



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Informe Técnico

Aislamiento Sonoro en Paneles Compuestos

Ana Laura Padilla Ortiz
Santiago Jesús Pérez Ruiz

Agosto 2014

Estancia ICYT

Instituto de Ciencia y Tecnología del D.F.

Título: Aislamiento Sonoro en Paneles Compuestos

Autores: Ana Laura Padilla Ortiz, Santiago Jesús Pérez Ruiz

CCADET, UNAM

Resumen

En el presente trabajo se aborda el diseño de un panel acústico compuesto para construir un muro con una característica de aislamiento sonoro semejante al que muestran paneles que ya se comercializan en México. El trabajo incluye tanto un desarrollo teórico como experimental. Se describe el procedimiento de caracterización de laboratorio, realizado en la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM, y se analizan los resultados comparándolos con otros paneles que existen en el mercado.

Índice

Introducción	3
1. Modelos teóricos para aislamiento Sonoro	3
1.1 Paneles Sencillos	3
1.2 Paneles dobles	10
2 Procedimientos de Medición	12
3 Resultados	17
Conclusiones	21
Referencias Bibliográficas	21

Introducción

Cuando se desea aumentar el aislamiento sonoro que proporciona un muro ó panel homogéneo, se puede optar por aumentar la masa del panel ensanchando su grosor. Esta técnica tiene sus limitantes e inconvenientes. Otra alternativa es utilizar un sistema de paneles dobles. Pero estos sistemas tienen un aislamiento bajo en frecuencias bajas y/o medias, debido a la resonancia de la cavidad formada por panel – aire- panel; una solución para esto es llenar la cavidad entre paneles con material poroso o semejantes. En el presente trabajo se presentan los resultados de tres arreglos que se investigaron, con diferentes combinaciones de materiales prefabricados. El aislamiento sonoro obtenido es bastante razonable tomando en cuenta los materiales utilizados.

1 Modelos teóricos para el aislamiento sonoro

1.1 Paneles sencillos

Las expresiones para la presión sonora en cada uno de los tres medios, mostrados en la figura1, pueden escribirse como sigue:

$$p_1(x,t) = \mathbf{A}_1 e^{j(\omega t - k_1 x)} + \mathbf{B}_1 e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (1)$$

$$p_2(x,t) = \mathbf{A}_2 e^{j(\omega t - k_2 x)} + \mathbf{B}_2 e^{j(\omega t + k_2 x)} \quad (2)$$

$$p_3(x,t) = \mathbf{A}_3 e^{j(\omega t - k_3 (x-L))} \quad (3)$$

Donde las constantes $\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1$, etc. son cantidades complejas

Para una onda plana en incidencia normal, la velocidad de partícula instantánea en cada material puede escribirse como:

$$v_1(x,t) = \left(\frac{1}{Z_1} \right) \left[\mathbf{A}_1 e^{j(\omega t - k_1 x)} + \mathbf{B}_1 e^{j(\omega t + k_1 x)} \right] \quad (4)$$

$$v_2(x,t) = \left(\frac{1}{Z_2} \right) \left[\mathbf{A}_2 e^{j(\omega t - k_2 x)} + \mathbf{B}_2 e^{j(\omega t + k_2 x)} \right] \quad (5)$$

$$v_3(x,t) = \left(\frac{1}{Z_3} \right) \left[\mathbf{A}_3 e^{j(\omega t - k_3 (x-L))} \right] \quad (6)$$

En la interfaz $x = 0$, la presión en el medio 1 es igual a la presión en el medio 2; la velocidad de partícula en el medio 1 es igual a la velocidad de partícula en el medio 2, utilizando esta condición y utilizando las ecuaciones de (1), (2) y (4), (5) tendremos:

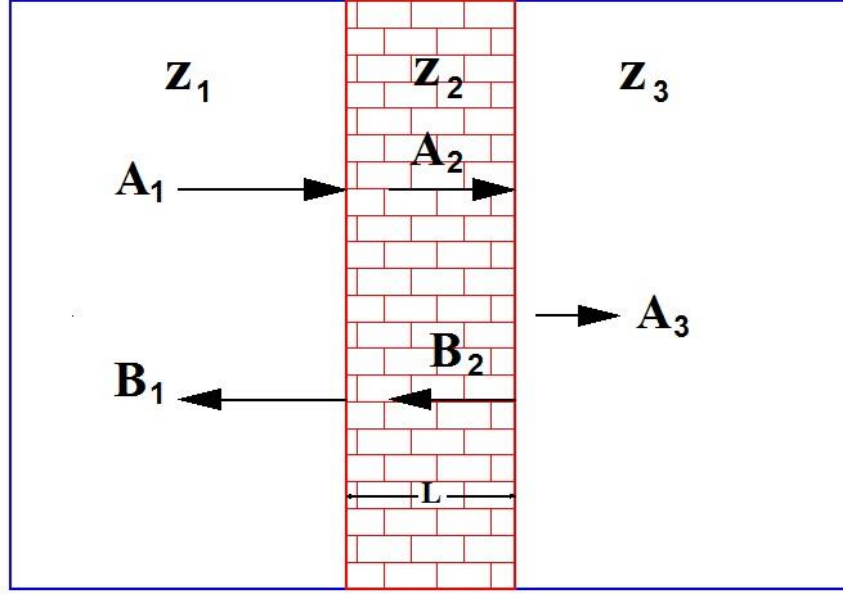


Figura 1. Transmisión sonora desde un primer material, pasando por un segundo material, hasta llegar a un tercer material (incidencia normal).

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (7)$$

$$\frac{A_1 - B_1}{Z_1} = \frac{A_2 - B_2}{Z_2} \quad (8)$$

En la segunda interfaz $x = L$, las presiones y la velocidad de partícula también son iguales, utilizando las ecuaciones (2), (3) y (5), (6) obtenemos un segundo conjunto de relaciones de los coeficientes:

$$A_2 e^{-jk_2 L} + B_2 e^{jk_2 L} = A_3 \quad (9)$$

$$\frac{A_2 e^{-jk_2 L} - B_2 e^{jk_2 L}}{Z_2} = \frac{A_3}{Z_3} \quad (10)$$

Podemos combinar las ecuaciones (7) a (10), para obtener la siguiente relación compleja:

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) e^{jk_2 L} + \frac{1}{4} \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2} \right) \left(1 - \frac{Z_2}{Z_3} \right) e^{-jk_2 L} \quad (11)$$

Substituyendo las relaciones de Euler para los exponenciales complejos en (11) nos darían la siguiente expresión:

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_3} \right) \cos(k_2 L) + j \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3} \right) \sin(k_2 L) \quad (12)$$

Cuya magnitud estará dada por:

$$\left| \frac{\mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_3} \right| = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{Z_1}{Z_3} \right)^2 \cos^2(k_2 L) + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3} \right)^2 \sin^2(k_2 L) \right]^{1/2} \quad (13)$$

