

Estudio de Pérdida de Energía de las Ondas Sonoras al Atravesar Diferentes Materiales

N. Agila¹, M. Guerrero²

Massachusetts Institute of Technology – 77 Massachusetts Ave W61-G312, Cambridge, MA 02139, EEUU ¹
Colegio Particular Experimental Politécnico – Km. 30,5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador ²
nmagila@mit.edu¹, mguerrero07@hotmail.com²

Resumen

Este trabajo estudia la pérdida de energía de las ondas sonoras utilizando un transductor electroacústico, un emisor de sonido, parlante y un osciloscopio. Se experimentó con placas de muestra de concreto, ladrillo, corcho, vidrio, balsa y cedro. Se comparó la amplitud de una onda sinusoidal de 4000Hz incidente al plano frontal de una placa del material de prueba con la onda transmitida en la parte posterior de la placa. Se dedujo que la amplitud de la onda que atraviesa el material es directamente proporcional a la amplitud incidente con un factor que depende netamente del material de prueba. Se calculó la pérdida de energía a partir de los factores obtenidos y se encontró que los efectos de transmisión y reflexión de la onda incidente causaron una pérdida de energía en el rango de 93,75% a 99,19% para los materiales estudiados. Se acude a publicaciones especializadas en acústica para en las referencias y se sugiere configuraciones alternativas de experimentos para futuros trabajos.

Palabras Claves: *Energía, ondas sonoras, amplitud, atenuación, reflexión*

Abstract

This work studies the loss of energy in sound waves using an electro-acoustic transducer, a sound emitter, a speaker and an oscilloscope. Samples of concrete, brick, cork, glass, raft wood and cedar were examined. The amplitude of a 4000Hz sine wave incident to the frontal plane of the sample was compared to the amplitude of the wave that had gone thorough the material. It was found that the amplitude of the wave that goes through the material is directly proportional to the incident amplitude. The loss of energy of the sound wave was calculated and it was observed that the transmission and reflection effects of the incident wave caused a loss of energy in the range (93.75, 99.19)% for the studied materials. Specialized journals in acoustics are referenced and modifications to the experiment design are suggested for future work.

Keywords: *Energy, sound waves, amplitude, attenuation, reflection*

1. Introducción

En teoría de ondas, el estudio de las ondas sonoras posee gran relevancia para aplicaciones en ingeniería. Salas de cine, teatro y radio requieren que el sonido en el interior sea de calidad y que el mismo no se filtre al exterior. Los materiales de construcción de las paredes son uno de los criterios de diseño iniciales y que más influenciaran en la acústica de una habitación. Por ejemplo, las paredes de los cubículos de oficina incorporan una delgada capa de aire en medio de dos capas de otros materiales. Estaciones de radio usan capas de fibra de vidrio para aislar las cabinas de grabación y en Institutos de enseñanza musical se pueden encontrar ciertos tipos de rocas para aislar el sonido.

En esta investigación proponemos un método simple para estudiar la pérdida de energía de las ondas sonoras al atravesar distintos materiales.

2. Marco teórico

2.1. Modelos de propagación de ondas

En su forma más simple, una onda sonora sinusoidal propagándose en el eje x se puede expresar como $y = A\cos(2\pi(ft-ax)) = A\cos(ct-x)$. En un instante de tiempo t , esta ecuación provee el desplazamiento de la onda x en su dirección de propagación. Dada una posición, la ecuación indica el desplazamiento de las partículas en dicha posición y causado por la propagación de la onda. La velocidad de fase c indica la velocidad fase de la onda.

A frecuencias en el espectro audible, el aire es un material no dispersor, al igual que la mayoría de otros materiales [1]. En materiales no dispersores todas las partículas del medio se mueven a una misma velocidad de fase independiente de las frecuencias individuales de vibración de las componentes de la onda. La velocidad de propagación de la onda en un mismo medio no depende de su frecuencia. Por lo tanto, se puede afirmar que la relación Newtoniana $v=\lambda f$ de espacio-tiempo describe la velocidad de propagación de toda la onda a partir de su frecuencia f y su longitud de onda λ .

