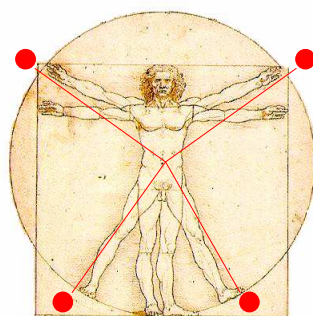


# TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

*Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*

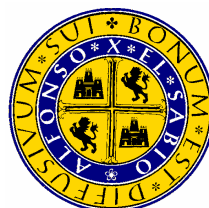
VOLUMEN VIII. AÑO 2010

SEPARATA



DISEÑO DE UNA MAQUETA PARA MEDIDAS DE LA ATENUACIÓN DEL  
RUIDO DE TRÁFICO RODADO MEDIANTE PAN TALLAS ACÚSTICAS

Laura Abad Toribio, Rafael Magro Andrade,  
María de la O Moreno Balboa, Marta Serrano Pérez



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO

Escuela Politécnica Superior  
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Laura Abad Toribio, Rafael Magro Andrade, María de la O Moreno Balboa, Marta Serrano Pérez

Julio, 2010

[http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD10\\_003.pdf](http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD10_003.pdf)

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

*Tecnol@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.VIII. 2010.*

# DISEÑO DE UNA MAQUETA PARA MEDIDAS DE LA ATENUACIÓN DEL RUIDO DE TRÁFICO RODADO MEDIANTE PANTALLAS ACÚSTICAS

**Laura Abad Toribio (a), Rafael Magro Andrade (b),  
María de la O Moreno Balboa (c), Marta Serrano Pérez (d)**

(a) Dra en Ciencias Físicas. Área de Matemáticas y Física Aplicadas.

Tf: 918105207, email: [labad@uax.es](mailto:labad@uax.es)

(b) Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de la Escuela Politécnica Superior.

Tf: 918105087, email: [rmagrand@uax.es](mailto:rmagrand@uax.es)

(c) Ingeniera Técnico Industrial. Área de Diseño Industrial

Tf: 918109168, email [mmorebal@uax.es](mailto:mmorebal@uax.es)

(d) Lcda en Ciencias Físicas, Área de Matemáticas y Física Aplicadas

Tf: 918105207, email: [mserrper@uax.es](mailto:mserrper@uax.es)

Universidad Alfonso X el Sabio. Avda de la Universidad nº 1, Villanueva de la Cañada, 28691

## *RESUMEN:*

Hoy en día es muy importante saber cómo diseñar una pantalla de ruido de carreteras que se adapte a su entorno y tenga las funciones acústicas y estructurales previstas. En este trabajo se diseña un sistema experimental para realizar medidas de la atenuación del ruido de tráfico rodado. Una maqueta realizada en madera de ocumen nos permite cambiar la sección transversal de la coronación de la pantalla. Para estudiar la validez del diseño se ha medido a diferentes alturas, con diferentes secciones y a distintas frecuencias en el rango entre 63 y 5000 Hz

*PALABRAS CLAVE:* investigación, tesis, cualidades, pautasruido, barreras, carreteras, sistema experimental, coronación

## *ABSTRACT:*

Today it is very important to know how to design a highway noise barrier that is adapted to their environment and have the acoustic and structural features provided. This paper shows the design of an experimental system for measurements of the attenuation of road traffic noise. A wooden ocumen model allows to change the transversal section of the coronation of the barrier. To study the validity of the design, the measures have been taken at different heights, with different sections and its varying frequencies in the range of 63 to 5000 Hz

*KEY-WORDS:*. noise, barrier, highway, experimental set-up, coronation

*SUMARIO:* 1. Introducción, 2. Teoría de Difracción, 3. Estudios sobre la coronación, 4. Sistema experimental, 5. Resultados preliminares y discusión, 6. Conclusiones, 7. Agradecimientos, 8. Referencias.

*SUMMARY:* 1. Introduction, 2. Theory of Diffraction, 3., Studies on the coronation, 4. Experimental set-up, 5. Preliminary results and discussion, 6. Conclusions, 7. Acknowledgments, 8. References.

[http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD10\\_003.pdf](http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD10_003.pdf)

## 1. Introducción

“Algún día el hombre tendrá que combatir el ruido de forma implacable como ha combatido el cólera o la peste”. Así vaticinó el médico alemán Robert Koch en Berlín en 1880 la evolución futura del ruido permanente sobre las personas, planteando la analogía entre las plagas bíblicas y las nuevas epidemias de ruido que acosan a los ciudadanos (Ver Referencia [1]). La Organización Mundial de la Salud pone el límite en el ruido ambiental en 55 dB. Según el estudio, 210 millones de europeos (casi un tercio de la población del viejo continente) sufren ruido de tráfico por encima de este nivel, y 35 millones a ruido motivado por ferrocarril. España, es junto con Japón, uno de los países más ruidosos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, seguido por Grecia y Francia. Los costos causados por los efectos de la exposición al ruido ambiental han sido evaluados también mediante modelos económicos, [2], [3]. El coste anual ha sido estimado en 40.000 millones de €uros. Los costos que se han estimado son los generados por:

- la protección comunitaria y privada (barreras acústicas, aislamiento sonoro en ventanas)
- las pérdidas de productividad
- el cuidado de la salud
- la pérdidas de bienestar psicológico
- el cambio del valor de mercado de la vivienda.

Dado que la polución por ruido de tráfico es uno de los agentes contaminantes que más deterioran la calidad de vida de los ciudadanos de nuestro país, durante los últimos años, se ha incrementado el uso de barreras acústicas a lo largo de las vías de penetración y circunvalación de las grandes ciudades, [4]. El principal motivo se debe a la concienciación por parte de los ciudadanos y de las administraciones ante dicho problema. Aunque la reacción sea actual, la comunidad científica lleva estudiando las posibles soluciones más de 30 años. Así lo demuestran los trabajos pioneros de Redfearn [5], Maekawa [6] y Kurze [7] entre otros. Carente hasta hace escaso tiempo, de normativas reguladoras, de limitaciones acústicas y de pantallas antirruído, España inició hace 20 años una única singladura hacia soluciones mejores. En nuestro país, el Real Decreto 1367/2007, [8], es una norma de

carácter básico, aplicable por todas las administraciones públicas, que trata de asegurar unos objetivos mínimos comunes de calidad acústica medioambiental en el ámbito estatal. Es de destacar que tanto las ordenanzas municipales como el planteamiento territorial y urbanístico se deberán adaptar a la Ley de Ruido y sus normas de desarrollo y, por tanto, a lo establecido en este Real Decreto.

Para proteger a las personas contra los efectos del ruido producido por el tráfico, cabe actuar en varios frentes, con medidas en general, no mutuamente excluyentes.

Los frentes de actuación pueden ser:

- Reducir el ruido en la fuente, es decir, en los propios vehículos.
- Adoptar medidas ya en la fase de planeamiento y proyecto de la carretera o vía urbana o suburbana.
- Adoptar medidas de explotación que disminuyan la “agresión ruidosa”.
- Actuar en los propios edificios mejorando su aislamiento frente al ruido.
- ***Instalar o construir estructuras antirruído que eviten la propagación del ruido entre carretera y edificios.***

En el caso del ruido producido por tráfico rodado se ha venido realizando un esfuerzo titánico a lo largo de los últimos años para reducir el ruido en su origen actuando sobre los motores de los vehículos y la capa de rodadura de los firmes de las vías, [9] y [10]. Sin embargo en este aspecto se ha llegado a unos niveles por debajo de los cuáles es muy difícil descender. Dentro de las estructuras antirruído se encuentran las pantallas acústicas. Organizadas adecuadamente, las pantallas antirruído suponen una respuesta actual a la problemática acústica en zonas urbanas periféricas sometidas al impacto directo del tráfico vial.

**El presente artículo recoge los principales resultados de una investigación desarrollada en el marco de un proyecto financiado por el Banco de Santander/Fundación Universidad Alfonso X el Sabio, con el nombre : “MORFOLOGÍA DE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS. ESTUDIOS DE DIFRACCIÓN EN EL BORDE DE LA PANTALLA”** El objetivo de dicho proyecto de

investigación era abordar el estudio la atenuación del ruido mediante pantallas acústicas **desde dos puntos de vista, el morfológico y el opto-acústico**, ya que en el proceso de diseño de una pantalla acústica es necesario aplicar los conceptos físicos elementales subyacentes a la reducción del ruido (si se quiere que ésta sea acústicamente eficaz), pero también es necesario tener en cuenta la importancia de otras características no acústicas como son el mantenimiento, la seguridad, la estética, la construcción, el coste, etc. Algunos de los estudios de dicho proyecto se publicaron en la revista de la UAX; *Tecnología y Desarrollo*, en la sección de *Medioambiente y desarrollo*, [11].