El ángulo de fase entre la onda transmitida y la onda incidente sería:

$$\tan(\phi) = \frac{[(Z_1/Z_2) + (Z_2/Z_3)] \tan(k_2 L)}{1 + (Z_1/Z_3)} \quad (14)$$

Con la ecuación (13) obtendríamos una medida de la relación entre la onda presión incidente y la transmitida, para cuantificar en términos de energía que transportan estas ondas, determinaremos la intensidad que es la tasa promedio de flujo de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación, por lo tanto podemos considerar que:

$$I = \frac{\text{Energía}}{\text{tiempo} \cdot \text{Área}} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Área}} = \frac{W}{S} \quad (15)$$

Ahora definamos el índice de transmisión sonora (τ), que relaciona la potencia transmitida (W_t), medio 3, con la potencia incidente (W_i), medio 1, de la onda sonora, de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{W_3}{W_1} = \frac{I_3}{I_1} \quad (16)$$

Considerando que en una onda plana, la intensidad sonora está dada por $I = p^2/Z$, la ecuación (16) se modificará de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{(p_3^2)}{(p_1^2)} = \left| \frac{\mathbf{A}_3}{\mathbf{A}_1} \right|^2 \frac{Z_1}{Z_3} \quad (17)$$

Sustituyendo la ecuación (13) en (17), obtendremos finalmente el índice de transmisión sonora:

$$\tau = \frac{4(Z_1/Z_3)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_3} \right)^2 \cos^2(k_2 L) + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3} \right)^2 \sin^2(k_2 L)} \quad (18)$$

En la obtención de la ecuación (18) no se han hecho restricciones sobre las características de los tres medios donde se propagan las ondas. Atendiendo a casos especiales esta ecuación se simplificará. En el caso de que los medios 1 y 3 sean iguales. Esto correspondería a la transmisión del sonido desde el aire (medio 1), pasando por una pared sólida (medio), para pasar del otro lado del muro, donde el medio 3 es igual al primero es decir es aire: En este caso $Z_1 = Z_3$; además, la impedancia de un sólido es mucho mayor la del aire, entonces $Z_1/Z_2 \ll 1$, para frecuencias por debajo de aproximadamente 1000

Hz, podemos hacer las siguientes simplificaciones $\sin(k_2 L) \approx k_2 L$ y $\cos(k_2 L) \approx 1$. Considerando estas simplificaciones la ecuación (18) se simplifica a:

$$\tau = \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} \right)^2 (k_2 L)^2} \quad (19)$$

Como se ha mencionado $Z_2 \gg Z_1$, por lo que el índice de transmisión sonora τ es muy pequeño, por lo que usualmente en aplicaciones de ingeniería se prefiere utilizar el inverso del índice de transmisión y se le denomina **índice de reducción sonora (R)**, **pérdida por transmisión** ó también **aislamiento sonoro** y por su magnitud (extremadamente grande por ser el inverso de τ), se expresa en decibeles. Es decir, tendremos:

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_3} \right) = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_3} \right) \quad (20)$$

Para calcular el inverso de la ec. (19), consideremos que $Z_2 = \rho_2 c_2$, $Z_1 = \rho_1 c_1$, $k_2 = 2\pi f / c_2$ y tendremos:

$$\frac{1}{\tau} = 1 + \left(\frac{\pi \rho_2 L f}{\rho_1 c_1} \right)^2 = 1 + \left(\frac{\pi M_s f}{\rho_0 c} \right)^2 \quad (21)$$

Donde $M_s = \rho_2 L$, es la densidad superficial de masa (Kg/m^2)

Observe que puesto que $\rho_0 c$ es una constante del aire (solo depende de la temperatura), en consecuencia R , Índice de Reducción Sonora solo depende de la frecuencia y de la densidad de masa superficial. Este resultado se conoce como ley de masas. Esto quiere decir que a mayor masa mayor aislamiento, pero también que en frecuencia bajas el aislamiento es menor. Este comportamiento se da en una cierta gama de frecuencias.

Para saber que sucede en otras regiones de frecuencia, se ha estudiado el problema dividiendo en tres regiones de frecuencia, estas regiones se muestran en la figura 2, y se suelen definir como:

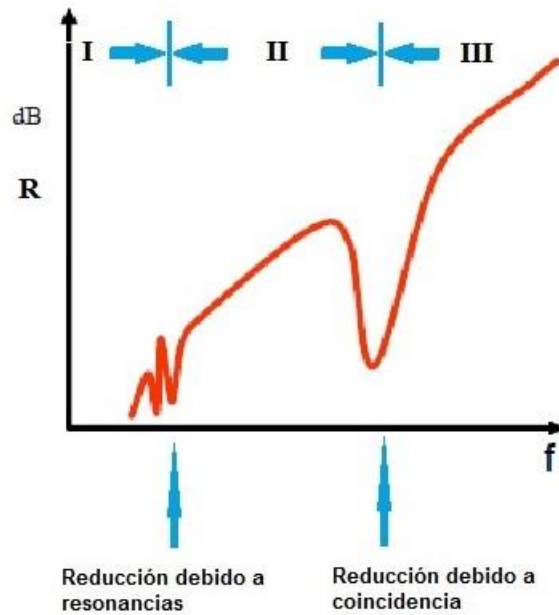


Figura 2 Variación, en general, de R en función de la frecuencia, para una pared o panel homogéneos. Región I: Región controlada por rigidez. Región II: Región controlada por masa. Región III: Región controlada por amortiguamiento

Existen varias técnicas para predecir el aislamiento sonoro para cada una de esas regiones. Siguiendo con el caso de un panel o muro homogéneo, en frecuencias bajas, este vibra como un todo y la transmisión de sonido a través del muro está determinada fundamentalmente por su rigidez. En la figura 3, se muestra esquemáticamente el movimiento del panel en la región I.

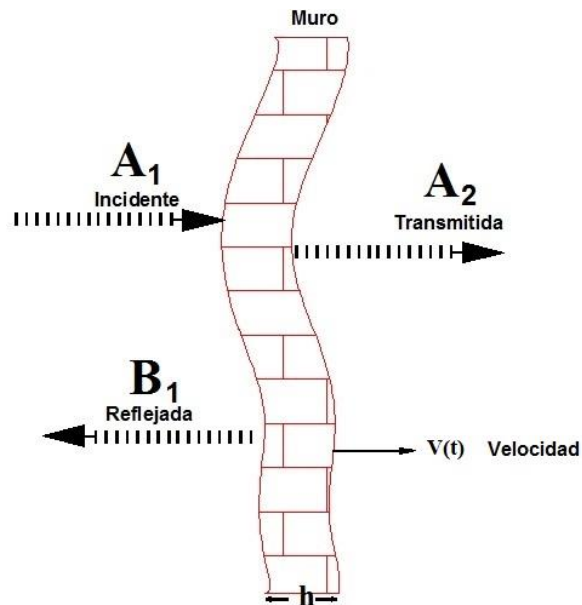


Figura 3. Movimiento del panel en la región I.

