuación. En la figura 3 se representa la malla correspondiente al espesor de 3 cm, siendo las correspondientes a los espesores de 2 y 5 cm sensiblemente paralelas a esta:

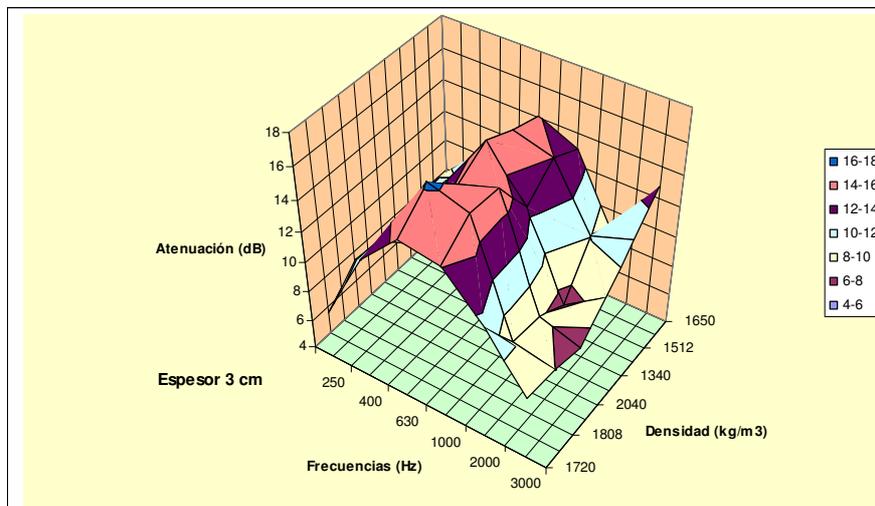


Figura nº3: representación tridimensional de la relación atenuación, frecuencia, densidad para un espesor de pantalla de 3 cm

A la vista de los resultados obtenidos y con objeto de completar un modelo global que nos relacione los cuatro parámetros de estudio, se ha realizado un estudio estadístico espacial, [6]. Utilizando el método de los mínimos cuadrados, se ha realizado una regresión múltiple. En las ecuaciones que aparecen en adelante, A representa la atenuación en dB, E el espesor en cm, D la densidad en g/cm<sup>3</sup> y F la frecuencia en kHz.

La regresión múltiple es consistente con un polinomio de grado 4 y da como resultado la siguiente ecuación:

$$A = -1144,35 + 2757,32D + 46,20F + 0,42ED + 0,76EF + 0,66DF - 0,37EDF - 2481,19D^2 - 48,73F^2 + 0,02E^3 + 986,43D^3 + 18,26F^3 - 0,01E^4 - 146,26D^4 - 2,31F^4 \quad (1)$$

Esta ecuación presenta una correlación bastante aceptable siendo su coeficiente de r=0,80. Si particularizamos el ajuste con la ecuación de polinomio de 4º grado para los distintos espesores de 2 cm, 3 cm y 5 cm, obtenemos las siguientes expresiones:

$$A = -1144,35 + 2758,16D + 47,72F - 0,08DF - 2481,19D^2 - 48,73F^2 + 986,43D^3 + 18,26F^3 - 146,26D^4 - 2,31F^4 \quad (2)$$

$$A = -1144,62 + 2758,58D + 48,48F - 0,45DF - 2481,19D^2 - 48,73F^2 + 986,43D^3 + 18,26F^3 - 146,26D^4 - 2,31F^4 \quad (3)$$

$$A = -1148,10 + 2759,42D + 50,00F - 1,19DF - 2481,19D^2 - 48,73F^2 + 986,43D^3 + 18,26F^3 - 146,26D^4 - 2,31F^4 \quad (4)$$

Como se puede observar las tres ecuaciones tienen una apariencia muy similar siendo los coeficientes muy parecidos.