Una forma de modelar las ondas sonoras que atraviesa diferentes materiales es con el comportamiento de una onda mecánica viajera en una cuerda. Considérese una cuerda unidimensional formada por dos cuerdas, la primera de menor densidad que la segunda y unidas por un extremo. Al aplicar un pulso ascendente a la primera cuerda, este viajará por la misma hasta alcanzar la frontera con la segunda cuerda. Al nivel molecular, la última partícula de la cuerda menos densa rebotará con la primera partícula de la cuerda más densa causando la inversión del pulso incidente de fase 180° [2]. Dado que la primera partícula de la cuerda más densa se encontraba inicialmente en reposo, la fuerza ascendente recibida provoca un desplazamiento ascendente en la segunda cuerda y el pulso se transmite con la misma fase del pulso incidente.

Considérese ahora que se aplica un pulso ascendente en el extremo de la cuerda más densa. El pulso se propaga por la cuerda densa y alcanza la frontera entre ambos medios. La primera partícula de la cuerda menos densa es impulsada hacia arriba transmitiendo un pulso en la misma dirección del pulso incidente. Parte del pulso incidente se refleja a cuerda densa sin cambio de fase.

La diferencia en densidades de las cuerdas las caracteriza como medios diferentes. Los pulsos incidentes y transmitidos viajan a distintas velocidades de propagación. La interacción entre las partículas de la frontera entre las cuerdas ocasiona que ambas vibren a una misma frecuencia por lo tanto la frecuencia del pulso es el mismo en el pulso incidente, reflejado y transmitido.

2.2. Difracción

El concepto de difracción es esencial en la propagación del sonido. De acuerdo al principio de Huygens, un frente de onda puede convertirse en un foco emisor de ondas secundarias que son idénticas a la inicial. Por ejemplo, cuando una onda sonora se encuentra con un obstáculo, los puntos en el frente de onda son focos de ondas difractadas con la capacidad de envolver dicho obstáculo [3]. El efecto de difracción depende de la longitud de onda y el tamaño

del obstáculo, y aumentando conforme aumenta el radio de la longitud de onda y el obstáculo [4].

Pierce estudió el caso de difracción en el que la fuente de sonido y el receptor están alineados en lados opuestos de una barrera rígida [5]. Pierce analiza el caso con la aproximación de Kirchoff, Markawa y complejas ecuaciones de difracción para obstáculos con doble borde (bloque o paralelepípedo). Sus resultados, según el método, muestran desde una intensidad de onda difractada cero a un valor pequeño comparado con la intensidad del sonido incidente, valor que infiere es calculable. Uno de los parámetros utilizados en este análisis es el número Fresnel N , parámetro adimensional que sugiere la diferencia de intensidad de la onda difractada en un punto receptor comparada con la onda inicial en la fuente. δ es la distancia entre el emisor y receptor de la onda sonora alrededor del borde del obstáculo menos la distancia más corta entre el emisor y el receptor:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (1)$$

Krusner & Anderson [6] indican que cuando N es mayor a 1, existe un importante efecto de atenuación de la onda difractada, mientras mayor es el número de Fresnel, menor es la intensidad de la onda difractada.

2.3. Energía

Al nivel molecular, las vibraciones de las partículas del medio de propagación se pueden describir a través del movimiento armónico simple [7]. En su punto máximo, la energía cinética máxima de una partícula equivalente al valor total de su energía. En función de las variables frecuencia de vibración f , amplitud máxima de vibración A_{max} y masa m_0 :

$$E_{C_{max}} = 2 \pi^2 f^2 A_{max}^2 m_0 = E \quad (2)$$

En una muestra con un número finito de partículas y volumen V , la energía transportada por una onda sonora E es la resultante de la suma de la energía cinética con que vibran las partículas individuales. Alternativamente, en función de la densidad del medio de propagación [8], describimos la energía transportada por unidad de volumen:

$$\frac{E}{V} = 2 \pi^2 f^2 A_{max}^2 \rho \quad (3)$$

Cuando una onda se propaga en un medio, la fricción entre las partículas provoca una pérdida de amplitud y a la vez de energía en la onda. Sarabian consideró este efecto de atenuación de las ondas sonoras a partir de la ley de Beer-Lambert que establece que "el decaimiento en amplitud de la onda es exponencialmente proporcional a la distancia viajada x y al coeficiente de atenuación del material específico a una frecuencia dada c_f " [1]

$$A = A_0 e^{-c_f x} \quad (4)$$

Al llegar la onda sonora a la frontera con otro medio, el efecto de reflexión y transmisión de una onda incidente en la frontera de dos materiales provoca que la energía de la onda incidente se distribuya en las dos ondas resultantes. Combinando la pérdida de energía de una onda al viajar por un medio y atravesar una frontera, si $N \geq 1$:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{reflejada}} + E_{\text{transmitida}} + E_{\text{atenuada}} \quad (5)$$

