

MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE EN PANTALLA CON PERFIL SEMICIRCULAR

PACS: 43.50.Gf.

Abad Toribio, Laura ¹, Colorado Aranguren, David ¹, García Martín, Tomás ¹, Retana Maqueda, M^a Jesús ¹, Serrano Pérez, Marta ¹, Magro Andrade, Rafael ².

(1) Física Aplicada e Ingeniería Ambiental, Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.

Avda de la Universidad s/n, 28690, Villanueva de la Cañada, Madrid

Tel: 918 105 207

Fax: 918 109 101

E-mail: labad@uax.es

(2) ASIMAG, Consultora de Formación, Grupo de Ingeniería Acústica, C/Alicante 4, 28045, Madrid

Tel: 689 102 679

Fax: 914 730 190

E-mail r.magro@asimag.net

ABSTRACT

It has been demonstrated that semicircular border screens are the most effective in reduction of traffic noise frequencies- Because semicircular border screens are not the most extended solution, they were measured using a scale model with both variable height (ground level, medium height, and on the top), and emission frequency (between 63 and 5000 Hz). Multiple regression model allows us to obtain the attenuation function for this profile and to show which of the two variables (height or frequency) is the most influential.

RESUMEN

De todos los posibles perfiles de pantalla, las cubreras semicirculares, todavía poco utilizadas en las carreteras, han demostrado ser muy eficientes acústicamente en el rango de frecuencias correspondientes al ruido de tráfico. La atenuación acústica en una pantalla con cubrera semicircular se ha medido en maqueta variando la altura de medición (nivel del suelo, media altura, y sobre la cubrera), y la frecuencia de emisión (entre 63 y 5000 Hz). El modelo de regresión múltiple nos permite obtener la función atenuación para este perfil y ver cuál de las dos variables (altura o frecuencia) es la más influyente.

1. INTRODUCCIÓN

Ciertos perfiles superiores colocados a modo de cubreras en las pantallas acústicas provocan una atenuación del efecto que producen las ondas de sonido ya que aumentan el número de difracciones que sufren las ondas. Así, al colocar algún tipo de perfil se puede lograr la misma efectividad en la reducción de los dB(A) con una pantalla de menor altura que la que necesitaríamos si no agregásemos ese perfil [1]. Los primeros ensayos donde la sección transversal de la coronación de la pantalla tenía diferentes geometrías fueron realizados por May y Osman, [2], en la década de los 80. Realizaron una serie de modelos que incluían pantallas con secciones rectas de diferentes espesores, pantallas con cubreras terminadas

en T y cuyo tramo superior presentaba distintas dimensiones, y pantallas terminadas en Y vertical o invertida. En la Escuela Politécnica de la Universidad Alfonso X el Sabio se han diseñado y fabricado una serie de cumbres para pantallas a escala, de diversa sección transversal con el objeto de analizar la variación de la atenuación producida. De esta manera, pantallas de distintos perfiles (circular, semicircular, en uve, en ele, triangular, cuarto de círculo, y escalonada) han sido caracterizadas acústicamente mediante su colocación frente a una fuente de sonido de frecuencia controlada, [3], [4]. Por diferencia de las lecturas de dos sonómetros colocados en la parte anterior y posterior de la pantalla, se ha obtenido la atenuación producida. Estudios energéticos nos han permitido concluir que el perfil de sección semicircular es el más eficiente acústicamente. El objetivo principal del presente trabajo consiste en la modelización del comportamiento acústico de una pantalla con cumbrera semicircular, en función de los parámetros altura de medición y frecuencia de emisión de ruido.

2. SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental diseñado, cuenta con dos partes principales: la caja anecoica y un equipo electroacústico. Este sistema experimental ya ha sido descrito en la referencia [3]. Se ha fabricado a escala una caja anecoica de manera que una de sus paredes es doble, de 44 cm de altura y actúa como barrera acústica. Sus dimensiones totales son 50 x 50 x 52 (cm) (largo, ancho, alto una vez añadida la cumbrera de 8 cm de altura). El esquema del sistema experimental se muestra en la Figura 1.