Las ecuaciones anteriores se han representado utilizando el programa SURFER, que permite representar las superficies atenuación-frecuencia-densidad. A continuación se muestran la superficie para el espesor intermedio:

Esesor 3cm. Aproximación con polinomio de 4º grado

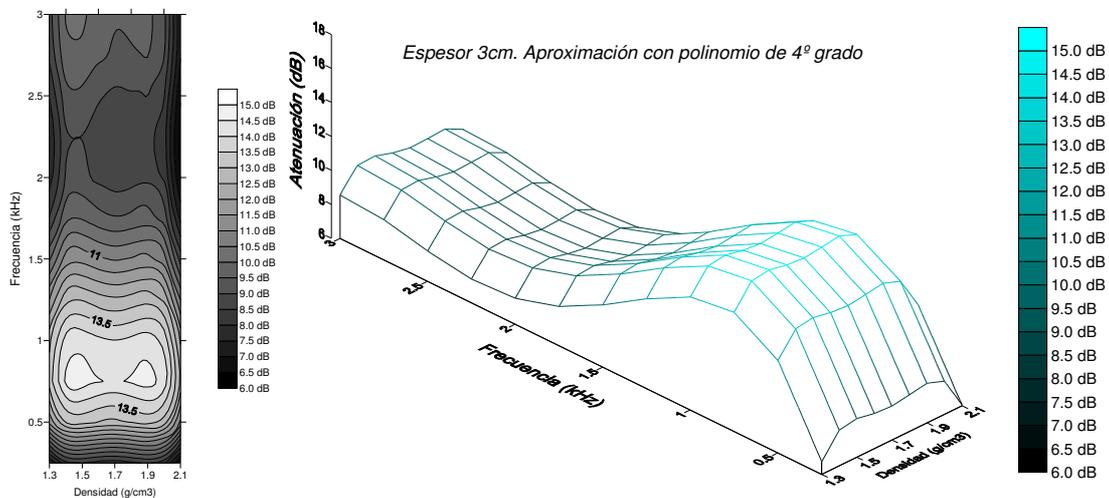


Figura nº4: representación con SURFER de la superficie atenuación-frecuencia-densidad para un espesor de pantalla de 3 cm. Figura de la izquierda: curvas de nivel. Figura de la derecha: wireframe

Si derivamos la función atenuación respecto del parámetro densidad, podremos obtener una densidad óptima para cada densidad.

Como las funciones de atenuación son similares para los tres espesores estudiados, analizaremos la del espesor medio, es decir de 3cm. Su derivada respecto al parámetro densidad  $D$ , es la siguiente:

$$\frac{\partial A}{\partial D} = 2758,58 - 0,45F - 4962,38D + 2959,29D^2 - 585,04D^3 \quad (5)$$

Igualando esta expresión a cero y particularizando para cada frecuencia, se obtienen los máximos y mínimos de la función atenuación. Analizando el signo de la segunda derivada determinamos si se trata de un máximo o un mínimo. Los valores de densidad  $D$  que maximizan la atenuación son los valores óptimos de diseño de la pantalla para cada tipo de ruido.

Para la frecuencia  $F=0.25$  kHz:

$$2758,47 - 4962,38D + 2959,29D^2 - 585,04D^3 = 0 \quad (6)$$

$$D_1=1,904 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

$$D_2=1,683 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} > 0 \quad \text{Mínimo}$$

$$D_3=1,472 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

Para la frecuencia F=0.4 kHz:

$$2758,40 - 4962,38D + 2959,29D^2 - 585,04D^3 = 0 \quad (7)$$

$$D_1=1,902 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

$$D_2=1,685 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} > 0 \quad \text{Mínimo}$$

$$D_3=1,470 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

Para la frecuencia F=0.63 kHz:

$$2758,29 - 4962,38D + 2959,29D^2 - 585,04D^3 = 0 \quad (8)$$

$$D_1=1,900 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

$$D_2=1,689 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} > 0 \quad \text{Mínimo}$$

