

Construcción de una cámara anecoica para la caracterización de la pérdida de transmisión sonora

(Construction of an anechoic chamber for characterization of the sound transmission loss)

Y. Piedrahita¹ y F. Fajardo²

¹Departamento de Física, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico

²Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Recibido em 14/9/2011; Aceito em 11/5/2012; Publicado em 7/12/2012

En este trabajo se realiza un estudio de la pérdida de transmisión sonora (PT) en diversos materiales de uso cotidiano, tales como: icopor, cartón, vidrio, algodón y fique. El montaje experimental consta básicamente de dos sonómetros y una cámara anecoica absorbente. Se muestra en detalle la construcción de la cámara anecoica utilizada para medir la PT , empleando materiales de bajo costo. Calculando la diferencia de las medidas nominales en los dos sonómetros ubicados dentro de la cámara anecoica se registran los datos de PT . Con los datos de PT en función de la frecuencia y barriendo un espectro en bandas de tercio de octava desde los 100 Hz hasta 5.000 Hz, se grafican distintas curvas que caracterizan el comportamiento acústico de los materiales estudiados. Se muestra la dependencia de la PT con la densidad y la estructura del material empleado para atenuar el sonido. Este experimento puede ser utilizado en cursos de física o ingeniería, como el de ondas o caracterización de materiales, para que los estudiantes exploren la capacidad de aislamiento sonoro de una gran diversidad de materiales disponibles fácilmente en su entorno.

Palabras-clave: pérdida transmisión, cámara anecoica, absorción sonido, atenuación.

In this paper a study of the sound transmission loss (PT) in various everyday materials such as styrofoam, cardboard, glass, cotton and sisal is performed. The experimental setup consists of two sound level meters and an absorbing anechoic chamber. It is shown in detail how to build with inexpensive materials the anechoic chamber used to measure the PT . From the difference in the nominal measures of the two sound level meters located inside the anechoic chamber the PT data are recorded. With the PT data as a function of frequency and sweeping the frequency spectrum in third octave bands from 100 Hz to 5.000 Hz, the different curves that characterize the materials acoustic behavior are plotted. We show the PT dependence with the density and structure of the material used to attenuate the sound. This experiment can be used in physics or engineering courses, like waves or materials characterization, for students to explore the sound insulation capability of a wide variety of materials readily available in their environment.

Keywords: transmission loss, anechoic chamber, sound absorption, attenuation.

1. Introducción

La física acústica es un área de gran importancia debido a que permite entre otras cosas explicar como se propaga el sonido y su interacción con diferentes medios. Como ejemplos de sus aplicaciones están la acústica arquitectónica y la acústica ambiental; ya sea en el aislamiento de recintos o en determinar el efecto que el ruido ambiental produce en las personas o la naturaleza [1,2]. Por lo tanto el estudio de la atenuación de sonido, específicamente la reducción de ruido NR (Noise reduction) y de la pérdida de transmisión TL (Transmission loss) es de gran importancia a nivel mundial. Las pérdidas de transmisión

se dan cuando el sonido que se propaga a través de un medio material (generalmente aire), se encuentra con algún otro medio. En experimentos que se realizan para la medición de materiales que son aislantes acústicos, se observa que estos presentan una mayor pérdida de transmisión sonora mientras más densos son [3,4]. Para la medida de estas variables se puede construir ambientes acústicos adecuados, como por ejemplo una cámara anecoica o un tubo de impedancia [5-7]. Una caja anecoica generalmente se construye de gran tamaño, para poder garantizar su aislamiento acústico y realizar medidas en condiciones de espacio libre. Cumplir al máximo con estas dos condiciones, hace que su precio de construcción sea muy elevado, lo cual

²E-mail: fefajardot@unal.edu.co.

limita enormemente su accesibilidad. En este trabajo se retoman algunas ideas del diseño de cámaras anecoicas pequeñas [8,9], para caracterizar la pérdida de transmisión sonora de algunos materiales, con los cuales los estudiantes interactúan cotidianamente, a saber: icopor, cartón, vidrio, algodón y fique. En el desarrollo del experimento también se ponen en práctica algunos conceptos y magnitudes físicas que describen la pérdida de transmisión sonora en un material, que a pesar de su gran importancia, es un fenómeno que pocas veces se trata en los cursos tradicionales de física.

En la próxima sección algunos conceptos importantes para el estudio de la pérdida de transmisión se revisan rápidamente; a continuación se describe la parte experimental, haciendo énfasis en la construcción de la cámara anecoica; luego se muestran los resultados de la medida de la pérdida de transmisión sonora en diversos materiales y finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Marco teórico

Los parámetros más relevantes dentro de la cuantificación del sonido son la presión y la frecuencia, por tanto para medir lo fuerte o débil que es un sonido se emplean diferentes magnitudes físicas que ayudan en la descripción del fenómeno sonoro. La presión sonora, es la fuerza por unidad de área que hace el sonido sobre una superficie determinada. La intensidad sonora, es la energía transportada por la onda por unidad de tiempo y unidad de área. La potencia sonora, es la cantidad de energía sonora emitida por la fuente por unidad de tiempo.

El nivel de presión sonora (SPL), el nivel de intensidad sonora (IL) y el nivel de potencia sonora (PWL), son variables que se miden en decibelios y se definen como [10-13]

$$SPL = 10 \log \frac{p^2}{p_o^2}, \quad (1)$$

donde p es el valor *rms* de la presión y p_o es una referencia internacional de presión igual a $p = 2 \times 10^{-5}$ Pa = 2×10^{-5} N/m².

$$IL = 10 \log \frac{I}{I_o}, \quad (2)$$

donde I es la intensidad, es decir la potencia generada por la fuente sonora que atraviesa una superficie, e I_o la intensidad de referencia, generalmente $I_o = 10^{-12}$ W/m².

$$PWL = 10 \log \frac{W}{W_o}, \quad (3)$$

donde W es la potencia desarrollada por la onda sonora medida y W_o es la potencia de referencia $W_o = 10^{-12}$ W.

