

MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL SONIDO

RESUMEN

El artículo presenta una metodología confiable y normalizada para la medición del coeficiente de absorción de sonido utilizando un tubo de impedancia provisto de un parlante y un micrófono, herramientas de la estadística inferencial y materiales que juegan un papel muy importante para el caso de aislamiento acústico arquitectónico.

PALABRAS CLAVES: Absorción de sonido, tubo de impedancia, aislamiento

ABSTRACT

This article presents a reliable methodology and normalized for the measurement of the coefficient of sound absorption using a provided impedance pipe with a speaker and a microphone, tools of the inference statistics and material that play a role very important for the case of architectural acoustic isolation.

KEYWORDS: *Sound absorption, impedance pipe, isolation*

1. INTRODUCCIÓN

La medición del coeficiente de absorción del sonido de algunas muestras de materiales como fibra de vidrio, espuma a base de PVC y cartón, mediante la utilización del tubo de impedancia, es de gran importancia para construcciones acústicas como estudios de grabación y salones de audio. Un método muy conocido para la medición del coeficiente de absorción de sonido es el tiempo de reverberación en un cuarto, siendo una cualidad acústica muy importante en un cuarto, en lo concerniente a músicos y arquitectos. La teoría explica el tiempo de reverberación en pequeños y grandes cuartos, la cual fue desarrollada por Sabine¹. Esta teoría requiere de un amplio conocimiento de las propiedades absorbedoras de los materiales, los cuales cubren las superficies del cuarto a analizar.

El tubo de impedancia, entre muchos de sus usos, permite medir las propiedades de los materiales de construcción mediante la utilización de muestras, y utilizando un método rápido y sencillo que permite reproducir perfectamente el coeficiente de absorción. Este tubo está provisto de un parlante, el cual produce ondas acústicas, las cuales viajan dentro del tubo y son reflejadas por la muestra de prueba; la fase de interferencia entre la onda dentro del tubo, las cuales son incidente y reflejada desde la muestra de prueba, resultan en la formación de un patrón de ondas estacionarias dentro del tubo. Si el 100% de la onda incidente es reflejada, entonces la onda incidente y la onda reflejada tendrán la misma amplitud; los nodos en el tubo tienen presión cero y los antinodos el doble de presión.

JAIME ANDRÉS CASTAÑEDA

Ingeniero mecánico
Universidad Tecnológica de Pereira
jaanvaci@msn.com

HÉCTOR ÁLVARO GONZÁLEZ

Profesor Asistente
Escuela de Tecnología Mecánica.
Universidad Tecnológica de Pereira
hagonza@utp.edu.co

Si un porcentaje de energía incidente es absorbido por la muestra, esto nos indica que, la onda incidente y reflejada tienen diferente amplitud; los nodos no muy largos tienen presión cero. La magnitud de la presión en los nodos y antinodos es medida con un micrófono de prueba, el cual se desliza dentro del tubo. La relación de presión máxima (antinodo) y la presión mínima (nodo) es llamada *standing wave ratio SWR*, esta relación, la cual es mayor o igual a la unidad, es usado para determinar el coeficiente de amplitud reflejada R de la muestra y su coeficiente de absorción.

Un método alternativo para determinar las propiedades absorbedoras de un material, el cual es ampliamente usado actualmente, involucra la colocación de una unidad de área de una pieza de material (el cual podría ser un metro cuadrado) en un cuarto especial de reverberación. La diferencia entre el tiempo de reverberación con y sin el material permite determinar las propiedades absorbedoras del material. Este método es generalmente más costoso, requiere de calibración precisa de los sensores y de un especial diseño de la cámara de reverberación y es mucho menos conveniente, es superior para la medición de características de absorción para promediar ondas de sonido incidente, y es preferible para la determinación de propiedades de absorción que dependen del tamaño del material. Existen otros métodos para la medición del coeficiente de absorción de sonido en los cuales se pueden obtener mejores resultados con determinadas características, pero teniendo en cuenta las limitaciones de los instrumentos y recursos con los que cuenta la Universidad Tecnológica, sin desmeritar los resultados que se puedan obtener de este método o la precisión que se pueda alcanzar, a iniciativa de uno de los autores, se utilizó un tubo de impedancia del laboratorio de Física, provisto por un parlante y un micrófono para explorar el campo sonoro. En este artículo se presentan los resultados de la

¹ Wallace Clement Sabine (1868-1919) fue el pionero en la arquitectura acústica.