Las ecuaciones para las presiones y velocidad de partícula, en este caso están dadas por:

$$p_1(x,t) = \mathbf{A}_1 e^{j(\omega t - kx)} + \mathbf{B}_1 e^{j(\omega t + kx)} \quad (22)$$

$$p_2(x,t) = \mathbf{A}_2 e^{j(\omega t - kx)} \quad (23)$$

$$v_1(x,t) = \left(\frac{1}{\rho_0 c} \right) \left[\mathbf{A}_1 e^{j(\omega t - kx)} + \mathbf{B}_1 e^{j(\omega t + kx)} \right] \quad (24)$$

$$v_2(x,t) = \left(\frac{1}{\rho_0 c} \right) \mathbf{A}_2 e^{j(\omega t - kx)} \quad (25)$$

En la interfaz $x = 0$, las velocidades de partícula en ambos lados del panel son iguales a la velocidad instantánea del panel $V(t)$, por lo que obtenemos:

$$\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1 = \mathbf{A}_2 \quad (26)$$

$$V(t) = \frac{\mathbf{A}_2 e^{j\omega t}}{\rho_0 c} \quad (27)$$

La rigidez finita del panel obliga que la fuerza neta que actúa en el panel sea igual a la fuerza de muelle (ley de Hooke, $F = -Kx$). En este trabajo esta fuerza la determinaremos por la *Compliance* mecánica específica (compliance mecánica por unidad de área), denotada por C_s . Haciendo el balance de fuerzas tendremos:

$$C_s [p_1(0,t) - p_2(0,t)] = -\int V(t) dt = \frac{\mathbf{A}_2 e^{j\omega t}}{j\omega \rho_0 c} \quad (28)$$

Sustituyendo en esta ecuación, las ecuaciones (22) y (23), tendremos:

$$\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 - \mathbf{A}_2 = \frac{j\mathbf{A}_2}{\omega \rho_0 c C_s} \quad (29)$$

Finalmente podemos obtener la relación entre amplitudes de la onda transmitida y la onda, incidente, combinando la ecuación (29) con (26) y (27):

$$\frac{\mathbf{A}_2}{\mathbf{A}_1} = \frac{1 - \frac{j}{2\omega \rho_0 c C_s}}{1 + \left(\frac{1}{2\omega \rho_0 c C_s} \right)^2} \quad (30)$$

Por lo que el índice de transmisión sonora será:

$$\tau = \left| \frac{A_2}{A_1} \right|^2 = \frac{1}{1 + (1/2 \omega \rho_0 c C_s)^2} \quad (31)$$

Por otro lado el correspondiente Índice de Reducción Sonora R , estará dado como:

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \log_{10} (1 + K_s^{-2}) \quad (32)$$

Donde:

$$K_s = 4\pi f \rho_0 c C_s \quad (33)$$

Para un panel rectangular de dimensiones $a \times b$, grosor h y densidad ρ_p , la expresión para la compliancia acústica específica es:

$$C_s = \frac{768(1 - \sigma^2)}{\pi^8 E h^3 (1/a^2 + 1/b^2)^2} \quad (34)$$

En esta ecuación E es el modulo de Young y σ es la relación de Poisson. La frecuencia de resonancia que marca la transición entre la Región I y la Región II, para el panel rectangular está dada por:

$$f_{11} = (\pi/4\sqrt{3}) h (1/a^2 + 1/b^2) c_L \quad (35)$$

Donde c_L es la velocidad de las ondas longitudinales en el panel, dada por:

$$c_L = \left[\frac{E}{\rho_p (1 - \sigma^2)} \right] \quad (36)$$

Para la Región III, la transición la define la *frecuencia de coincidencia* que es cuando la longitud de onda de la energía sonora que arriba al panel coincide con la longitud de onda de la onda de flexión del panel. En esta frecuencia la transmisión de la onda sonora se ve facilitada, por lo que el aislamiento sonoro disminuye. Esta frecuencia de *coincidencia* o *crítica* está dada por la siguiente expresión:

$$f_c = \frac{\sqrt{3} c^2}{\pi c_L h} \quad (37)$$

En esta Región III, por arriba de la frecuencia crítica el Índice de Reducción Sonora depende fuertemente de la frecuencia de las ondas incidentes y el amortiguamiento interno del material del que esté elaborado el panel. Se ha encontrado, de forma empírica, que el Índice de Reducción Sonora, para una incidencia aleatoria, para frecuencia por arriba de la crítica, es:

$$R = R_n(f_c) + 10 \log_{10}(\eta) + 33.22 \log_{10}(f/f_c) - 5.7 \quad (38)$$

Donde la cantidad $R_n(f_c)$ es el índice de Reducción Sonora en incidencia normal en la frecuencia crítica, dado por:

$$R_n(f_c) = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\pi f_c M_s}{\rho_0 c} \right)^2 \right] \quad (39)$$

Y la cantidad η es el coeficiente de amortiguamiento del panel.

1.2 Paneles dobles

Las construcciones de paneles o muros dobles, consisten en dos paneles separados por espacio de aire. Para esta tipo de construcción, mostrado en la figura 4, el Índice de Reducción Sonora R , se ve influenciado por la masa de aire de este espacio, además de modificar las características de aislamiento de los paneles individuales.

El comportamiento de R , en función de la frecuencia se divide en 3 regímenes. El régimen A, frecuencias bajas, es para cuando los paneles se encuentran muy cerca uno de otro, en este caso actúa como si fueran uno solo. El espacio de aire entre los paneles tiene un efecto despreciable. Este comportamiento ocurre para la siguiente gama de frecuencias:

$$\frac{\rho_0 c}{\pi(M_{s1} + M_{s2})} < f < f_0 \quad (40)$$

Donde M_{s1} y M_{s2} son las densidades de masa superficial de cada uno de los paneles.

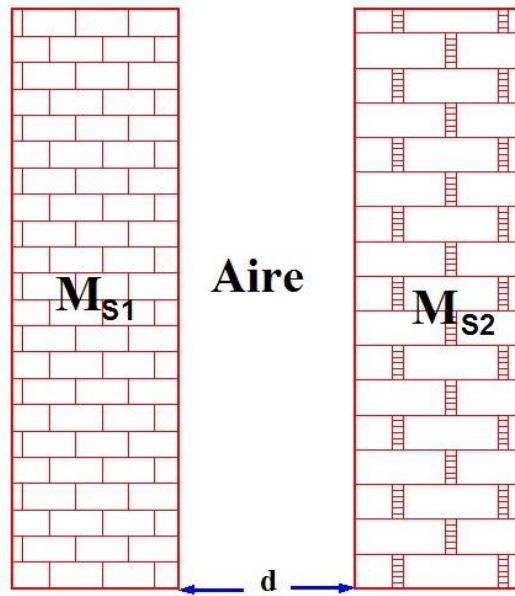


Figura 4 Muro compuesto por dos paneles con un espacio de aire entre ellos.