En la actualidad, y debido al alto coste, y al mucho tiempo que requieren los estudios sobre las maquetas, éstas están dejando paso a las simulaciones digitales. Estas novedosas herramientas informáticas, que se usan hoy en día tienen en cuenta entre otras muchas cosas los efectos de propagación ligados a la meteorología y a la naturaleza del suelo. A modo de ejemplo, el modelo de propagación acústica en exteriores toma en cuenta la atenuación por distancia desde las fuentes de ruido hasta los lugares sensibles y la reflexión acústica en la superficie del terreno, (Referencia [12]). Existen actualmente muchas herramientas de simulación acústica (Cadna, Mithra, Soundplan, ArcView, ...) que han revolucionado el mundo de la predicción y del análisis de los factores acústicos, gracias al uso de complejas ecuaciones y cálculos recursivos, los cuales solamente una máquina de cálculo puede realizar con relativa facilidad. La acústica medioambiental se caracteriza por trabajar con métodos de análisis eminentemente empíricos, con toda una formulación que requiere muchos y repetitivos cálculos, [13]. Sin embargo, los métodos clásicos de cálculo no dejan caracterizar, desde que se conciben, la eficacia. Sólo la medición en una maqueta hace que se pueda preveer el comportamiento de la pantalla acústica antes de realizarla. De forma complementaria a los diferentes estudios realizados con distintos tipos y disposiciones de materiales absorbentes usados en la construcción de las pantallas acústicas, sus formas también se han alterado tanto en su sección recta como en sus perfiles longitudinales con objeto de incrementar su eficacia.

Habitualmente este tipo de estudios se realiza, como en nuestro caso, sobre modelos a escala reducida, pasando posteriormente, en aquellos modelos prometedores a ensayos a escala real Aunque las

pantallas antirruído forman parte del paisaje urbano, sufren de cierta pobreza estructural (la mayoría de ellas son rectas).

Por todo ello en este trabajo se ha diseñado y construido una maqueta, que nos servirá como modelo experimental para realizar medidas sobre la atenuación del ruido del tráfico rodado.

## 2. Teoría de difracción

Para la comprensión del funcionamiento de una pantalla acústica, es necesario estudiar los fenómenos que experimenta el sonido en su encuentro con un cambio de medio físico (ya que una pantalla acústica, es un muro de pequeño espesor relativo que se interpone entre el receptor y una determinada fuente sonora para protegerlo del ruido). En ausencia de un obstáculo, un sonido emitido por una fuente se propaga por el aire hasta alcanzar al receptor. En un medio homogéneo e isótropo

las ondas sonoras se propagan en línea recta, en todas las direcciones del espacio (es, por lo tanto una onda esférica que se transmite desde una fuente puntual en el espacio libre.). Muchas veces tratamos de reducir la molestia producida por algún ruido mediante la ubicación de un elemento u obstáculo entre el receptor y la fuente. El contacto visual con la fuente se evita con un obstáculo grande, sin embargo el sonido llega al oído sólo un poco atenuado. El sonido puede hacer algo que no puede hacer nuestra vista, se puede curvar alrededor del obstáculo. Es decir, no se propaga necesariamente en línea recta. Este fenómeno físico se conoce como difracción y depende de la forma del cuerpo u obstáculo. El problema de la difracción fue estudiado para la luz por Sommerfeld, [14].

La difracción es la desviación, que sufren las ondas alrededor de los bordes, que se produce cuando un frente de onda (ya sea sonora, material o electromagnética) es obstruido por algún obstáculo. El esquema de la onda resultante puede calcularse considerando cada punto del frente de la onda original



Figura 1: Onda esférica

Fuente:

[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_05\\_06/io4/public\\_html/focalizacion.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io4/public_html/focalizacion.htm)

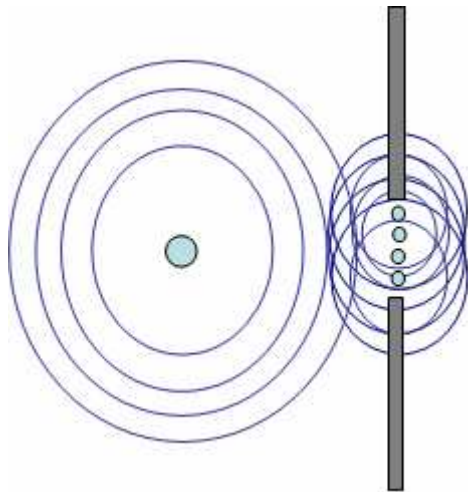


Figura 2: Principio de Huygens  
Elaboración propia.

como una fuente puntual de acuerdo con el principio de Huygens y calculando el diagrama de interferencia que resulta de considerar todas las fuentes.

El principio de Huygens dice que cada punto en el frente de una onda sirve de fuente de ondas esféricas secundarias (Figura 2). Así, cuando una fuente de ondas alcanza una placa con un orificio o rendija central, cada punto de la porción del frente de ondas limitado por la rendija se convierte en foco emisor de ondas secundarias, todas de idéntica frecuencia. Los focos secundarios que corresponden a los extremos de la abertura generan ondas que son las responsables de que el haz se abra tras la rendija y bordee sus esquinas.

En los puntos intermedios se producen superposiciones de las ondas secundarias que dan lugar a zonas de intensidad máxima y de intensidad mínima. Si se combinan dos ondas armónicas procedentes de dos focos de la misma frecuencia y longitud pero de diferente fase, la onda resultante es una onda armónica cuya amplitud depende de la diferencia de fase. Si la diferencia de fase es cero o un número entero de veces  $360^\circ$  las ondas están en fase y la amplitud resultante es igual a la suma de amplitudes individuales y la intensidad es máxima. Si la diferencia de fase es  $180^\circ$  o un número entero impar de veces  $180^\circ$  la amplitud resultante es igual a la diferencia entre las amplitudes individuales y la intensidad, es un mínimo. Cuando existen muchas rendijas equiespaciadas se presentan los máximos de interferencia en los mismos puntos que cuando había dos rendijas, pero los máximos son mucho más intensos y mucho más estrechos.

En la Figura 3 se observan, para luz, los diferentes patrones de difracción para una, dos, tres, cuatro y cinco rendijas; en las que se puede apreciar lo dicho anteriormente. Cuando se trata de sonido, la intensidad sonora, disminuye con la distancia a la fuente.



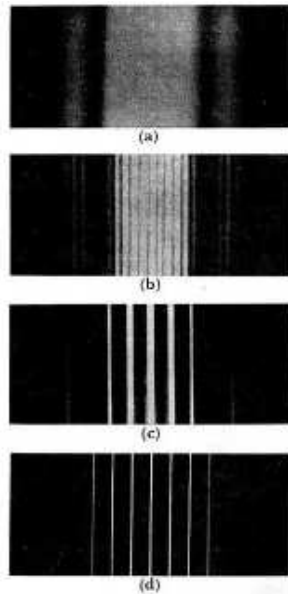


Figura 3. Patrones de difracción que forman rejillas con:  
(a) 1 rendija; (b) 2 rendijas; (c) 5 rendijas; (d) 20 rendijas.

A medida que el número de rendijas aumenta,  
se van formando líneas cada vez más angostas.

Fuente: [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/26/htm/sec\\_7.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/26/htm/sec_7.html)

La energía acústica, según aumenta la distancia a la fuente, debe repartirse en una mayor superficie del frente de onda. La intensidad del sonido se define como la potencia acústica transferida por una onda sonora por unidad de área normal a la dirección de propagación. Es por eso, que la intensidad sonora se calcula entonces como el cociente entre la potencia y la superficie del frente de onda, en este caso la superficie de una esfera de radio  $r$ .

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Aunque esta intensidad se mide en  $W/m^2$ , es habitual utilizar una escala logarítmica. Por convenio, en dicha escala se emplea como referencia el umbral de audición:

$$I_{dB} = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

donde  $I_{dB}$  es la intensidad acústica en decibelios (dB),  $I$  la intensidad acústica percibida en ( $W/m^2$ ) e  $I_0$  la intensidad umbral de audición ( $10^{-12} W/m^2$ ). Además, la absorción del aire y la presencia de elementos absorbentes en él reducen los niveles acústicos. Otros factores que influyen en la

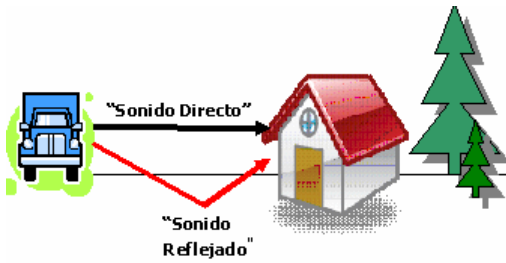


Figura 4: Sonido directo y reflejado  
Elaboración propia

propagación del sonido son el denominado “efecto suelo” y los efectos atmosféricos (viento y gradientes de temperatura). De esta manera, si suponemos sólo la influencia del terreno en la propagación del sonido entre el emisor y el receptor en espacio abierto, observaremos dos posibles caminos en ausencia de una pantalla. Al receptor llegaría el “sonido directo” al que habría que sumarle la contribución energética del “sonido reflejado”

en el terreno, tal como muestra la Figura 4. Cuando interponemos una pantalla acústica entre la fuente y el receptor (Figura 5), la propagación del sonido se ve modificada. La onda sonora que se propaga a través de un medio, y encuentra a su paso una superficie de separación con otro medio, origina una onda reflejada en el medio origen y una onda transmitida en el segundo medio. En general, una onda acústica experimentará una reflexión siempre que exista un cambio en el medio a través del cual se propaga. Así denominamos “**sonido directo**” al que viaja por el camino más corto y “**sonido reflejado**” a aquel que tras chocar con el obstáculo entre emisor-receptor, vuelve hacia el punto de emisión (en la práctica muchas pantallas acústicas **reflejan el ruido al lado opuesto de la vía de tráfico**, lo que podría originar un crecimiento de las molestias por efecto de las reflexiones en la población situada frente a la pantalla).