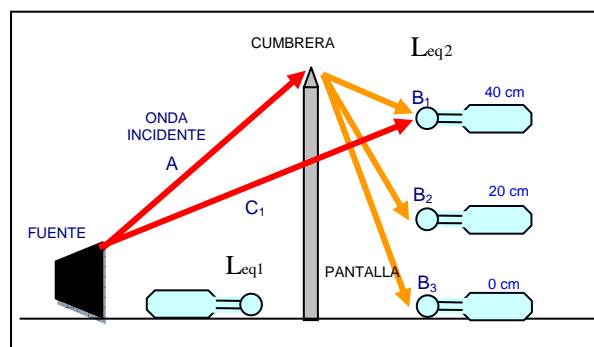


Figura 1: Sistema experimental

3. METODOLOGÍA DE ENSAYO

El dispositivo electroacústico permite emitir un sonido de frecuencia controlada. El espectro de frecuencias analizado barre desde los 63 Hz hasta los 5000 Hz, (63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000) intentando reproducir de esta manera el espectro de ruido del tráfico rodado y ferroviario, [5]. El altavoz del dispositivo electroacústico se coloca delante de la pared, que es la que está actuando como pantalla acústica. El primero de los sonómetros se ha colocado entre el foco emisor de ruido y la pantalla. La altura de ubicación de este sonómetro se mantiene siempre a nivel del suelo (0 cm). El segundo de ellos, se sitúa en el interior de la caja acústica, justo detrás de la barrera acústica y puede hacer los registros a distintas alturas (0, 20 y 40 cm), alturas que se corresponden con el pie, media altura y la coronación de la pantalla. La diferencia entre las lecturas de los dos sonómetros (L_{eq}) nos indica la atenuación producida por la pantalla para cada frecuencia emitida por el altavoz.

$$\text{Atenuación} = L_{eq1} - L_{eq2} \quad (1)$$

Durante la fase de experimentación en laboratorio se han analizado un total de siete configuraciones de pantalla (altura-cumbrera-frecuencia). Cada una de ellas se ha ensayado 6 veces, con objeto de determinar un valor medio estadístico de cada medida. De esta manera, el cómputo total de ensayos realizados asciende a 1.512 ensayos. 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 dada por las coordenadas horizontales definidas por la frecuencia de emisión y altura del receptor y la coordenada vertical en la que se representa la atenuación. La comparación entre algunas de las superficies de respuesta se muestra en la Figura 2, donde pueden apreciarse, para tres de los siete perfiles estudiados, la atenuación (en dB) en función de la frecuencia (Hz) y la altura de posición del sonómetro receptor (cm). El código de colores varía desde el blanco (mínima atenuación) hasta el negro (valores máximos de atenuación).