La frecuencia f_0 es la frecuencia de resonancia de los dos paneles acoplados por el aire. Esta frecuencia está dada por:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{d} \left(\frac{1}{M_{s1}} + \frac{1}{M_{s2}} \right)} \quad (41a)$$

$$f_0 \approx 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{M_{s1}} + \frac{1}{M_{s2}} \right)} \quad (41b)$$

El índice R en el régimen A esta dado por:

$$R = 20 \log_{10}(M_{s1} + M_{s2}) + 20 \log_{10}(f) - 47.3 \quad (42)$$

Cuando los paneles se separan, se establece un patrón de ondas estacionarias entre el espacio de aire, este es el comportamiento del régimen B. Este régimen ocurre en la gama de frecuencias dadas por:

$$f_0 < f < (c/2\pi d) \quad (43)$$

$$f_0 < f < (55/d) \quad (43b)$$

El índice R , en este régimen B, estará dado por:

$$R = R_1 + R_2 + 20 \log_{10}(4\pi f d / c) \quad (44)$$

$$R = R_1 + R_2 + 20 \log_{10}(f d) + 20 \log_{10}(4\pi / c)$$

$$R \approx R_1 + R_2 + 20 \log_{10}(f \cdot d) - 29 \text{ dB} \quad (44b)$$

Donde R_1 y R_2 , son los índices para cada panel actuando por separado.

Cuando los paneles se separan todavía más, los dos paneles actúan independientemente y se observa el comportamiento del régimen C. En este caso el espacio de aire entre los paneles actúa como un pequeño recinto. Este régimen C ocurre en la gama de frecuencias dada por: $f > (c/2\pi d)$. En este caso el índice R , estará dado por:

$$R = R_1 + R_2 + 10 \log_{10} \left[\frac{4}{1 + \frac{2}{\alpha}} \right] \quad (45)$$

Donde α es el coeficiente de absorción de los paneles.

2 Procedimiento de Medición

El objetivo de este proyecto fue utilizar un arreglo como el mostrado en la figura 4, pero variar el coeficiente de absorción α entre los paneles, colocando una capa de material con características porosas para aumentar la absorción. Para este propósito se midieron cuatro tipos de paneles compuestos (muestras A, B, C y D). En la Tabla I, se muestran los detalles de construcción de cada una de las muestras.

Tabla I

ETIQUETA	SISTEMA
Muestra A	Estructura de dos placas de tablaroca*.
Muestra B	Estructura de dos placas de tablaroca recubiertas en su interior con pintura acústica*.
Muestra C	Estructura de dos placas de tablaroca recubiertas en su interior con pintura acústica + Lana mineral.
Muestra D	Estructura de cuatro placas de tablaroca recubiertas (y adheridas) en su interior con pintura acústica + Lana mineral.

*La pintura acústica es un material desarrollado, fabricado y comercializado por Polímeros Protectores S.A. de C.V.

Adicionalmente, en la figura 5 se muestra un esquema de los detalles de cada uno de los paneles que constituyen la muestra A, D, C y B.

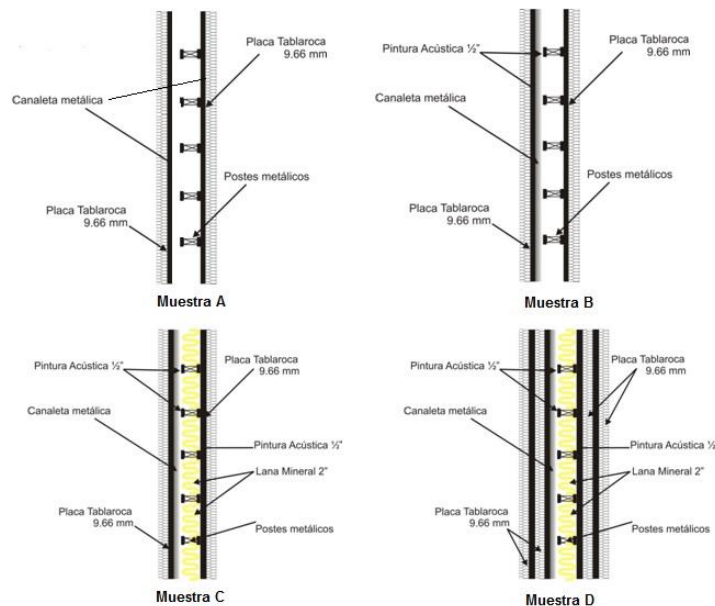


Figura 5. Detalles de ensamblado de las muestras de paneles acústicos a medir.

Las mediciones se realizaron en la Cámara de Transmisión CT del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM. El procedimiento de medición se realizó de acuerdo a la norma ISO 140-3. En la figura 6 se muestra un esquema del arreglo experimental utilizado.

