



**Universidad de Matanzas**



**Facultad de Ciencias Empresariales**

**Departamento Industrial**

**Tesis en opción al título de Ingeniero Industrial.**

**Título: “Cálculo del coeficiente de absorción acústica de diversos materiales.”**

**Autor: José Adrián Camacho Isaac**

**Tutor: MSc. Yoel Almeda Barrios**

**Año 2019**

Pensamiento

*“Sin laboratorios los hombres  
de ciencia son como soldados  
sin armas”*

Louis Pasteur



## Dedicatoria

Para mi abuelo Andrés, por nuestra familia siempre recordado como "papi". Espero que te sientas orgulloso desde donde sea que estés.

## Agradecimientos:

Agradecer es una muestra inequívoca de humildad, un rasgo humano cada vez más escaso, pero no por ello menos poderoso. Aún y cuando en estas líneas me sea imposible corresponder a la ayuda desinteresada, al cariño y a la motivación extra que he recibido durante estos últimos años, me llena de placer agradecer a muchas de las personas que contribuyeron a que este momento llegara:

- A mi abuela Fela, por haberme criado y ser un pilar fundamental en mi vida.
- A mi mamá Yorti , por siempre estar ahí cuando lo necesito, por su comprensión y su amor siempre latente.
- A mi papá José Antonio (Papito) por los valores y principios que me ha inculcado y por ser mi modelo a seguir.
- A mis hermanos José Carlos y José Julio por ser ese impulso extra que me motiva a convertirme en un ejemplo para ellos.
- A Nelson, por siempre haberme dado su cariño y siempre haberme demostrado que siempre estará ahí para lo que haga falta.
- A Annamary, por sus críticas positivas, su aliento y su apoyo incondicional en todo momento de una manera u otra.
- A mi tío y primas, que aun desde la distancia me hacen llegar su aliento a cada paso.
- A todos mis amigos, son pocos, pero son de verdad. Innumerables momentazos juntos.
- A mis compañeros de aula que han hecho de estos últimos años los mejores de mi vida.
- A Ulises, por haber hecho de esta travesía una experiencia mucho más fácil de llevar, por tenderme su mano amiga bajo cualquier circunstancia, hasta el punto de ser prácticamente el co-tutor de esta tesis. Gran parte del futuro profesional que seré te lo debo a ti hermano.
- A Anthuan, compañero de aventuras literalmente desde el primer día de clases hasta el último, es que no hay manera de separarnos brother.
- A Anay, siempre la compañía perfecta para echarse unas risas y una gran amiga.
- A Claudia por haberse convertido en una persona muy querida y ganarse mi confianza.
- A Javier, Giselle y El Gordo, por haber formado parte de los mejores momentos que he vivido en la Universidad.
- A mi tutor Yoel, por haberme dado el voto de confianza, por ayudarme en todo lo posible y por su amistad.

- A todos los profesores que han contribuido a mi formación profesional y como persona.
- A todos los que han contribuido de una manera u otra a la realización de este trabajo de diploma.

A TODOS, MUCHÍSIMAS GRACIAS.

**Declaración de autoridad**

Yo, José Adrián Camacho Isaac declaro que soy el autor de este Trabajo de Diploma y autorizo a la Universidad de Matanzas a hacer uso del mismo con los fines que estimen pertinente.

Y para que así conste:

---

Firma del autor

José Adrián Camacho Isaac

---

Firma del tutor

MSc. Yoel Almeda Barrios

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Presidente del Tribunal**

**Firma**

---

---

**Miembro del Tribunal**

**Firma**

---

---

**Miembro del Tribunal**

**Firma**

---

---

**Dado en Matanzas, el día \_\_\_\_ del mes de \_\_\_\_\_ del año 2019.**

**“Año 61 de la Revolución”.**

## **Resumen**

El empleo de materiales en la construcción de locales, sin conocer sus propiedades acústicas, implica el riesgo de obtener recintos con una acústica inadecuada. Específicamente en Cuba es limitada la información referente a las propiedades acústicas de los materiales de fabricación nacional. Se trazó como objetivo general: calcular el coeficiente de absorción acústica de diversos materiales. Con este fin se propuso una metodología basada en la bibliografía consultada. Se empleó el método de ondas estacionarias mediante el tubo de Kundt, cuya aplicación permitió obtener los coeficientes de absorción sonora de los 7 materiales seleccionados (hormigón, cartón, madera, fieltro, bloque de canto, pladur y piedra sieforé) para las frecuencias de 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, datos que fueron procesados y analizados a través de un Excel programado para ello. Se calcularon además los errores asociados al diseño experimental que reflejaron valores mínimos. El estudio concluyó que el mejor material absorbente entre los analizados fue la piedra sieforé y el peor el hormigón.



## **Summary**

The use of materials in the construction of premises, without knowing their acoustic properties, implies the risk of obtaining enclosures with an inadequate acoustics. Specifically in Cuba, information regarding the acoustic properties of nationally manufactured materials is limited. The general objective was to calculate the acoustic absorption coefficient of various materials. To this end, a methodology based on the consulted bibliography was proposed. The method of standing waves was used by the Kundt tube, whose application allowed to obtain the sound absorption coefficients of the 7 selected materials (concrete, cardboard, wood, felt, block of edge, plasterboard and siefore stone) for the frequencies of 250 , 500, 1000, 2000 and 4000 Hz, data that was processed and analyzed through an Excel programmed for it. The errors associated with the experimental design that reflected minimum values were also calculated. The study concluded that the best absorbent material among those analyzed was sieved stone and the worst concrete.

## Índice

Introducción.....	1
<b>Capítulo I: Marco teórico de la investigación .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1) El sonido. Definiciones y parámetros que lo caracterizan .....</b>	<b>6</b>
1.1.1) Fisiología y anatomía de la audición.....	7
1.1.2) El ruido y su relación con el sonido.....	8
<b>1.2) Afectaciones del ruido.....</b>	<b>11</b>
1.2.1) Control de ruido.....	12
<b>1.3) Materiales absorbentes de ruido .....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Influencia de los parámetros del material.....	15
1.3.2) Caracterización de las propiedades acústicas de los materiales absorbentes .....	16
<b>1.4) Coeficiente de absorción acústica.....</b>	<b>17</b>
1.4.1) Medición del coeficiente de absorción de un material.....	18
1.4.2) Coeficiente de reducción acústica (NRC) .....	19
1.4.3) Modelos matemáticos .....	20
<b>1.5) Antecedentes en la elaboración de materiales .....</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo II: Materiales y métodos para el cálculo del coeficiente de absorción acústica .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1) Metodología propuesta.....</b>	<b>22</b>
2.1.1) Fase 1: Validación del tubo de impedancias .....	24
2.1.2) Fase 2: Fabricación de probetas .....	24
2.1.3) Fase 3: Medición.....	28
2.1.4) Fase 4: Resultados .....	31
<b>2.2) Tubo de Kundt. Montaje y operación.....</b>	<b>34</b>
<b>Capítulo III: Desarrollo del experimento del cálculo de coeficiente de absorción de distintos materiales mediante el tubo de impedancias.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1) Validación .....</b>	<b>36</b>
3.1.1) Selección del material de referencia .....	36

3.1.2) Realización de las mediciones .....	37
3.1.3) Comparación de los resultados obtenidos con los datos de referencia .....	38
3.2) Fabricación de las probetas .....	39
3.2.1) Paso 1: Selección y caracterización de los materiales a estudiar. ....	39
3.2.2) Elaboración de probetas .....	40
3.3) Informe de la medición. Análisis de resultados.....	42
3.4) Obtención y análisis de los errores de medición.....	52
Conclusiones generales.....	55
Recomendaciones .....	56
Referencias bibliográficas .....	57
Anexos	

## Introducción

El mundo de los sonidos es tan circunstancial como el hombre y aparece casi simultáneamente con el desarrollo de él, dígame con el lenguaje, el canto y la música. En la prehistoria se encuentran indicios del empeño que el hombre ha mantenido por amplificar sonidos.

El deseo de armonizar los sonidos y tratar de amplificarlos lo máximo posible se remonta a los albores de la humanidad. En épocas remotas el hombre primitivo se valía de los medios naturales que encontraba a su alcance para tratar de lograr que su voz viajara grandes distancias. En aquellos tiempos la problemática estaba en cómo lograr amplificar el sonido.

El ruido representa un problema desde hace ya muchísimo tiempo. Como datos de interés históricos se pueden encontrar algunos manuscritos desarrollados en el antiguo imperio romano donde se recogen denuncias por el ruido de las carretas en las adoquinadas calles de esa populosa urbe algunos siglos antes de nuestra era. Además, en algunas ciudades de Europa medieval no se permitía usar carruajes ni cabalgar durante la noche para asegurar el reposo de la población. (Berglund *et al.*, 1999)

Estas primeras Formaciones Económico Sociales, dígame Comunidad Primitiva, Esclavismo y Feudalismo basaban su economía en una agricultura manual, la ganadería, la pesca, la manufactura o la alfarería. Por ello desarrollaron sus actividades sin contaminar al medio con ondas sonoras desagradables o peligrosas, debido a que los medios de producción utilizados no generaban ruido pues se basaban fundamentalmente en actividades manuales o aprovechaban la energía proveniente de la tracción animal, el viento o el calor generado por las llamas, todas ellas silenciosas.

No fue hasta mucho tiempo después, a mediados del siglo XVIII, que con la irrupción de la Revolución Industrial salen a la luz una gran cantidad de cambios tecnológicos, y consecuentemente con ellos aparecen las primeras máquinas, movidas por vapor al inicio y por electricidad después. Se evidencia el surgimiento de nuevos elementos agresores y riesgosos productos de este conjunto de nuevas transformaciones socioeconómicas, tecnológicas y culturales; caracterizadas por el surgimiento de nuevas tecnologías en los procesos productivos, donde los trabajadores se exponen a un nuevo tipo de explotación: condiciones de trabajo difíciles, calor excesivo, gases, polvo, pobre iluminación, riesgos mecánicos y eléctricos.

Es en este momento que en el ambiente industrial aparece el ruido como un riesgo hasta entonces desconocido por el hombre y acerca del cual se ignoraba los daños y secuelas que en el organismo provocaban. (Real Pérez, 2005)

Es entonces cuando producto del desarrollo tecnológico, se da un giro opuesto y el problema que plantea el incipiente desarrollo industrial es cómo reducir el ruido. Entre los numerosos factores que contribuyen a la contaminación del ambiente, que afectan la salud y la comodidad del hombre y que agravan la economía de todos los países, el ruido ocupa uno de los primeros lugares.(Almeda Barrios, 2015)

El ruido es responsable de pérdidas económicas resultantes de la disminución de la capacidad de trabajo físico e intelectual, e incluso de la eliminación temporal y definitiva del ciclo productivo del trabajador, por licencia laboral o una enfermedad precoz. Como consecuencia del desarrollo industrial, en tiempos recientes se ha notado un aumento del número y potencia de las fuentes de ruido. De acuerdo a Feliú González (2018) esta realidad tiene su respaldo en el hecho de que un gran número de autos transitan regularmente por las ciudades y campos, los camiones de carga pesada con motores diésel sin silenciadores adecuados circulan en carreteras tanto de día como de noche, además de que las aeronaves y trenes también contribuyen al ruido ambiental. Todo esto trae consigo un aumento de la contaminación acústica en la sociedad actual.

Es de esperar que el acelerado desarrollo de las nuevas técnicas, la creación de los sistemas automatizados y la preocupación creciente de la sociedad, incidan de manera determinante en reducir del ambiente laboral los ruidos. No obstante, la situación actual de desarrollo tecnológico provoca que el obrero tenga que laborar en ambientes ruidosos y durante un período de tiempo más o menos largo se tendrá que luchar por reducirlos, puesto que uno de los objetivos primarios de la sociedad, es preservar la salud de sus trabajadores.

Investigaciones han relevado que más allá de ciertos límites, el ruido afecta la salud y capacidad de trabajo. Sus efectos pueden ir de simples molestias psíquicas y físicas, hasta la afección orgánica grave, la cual puede derivar en la pérdida total de la audición, lo que limita al individuo para la realización de actividades profesionales y para su realización plena como ente social.

Precisamente por las características tecnológicas de las industrias, es bastante común encontrar una gran cantidad de fuentes de ruido que lo difunden no sólo a su espacio inmediato, sino que pueden afectar áreas aledañas, lo que crea una zona de alta exposición.

Las distintas compañías han buscado adoptar las estrategias para asegurar la competitividad en el mercado cada vez más. Entre las estrategias adoptadas se destacan aquellas relacionadas con la salud del trabajador y la integridad medioambiental, particularmente las tecnologías que sean capaces de mantener los

niveles de ruido por debajo de las normas establecidas en cada país, ya que estos factores son actualmente evaluados por los consumidores, especialmente aquellos de mercados exigentes.

A día de hoy las empresas no pueden ser competitivas en el mercado a no ser que sean capaces de garantizar tanto a sus clientes internos como a sus clientes externos los estándares de confort acústico requeridos. Para lograr este objetivo se aplican métodos de control de ruido. Muchas técnicas para limitar el efecto de las ondas acústicas en el hombre han sido creadas. Todas parten en primera instancia de evitar la vibración, como condición indispensable para su generación al medio, y terminan con la protección al aparato auditivo mediante los medios de protección.

Sin embargo, si en su trayectoria por el aire, se logra reducir su energía antes que llegue a hombre, se convierte en una importante técnica de control. Aquí es donde entra la mejora acústica de recintos o tratamiento acústico de locales, técnica que ha experimentado un interesante auge en cuanto a su utilización, ya que ha probado ser altamente efectiva si se implementa correctamente, hecho que dependerá en gran medida de los coeficientes de absorción acústica de los materiales absorbentes de ruido que se empleen.

Para el control de la reverberación de una local resulta básico conocer el comportamiento, ante la incidencia del sonido, de los materiales que forman o cubren el local. Este comportamiento queda definido por el coeficiente de absorción sonora que presenta el material para las distintas frecuencias básicas (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz).