Las pérdidas de transmisión (TL) se presentan cuando una onda acústica que se propaga por un medio debe atravesar un obstáculo material en su camino. En el caso particular de que no exista un obstáculo en el medio de propagación, la TL se llama atenuación. La atenuación se puede medir calculando la diferencia en las medidas nominales de dos sonómetros separados una distancia determinada [14].

La atenuación sonora se define como

$$SPLA = 20 \log \frac{r_1}{r_2}, \quad (4)$$

donde r_1 y r_2 son las distancias entre la fuente y los sonómetros que miden la SPL.

Cuando existe la presencia de un obstáculo en el medio donde se propaga el sonido, la pérdida de transmisión TL se define como,

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau}, \quad (5)$$

donde τ es el coeficiente de transmisión sonora, que es propio de cada material o medio de propagación, definido como $\tau = W_t/W_i$, donde W_t y W_i son las potencias acústicas transmitida e incidente respectivamente [4,15].

En el montaje propuesto en este trabajo se emplea una cámara anecoica, que se caracteriza por no tener eco y presentar pocas reflexiones en su interior. Se asume por lo tanto que se está en presencia de un campo de onda acústica plana progresiva, esto conlleva a la consecuencia práctica que

$$I = \frac{W}{4\pi \cdot r^2}, \quad (6)$$

siendo W la potencia total generada y r el radio de la superficie esférica sonora propagándose en el espacio libre. También se conoce que $I \propto P^2$, por lo tanto para campo libre se tiene que $I = P^2/\rho c$, donde P es la presión *rms*, ρ la densidad del aire y c la velocidad del sonido en el aire.

Con ayuda de las ecuaciones anteriores se puede entonces definir la pérdida de transmisión sonora (PT) debida al material, como [3]

$$PT = TL - 20 \log \left[\frac{r_1}{r_2} \right] = SPL_i - SPL_t. \quad (7)$$

Siendo PT la variable a medir durante el presente trabajo, la cual experimentalmente corresponde a la diferencia en la lectura de dos sonómetros, uno que mide la SPL de la onda incidente y otro la SPL de la onda transmitida a través del material.

3. Montaje experimental

En la Fig. 1 se puede apreciar una representación esquemática del montaje de la cámara anecoica que se

utilizo para medir las pérdidas de transmisión sonora PT. La cámara anecoica consta principalmente de una caja externa y una caja interna (se aprovecharon cajas en la que se empaican algunos electrodomésticos), entre las cuales se colocan capas de diferentes materiales. La caja externa se utiliza básicamente para garantizar el aislamiento con el exterior. Entre las cajas se colocó una lámina de espuma amarilla de baja densidad (10 cm de espesor) y una lámina de cartón sencilla (5 mm de espesor). La caja interna se recubrió de diversos materiales, con el fin de reducir al máximo las reflexiones internas en sus paredes, que es una de las principales características de una cámara anecoica. Los recubrimientos de la caja interna son: una lámina de icopor (10 mm de espesor), una lámina de espuma de baja densidad (50 mm de espesor) y una lámina de espuma troquelada con ondulaciones de mediana densidad (35 mm de espesor). La espuma con ondulaciones es para ayudar a atenuar las reflexiones dentro de la cámara. En las cámaras anecoicas este revestimiento es hecho generalmente con cuñas o cubos de diferentes tamaños, fabricados de materiales absorbentes como el poliuretano [5, 8].

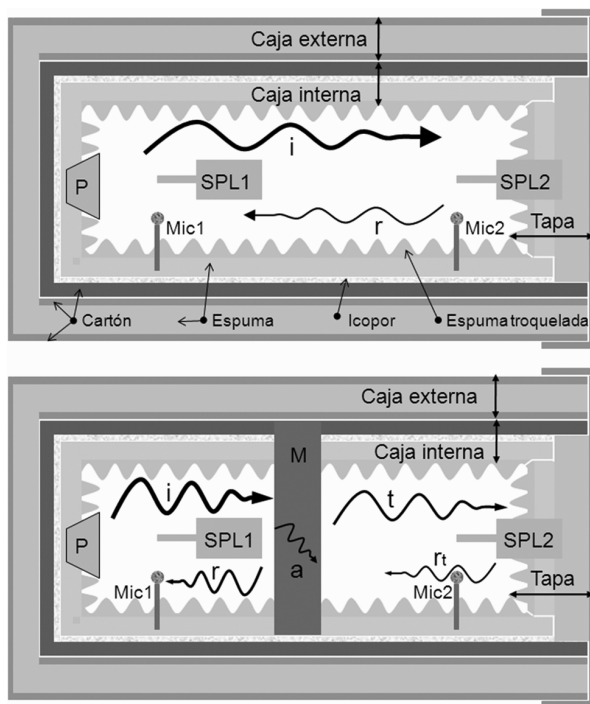


Figura 1 - Representación esquemática de la cámara anecoica empleada en la medida de las pérdidas de transmisión sonora (PT). Donde SPL1 y SPL2 son los sonómetros, P es el parlante, Mic1 y Mic2 son micrófonos y M la muestra a estudiar, la cual divide la caja interna en dos recámaras. En la figura superior se observa los materiales con los que se construyen las diferentes capas de la cámara. Con flechas se representan las posibles ondas presentes al interior de la cámara, de acuerdo con: i, incidente; r, reflejada; a, absorbida; t, transmitida y r_t , reflejada de la transmitida.

En la mitad de la caja interna existe una ranura para colocar las muestras que se analizarán. Como se observa en la Fig. 1 (inferior), el interior de la caja interna queda dividido en dos recámaras, una vez que es colocada la muestra de material a estudiar. También se indica la ubicación de los instrumentos de medida dentro de la cámara anecoica y se representan mediante flechas las posibles ondas presentes en la cámara, es decir: i, incidente; r, reflejada; a, absorbida; t, transmitida y r_t , reflejada de la transmitida.