Sarabian recalca que si la distancia viajada por la onda es lo suficientemente pequeña o el efecto de atenuación es constante en el rango de sensibilidad de los equipos de medición, la onda sonora se propagará virtualmente inalterada. En este caso se puede afirmar que:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{reflejada}} + E_{\text{transmitida}} \quad (6)$$

La figura 1 muestra una representación coherente con la ecuación (6) del comportamiento de la onda sonora incidente al plano, el efecto de reflexión y la onda transmitiéndose al siguiente material.

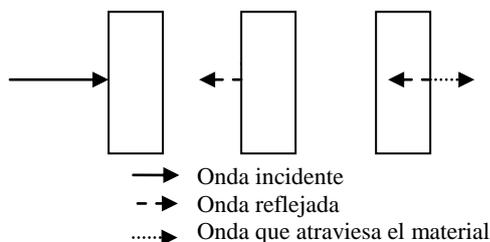


Figura 1. Comportamiento de la onda incidente (figura no a escala)

3. Diseño del experimento

El experimento tiene dos objetivos: Primero, comparar y establecer una relación entre la amplitud de la onda sonora incidente y la amplitud de la onda sonora que ha atravesado la muestra de material; segundo, observar la pérdida de energía de la onda sonora que atravesó el material comparada con la energía de la onda incidente.

Para capturar la onda sonora se utilizó un micrófono cardiode Shure modelo C608 como transductor electroacústico. El micrófono se sujetó y se mantuvo fijo a un soporte universal con una pinza de nuez. Se adaptó el micrófono al canal de entrada de un osciloscopio cambiando el terminal estándar o plug del micrófono a un terminal BNC con un lagarto para conexión a tierra. El osciloscopio en este experimento es un BK Precision 2125A analógico. Para la emisión del sonido se utilizó una computadora personal con el software NCH Tone Generator versión 2.01 instalado y un parlante de computadora modelo PC Creative SBS15. Se utilizó además un protector de oído para el investigador. La Figura 2 muestra la configuración de las conexiones en el experimento.

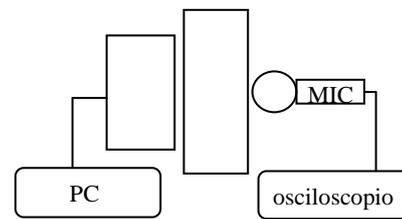


Figura 2. Configuración de materiales y equipos

Los materiales seleccionados como medios de propagación son comúnmente hallados en construcciones: ladrillo, concreto, corcho, cedro, vidrio y balsa. Las placas de muestra fueron de dimensiones (20x20x4)cm



Figura 3. Placas de muestra de materiales

Se decidió colocar la fuente de emisión de sonido en el punto medio entre las aristas del plano de las muestras de material, el centro geométrico que dista 10cm de las aristas. Se localizó el centro de gravedad del micrófono interceptando líneas obtenidas sujetando el micrófono por varios puntos a los extremos y marcando la vertical con una plomada. Visualmente se encontró el centro de la bovina del parlante. Estos tres puntos fueron alineados en una horizontal imaginaria en todas las etapas de medición. El micrófono, conectado al osciloscopio, fue ubicado cerca del plano posterior del material pero sin tocarlo. El parlante, conectado al computador, fue colocado en el plano frontal de la placa de muestra. La cercanía entre el parlante, la muestra y el micrófono evita que la onda sonora transmitida viaje una distancia significativa en el aire antes de ser captada por el sistema.

Se señalaron las posiciones relativas del parlante, el micrófono y la muestra como referencia en la superficie de trabajo. Ni el micrófono ni el parlante fueron movidos de sus posiciones para cambiar las placas de muestra durante el experimento. Al finalizar con los materiales, se estudió la onda incidente común a todos estos. Se acercó el micrófono hacia el parlante hasta que su distancia de separación era la misma que aquella entre el parlante y el plano frontal de la placa de los materiales. La alineación del micrófono con

respecto al parlante se mantuvo, variando solo la distancia entre ambos.