La absorción de una material queda completamente definido por la gráfica de su poder absorbente según la frecuencia. Un material que ofrezca una absorción parecida para las distintas frecuencias poseerá una gráfica aproximadamente horizontal y será calificado de poco selectivo. Si, por el contrario, sus coeficientes de absorción son muy dispares, que es lo común, su gráfica será irregular; en este caso, el material es selectivo. La selectividad de las superficies que componen un recinto tiene como resultado el proporcionar diferentes campos de reverberación para las distintas frecuencias, consecuencia ésta de fundamental importancia para la acústica de un local.

Básicamente, existen dos tipos de ensayos en laboratorio que tienen como objetivo la obtención del coeficiente de absorción acústica de un material. El primero, denominado "Método del tubo de impedancias", se basa en la creación de un campo acústico de ondas planas, estacionarias, dentro de un tubo de pequeñas dimensiones, en el que se superponen una onda que incide de forma perpendicular sobre la muestra del material

a analizar, y la correspondiente onda reflejada. Dentro de este tipo de ensayo, existen dos procedimientos: método del rango de onda estacionaria y el método de la función de transferencia. Un segundo ensayo llamado “Método de la cámara reverberante” permite obtener la absorción acústica de un recinto a partir de mediciones de tiempo de reverberación. A diferencia de los primeros, este procedimiento determina el coeficiente de absorción a través de un campo acústico difuso que incide de forma aleatoria sobre la muestra, con la misma probabilidad para todos los ángulos de incidencia. (Rodríguez Montejano, 2003)

### **Justificativa de la investigación**

La elaboración de nuevos materiales absorbentes de ruido es un área de la acústica que ha cobrado fuerza recientemente en Cuba. Sin embargo, se trata de un proceso complejo, porque antes de que se pueda implementar cualquier material creado este debe primero ser sometido a una serie de controles y ensayos de orden físico, mecánico, químico y acústico. Cuba enfrenta severas limitaciones a la hora de desarrollar este tipo de estudios debido a que los equipos requeridos para ello son de muy difícil adquisición pues al encontrarse económicamente bloqueada se hace muy costoso comprarlos a través de terceros países. Ejemplo palpable de ello es el caso de la Empresa Nacional de Investigaciones (ENIA), la cual es de los pocos entes que han logrado poseer algunos equipos de interés como son las máquinas para realizar ensayos de resistencia a compresión, pero la mayoría del tiempo presenta problemas para realizar una adecuada caracterización de los materiales a utilizar y esto provoca enormes dificultades para los distintos procesos.

A nivel mundial, los fabricantes frecuentemente ofrecen una caracterización de los materiales que proporcionan. En esta caracterización se deben tener en cuenta las propiedades acústicas de estos materiales. Específicamente en Cuba es limitada la información referente a las propiedades acústicas que se tiene de los materiales que se emplean para el caso de aquellos materiales que son de fabricación nacional como los derivados de la caña de azúcar (bagazo de caña) y otras fibras naturales (henequén, kenaf). De igual forma sucede con aquellos materiales constructivos que se otorgan a la población para cubrir la reparación y fabricación de viviendas.

El empleo de materiales para la construcción y reparación de locales sin el previo conocimiento de sus propiedades acústicas, implica el riesgo de obtener como resultado recintos con una acústica inadecuada y las consecuentes afectaciones en la calidad de las actividades que se desarrollan en ellos, o incluso, afectaciones en la salud de las personas que los frecuentan.

Específicamente en la Universidad de Matanzas, como resultado de un proyecto de tesis paralelo a esta investigación desarrollado por Hernández Goñi (2019), se creó un tubo de impedancias o tubo de Kundt. Por tal motivo existe la oportunidad de experimentar en el cálculo de los coeficientes de absorción y su variación mediante el análisis de las características de diversos materiales.

Todo lo antes expuesto permite plantear el siguiente **problema científico**:

Se desconocen los coeficientes de absorción acústica de diversos materiales.

### **Objetivo General**

Calcular el coeficiente de absorción acústica de diversos materiales.

### **Objetivos Específicos**

Determinar los elementos teóricos que sustentan los estudios del sonido, el ruido y el cálculo del coeficiente de absorción acústica.

Realizar el diseño experimental para el cálculo del coeficiente de absorción acústica de materiales constructivos empleados en Cuba.

Aplicar las pruebas experimentales propuestas con el empleo de diversos materiales seleccionados.

Determinar los errores asociados al desarrollo del experimento.

### **Estructura del trabajo de diploma**

Para su presentación la tesis consta de la siguiente estructura: una **Introducción**, donde se realiza un primer acercamiento a la temática a abordar y se caracteriza la situación problemática; un **Capítulo 1**, el cual recoge el marco teórico-referencial que sustenta la parte práctica del trabajo, este capítulo ofrece conceptos fundamentales para el desarrollo de la investigación; un **Capítulo 2** en el cual se explica la metodología usada y cómo se utiliza el tubo de impedancias, un **Capítulo 3** donde se ofrece un análisis de los principales resultados de la investigación. Terminado este capítulo se encuentran las principales **Conclusiones** y **Recomendaciones** que se derivan de este trabajo, además de la **Bibliografía referenciada** en la tesis y los **Anexos** necesarios para complementar los resultados ofrecidos y lograr una adecuada comprensión del tema abordado.



## Capítulo I: Marco teórico de la investigación

### 1.1) El sonido. Definiciones y parámetros que lo caracterizan

El sonido es un fenómeno que se encuentra omnipresente en prácticamente todo momento. Sus fuentes de origen son bastas, ya que puede originarse en eventos tan naturales como el movimiento de las olas del mar, en el ladrido de un perro o en la voz humana.

El sonido consiste en una vibración del aire que se propaga en forma de ondas de presión. En ausencia de sonido, la presión atmosférica alcanza un estado de equilibrio y es constante en el tiempo y en el espacio. Cuando aparece una perturbación, por ejemplo la vibración de un objeto, se producen variaciones de presión y estas variaciones no sólo se producen a lo largo del tiempo, sino que se propagan también por el espacio con cierta velocidad.(Miyara, 1999)

En el Recuadro 1.1 se presentan algunas definiciones de sonido según varios autores:

Recuadro 1.1: Definiciones del sonido.

Autores	Conceptos
Miyara (1999)	Consiste en una vibración del aire que se propaga en forma de ondas de presión.
Werner (2006)	Es desde el punto de vista de la acústica en la propagación de un movimiento vibratorio molecular a través de un medio elástico que puede ser reconocido por un ser vivo o por un instrumento
Cabrera Ortiz (2010)	El sonido consiste en la propagación de una perturbación en el aire.
Caballero Núñez <i>et al.</i> (2016)	Desde el punto de vista físico el sonido se define como una forma de energía ondulatoria que aparece como variaciones en la presión y en la densidad de la atmósfera originadas por movimientos mecánicos.
García Dihigo (2016)	El término sonido es definido como la sensación producida en el oído por determinadas oscilaciones de la presión exterior.

Fuente: elaboración propia.

Uno de los parámetros más fundamentales en acústica, es la frecuencia. De acuerdo a Cabrera Ortiz (2010) se define como la cantidad de ciclos por segundo, o lo que es lo mismo, la cantidad de perturbaciones por segundo. Se expresa en Hertz (Hz). La

frecuencia de los sonidos audibles está comprendida entre los 20 Hz (sonidos graves) y los 20.000 Hz (sonidos agudos) o 20 kHz.

Un segundo parámetro es el periodo, que se define como el tiempo transcurrido entre una perturbación y la siguiente. Se mide en segundos (s) o milisegundos (ms), es decir la milésima parte de un segundo. El periodo de los sonidos audibles para el ser humano varía entre los 0,05 ms (sonidos muy agudos) y los 50 ms (sonidos muy graves).

Uno de los parámetros más importantes relacionados con los sonidos periódicos es la longitud de onda, que se representa con la letra griega lambda ( $\lambda$ ) y es la distancia que existe entre dos partículas consecutivas en igual situación de fase. También se puede definir como la distancia que recorre una onda en un período de tiempo. La longitud de onda disminuye al aumentar la frecuencia. (Cortés Polanco, 2010)

La  $\lambda$  se mide en metros (m) o en centímetros (cm), y para los sonidos audibles está comprendida entre los 2 cm (sonidos muy agudos) y los 17m (sonidos muy graves).

Otra variable que es importante es la amplitud, la cual se podría entender como la altura de la onda. Es la máxima distancia que alcanza un punto al paso de las ondas respecto a su posición de equilibrio. La amplitud está relacionada con la intensidad sonora, a menor amplitud menor intensidad y a mayor amplitud mayor intensidad. (Kuttruff, 2009)

Para Domínguez Alejo (2014) la velocidad del sonido es una variable que estará en función de la temperatura del aire, de la humedad que este contenga, pero prácticamente estas variaciones afectan la velocidad en sólo unos 20 m/seg si se consideran los límites climáticos extremos. El valor práctico de velocidad más comúnmente generalizado es de 340 m/seg.

### **1.1.1) Fisiología y anatomía de la audición**

La audición se produce a través del oído, el cual, desde el punto de vista anatómico está compuesto por 3 partes: el oído externo, el oído medio y el interno. En cada una de estas partes intervienen un conjunto de estructuras que posibilitan la audición. (Almeda Barrios, 2018)

Esencialmente el oído está formado por una bolsa que contiene un líquido al cual hacen vibrar las ondas sonoras. Células especiales, provistas de pestañas, que se encuentran en contacto con el líquido, reciben sus vibraciones y las transmiten, por el medio auditivo, al cerebro, donde se produce la sensación acústica. (García Dihigo, 2016)

El oído externo está formado por el pabellón u oreja y el canal auditivo. La oreja cumple la función de focalizar el sonido hacia el canal auditivo, lo cual produce un acoplamiento más efectivo entre la baja impedancia acústica del aire y la más alta del tímpano. Otra

función importante es la de ayudar a la localización direccional del sonido. El canal auditivo desempeña dos funciones: la de proteger al tímpano, haciéndolo virtualmente inaccesible desde afuera, y la de enfatizar por resonancia la región del espectro más importante para la inteligibilidad de la palabra.

El oído medio está formado por el tímpano, la caja timpánica, la cadena osicular (los huesecillos), una serie de músculos, como el tensor del tímpano y el estapedio, y la trompa de Eustaquio. Este se encarga de recibir las vibraciones que han sido conducidas por el oído externo y las transmite al interno. El tímpano tiene como finalidad captar las ondas sonoras que ingresan al canal auditivo y transformarlas en vibraciones mecánicas que luego serán comunicadas al oído interno. Otra estructura importante es la trompa de Eustaquio que es un conducto que comunica el oído medio con la garganta, y por consiguiente, a través de la boca, con el exterior.(Miyara, 1999)

El oído interno, también denominado laberinto, posee dos partes con funciones bien diferenciadas. La primera son los canales semicirculares, los cuales constituyen el órgano sensor del equilibrio ya que permiten detectar movimientos rotacionales. La segunda parte es la cóclea caracol, que tiene forma precisamente de caracol, y es probablemente el sistema mecánico más complejo de todo el organismo. Está destinada a transformar las vibraciones provenientes del oído medio (a través del estribo) en señales neuroeléctricas dirigidas al cerebro.(Miyara, 1999)

### **1.1.2) El ruido y su relación con el sonido**

Dentro de la corrección acústica no se habla de “sonido” sino de “ruido”. Esta diferenciación, que puede parecer no más que un juego de palabras, es de vital importancia. Es por eso que se vuelve crucial esclarecer apropiadamente qué es lo que se entiende por ruido, así como sus principales características.

En la actualidad el ruido es un factor de riesgo agresivo que acompaña al hombre en el medio laboral, mientras viaja en cualquier medio de transporte e incluso descansa en su zona de residencia o se encuentra en cualquier comunidad humana según afirman Degrandi Oliveira (2012), Caballero Núñez *et al.* (2016), Sierra Calderón (2016). Estudios realizados por la Unión Europea demuestran que 80 millones de personas están expuestos diariamente a niveles de ruido ambiental superiores a 65 decibeles (fracción audible), mientras que otros 170 millones, lo están a niveles entre 55-65 dB (European Environment Agency, 2014), (Amable *et al.*, 2017 ).

De acuerdo a Giménez de Paz (1998) el ruido es un sonido indeseable de cualquier intensidad, que interacciona e interfiere con el ser humano y que siempre produce sensación molesta y desagradable y comprende cualquier sonido que pueda provocar

una pérdida de audición o ser nocivo para la salud o entrañar cualquier otro tipo de peligro.

Moya Pon (2003), lo conceptualiza como todo sonido indeseable, que, según su naturaleza, magnitud o duración, puede afectar la salud y/o producir otros efectos adversos para las personas y el ambiente.

De forma amplia Cabrera Ortiz (2010) señala que se puede definir como ruido cualquier sonido no deseado que puede interferir la recepción de un sonido.

Según García Dihigo (2016) se define ruido al sonido que está en discrepancia por una dependencia temporal compleja que no se repite.

Para Almeda Barrios (2018) el ruido es un sonido no deseado, causante de una sensación auditiva desagradable o molesta.

De manera general se detectó que todos coinciden en que el ruido es un sonido no deseado o molesto, lo cual evidencia que la relación sonido-ruido se establece desde el punto de la interpretación humana y la subjetividad que conlleva la interpretación que realizan de forma individual los seres humanos de los sonidos que se generan.

Varios autores como Hansen (2001), Real Pérez (2005), Rodríguez González (2007) y Sánchez Fernández (2008) han abordado este tema y coinciden que los ruidos se pueden caracterizar según su intensidad y período (Recuadro 1.2) y según su frecuencia (Recuadro 1.3).

Recuadro 1.2: Clasificación del ruido según a su intensidad y período.

<b>Clasificación</b>	<b>Características</b>
<b>Ruido Ambiental</b>	Suele estar presente en el ambiente, de intensidad medible, compuesto comúnmente por sonidos de varias fuentes cercanas y lejanas.
<b>Ruido de fondo</b>	El que prevalece en ausencia del ruido generado por la fuente de objeto de evaluación.
<b>Ruido tonal</b>	El que presenta un espectro con tonos audibles discretos.
<b>Ruido constante</b>	Cuando los niveles determinados según la respuesta lenta del sonómetro varían en no más de 5 dB en las 8 horas laborales, lo que significa que el nivel de presión sonora no fluctúa significativamente durante el período de observación.

