

UNA ALTERNATIVA PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DE PANELES PERFORADOS

Jesús Carbajo¹, William Cardenas², Jeniffer Torres², Jaime Ramis², David Molina³

¹Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, España
{jesus.carbajo@ua.es}

²Instituto de Ciencias y Física Aplicada a la Tecnología, Universidad de Alicante, España
{wacp1@alu.ua.es, jtr17@alu.ua.es, jramis@ua.es}

³ideatec[®], Pol. Industrial Santa Fe, Novelda, España
{oficinatecnica@ideatec.es}

Resumen

El uso de paneles perforados constituye hoy en día una atractiva alternativa a los materiales absorbentes acústicos tradicionales como las fibras y las espumas. Sus propiedades acústicas vienen determinadas por el tamaño de sus perforaciones, la porosidad, el espesor del panel, y el espesor de la cavidad formada entre éste y una pared rígida. En este trabajo se propone el uso de la técnica de holografía acústica NAH (Near-field Acoustic Holography) para el análisis del campo acústico en las proximidades del panel perforado. La técnica NAH nos permite estudiar el efecto de la interacción entre orificios para las frecuencias de interés a partir de su respuesta de fase. También se obtiene la absorción acústica de este tipo de resonadores a partir de un modelo analítico y un procedimiento computacional en elementos finitos. Dichos modelos son validados con medidas experimentales en un tubo de impedancia para diferentes muestras, presentando una buena correlación con las predicciones.

Palabras-clave: absorción sonora, paneles perforados, NAH, resonador.

Abstract

The use of perforated panels is today an attractive alternative to traditional acoustic absorbent materials such as fibers and foams. The acoustic properties are determined by the size of its perforations, the porosity, the panel thickness, and the thickness of the air cavity between the panel and a rigid wall. This paper proposes the use of the NAH (Near-field Acoustic Holography) technique for the analysis of the acoustic field in the vicinity of the panel. The NAH technique allows us to study the holes interaction effect for the frequencies of interest from its phase response. The acoustic absorption of these types of resonators is obtained through analytical and finite element modeling. A comprehensive experimental study is conducted in an impedance tube for different samples, showing a good agreement with the predicted results.

Keywords: sound absorption, perforated panels, NAH, resonator.

PACS no. 43.10.Ce, 43.55.Ev, 43.60.Sx

1 Introducción

Los materiales absorbentes acústicos son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones de control de ruido y vibraciones. Sin embargo, algunos materiales como la fibra de vidrio o la espuma no suelen ser renovables y se deterioran con el tiempo. Así por ejemplo, al emplearse en el interior de revestimientos quedan expuestos a residuos que pueden provocar que pierdan sus capacidades como absorbentes sonoros. Por otra parte, dado que los efectos a largo plazo en la salud son desconocidos, es recomendable que se minimice la exposición a los mismos, debiendo emplearse otros materiales principalmente en aquellas instalaciones en las que se manipulen alimentos o que estén destinadas al cuidado de personas enfermas.

Una de las más atractivas alternativas a las fibras y las espumas es el empleo de paneles perforados formando un resonador con una cavidad de aire o plenum. Normalmente se fabrican a partir de plástico o metal, aunque también pueden ser de cartón o madera contrachapada, pudiendo emplearse de manera complementaria o como reemplazo de otros materiales en entornos que requieran unas buenas condiciones de limpieza y salubridad. Sus propiedades acústicas vienen determinadas principalmente por el tamaño de sus perforaciones d , la distancia entre centros de las perforaciones b , la porosidad del panel f , su espesor t , y el espesor D de la cavidad formada entre éste y una pared rígida. Éstos ofrecen una mayor resistencia acústica cuando sus perforaciones son de tamaño sub-milimétrico (microperforados), debido a que la fricción en las mismas se traduce en un aumento de la atenuación sonora a frecuencias bajas y medias [1, 2]. Un aumento del espesor de la cavidad de aire o del panel también puede mejorar la absorción en baja frecuencia, aunque las limitaciones de espacio restringen en gran medida el empleo de este tipo de soluciones, pudiéndose tomar otro tipo de medidas como se verá más adelante. Para caracterizar este tipo de materiales es común obtener experimentalmente su coeficiente de absorción a incidencia normal realizando medidas en tubo de impedancia según la normativa ISO 10534 [3], aunque también existen modelos teóricos que se aproximan de forma satisfactoria, como es el caso del modelo de Atalla y Sgard [4]. Sin embargo, la gran mayoría de estos modelos son válidos únicamente en régimen lineal y para paneles que presentan una distribución regular de sus perforaciones, lo cual no siempre es cierto en la práctica.