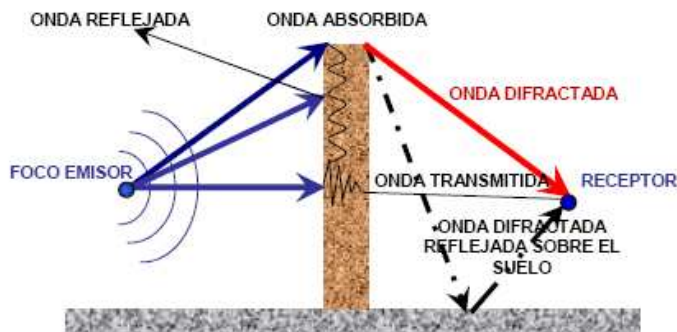


Figura 5: Ondas y pantallas acústicas. Elaboración propia

Como se ve en las Figuras 5 y 6, las barreras reducen el ruido que llega a ellas a través de la difracción de las ondas de sonido (haciendo que éstas recorran un camino más largo que el que recorrerían si no estuvieran colocadas las barreras), de la absorción, de la transmisión y de la reflexión de las ondas de sonido. También como resultado de la difracción aparecen zonas de sombra sonora en el lado opuesto al obstáculo. Esta zona de sombra depende de la diferente absorción del material (Figura 7).

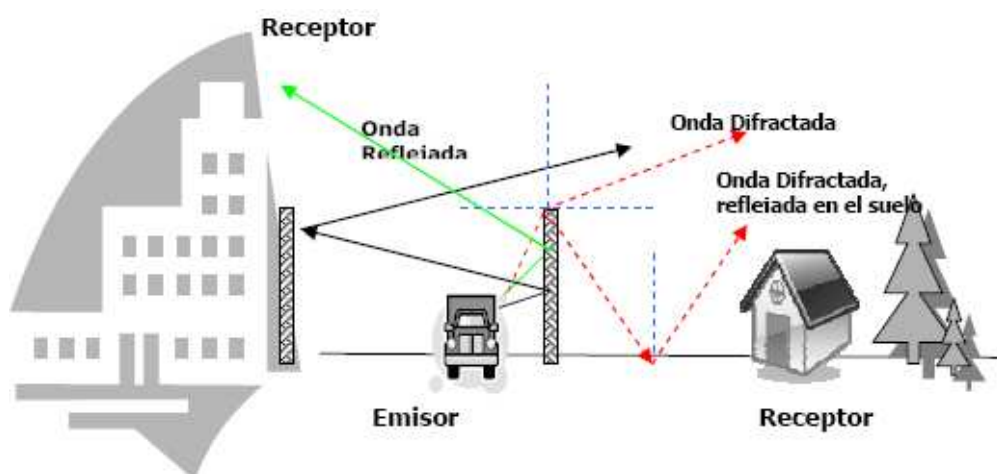


Figura 6: Apantallamiento vertical a ambos lados de la vía. Elaboración propia.

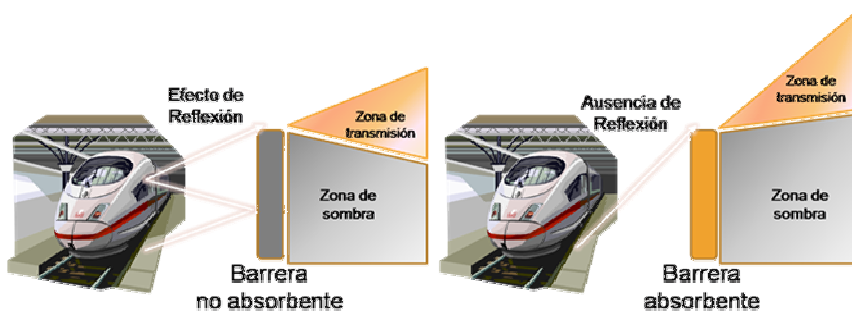


Figura 7: Zona de sombra. Fuente <http://www.climablock.com/Barrera-acustica-03-Absorcion-sonora.htm>

Entonces, cuando interponemos una pantalla acústica entre un emisor y un receptor, la contribución de la onda directa se reemplaza por la onda difractada sobre la coronación de la pantalla, con lo que reduce

su acción. Así, la energía residual que accede al receptor sólo se transmite por difracción por encima de la coronación de la barrera, siendo precisamente este fenómeno físico la vía de acceso del ruido más determinante a efectos de valorar un nivel de atenuación dado. La difracción, o cambio de dirección de las ondas alrededor de un obstáculo, puede ocurrir tanto en la parte superior de la barrera acústica como alrededor de los bordes laterales. Dada la naturaleza del sonido, la difracción no se produce de igual forma para todas las frecuencias. Las frecuencias más altas se difractan menos que las bajas; como resultado, una barrera es, generalmente, más efectiva atenuando frecuencias altas que bajas (Figura 8).

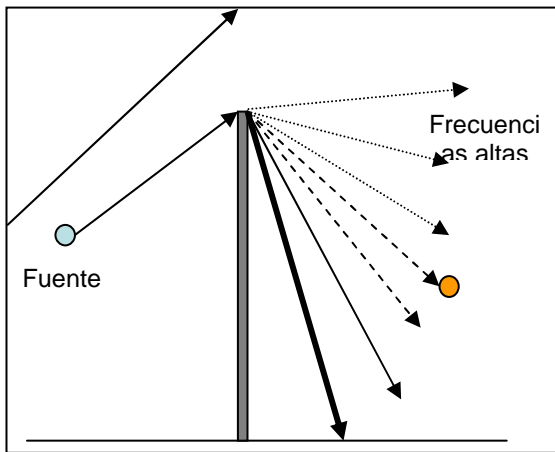


Figura. 8. Difracción en la pantalla acústica.

Elaboración propia

Las fuentes de ruido tienen diferentes formas: las máquinas pequeñas son consideradas como fuentes puntuales, el tráfico en carreteras como fuentes en línea, y las fachadas de los edificios como fuentes de superficie. Como ya hemos comentado en este capítulo, cuando una onda de sonido encuentra un obstáculo que es pequeño en relación con su longitud de onda, pasa alrededor de él casi como si no existiera, formando una sombra muy pequeña. Pero, si la frecuencia de sonido es suficientemente alta, y la longitud de onda por lo tanto suficientemente corta, se forma una sombra perceptible. El efecto de difracción de las ondas del sonido con frecuencias

altas y bajas respectivamente se muestra en las Figuras 8, 9 y 10, [15].

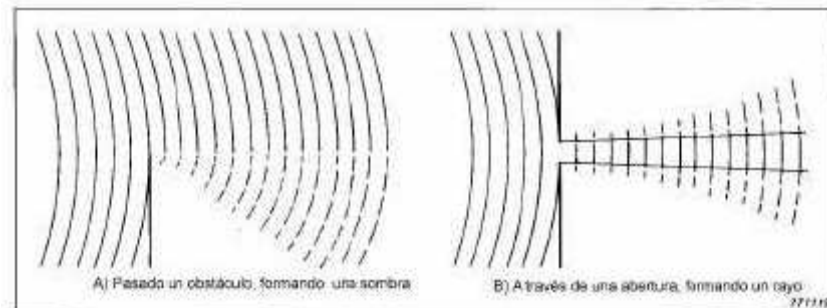


Figura 9: Efecto de difracción a frecuencias altas. Referencia [15]

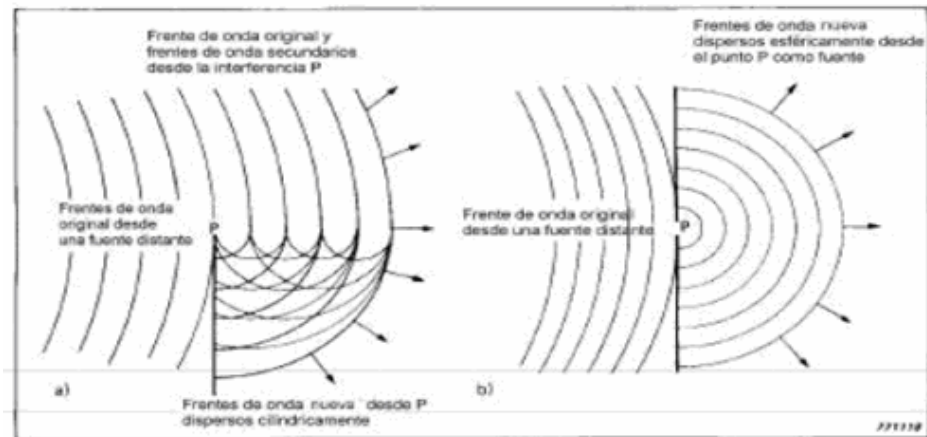


Figura 10: Efecto de difracción a frecuencias bajas. Referencia [15]

Como ya hemos comentado, los fenómenos que se producen al interceptar el camino de la onda acústica con la inserción de una barrera acústica son:

- ✚ Parte de la energía de la onda acústica se refleja en la superficie de la barrera.
- ✚ Parte de la energía no reflejada se transforma en calor al ser absorbida por la barrera.
- ✚ Parte de la energía no reflejada se transmite a través de la barrera.
- ✚ Parte de la energía se difracta por los bordes superior y laterales.