<b>Ruido no constante</b>	Cuando los niveles determinados según la respuesta lenta del sonómetro, varían en más de 5 dB en las 8 horas laborales, lo que significa que el nivel de presión sonora fluctúa significativamente durante el período de observación.
---------------------------	---

Fuente: Elaboración propia.

Recuadro 1.3: Clasificación del ruido según su frecuencia.

<b>Clasificación</b>	<b>Características</b>
<b>Ruido blanco</b>	Se caracteriza por su distribución uniforme en el espectro audible (20 Hz a de 20 kHz). Es un ruido cuya respuesta en frecuencia es plana, lo que significa que su intensidad (amplitud de sonido) es constante para todas las frecuencias.
<b>Ruido rosa o rosado</b>	La respuesta en frecuencia del ruido rosa no es plana, su intensidad decae 3 decibelios por octava. El ruido rosa que emiten los generadores de ruido se utiliza con filtros de 1/3 de banda de octava para medir la acústica de salas.
<b>Ruido marrón</b>	No es un ruido muy común, pero existe en la naturaleza. Está compuesto principalmente por ondas graves y medias

Fuente: elaboración propia.

### 1.1.3) Interacción del sonido con los obstáculos

Cuando una onda sonora choca contra un material o una superficie, parte de ella se absorbe, parte se refleja y el resto se transmite. Existe, por tanto, una relación inminente entre la energía incidente y la energía absorbida, reflejada y transmitida.

Cuando la onda acústica incide sobre el material, parte de ella rebota y se refleja cambiando de dirección. Así, la reflexión del sonido representa el porcentaje de energía acústica incidente que refleja la superficie. Este fenómeno tiene lugar cuando la superficie del material es dura y lisa, como, por ejemplo: el hormigón y el ladrillo. En acústica, este tipo de materiales que presentan elevada reflexión se emplean como aislantes de ruido aéreo. (Parejo Gamboa, 2013)

La difracción es la propiedad del sonido para rodear obstáculos y propagarse por todo un local a través de una abertura. El fenómeno de la difracción depende de la relación que existe entre el tamaño del obstáculo que se interpone en la propagación del sonido y la  $\lambda$  del mismo. Si las dimensiones del obstáculo son del orden o menores que  $\lambda$ , los distintos frentes de onda se convierten en centros emisores en los puntos de

intercepción con el obstáculo rodeándolo totalmente de acuerdo a Domínguez Alejo (2014). En la figura 1.1 se muestra el fenómeno de la difracción.

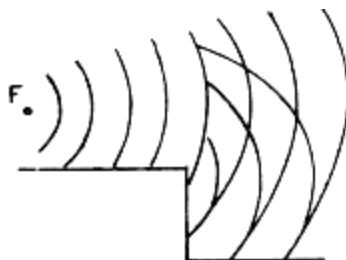


Figura 1.1. Difracción de una onda sonora por un obstáculo.

Fuente: tomado de García Dihigo y Real Perez (2005).

Para Miyara (1999) la reverberación no es más que un fenómeno que se produce como consecuencia de las numerosas reflexiones tardías del sonido. De acuerdo a Electrónica (2008) la reverberación es un fenómeno acústico natural que se produce en recintos más o menos cerrados por el cual la señal original se modifica por el agregado de diferentes señales reflejadas en las paredes del recinto. Dichas reflexiones se producen con un retardo causado básicamente por la distancia física entre la fuente de sonido original y las paredes del recinto. Este fenómeno de reflexión de la señal original y su retorno también es el responsable del efecto de eco de una señal. En el caso de un eco percibimos la señal y sus reflexiones separadamente, mientras que en el caso de la reverberación el efecto resultante se percibe como una modificación de la señal original.

Según Fernández González (2016) se define el Tiempo de Reverberación como el tiempo que transcurre desde que la excitación sonora se detiene, hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

## 1.2) Afectaciones del ruido

Los efectos del ruido sobre la salud humana son disímiles y pueden llegar a ser graves. Constituye un agente que puede dar lugar a efectos tanto sobre el receptor del sonido (efectos auditivos) como de tipo fisiológico y comportamental (efectos extrauditivos).

A día de hoy es evidente que el ruido es, sino el mayor, uno de los agentes más penetrantes en el lugar de trabajo y en la vida social de las personas, por lo que se hace imprescindible la implementación de medidas para su control en aras de mitigar sus efectos nocivos sobre la salud humana.

Para Secretaría de Salud Laboral y Medio Ambiente de CC.OO. de Asturias (2007) ocasiona daños tanto a nivel auditivo, como a nivel psíquico y de otros órganos distintos a la audición.

Los efectos sobre la audición que traen una exposición continua al ruido son disímiles, destacándose la hipocausia o sordera permanente (requiere una exposición elevada al ruido, en intensidad sonora y tiempo) y la dificultad en la comprensión del lenguaje.

En cuanto a trastornos psíquicos se refiere, la exposición al ruido trae consigo un estrés generalizado, malestar, ansiedad, dificultad en la comunicación y más inconvenientes, causas estas que inciden negativamente en el patrón de conducta del individuo y en su rendimiento laboral.

Cuando se habla de afectaciones a otros órganos distintos a la audición, se hace necesario destacar afecciones tales como alteraciones de la frecuencia cardíaca e hipertensión arterial y alteraciones del aparato reproductor-gestación.

### **1.2.1) Control de ruido**

Miyara (1999) entiende el control del ruido como una serie de pautas, técnicas y medidas específicas para mantener los niveles de ruido dentro de los márgenes requeridos para un mayor bienestar o para no poner en peligro la salud auditiva.

De acuerdo a Faulkner (1976) existen 3 elementos básicos en todo sistema de control de ruido:

1. La fuente del sonido.
2. El medio por el cual se propaga.
3. El receptor del sonido.

De acuerdo a varios autores como Viña Brito y Marsán Castellanos (2007), Náf Cortés (2014) y Virginis (2015), las medidas de control se pueden agrupar en tres tipos, primarias o control en la fuente, secundarias o control en el medio de propagación y organizativas o control en el receptor ( Figura 1.2 ). Este constituye el criterio más extendido para estudiarlas, aunque hay otros puntos de vista como el que plantea Verdejo (2001) acerca de la existencia de 2 formas de control de ruido: en la fuente y en los medios de propagación.



Figura 1.2: Medidas de control del ruido.

Fuente: tomados de Viña Brito y Marsán Castellanos (2007).

### **Medidas primarias**

La acción más directa y eficiente contra los niveles de ruido excesivo es la reducción del ruido en la propia fuente. En términos generales, las estrategias más efectivas para reducir su impacto sobre las personas, consisten en rediseñar o reemplazar los vehículos o equipos ruidosos por otros más silenciosos. (García Rodríguez, 2006)

Las modificaciones en la fuente de sonido son usualmente consideradas la mejor solución para un problema de control de ruido. (García, 2001), (Barron, 2003).

### **Medidas secundarias**

Otra posibilidad es actuar sobre el medio de propagación. Controlar las vías de transmisión del ruido se refiere a la aplicación de medidas al entorno inmediato que se encuentra alrededor de la fuente emisora, para lograr la reducción de los niveles de presión sonora. (García, 2001)

Entre las medidas secundarias más comunes están las cápsulas, el tratamiento acústico de locales, las cabinas, los resonadores acústicos y las pantallas acústicas.

### **Medidas organizativas**

Autores como Barron (2003), Secretaría de Salud Laboral (2012), Peiró Torres *et al.* (2016) hacen alusión a que dichas medidas deben ser implementadas en última instancia debido a la falta de efectividad de las mismas. Estos métodos insensibilizan la percepción de algunas actividades de riesgo físico para el trabajador y dificultan la intercomunicación entre personas. (Parma, 2015)

### **1.3) Materiales absorbentes de ruido**

Cada material tiene unas características absorbentes diferentes, por ello es importante conocerlas para poder elegir el material adecuado en función de las características acústicas del recinto y de los tiempos de reverberación que se quieran obtener. Estas



características de absorción dependen no solo de sus propiedades físicas, sino también de su forma de colocación y de otros condicionantes.

Así se denominan materiales absorbentes acústicos a todos aquellos materiales o sistemas que disponen de elevados coeficientes de absorción sonora, en todo o en parte del espectro de frecuencias audibles.(Parejo Gamboa, 2013)

### **Tipos de materiales absorbentes:**

Según Montano (2006) los diversos materiales de uso común, utilizados como absorbentes acústicos, se pueden dividir en:

**Materiales porosos:** disipan la energía acústica transformándola en calor. Su principal eficacia es para frecuencias medias y altas, donde las longitudes de onda coinciden con los espesores normales de los materiales utilizados (fibra de vidrio, lana mineral, corcho). Son de estructura granular o fibrosa. El espesor de la capa y su distancia a la pared soporte, constituyen elementos muy importantes. El espesor se suele elegir en función del coeficiente de absorción deseado, ya que si es demasiado delgado se reduce el coeficiente de absorción a bajas frecuencias, y si es muy grueso resulta bastante caro.

**Materiales para argamasa:** son materiales acústicos que se aplican en estado húmedo con paleta o pistola para formar superficies continuas de un espesor deseado. Se conocen también como morteros acústicos. Estos materiales se forman por una mezcla de ingredientes secos, a los que se les añade un aglutinante líquido. Estos morteros acústicos se aplican normalmente a una capa de cemento o sobre cualquier otro material. La mayoría de los morteros están formados por un agregado de perlita o vermiculita y aglutinante (normalmente yeso). Los huecos entre las partículas dan la porosidad necesaria para la absorción sonora.

**Membranas resonadoras:** convierten la energía sonora en mecánica al deformarse ondulatoriamente un panel al ser excitado por el sonido. Las absorciones máximas son para bajas frecuencias.

**Resonadores de Helmholtz:** la disipación de energía se produce al hacer oscilarlas ondas sonoras el aire contenido en las pequeñas cavidades que presenta el material. Su coeficiente de absorción es muy elevado, pero abarca una banda de frecuencias muy estrecha, también en la zona de bajas frecuencias. Al introducirse el material poroso en el interior de las cavidades se amplía la anchura de la banda, pero disminuye el coeficiente de absorción.

### **1.3.1 Influencia de los parámetros del material**

Para (Miyara, 1999) el coeficiente de absorción de los materiales absorbentes depende en gran medida de sus parámetros, refiriéndose específicamente a la densidad, la frecuencia, la porosidad y al espesor.

#### **Efecto del espesor**

Un material absorbente de gran porosidad se comporta en cierta forma como una tubería en la cual el efecto de atenuación de energía sonora en el aire se incrementa debido a las múltiples oportunidades de fricción que encuentra la onda en su trayecto. Por este motivo, la energía de una onda sonora que incide sobre este tipo de material se reduce exponencialmente con la distancia de penetración, pudiéndose concluir que un incremento de espesor aumentará la energía transformada en calor en la estructura porosa interna del material absorbente, lo cual implica un aumento del coeficiente de absorción sonora  $\alpha$  en todas las frecuencias. (Miyara, 1999)

#### **Efecto de la densidad**

El aumento de la densidad del material genera mayor fricción lo que produce una mayor absorción de la onda sonora incidente. Existe un límite en el aumento de la densidad del material, ya que si se aumenta la densidad la onda sonora no podrá penetrar el material y, en consecuencia, existirá una mayor reflexión de la energía. Desde el punto de vista práctico, la densidad de un material absorbente debe estar comprendida entre 40 y 100 Kg/m<sup>3</sup>. (Castillo, 2012)

#### **Efecto de la frecuencia**

De manera general la absorción aumenta con la frecuencia. Para un material de composición, textura y geometría dadas, el coeficiente de absorción sonora depende fuertemente de la frecuencia. Ello se debe, entre otras cosas a la relación entre la efectividad de la disipación de energía sonora en forma de calor y la proporción de la longitud de onda sobre la que actúa el material. (Miyara, 1999)

#### **Efecto de la porosidad**

Al incrementarse la porosidad del material, aumenta la absorción sonora debido a que el frente de onda incidente penetra en mayor medida dentro del material. Al producirse una mayor penetración de la onda, la fricción del aire con las paredes del material aumenta e incrementa la tasa de transformación de energía sonora a calórica. (Castillo, 2012)

### **1.3.2) Caracterización de las propiedades acústicas de los materiales absorbentes**

Para la correcta utilización de un material absorbente acústico cualquiera, es necesaria una previa caracterización de las propiedades intrínsecas del material en cuestión, específicamente las propiedades físicas y acústicas.

Los materiales absorbentes del sonido de tipo poroso se clasifican en absorbentes de esqueleto rígido y absorbentes de esqueleto flexible. En los absorbentes sonoros de esqueleto rígido el coeficiente de absorción aumenta con la frecuencia. Por su parte, en los absorbentes sonoros de esqueleto flexible se producen resonancias a frecuencias bajas y medias. Dichos materiales cuentan con ciertas características físicas que influyen en el comportamiento del mismo a la hora de absorber sonido. (Juliá, 2008)

Entre dichas propiedades físicas es de obligada mención la porosidad, la cual de acuerdo a Fahy (2001) no es más que la relación del volumen de agujeros de aire y el volumen total del material y constituye una cantidad adimensional que es menor a la unidad.

También se deben considerar la resistencia al flujo de aire y la resistividad al flujo: para Fernández (2015) la resistencia al flujo de aire está definida como la relación entre la caída de presión y la velocidad del flujo a través de una muestra de material, mientras que la resistividad al flujo se define como la medida de la resistencia al flujo por unidad de espesor y también es llamada como resistencia específica al flujo por unidad de espesor y depende principalmente de la densidad del material y del tamaño de la fibra.