En el presente trabajo se han caracterizado experimentalmente una serie de muestras perforadas homogéneas de geometría simple (orificios circulares) realizando medidas en tubo de impedancia. Los resultados obtenidos se han comparado con los que ofrece el modelo de Atalla y Sgard, obteniendo una buena correlación entre los mismos. También se ha implementado un modelo en elementos finitos que se ajusta satisfactoriamente al modelo teórico, siendo de gran utilidad en el estudio de sistemas cuya cavidad de aire no presenta una geometría regular o para sistemas más complejos que agrupen varios paneles perforados. Por último, se presenta una configuración experimental que permita estudiar el campo acústico en las proximidades del panel perforado empleando la técnica de NAH (Near-field Acoustic Holography) y se discuten las presuntas mejoras asociadas al empleo de paneles perforados heterogéneos.

El presente trabajo se estructura de la siguiente forma: en la Sección 2 se presenta el modelo físico de Atalla y Sgard y las ecuaciones para la obtención de la impedancia acústica de un panel perforado; en la Sección 3 se detalla el modelo en elementos finitos implementado y los montajes experimentales para las medidas en tubo de impedancia y en campo cercano, así como los fundamentos de NAH necesarios para obtener el campo acústico en las proximidades del panel perforado; en la Sección 4 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos con cada uno de los procedimientos expuestos; finalmente se resumen las principales conclusiones del trabajo.

2 Modelo físico

La Figura 1 muestra el esquema de un panel perforado sobre el que incide un frente de onda plano, pudiendo considerarse dicho panel rígido y sus orificios una agrupación de tubos pequeños distribuidos de forma periódica a lo largo de su superficie. Cuando el tamaño de dichas perforaciones y la distancia entre las mismas son pequeños en comparación con la longitud de onda de trabajo, el aire en el interior de las mismas se mueve como un pistón rígido. La masa efectiva de dicho pistón es equivalente a la de un cilindro de aire de longitud algo mayor que el espesor del panel, siendo necesario realizar una corrección de orificio que contemple los efectos visco-resistivos en ambas caras del orificio y de oscilación de la masa adicional.

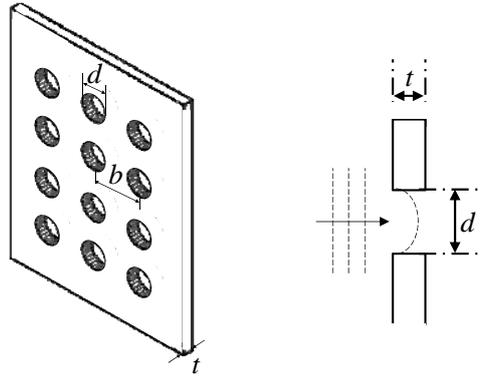


Figura 1 – Esquema de un panel perforado sobre el que incide una onda plana.

La mayoría de los modelos teóricos aproximados determinan sus propiedades acústicas considerando la impedancia acústica de un único orificio y utilizando la porosidad para obtener la impedancia del panel. Sin embargo, esto no es del todo válido cuando la separación entre orificios es pequeña, dado que se produce una interacción entre orificios adyacentes. Atalla y Sgard desarrollaron un modelo que contempla este efecto utilizando un planteamiento de fluido equivalente para llegar a una expresión de la impedancia superficial Z_s de un panel perforado con una cavidad de aire detrás:

$$Z_s = \frac{1}{f} jw r_e^{\%} t - jZ_0 \cot(kD), \quad (1)$$

donde Z_0 es la impedancia característica del aire, w la frecuencia angular, k el número de onda y $r_e^{\%}$ la densidad efectiva del panel perforado, que está relacionada con la densidad del aire r_0 según:

$$r_e^{\%} = r_0 a_v \left[\frac{\alpha}{\beta} + \frac{sf}{jwr_0 a_v} G_J(w) \frac{\beta}{\alpha} \right], \quad (2)$$

siendo:

$$G_J(w) = \frac{\alpha}{\beta} + j \frac{4wr_0 a_v^2 h \frac{\beta}{\alpha}}{s^2 f^2 L^2 \frac{\beta}{\alpha}}, \quad (3)$$

y s la resistividad al flujo de aire estático ($s = 32h/f d^2$), h la viscosidad dinámica del aire, L la longitud característica viscosa que es igual al radio de las perforaciones y a_v la tortuosidad geométrica. Una de las consecuencias derivadas del fenómeno de interacción entre orificios es la distorsión de la onda acústica en torno a cada orificio [5]. Jaouen y Becot [6] desarrollaron una