Una fotografía de la cámara anecoica donde se observa la caja externa e interna y las capas que la componen se muestra en la Fig. 2. Nótese que la caja interna descansa sobre una capa de espuma, la cual además de ayudar a aislarla acústicamente del exterior, sirve para amortiguar las oscilaciones del exterior. En otras palabras, en principio actúa como los amortiguadores que se utilizan normalmente en el diseño de una cámara anecoica para reducir las vibraciones externas [7,8]. Las dimensiones exteriores de la cámara anecoica son (1,28 x 0,70 x 0,81 m) de largo, alto y ancho respectivamente.

Algunas características de los instrumentos empleados en las mediciones son.

- El sonómetro 1 (SPL1) es un Data Logger sound level meter IEC651- Type 2. El sonómetro 2 (SPL2) es un Data Logger TES 1352. Para los dos sonómetros se ajustó el rango dinámico entre (30-130) dB y el filtro de ponderación en tipo C. El sonómetro es un instrumento de medida que sirve exclusivamente para medir niveles de presión sonora (*sound Pressure level*) SPL en decibelios (dB). Los sonómetros empleados en este trabajo son integradores, es decir que se pueden ajustar en niveles de ponderación determinados. Dichas curvas de ponderación son redes de filtrado en el aparato que dan a cada frecuencia un “peso” determinado, el cual está relacionado a la sensibilidad del oído humano a dichas frecuencias [3,15].

- El generador de señales es un PASCO PI-9587C, el cual se conecta al parlante. El rango de frecuencias empleado en este trabajo fue barrido en bandas de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz, con un total de 18 variaciones de frecuencia. La potencia en el generador de señal se mantuvo fija y únicamente se varió la frecuencia de una señal sinusoidal.

- Los micrófonos son Vernier MCA-BTA, con un rango de frecuencias comprendido entre 20 Hz y 16 kHz. Estos micrófonos fueron conectados al PC a través de una interfaz Vernier. Los micrófonos se usaron para registrar simultáneamente en tiempo real las formas de las ondas sonoras en cada una de las recámaras de la caja interna. Mediante el análisis del espectro del sonido en series de Fourier, se verificó que el pico correspondiera al valor indicado por el generador. En este experimento, si no se está interesado en verificar la frecuencia de la señal generada, se puede prescindir de los micrófonos.

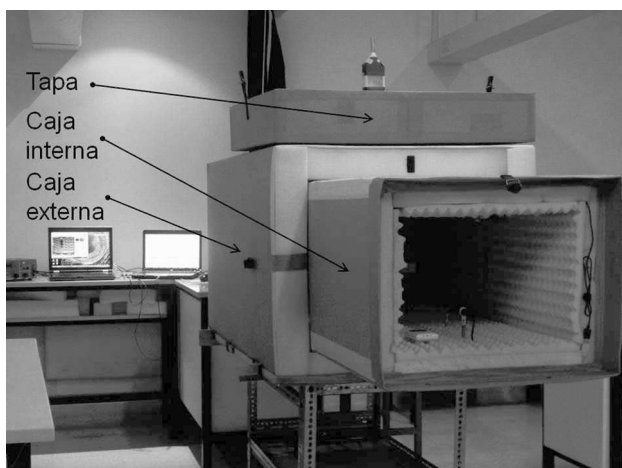


Figura 2 - Fotografía del montaje general de la cámara anecoica, donde se aprecian las dos cajas que la conforman y las diferentes capas de materiales. Note en especial la espuma con ondulaciones para disminuir las reflexiones internas. Sobre la caja externa se puede ver la tapa frontal con el sonómetro 2 insertado en ella.

- Se utilizó un sensor de temperatura y de humedad relativa marca Thermo-Hygro THGR228 N. En todas las medidas el porcentaje de humedad relativa estuvo entre el 59 y 64 % y la temperatura ambiente varió entre 17 y 20 °C. Se encontró que estos cambios en las condiciones ambientales producían solo variaciones mínimas en la pérdida de transmisión sonora en el aire, motivo por el cual en este trabajo, vamos a suponer que tanto la temperatura y la humedad relativa son constantes.

A manera de ejemplo en la Fig. 3 se puede observar el anclaje de una muestra de fique tejido a un marco de madera, con la finalidad de realizar la medida de la *PT* dentro de la cámara anecoica. A las muestras rígidas como el vidrio, cartón o algodón no era necesario realizarles este tipo de anclaje, ya que se colocaban directamente en la ranura de la caja interna.

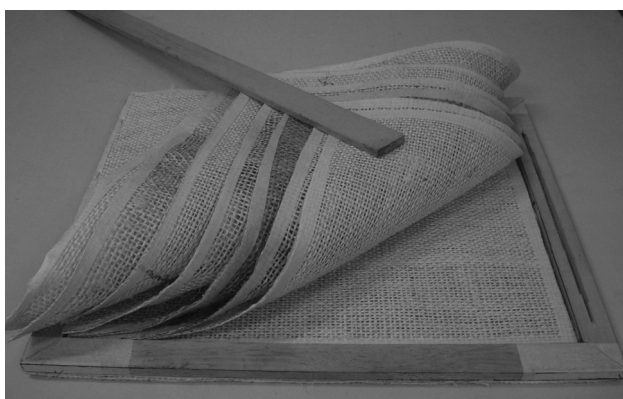


Figura 3 - Porta muestras configurado para la medición de varias capas de fique tejido, el cual es introducido en la ranura de la caja interna de la cámara anecoica.

La nomenclatura que se emplea en este trabajo para las medidas experimentales es:

- SPL1: nivel de presión sonora en el sonómetro 1,

que está ubicado en la recámara 1, frente al parlante.

- SPL2: nivel de presión sonora en el sonómetro 2. Se encuentra insertado en el centro de la tapa de la cámara (ver Fig. 2), y queda ubicado dentro de la recámara 2 cuando se divide la cámara anecoica con la muestra.

- *PT*: pérdida de transmisión sonora del material a estudiar, la cual es determinada por medio de la ecuación (7).