Otra propiedad física de importancia es la tortuosidad, ya que mientras más compleja la trayectoria de propagación a través del absorbente, mayor es la absorción, y esa complejidad de la ruta está parcialmente representada por la tortuosidad. (Trevor J. C., 2004)

Para Miyara (2006) las propiedades acústicas de los materiales que constituyen un recinto acústico, determinan, en gran medida el comportamiento del sonido dentro y fuera del mismo. Sin embargo, cuando se trata de lograr un control del ruido con especificaciones rigurosas, se hace necesario recurrir a materiales y estructuras especialmente formulados o acondicionados para tener propiedades acústicas sobresalientes. A los materiales que se emplean para ello se les denominan materiales acústicos.

Los materiales acústicos según Miyara (2006) se clasifican de acuerdo a las siguientes categorías:

a) Materiales absorbentes: absorben la energía acústica de las ondas que inciden en su superficie transformándola en calor, y por tanto reducen la energía acumulada en un recinto. Poseen un coeficiente de absorción sonora considerable.

b) Materiales aislantes: impiden la propagación del sonido de un recinto a otro.

Su pérdida de transmisión es elevada.

c) Materiales difusores: contribuyen a lograr un campo sonoro más difuso en un recinto, y por consiguiente permiten controlar resonancias y otros defectos acústicos.

#### 1.4) Coeficiente de absorción acústica

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una parte de la energía es absorbida, otra se refleja y otra se transmite. El coeficiente de absorción sonora es definido por Cabrera Ortiz (2010), Carlos G. García Garino (2013) y Cristian D. Carrizo (2011) como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente por una superficie o sustancia. Normalmente, se expresa en sabines dentro de una escala de 0 a 1 y se representa con la letra alfa ( $\alpha$ ).

Debido a la gran diferencia de tamaños que presentan las longitudes de onda audibles (desde los 17mm hasta los 17 metros aproximadamente), los materiales no suelen absorber por igual todas las frecuencias. Por ello el coeficiente de absorción se expresa en función de la frecuencia, ya sea en bandas de octava y/o tercio de octava. (Montano, 2006)

En la figura 1.3 se muestra el coeficiente de absorción de algunos materiales.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
<b>Hormigón</b>	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,027
<b>Moqueta</b>	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63
<b>Fibra de vidrio</b>	0,2	0,37	0,6	0,8	0,75	0,7

Figura 1.3: Coeficientes de absorción de algunos materiales

Fuente: tomado de Montano (2006)

Por definición una abertura absorbe la totalidad de la energía incidente, donde  $\alpha = 1$ . Según Parejo Gamboa (2013) el coeficiente de absorción de un material depende de:

- El espectro sonoro de la onda incidente.
- La naturaleza del material (tipo, forma, espesor, características constructivas, etc.)
- Las condiciones termohigrométricas del ambiente.

Las características de absorción de los materiales absorbentes dependen, no sólo de sus propiedades físicas, sino también, de un sinnúmero de condicionantes y de detalles

constructivos, que varían sustancialmente si se particulariza el estudio y que resultan prácticamente muy complejas al momento de modelarlas matemáticamente. (Cristian D. Carrizo, 2011).

De acuerdo a Carlos G. García Garino (2013) el valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. Habitualmente se especifica para frecuencias centrales de bandas por octava y tercio de octava.

#### 1.4.1) Medición del coeficiente de absorción de un material

Existen diferentes métodos de medición para la caracterización de materiales acústicos, los más aplicados durante el desarrollo investigativo de los materiales para la acústica son: el tubo de Kundt o también conocido como el tubo de impedancias y el método de cámara reverberante.

El tubo de impedancia (Figura 1.4) es un método muy útil ya que permite hacer las mediciones en condiciones muy definidas y controladas sin requerir de muestras muy grandes ni recintos especializados. Este método es utilizado especialmente para medir materiales absorbentes de tipo poroso, ya que, para otro tipo de materiales absorbentes, las muestras pequeñas no son representativas para el comportamiento de la absorción en las muestras grandes. (Fernández, 2015)

El funcionamiento del tubo se basa en la teoría de ondas estacionarias, reflexión, superposición e interferencia de las ondas. (Salazar, 2013)

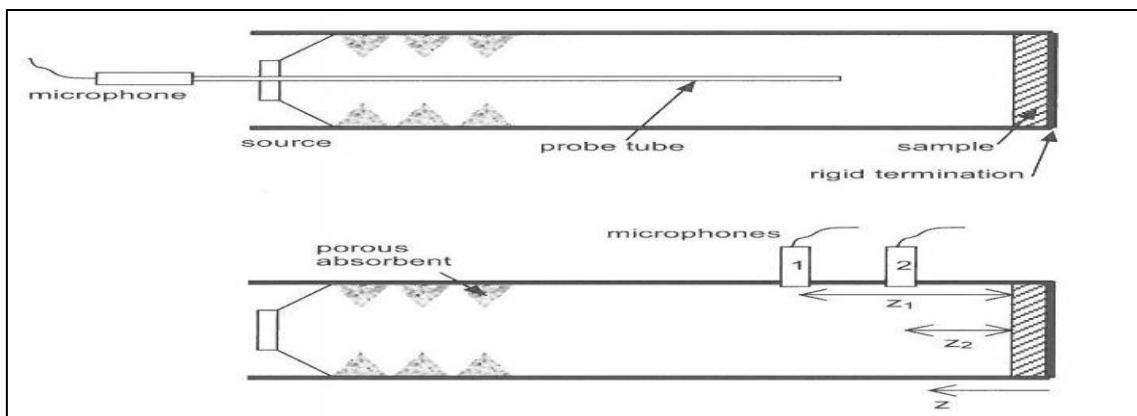


Fig. 1.4 Tubo de impedancia. Arriba: Montaje con sonda. Abajo: Montaje con dos micrófonos

Fuente: tomado de Fernández (2015)

El campo de sonido dentro del tubo puede ser considerado como una suma de las ondas planas y los modos superiores. El sonido es guiado internamente y forzado a propagarse en la dirección axial del tubo. (Barros, 2009)

El tubo está provisto de un altavoz, el cual produce ondas sonoras, las que 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. (Carlos G. García Garino, 2013)

La determinación de los coeficientes de absorción también se lleva a cabo en una sala denominada cámara reverberante. En los grandes laboratorios de acústica siempre existe un recinto de gran reverberación apto para medir  $\alpha$ , denominado cámara reverberante. Por lo general cuentan con un tiempo de reverberación cercano a los 10 segundos, y su volumen es algo mayor a los 200 m<sup>3</sup>. Se procura que no sean de forma exactamente rectangular, para lo cual sus paredes están inclinadas entre sí cierto ángulo, de manera de obtener una mejor difusión del sonido. En muchos casos se utilizan además paneles giratorios que contribuyen a mejorar aún más la difusión. Para la medición se suele ubicar en el suelo una muestra de unos 3 ó 4 m<sup>2</sup>. Se hace esto para evitar incrementar significativamente la absorción total de recinto, y así lograr un buen cumplimiento de las aproximaciones. (Miyara, 1999)

Este es el único método que permite determinar los efectos de las condiciones del montaje de los materiales. Los coeficientes de absorción obtenidos a través de una cámara reverberante no son tan precisos como los medidos para la incidencia normal en tubo de Kundt debido a que es muy difícil obtener una difusión completa del sonido en ella; además el área de absorción equivalente de una muestra no es proporcional al área real debido a la difracción de la muestra. (López, 1989)

#### **1.4.2) Coeficiente de reducción acústica (NRC)**

En lugar de hacer uso de todos los valores de los coeficientes de absorción para cada banda de frecuencias (octava), se utiliza un único coeficiente para el material absorbente. Dicho coeficiente denominado coeficiente de reducción acústica (NRC: Noise Reduction Coefficient) se define como la media aritmética de los coeficientes de absorción correspondientes a las bandas centradas en 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz. Si bien el uso de un solo coeficiente simplifica los cálculos, se debe tener precaución, ya que puede existir un mismo valor de NRC para dos materiales que tienen comportamientos totalmente distintos debido a las distintas respuestas en frecuencia de los materiales. (Castillo, 2012)

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000} + \alpha_{4000}}{5}$$

### **1.4.3) Modelos matemáticos de absorción acústica de materiales porosos**

Son varios los autores que se han dedicado a desarrollar modelos y teorías para intentar predecir el comportamiento de los materiales desde un punto de vista acústico, predicción de invaluable ayuda a la hora de caracterizar acústicamente dichos materiales y por ende imprescindible en el proceso de elaboración de materiales absorbentes de ruido.

Son diversos los parámetros que caracterizan acústicamente un material, pero hay dos que permiten caracterizar completamente los materiales de tipo poroso y fibroso: la impedancia característica compleja y la constante de propagación compleja. Los modelos que permiten determinar la impedancia acústica característica y la constante de propagación de los materiales porosos a partir de sus propiedades físicas se clasifican en empíricos, fenomenológicos y microestructurales. (Parejo Gamboa, 2013)

El más conocido de los modelos empíricos es el de Delany (1970), que presentan unas relaciones a partir del ajuste de una gran cantidad de datos experimentales. Este modelo solo necesita como dato de entrada la resistividad al flujo.

La denominada aproximación fenomenológica consiste en sustituir un sólido poroso saturado por un fluido equivalente disipativo. Uno de los autores más importantes en el desarrollo de los modelos teóricos ha sido Biot (1956) que desarrolló una teoría general de la propagación de ondas en un sólido poroso saturado con estructura elástica.

En último lugar, la aproximación microestructural consiste en el estudio de la propagación de las ondas sonoras en el interior de un poro, para, posteriormente, generalizar los resultados a escala macroscópica. Los autores Zwicker (1949) y Attenborough (1982) son los máximos exponentes en cuanto al desarrollo de modelos microestructurales.

### **1.5) Antecedentes en la elaboración de materiales absorbentes sonoros**

Desde hace varios años el tema del confort acústico es un tema que suscita marcado interés en la comunidad científica internacional, y en los últimos tiempos la temática de la elaboración de materiales absorbentes de ruido ha cobrado especial importancia debido a que se busca encontrar alternativas factibles a las propuestas que hoy en día ofrece el mercado especializado. El hecho ampliamente conocido de que esta industria está aún en sus etapas incipientes ha conllevado a que varias investigaciones se hayan llevado a cabo, pues se plantea que los materiales actualmente utilizados están aún sujetos a disímiles mejoras que derivarían en una mejor calidad del producto, en unos menores costos de fabricación y en una mayor divulgación y uso de dichos materiales absorbentes acústicos.

Dentro de estas investigaciones se destacan las investigaciones de Seddeq (2013), García-Vallés (2008), Navacerrada (2006), J. A. González Ganso (2008), Del Río Merino (1999). Estas investigaciones, en algunos aspectos, presentan similitud en cuanto a resultados se refiere. De inicio, en su enorme mayoría se enfocan en el reaprovechamiento de residuos sólidos y de materiales fibrosos reciclados, para así darle valor útil a productos cuya potencial completo es aún una incógnita para la ciencia. Estas investigaciones arrojan que es posible obtener coeficientes de absorción iguales e incluso superiores a los productos que actualmente se venden en el mercado por las distintas empresas, basándose una selección rigurosa de los materiales a utilizar y a través de la mezcla de materiales en distintas proporciones volumétricas. También se realizan un análisis de las propiedades de los materiales seleccionados, ya sean propiedades físicas, mecánicas o acústicas. Se obtienen materiales gentiles con el medioambiente, lo cual constituye una premisa fundamental a día de hoy, así como materiales que a su vez son económicos. Las investigaciones demostraron ser exitosas puesto que la absorción de sonido es constante y uniforme en todas las frecuencias.

#### **Conclusiones parciales del Capítulo I:**

- El empleo de los materiales absorbentes de ruido constituye la base para la aplicación del tratamiento acústico de locales como medida secundaria para el control del ruido.
- Los autores consultados coinciden en definir los materiales absorbentes acústicos como todos aquellos materiales o sistemas que disponen de elevados coeficientes de absorción sonora, en todo o en parte del espectro de frecuencias audibles.
- Se determinó que la porosidad, la densidad y el espesor son las tres características de mayor influencia en el coeficiente de absorción acústica de un material.
- Se realizó un análisis de los antecedentes en la creación de materiales absorbentes acústicos, los modelos matemáticos y métodos para el cálculo del coeficiente de absorción.



## Capítulo II: Materiales y métodos para el cálculo del coeficiente de absorción acústica

En este capítulo se presenta un método fiable para llevar a cabo un correcto procedimiento de medición del coeficiente de absorción sonora de materiales acústicos y se incluye una explicación de los posibles errores que se puedan presentar y cómo calcularlos. Se explican los métodos y herramientas para el cumplimiento de los objetivos específicos.

### 2.1) Metodología propuesta

Como resultado de una búsqueda bibliográfica mediante diversas fuentes tanto a nivel internacional como nacional, fue posible la consulta de diferentes investigaciones que se concentran en el cálculo del coeficiente de absorción sonora mediante un tubo de impedancias o de Kundt. Dichas investigaciones se basan en lo recomendado por la norma ISO 10534 parte I. En la Recuadro 2.1 se relacionan algunos de estos estudios.

Recuadro 2.1: Diferentes estudios del cálculo de absorción sonora de diferentes materiales, mediante un tubo de impedancia.

Autor	Título
Fernández (2015)	Caracterización acústica de un material de uso alternativo a partir de la resistencia al flujo y el coeficiente de absorción para evaluar su posible aplicación en soluciones acústicas.
Castañeda (2004)	Medición del coeficiente de absorción del sonido.
Parejo Gamboa (2013)	Desarrollo de materiales absorbentes acústicos a partir de residuos agrícolas.
Infante Salamanca (2012)	Diseño y construcción de un panel absorbente con materiales de residuo sólido.

Fuente: elaboración propia.

Las características del presente estudio también permiten basarse en la norma ISO 10534 parte I: Método de ondas estacionarias.

Dado las condiciones particulares bajo las cuales se llevará a cabo la presente investigación, dígame la inexistencia en la Universidad de Matanzas de un tubo de impedancias profesional y que el estudio se realizará con un tubo de Kundt desarrollado

en una investigación paralela a esta, se hace necesario adecuar la norma para una correcta aplicación. Esto deriva en la propuesta de una metodología para el cálculo del coeficiente de absorción sonora, la cual se muestra en la figura 2.1.

