

ÍNDICE EVALUADOR DE LA CAPACIDAD DE PROTECCIÓN DE PANTALLAS ACÚSTICAS ANTIRUIDO

REFERENCIA PACS: 43.50.Gf

F. Simón, J. Pfretzschner
Instituto de Acústica (CSIC)
Serrano 144
28006 Madrid. España
Tel: 34 915 618 806
Fax: 34 914 117 651
E-Mail: iacjp36@ia.cetef.csic.es

ABSTRACT

In previous works, the authors proposed a single number rating index useful to describe the acoustic protection of a noise barrier under ordinary conditions. That index was based on the asymptotic properties of the behaviour of the Insertion Loss function with the reception distance.

A new index, well suited for short reception distances, has been developed, based on the directive properties of each barrier top end.

The frequency dependent index can be averaged for the representative frequency bands of the intrusive noise, in order to get a single rating number for each type of noise barrier.

RESUMEN

En anteriores trabajos, los autores han propuesto un índice descriptor de la capacidad de protección de una pantalla acústica, atendiendo a diversas circunstancias (con y sin reflexiones en el terreno, con o sin cumbreras, etc.), basado en las propiedades asintóticas que presenta la función de pérdidas de inserción en función de la distancia de recepción.

En esta ocasión, se presenta un nuevo índice mas adecuado para distancias cortas de recepción, en donde la directividad de la cumbrera juega un papel relevante. Si bien un índice de directividad es siempre función de la frecuencia, podría establecerse un índice ponderado, para cada tipo de barrera, que promedie las bandas de frecuencias mas representativas del espectro de ruido para el que la barrera ha sido diseñada.

FUNDAMENTOS

La propuesta consiste en caracterizar, mediante un índice de número único el comportamiento directivo de cada tipo de barrera. El índice obviamente debe depender de la dirección espacial de observación y de la frecuencia radiada por la fuente acústica de que se trate, para una posición espacial fija de ésta respecto de la barrera. La definición, o mejor dicho la evaluación depende además del tipo de fuente: puntual, lineal, coherente, no coherente, etc.

Como patrón de referencia proponemos la más sencilla (y mejor estudiada), pantalla plana seminfinita, barrera a la que habrán de referirse las posibles configuraciones: pantallas con distintos tipos de cubrerías (cilíndricas, en T, con subpantallas, laterales, etc.), pantallas dobles, pantallas con espesor, etc.

El principio de funcionamiento se basa en considerar en cada caso que en el borde equivalente se produce una serie de fuentes secundarias, cuya radiación directa y su resultante de la actuación conjunta de las mismas depende de las características constructivas de la barrera (aparte de la posición y tipología de la fuente emisora, como anteriormente se ha especificado). Es decir trasladamos el problema a una situación bien conocida en el campo de la electroacústica: asociación de fuentes en "arrays" para formar con ellos diversos tipos de columnas acústicas y/o radiadores bidimensionales.

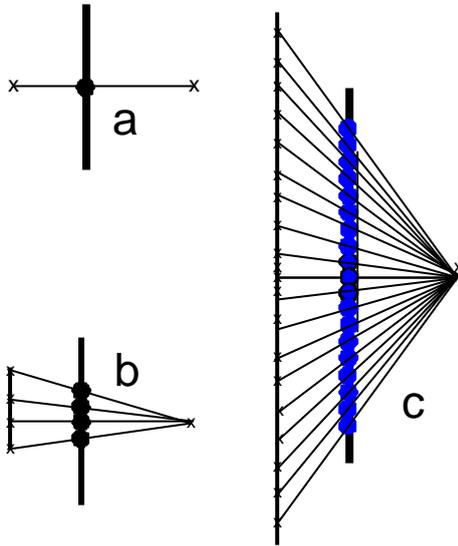


Figura 1

El caso más sencillo corresponde al de una fuente única frente a una pantalla plana (como sucede con el apantallamiento de una máquina o bien un puesto de trabajo protegido por una mampara de oficina). El paso siguiente correspondería al de una fuente lineal de longitud finita desplazándose paralelamente a una pantalla seminfinita (vehículo largo en carretera, o ferrocarril) y por último una vía de tráfico frente a una pantalla seminfinita. (figura 1).