Fecha de recepción: 27 Mayo de 2003

Fecha de aceptación: 23 Julio de 2004

investigación experimental realizada para medir el coeficiente de absorción de varios materiales con una confianza del 95% bajo condiciones controladas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Medición del coeficiente de absorción de sonido mediante la aplicación de un procedimiento confiable, basándose en la medición de la energía disipada por el material al ser colocado en el tubo de impedancias, donde un parlante proporciona la energía en forma de sonido y un micrófono se encarga de medir la disipación de esta en el material de prueba. Aplicando un método experimental para la medición del coeficiente de absorción de sonido, se determinará a partir de este, los coeficientes de diferentes materiales de fácil adquisición en el mercado.

3. JUSTIFICACION

La apropiación de la teoría de sonido permitirá conocer una metodología que describa un procedimiento para determinar el coeficiente de absorción de sonido. Es de suma importancia comprobar si los materiales absorbentes de ruido de fácil adquisición en el mercado verdaderamente se pueden usar como materiales aislantes o absorbentes de sonido y a que frecuencias son más eficientes.

En el mercado existen materiales que pueden ser usados como absorbentes de sonido, pero no siempre se conocen las características de estos o los fabricantes no están en condiciones de ofrecerlas, como por ejemplo el coeficiente de absorción. A nivel del país no se tiene información acerca de estudios realizados en este campo.

Los materiales absorbentes juegan un papel importante en el área de los arquitectos acústicos, el diseño de cuartos de grabación o cuartos de audio y en el interior de los automóviles (estos materiales son los responsables de casi el 50% de la absorción de sonido dentro de los automóviles).

El efecto negativo que tiene el ruido sobre el ser humano, tanto en los períodos de trabajo como en los de descanso, afecta el rendimiento y la calidad de sueño.

3. OBJETIVO GENERAL

Aplicar un procedimiento normalizado en condiciones controladas con base en la norma ASTM C384-98, con el fin de buscar el coeficiente de absorción del sonido para diversos materiales.

3.1 Objetivos Específicos

Aplicar la teoría de sonido en el tubo de impedancia para determinar el comportamiento de las ondas dentro de este.

Resonar ondas en un tubo de impedancia para determinar el primer máximo y mínimo relativo.

Aplicar la estadística inferencial en el análisis de los datos para determinar la confiabilidad de estos.

Establecer un procedimiento confiable para la determinación del coeficiente de absorción de sonido.

Producir un artículo y/o ensayo que permita divulgar la teorización o conceptualización de los resultados producto de la investigación.

4. MARCO TEÓRICO

La energía total que choca contra una pared, una parte se refleja, otra parte, es absorbida en la propia pared y la otra parte, transmitida al espacio detrás de la pared. Dividiendo éstos, los fragmentos de energía son:

El coeficiente de reflexión de energía $|r|^2$

El coeficiente de absorción α

El coeficiente de transmisión de energía $|t|^2$ y aplicando conservación de energía se tiene:

$$|r|^2 + \alpha + |t|^2 = 1 \quad (1)$$

Suponga una onda plana armónica que choca en dirección normal sobre una superficie. La onda plana viajera será reflejada con una disminución de intensidad debido a la absorción del material. Si la presión de la onda de sonido incidente y reflejada son llamadas P_i y P_r respectivamente, y el coeficiente de reflexión r a un punto, es definido por la ecuación (2) se tiene

$$r = \frac{P_r}{P_i} \quad (2)$$

Las intensidades de las dos ondas son proporcionales a $|P_i|^2$ y $|P_r|^2$, el coeficiente de reflexión de energía es:

$$r^2 = \frac{|P_r|^2}{|P_i|^2} \quad (3)$$

si el fragmento de energía que traspasa la muestra es muy pequeña (despreciable) comparada con la absorbida, entonces el coeficiente de absorción de energía es obviamente representada por la ecuación (4)

$$a = 1 - r^2 \quad (4)$$

Los estudios críticos de numerosos métodos para medir la impedancia acústica en incidencia normal, hace que se confíe aquí, en la descripción del principal método que parece frecuentemente ser usado². Si la fuente sonora opera a bajas frecuencias tal que la longitud de onda sea mayor

² tubo en el que se inserta una fuente sonora y la muestra bajo prueba se enfrenta a esta.

que 1.707 veces el diámetro D del tubo, sólo las ondas planas pueden viajar por el tubo. En la vecindad de la fuente estas ondas planas se perturban si la fuente sonora genera las ondas no planas. Lo mismo se cumple para el vecindario de la muestra.

Una muestra no homogénea puede reflejar la onda plana entrante como un reflejo distorsionado. A alguna distancia de la muestra la onda reflejada será de nuevo plana, si la longitud de onda es bastante grande. Por consiguiente todos los tubos de resonancia que usan las ondas planas sólo pueden ser usados a las frecuencias menores de $C_0/1.7 D$, donde C_0 es la velocidad del sonido en el espacio libre. Esta restricción no puede descuidarse si la fuente nos proporciona las ondas idealmente planas, desde que todas las muestras sean más o menos homogéneas, entonces, reflejarán las ondas no planas progresivamente si la frecuencia escogida es demasiado alta. Asumiendo que esta restricción se cumple, se puede describir el sonido contenido en el tubo como la superposición de dos ondas planas, una incidente y una reflejada. Debido a que la absorción y la reflexión serán de intensidad más pequeña que la incidente, se puede aplicar la ecuación (3), para determinar el coeficiente de la reflexión r .

Algunos métodos para explorar el campo sonoro han sido trabajados fuertemente, difiriendo en la cantidad en que el campo sonoro se perturba. Estos métodos no serán explicados aquí y el lector los puede consultar en la referencia [1] y [2].

Debido a la limitación de instrumentos con los que cuenta el laboratorio de Física de la universidad tecnológica de Pereira y de recursos por parte de este proyecto y teniendo en cuenta los diferentes métodos propuestos anteriormente, se decide utilizar el tubo de impedancia, provisto de un parlante y micrófono para explorar el campo sonoro, para lo cual a continuación se describe de una forma mas detallada la teoría para la utilización de este método.

Si alguna parte de la energía incidente es absorbida por la muestra, las ondas incidente y reflejada tendrán diferentes amplitudes; y los nodos en un tubo no muy largo tienen presión cero. Las amplitudes de presión en los nodos y antinodos son medidas con un micrófono, el cual se desliza a lo largo del tubo y su posición es determinada por una regla graduada paralela al tubo.

La amplitud en un antinodo de presión (máxima presión) es $(A+B)$, y la amplitud en un nodo de presión (mínima presión) es $(A-B)$, las cuales se muestran en la figura 1. No es posible medir A o B directamente pero se puede medir $(A+B)$ y $(A-B)$, esto se logra al resonar la onda en el tubo, formándose de esta manera ondas estacionarias. Se puede definir la relación de presión máxima a presión mínima como SWR (standing wave ratio), mediante la ecuación 5, [4]

$$SWR = \frac{A+B}{A-B} \tag{5}$$

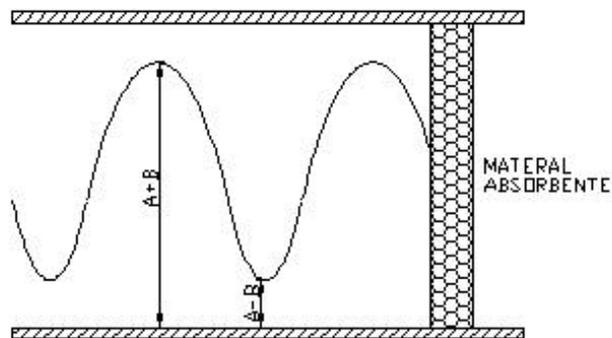


Figura 1. Representación de la máxima y mínima presión en un tubo de impedancia para ondas estacionarias.