Se debe considerar que la transmisión de la onda acústica a través de la barrera sea despreciable comparado con la difracción por los bordes. En este estudio se pretende profundizar en la comprensión de este fenómeno de difracción que se produce en el borde superior de las pantallas acústicas,

analizando la variación de la intensidad sonora entre unas zonas y otras como consecuencia del mismo, definiendo, así los puntos donde se generan niveles sonoros máximos y mínimos. En la Figura 11 se observan los máximos y mínimos de difracción en el borde superior de la pantalla

Las teorías de la difracción por barreras han sido desarrolladas en un número elevadísimo de publicaciones. Una amplia bibliografía sobre el mismo puede encontrarse en la Referencia [16].

Son de destacar:

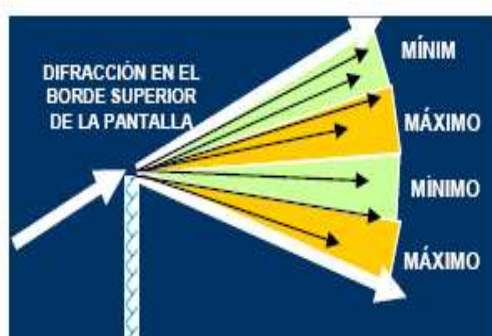


Figura 11: Máximos y mínimos de difracción en la pantalla acústica. Elaboración propia.

- a) la teoría de Maekawa-Kurtze-Anderson , [6] y [7]
- b) la teoría ondulatoria de Pierce, [17], [18] y [19].

Un aspecto importante de la difracción es la diferencia entre el camino que la onda hace al difractarse en la parte superior de la barrera y el camino que haría si la barrera no estuviera. Esta diferencia de caminos sirve para calcular el número de Fresnel ( $N$ ), que es un número

adimensional que se utiliza para predecir la reducción que provocaría una barrera colocada entre la fuente y el receptor (Figura 12).

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad \dots \quad (3)$$

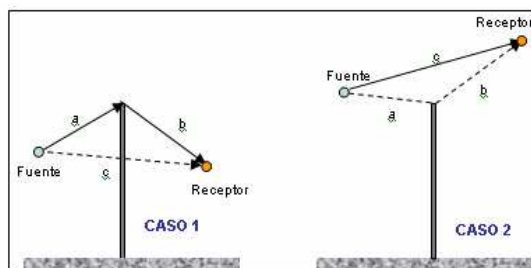


Figura 12: Diferencia de camino. Elaboración propia

$N$ : es positivo en el caso 1 y negativo en el caso 2

$\delta$ : es la diferencia de caminos planteada por  $\delta=a+b-c$  ( $a,b,c$  según la Figura12)

$\lambda$ : es la longitud de onda del sonido emitido por la fuente;

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

$c$  es la velocidad del sonido

$f$ : es la frecuencia del sonido emitido por la fuente

Según la fórmula anterior, si la diferencia de caminos aumenta, el número de Fresnel y la atenuación del sonido también aumentan. Lo mismo sucede si la frecuencia de la onda aumenta. Para observar este efecto, se tienen que comparar las dimensiones del obstáculo ( $d$ ) con la longitud de onda ( $\lambda$ ) de las ondas sonoras, ya que si ésta es mucho mayor que las dimensiones del obstáculo, este fenómeno es difícil de apreciar. Por poner un ejemplo, y sabiendo que la longitud de onda audible se encuentra entre 17 m y 1.7 cm. Un sonido con una frecuencia de 20 Hz (longitud de onda 17 m) que tropiece con un obstáculo de 5 m, puede ser transmitido a la parte posterior del mismo debido a la difracción ( $\lambda \approx d$ ), sin embargo si la frecuencia del sonido es de 20000 Hz (1.7 cm de longitud de onda) no es difractado ( $\lambda \ll d$ ), o sea no es transmitido al otro lado del obstáculo.

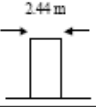
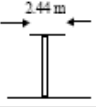
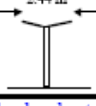

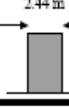

### 3. Estudios sobre la coronación

A principios de los 80, May y Osman, investigaron la eficiencia de las llamadas nuevas formas de barreras acústicas, logrando uno de los trabajos de mayor aporte en el tema, [20] (ensayos donde la sección transversal de la coronación de la pantalla tenía diferentes geometrías) Describieron una típica situación de una autopista en un modelo a escala 1/16, en las cuales simularon los fenómenos acústicos que se producían cuando el receptor estaba detrás de la barrera simple, en el lado opuesto de la autopista y entre barreras paralelas. Los tipos de barrera fueron ancha reflectante, ancha con un lado absorbente, convencional con un lado absorbente, forma de T, con cumbre cilíndrica y en forma de Y. La comparación se hace ante una barrera delgada completamente reflectante, de 4.9 m de altura. Se

16. Laura Abad Toribio, Rafael Magro Andrade, María de la O Moreno Balboa y Marta Serrano Pérez

consideró una altura de 1.2 m para la fuente, que correspondía a un típico espectro ruido de tráfico compuesto de 8 % de vehículos pesados. La distancia fuente-barrera fue de 12.2 m y la distancia barrera-receptor, fue de 6.1, 12.2, 24.4 y 36.6 m. Un resumen de los resultados más relevantes respecto a la Pérdida de Inserción de 14.8 dB(A) alcanzada por la barrera acústica de referencia, se indican en la Tabla I.

**Tabla I: Pérdida de inserción relativa obtenida de un modelo a escala (Ref. [21])**

Opción	Pérdida de inserción relativa comparada con barrera de 4.9 m
<p>Ancha reflectante</p> 	+3.1
<p>Forma de T</p> 	+4.2
<p>Forma de Y</p> 	+3.5
<p>Convencional un lado absorbente</p> 	+1.5
<p>Ancha absorbente</p> 	+5
<p>Cumbrera cilíndrica</p> 	+2.5

En 1991 Hothersall y Crombie, [22] utilizando métodos numéricos repitieron los ensayos de May y Osman, incluyendo además otros elementos difractares en la cumbrera de las pantallas, a modo de



pequeñas pantallas situadas paralelas a la pantalla portante en su parte superior y separadas de la misma una determinada distancia en toda su longitud., [16]. También estudiaron la altura de estos dispositivos así como la inclusión de una serie de materiales y la inclusión de material absorbente en sus caras interiores.

Para calcular la reducción del nivel sonoro debido a la interposición de una pantalla, habitualmente se usan métodos aproximados que permiten el uso de los ábacos, que anteriormente hemos mencionado (ver Referencia [6]). Wirt, [23] propone pantallas en forma de diente de sierra (con lo que se conseguiría una menor resistencia al viento así como una mayor transparencia óptica, ver Figura 13, debido al denominado efecto estroboscópico). No obstante sólo se obtuvo una degradación de 1.2 a 4 dB respecto a una pantalla de altura equivalente. Finalmente, las propuestas de Fuyjwara y Furuta, [24], que se basaban en los estudios teóricos de la teoría geometría de la difracción de Keller, [25], muestran la posibilidad de utilizar cumbreras con sección circular con el fin de incrementar la atenuación en una pantalla (ver Pfretzschner et al, [26]), demuestran la idoneidad de este tipo de pantallas para pequeños ángulos de difracción, como por ejemplo para pantallas situadas en autopistas elevadas sobre la topografía del terreno.

Con todos estos estudios se probó que ciertos perfiles superiores colocados en las pantallas (Figuras 13 y 14) 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 (Ref. [27]). Instintivamente, podemos considerar que es mejor colocar un perfil porque podríamos reducir

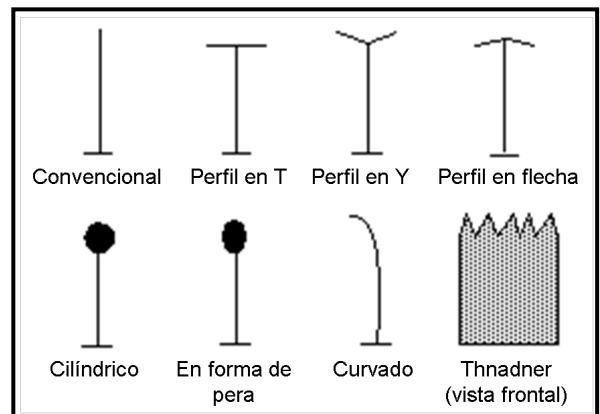


Figura 13: Perfiles de pantalla  
Fuente: Referencia [21]

18. Laura Abad Toribio, Rafael Magro Andrade, María de la O Moreno Balboa y Marta Serrano Pérez

la altura de la pantalla, y esto último no sólo resultaría una mejora estética sino que también abarataría los costes, el problema es que generalmente la construcción de estos perfiles suele superar en coste a una pantalla de mayor altura que produjera la misma reducción de dB(A), por lo que normalmente se opta por simplificar el proceso de construcción e instalar una pantalla sin perfil.