Previamente a la caracterización de los materiales se comparó la diferencia de la medida en los sonómetros para: i) distintas ubicaciones dentro de la cámara, es decir variando la posición a lo largo, alto y ancho de esta, y ii) los dos sonómetros posicionados a igual distancia de la fuente, con el fin de comparar sus medidas nominales para un mismo sonido. Se pudo concluir que no era significativa la diferencia en la medida de los sonómetros ni a lo alto, ni a lo ancho de la cámara. A lo largo de la cámara como era de esperarse los sonómetros presentan una pequeña diferencia producida por la atenuación en el aire. Pero, debido a que la posición de los sonómetros dentro de la cámara es siempre la misma al momento de realizar las medidas, el término de atenuación en el aire es siempre constante (ver ecuación (4)).

4. Medida de la *PT* para diversos materiales

Siempre se midió la pérdida de transmisión del aire durante la caracterización de cada una de las muestras, para tenerla como una referencia y su curva se puede observar en cada una de las gráficas de *PT* que se muestran a continuación. También, con el fin de resaltar algunas características de la medida de la *PT*, para algunos materiales la pérdida de transmisión sonora se divide en dos regiones, una que va de 100 a 800 Hz (bajas frecuencias) y otra de los 100 a 5000 Hz.

4.1. *PT* para diferentes láminas de cartón

Utilizamos láminas de cartón lisas de 3 mm de espesor, de las que se emplean normalmente en cajas para embalaje de objetos. El cartón utilizado tenía una densidad de 126 kg/m³. Iniciamos la medida de la *PT* con una lámina, a la cual se le fueron superponiendo otras hasta completar seis. Las curvas de la *PT* en función de la frecuencia se observan en las Fig. 4 (de 0 a 800 Hz) y en la Fig. 5 (de 0 a 5000 Hz). De la Fig. 4 se infiere que en la región de bajas frecuencias la pérdida de transmisión sonora aumenta con el incremento de la frecuencia y con el número de láminas de cartón que se superpongan.

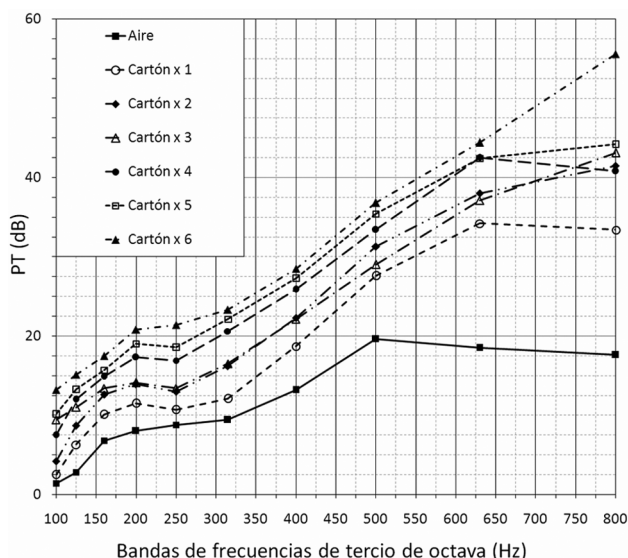


Figura 4 - Pérdida de transmisión sonora PT en función de la frecuencia (0 a 800 Hz) para el cartón de 3 mm de espesor, tomando como parámetro el número de láminas (de 1 a 6).

De la Fig. 5 vemos que para las altas frecuencias (mayores a 800 Hz) al ir incrementando el número de de láminas de cartón, la PT no cambia apreciablemente y se mantiene alrededor de 37 ± 5 dB. A partir de frecuencias mayores a 500 Hz la diferencia entre la PT de los cartones y la atenuación en el aire es bien significativa (mayor a 25 dB), indicando que el cartón es un buen aislante acústico.

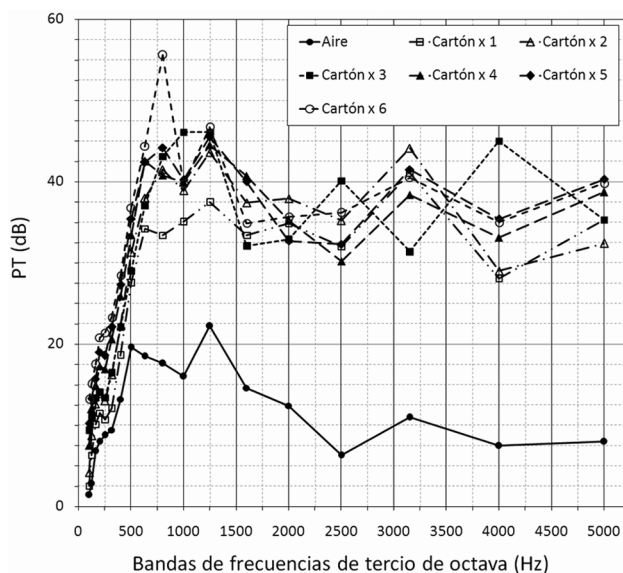


Figura 5 - PT en función de la frecuencia (100 a 5000 Hz) para el cartón de 3 mm de espesor.

4.2. PT para diferentes capas de fique tejido

Otro de los materiales que se midieron fueron los embalajes de fique, que comúnmente son empleados para empacar productos orgánicos. Estos embalajes dependen

de la trama del tejido son más o menos densos. Se empleó un embalaje denso ($\rho = 293 \text{ kg/m}^3$), de 170 hilos, como el que se observa en la Fig. 3. Ya que aumentar capa por capa de fique tejido no es tan representativo en variaciones de PT , se optó por medir 1, 2, 6 y 10 capas. Las curvas de PT en función de la frecuencia para el fique tejido se representan en la Fig. 6. Se observa que para bajas frecuencias sonoras (menores a 800 Hz), la pérdida de transmisión sonora PT es prácticamente igual que la atenuación del aire y no aumenta notablemente con el aumento del número de las capas de fique tejido. Todas las curvas tienen su máxima PT en 1250 Hz, es decir, no hay desplazamiento de la máxima PT al aumentar el espesor de la división de fique tejido. Para frecuencias mayores a 3150 Hz hay una pequeña diferencia entre la PT de las capas de fique y la atenuación en el aire, la cual es de aproximadamente 6 dB para diez capas de fique; por lo que podemos deducir que este material no es un buen aislante acústico. La principal razón para este comportamiento, es que el fique tejido deja un gran número de agujeros a lo largo del entramado, por los cuales el sonido se transmite fácilmente.