corrección de orificio e_e válida para cualquier valor de porosidad en el rango [0-1] empleando una aproximación polinomial de la forma:

$$e_e = (1 - 1.13x - 0.09x^2 + 0.27x^3) \frac{4d}{3p}, \quad (4)$$

donde x es la relación entre el diámetro de perforación d y la distancia entre centros de los orificios b , obteniéndose la tortuosidad para un panel perforado con una cavidad de aire detrás según:

$$a_v = 1 + \frac{2e_e}{t}. \quad (5)$$

El coeficiente de reflexión puede obtenerse como:

$$R = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0}, \quad (6)$$

y el coeficiente de absorción viene dado por:

$$a = 1 - |R|^2. \quad (7)$$

Por tanto, disponiendo de las características geométricas de un panel perforado y del espesor de su cavidad posterior es posible, resolviendo las expresiones anteriores, estimar su impedancia acústica y coeficiente de absorción a incidencia normal.

3 Metodos

3.1 Medidas en tubo de impedancia

Con el fin de determinar experimentalmente las propiedades acústicas de distintos tipos de paneles perforados se han realizado unas medidas en tubo de impedancia siguiendo las instrucciones de la normativa ISO 10534. El tubo empleado tiene una sección circular de 102 mm de diámetro, y se disponen sobre el mismo dos micrófonos de ½ pulgada (Brüel&Kjær tipo 4188) rasantes con la superficie interior del tubo y separados una distancia de 85 mm, estando a una distancia de 235 mm el más lejano a la muestra. La frecuencia de corte inferior del tubo obtenida para estas condiciones según la normativa es 201 Hz. En un extremo del tubo se colocó un altavoz y en el otro la muestra de panel perforado a caracterizar, separada una distancia D del extremo rígido del tubo o émbolo. Para excitar el sistema se empleó un generador de ruido blanco conectado al altavoz a través de un amplificador. Para la adquisición se empleó una tarjeta de dos canales que incorpora un módulo de procesado. A partir de la función de transferencia entre los dos micrófonos se obtiene la impedancia superficial de cada muestra y su coeficiente de absorción.

Para calibrar el dispositivo experimental se realizaron una serie de medidas para un panel perforado de espesor $t = 3$ mm, diámetro de perforación $d = 1.6$ mm, distancia entre perforaciones $b = 9.6$ mm y porosidad $s = 1.7$ % con una cavidad de aire de espesor $D = 70$ mm. En la Figura 2 se muestran los valores máximos del coeficiente de absorción y resistencia acústica específica en función del nivel de presión sonora. El valor máximo del coeficiente de absorción aumenta al aumentar la presión sonora incidente para niveles por encima de aproximadamente 100 dB, debido principalmente a los fenómenos no lineales que se producen en los orificios del panel perforado,

mientras que la resistencia acústica específica normalizada permanece constante para niveles por debajo de dicho umbral, aumentando igualmente para niveles superiores. La frontera entre la región lineal y no lineal dependerá en gran parte de las dimensiones del panel perforado (diámetro de perforación, porosidad y espesor). Dado que el presente trabajo se basa en un modelo lineal, se mantendrán los niveles de presión sonora en el tubo por debajo de los 100 dB.

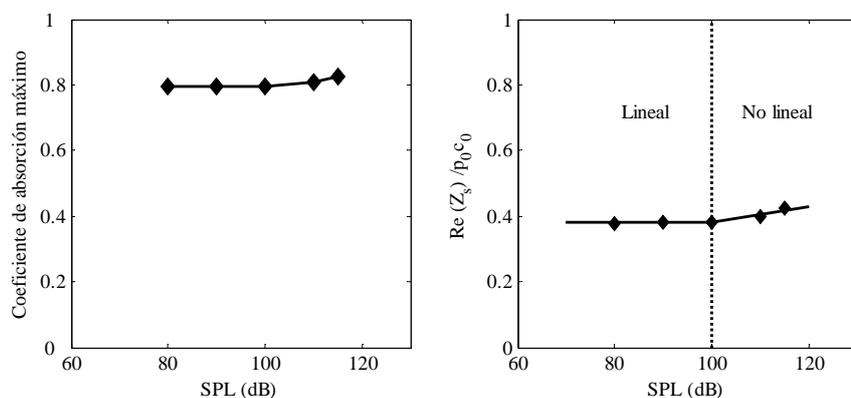


Figura 2 – Variación del coeficiente de absorción (izquierda) y resistencia acústica normalizada (derecha) máximos en función del nivel de presión sonora incidente para un panel perforado.