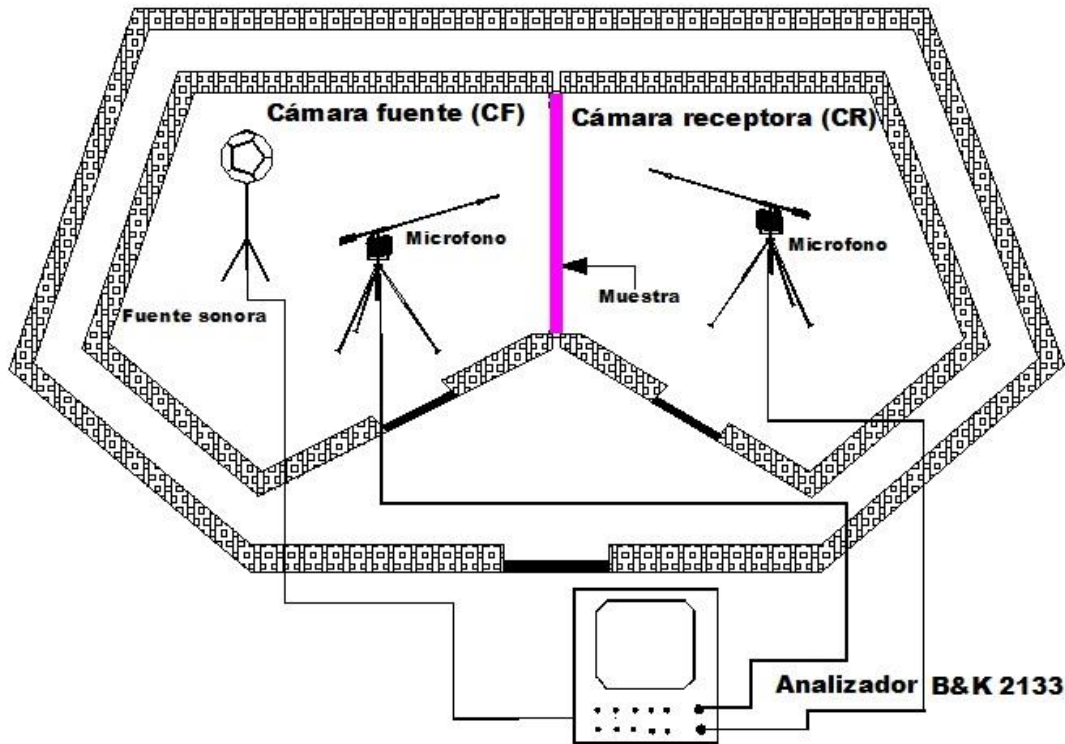


Figura 6. Esquema del arreglo de medición utilizado

En la tabla II se muestra el equipo de medición utilizado. La norma ISO 140-3, establece como procedimiento de medición, determinar la potencia sonora incidente y la potencia sonora transmitida, las potencias se determinan (estiman) mediante el promedio espacial de la presión sonora; a esta cantidad hay que restar la potencia absorbente de la cámara receptora. Este procedimiento se resume en la siguiente ecuación:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (46)$$

Donde:

- L_1 Es el nivel de presión sonora promedio en la cámara fuente
- L_2 Es el nivel de presión sonora promedio en la cámara receptora
- S Es el área del espécimen de prueba en m^2
- A Es el área equivalente de absorción sonora en m^2

En general, se define el valor promedio como:

$$L = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_n/10} \right] \quad (47)$$

Para determinar el área equivalente de absorción sonora se utiliza la ecuación de Sabine, por lo que la ecuación (46) se modifica a:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log(Tr) + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{0.163V} \right) \quad (48)$$

Donde:

L_1 Tiempo de reverberación de la cámara receptora
 V Volumen de la cámara receptora

Tabla II

Equipo	Marca	Modelo	No. Serie
Analizador	Brüel & Kjaer	2133	18553601
Micrófono incidencia aleatoria (CF)	Brüel & Kjaer	4943	4749906
Micrófono incidencia aleatoria (CR)	Brüel & Kjaer	4166	1440624
Boom giratorio	Brüel & Kjaer	3923	2705111
Calibrador	Brüel & Kjaer	4230	1207137
Termo higrómetro	White Box	CT485-R5	-----
Computadora Laptop	Hewlett-Packard	-----	-----
Fuente Omnidireccional	-----	-----	-----

Después de colocar la muestra a medir y antes de realizar mediciones de nivel de presión sonora, se deben caracterizar ambas cámaras (fuente y receptora) con el objetivo de que los tiempos de reverberación cumplan con los establecidos en la norma ISO 140-1:

$$1 \leq T_R \leq 2 \left(\frac{V}{50} \right)^{2/3}$$

Donde V es el volumen del recinto que se quiere evaluar, de tal manera se tiene:

Para la cámara receptora $V = 68.3 \text{ m}^3 \Rightarrow 1 \leq TR \leq 2.46 \text{ (s)}$
 Para la cámara fuente $V = 77.6 \text{ m}^3 \Rightarrow 1 \leq TR \leq 2.68 \text{ (s)}$

Para lograr estos tiempos de reverberación, fue necesario acondicionar ambas cámaras, introduciendo cierta cantidad de absorción. Este acondicionamiento se hizo a prueba y error, midiendo cada vez el

tiempo de reverberación. Después de varios ensayos se lograron los resultados mostrados en las figuras 6 y 7.

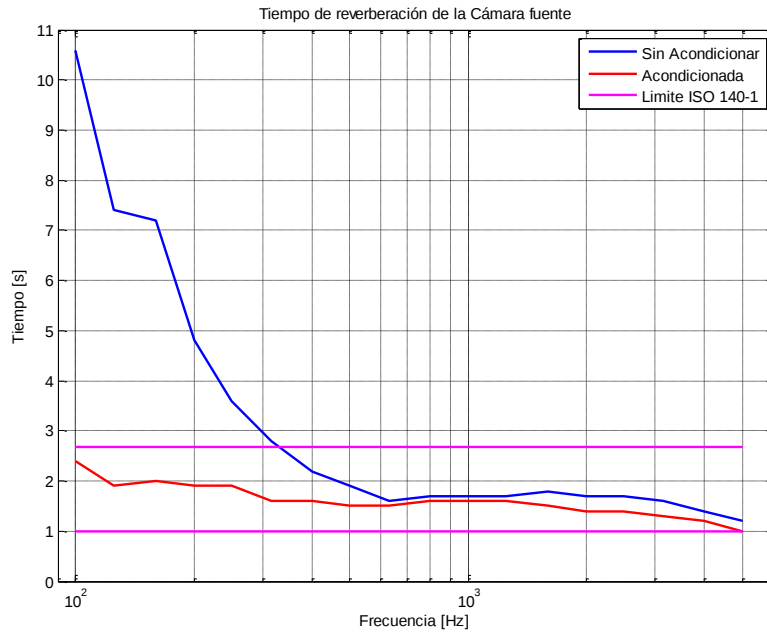


Figura 6. Tiempos de reverberación para la cámara fuente.

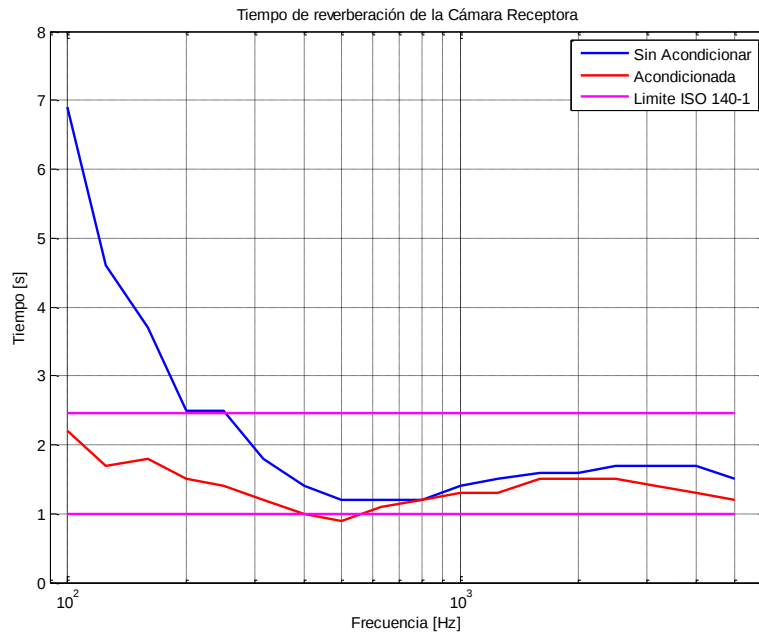


Figura 7. Tiempos de reverberación para la cámara receptora

Los tiempos de reverberación se midieron por el método de ruido interrumpido, utilizando el mismo analizador B&K 2131. Se realizaron mediciones en 4 diferentes posiciones, en las graficas mostradas en la figura 6 y 7, se muestran los valores promedio de estas posiciones.