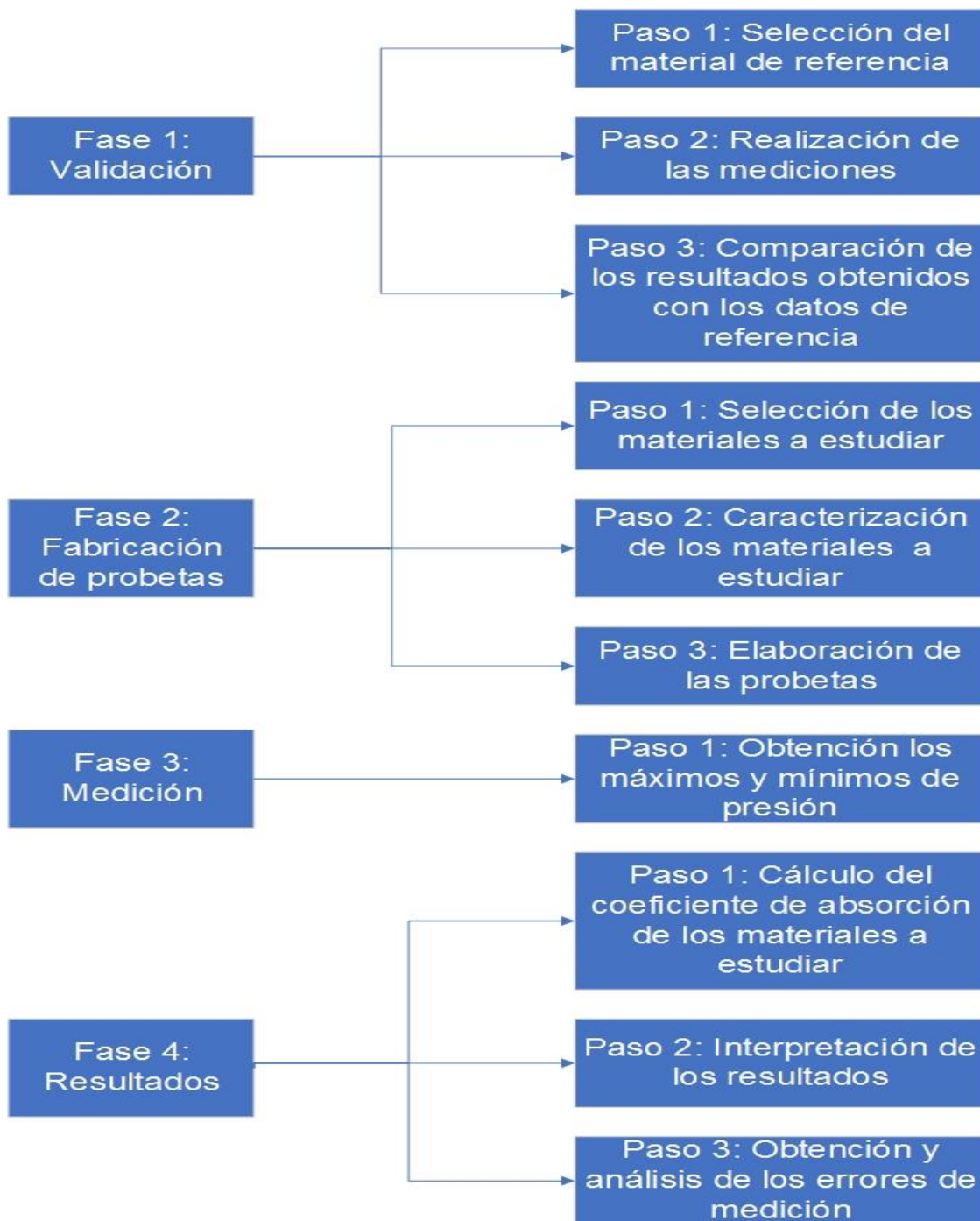


Figura 2.1: Metodología propuesta

Fuente: elaboración propia

A continuación, se explican cada uno de las fases y pasos que componen a la metodología propuesta.

### **2.1.1) Fase 1: Validación del tubo de impedancias**

#### **Paso 1: Selección del material de referencia**

Para una correcta validación del proceso de medición a través del tubo de impedancia con que se cuenta, para desarrollar la investigación, deben ser seleccionados uno o varios materiales cuyos coeficientes de absorción por bandas de octava estén homologados a nivel internacional. Se recomienda la selección de un material que sea un buen absorbente acústico, pues son a los que se le dedican la mayoría de los estudios, lo que facilita la búsqueda de bibliografía.

#### **Paso 2: Realización de las mediciones**

Para realizar las mediciones del coeficiente de absorción del material de referencia, es necesario regirse por las indicaciones que se orientan en esta metodología más adelante.

#### **Paso 3: Comparación de los resultados obtenidos con los datos de referencia**

Una vez se cuente con los valores obtenidos a través del proceso de medición del coeficiente de absorción sonora, se realiza la comparación de estos resultados con los que se tienen del material de referencia seleccionado. Como se trata del mismo material, el estudio debe arrojar resultados semejantes a lo obtenido en investigaciones precedentes, pero es comprensible que existan pequeñas discrepancias ya que en todo proceso de medición la ocurrencia de errores es algo bastante frecuente.

Este paso determina que se pueda desarrollar el estudio con el equipo creado si se obtienen, como se explicó con anterioridad, resultados experimentales similares a los que recoge la literatura.

### **2.1.2) Fase 2: Fabricación de probetas**

#### **Paso 1: Selección de materiales a estudiar**

La utilización del tubo de impedancias tiene su uso más común en la medición del coeficiente de absorción sonora de materiales para, a partir de ahí, realizar valoraciones acerca de cuán buenos absorbentes acústicos son. Consecuentemente con esta premisa, lo que más se seleccionan son materiales que cumplan con las características de un buen absorbente (porosidad, por ejemplo).

Una característica primordial que se debe tener en cuenta a la hora de la selección del material es su porosidad. Según Marín (2009) para que los materiales presenten un alto

grado de absorción de sonido deberán ser diseñados con estructuras porosas para que se alcance el flujo de aire ideal.

Se debe tener en cuenta que los materiales porosos absorben mejor los sonidos agudos pues sus longitudes de onda son menores e ingresan con mayor facilidad a los poros. Con un aumento de la porosidad aumenta la absorción a todas las frecuencias, tal y como se muestra en la figura 2.2. Este efecto es de esperar, ya que la penetración de la onda sonora incidente es mayor a medida que se incrementa el grado de porosidad.

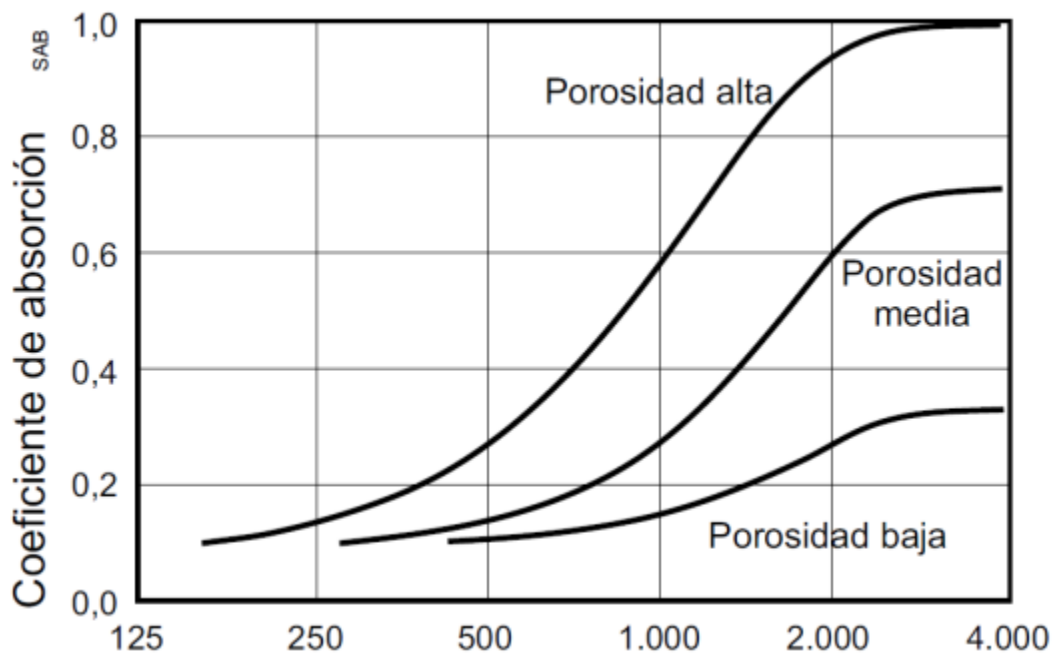


Figura 2.2: Variación del coeficiente de absorción en función de la frecuencia y de la porosidad del material (lana de vidrio).

Fuente: tomado de Castillo (2012)

Dentro de los materiales porosos podemos a su vez distinguir varios tipos como son los porosos-rígidos y los porosos-elásticos.

Los materiales porosos-rígidos se utilizan como absorbentes sonoros. Se caracterizan por su resistencia y porque se montan con facilidad siempre que la superficie que los reciba esté preparada. Una de sus ventajas principales es su fácil adaptación tanto en edificios nuevos como en los ya construidos.

Los materiales porosos-elásticos son materiales absorbentes que presentan un esqueleto no rígido sino elástico, dicho esqueleto estará sujeto a vibraciones al igual que el aire contenido en los poros. Estos sistemas se suelen instalar como sistemas de dos capas con la formación capa de material absorbente-aire-capo de material-airepared, ya que se ha comprobado que un aumento en el número de capas del sistema,

de una a dos, aumenta de manera importante las frecuencias para las que el coeficiente de absorción es relativamente alto.

Una particularidad relevante de los materiales porosos es que, si posee un espesor igual a la mitad de la longitud de onda del sonido incidente, la absorción alcanza un máximo valor para este material. No obstante, puede decirse que con el aumento del espesor del material la absorción crece hasta un cierto límite, pero superado los 7 cm (3 pulgadas) el incremento es relativamente poco. El espesor se suele elegir en función del coeficiente de absorción deseado, ya que si es demasiado delgado se reduce el coeficiente de absorción a bajas frecuencias, y si es muy grueso resulta bastante caro. En la figura 2.3 se muestra la variación del coeficiente de absorción sonora de un material en función del espesor.

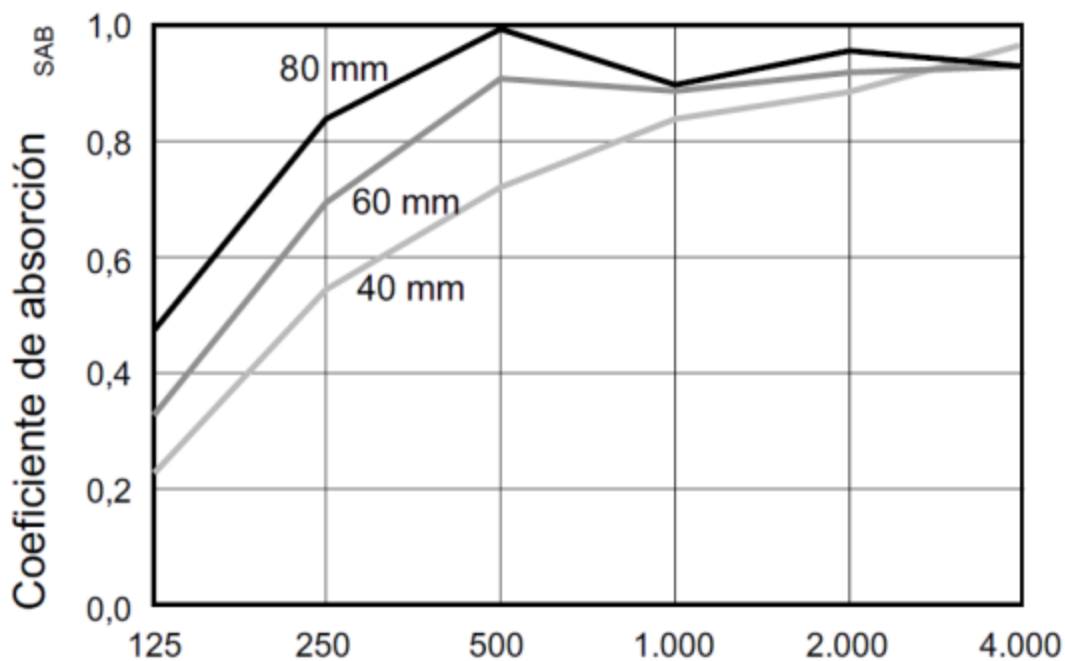


Figura 2.3: Coeficiente de absorción en función de la frecuencia para material absorbente sonoro de distintos espesores.

Fuente: tomado de Cristian D. Carrizo (2011)

Otro parámetro a considerar para la selección de materiales, es la densidad. A medida que esta aumenta, se produce un incremento progresivo de absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda sonora en el material, es decir, una mayor reflexión de energía.

Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente, 40 y 70 Kg/m<sup>3</sup>, no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/m<sup>3</sup>, tal y como se muestra en la figura 2.4.