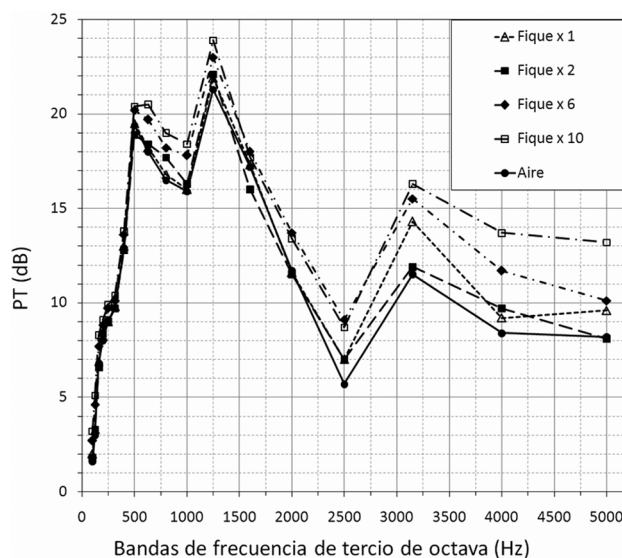


Figura 6 - Pérdida de Transmisión sonora PT en función de la frecuencia para el fique tejido.

4.3. PT para diferentes capas de felpa de fique

A partir del fique también se produce la felpa de fique, que es empleada para recubrimientos internos en muebles y en aislamientos acústicos. La felpa de fique se fabrica a partir de fibras de fique de pequeña longitud (menores a 5 cm), con las cuales se hace un aglomerado en forma de láminas. Se empleó una felpa de fique con una densidad $\rho = 160.1 \text{ kg/m}^3$.

En la Fig. 7 se muestran las curvas de PT de la felpa de fique en función de la frecuencia tomando como parámetro el número de láminas. Se observa que el incremento en el número de capas de felpa garantiza

un aumento de la pérdida de transmisión sonora PT , el cual es más significativo cuando se compara con el fique tejido (ver Fig. 6). La diferencia se debe a que la felpa de fique es un material menos denso que el fique tejido, pero por estar las fibras orientadas al azar y en forma aglomerada, no deja agujeros a lo largo del espesor de la lámina. Nótese que la pérdida de PT depende apreciablemente del número de capas de felpa de fique y que su máximo es el mismo para todas las curvas, el cual coincide con el máximo de la curva de atenuación en el aire. Se puede afirmar que la felpa de fique es un aislante acústico medio, ya que comparado con la atenuación en el aire la diferencia en la PT es de alrededor de 8 dB en el intervalo de frecuencias entre 500 y 5000 Hz.

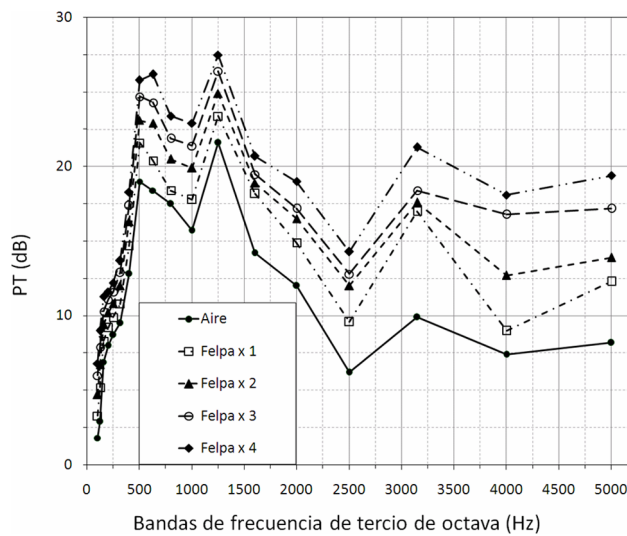


Figura 7 - Pérdida de transmisión sonora PT en función de la frecuencia para la felpa de fique, tomando como parámetro el número de láminas.

4.4. PT para diferentes capas de fieltro de algodón

El fieltro de algodón son láminas prensadas de diferentes espesores, en este trabajo se utilizó uno que tiene una densidad $\rho = 74,3 \text{ kg/m}^3$.

En las Figs. 8 y 9 se observan las curvas correspondientes a la pérdida de transmisión sonora PT en función de la frecuencia para diferentes capas de fieltro de algodón. Para todo el rango de frecuencias la PT aumenta, pero después de 500 Hz la PT es visiblemente dependiente del número de capas de fieltro de algodón, encontrando una diferencia de hasta aproximadamente 35 dB cuando se compara con la atenuación del aire. Podemos concluir que el fieltro de algodón es un buen aislante acústico en prácticamente todo el espectro de frecuencias estudiado, pero con la desventaja de que sus láminas son de un espesor mayor, cuando se comparan con materiales como el cartón y el vidrio.

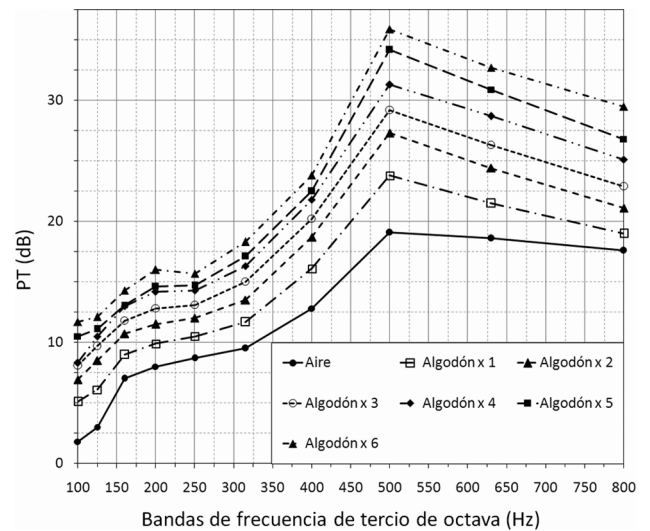


Figura 8 - PT en la región de bajas frecuencias (100 a 800 Hz) para diferentes láminas de fieltro de algodón.