3.2 Modelo numérico en elementos finitos

El modelo teórico presentado del panel perforado, así como la gran mayoría de los existentes en la literatura, asume que el elemento absorbente es infinitesimal y no contempla el efecto de la geometría finita del mismo. Por otra parte, no solo son válidos para geometrías sencillas del resonador sino que no ofrecen detalles del campo acústico en las inmediaciones del mismo. A continuación se presenta un modelo en elementos finitos implementado con una herramienta software comercial que permite soslayar estas y otras limitaciones, estableciendo una base de utilidad para el diseño de absorbentes acústicos de este tipo.

El modelo se ha validado contrastando el mismo con el teórico de Atalla y Sgard. En un estudio numérico reciente, C. Wang y L. Huang [7] evaluaron las propiedades acústicas de distintos arrays de paneles perforados, implementando un modelo basado en una configuración bidimensional. En el presente trabajo se presenta un modelo que se basa en una configuración 2D simple como la de la Figura 3 y que consiste en un panel perforado rígido con una cavidad de aire detrás. Siguiendo la normativa ISO 10534, se conecta un tubo rectangular (un canal en el modelo 2D) al conjunto panel-cavidad en el modelo numérico, representando el tubo de impedancia del dispositivo experimental. Sobre el panel perforado incide una onda plana de amplitud unidad p_i que viene desde el lado izquierdo del tubo, siendo parte de esta energía acústica reflejada y el resto absorbida por el resonador. El campo acústico en el interior del tubo y la cavidad se rige por la ecuación de Helmholtz:

$$\tilde{\nabla}^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (8)$$

donde c_0 es la velocidad del sonido en el aire y p la presión acústica. Ambas regiones están acopladas por un término de impedancia acústica específica que hace referencia al panel perforado y que se determina mediante el modelo teórico anterior. Para evitar que la onda sonora reflejada en el perforado se mezcle con la incidente en el lado izquierdo del tubo, se implementa una condición de contorno

Dirichlet-Neumann en dicho extremo. También se asume que las paredes del tubo y la cavidad son rígidas, lo cual implica que la velocidad de partícula normal a dichos contornos es evanescente.

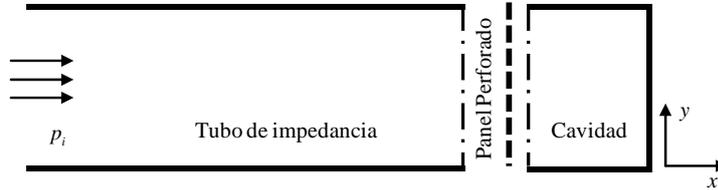


Figura 3 – Modelo numérico del panel perforado con cavidad de aire detrás.

En resumen, el procedimiento de modelado contiene dos dominios: el tubo de impedancia y la cavidad. El problema acústico se resuelve tomando la ecuación (8) y las condiciones de contorno especificadas. El efecto de las perforaciones se ha modelado con la impedancia acústica del modelo teórico. El acoplamiento entre ambos dominios se analiza empleando un módulo de la herramienta software que permite resolver ecuaciones diferenciales parciales. De este modo, y evaluando el campo acústico en las proximidades del panel perforado, puede obtener el coeficiente de absorción a incidencia normal según:

$$a = \frac{r_0 c_0 \int_0^h \hat{A}(p^*(y) \cdot v(y)) dy}{|p_i| h} \quad (9)$$

donde h es la altura del tubo, $v(y)$ la velocidad de partícula, \hat{A} denota la parte real de un valor complejo y el asterisco el complejo conjugado. En la simulación en elementos finitos, el tubo tiene una altura $h = 200$ mm. Los dominios de computación se han discretizado con elementos triangulares cuadráticos de Lagrange. El máximo tamaño de elemento empleado ha sido de 0.01 m, definiendo un total de 5096 elementos, cantidad más que razonable para el rango de frecuencias de trabajo.

3.3 Técnica de NAH

La holografía acústica en campo cercano (Near-field Acoustic Holography, en inglés) es una técnica que permite reconstruir el campo acústico en un espacio tridimensional a partir de la medida de la presión sonora cerca de la superficie de una fuente. Se trata de una herramienta de elevado potencial que, a diferencia de las técnicas microfónicas o intensiométricas convencionales, permite determinar con precisión la localización de una fuente sonora, especialmente cuando existen otras fuentes o elementos reflectantes cerca.