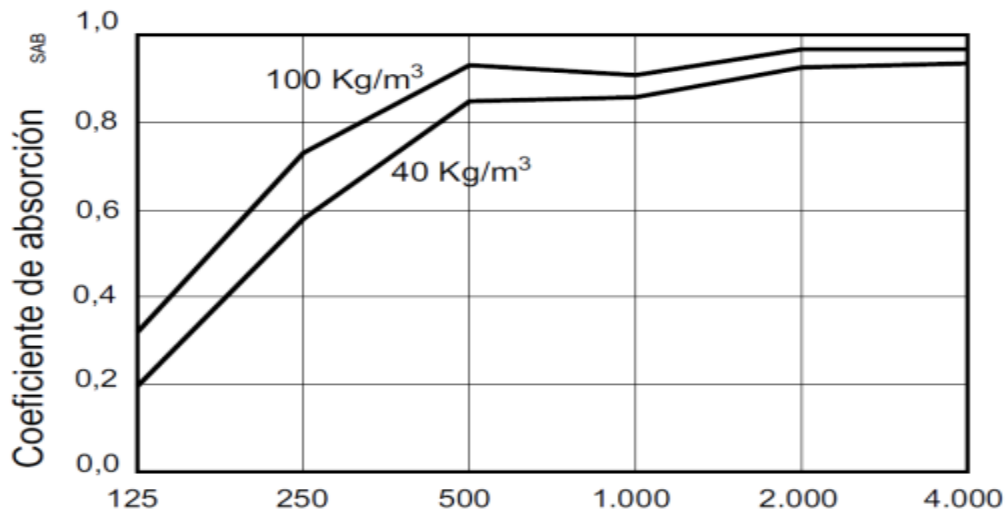


Figura 2.4: Coeficientes de absorción sonora en función de la frecuencia para lana de roca de 60 mm.

Fuente: tomado de Castillo (2012)

También se busca que resulten económicamente factibles, ya que actualmente uno de las mayores trabas en la implementación de tratamientos acústicos se encuentra en lo costoso de la adquisición de los materiales absorbentes a utilizar, como se aprecia en la figura 2.5.



Figura 2.5: Costos de algunos materiales absorbentes comercializados internacionalmente.

Fuente: datos consultados en Amazon.com

Sin embargo, para el caso particular de esta investigación, resulta también de interés estudiar materiales que no cumplan con los rasgos de un absorbente acústico de calidad, con el fin de darle cumplimiento a los objetivos específicos de la investigación.

## **Paso 2: Caracterización de los materiales**

Una vez seleccionados los materiales a estudiar, se hace necesario una breve caracterización de los mismos donde se muestren su composición, obtención y aquellos rasgos que los hacen relevantes para la investigación, así como sus principales áreas de utilización.

## **Paso 3: Elaboración de las probetas**

Las probetas son pequeñas piezas (generalmente de dimensiones normalizadas), constituida por un material determinado (o materiales según el caso) cuyas características se desean estudiar. Las probetas constituyen una muestra representativa del material a estudiar.

Para poder llevar a cabo esta investigación es totalmente imprescindible contar con pequeñas probetas de los materiales seleccionados, las cuales son introducidas en el tubo de Kundt. Estas probetas tienen que encajar perfectamente en la sección transversal del tubo y a su vez tienen que ser capaces de poder desplazarse a través de él. Por ello, el diámetro exterior de las probetas a fabricar tiene que ser entre 0,5mm-1mm menor que el diámetro interior del tubo.

En algunos casos específicos, la fabricación de las probetas requerirá la utilización de moldes, debido a que será necesario un proceso de mezcla, amasado y conformación del material, antes de ser desmoldado después de un tiempo prudencial.

Las probetas serán perforadas por el medio mediante un taladro con una barrena fina con el fin de introducir una varilla metálica con un micrófono atado a ella. Esta varilla se desplazará a lo largo del tubo para poder realizar las mediciones requeridas.

### **2.1.3) Fase 3: Medición**

Las mediciones se efectuarán según lo que establece la ISO 10534 parte I, la cual se basa en el hecho de que existen ondas planas incidentes y sólo refleja ondas que se propagan paralelamente al eje del tubo en la sección de prueba del tubo (la sección donde se explora el patrón de ondas estacionarias). La generación de otras formas de onda (los modos más altos) se evitará. Se supone también que la onda sonora se propaga en el tubo sin atenuación.

Esta parte de la norma ISO 10534 especifica un método para la determinación del coeficiente de absorción de sonido. Los valores se determinan para la incidencia de sonido normal mediante la evaluación del patrón de onda estacionaria de una onda plana en el tubo, que se genera por la superposición de una onda plana sinusoidal incidente con la onda plana reflejada desde el objeto de prueba.

Este método es adecuado para estudios de parámetros y para el diseño de absorbentes de sonido, ya que solo se necesitan pequeñas muestras del material absorbente. Proporciona valores exactos (excluidos los errores de medición y montaje).

El objeto de prueba se monta en el final de un tubo de impedancia que sea recto, rígido, y liso con un ajuste perfecto. La onda sonora plana sinusoidal incidente  $p_i$  es generada por un altavoz en el otro extremo del tubo. La superposición  $p = p_i + p_r$  de la onda incidente  $p_i$  con la onda reflejada en el objeto de prueba,  $p_r$ , produce un patrón de ondas estacionarias en el tubo. El producto de evaluación de las cantidades medidas (en forma lineal o en una escala logarítmica) de las amplitudes de presión sonora  $|p|$  a la presión mínima (uno o más), y  $|p|$  a la presión máxima.

Estos datos son suficientes para determinar el coeficiente de absorción. Además, la distancia  $X_{min1}$  de la primera presión sonora mínima en el plano de referencia  $X = 0$  (que normalmente es el plano donde se coloca la superficie del objeto de prueba) y la longitud de onda  $\lambda_0$  debe ser determinado para dar el factor de reflexión  $r$  y la impedancia  $Z$  o la admisión (o admitancia)  $G = 1/Z$ .

### Paso 1: Obtención de los máximos y mínimos de presión

De acuerdo a Castañeda (2004) 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 2.3. 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. Las amplitudes de presión en los nodos y antinodos son medidas con un micrófono, el cual se desliza a lo largo del tubo de impedancias.

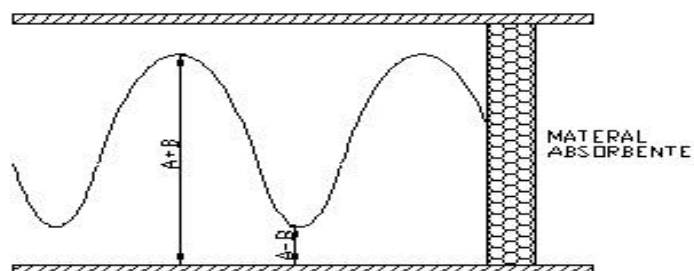


Figura 2.3: Representación de la máxima y mínima presión en un tubo de impedancia para ondas estacionarias.

Fuente: tomado de Castañeda (2004).

En la Figura 2.4 se expone el diagrama de bloques de la configuración de los equipos usados para la medición.





Figura 2.4: Diagrama de flujo- Medición del coeficiente de absorción a incidencia normal.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestra el procedimiento a seguir para medir el coeficiente de absorción sonora, procedimiento basado en la norma ISO 10534 y que se recoge en la investigación realizada por Infante Salamanca (2012).

El coeficiente de absorción de un material puede ser afectado muy fuertemente por las condiciones de montaje, por lo que estas deben ser cuidadosamente controladas. Los requisitos generales son que la muestra encaje cómodamente en el soporte, además la muestra debe quedar totalmente paralela al parlante para evitar cualquier posible inclinación para garantizar la incidencia normal.

- Colocar la muestra de material acústico en el tubo de impedancia.
- Conectar el micrófono directamente a la entrada del osciloscopio y el generador de señales al parlante.
- Prender el osciloscopio y fijar una velocidad de barrido de 5ms/div y una ganancia en el canal de 0.5 mv/div. Aunque estos parámetros pueden variar en dependencia del material y pueden ser ajustados a consideración del usuario.
- Fijar el generador de señales para producir 250 Hz, en onda sinusoidal.
- El micrófono se coloca dentro del tubo a 1 mm de la superficie de la muestra
- Se activa el modo xy del osciloscopio para poder visualizar las figuras de lissajous ya que este nos ayuda a determinar el desfase de 90°.
- 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 hasta que se logre.
- Posteriormente se desactiva el modo xy para obtener una lectura acerca de la amplitud de la onda, esta amplitud se calcula tras medir la cantidad de cuadros de la grilla del osciloscopio, cada cuadro es de 0,5v.

- Luego se tiene que determinar el (A+B) que es la máxima presión (antinodo) que se logra cuando el tubo entra en resonancia, formándose de esta manera ondas estacionarias, esta señal siempre se obtiene a 1mm de la muestra en las 7 muestras.
- Luego se tiene que determinar el (A-B) que es la mínima presión correspondiente a la amplitud del nodo, esto se logra con el traslado del micrófono en dirección opuesta a la muestra hasta obtener en el osciloscopio la primera con menor amplitud.
- El procedimiento se repite, para las frecuencias en 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.
- Se realizan 8 mediciones por cada frecuencia en cada muestra.

#### **2.1.4) Fase 4: Resultados**

##### **Paso 1: Cálculo del coeficiente de absorción de los materiales a estudiar.**

Con los datos obtenidos se realizan los cálculos para obtener los coeficientes de absorción de las muestras. Dichos cálculos se relacionan a continuación.

La relación de presión máxima a presión mínima SWR (método de ondas estacionarias)

$$SWR = \frac{(A + B)}{(A - B)}$$

Luego de obtener la relación de presiones (SWR), se calcula el coeficiente de reflexión.

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

Al tener el valor del coeficiente de reflexión se halla el coeficiente de absorción sonora  $\alpha$  para las frecuencias de 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.

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

Una vez obtenidos los 8 coeficientes de absorción  $\alpha$  se promedian para cada una de las frecuencias y cada una de las muestras.

Luego, se procede a hallar el NRC para cada material a partir de la ecuación explicada en el capítulo anterior.

##### **Paso 2: Interpretación de los resultados**

Una vez se obtengan los coeficientes de absorción para las distintas frecuencias de interés se pasará a analizar los resultados obtenidos. Para ello se hará un análisis del comportamiento acústico que presenta el material objeto de análisis. Esto será posible a partir de la interpretación de las tablas de coeficientes de absorción en función de la frecuencia de cada material. Se le debe prestar esencial importancia a en cuáles

frecuencias presenta sus picos máximos y mínimos de absorción, para así dar un criterio acerca de la posible utilización del mismo o si no debería ser usado en absoluto.

### **Paso 3: Obtención y análisis de los errores de medición**

En todo proceso investigativo que se requiera de la interpretación de resultados dados, se hace necesario contar con equipos que ofrezcan la mayor exactitud y precisión en el trabajo con los datos experimentales. Para esto se necesita la eliminación del máximo número posible de fuentes de error, que pueden atribuirse bien al sistema de medición, bien al operador. (CERVELLE. B., 1978)

En este sentido hay que distinguir dos clases fundamentales de errores: los sistemáticos y los estadísticos. Por regla general, cuando realizamos una medición se presentan errores de ambos tipos.(H., 1977)

Los errores van a tener su origen en posibles fallas al momento de recoger los valores de los máximos y mínimos de presión.

#### **Errores sistemáticos**

Los errores sistemáticos son debidos a un defectuoso ajuste del aparato utilizado, o a un fallo del operador. Este tipo de errores provoca que los valores experimentales obtenidos se desplacen siempre en un mismo sentido con respecto al valor real.(Vendrell Saz, 1979)

En el caso del presente estudio existe una limitación en el rango de frecuencias bajas ya que el límite inferior está determinado por la longitud del tubo. Por ejemplo, para medir en 250 Hz dos mínimos de presión, la longitud del tubo debe ser de por lo menos dos metros ya que la norma expresa que la longitud  $l=3/4 \lambda$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia inferior medida, esto quiere decir que el tubo utilizado en la medición no alcanza a tener dos mínimos de presión.

Entre los errores sistemáticos se encuentra la temperatura ya que esta es una variable que no se puede controlar por el espacio en el que se realiza la medición.

La sonda de micrófono utilizada puede no ser la más adecuada para las mediciones realizadas, pues no se trata de un micrófono de mediciones.

La calibración del sistema se realizó antes de iniciar la medición debido a que los equipos utilizados en la Universidad de Matanzas no se encuentran totalmente calibrados.

## Errores Estadísticos

Los errores estadísticos son intrínsecos al método y no tienen una dispersión constante respecto al valor real. Aunque no pueden corregirse con exactitud pueden ser minimizados mediante la realización de un elevado número de mediciones, cosa que no sucede con los errores sistemáticos. (H., 1977)

Los errores estadísticos se entienden como incertidumbres debidas a numerosas causas imprevisibles que dan lugar a resultados distintos cuando se repiten las medidas. Son generalmente accidentales y debido a causas irregulares son mayores o menores, por exceso o por defecto, al alterar con igual probabilidad, pues obedecen a las leyes del azar.

Los errores estadísticos se pueden evaluar mediante la estadística descriptiva. El análisis estadístico no genera información novedosa, pero permite categorizar y caracterizar los datos para tomar decisiones objetivas e inteligentes en cuanto a su calidad e interpretación.

Por lo general se suelen utilizar medidas de centralización y dispersión.

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 utilizará la desviación estándar poblacional, la desviación típica y la varianza.

La principal medida de centralización es la media:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

Y entre las medidas de dispersión:

Desviación estándar de la muestra:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

Varianza:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}$$

Error estándar de la media o desviación típica:

$$Sm = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

## **2.2) Tubo de Kundt. Montaje y operación**

Para efectuar el estudio, se cuenta con un tubo cilíndrico de vidrio transparente de longitud 135 cm, un diámetro interior de 4.4 cm y exterior de 4.8 cm. El tubo es sujetado por una base de madera de longitud 60 cm y altura 13 cm, que cuenta con 2 soportes que hacen función de apoyo para el tubo.

Se dispone de una fuente sonora (bocina) que se acopla en un extremo del tubo, con la potencia e impedancia adecuadas para el amplificador. Dicha fuente está conectada a un amplificador de potencia capaz de alimentar a la bocina de manera que esta pueda transmitir las frecuencias a analizar a través del tubo; se le puede conectar por medio de un cable auxiliar cualquier dispositivo que emita niveles de frecuencia. En este caso se utiliza un celular con la aplicación móvil "Generador de Frecuencia" para sistema operativo Android que permite emitir niveles de frecuencia hasta 22000Hz, pero también cabe la posibilidad de conectarle un generador de frecuencias profesional, generadores que son posibles de encontrar en el Laboratorio de Física de la Universidad de Matanzas.

Para una mejor funcionalidad del equipo se construyó un pistón ajustable que cierra el tubo en el otro extremo y da la posibilidad de variar su longitud y encontrar los largos efectivos para los cuales se desarrollan ondas estacionarias.