Como forma de reflejar estos resultados (aunque luego observaremos nuestros resultados obtenidos ensayando distintos perfiles en el laboratorio) podemos indicar que si tomamos dos pantallas de la misma altura y a una de ellas le colocamos un perfil en T, la que tiene el perfil provee 2,5 dB(A) adicionales de reducción del ruido que la que no tiene el perfil. Los perfiles en Y y con forma de flecha también resultan efectivos pero no tanto como el perfil en T. Los perfiles cilíndricos, en forma de pera, curvados y Thnadner no muestran una mejora muy significativa a menos que se les aplique algún tratamiento para que también absorban parte de las ondas. A pesar de lo comentado son pocos los estudios sobre la difracción en la coronación de las pantallas, y lo existentes presentan una notable complejidad matemática



Figura 14: Diferentes perfiles  
<http://www.soundfighter.com/content.asp?page=11>

#### 4. Sistema experimental.

Este estudio pretende profundizar en la comprensión de este fenómeno de difracción que se produce en el borde superior de las pantallas acústicas, analizando la variación de la intensidad sonora entre unas zonas y otras como consecuencia de este efecto, definiendo, así los puntos donde se generan niveles sonoros máximos y mínimos. Si bien en nuestro país no se suelen utilizar pantallas de madera, en los países nórdicos se fabrican de madera de pino nórdico con alta absorción acústica. También las maderas exóticas resisten bien a la intemperie. En la elección de la madera para la fabricación del

modelo se ha optado por la madera de ocumen. Es posiblemente la madera más fácil de cortar y de dar forma. Posee también una gran elasticidad y resistencia a los choques. Es fuerte para su peso. Se usa principalmente para aislamiento, ayudas a la flotabilidad y maquetería. Algunas de las piezas tuvieron que ser fabricadas artesanalmente, debido a las dimensiones de las mismas. Dicha elección se basa en una serie de características físicas y mecánicas que son las que se muestran a continuación:

- Densidad aparente al 12% de humedad  $440 \text{ kg/m}^3$ , madera semipesada
- Estabilidad dimensional
- Coeficiente de contracción volumétrica 12 %, madera poco nerviosa
- Dureza (Chaláis-Meudon) 1,5
- Resistencia a flexión estática  $700 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad  $77.500 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia a la compresión paralela  $380 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia a la tracción paralela  $89 \text{ kg/cm}^2$

El modelo a escala es una caja acústica, siendo sus dimensiones totales  $50 \times 70 \times 52 \text{ (cm}^3\text{)}$ . Una de sus paredes es doble, de altura 44 cm. Junto con la caja se han diseñado distintos bordes, con diferente sección transversal, con el fin de abordar el estudio acerca de la influencia de la sección transversal sobre la atenuación sonora. Estos bordes se colocan sobre la pared doble y tienen una altura de 8 cm, lo que representa aproximadamente  $1/7$  de la altura total de la barrera acústica, y su longitud es de 45,7cm. Estos bordes superiores de pantalla tienen formas curvilíneas, triangulares, escalonadas e incluso sección recta, aunque se puede variar el ángulo que ésta forma con la horizontal. Se muestran en la Figura 15. Se han instalado en el modelo un par de goniómetros, que nos permiten establecer el ángulo que forma la pieza anteriormente descrita con la horizontal. Se pueden realizar medidas desde  $0$  a  $180^\circ$ , gracias a un eje que atraviesa la pieza y que permite que gire libremente alrededor de él. Para asegurar la pieza en la posición elegida, se usan unas espiguillas que la aseguran, evitando que se mueva durante la medición.

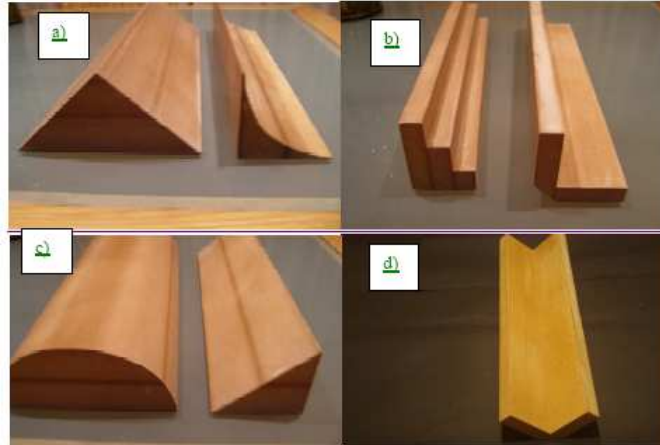


Figura 15: a) Secciones triangular y curva, b) Secciones escalonada y en ele, c) Secciones semicircular y triangular, d) Sección en uve.

A continuación, se recogen algunos planos y fotografías de este modelo a escala (ver Figuras 16, 17 y 18).



Figura 16: Vista frontal y superior de la caja acústica



Figura 17: Goniómetro, que permite fijar el ángulo que forma la pieza con la horizontal.

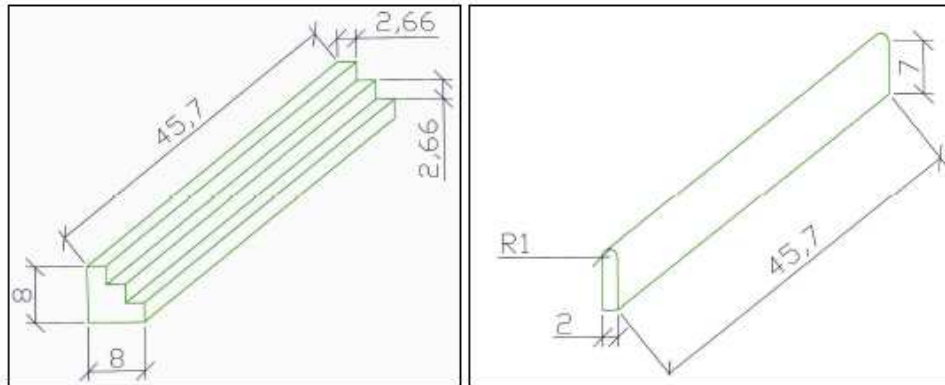


Figura 18: Perfil de sección escalonada. (izquierda) y recta (derecha). Esta pieza, esta atravesada por un eje de lado a lado, éste permite que la pieza gire. De esta forma podremos hacer mediciones con la cumbrera formando un ángulo determinado con la horizontal. Éste ángulo podrá determinarse usando los goniómetros que el modelo experimental posee en ambos extremos del mismo.

Para la medida de ruido se utilizan equipos especializados que utilizan micrófonos como sensores de presión. Hay tres tipos de instrumentos de medición:

1. SONÓMETROS
2. DOSÍMETROS
3. ANALIZADORES ESPECTRALES

De ellos el sonómetro es el equipo más comúnmente utilizado. Es un instrumento diseñado para responder al sonido aproximadamente de la misma forma que el oído humano y para dar medidas objetivas reproducibles del nivel de presión sonora (SPL). Aunque hay muchos sistemas diferentes de medición sonora disponibles, todos constan, en líneas generales, de micrófono, amplificador, procesador y unidad de lectura. El micrófono convierte la señal sonora en una señal eléctrica equivalente, la cual es muy débil, por lo que es incrementada por el amplificador. Posteriormente actúa el procesador, que la hace pasar por una red de ponderación. La última etapa es la unidad de lectura, que presenta el nivel sonoro directamente en dB o en alguna otra unidad derivada, como pueden ser los dB(A) (curva de ponderación). Se utilizan sobre todo para obtener el SPL y el  $L_{eq}$  (nivel sonoro

22. Laura Abad Toribio, Rafael Magro Andrade, María de la O Moreno Balboa y Marta Serrano Pérez

continuo equivalente) Este nivel sonoro equivalente se define como la media del nivel de ruido promediado en el tiempo de medida. Se usa cuando el nivel de ruido varía con el tiempo, como es el caso del ruido del tráfico rodado. Los sonómetros utilizados en este experimento son de Clase 1.

Hay que tener en cuenta que las frecuencias audibles por el oído humano oscilan entre los 50 y 20000 Hz, sin embargo las que producen el ruido ambiental se encuentran entre los 50 y 5000 Hz, aproximadamente. Se han realizado mediciones utilizando los bordes de pantallas de diferente geometría sometidas a un espectro de frecuencias comprendido entre 0 y 5000 Hz (63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 y 5000 Hz). Las frecuencias elegidas corresponden a las frecuencias preferentes indicadas en la Norma UNE 74.002-78. Dichas frecuencias estaban grabadas en un CD y mediante un altavoz se usaba como emisor. El problema que debíamos solucionar, era la imposibilidad de utilizar un volumen constante en todas las mediciones, ya que según la frecuencia utilizada no se escuchaba nada o hacía vibrar demasiado el altavoz, lo cual solucionamos utilizando dos sonómetros, uno fuera y otro dentro de la caja, para la medición del emisor y receptor y así no obtener resultados desvirtuados por la variación del volumen Para comprobar la efectividad de dichos bordes de pantalla disponíamos de dos fuentes receptoras que registraban la  $L_{eq}$ , una situada en el

exterior de la pantalla y la otra en el interior. Para la recogida de datos situamos la fuente receptora que se encontraba en el interior a tres alturas diferentes (0, 20 y 40 cm.) y se registró la  $L_{eq}$  durante 1 minuto en cada una de las posiciones y frecuencias, tanto en el exterior como en el interior, para su posterior análisis. El emisor es un altavoz acoplado a un amplificador en el que reproducimos distintas frecuencias de sonido de las que mediremos su nivel de presión sonora antes y después de la pantalla (Figura 19). Uno de



Figura 19: Emisor, sonómetro exterior y caja acústica

los sonómetros se colocó entre el emisor y la pantalla para medir el nivel de presión sonora que le llega. Con el otro se mide la presión sonora que llega a la parte de atrás de la pantalla. Las medidas se han tomado a distintas alturas, 0cm, 20cm y 40cm, que en la pantalla real equivalen a altura de la base de la pantalla, altura media de la pantalla y altura del borde de la pantalla.