La ecuación 1 puede ser manipulada para determinar el coeficiente de reflexión de la potencia del sonido, expresada mediante la ecuación 6.

$$R = \frac{B}{A} = \frac{SWR-1}{SWR+1} \tag{6}$$

La energía reflejada es proporcional al cuadrado de las relaciones de amplitud de las ondas, por lo tanto, el coeficiente de absorción del sonido (α) de la muestra a una frecuencia dada esta dado por la ecuación 7.

$$\alpha = 1 - R^2 = \frac{(SWR-1)^2}{(SWR+1)^2} \tag{7}$$

5. METODO O ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE ANALISIS, CRITERIOS DE VALIDEZ Y CONFIABILIDAD

La confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto produce iguales resultados³; para nuestro caso el objeto será el Osciloscopio, al cual se le tomaran diferentes lecturas en intervalos de tiempos para una misma, señal patrón. La validez de un instrumento de medición es validada cuando mide aquello a lo que esta destinado⁴, en nuestro caso el Osciloscopio proporcionará lecturas de voltaje, el cual es la variable principal para la determinación del coeficiente de absorción de sonido.

La norma ASTM C384-98 para el método de prueba estándar para la impedancia y el coeficiente de absorción acústico en materiales, cubre el uso del tubo de impedancia, alternativamente llamado aparato de ondas estacionarias, para la medición de la relación de impedancia y el coeficiente de absorción de incidencia normal de materiales

³ SAMPIERI, Roberto H., COLLADO, Carlos F., LUCIO, Pilar B. Metodología de la investigación. Editorial McGraw Hill. 1996

⁴ BERNAL, Cesar A. Metodología de la investigación. Editorial Prentice Hall. 2000

acústicos. Esta norma no pretende dirigir todo lo concerniente a seguridad, si no, asociarlo con este uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer la seguridad y salud de los practicantes y determinar la aplicabilidad de limitaciones regulares propias de esta. Los valores se expresan en unidades del Sistema Internacional para ser considerado como norma.

La norma no será cumplida en su totalidad, ya que posee ítems que son imposibles de llevar a cabo debido a los recursos limitados con los que cuenta este proyecto, por lo tanto, esta solo será tomada como base para desarrollar el experimento. Se realizará una prueba piloto con 4 materiales para los cuales es conocido el coeficiente de absorción de sonido, para determinar la confiabilidad del experimento. Para la obtención de datos, se colocará la muestra de interés dentro del tubo de impedancia y se obtendrán en el Osciloscopio lecturas de voltaje, los cuales representan (A+B) y (A-B), y son necesarias para la determinación del coeficiente de absorción de sonido. Se tomarán 30 datos en primera instancia y se determinará la confiabilidad de dichos datos, la cual no debe ser menor al 99%, si sucede lo contrario se procederá a tomar más datos hasta obtener la confiabilidad deseada. Una vez que los datos han sido recolectados, se puede proceder a analizarlos, para lo cual se utilizará el programa Excel. Una vez determinada la confiabilidad del experimento, se procederá a realizar las pruebas a los demás materiales para determinar el coeficiente de absorción de sonido.

Las medidas de tendencia central son los valores centrales o medios de una distribución dentro de una escala de medición, para este caso se utilizará la media. Las medidas de variabilidad indican la dispersión de los datos en la escala de medición, para este caso se utilizara la desviación estándar poblacional y la varianza. La prueba Z es una prueba de distribución normal que tiene como fin comparar los puntajes de distribución que son diferentes entre sí. El nivel de significancia (alfa) es un nivel de probabilidad de equivocarse y se fija antes de probar la hipótesis; como anteriormente se definió un nivel de confianza del 99%, el nivel (alfa) se definirá como el 1%.