En la figura 8, se muestran los detalles del acondicionamiento final, mostrando los lugares donde se colocó el material absorbente. En la misma figura 8, se muestran las posiciones de micrófonos y fuente en las cámaras.

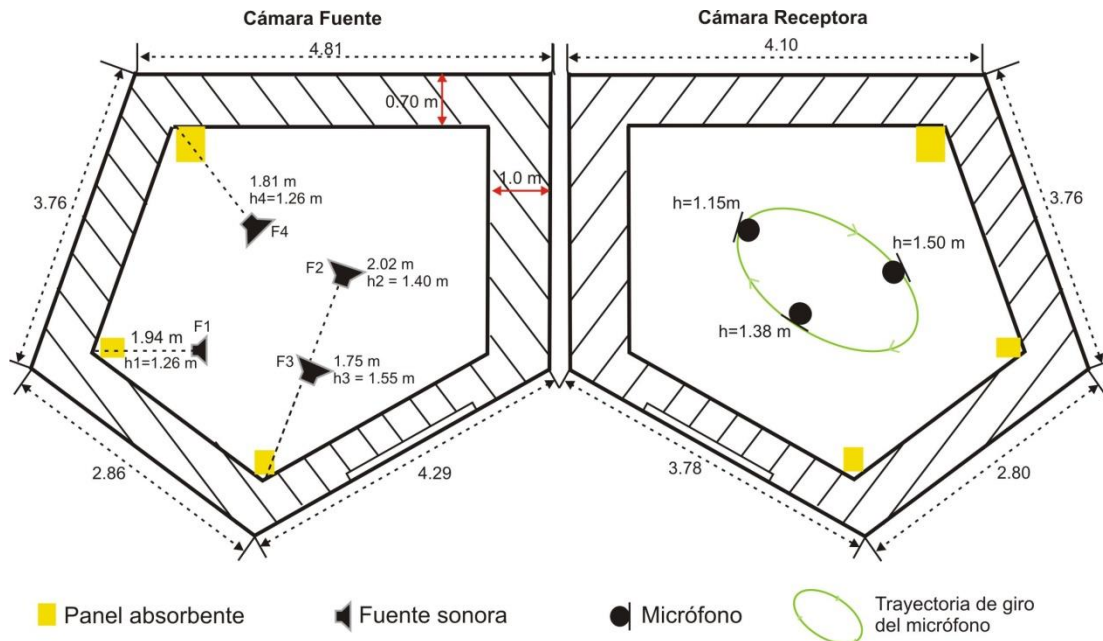


Figura 8. Esquema que muestra las cuatro posiciones de la fuente sonora, así como tres puntos de medición de los micrófonos en la cámara fuente y receptora. Las superficies con rayas corresponden a áreas restringidas donde la norma establece que no se debe colocar ningún instrumento de medición.

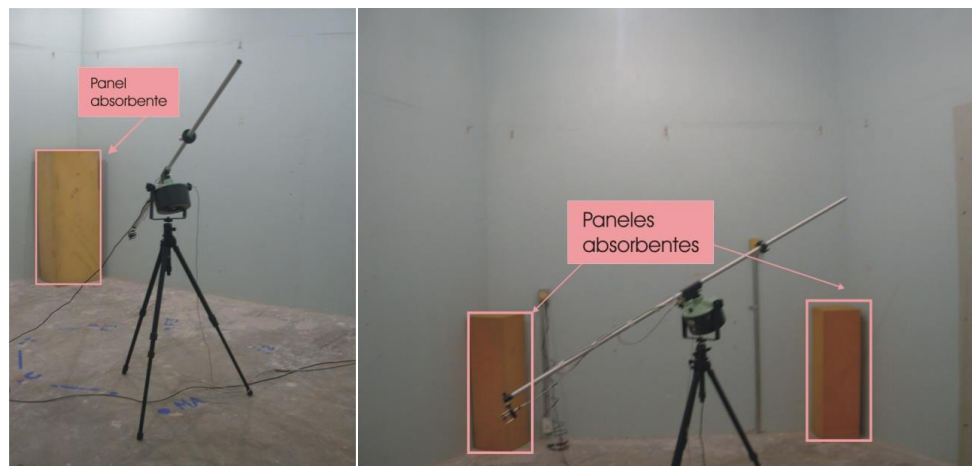


Figura 9. Imagen que muestra la ubicación de los paneles absorbentes al interior de una de las cámaras para reducir el tiempo de reverberación.

3 Resultados

Inicialmente se midió el aislamiento de los 2 paneles de tabla roca, Muestra A; todas las mediciones del Índice de Reducción Sonora se determinaron en la gama de frecuencias que cubre el intervalo de 100 a 5 000 Hz. En la grafica de la figura 10, se muestra el índice de Reducción Sonora, R, de la Muestra A y su desviación; Los valores de R mostrados son los valores promedio de 5 combinaciones fuente-micrófono.

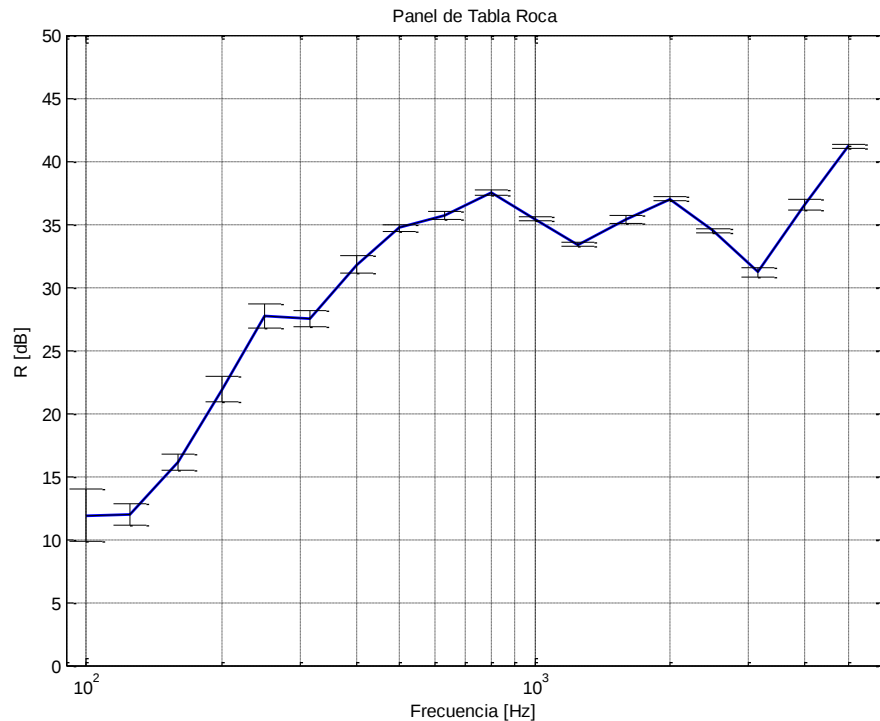


Figura 10. Valores de R, promedio espacial y su desviación normal Muestra A.