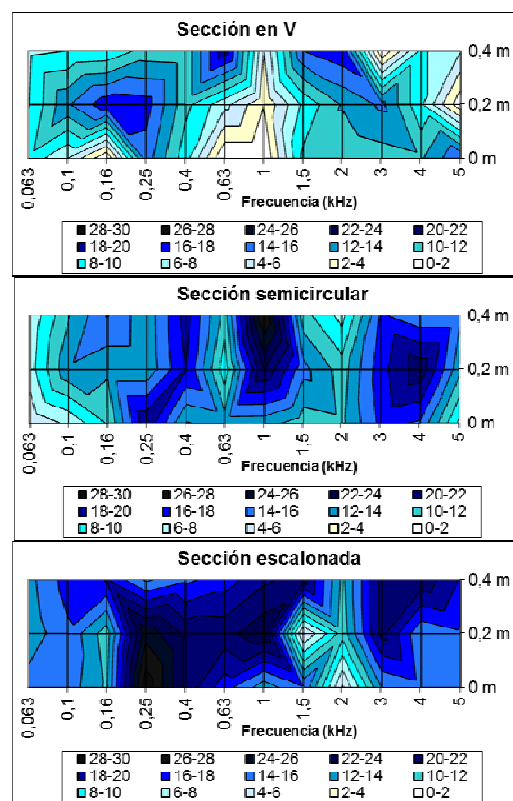


Figura 2: Comparación de la atenuación acústica (en dB) entre perfiles de cumbrera de diferentes secciones. Las secciones en V y escalonada presentan globalmente unos valores de atenuación acústica inferiores al perfil de sección semicircular. La atenuación para el perfil en V es claramente inferior a la obtenida con los otros perfiles, mientras que el perfil de sección escalonada funciona peor a frecuencias superiores o iguales a 1kHz, en comparación con el perfil de sección semicircular.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Analizando las gráficas globalmente, la relación entre los parámetros altura-frecuencia y atenuación para cada perfil indica que se obtiene un funcionamiento acústico óptimo para las pantallas de sección rectangular, escalonada, triangular y semicircular. En base a esto, hemos creído conveniente realizar un estudio con los incrementos energéticos que cada tipo de borde de pantalla ha generado, analizando la energía inicial emitida y la que llega al sonómetro receptor una vez implantado el perfil superior de la pantalla. Aunque los perfiles superiores empleados en el estudio no son los mismos, la pantalla sí lo es. Por lo tanto, a efectos comparativos la energía absorbida por la barrera es la misma en todos los casos, con lo que los distintos niveles de atenuación registrados en la zona de sombra del trasdós de la pantalla

deben estar provocados por la difracción que se produce en el borde superior de la misma. Debido a que las condiciones de ensayo son las mismas para todos los perfiles (misma frecuencia de emisión, misma distancia fuente-barrera y barrera-receptor), podemos calcular la atenuación energética media registrada para cada perfil evaluando así que tipo de borde es el que mejor rendimiento energético para cada una de las frecuencias estudiadas. Para determinar la energía se ha empleado la siguiente expresión:

$$W = 4\pi r^2 \frac{P}{\rho c} \quad (2)$$

siendo ρc la impedancia característica del sistema, P el valor eficaz de la presión sonora y r la distancia de la fuente sonora a la coronación de la pantalla (indicada como A en la Figura 1). Teniendo esto en cuenta, podemos calcular la energía emitida, la distancia desde la coronación de la pantalla al sonómetro receptor, y la energía transmitida a través de la pantalla (indicada como B_1 en la misma Figura si se mide sobre la cumbre, B_2 si se mide a media altura y B_3 si se mide a pie de pantalla). Los valores de la presión sonora se han calculado a partir de las lecturas de L_{eq} de los sonómetros. La variación energética en % (denominada eficiencia) la hemos calculado mediante la expresión:

$$Eficiencia(\%) = \frac{|W_{emitida} - W_{transmitida}|}{W_{emitida}} \quad (3)$$

En la Figura 3 se muestra el Espectro de intensidades (W/m^2), en coeficientes por octavas, para valorar la distribución de la potencia en frecuencias de diferentes fuentes de ruido normalizado. Teniendo en cuenta esta Figura puede observarse cómo la intensidad del ruido de tráfico presenta un máximo para 1000 Hz. Aunque la Figura 3 no recoge los datos correspondientes a tráfico ferroviario, la intensidad del ruido de ferrocarril tiene también un máximo a esta frecuencia. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestra la eficiencia energética (en %) para la pantalla de perfil triangular y la pantalla de perfil semicircular.