De todos es conocido que las funciones analíticas que controlan estos procesos parten de expresiones tan simples como la ecuación:

$$D(f, \mathbf{q}) = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2} k L \text{sen}(\mathbf{q})\right)}{\frac{1}{2} k L \text{sen}(\mathbf{q})} \quad (1)$$

en donde k es el número de onda y L la longitud total de la alineación. Esta ecuación se puede complicar enormemente como sucede con las correspondientes alienaciones para un número n de fuentes discretas y cuyos elementos radiantes la amplitud y fase de la señal siguen distribuciones que corresponden a los coeficientes de series de tipo binomial, Dolph - Tchebitchef, etc. en las que el fin principal se centra en la eliminación o el control de los lóbulos laterales respecto del principal, con el objeto de realizar radiadores con una dirección preferente, y con ello resolver difíciles problemas de sonorización en espacios abiertos o confinados.

Aceptando este punto de partida, y supuesta la igualdad de las fuentes secundarias situadas sobre el borde difractor, se tienen dos planos principales de directividad, que en la figura 1 coinciden con el plano del papel y otro perpendicular al mismo. En el plano del dibujo se tendrían unos diagramas cuyo lóbulo principal se estrecha a medida que el número de fuentes aumenta, dando en la práctica soluciones análogas para 1a) y 1b) mientras que en 1c), al ser infinita la longitud de la alineación (al serlo la fuente), y para un punto de recepción fijo se obtiene un lóbulo muy estrecho de radiación máxima que corresponde a una función de directividad cero como se deduce de la función *sinc* representada en la ecuación 1 al tender L a infinito.

Por el contrario, el diagrama de radiación correspondiente a la directividad de las fuentes secundarias según un plano perpendicular al del papel, será el mismo para cualquiera de las configuraciones, ya que por razones de simetría solo depende de las características directivas de cada fuente (supuestas iguales) según este plano, que a su vez son función de las características estructurales del borde o superficie difractora.

Debido a esta invarianza, se ha elegido este modelo de dos dimensiones para el cálculo del índice de directividad, que se obtiene sin mas que expresar logarítmicamente la relación, en *dB*, entre las áreas cubiertas por el diagrama de directividad y el de un sector circular con la misma variación angular y cuyo radio iguale al valor de radiación máxima del diagrama polar anterior.

Cuanto mayor sea el número obtenido tanto más directiva será la fuente resultante.

El índice de directividad de una agrupación de fuentes (alineación según una dirección, dos direcciones, círculo, etc.) se obtiene sin mas que dividir los diagramas polares por el de una fuente omnidireccional cuya amplitud coincida con la máxima de la agrupación, e integrar para todo el espacio (ángulo sólido 4π).

El caso dual para las barreras acústicas consistiría en dividir la presión difractada por la pantalla por la producida por una fuente omnidireccional cuya amplitud coincida con la de radiación máxima difractada e integrar para todo el espacio de sombra (limitado por el plano posterior de la pantalla y el plano de iluminación directa). Sin embargo, en el caso de pantallas seminfinitas excitadas por una fuente puntual, únicamente se debe considerar la emisión directiva correspondiente a la onda difractada, por lo que se establece una restricción espacial comprendida angularmente entre el plano posterior a la pantalla y la recta que delimita la zona de iluminación directa.

PANTALLA SEMINFINITA

Los diagramas de directividad principales según el plano perpendicular al borde de la pantalla, se obtendrán para una posición del ángulo de incidencia, θ_0 , comprendido entre $3\pi/2$ y 2π , y el ángulo de difracción θ , entre 0 y $\theta_0 - \pi$ (línea de mira).