Una de las más comunes implementaciones de la NAH es la basada en la Transformada de Fourier [8], en la que para obtener la presión sonora en cualquier punto del espacio $p(x, y, z, w)$ se realiza la transformada inversa de Fourier del espectro angular de la presión sonora medida en lo que se conoce como plano de holograma $p(x, y, z_H, w)$ y que viene multiplicada por un propagador $G_p(k_x, k_y, z - z_H)$. Dicho espectro angular se obtiene a partir de una transformada espacial de Fourier de la presión sonora medida al dominio del número de onda.

Para obtener la velocidad de partícula $v(x, y, z, w)$ se empleará otro propagador $G_v(k_x, k_y, z - z_H)$ que obedece a la ecuación de Euler y depende del vector de número de onda $k(k_x, k_y, k_z)$, que indica la cantidad de energía que fluye en cada una de las direcciones del espacio. Así, multiplicando la presión en este plano de holograma por uno u otro propagador es posible reconstruir el campo acústico en cualquier plano paralelo a éste en el que no exista ninguna otra fuente, estando limitada esta metodología a fuentes que presenten una geometría plana.

$$p(x, y, z, w) = F_x^{-1} F_y^{-1} \{ F_x F_y \{ p(x, y, z_H, w) \} \times G_p(k_x, k_y, z - z_H) \} \quad (10)$$

$$v(x, y, z, w) = F_x^{-1} F_y^{-1} \{ F_x F_y \{ p(x, y, z_H, w) \} \times G_v(k_x, k_y, z - z_H) \} \quad (11)$$

$$G_p(k_x, k_y, z - z_H) = e^{jk_z(z_H - z)} \quad (12)$$

$$G_v(k_x, k_y, z - z_H) = \frac{k_z}{r_0 c_0} e^{jk_z(z_H - z)} \quad (13)$$

Para estudiar el campo acústico en las inmediaciones de un panel perforado, se preparó un montaje como el que muestra el esquema de la Figura 4. Dicha configuración emplea un tubo de impedancia como el que se usó para medir absorción pero sin émbolo en la parte trasera de la muestra perforada. De esta forma, quedando la cara posterior de la misma descubierta, se hizo uso de un sistema robotizado para recorrer un plano paralelo a la superficie del panel perforado midiendo el nivel de presión sonora con un micrófono de ¼ de pulgada (Brüel&Kjær tipo 4935) situado en la dirección normal al mismo. La resolución espacial de medida empleada a lo largo de cada una de las direcciones del plano de holograma fue de 3.1 mm y la distancia de separación respecto a la muestra de 1 mm. Se utilizó como señal de excitación una secuencia MLS, de forma que la correlación entre registros permitiese estudiar la respuesta en fase entre cada punto de medida.

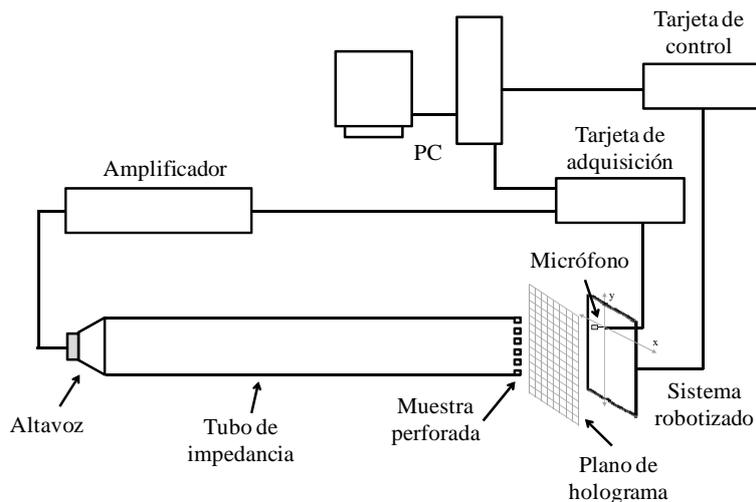


Figura 4 – Configuración experimental para las medidas de holografía acústica en campo cercano.

4 Resultados

4.1 Coeficiente de absorción a incidencia normal

En la Figura 5 se comparan las curvas del coeficientes de absorción a incidencia normal calculado a partir de las medidas en tubo de de impedancia acústica con el obtenido a partir del modelo físico expuesto. Las características geométricas de las muestras empleadas para el estudio experimental se muestran en la Tabla 1. Las medidas experimentales presentan una aceptable similitud con los resultados del modelo teórico, pudiendo apreciarse que un mayor diámetro de perforación y porosidad ofrece una menor absorción, aumentando asimismo la frecuencia de resonancia del sistema. La cavidad de aire empleada es $D = 70$ mm.