$$D_3=1,469 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

Para la frecuencia F=1.0 kHz:

$$2758,13 - 4962,38D + 2959,29D^2 - 585,04D^3 = 0 \quad (9)$$

$$D_1=1,897 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

$$D_2=1,695 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} > 0 \quad \text{Mínimo}$$

$$D_3=1,467 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

Para la frecuencia F=2.0 kHz:

$$2757,68 - 4962,38D + 2959,29D^2 - 585,04D^3 = 0 \quad (10)$$

$$D_1=1,888 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

$$D_2=1,712 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} > 0 \quad \text{Mínimo}$$

$$D_3=1,458 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

Para la frecuencia  $F=3.0$  kHz:

$$2757,23 - 4962,38D + 2959,29D^2 - 585,04D^3 = 0 \quad (11)$$

$$D_1=1,877 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

$$D_2=1,730 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} > 0 \quad \text{Mínimo}$$

$$D_3=1,452 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial D^2} < 0 \quad \text{Máximo}$$

Los máximos correspondientes al valor  $D_1$  permiten obtener atenuaciones mayores a los correspondientes al valor  $D_3$ , si bien estos últimos se obtienen para pantallas muy ligeras, siendo su atenuación nada desdeñable.

## 5. CONCLUSIONES

El análisis realizado apoya la hipótesis de que la utilización de una pequeña cantidad de perlas de porexpan como árido en la dosificación del hormigón, puede mejorar ligeramente la atenuación acústica producida por la pantalla.

Para cada frecuencia de ruido existe una densidad óptima que garantiza un mejor comportamiento acústico, si bien, el intervalo de estas densidades varía poco y está centrado en  $1900 \text{ kg/m}^3$  aproximadamente. La aparición del máximo  $D_3$ , deja abierta la posibilidad de que pudieran existir otras configuraciones óptimas fuera del rango de estudio. Además, la densidad óptima disminuye al aumentar la frecuencia del sonido, por lo que para frecuencias superiores a 3 kHz, el modelo predice que pantallas más ligeras tendrían un comportamiento mejor. Pantallas más ligeras podrían dar buenos resultados, si bien verían comprometida su resistencia estructural. El factor espesor tiene una influencia menor de lo esperado en la atenuación, por lo que los resultados obtenidos para los espesores 2,3 y 5 cm no han diferido sustancialmente.

La utilización de porexpan en el hormigón de las pantallas puede resultar también bueno a nivel constructivo, ya que las pantallas son más ligeras, y a nivel medioambiental, ya que el porexpan puede provenir de plantas de tratamiento de RSU o RCD.

## 6. REFERENCIAS

[1] Bello-Morales, Antonio, "El hormigón como material básico para pantallas antirruído" Revista Cemento Hormigón, Año LXI, Mayo 1990, nº 680, pp 525-537

[2] May D. N., Osman M.M. (1980): *“High way noise barriers; new shapes”*, Journ. of Sound and Vibration, vol 71, pp. 73-101,

[3] Narayanan Neithalath, Adam Marolf, Jason Weiss and Jan Olek (2005): *“Modeling the Influence of Pore Structure on the Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrete”* Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 3 No. 1, 29-40.

[4] L.Abad , R.Magro, M. de la O. Moreno, M.Serrano, *“Diseño de una maqueta para medidas de atenuación de ruido en tráfico rodado”*, Tecnologi@ y desarrollo/Medioambiente y Desarrollo. ISSN 1696-8085. 2010.

[5] Dámaso Alegre (2008): *“Medidas correctoras de impacto acústico en infraestructuras (II/II) Pantallas acústicas y otros dispositivos reductores de ruido para carreteras y ferrocarriles”*, Anales de mecánica y electricidad

[6] J.Puy Huarte: *“Calculo numérico”* Universidad Politécnica de Madrid, 1981. ISBN 84-7493-043-X.