Las funciones de directividad de todos los objetos difractores y en especial de las barreras dependen de la frecuencia y del ángulo de incidencia de la fuente respecto de la barrera (θ_0) por lo que éste debería normalizarse a un ángulo especificado (por ejemplo $\theta_0 = 5\pi/4$) con objeto de poder comparar la eficacia de cada uno de los dispositivos considerados.

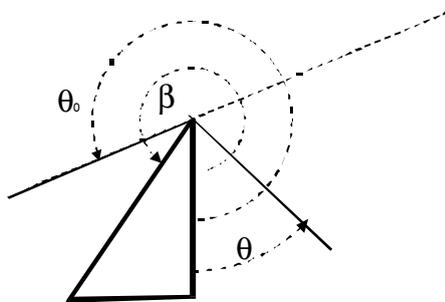


Figura 2

Dado que para las alineaciones de fuentes acústicas los diagramas de directividad y demás parámetros asociados deben referirse a las distancias lo suficientemente alejadas del dispositivo (campo lejano o zona de Fresnel), en el caso de las barreras acústicas esta condición implica posiciones en un campo lo suficientemente lejano para situarnos sobre la asíntota de la función de pérdidas por inserción, al objeto de independizar el valor del índice de directividad del radio vector con origen en el vértice de difracción en el que se sitúa la fuente acústica virtual.

Al igual que sucede con las agrupaciones lineales de altavoces, las expresiones analíticas que definen el índice de directividad no son sencillas, por lo que se expresa de forma compacta en su versión integral o la que se considere más adecuada. En el caso de las pantallas, la presión difractada puede obtenerse a través de los conocidos algoritmos de Keller, Kurze, Tatge, etc. Sin embargo para este caso hemos preferido utilizar las expresiones de Pierce [1] ya que las otras presentan soluciones divergentes de la presión difractada para la línea de transmisión directa (línea que une la fuente con el borde difractor). Además las expresiones de Pierce presentan la ventaja añadida de poder utilizarse para cualquier tipo de elementos difractores en cuña.

Según este autor, la presión difractada por el borde de una cuña o de una pantalla (cuña degenerada en la que el ángulo exterior es 2π) se expresa:

$$p_{Dif} = \frac{e^{jkL} e^{jp/4}}{L \sqrt{2}} [A_D(X_+) + A_D(X_-)] \quad (2)$$

para una onda esférica incidente.

En la expresión anterior las funciones $A_D(X_{\pm})$ son funciones integrales que se pueden expresar a través de las funciones de Fresnel:

$$A_D(X_{\pm}) = \text{signo}(X) \{f(|X_{\pm}|) + g(|X_{\pm}|)\} \quad (3)$$

siendo f y g las conocidas integrales de Fresnel.

El valor del argumento X_{\pm} en función de los ángulos de incidencia, difracción, y exterior a la cuña (β), viene dado a través de la expresión:

$$X_{\pm} = \sqrt{\frac{2rr_0}{\mathbf{l}(r+r_0)} \frac{\cos(\mathbf{np}) - \cos(\mathbf{n}(\mathbf{q} \pm \mathbf{q}_0))}{\mathbf{n} \text{sen}(\mathbf{np})}} \quad (4)$$

siendo $v = \pi / \beta$ (figura 2)

Pierce sustituye las funciones integrales de Fresnel por los primeros términos de los desarrollos asintóticos a través de dos series alternantes que utiliza para distancias cortas o largas del borde difractor. Por nuestra parte, hemos utilizado los desarrollos polinómicos de Hastings, que resultan mucho mas apropiados para el cálculo numérico del conjunto de las expresiones.

La función del índice de directividad restringido al semiespacio receptor (zona de sombra) se puede expresar a través de la ecuación:

$$ID = 10 \log \frac{\int_{\Omega} p_{Dif}^2(f, \mathbf{q}, \mathbf{b}) d\Omega}{\int_{\Omega} p_{DifMax}^2 d\Omega} \quad (5)$$

en donde p_{DifMax} corresponde al valor máximo de la presión difractada por el borde. El ángulo sólido de integración \mathbf{W} cubre el semiespacio receptor (zona de sombra).