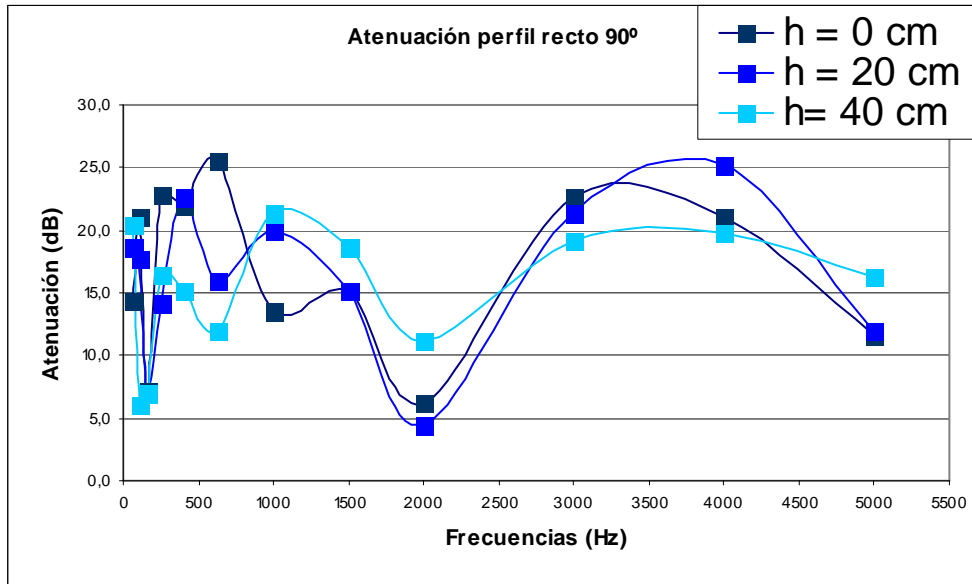
### 5. Resultados preliminares y discusión

Con el fin de probar la validez de la maqueta y del sistema experimental para detectar variaciones en la atenuación, se ha medido inicialmente la atenuación correspondiente a cuatro perfiles, sección recta, sección recta a 30°, sección triangular y sección curva. Para cada uno de los perfiles se han medido la intensidad de emisión y de recepción a tres alturas, a 0 cm, a 20 cm y a 40 cm, que corresponden a la parte más baja, a media altura y al borde superior. Para cada una de ellas se ha calculado la atenuación como se muestra en la Tabla II Las frecuencias medidas son de 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 y 5000 Hz.

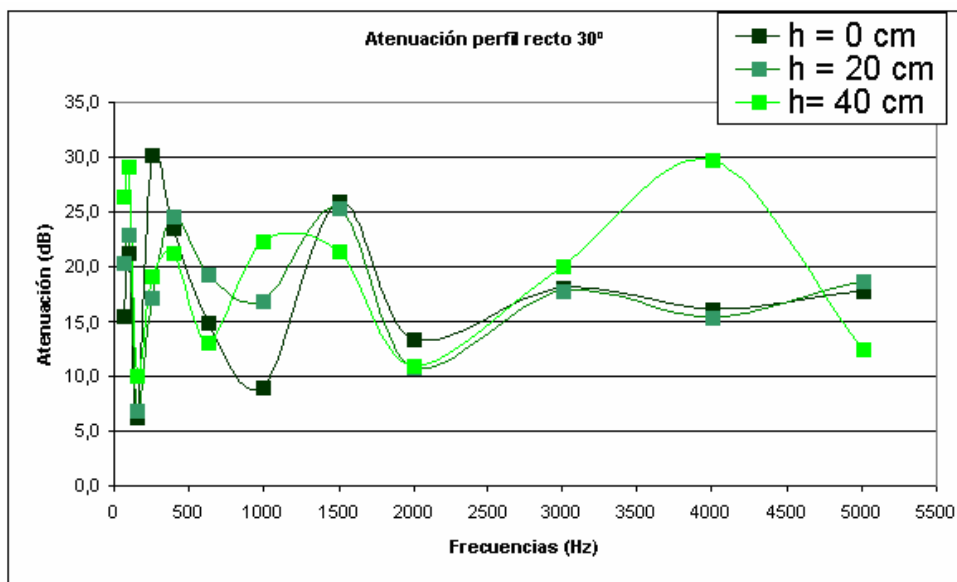
**Tabla II. Esquema de medición para cada uno de los perfiles**

Frecuencia de Emisión	Intensidad de Emisión (dB)	Intensidad de recepción (dB)		Atenuación (dB)
$f$ (Hz)	$I_{e_1}$	0 cm	$I_{r_1}$	$\Delta I_1 = I_{e_1} - I_{r_1}$
	$I_{e_2}$	20 cm	$I_{r_2}$	$\Delta I_2 = I_{e_2} - I_{r_2}$
	$I_{e_3}$	40 cm	$I_{r_3}$	$\Delta I_3 = I_{e_3} - I_{r_3}$

En la Gráfica 1 se observan las medidas realizadas para la sección recta a 90° para las tres diferentes alturas. Los puntos experimentales se han unido por una línea suavizada. En un estudio posterior un análisis estadístico de los datos nos permitirá obtener la función de esta línea de tendencia, para ver para cada altura cómo varía la atenuación en función de la frecuencia, para cada uno de los perfiles de la maqueta. En la Gráfica 2 se muestra la sección recta a 30° (Figura 20).