Para comprobar la hipótesis se requiere de una confiabilidad del 99%, si el nivel de significancia (alfa) es 0.01, se compara el valor calculado en la prueba Z con el valor crítico de la prueba estadística (tomado de la tabla de valores Z) según el nivel de significancia elegido. Si el valor calculado de Z es menor que el valor crítico, no se rechaza la hipótesis. Si el valor calculado es mayor que el valor crítico, se rechaza la hipótesis.

6. DISEÑO METODOLOGICO PRELIMINAR

6.1 Hipótesis: Aplicando el procedimiento para determinar el coeficiente de absorción de sonido en los materiales, se disminuirán los costos y se mantiene la confiabilidad en el procedimiento.

6.2 Variables: Se tiene como variable independiente el material y como dependiente el coeficiente de absorción de sonido.

6.3 Indicadores: Para los materiales se tienen los siguientes indicadores: Composición estructural del material y muestras de 232 mm de diámetro.

Para la absorción de sonido se tienen los siguientes indicadores: SWR (Standing wave ratio), R (coeficiente de reflexión de sonido) y NRC (Noise reduction coefficient).

6.4 Instrumentos Y Equipos: Tubo de resonancia PASCO WA-9612, fuente emisora de sonido y osciloscopio.

La figura No. 2 muestra los elementos usados en el experimento de medición.



Figura No. 2 Elementos del proceso de medición de la absorción del sonido.

7. PROCEDIMIENTO NORMALIZADO

Para la realización de este procedimiento se presentaron las siguientes condiciones:

- Temperatura entre 21 a 24 grados centígrados.
 - Realizar las pruebas en las horas de la noche, ya que el ruido de fondo es el menor posible.
 - Laboratorio sin recubrimiento contra ruido.
 - No realizar pruebas cuando esta lloviendo, ya que el ruido de fondo se incrementa demasiado.
 - Verificar que la posición de la muestra sea lo mas perpendicular posible a la dirección del tubo, para garantizar incidencia normal.
 - La muestra de material debe estar en condición de apriete dentro del tubo.
- a. Auto calibrar el osciloscopio mediante la colocación de una sonda en el punto dispuesto para este propósito en el osciloscopio.

- b. Colocar la muestra de material acústico absorbente con la ayuda del embolo en el tubo de impedancia, a una distancia inicial de 60 cm.
- c. Conectar el micrófono directamente a la entrada del osciloscopio y el generador de señales al parlante.
- d. Prender el generador y regular la amplitud de la señal a la 2.5 milivoltios, correspondiente a la mitad de su capacidad.
- e. Prender el Osciloscopio y fijar una velocidad de barrido de 5 ms/div y una ganancia en el canal de 0.5 mv/div. Aunque estos parámetros pueden variar dependiendo del material y pueden ser ajustados a consideración del usuario.
- f. Fijar el generador de señales para producir 250 Hz. en onda sinusoidal.
- g. Fijar el osciloscopio para obtener figuras de Lissajous, mediante la activación del modo *xy*.
- h. Localizar el tubo a una distancia de 1 cm con respecto del parlante.
- i. Posicionar el micrófono a una distancia de aproximadamente 1 mm de la superficie de la muestra.
- j. Observar la figura resultante en el osciloscopio. Si la figura no se acerca a la forma de un círculo, mover la muestra de material dentro del tubo 0.5 cm, mediante la ayuda del embolo retirar el embolo y repetir el paso anterior.
- k. Desactivar el modo *xy* y el canal correspondiente al parlante.
- l. Obtener del osciloscopio la lectura de la amplitud de la onda; este es el valor correspondiente a (A+B).
- m. Desplazar el micrófono hasta obtener en el osciloscopio la primera onda con la menor amplitud; este valor corresponde a (A-B).
- n. Repetir desde el numeral (f) para frecuencias de 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 Hz.
- o. Realizar de nuevo el procedimiento para 30 datos como mínimo.
- p. Determinar que la confiabilidad de los datos para cada frecuencia sea mayor al 99% o de lo contrario, aumentar el tamaño de la población para obtener la confiabilidad deseada.