Las frecuencias que hacen posible la utilización del equipo de forma correcta se encuentran con el uso de un micrófono ubicado en el inicio del tubo conectado a un osciloscopio, el cual muestra una recta horizontal que equivale a tener ondas estacionarias dentro del tubo. En dicho osciloscopio se llevarán a cabo diferentes lecturas en intervalos de tiempos para una misma señal patrón, lo cual proporcionará lecturas de voltaje, variable principal para la determinación del coeficiente de absorción de sonido.

El equipo debe ser manipulado con mucha cautela dada su gran fragilidad, principalmente el tubo de cristal. Es primordial siempre utilizar el equipo en un puesto de trabajo que garantice la estabilidad requerida.

Para poner en funcionamiento el Tubo de Kundt es elemental tener todos los componentes del mismo vinculados entre sí, entonces se procede a conectar la fuente de alimentación a la corriente, así como el dispositivo que emite las frecuencias al amplificador. Después se puede comenzar a operar el equipo. Una vez se echa andar, funcionará hasta que se deje de emitir frecuencia al interior del tubo o se desconecte el amplificador de la corriente eléctrica.

De ser necesario transportar el Tubo de Kundt se recomienda desmontar los distintos componentes y moverlos por separado, a partir de las características individuales de cada uno, concentrándose en la protección del tubo de cristal que resulta el elemento que mayor cuidado requiere.

Se debe respetar las diversas medidas de seguridad. El equipo se colocará en un puesto de trabajo donde no exista riesgo de caída, alejado de zonas con humedad que pudieran afectar los componentes electrónicos del mismo o lugares donde incidan los rayos del sol porque el calor puede afectar el tubo de cristal. La manipulación debe estar a cargo de una persona con los conocimientos básicos para su operación.

Para su correcto mantenimiento se recomienda cada cierto tiempo pintar la base de madera para protegerla del deterioro que sufre este tipo de material con el paso del tiempo. La vida útil del equipo irá asociada al cuidado y protección que se le provea al equipo.

### **Conclusiones parciales del Capítulo II.**

- Se propuso una metodología para calcular el coeficiente de absorción sonora de materiales, la cual se basa en las indicaciones recogidas en la norma ISO 10534 parte I: Método de ondas estacionarias.
- Fue detallado el procedimiento, los equipos y medios para el cálculo del coeficiente de absorción acústica.
- Se determinaron los parámetros para el montaje, operación y seguridad en el empleo del tubo de Kundt.

### **Capítulo III: Desarrollo del experimento del cálculo de coeficiente de absorción de distintos materiales mediante el tubo de impedancias**

En el presente capítulo se lleva a cabo una investigación tipo descriptiva – experimental, donde se presentan los principales resultados conseguidos tras aplicar la metodología propuesta a materiales utilizados en la construcción de edificaciones y recintos acústicos en Cuba.

#### **3.1) Validación**

Para el proceso de validación del estudio se tomó como guía las indicaciones que se recogen en la metodología propuesta, lo que resultó en el desarrollo de 3 pasos previos a la decisión sobre si el experimento proseguía o no.

##### **3.1.1) Selección del material de referencia**

Para el proceso de validación del estudio se seleccionó la espuma de poliuretano. Este es un material plástico poroso formado por una agregación de burbujas, conocido también por los nombres coloquiales de gomaespuma en España o gomapluma en algunos países sudamericanos. También es denominado poliuretano proyectado, debido a la forma en la que se suele aplicar sobre superficies. Se forma básicamente por la reacción química de dos compuestos, un polioliol y un isocianato, aunque su formulación necesita y admite múltiples variantes y aditivos. Es un material muy versátil ya que, según los aditivos y los sistemas de fabricación utilizados, se pueden conseguir características muy distintas y espumas destinadas a usos muy diferentes, desde los bien conocidos bloques de espuma elástica para colchones hasta espumas casi rígidas para juguetería, automoción o calzados.

En las siguientes imágenes (figura 3.1) se muestran a la izquierda el pomito de espuma de poliuretano usado y a la derecha la espuma en estado seco.



Figura 3.1: Espuma de poliuretano.

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2) Realización de las mediciones

1) Nombre del objeto de ensayo: Espuma de poliuretano.

a) Datos estructurales:

Espesor total: 5 cm.

Superficie característica: Superficie porosa.

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.3 cm y espesor de 5 cm.

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares.

La estructura y porosidad de las cubiertas: Estructura conformada en su totalidad por la espuma de poliuretano, de carácter muy ligero y de bajo peso debido a que sus partículas se encuentran muy separadas y posee además aire en sus cavidades interiores, con una cubierta porosa al tacto y a la vista.

2) Datos del material:

Densidad aparente: Material muy ligero y poroso

Materiales de los componentes del objeto de prueba y sus composiciones: muestra conformada únicamente por espuma de poliuretano al 100%.



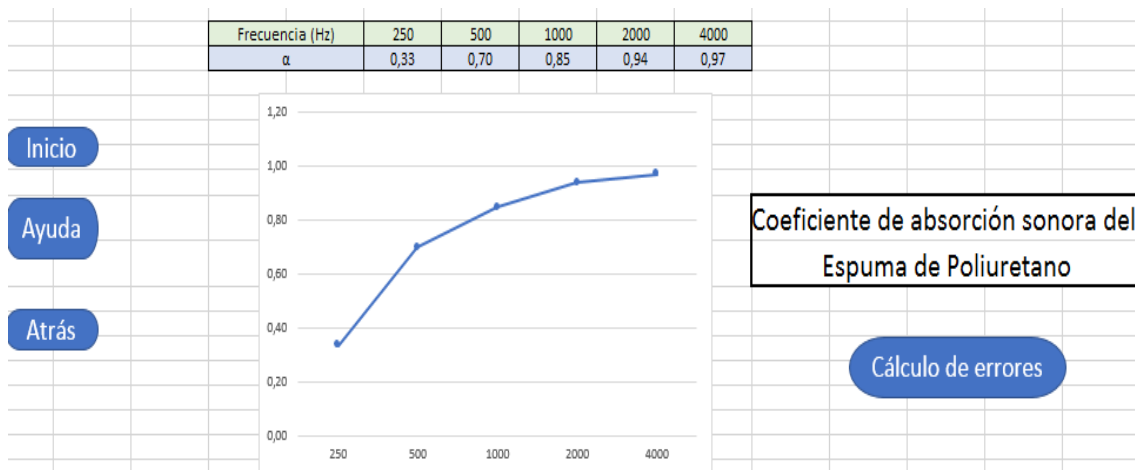


Figura 3.2: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de la espuma de poliuretano.

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3) Comparación de los resultados obtenidos con los datos de referencia

Los datos obtenidos a través de Cibiel (2016) refleja que los coeficientes de absorción con espesor de 5 cm de la espuma de poliuretano para las siguientes frecuencias son las que se muestran en la siguiente Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Coeficientes de absorción de referencia del poliuretano

Espuma de poliuretano para 5 cm de espesor					
Frecuencias (Hz)	250	500	1000	2000	4000
<b>A</b>	0,32	0,72	0,88	0,97	1

Fuente: tomado de (Cibiel, 2016)

La aplicación del experimento del cálculo de los coeficiente de absorción mediante el tubo de impedancias, según la metodología del capítulo II, reflejó los siguientes valores mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Coeficientes de absorción calculados del poliuretano.

Frecuencia (Hz)	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$	0,33	0,70	0,85	0,94	0,97

Fuente: elaboración propia

La determinación del coeficiente de absorción mediante el tubo de Kundt mostró valores muy similares a los que refleja la literatura, lo cual evidencia que los márgenes de error

con el instrumento que se construyó son mínimos, lo cual permite afirmar que el experimento se desarrolló bajo condiciones válidas.

### **3.2) Fabricación de las probetas**

Se seleccionó un total de 7 materiales a estudiar, a los cuales se le realizaron sus respectivas probetas con el fin de calcular los coeficientes de absorción de cada material.

#### **3.2.1) Paso 1: Selección y caracterización de los materiales a estudiar.**

##### Cartón

El cartón es un material formado por varias capas de papel superpuestas, a base de fibra virgen o de papel reciclado. El cartón es más grueso, duro y resistente que el papel. Para el estudio se seleccionó el cartón corrugado que generalmente, se compone de tres o cinco papeles; las dos capas exteriores son lisas y el interior o los interiores ondulados, lo que confiere a la estructura una gran resistencia mecánica.

##### Hormigón

El hormigón es un material compuesto, empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante (cemento) al que se añade partículas o fragmentos de un agregado (áridos), agua y aditivos específicos. Su principal característica es que resiste de manera notable los esfuerzos de compresión.

##### Madera de cedro

El cedro es una madera bastante frágil, lo cual provoca que su empleo en carpintería sea muy limitado. Sus propiedades de imputridez lo hacen idóneo en la construcción naval y la fabricación de ataúdes. Se usa en la construcción, sobre todo como recubrimiento de muros exteriores y para tejas de madera.

##### Piedra sieforé

Es una roca ígnea volcánica vítrea, con baja densidad (flota en el agua) y muy porosa, de color blanco o gris. Triturada se puede utilizar para la fabricación de morteros u hormigones de áridos ligeros, destinados a mejorar las condiciones térmicas y acústicas.

##### Bloque de canto

Piedra que contiene alto porcentaje de calcita y de materiales tríticos. Su mayor utilización es en la construcción. Se pueden encontrar en la construcción de muros y mamposterías. Si se calcina se puede producir cal viva y se puede llegar a utilizar como materia prima para la industria del cemento Portland.

## Pladur

El pladur es un material de construcción utilizado para la ejecución de tabiques interiores y revestimientos de techos y paredes. Suele utilizarse en forma de placas, paneles o tableros industrializados. Consiste en una placa de yeso laminado entre dos capas de cartón, por lo que sus componentes son generalmente yeso y celulosa, aprovechándose de la buena resistencia a la compresión del yeso con la buena resistencia a la flexión que le da el sándwich de cartón.

## Fieltro

El fieltro es un textil no tejido, en forma de lámina, cuya característica principal es que para fabricarlo no se teje, es decir, que no surge del cruce entre trama y urdimbre, como ocurre con las telas. A menudo, presenta un revestimiento<sup>1</sup> que le proporciona ciertas propiedades como impermeabilidad y resistencia al desgarro, entre otros. Aunque es grueso y de gran extensión nunca resulta pesado, además es resistente a los vientos, aislante del frío, aguanta bastante bien la acción de la lluvia y retarda el fuego.

### **3.2.2) Elaboración de probetas**

La elaboración de las probetas en este proyecto requiere que los materiales sean debidamente trabajados y en el caso del hormigón pase por un proceso de mezcla y conformación.

Para llevar a cabo este estudio se prepararon probetas cilíndricas, de diámetro igual a 43 mm y distintos espesores según los requerimientos de los diferentes ensayos realizados.

El diámetro de 43 mm es común para todas las probetas, pues el tubo de impedancia con el que se va a efectuar el estudio cuenta de un diámetro interno de 44 mm. Esta medida es la adecuada para garantizar que la muestra de ensayo pueda fijarse a la sección transversal del tubo, sin ocurrencia de fugas de sonido que puedan restar validez al ensayo, y a la vez lograr la holgura necesaria para poder desplazar la probeta por el tubo, condición imprescindible para la realización del experimento.

Inicialmente se contó con muestras de pladur, canto y piedra sieforé de unas dimensiones superiores en cuanto a diámetro y altura que las deseadas para el proyecto, por lo que se hizo necesario darles la forma requerida.

En la figura 3.3 se observan algunas probetas de los materiales seleccionados.



Figura 3.3: Probetas de algunos materiales seleccionados.

Fuente: elaboración propia.

Para ello se contó con diversas herramientas como segueta, cincel, compás, taladro, pie de rey, regla, lima y lija, algunas de las cuales se muestran en la figura 3.4.



Figura 3.4: Algunas herramientas empleadas en la fabricación de probetas.

Fuente: elaboración propia.

En los casos del cartón y la madera, se obtuvieron mediante un trabajo de carpintería.

En cuanto al hormigón se trató de un caso particular pues fue necesario la elaboración de moldes para su obtención, a partir de lo recomendado en la Normalización (2005)

Para ello se pesaron los componentes (cemento, arena, piedra, agua) para obtener las proporciones fijadas de cada uno de ellos en el producto final a elaborar. El molde se colocó en una superficie plana y fija y de fácil acceso como mesa de trabajo. El proceso de mezclado se realizó durante un tiempo suficiente para que todos los componentes se mezclen perfectamente, hasta alcanzar finalmente la mezcla idónea.

A continuación, se vertió la pasta en los moldes, de modo que se consiguiera una distribución uniforme, y se compactó la masa con ayuda de objetos de prensa de 3kg de peso, de forma que se obtuviera una muestra con la máxima compactación posible. Posteriormente se compactó con el mismo objeto por la cara opuesta del cilindro y se dejó secar sobre la arista.

El desmolde se mezcló 24 horas después, brindándole atención a que el producto no se endurezca, ya que esto puede traer dificultades al desmoldar.

Una vez logradas las dimensiones idóneas en las distintas probetas de ensayo, se procedió a darles un acondicionamiento final para la prueba. Por las características del experimento y de los equipos a utilizar, se hizo necesario perforar levemente las muestras con el fin de introducir a través de ellas una varilla metálica a la cual se sujeta el micrófono, con el propósito de que este tenga movilidad a lo largo del tubo de impedancias, requisito indispensable para poder realizar la investigación. Para la perforación de las probetas se contó con un taladro marca Parkside, el que se utilizó con barrenas de muy bajo espesor y a bajas revoluciones de velocidad del motor del taladro.

### **3.3) Informe de la medición. Análisis de resultados.**

A continuación, se recogen los principales resultados para cada material en el informe de la medición. Igualmente se plasman las condiciones inherentes que debe conllevar el proceso en aras de que exista una estandarización del mismo y también se ofrecen datos generales de interés para el experimento.

#### **Procedimiento normalizado**

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

Temperatura entre 26 a 29 grados centígrados.