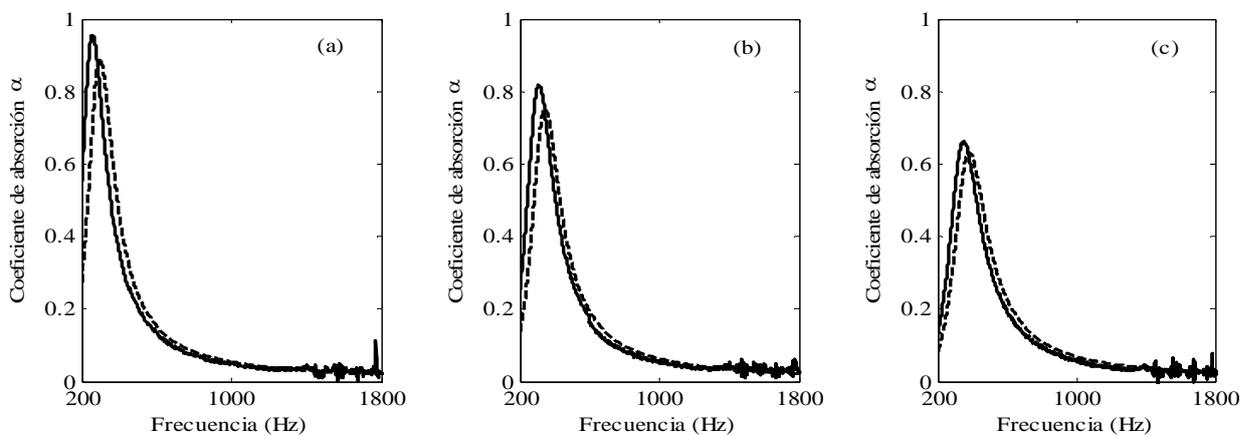


Figura 5 – Comparativa de los valores teóricos (-----) y medidos (—) del coeficiente de absorción de las distintas muestras de paneles perforados con una cavidad de aire $D = 70$ mm: (a) P1 (b) P2 y (c) P3.

En la Figura 6 se muestran los valores del coeficiente de absorción a incidencia normal medido y calculado a partir del modelo teórico para todas las muestras y dos espesores de cavidad. Ambos muestran una buena correlación, con un valor medio y desviación estándar de las diferencias de 0.01 ± 0.04 .

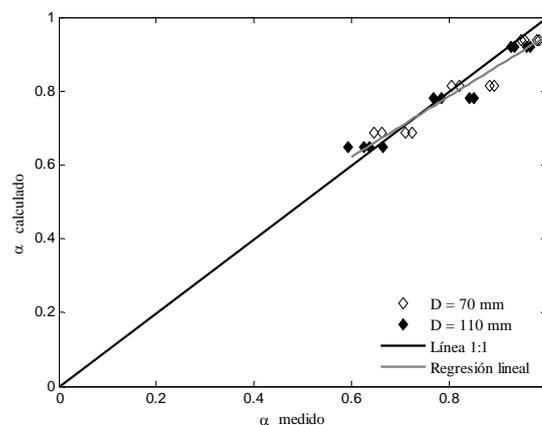


Figura 6 – Comparativa de los valores medidos y calculados del coeficiente de absorción de paneles perforados para $D = 70$ mm y $D = 110$ mm.

Tabla 1 – Dimensiones de las muestras perforadas.

Tipo	t (mm)	d (mm)	b (mm)	f (%)
P1	3	1.2	4.8	0.9
P2	3	1.4	7	1.3
P3	3	1.6	9.6	1.7

Anteriormente se presentaba un modelo en elementos finitos que ofrece una serie de ventajas entre las que cabría resaltar su utilidad en el estudio de geometrías de la cavidad de aire o plenum para las que no existe una solución analítica. Para validar dicho modelo se ha simulado una configuración con un panel perforado rígido de las características de la muestra P3 con una cavidad de aire de espesor $D = 70$ mm. Para dicha configuración, el coeficiente de absorción a incidencia normal puede calcularse analíticamente siguiendo el modelo físico de Atalla y Sgard, obteniendo prácticamente idénticos resultados para ambos casos, como se aprecia en la Figura 7.