Observaciones preliminares mostraron que al variar la frecuencia del sonido en el programa generador de tonos NCH Tone Generator, la onda mostrada en el osciloscopio varía en frecuencia y amplitud aun si los parámetros de volumen no han sido modificados previamente. Esto se debe mayormente a la respuesta del micrófono y el parlante a distintas frecuencias dentro de su rango de sensibilidad [6]. El micrófono posee una curva de intensidad variable con respecto a la frecuencia. Por otro lado, el parlante distorsiona el sonido en frecuencias muy altas o muy bajas. Las respuestas del parlante y el micrófono motivaron la restricción del diseño experimental a una sola frecuencia. Las mediciones fueron repetidas dos veces el mismo día.

4. Análisis del diseño experimental

Tres factores influyen la magnitud de la energía transportada por una onda sonora de acuerdo con la ecuación (3): la densidad del medio de propagación, el cuadrado de la frecuencia de la onda y el cuadrado de la amplitud de onda. El diseño experimental propuesto captura la onda sonora en el aire luego de que ha atravesado una placa de material. La densidad del medio de propagación al instante de medición es una variable controlada.

Durante las observaciones preliminares del diseño del experimento se decidió usar un solo valor de frecuencia. La elección de la frecuencia a usar depende de dos factores: primero, la capacidad de el equipo experimental de trabajar con dicha frecuencia y arrojar resultados confiables con un mínimo de distorsión; y segundo, el efecto de difracción de las ondas sonoras alrededor de la placa de material estudiado. A los 4000Hz el micrófono Shure modelo C608 muestra una sensibilidad cercana al máximo posible de acuerdo con sus especificaciones [9]. Tomamos pues, este valor como inicial para evaluarlo en términos de difracción.

Dado que el objetivo del experimento es estudiar la onda sonora que atraviesa el material, es deseable minimizar el efecto de difracción en el que ondas envuelven la placa de muestra. Se puede estimar el efecto de difracción usando la ecuación (1), el número de Fresnel. Utilizando un valor de 340m/s como velocidad propagación del sonido en el aire a temperatura ambiente, y una frecuencia de 4000Hz, la longitud de la onda de prueba λ es 8,5cm. Para el caso de la muestra de (20x20x4)cm ubicado según este experimento, δ se calcula como el recorrido desde el punto medio del plano frontal al punto medio del plano posterior alrededor de los bordes menos la distancia entre ambos puntos:

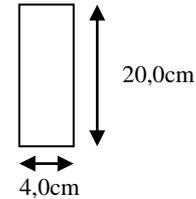


Figura 4. Vista lateral de una muestra y dimensiones

Aplicando las dimensiones específicas de la muestra:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2(10,0 + 4,0 + 10,0 - 4,0)}{8,5} = 4,7$$

De acuerdo al análisis de Krusner & Anderson [6], $N=4,7$ implica una intensidad de la onda difractada en lugar de medición mucho menor que la intensidad de la onda incidente a la muestra en el lugar donde se tomaron las mediciones con el micrófono. Por lo tanto, buscaremos los cálculos de energía en la ecuación (6).

Como transductor electroacústico, el micrófono convierte las vibraciones sonoras en una señal eléctrica visible en el osciloscopio. Las mediciones de amplitud del osciloscopio en voltios (V) son proporcionales a la amplitud de la onda.

El programa generador de tonos NCH Tone Generator fue utilizado para controlar la frecuencia del sonido, la forma de onda. Se seleccionó un rango de parámetros de -11dB a 0dB para las mediciones. Estos valores son relativos a la máxima intensidad que el software es capaz de controlar eficazmente. Se seleccionó una onda sinusoidal siguiendo el enfoque simplificado propuesto en nuestro modelo de propagación.

5. Trabajo experimental

Primero, se mejoró el aislamiento acústico del lugar donde se lleva a cabo el experimento. Se trabajó a una hora con menor ruido externo y tapó rendijas en puertas y ventanas. Este tipo de técnicas son vitales para la aplicación del método usado. La onda mostrada en el osciloscopio podrá ser influenciada por algún ruido externo convirtiéndose en una fuente de incertidumbre para los resultados.