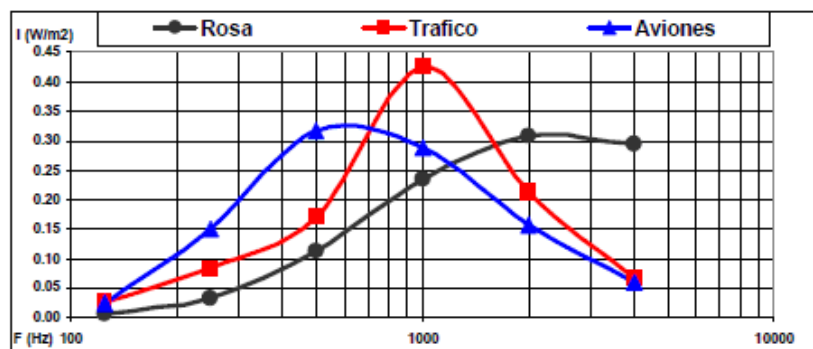


Figura 3: Espectro de intensidades para diversas fuentes de ruido. Fuente: Código Técnico de la Edificación, Anejo 1.

A la frecuencia de 1000 Hz (que corresponde a la intensidad máxima del tráfico rodado y de ferrocarril) la valoración energética porcentual (98,7 %) es para el perfil semicircular mayor que para otras frecuencias. También resulta superior al obtenido para la pantalla con borde de sección triangular a esta misma frecuencia, y ligeramente superior al de la pantalla con borde de sección rectangular y al de la escalonada, también a esta misma frecuencia. Los demás perfiles presentan eficiencia acústica (energética) inferior para esta frecuencia. Este perfil sería el que mejor atenuaría el ruido del tráfico rodado y de ferrocarril. Por ejemplo a una frecuencia de emisión de 1000 Hz, la eficiencia acústica de la pantalla con perfil de borde en sección rectangular sería del orden del 97%. Sin embargo para esta misma pantalla existen otras frecuencias (4000 Hz, 400 Hz y 250 Hz) para las que la valoración energética es superior que a

1000 Hz (del orden del 99%). No obstante para estas últimas frecuencias, la intensidad del ruido de tráfico resulta más baja. El resto de los perfiles (en V, en L, en cuarto de círculo), presentan una eficiencia acústica baja.

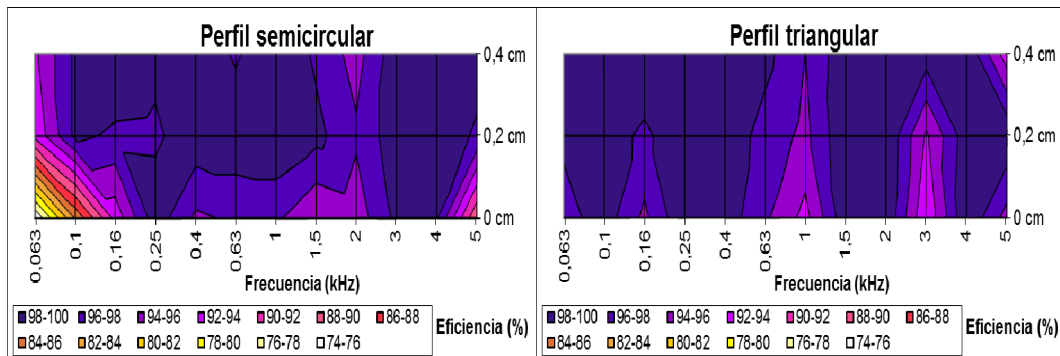


Figura 4: Comparación de la eficiencia acústica energética (en %) para el perfil semicircular (izquierda) y triangular (derecha), en función de la frecuencia de emisión y la altura de la pantalla. En el entorno de 1 kHz el perfil semicircular es notablemente más eficiente.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que para la frecuencia en torno a 1000 Hz es la pantalla con cumbrera semicircular la más eficiente acústicamente. Para este tipo de pantalla, se ha realizado un estudio estadístico espacial, [6]. Utilizando el método de los mínimos cuadrados, se ha realizado una regresión múltiple. Para poder aplicar este método las variables altura y frecuencia deben ser linealmente independientes entre sí. En la Figura 2 se observaba también dicha no linealidad. En las ecuaciones que aparecen en adelante, A representa la atenuación en dB, H la altura en cm, y F la frecuencia en kHz.