Gráfica 1: Sección recta a 90°



Gráfica 2: Sección recta a 30°





Figura 20: Sección recta a 30°

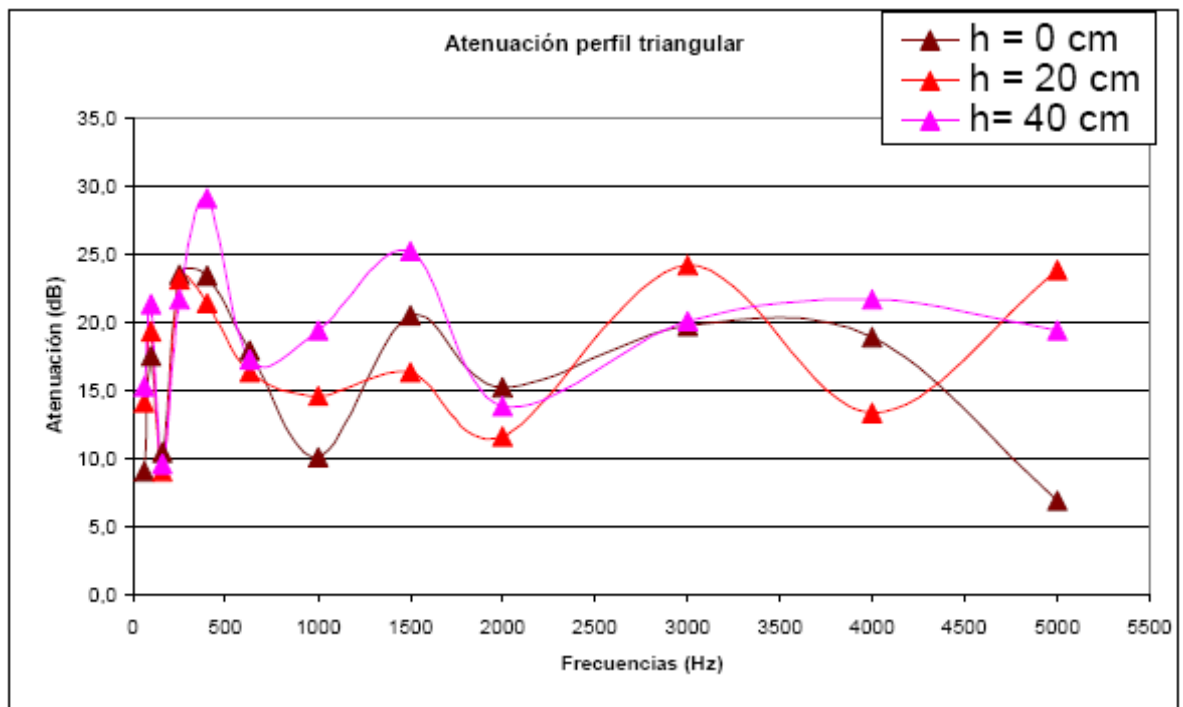


Figura 21: Sección triangular



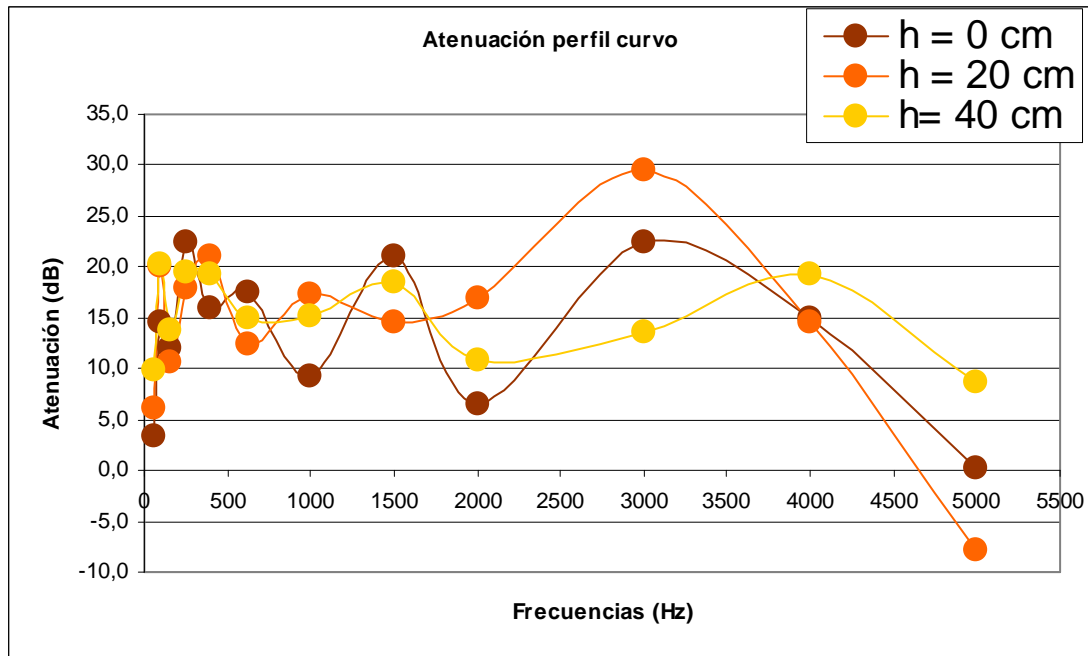
Figura 22: Sección curva

En la Gráfica 3 se muestra la sección triangular (Figura 21)



Gráfica 3: Sección triangular

En la Gráfica 4 se muestra la sección curva (Figura 22)



Gráfica 4: Sección curva

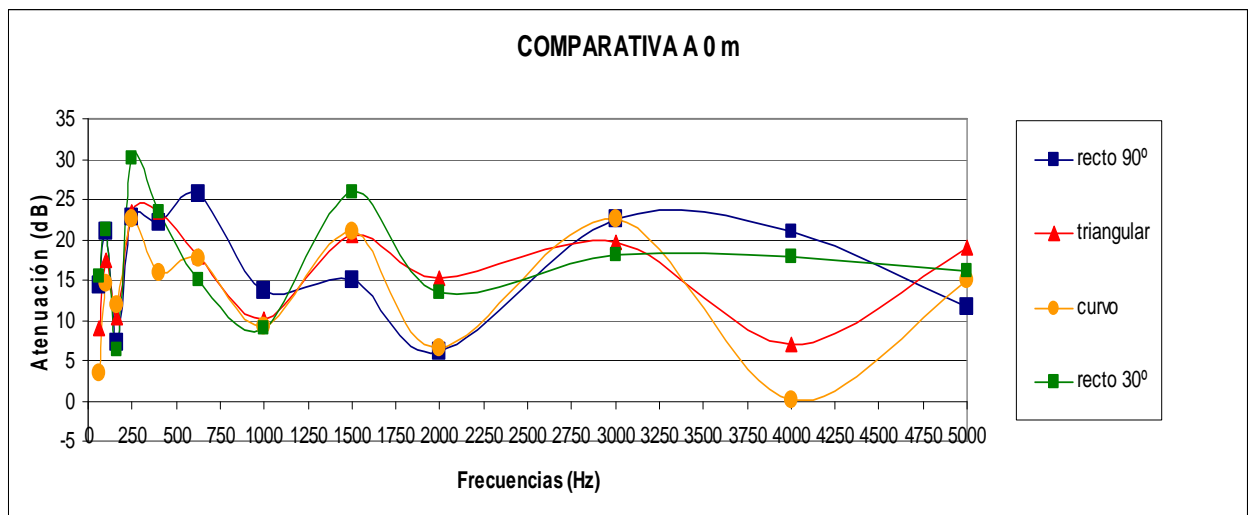
Después de recoger los datos y con los gráficos adjuntos que representan la atenuación a las distintas alturas podemos decir, que con el borde de pantalla de sección recta ( $90^\circ$ ) se produce una reducción de la intensidad en nuestro estudio la variación de intensidades oscila entre 4,1 y 26,0 dB. A 2000 Hz de frecuencia la atenuación es baja y similar para las tres, y para frecuencias superiores la atenuación es también similar para las tres alturas, y mucho más alta.

Para el borde de sección recta ( $30^\circ$ ) no se puede hacer un análisis general, ya que para cada rango de frecuencias actúa mejor una altura distinta. En concreto para los tramos de 63 Hz a 160 Hz y de 3000 Hz a 5000 Hz la altura en la que más se amortigua el sonido es la de 40 cm mientras que para el intervalo de frecuencia comprendido entre 160 Hz y 1500 Hz esa altura es la de 20 cm. Cabe destacar que de 1500 Hz a 3000 Hz, en todas las alturas, se amortigua más o menos de la misma forma con el borde de pantalla de sección recta inclinada  $30^\circ$  se produce una reducción de la intensidad en nuestro estudio la variación de intensidades oscila entre 6.4 y 29.7 dB

Con el borde de pantalla de sección triangular se produce una reducción de la intensidad en nuestro estudio la variación de intensidades oscila entre 6,9 y 29,1 dB. Podemos decir que a la altura más alta (40 cm) se obtienen la mayor amortización del ruido y que por el contrario donde menor amortización se produce es a la altura más baja (0 cm).

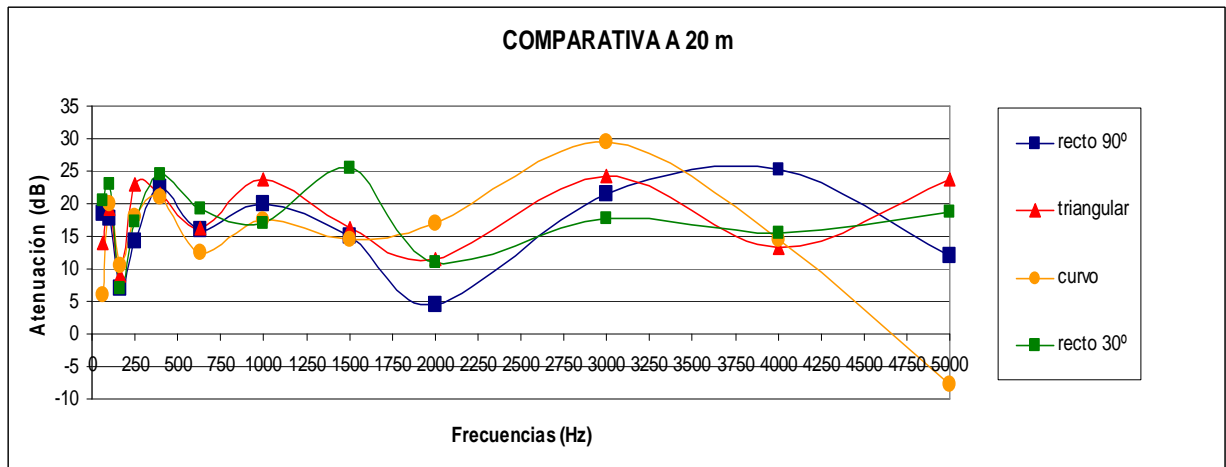
Con el borde de pantalla de sección curva se produce una reducción de la intensidad en nuestro estudio la variación de intensidades oscila entre -7.8 dB y 29,4 dB. La pantalla funciona bien, ya que en la mayoría de los casos, se amortiza el ruido dentro de la caja. Es decir, nuestras medidas de ruido son siempre menores dentro de la caja que fuera. Sólo hay una excepción: 5000 Hz en la 2ª altura. Dónde podemos ver que la medida dentro de la caja es 65,5 dB y fuera 57,7 dB. La explicación más lógica sería un error de medida, ya que es muy extraño que sólo en una determinada posición se escuche más el ruido dentro que fuera de la caja, estando la fuente de emisión fuera de la caja. Pero no descartamos otras posibles explicaciones que formarían parte de un estudio posterior.