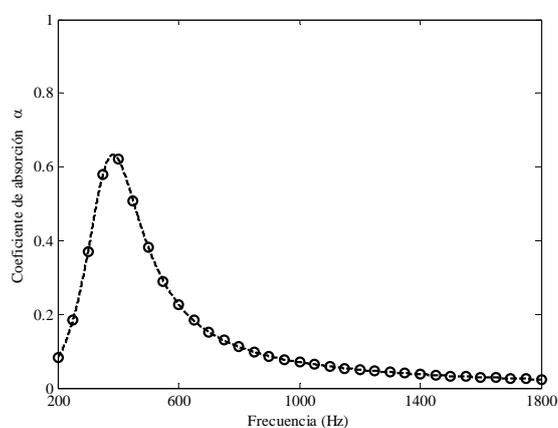


Figura 7 – Comparativa del coeficiente de absorción predicto por el modelo en elementos finitos (o) y por el modelo teórico de Atalla y Sgard (-----).

4.2 Interacción entre orificios

Aunque tanto el modelo físico como el modelo numérico se ajustan correctamente a los resultados experimentales obtenidos, en ocasiones puede resultar de interés disponer de información adicional del campo acústico en las proximidades del panel perforado. Midiendo la presión sonora en un plano cercano a la fuente y aplicando la técnica de NAH se pueden estudiar efectos como el de la interacción entre orificios del panel perforado. Esta aplicación podría ser de utilidad en el modelado de la impedancia del panel perforado en régimen no lineal o en el estudio de paneles perforados heterogéneos.

Para este propósito, se midió una muestra de panel perforado de $t = 12$ mm, $d = 8$ mm, $b = 32$ mm y $f = 2.46$ %. Aunque las dimensiones de esta muestra son algo mayores que las analizadas anteriormente, resultan de gran utilidad en el acabado de paredes en interiores al ofrecer una mayor robustez estructural y rigidez. La Figura 8.a muestra la distribución de velocidades en las dos direcciones coplanarias del holograma de medida superpuesta al nivel de presión sonora normalizado respecto al valor máximo en dicho plano para la frecuencia de 500 Hz. La Figura 8.b muestra a esa misma frecuencia la distribución de niveles de presión y velocidades pero en un plano perpendicular a la superficie de la muestra y alineado con dos de sus perforaciones. En ambos casos se han empleado

los propagadores previamente descritos. Dado que puede asumirse que el frente de onda que se propaga en el interior del tubo para esa frecuencia es plano, pueden identificarse claramente las regiones en las que se encuentran los orificios del panel perforado y en las que el campo acústico viene dado en gran parte por la contribución de ambos orificios.

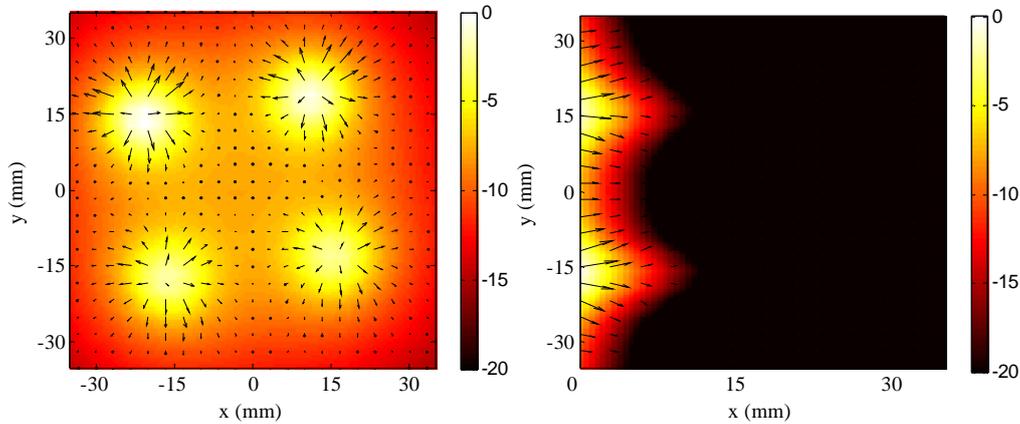


Figura 8 – Nivel de presión sonora normalizado y distribución de velocidades a 500 Hz:
 (a) Plano de holograma. (b) Plano perpendicular a la superficie de la muestra.