El modelo es claramente no lineal, ni en la frecuencia ni en la altura. Debido a la complejidad que presenta la función atenuación hemos utilizado la regresión “stepwise”, traducida habitualmente como regresión por pasos. Sucesivos ajustes nos llevan a introducir incluso términos cruzados en la ecuación. La regresión múltiple es consistente con un polinomio de grado 11 y da como resultado la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 A = & 12,14 + 389,07F + 2602,62F^2 + 9027,37F^3 + \\
 & + 16165,45F^4 + 12944,85F^5 + 20,21H + 30,09H^2 + 7631,73F^7 + 5656,63F^8 \\
 & - 1863,91F^9 + 294,97F^{10} + H^2F^5 + 0,09H^2F^6 + 2,62H^2F^4 + 18,12F^{11}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

El análisis de regresión para este modelo nos arroja un coeficiente de correlación múltiple de $r=0,86$, y un coeficiente de determinación $r^2=0,73$. Los términos más influyentes del modelo se han calculado mediante el diagrama de Pareto (ver Figura 5). Así el 80% del modelo de atenuación (indicado por la línea verde a trazos) se explica mediante los términos F^4 , F^5 y F^3 , y el 90% (indicado por la línea morada a trazos) mediante los términos F^4 , F^5 y F^3 y F^7 . La dependencia con la altura aparece en la ecuación (4) mediante términos lineales, cuadráticos y cruzados cuadráticos. De la gráfica se observa que su influencia es mucho menor. Por tanto el parámetro más influyente en la atenuación acústica es la frecuencia de emisión.

La representación de esta ecuación nos permite comparar los resultados teóricos obtenidos con este modelo de regresión con los resultados experimentales (ver Figura 6). Se observa en general una gran similitud entre los valores experimentales y los teóricos. El residuo medio es del orden del 15 %.

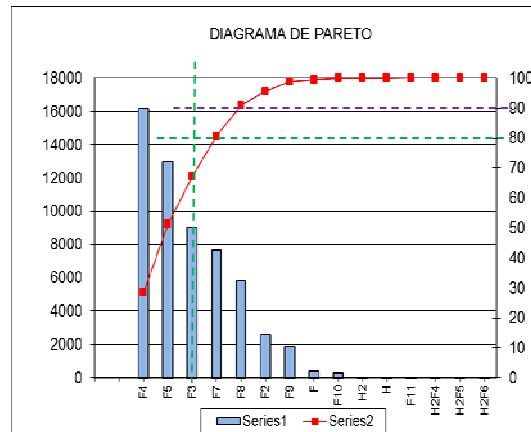


Figura 5: Diagrama de Pareto para el modelo de regresión. La serie 1 corresponde a los coeficientes de los parámetros en que se basa el modelo. La serie 2 indica su influencia en %. Cuanto más se aleje la serie 1 de la serie 2 será menor la influencia del parámetro.