Segundo, con el osciloscopio calibrado, se procedió a alinear el centro de gravedad del micrófono y la placa de material de prueba con el centro del parlante. Por cada placa de material, se realizaron observaciones de amplitud de onda para el tono sinusoidal de 4000Hz con el generador de tonos configurado en el rango de medición seccionado, parámetros enteros de -11dB a 0 dB. Al terminar, se procedió a cambiar de placa de material con precaución de no mover el micrófono o el parlante. Se realizaron mediciones en el mismo rango y con el mismo tono para todos los materiales restantes.

Tercero, se estudió la onda incidente, que es constante para todos los materiales de prueba, ya sin

las muestras. Se ubicó el micrófono tan cerca del parlante como el plano frontal las muestras anteriores pero manteniendo su alineación relativa al parlante.

6. Resultados

Las mediciones de amplitud de onda incidente y transmitida por cada material se encuentran en la Figura 5 a continuación. La incertidumbre de estas observaciones es de 0,5mV encontrada a partir de la precisión del osciloscopio analógico.

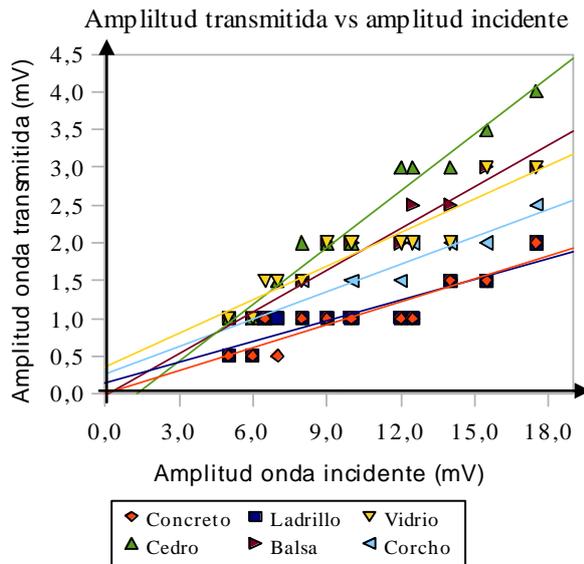


Figura 5. Comparación de materiales

Existe una clara relación entre la amplitud de onda incidente y la amplitud de onda medida luego de atravesar la muestra para todos los materiales de prueba. Se encontró que el coeficiente de determinación R^2 , tenía valores más altos para líneas de tendencia del tipo $y = mx+b$. Se calculó la pendiente de la línea de tendencia con el método de regresión lineal. Esta pendiente determina el radio de amplitudes entre la onda incidente y transmitida al aire luego de atravesar la muestra A_t / A_i . Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Radio de amplitudes y coeficiente de determinación

Materiales	R^2	A_t/A_i
Cedro	0,96	0,25
Balsa	0,93	0,18
Vidrio	0,87	0,15
Corcho	0,88	0,12
Concreto	0,82	0,10
Ladrillo	0,79	0,09

Para una frecuencia escogida, la amplitud de onda incidente y que ha atravesado la muestra de material son proporcionales. Se observa que la pendiente difiere entre tipos de materiales; el cedro mostró mayor conductividad acústica mientras que el concreto y el ladrillo demostraron mejores propiedades

aislantes. Mientras más cercano a 1 este el valor de R^2 más cercana es la distribución de puntos a una relación lineal. El rango de valores de R^2 de estas observaciones está entre 0,79 y 0,96, lo que refleja una alta tendencia lineal.

Con los cálculos obtenidos se procede a estudiar la pérdida de energía de las ondas sonoras al atravesar estos materiales. Aplicando la ecuación (3) a este experimento donde la densidad del medio y la frecuencia del sonido son constantes para todas las mediciones, expresamos el radio de energía transmitida por unidad de volumen E_t y la energía de la onda incidente por unidad de volumen E_i en función de las mediciones de amplitud de ambas ondas:

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{k}{k} \left(\frac{A_t}{A_i} \right)^2 = \left(\frac{A_t}{A_i} \right)^2 \quad (7)$$

Aplicando porcentajes a la ecuación (8) se expresa el porcentaje de pérdida de energía de la onda transmitida con respecto a la onda incidente %PE:

$$\%PE = \left(1 - \frac{E_t}{E_i} \right) 100 = \left(\left(1 - \frac{A_t}{A_i} \right)^2 \right) 100\% \quad (8)$$

En la Tabla 2 mostramos los resultados de estos cálculos:

Tabla 2. Porcentaje de pérdida de energía por material

Materiales	Pérdida de energía (%)
Cedro	93,75
Balsa	96,76
Vidrio	97,75
Corcho	98,56
Concreto	99,00
Ladrillo	99,19

7. Evaluación del experimento y resultados

La Figura 5 muestra un desplazamiento del punto de intersección de la recta con el eje vertical. Esto demuestra errores sistemáticos en las mediciones. Ejemplos de posibles fuentes de errores sistemáticos en este experimento son:

a) Ruido externo o interferencia que permanece constante durante el proceso del experimento como la presencia de un generador eléctrico en la habitación en las cercanías del laboratorio.

b) Reflexión de la onda incidente en paredes a corta distancia, la cual se podría superponer a la onda que viaja a través de las muestras.

c) Reflexión difusa en materiales con orificios en la superficie como el corcho, concreto y ladrillo provocando que la onda transmitida al micrófono no llegue tan directamente como en materiales macroscópicamente más homogéneos.

d) En este trabajo no se ha contemplado la fricción intermolecular en las placas de las muestras como un factor en el cálculo de la pérdida de energía. Parte del efecto de fricción se podría describir en la ecuación

(5). Hemos considerado este efecto mínimo comparado con la pérdida de energía resultado del proceso de reflexión y transmisión de la onda incidente de acuerdo con las observaciones de Serabian [1].

e) Aspectos del efecto de difracción que no han sido contemplados en el número de Fresnel y que puedan sugerir que el efecto de difracción es mayor al que se ha considerado en este trabajo.

Ejemplos de fuentes de errores aleatorios incluyen:

f) Cambios de temperatura del ambiente, la cual no fue controlada con termostato o aire acondicionado para evitar que el ruido que produce al funcionar influya la forma de la onda. Estos cambios influyen en la velocidad de propagación del sonido y en la longitud de onda que se utiliza. El aumento de temperatura produce además una muy pequeña dilatación de las muestras. Las condiciones ambientales durante este experimento fueron 22,6 °C, humedad relativa 72% y presión atmosférica 1011 mb. Usando estos datos, se puede calcular la velocidad del sonido [10] en 345,94 m/s. Esto es una variación del 1,71% comparado con el valor de referencia de velocidad del sonido usado en este trabajo e incrementa el número de Fresnel calculado N por de 4,7 a 4,8. Dado que N es aun mayor a 1, las condiciones ambientales durante el experimento producen una leve sobreestimación del nivel de difracción alrededor de las placas de muestra de material. Por lo tanto, las ecuaciones (6) y (7) se mantienen válidas a pesar de la estimación de velocidad de sonido inicial.

g) Vibraciones aleatorias captadas por el micrófono, por ejemplo flujo de aire debido a cambios de presión o vibración de la mesa de trabajo debido al paso de vehículos en las cercanías del laboratorio. En nuestro diseño experimental, el soporte universal que sostiene el micrófono, la placa de muestra de material y el parlante descansan en una mesa de laboratorio empotrada al suelo. Esto ocasiona que la vibración debido al tráfico vehicular en las cercanías del laboratorio. Se puede estimar la influencia de este efecto en nuestras mediciones considerando el umbral de percepción de vibración humana [11]. El rango de velocidad pico de partículas debido a vibraciones por tráfico cerca del umbral de percepción humana es de 0,15 mm/s a 0,30 mm/s. Estas vibraciones pueden aumentar la complejidad del problema estudiado en este artículo dependiendo de factores como la densidad del material de muestra y si existe contacto entre la mesa de trabajo y la placa de muestra.

8. Conclusiones y recomendaciones

Se comparó la amplitud de una onda sinusoidal de 4000Hz incidente al plano frontal de una placa del material de prueba con la onda transmitida en la parte posterior de la placa. Se dedujo que la amplitud

transmitida es directamente proporcional a la amplitud incidente con un factor que depende netamente del material de prueba. Los seis materiales provocan una pérdida de energía mayor al 90%. Encontramos que la placa de ladrillo transmitió menos energía sonora con una pendiente menor en el gráfico de amplitud transmitida vs amplitud incidente y una pérdida de energía cercana al 99.19%. El cedro mostró una pérdida de energía del 93,75%

La pérdida de energía de la onda sonora al atravesar un material, podría usarse como una forma de caracterizar los materiales por sus propiedades acústicas. El estudio del ladrillo y el corcho muestra que tanto materiales homogéneos como heterogéneos pueden ser estudiados con este método. Muchos de los nuevos materiales, utilizados en aplicaciones de aislamiento acústico, poseen porosidades. Futuras aplicaciones del método propuesto podrían estudiar estos materiales.