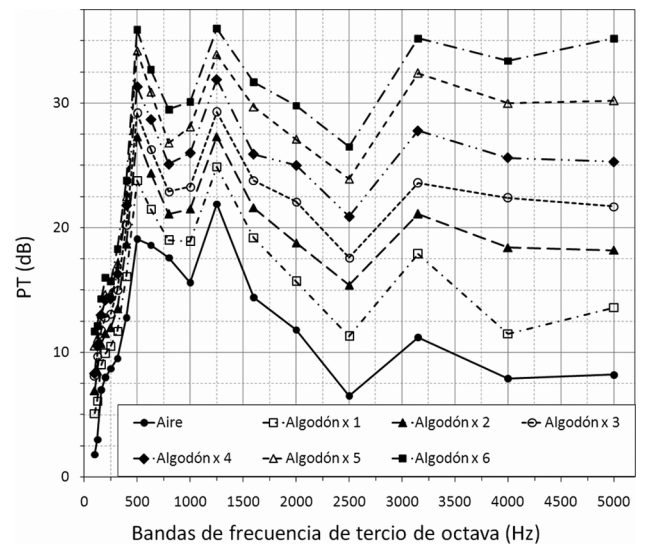


Figura 9 - PT en función de la frecuencia (100 a 5000 Hz) para varias láminas de fieltro de algodón.

4.5. PT para diferentes láminas de icopor de un mismo calibre

Las láminas de icopor tienen una densidad $\rho = 10.5 \text{ kg/m}^3$ y un espesor de 5 mm. En la Fig. 10 se representa la PT en función de la frecuencia para el icopor, tomando como parámetro el número de láminas. Para frecuencias menores a 500 Hz la PT del icopor es prácticamente igual a la atenuación sonora en el aire e independiente del número de láminas. Para frecuencias mayores a 500 Hz, la PT aumenta al incrementarse el número de capas de icopor. Para frecuencias mayores a 1500 Hz, hay una diferencia marcada entre la PT debida al icopor y la atenuación sonora en el aire, es decir comienza a insonorizar apreciablemente. A pesar que el icopor presenta una PT apreciable a partir de los 500 Hz, esta no es tan significativa como generalmente

se piensa. Las láminas de icopor de 5 mm estarían en el rango medio entre los absorbentes acústicos.

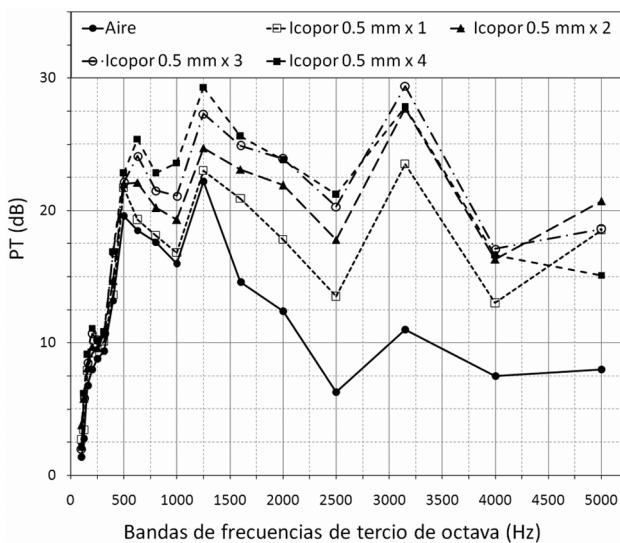


Figura 10 - *PT* en función de la frecuencia para diferentes láminas de icopor.

4.6. *PT* para láminas de icopor de diferente calibre y densidad

En la Fig. 11 se observan las curvas de *PT* en función de la frecuencia para tres láminas de icopor de diferente espesor. Para frecuencias menores a 500 Hz la *PT* del icopor es prácticamente igual a la atenuación sonora y no depende del espesor de la lámina.

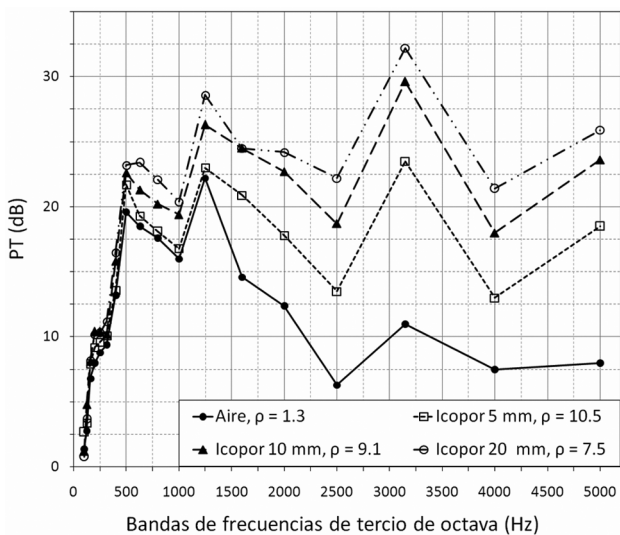


Figura 11 - *PT* en función de la frecuencia en láminas de icopor de diferente espesor y densidad. La densidad (ρ) se mide en kg/m^3 .

Para frecuencias mayores a 500 Hz la *PT* aumenta al incrementarse el espesor de las láminas de icopor, no obstante que su densidad (ρ) disminuye con el aumento del espesor. Para frecuencias mayores a 1500 Hz, hay

una diferencia marcada entre la *PT* debida al icopor y la atenuación sonora en el aire.