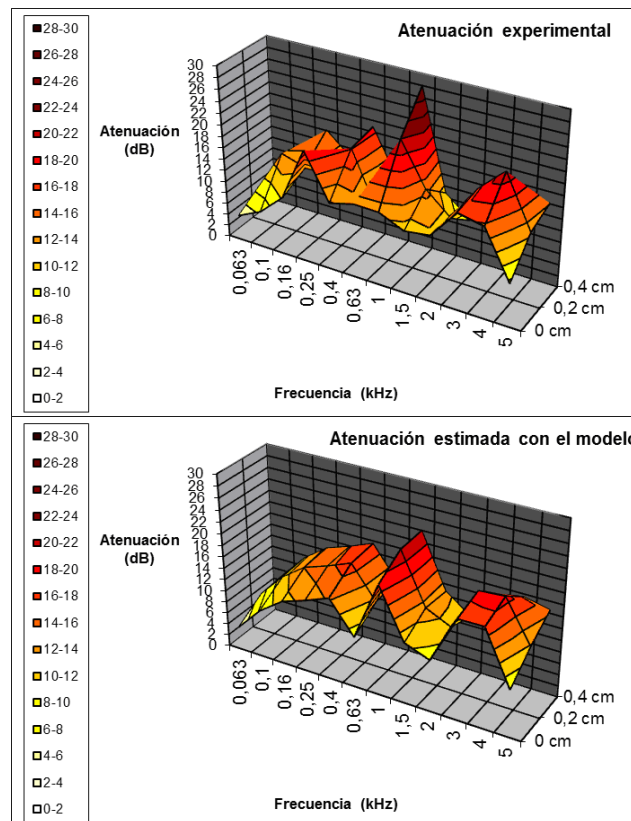


Figura 6: Comparación entre la atenuación acústica experimental (superior) y la obtenida con el modelo de regresión (inferior) para la pantalla de perfil semicircular.

Para analizar las soluciones de la ecuación, se puede recurrir al cálculo numérico, resolviendo la ecuación (4) mediante el método de Newton iterativo con una solución de prueba a modo de semilla, de forma que en cada paso se va teniendo a la convergencia, siendo el paso genérico:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (5)$$

El intervalo de frecuencias para el que se ha obtenido una mayor eficiencia es el comprendido entre 0,25 kHz y 4 kHz (ver Figura 4). A frecuencias más bajas (entre 0,063 y 0,25 kHz) la pantalla no funciona de forma correcta, si bien globalmente el perfil semicircular ha demostrado ser el más idóneo. Para estas frecuencias podemos calcular qué altura debería tener la pantalla con este tipo de cumbre para lograr la atenuación de estas frecuencias. Para ello, en la ecuación (4), a frecuencia fija, buscamos qué soluciones para la altura verifican que la función atenuación es máxima, es decir $\frac{\partial^2 A}{\partial H^2} < 0$. Los resultados se muestran en la Tabla I.

Tabla I:

| Frecuencia (kHz) | Solución H(m) | $\frac{\partial^2 A}{\partial F^2}$ |
|------------------|---------------|-------------------------------------|
| 0,063 | 0,334 | <0 Máximo |
| 0,1 | 0,336 | <0 Máximo |
| 0,16 | 0,336 | <0 Máximo |

Todas las soluciones quedan dentro del intervalo ensayado.

Como ya hemos comentado (ver Figura 6), la altura influye mucho menos en la atenuación que la frecuencia del ruido, especialmente a bajas frecuencias. A medida que la frecuencia aumenta su influencia va siendo cada vez más notable. Particularizando para una altura de 0,4 m, lo que correspondería a la máxima altura de la pantalla utilizada en los ensayos, la ecuación (4) nos queda en la forma:

$$\begin{aligned}
 A = & 8,88 + 389,07F + 2602,61F^2 + 9027,37F^3 + \\
 & + 16165,77F^4 + 12944,00F^5 + 0,0038F^6 + 7631,73F^7 + 5656,63F^8 \\
 & - 1863,91F^9 + 294,97F^{10} + 18,12F^{11}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Las soluciones pueden corresponder a máximos y mínimos de la función atenuación acústica, que se calculan a partir del signo de la segunda derivada de esta función. En el intervalo de frecuencias estudiadas en los ensayos, hemos encontrado una serie de soluciones, son las que se muestran en la Tabla II.