En las Gráficas 4, 5 y 6 se muestran las comparativas para 0, 20 y 40 cm repectivamente (1ª altura, 2ª altura y 3ª altura) para los cuatro perfiles



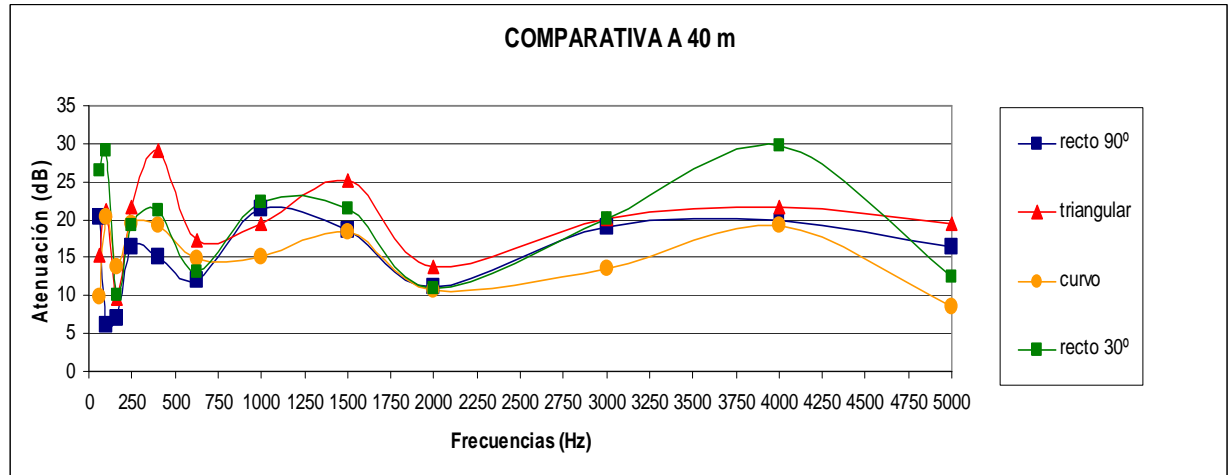
Gráfica 4: Comparativa a primera altura. Los puntos se han unido por una línea suavizada

Observando el Gráfico arriba representado de comparación de las distintas medidas tomas en altura cero con los diferentes bordes, se puede ver que el borde que mejor amortigua el sonido como diferencia de la intensidad de emisión y recepción sería el recto formando 30° con la horizontal. El perfil recto de 30° amortigua el sonido correctamente, sobre todo en las frecuencias de 250 Hz y de 1500 Hz, siendo claramente superior a los demás perfiles. En las frecuencias de 160 Hz, 1500 Hz y 4000 Hz, los tres perfiles no logran amortiguar adecuadamente el ruido. La mejor atenuación a 4000 Hz es la del perfil recto (90°)



Gráfica 5: Comparativa a segunda. Los puntos se han unido por una línea suavizada

No podemos obtener datos determinantes y claros sobre la relación entre los distintos perfiles y la cantidad de ruido amortiguado en la altura de 20 cm. Existe un dato negativo del perfil curvo en los 5000 Hz. En 160 Hz podemos observar que la cantidad de ruido amortiguada es similar para los tres perfiles, siendo ésta baja. La mejor atenuación a 4000 Hz es la del perfil recto a 90°, siendo la de los otros tres perfiles bastante similar a esta frecuencia.



Gráfica 6: Comparativa a tercera altura. Los puntos se han unido por una línea suavizada

En esta última altura los perfiles predominantes son el triangular y el recto de 30°. Estos dos perfiles amortiguan perfectamente el sonido en 100 Hz, 400 Hz, 1500 Hz y 4000 Hz. Es de destacar que ahora a 4000 Hz es mejor el funcionamiento del perfil recto a 30° que el de 90° al contrario que en las alturas de 0 m y 20 m

## 6. Conclusiones

Tras el estudio realizado a los cuatro perfiles; en las tres alturas se puede observar que el perfil que parece más adecuado, es el recto que forma 30° con la vertical, ya que ha dado los mejores resultados generales en la mayor parte de las alturas. Sin embargo debemos hacer referencia a los posibles errores en la ejecución del estudio (que siempre habrá que tenerlos en cuenta para comprobar la fiabilidad de los resultados); a continuación nombraremos algunos de ellos:

- Reflexión del ruido en paredes, suelos y otros objetos ya que se trataba de una clase cerrada.
- La pantalla se encontraba en una mesa apoyada en cuatro puntos, es posible que se puedan reflejar el sonido entre la pantalla y la mesa.

30. Laura Abad Toribio, Rafael Magro Andrade, María de la O Moreno Balboa y Marta Serrano Pérez

---

- Las medidas se deberían repetir el número suficiente de veces, de forma que pudiésemos realizar un análisis estadístico para obtener la línea de tendencia y poder obtener algún modelo de comportamiento

Debido a que la difracción del sonido sobre la cumbrera de la pantalla acústica es la que condiciona la eficacia de la misma, investigar como la sección transversal de la coronación puede influir en la atenuación del nivel de intensidad, podría suponer grandes mejoras en su construcción. Si bien este es un estudio preliminar sobre la validez de la maqueta, el objetivo final de la investigación es poder conseguir una relación entre la tipología del borde superior de la pantalla acústica y el nivel de atenuación sonora resultante al otro lado del apantallamiento. La aplicación real de los datos obtenidos permitiría lograr una mejora en la calidad acústica ambiental realizando mediciones al otro lado de la pantalla. El empleo de perfiles especiales puede ser interesante, además de por razones estéticas para evitar alturas excesivas de pantalla.

En un posterior estudio se realizará un modelo para estudiar la atenuación usando el diseño factorial de experimentos y un mapa de ruido barriendo a distintas alturas y a distintas distancias de pantalla.

## 7. Agradecimientos

Agradecemos a la Fundación UAX y al Banco de Santander el habernos concedido el Proyecto: **“MORFOLOGÍA DE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS. ESTUDIOS DE DIFRACCIÓN EN EL BORDE DE LA PANTALLA”** y a D. Jorge Huete Sánchez la ejecución de los planos de la maqueta.

## 8. Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS). "*Guidelines for Community Noise.*" (<http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>). Ginebra, 1999.
- [2] del Saz S, "*Tráfico rodado y efectos externos: Valoración económica del ruido*" *Ekonomiaz: Revista vasca de economía*, nº57, 2004, 22 páginas

- [3] L.C. den Boer, A. Schrotten “*Traffic noise reduction in Europe, Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise*”, CE Delft, March 2007
- [4] Fontalba M.A. et al, Tecniacústica 2006 “*Instalación de pantallas acústicas. Procedimiento a seguir.*”
- [5] Redfearn, S.W. “*Some acoustical source-observer problems.*”, Phil. Mag. Ser. 7(30), pp. 223, (1940)
- [6] Maekawa, Z. “*Noise reduction by screens.*” Appl. Acoust. Vol.1, pp. 157-73, (1968)
- [7] Kurze U.J., “*Noise reduction by barriers.*” J. Acoust. Soc. Am. Vol. 55, pp.504-18, (1974)
- [8] *Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.*
- [9] Segues Echazarreta, F., Trigueros Rodrigo, J., Magro Grande, S., Perera, P., Bañuelos, A., Diaz Sanchidian, C., Alberche Arquer, G., Alegre Marrades, D., Ruza Tarrío, F. “*Curso sobre ruido producido por infraestructura de transporte*”. Madrid: CEDEX, (1998).
- [10] Salas, R.A.; Simón, F.; Pfretzschner, J. “*Protección contra el ruido de tráfico: ¿pantallas o carreteras en trinchera?*” Instituto de Acústica, CSIC. Madrid (1999).
- [11] M.Serrano, R.Magro, L.Abad, T.García, “*Estudio de la tipología de las pantallas acústicas. Normativa y estado del arte*”. Tecnología@ y desarrollo/Medioambiente y Desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.VII. 2009.
- [12] J. S. Lamancusa, “*Noise Control - Outdoor Sound Propagation*”. The Pennsylvania State University, 2002.
- [13] Tarrero Fernández. et al, Tecniacústica 2005 “*Comprobación de la bondad del Software de simulación acústica Cadna/a*”
- [14] Sommerfeld A, “*Vorlesungen über Theoretische Physik*”, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1964.
- [15] Arenas , J. (1996). “*Estudio sobre la difracción y atenuación introducida por las barreras acústicas*”. Tesis de Magister en Física. Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 1996.

32. Laura Abad Toribio, Rafael Magro Andrade, María de la O Moreno Balboa y Marta Serrano Pérez

- 
- [16] F. Simón, “*Caracterización acústica de pantallas anti-ruido mediante un índice global*”, Tesis Doctoral, U. Complutense, Madrid (1996)
- [17] A. D. Pierce “*Diffraction of sound around corners and over wide barriers*”, JASA 55, (1974), 941-955]
- [18] A.D. Pierce, “*Acoustics*”, Ed. Acoustical Society of America, New York, 1994.
- [19] W.J Hadden, A.D. Pierce, “*Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations*”, J. Acoust. Soc . Am. .,69, 5, 1266-1276, 1981.
- [20] May D. N., Osman M.M., “*High way noise barriers; new shapes*”, Journ. of Sound and Vibration, vol 71, pp. 73-101, (1980)
- [21] Esteban David Olmos Cancino ,”*Evaluación de la pérdida de inserción de una barrera acústica aplicada en un proyecto lineal*”, Tesis doctoral, Universidad de Valdivia, 2002
- [22] Hothersall, D. C., Crombie, D. H., “*Prediction and the effects of parallel road traffic noise barriers*”, Proc. I. O. A., vol.14, pp 673-676, (1992)
- [23] Wirt L.S., “*The control of diffracted sound by means of Thnadners (shaped noise barriers)*”, Acoustica, vol. 42, pp. 73-88, (1979)
- [24] Fujiwara, K., Furuta, N. “*Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge.*” Noise Control Eng. J. vol. 37, pp. 5-11, (1991)
- [25] Keller J. B., “*Geometrical theory of difracction*”, J. Opt. Soc. Am. Vol.52 (2) pp.116-130, (1961)
- [26] Pfrezschner, J., Simón, F., Burgos, M. J. “*¿Se justifican las pantallas acústicas con cumbrera circular?*” Proc. TecniAcústica, pp. 159-162, (1995)
- [27] Cohn, Louis F. and Roswell A. Harris. Special Noise “*Barrier Applications: Literature Review*” - Task 1 (draft). Louisville, KY: University of Louisville, December 1991.