4.7. *PT* para capas de vidrio de diferentes calibres

El vidrio a diferencia de los anteriores materiales estudiados se caracteriza por ser bastante denso, $\rho = 2.526 \text{ kg/m}^3$. La Fig. 12 muestra la *PT* en función de la frecuencia para vidrios de dos calibres (3 y 6 mm), los cuales poseen densidades muy similares (2.526 y 2.451 kg/m^3 , respectivamente). Se hicieron medidas de la *PT* para los siguientes casos: una lámina de vidrio de 3 mm, dos láminas de vidrio de 3 mm, una lámina de vidrio de 6 mm y las tres láminas de vidrio colocadas en forma sucesiva.

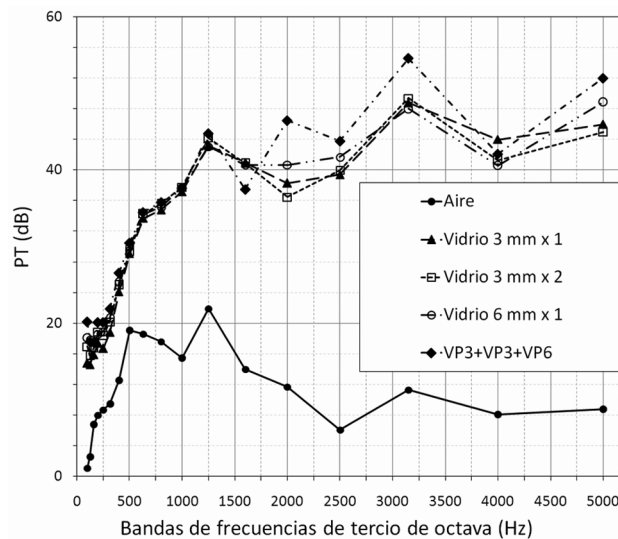


Figura 12 - *PT* en función de la frecuencia (100 a 5000 Hz) para láminas de vidrio de diferentes densidades y espesores.

En la Fig. 12 se observa claramente que la *PT* del vidrio a bajas frecuencias (0 a 800 Hz) es mucho mayor cuando se compara con la atenuación sonora en el aire. Por lo tanto, el vidrio es un excelente aislante acústico a bajas frecuencias, donde muchos materiales no lo son. También encontramos que para altas frecuencias (mayores a 800 Hz) el aumento del número de láminas de vidrio o de su espesor, no produce cambio significativo en la *PT*. Por lo tanto, es suficiente colocar solamente una capa de vidrio de alrededor de 3 mm de espesor, para lograr un buen aislamiento acústico en todo el espectro de frecuencias analizado.

5. Comparación de la *PT* de los materiales estudiados

En las Figs. 13 y 14 se realiza una comparación de la pérdida de transmisión sonora *PT* de los diferentes materiales estudiados en función de la frecuencia. Cada material está en la configuración que presento la

máxima pérdida de transmisión; es decir, la mayor cantidad de láminas de cada uno.

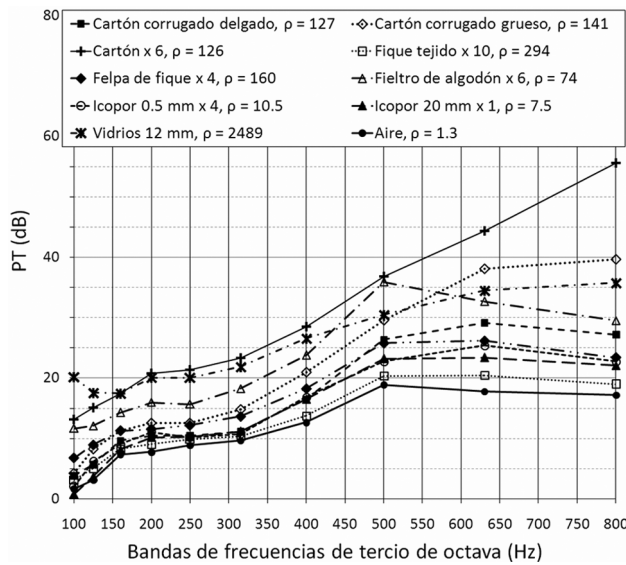


Figura 13 - Comparación de la pérdida de transmisión sonora PT en la región de bajas frecuencias (100-800 Hz), para distintos materiales.

De la Fig. 13, que corresponde a la región de bajas frecuencias (0 a 800 Hz), se pueden destacar las siguientes características:

- Para frecuencias menores a 500 Hz, todos los materiales aumentan su pérdida de transmisión sonora PT en función de la frecuencia.

- Para frecuencias muy bajas (100 Hz a 400 Hz) el vidrio, el cartón y el fieltro, son los únicos materiales que presentan una PT realmente significativa. El cartón en su configuración de 6 capas es el mejor aislante acústico de los diversos materiales estudiados.

- El fique tejido, la felpa de fique y el icopor, no presentan a bajas frecuencias una significativa pérdida de transmisión sonora.

- La PT no depende únicamente de la densidad del material, ya que el cartón y el fieltro de algodón presentan una significativa PT y tienen una densidad baja comparada con la del vidrio. El fique tejido a pesar de tener una buena densidad, muestra una PT pequeña, debido principalmente a que su estructura no es homogénea por la presencia de agujeros.

De la Fig. 14 se puede deducir lo siguiente:

- El valor máximo en la pérdida de transmisión sonora PT en función de la frecuencia, varía dependiendo de la estructura del material.

- Para frecuencias mayores a 1500 Hz la PT no depende significativamente de la frecuencia.

- La PT depende de la densidad del material, de su estructura y de su espesor.

- El vidrio es el mejor aislante acústico entre los materiales estudiados.

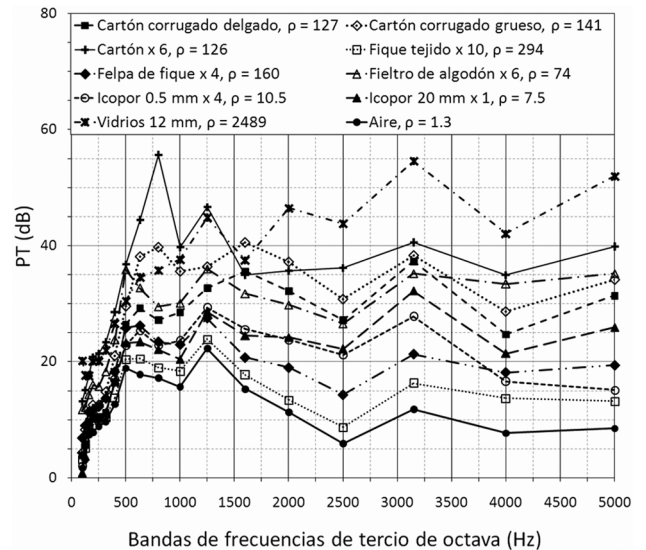


Figura 14 - Comparación de la pérdida de transmisión sonora PT en función de la frecuencia (100-5000 Hz), para diferentes materiales.