Tabla II: H=0,4 m

| Solución Frecuencia (kHz) | $\frac{\partial^2 A}{\partial F^2}$ |
|---------------------------|-------------------------------------|
| 0,418 | <0 Máximo |
| 0,786 | >0 Mínimo |
| 1,286 | <0 Máximo |
| 1,821 | >0 Mínimo |
| 2,713 | <0 Máximo |
| 3,707 | >0 Mínimo |
| 4,744 | <0 Máximo |

Si comparamos las soluciones de esta Tabla con la Figura 2 para el borde de perfil semicircular, los resultados resultan bastantes coherentes, lo que nos indica la validez del modelo. Las soluciones obtenidas para alturas 0 m y 0,4 m son las mismas, variando únicamente en algunos casos en el último decimal, lo que de nuevo nos indica que la eficiencia acústica de una pantalla depende de la frecuencia y de la sección transversal de su cumbre, más que de la altura, de forma que se pueden conseguir mayores atenuaciones acústicas variando la sección transversal de la coronación y disminuyendo la altura de la pantalla respecto a la una pantalla convencional (de sección recta).

5. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre perfiles de cumbrera realizado apoya la hipótesis de que la utilización de pantallas de perfil semicircular puede mejorar la atenuación acústica producida por la pantalla respecto a si se emplea otro tipo de perfil, obteniéndose reducciones elevadas a 1000 Hz de frecuencia, que corresponde con la frecuencia para la cuál existe un máximo de intensidad del ruido procedente de tráfico rodado y de tráfico ferroviario. Los estudios energéticos concluyen que la eficiencia de esta pantalla es muy elevada (superior al 94% en muchas zonas del espectro de frecuencias). No obstante, es probable que a escala real la eficacia fuese menor, debido a los múltiples factores asociados a la atenuación y que no aparecen en laboratorio (viento, temperatura, efecto suelo...).

El modelo de atenuación acústica presenta una gran complejidad y depende fuertemente de la frecuencia de emisión más que de la altura de la pantalla, o de la ubicación del sonómetro. Si bien para cada frecuencia de ruido debería existir una altura óptima que garantiza un mejor comportamiento acústico, existe una fuerte influencia de la frecuencia en la atenuación. El modelo de atenuación obtenido resulta bastante coherente con los resultados experimentales obtenidos.

La fuerte influencia del perfil hace también que este modelo de atenuación no sea aplicable a otros tipos de cumbreras, siendo válido para el perfil semicircular que además es el más eficiente.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Universidad Alfonso X el Sabio (FUAX) y al Banco de Santander el habernos concedido el proyecto de investigación 1.010.102 “Estudio de los factores asociados a la atenuación del sonido mediante barreras acústicas: Densidades y espesores variables en pantallas de hormigón. Difracción en el borde superior de las pantallas y estudios morfológicos en pantallas acústicas dispersas mediante redes modulares” para poder realizar este trabajo.

7. REFERENCIAS

- [1] E. A.G.Shaw (1995) “*Noise environments outdoors and the effects of community exposure*”, J. Acoust. Soc. Am. Volume 97, Issue 5, pp. 3322-3323 (1995).
- [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] L.Abad , R.Magro, M. de la O. Moreno, M.Serrano, “*Diseño de una maqueta para medidas de atenuación de ruido en tráfico rodado*”, Tecnología y desarrollo/Medioambiente y Desarrollo. ISSN 1696-8085 (2010).
- [4] M.Serrano, “*Estudio de la difracción en el borde superior de las pantallas acústicas. Aplicación al diseño de las secciones de la coronación y comparativa de la eficacia de la pantalla en función de la sección transversal*”, Tesis doctoral, Universidad Alfonso X el Sabio (2011).
- [5] D. Alegre: “*Medidas correctoras de impacto acústico en infraestructuras (I/II) Pantallas acústicas y otros dispositivos reductores de ruido para carreteras y ferrocarriles*”, Anales de mecánica y electricidad (2008)
- [6] J.Puy Huarte: “*Calculo numérico*” Universidad Politécnica de Madrid, ISBN 84-7493- 043-X. (1981).