Este trabajo sugiere una perspectiva matemática simple aplicable a pequeña escala que dentro de los parámetros del experimento, es coherente con los conceptos físicos que requieren cálculos complejos como la dependencia de la atenuación en la frecuencia.

Se recomienda aislamiento acústico del lugar de prueba en usos futuros, ya sea el uso de cámaras cerradas o habitaciones con poco ruido y con temperatura controlada para disminuir fuentes de incertidumbre. Se pueden utilizar transductores electroacústicos de mayor sensibilidad y con radio de acción localizado para capturar la onda transmitida a través de la placa del material con poca interferencia. También se puede incluir un amplificador de sonido o parlantes con capacidad de emitir tonos a mayor intensidad sin distorsión. Otras alternativas son usar un osciloscopio digital o un amplificador de señal entre el micrófono y el osciloscopio para facilitar las mediciones de amplitud aunque aplicando luego un factor de corrección en los cálculos para considerar la amplificación de señal.

Una forma de obtener mayor exactitud en las mediciones es controlando parámetros como la vibración debido al tráfico y disminuyendo influencia de las ondas reflejadas en la mesa de trabajo. Esto se puede alcanzar montando el diseño experimental sobre una mesa capaz de resistir vibraciones externas sin que estas afecten propio equilibrio (ej. Mesa para óptica experimental), o con una mayor separación entre la superficie horizontal y el emisor de sonido en comparación con la longitud transversal de la placa de muestra.

La caracterización de la materia por sus propiedades acústicas, tales como aquellas estudiadas en este trabajo, tiene aplicaciones en otros campos como la percepción remota. Las ondas sonoras proveen la ventaja del bajo costo de equipos acústicos relativo con equipos que trabajan con otros tipos de ondas [12]. Por ejemplo, se pueden aplicar algunas de las suposiciones que se usan en este trabajo

escogiendo un sistema receptor de señal con filtro de frecuencia de banda en rango reducido de tal forma que se minimice la influencia de ruido y otros sonidos de otras frecuencias.

10. Referencias

- [1] Serabian S. "Influence of Attenuation upon de Frequency Content of a Stress Wave Packet in Graphite," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 42, issue 5, 1967, pp. 1052 – 1059.
- [2] Russel, D. "Phase Changes upon Reflection," Kettering University Applied Physics. Última actualización Mayo 2009. Disponible en <http://www.gmi.edu/~drussell/>
- [3] Moore, G. "Physics and Psychophysics of Music," Lecture notes for McGill course Physics 224. Última actualización 2006. Disponible en <http://www.physics.mcgill.ca/~guymoore/ph224/>
- [4] Kim, H., Kim, J et al. "Sound diffraction by multiple wedges and thin screens," *Applied Acoustics*, vol. 66, 2005, pp. 1102 – 1119.
- [5] Pierce, A. "Diffraction of sound around corners and over wide barriers," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 55, 1974, pp. 941 – 955.
- [6] Kurze, U., Anderson, G. "Sound attenuation by barriers," *Applied Acoustics*, vol. 4, 1971, pp. 35 – 53.
- [7] Crocker, M. *Handbook of Noise and Vibrations*, Canada: John Wiley and Sons, 2007, pp. 2 – 4.
- [8] Trujillo, J. Movimiento Ondulatorio. Última actualización Diciembre 2007. Disponible en <http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/3/Usrn/fisica/>
- [9] User guide for Shure microphones C606, C607, and C608. Cited on 2005-05-16. Disponible en: <http://www.shure.com/datasheets/guides-iredmics.html>
- [10] National Physics Laboratory. "Calculation of speed of sound in humid air" Última actualización 10 Noviembre 2005. Disponible en <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/speedair/>
- [11] California Department of Transportation Central Coast. "Vibration Report" *Technical Studies Branch*, Septiembre 2008.
- [12] Bradley, S. *Atmospheric Acoustic Remote Sensing*, Boca Raton FL: CRC Press, 2008, pp 4-6, 33-34