8. RESULTADOS

Cuando se reporta el resultado de una medida física, es necesario brindar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, para que el usuario pueda darse cuenta de su confiabilidad. Sin tal indicación los resultados de las medidas no pueden ser comparados con datos del mismo tipo. Como parámetro asociado con el resultado de la medición, se tiene la incertidumbre, que caracteriza la dispersión de los valores que en forma razonable se les podrían atribuir a la magnitud medida. La incertidumbre de una medida refleja la falta de conocimiento exacto del mensurado. El resultado de una medición después de correcciones, por efectos sistemáticos reconocidos, es todavía solo un estimado del valor del mensurado debido a que la incertidumbre se obtiene de los

efectos aleatorios y de correcciones imperfectas del resultado por efectos sistemáticos.

Para la prueba piloto se tomaron cuatro materiales de las marcas *FIBERGLASS Y ACUSTIFIBRA*, a los cuales en su ficha técnica se especifica el NRC (Noise Reduction Coefficient), como el promedio aritmético de los coeficientes de absorción de sonido a las frecuencias de 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, a pesar que la norma C423 no define el NRC para la frecuencia de 4000 Hz. A continuación se describen los materiales usados en la prueba piloto: Material No 1 (Acustifibra de 1” $\alpha = 0.7$), Material No 2 (Fiberglass de 30 mm $\alpha = 0.75$), Material No 3 (Acustifibra de 1” $\alpha = 0.9$), Material No 4 (Fresca de 3” $\alpha = 0.95$), con α como coeficiente de absorción. La prueba piloto verificó los coeficientes de absorción conocidos, validando el método propuesto.

Para la prueba de materiales con coeficiente de absorción desconocidos se analizaron cuatro materiales, y se determinó su coeficiente de absorción para frecuencias de 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 y 2500 Hz. Los materiales a los cuales se les realizaron las pruebas presentan las siguientes características:

- El material 1 corresponde una espuma verde a base de PVC con un espesor de 3.6 mm.
- El material 2 corresponde una espuma blanca a base de PVC con un espesor de 3.6 mm.
- El material 3 corresponde a cartón corrugado de 3 mm espesor.
- El material 4 corresponde a una combinación (sándwich) de una espuma de 13 mm y un caucho 1 mm de espesor (espumlatex), el cual para la prueba fue dispuesto de tal manera que la espuma fuese la que recibiera las ondas.

Los gráficos 1 a 4 muestran los resultados del coeficiente de absorción con una incertidumbre de una cifra decimal y una confianza del 95% para los cuatro materiales. En estos gráficos no se estila línea de tendencia porque se trata de conocer el coeficiente de absorción a la frecuencia de la norma.

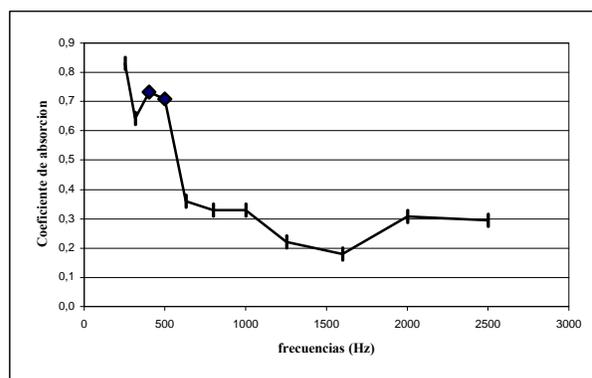


Gráfico No 1 Material No 1 (Espuma verde a base de PVC de 3.6 mm de espesor)