En la Tabla 1, se presenta una comparación de los diferentes materiales empleados con respecto a sus densidades volumétricas, costos y pérdida de transmisión sonora PT . Los diferentes materiales se organizan en orden decreciente en densidad. Los valores de PT están dentro de los valores típicos obtenidos para este tipo de materiales [12]. El vidrio y el cartón son los mejores aislantes acústicos, los cuales tienen espesores similares, pero el cartón es bastante más económico. El icopor, el cartón corrugado, la felpa de fique y el algodón de fieltro estarían en el rango medio de aislantes acústicos, compitiendo igualmente en precios. En general el vidrio, el cartón, el icopor y el fieltro de algodón se pueden utilizar como aislantes acústicos, en el rango de frecuencias comprendido entre 400 y 4000 Hz, que es donde el oído humano tiene una mayor sensibilidad.

6. Conclusiones

Se construyó una cámara anecoica empleando materiales de bajo costo, con la cual es posible caracterizar acústicamente algunos materiales de uso cotidiano. A la hora de elegir un material como aislante acústico, es importante tener en cuenta factores como su densidad, su estructura y el rango de frecuencias que se quiere aislar; ya que los costos de los materiales pueden variar notoriamente. Se encontró que el cartón es una buena alternativa para aislamientos acústicos de bajo costo, con el cual se puede garantizar una buena respuesta en la pérdida de transmisión sonora PT en todo el espectro de frecuencias. El vidrio es un excelente aislante acústico en todo el espectro de frecuencias estudiado, inclusive en las frecuencias inferiores a 500 Hz. Los materiales más densos presentan generalmente una pérdida de transmisión sonora mayor, observándose en algunos casos una dependencia importante de la estructura del

material. Este es un trabajo que puede ser utilizado como proyecto experimental en diversos cursos de física, en el cual se pueden emplear una gran variedad de materiales utilizados por los estudiantes en su cotidian-

idad. Además, de que permite trabajar una serie de conceptos que son poco explorados en los laboratorios tradicionales de física.

Tabla 1 - Algunas características de los materiales estudiados: densidad (ρ), formato de la lámina (dimensiones en m^2), costo en dólares y PT máxima en dB. El número de láminas aparece en paréntesis en la columna del tipo de material.

Material (número de láminas)	$\rho(kg/m^3)$	Formato lámina (m^2)	Costo (U\$)	PT máx (dB)
Vidrio 3 mm (2)	2526	0.5x0.4	2.5	49.4
Vidrio 6 mm (1)	2451	0.5x0.4	4.5	48.9
Fique tejido 170 hilos (10)	294	1.0x0.8	1	23.9
Felpa de fique (4)	160	1.0x0.8	2.5	27.5
Cartón liso (6)	126	1.2x2.0	5	55.6
Algodón de fieltro (6)	74.3	1.0x2.0	3	36
Icopor 5 mm (4)	10.5	1.0x1.0	1	29.3
Icopor 10 mm (1)	9.1	1.0x1.0	2.5	29.6
Icopor 20 mm (1)	7.5	1.0x1.0	2.5	32.2

Agradecimientos

Al profesor Nelson Rojas de la escuela de Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia por su desinteresado apoyo, a la compañía de Empaques S.A. por el suministro del fique tejido y la felpa de fique y al físico J.P. Arenas Arango por su colaboración en algunas medidas preliminares. Finalmente, agradecemos los comentarios del referee, ya que nos permitieron darle una mayor claridad al trabajo.

Referencias

[1] M. Meisser, *Acústica de los Edificios* (Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona, 1973).

[2] Serway A. Raymond, *Física Tomo 1* (Ed. McGraw Hill, México, D.F., 1997).

[3] Centro de formación profesional REVILLAGIGEDO. M1 Equipos de sonido, <http://www.artegijon.com/UserFiles/File/Toni/SONIDO/E1%20sonido.pdf>, Agosto de 2011.

[4] Thomas D. Rossing, *The Science of Sound* (Ed. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1990)2nd ed.

[5] A.G. Velis, H.G. Giulinao and A.M. Méndez, *Applied Acoustics* **44**, 79 (1995).

[6] A.R. Whatmore and M.V. Lowson, *Applied Acoustics* **6**, 293 (1973).

[7] X. Duanqui, W. Zheng and C. Jinjing, *Applied Acoustics* **29**, 139 (1990).

[8] V.M. Viebrock and M.J. Crocker, *J. of Sound and Vibration* **32**, 77 (1974).

[9] M.S. Ressler and P.W. Wundes, in *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Acoustics & Music: Theory & Applications*, Romania, 2010, p. 18.

[10] H. Kuttruff, *Acoustics. An Introduction* (Ed. Taylor and Francis Group, London, 2006).

[11] C. Rosado Rodríguez, *Acústica I* (Ed. Trillas, Mexico, 1974).

[12] T. Rossing, *Springer Handbook of Acoustics* (Springer, New York, 2007).

[13] Nivel de presión sonora, nivel de potencia sonora, nivel de intensidad sonora, disponible en http://www.labc.usb.ve/paginas/EC4514/AUDIO/Sonido/Caracteristicas_del_Sonido.html, Agosto de 2011.

[14] Nivel de presión sonora. Atenuación, http://www.Plataea.Pntic.mec.es/~{Imarti2/SONIDO%20_STI_pdf, (Agosto2011).

[15] L. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics* (Ed. Wiley, New York, 2000).