Como puede observarse en la figura 10, la frecuencia de coincidencia, para este muro, se ubica en aproximadamente 1250 Hz y la frecuencia de resonancia es de aproximadamente de 250 Hz, por lo que podemos ubicar la Región I, región controlada por rigidez, en frecuencias por debajo de 250 Hz; la Región III, región controlada por amortiguamiento, en frecuencia por arriba de 1250 Hz y la Región II, región controlada por masa, en la región de 250 a 1250, ver figura 2 como referencia.

A continuación a la Muestra A, se le añadió una capa de aproximadamente $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor de pintura acústica; esta pintura acústica (de estructura polimérica) se desarrollo para reducir el ruido por impacto, pero se deseaba conocer cómo se comportaría al colocarla en un muro divisorio y no en losa de piso ó techo. El arreglo de las placas de Tabla roca mas la pintura acústica constituyen la Muestra B.

En la figura 11, se muestran los valores del Índice de Reducción Sonora, R, tanto para la Muestra A, como para la muestra B, para visualizar mejor el comportamiento de la pintura acústica.

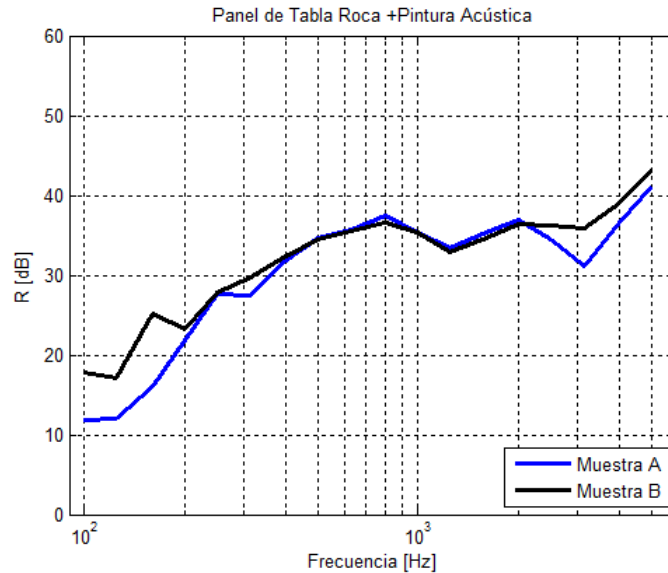


Figura 11. Valores de R, para las Muestras A y B.

Como puede verse al examinar la figura 11, la pintura no tiene efecto en la Región II, controlada por masa, pues la capa de pintura no añade prácticamente nada de masa al muro; en cambio la pintura acústica tiene efecto en la Región I y III; el efecto que tiene la pintura en la Región I, es de esperarse ya que la pintura acústica contribuye al amortiguamiento y, en consecuencia, aumenta el valor de R en frecuencia por arriba de 3150 Hz.

La contribución en valor de R, de la pintura acústica en la Región I, debe atribuirse a que en esta región, la pintura acústica tiene el efecto de aumentar la rigidez del panel. Este resultado es algo inesperado, ya que el incremento en R es casi 6 dB en 100 Hz.

Para preparar la Muestra C, se añadió lana mineral, con espesor de 5 centímetros (2 pulgadas). En la figura 12 se muestra la maniobra de colocación de la lana mineral entre los paneles de tabla roca.

Al medir esta combinación de Tabla roca y lana mineral, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 13; en esta misma figura se muestra, para fines de comparación, la curva de la figura 10 que corresponde a los paneles de tabla roca.



Figura 12. Colocando A) pintura acústica B) lana mineral

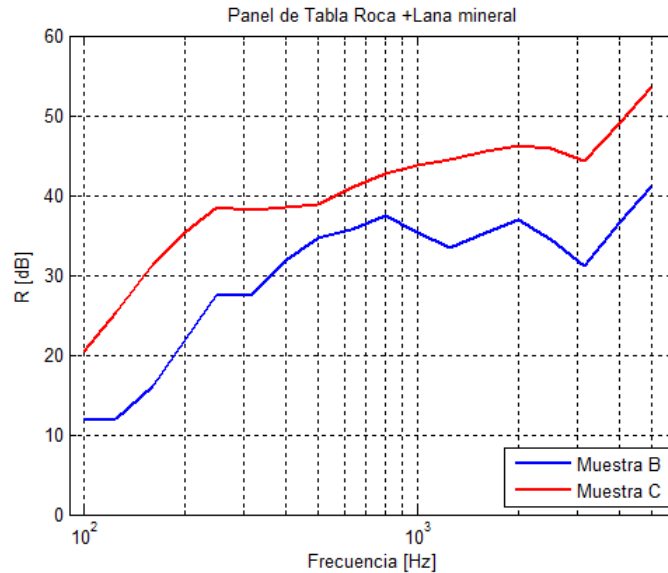


Figura 13. Comparación entre aislamiento sonoro del arreglo B y el arreglo C, la diferencia entre ambos arreglos es que en el arreglo C se añadió lana mineral, ver figura 5.

Como puede observarse en la figura 13, el aislamiento aumenta en las tres Regiones de frecuencia; incluso en la Región I, la controlada por masa; por la manera de aplicar la lana mineral estimamos agregar entre 2 y 5 Kg/m² de densidad de masa.

Enseguida se montó la muestra con el arreglo D, ver Tabla I y Figura 5. Los resultados se muestran en la figura 14, en la misma figura se muestran los resultados para las 4 muestras, incluyendo su error en la determinación de R.