EJEMPLOS

Como se ha comentado anteriormente, para cada tipo de barrera el índice de directividad depende del ángulo de incidencia y de la frecuencia. Dadas las escasas comparaciones existentes en la bibliografía entre la eficacia de barreras planas y cuñas con ángulo exterior variable hemos creído conveniente establecer una serie de comparaciones entre ambos tipos de barreras acústicas que ayuden a un conocimiento mas profundo del comportamiento de las mismas, estudio ya iniciado en Tecniacústica 99 [2], en donde mostrábamos la mayor capacidad de protección de una pantalla plana frente a un diedro de ángulo recto .

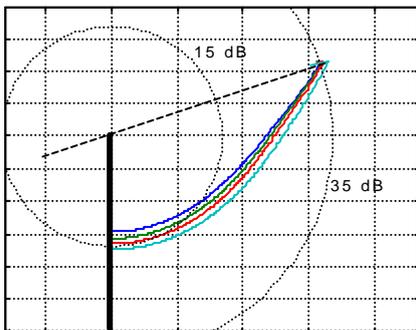


Figura 3

Así en la figura 3, y para una frecuencia de emisión de 600 Hz

(representativa del ruido de tráfico), se muestran los diagramas polares de una pantalla plana seminfinita (en color azul) y los de tres diedros con ángulos interiores de 30° , 45° y 60° (colores verde, rojo y celeste respectivamente) para un ángulo de incidencia de 290° calculados a través de la ec. (2). Puede comprobarse la gran similitud existente entre los diagramas, que como es sabido corresponden a la variación angular de la presión difractada por cada tipo de vértice. En la figura, representada en coordenadas polares, se ha superpuesto la pantalla plana así como la línea de mira fuente – pantalla a efectos didácticos.

Los índices de directividad de todas las configuraciones anteriores toman un valor muy parecido, lo que indica la dependencia de esta magnitud con el tipo físico de cumbre (en el caso que nos ocupa se trata de un vértice). Con objeto de resaltar este mecanismo, se muestra en la figura 4 la directividad de una pantalla plana (azul) y la de una cumbre cilíndrica de 40 cm de radio (verde) para una frecuencia de 600 Hz y $\phi = 330^\circ$. Puede comprobarse la mayor direccionalidad de este tipo de dispositivos para ángulos de recepción inferiores a 90° [3], lo que les hace idóneos para su colocación en carreteras elevadas. Sin embargo no presenta ventaja alguna para ángulos de recepción mayores de 90° e incluso puede resultar menos directivo que las pantallas planas. El número de mínimos aumenta con la frecuencia así como su magnitud.

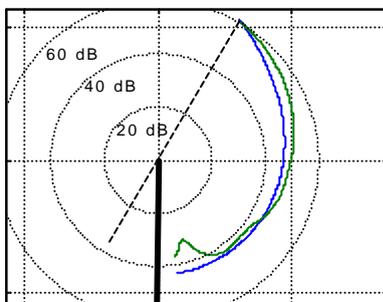


Figura 4

La figura 5 muestra la variación del índice de directividad con la frecuencia para una pantalla plana seminfinita, para ángulos de incidencia de 300° (verde) y 330° (azul). La curva presenta una pendiente de 1.5 dB / octava aproximadamente a medida que aumenta la frecuencia. Recuérdese que las pérdidas por inserción y/o la presión difractada por estos dispositivos presentan una pendiente de 3 dB/oct. con la frecuencia.