El estudio de la interacción entre orificios no es una tarea sencilla, dado que dicho efecto está siempre ligado a otros, siendo complicado estimar su contribución de forma individual. Además, en el caso de paneles homogéneos, un cambio en la distancia entre perforaciones vendrá siempre acompañado de un cambio en la porosidad del propio panel, no pudiendo asociar unívocamente dicho efecto a la modificación de dicho parámetro. Sin embargo, si el panel es heterogéneo es posible estimar este efecto teóricamente mediante el modelo de Atalla y Sgard, siendo necesaria una pertinente corroboración experimental de los resultados obtenidos. La Figura 9 muestra la variación del ancho de banda relativo, definido como el cociente de la diferencia $f_2 - f_1$ (frecuencia superior e inferior a las que la absorción máxima se reduce a la mitad) entre la frecuencia a la que se tiene el máximo de absorción f_{\max} , respecto a la distancia b entre centros de perforaciones (expresada en múltiplos del diámetro de perforación d) para un panel perforado y distintos espesores de cavidad D .

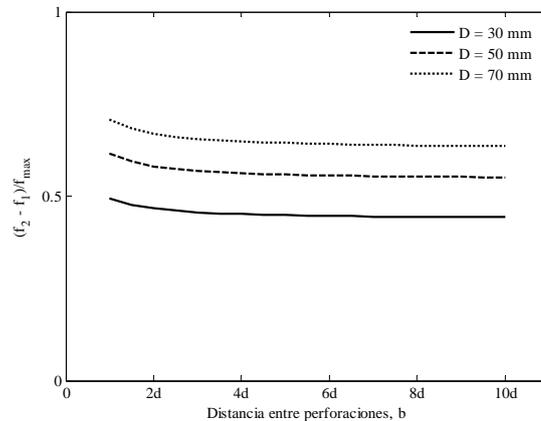


Figura 9 – Ancho de banda relativo en función de la distancia entre perforaciones para distintos espesores de cavidad D .

El ancho de banda relativo disminuye al aumentar la distancia entre perforaciones, siendo esto más notable para relaciones d/b grandes (típicamente, $b < 5d$). Esto es debido a los efectos visco-resistivos y de inercia, que producen una disminución de la resistencia y la masa añadida al ser mayor la región de interferencia entre perforaciones. Reduciendo la distancia entre perforaciones se pueden conseguir anchos de banda relativos prácticamente idénticos que al aumentar el espesor de la cavidad en 20 mm, suponiendo esto una mejora importante en los procesos de diseño y optimización de este tipo de soluciones, siendo necesario un estudio experimental que corrobore estas observaciones.

5 Conclusiones

La caracterización de paneles perforados resulta de gran interés al constituir estos una solución cada vez más frecuente para el control de ruido y vibraciones en diversos entornos. Para llevar ésta a cabo se ha preparado un dispositivo experimental de medida en tubo de impedancia y calculado el coeficiente de absorción a incidencia normal de distintos tipos de muestras perforadas. Los valores obtenidos se comparan con los calculados a partir del modelo teórico de Atalla y Sgard, llegando a resultados satisfactorios para distintas geometrías de las muestras y espesores de la cavidad de aire. También se ha implementado un modelo en elementos finitos, de gran utilidad para el diseño de este tipo de resonadores y escalable a sistemas más complejos como pueda ser una configuración en array de paneles perforados o cavidades irregulares para las que no existe una solución analítica. Los resultados de dicho modelo presentan una buena correlación con los obtenidos mediante el modelo teórico. En cuanto a las medidas en campo cercano, se ha empleado la técnica de NAH para propagar el campo acústico del holograma de medida, observando el fenómeno de interacción entre orificios de una muestra de panel perforado y discutiendo la mejora que puede suponer en el proceso de diseño de paneles perforados una distribución heterogénea de sus perforaciones.

Referencias

- [1] Maa, D. Y. Potential of Micro-perforated panel absorber. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 104, 1998, pp. 2861-2866.
- [2] Ingard, K.U. *Notes on sound absorption technology*, Noise Control Foundation, New York, 1994.
- [3] ISO 10534. Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [4] Atalla, N.; Sgard, F. Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 303, 2007, pp. 195-208.
- [5] Tayong, R.; Dupont, T.; Leclaire, P. Experimental investigation of holes interaction effect on the sound absorption coefficient of micro-perforated panels under high and medium sound levels. *Applied Acoustics*, Vol. 72, 2011, pp. 777-784.
- [6] Jaouen, L.; Becot, F. X. Acoustical characterization of perforated facings. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129 (3), 2011, pp. 1400-1406.
- [7] Wang, C.; Huang, L. On the acoustic properties of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers with different cavity depths. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 130 (1), 2011, pp. 208-218.
- [8] Williams, E. G. *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Near-field Acoustic Holography*, Academic Press, San Diego, 1999.