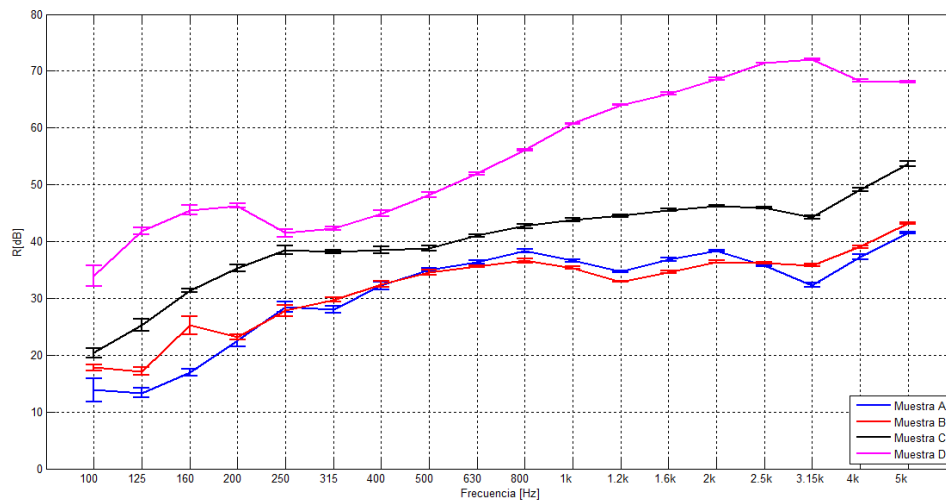


Figura 14. Valores de R y su desviación, para los distintos arreglos de la Tabla I, ver también figura 5

Para tener una mejor idea de las características alcanzadas por el muro propuesto en la Muestra D, en las figuras 15 y 16, se muestran comparaciones con otros paneles.

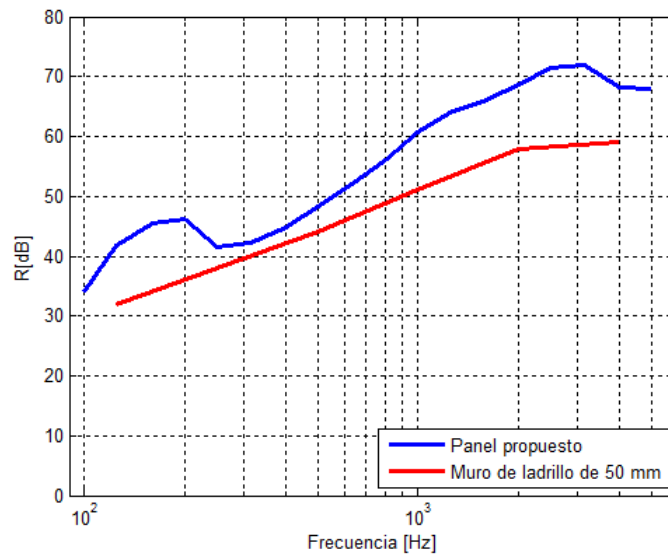


Figura 15. Comparación entre el panel propuesto y un muro de 50 mm de espesor + una cavidad de aire de 60 mm + una placa de yeso de 13 mm.

La primera comparación es contra el arreglo que consiste en un muro de ladrillo macizo de grosor de 50 mm más una cavidad de aire de 60 mm, mas una placa de yeso de espesor de 13 mm. La segunda comparación es contra un panel fabricado en USA, por la empresa Sound Reduction Systems (SRS), que consiste una placa Maxiboard fijada a una pared de block ligero, con un grosor de 100 mm y una densidad de 630 kg/m^3 con barras flexibles. Estas comparaciones muestran mejor las diferencias, a favor o en contra en función de la frecuencia, que comprar los respectivos índices de clasificación (STC)-resumidos en un solo número-.

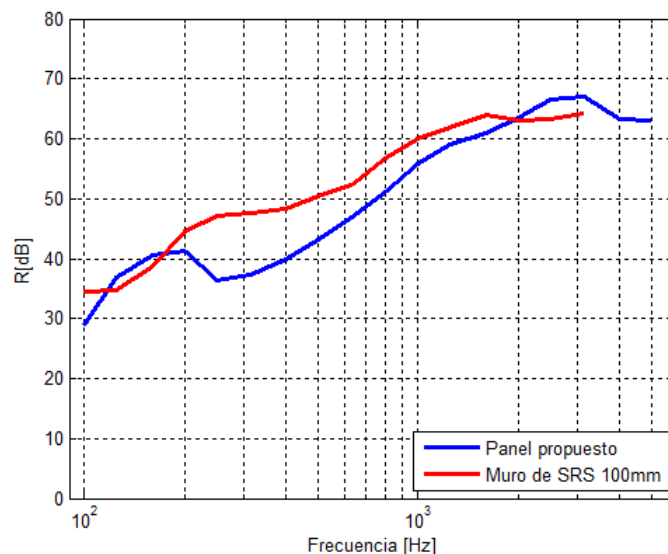


Figura 16. Comparación entre el panel propuesto y arreglo que consiste en una placa Maxiboard fijada a una pared de block ligero, con un grosor de 100 mm y una densidad de 630 kg/m^3 con barras flexibles

Al hacer la comparación con el arreglo de SRS, se tomó en consideración que los datos mostrados de su arreglo no se hicieron en R (Sound Reduction Index) sino en Dnt (Standardised Sound Level Difference). Por lo que se compensó con -5 dB, los valores de R del panel propuesto.

Conclusiones

El arreglo propuesto consigue una característica de aislamiento sonoro R , que compite bastante bien con otros paneles que existen en el mercado internacional. Esta característica acústica deberá modularse con un análisis de costos cuidadoso que permita ofrecer un producto atractivo con una relación costo-beneficio ventajosa, el tema de costos no se aborda en el presente trabajo.

Referencias

- [1] Barron R. F. *Industrial Noise Control and Acoustics*. Edit. Marcel Dekker, Inc. New York, 2003.
- [3] Hopkins C. *Sound Insulation*. First Edition, Elsevier , 2007
- [2] Fahy F. *Foundations of Engineering Acoustics*, Elsevier , 2001.
- [4] ISO 140, Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements
 - Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission, 1997.
 - Part 1 Amd. 1: Specific requirements on the frame of the test: 2004.
 - Part 2: Determination, verification and application of precision data, 1991.
 - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements 1995.
 - Part 3 Amd. 1: Installation guidelines for lightweight twin leaf partitions, 2004.
 - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms, 1998.
 - Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and facades, 1998.
- [5] Arau H. *ABC de la Acústica Arquitectónica*, Ediciones CEAC, 1999
- [6] Prascevic M., Cvetkovic D., Mihajlov D., “Comparison of Prediction and Measurement Methods for Sound Insulation of Lightweight Partitions”, *Facta Universitatis. Architecture and Civil Engineering* Vol 10(3) pp 155-167, 2012.
- [7] Ballagh K. O. “Accuracy of Prediction Methods for Sound Transmission Loss” The 33th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Inter-Noise 2004 Prague, august 22-25.
- [8] Ellefsen J., Olafsen S. “Empirical calculations of sound insulation in lightweight partition walls with separate steel studs” *Proceedings 20th International Congress, ICA 2010*, pp 23-27. Sydney Australia.
- [9] “Ultimate Acoustics Solutions for Walls & Partitions”. Technical Notes of Sound Reductions Systems