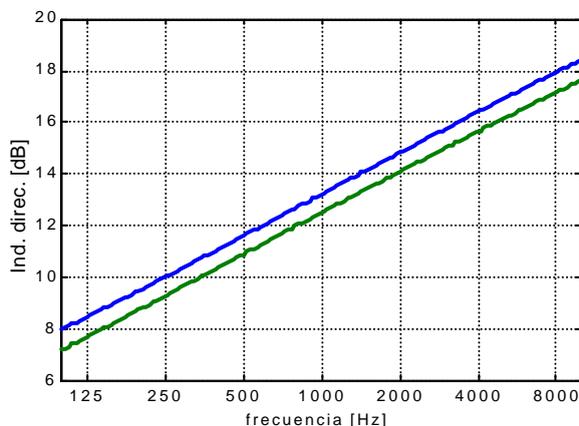


Figura 5

Para otros ángulos de emisión θ_0 se obtienen curvas paralelas a la de la figura. Idéntico comportamiento sucede para barreras en forma de diedros, independientemente del valor del ángulo interior de los mismos, si se mantienen constantes los demás parámetros.

Con el fin de completar el estudio, en la figura 6 se muestra la variación del índice de directividad con el ángulo de incidencia y con el ángulo exterior del diedro

Nuevamente no se encuentra diferencias apreciables entre los resultados correspondientes a las pantallas planas y cuñas con distinto ángulo de apertura; únicamente en el campo de actuación que queda restringido a la zona de sombra, que disminuye a medida que aumenta el ángulo interior de apertura. Lógicamente la longitud de las curvas disminuye progresivamente desde la correspondiente a la pantalla plana (azul) en función de la anchura creciente del ángulo interior del diedro.

También puede observarse en la gráfica las limitaciones de las expresiones asintóticas de Pierce para ángulos de incidencia θ_0 mayores de 350° .

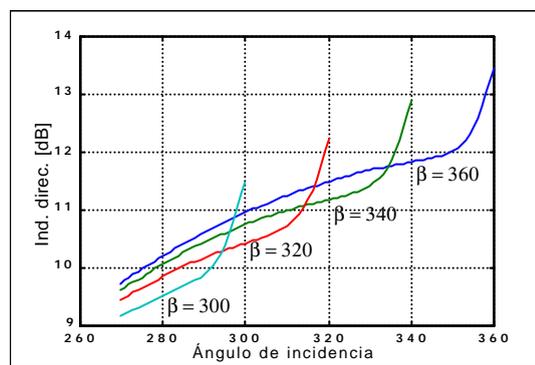


Figura 6

CONCLUSIONES

Es de destacar la gran similitud de los diagramas de directividad por vértices rectos (cuñas y pantallas), lo que demuestra la importancia del tipo de borde en los fenómenos de difracción. En este caso y dada su dependencia espectral bastaría calcularla para una única frecuencia de referencia

Las pantallas y cuñas son sistemas muy directivos, cuya mayor capacidad de protección se concentra en ángulos pequeños de difracción ($\theta < 45^\circ$). Nótese que las columnas acústicas con un índice de directividad > 9 se consideran altamente directivas, resultando idóneas para la configuración muy controlada de radiación acústica en grandes espacios abiertos o en recintos muy reverberantes.

Para sistemas difractores complejos (cubiertas en T, en U, etc.) si no se dispone de algoritmos algebraicos que los describan no queda otra solución que establecer resultados a partir de modelos experimentales o por tratamiento numérico.

El índice de directividad, junto con el propuesto en anteriores trabajos [4] sirve para calificar de forma muy descriptiva las capacidades de protección acústica de estos dispositivos; ambos dependen sólo de las características del semiespacio emisor y de las características acústicas de la fuente.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 A.D. Pierce, Diffraction of sound around corners and over wide barriers, J. Acoust.Soc. Am. 55, 941-954, 1974.

2. R.A. Salas, F. Simón, J. Pfretzschner, Protección contra el ruido de tráfico: ¿Pantallas o carreteras en trinchera?, Tecniacústica 99, 1999.
3. J. Pfretzschner, F. Simón, Aplicación de las barreras acústicas provistas de una cumbrera cilíndrica en el apantallamiento del tráfico rodado. Tecniacústica 96, 1996
4. F. Simón "Caracterización acústica de pantallas antirruído mediante un índice global" Tesis doctoral UCM 1997

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto de Investigación AMB 98-1029 del Plan Nacional de I+D de la DGICYT.