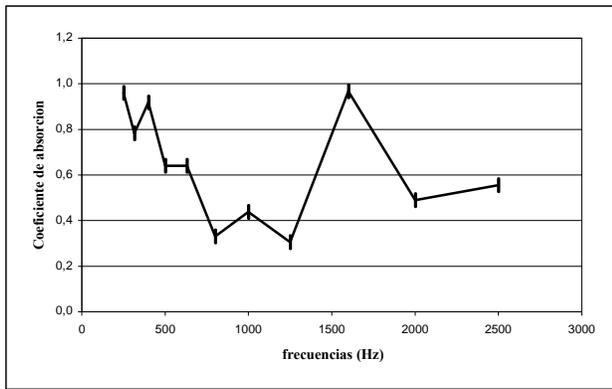


Gráfico No 2. material No 2
(Espuma blanca a base de PVC de 3.6 mm de espesor)

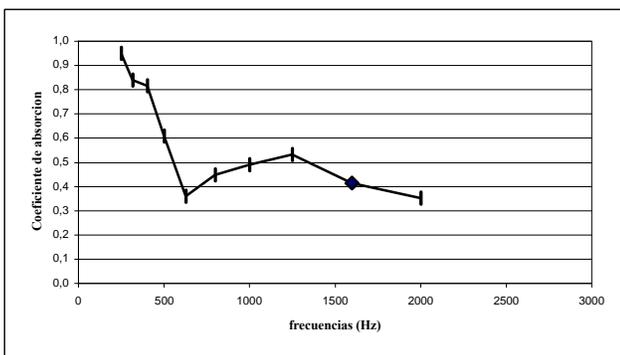


Gráfico No 3. Material No 3
(Cartón corrugado de 3 mm de espesor).

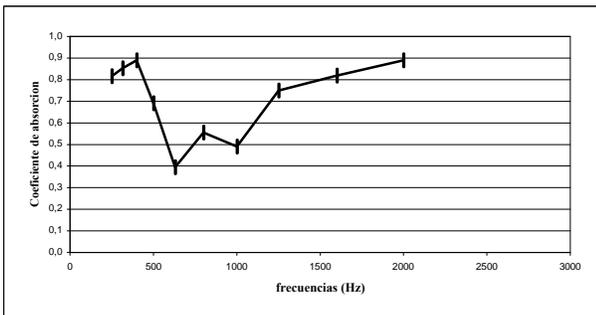


Gráfico No 4. Material No 4
(Sándwich de espuma de 13 mm y caucho de 1 mm).

9. CONCLUSIONES

A manera de conclusión la investigación desarrollada en el proyecto de medición del coeficiente de absorción de materiales porosos permitió verificar la hipótesis, por lo tanto, con el tubo de impedancia de física y observando un control en las condiciones de la medición, se pueden obtener resultados con un grado de confiabilidad del 95%. Los gráficos permiten observar a que frecuencias el material responde mejor a la absorción del sonido, por ejemplo el material 3 se comporta mejor a bajas frecuencias como 250 y 300 Hz., de otro lado el material 4 en

frecuencias del orden de 2000 Hz. Posee buena absorción de sonido.

10. BIBLIOGRAFÍA

[1] HARRIS, Cyril. Manual de medidas acústicas y control del ruido / cyril m. Harris. - 3a ed. España: McGraw-Hill companies inc. , 1995, capítulo 30.

[2] KINSLER, Lawrence E. Fundamentos de acústica. - 3a ed. México: Editorial Limusa, 1988, capítulos 7 y 9.

[3] MARTINEZ, Ciro B. Estadística y muestreo. Edi. Ecoe ediciones. Santa Fe de Bogotá. 1998

[4] RUSSELL, Daniel A. GMI Engineering & Management Institute, Absorption Coefficients and impedance, www.gmi.edu/~drussell/GMI-Acoustics/Absorption.html.

[5] SAMPIERI, Roberto H., COLLADO, Carlos F., LUCIO, Pilar B. Metodología de la investigación. Editorial McGraw Hill. 1996

[6] WYATT, Mason. Sound Absorbing Materials, www.noisecontrol.net/materials.html

[7] BERNAL, Cesar A. Metodología de la investigación. Editorial Prentice Hall. 2000.