Laboratorio con recubrimiento contra ruido.

No se realizaron pruebas cuando bajo condiciones de lluvia, ya que el ruido de fondo se incrementa demasiado.

Posición de la muestra lo más perpendicular posible a la dirección del tubo, para garantizar incidencia normal.

La muestra de material debe estar en condición de apriete dentro del tubo.

#### **Datos generales**

Nombre del laboratorio de pruebas: Laboratorio de Ergonomía de la Universidad de Matanzas.

Fechas de las pruebas: 6 - 10 de mayo del 2019

Montaje de las condiciones del objeto de prueba en el tubo: Las muestras se introdujeron manualmente con ayuda de una varilla metálica específicamente adaptada para este fin y siempre totalmente perpendiculares al parlante, los objetos de prueba fueron cubiertos en sus lados para evitar desprendimiento del material.

Dimensiones interiores del tubo de impedancia y su forma: Tubo de forma circular con un diámetro de 4.4 cm y 1.35 m de largo.

Material y el grosor de las paredes del tubo: Tubo cilíndrico de cristal con un grosor en las paredes de 4 mm.

Declaración de que las pruebas se realizaron de acuerdo con esta parte de ISO

10534: Estas pruebas se realizaron de acuerdo a la Norma ISO 10534 Parte 1:

Método de ondas estacionarias.

Tabla informativa de materiales: **Anexo 1**

Herramienta utilizada para la gestión de los cálculos: Documento Excel programado (Fig. 3.5) donde se obtienen los coeficientes de absorción sonora y los errores de medición mediante la introducción de los máximos (A + B) y los mínimos (A - B). Además, ofrece los resultados del cálculo de los errores de medición y gráficos que facilitan su comprensión.

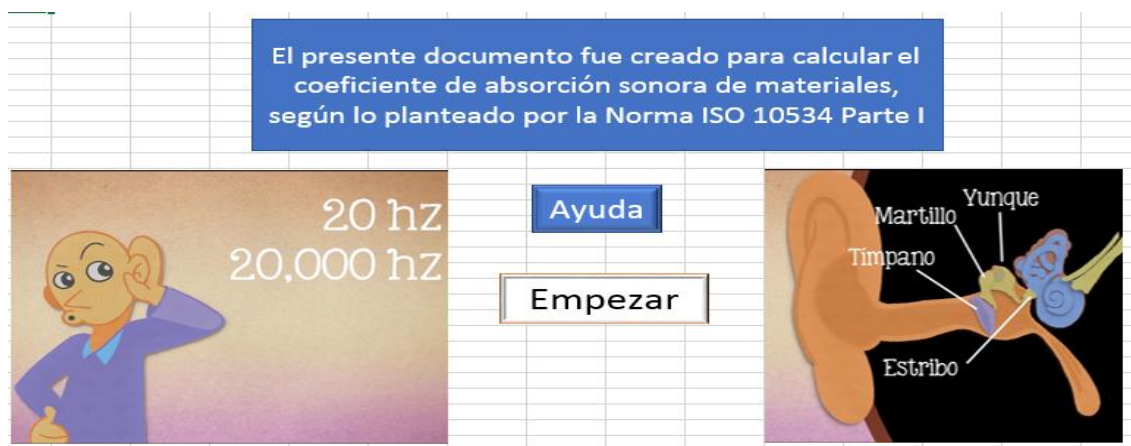


Figura 3.5: Excel programado para el cálculo del coeficiente de absorción sonora.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 3.6 se aprecia el proceso de medición de los máximos y mínimos de presión.



Figura 3.6: Proceso de medición de los máximos y mínimos de presión.

Fuente: elaboración propia.

### **Mediciones por materiales**

1) Nombre del objeto de ensayo: Pladur

a) Datos estructurales:

Espesor total: 1.2 cm

Superficie característica: Superficie rugosa

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.5 cm y 1.2 cm de espesor

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares

La estructura, el espesor y la porosidad de las cubiertas: Estructura conformada por la unión de 2 materiales para un total de una muestra, con cubiertas no porosas y con espesor de 1.2 cm.

b) Los datos del material:

Densidad aparente: Material rígido, no poroso.

Materiales de los componentes del objeto de prueba: Celulosa y yeso

c) Características de construcción:

Conexión de las capas entre sí: conexión de capas de celulosa a través de yeso, en forma de sándwich.

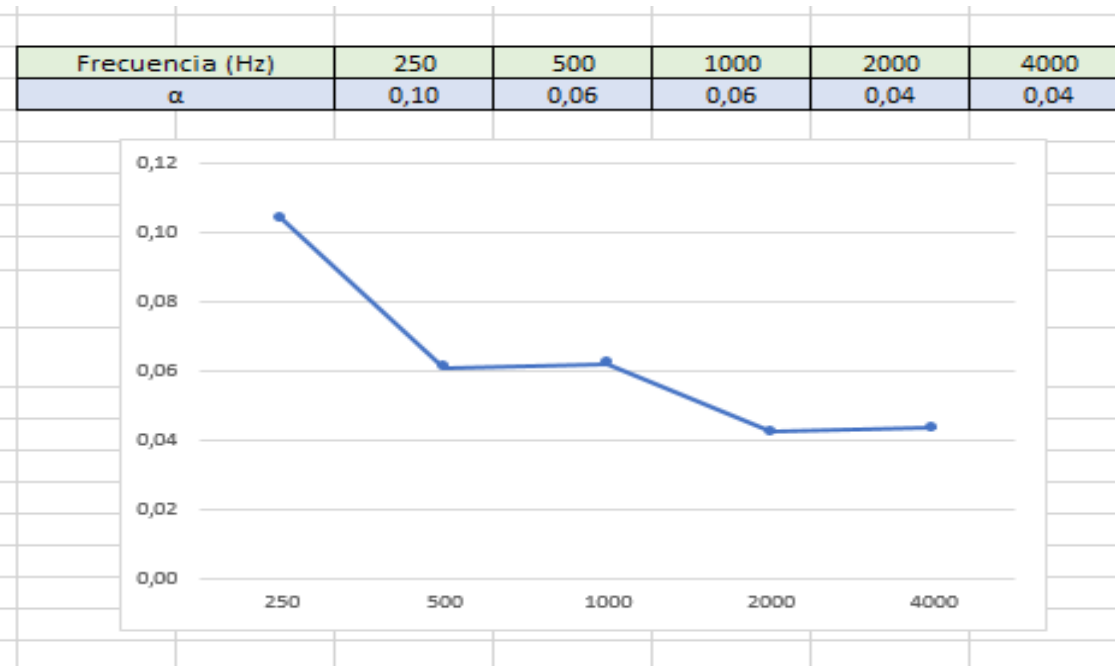


Figura 3.7: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia del pladur

Fuente: elaboración propia.

**NRC = 0,06**

Caracterización acústica:

Al presentar una alta rigidez y una porosidad prácticamente nula, la absorción del sonido es mínima. Alcanza el mayor valor de coeficiente de absorción a la frecuencia de 250 HZ con 0.10, y a partir de ahí sufre un descenso hasta llegar a los 0.04 en las frecuencias más agudas. En líneas generales no es un buen material absorbente pues no alcanza valores significativos en ninguna frecuencia de interés.

2) Nombre del objeto de ensayo: Cartón

a) Datos estructurales:

Espesor total: 0,4 cm

Superficie característica: Superficie rugosa

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.5 cm x 0,4 cm de espesor

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares

La estructura, el espesor y la porosidad de las cubiertas: Estructura conformada en su totalidad por cartón (celulosa) para un total de 2 muestras, todas las muestras con cubiertas poco porosas y con espesor de 0,4 cm.



b) Los datos del material:

Densidad aparente: Material dúctil y de baja porosidad.

Materiales de los componentes del objeto de prueba: Celulosa.

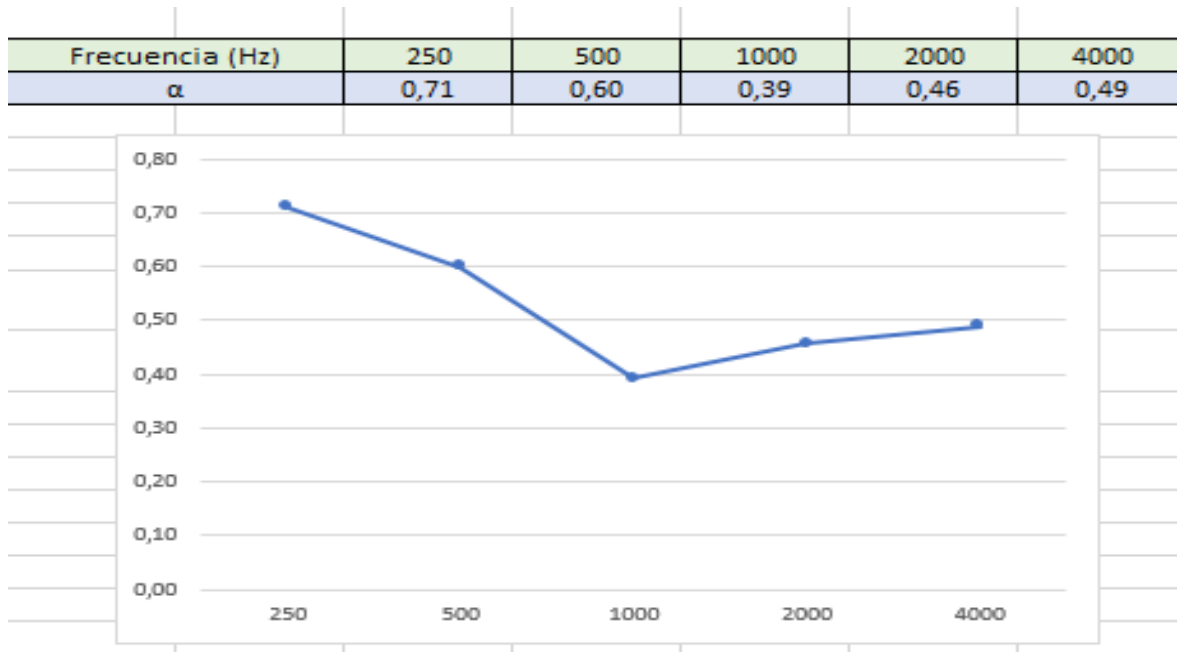


Figura 3.8: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia del cartón.

Fuente: elaboración propia.

**NRC= 0,53**

Caracterización acústica:

El material presenta un coeficiente de absorción sonora bastante bueno si se tiene en cuenta la baja porosidad que lo caracteriza y que influye en que no tenga una alta comunicación entre los poros que lo conforman. Los mayores valores los presenta en las frecuencias de 250 Hz y 500 Hz, con coeficientes de 0,71 y 0,60 respectivamente. Luego tiene una caída bastante significativa en la frecuencia de los 1000 HZ para después subir nuevamente en las frecuencias agudas, pero sin llegar a alcanzar valores altos. La gráfica arroja que este es un material a considerar para su utilización a bajas frecuencias por su carácter selectivo en cuanto a su capacidad de absorción.

3) Nombre del objeto de ensayo: Hormigón

a) Datos estructurales:

Espesor total:

Superficie característica: Superficie suave

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.5 cm y 1.2 cm de espesor

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares

La estructura, el espesor y la porosidad de las cubiertas: Estructura conformada por la unión de 3 materiales, con cubiertas no porosas y con espesor de 2 cm.

b) Los datos del material:

Densidad aparente: Material rígido, no poroso.

Materiales de los componentes del objeto de prueba: Cemento, arena, piedra

c) Características de construcción:

Conexión de las capas entre sí: conexión de distintos materiales a través de cemento, el cual actúa como aglomerante.

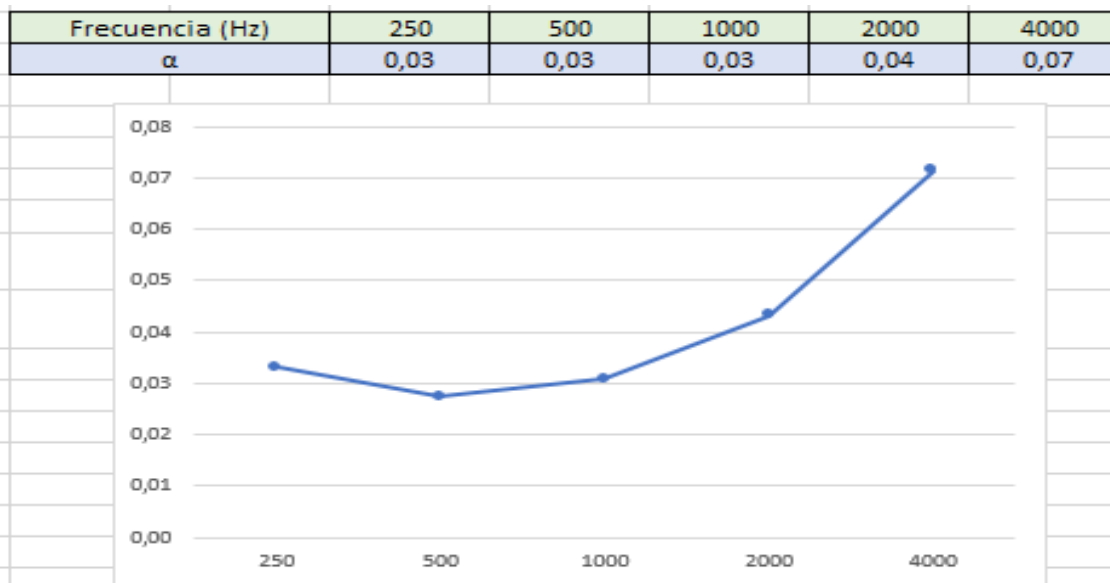


Figura 3.9: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia del hormigón.

Fuente: elaboración propia.

**NRC= 0,04**

Caracterización acústica:

Material muy rígido y por ende con una exigua porosidad, causante de una absorción sonora prácticamente inexistente. Sus valores experimentan un aumento paulatino que va desde un coeficiente de 0.03 a 250 Hz a 0.07 a una frecuencia de 4000 Hz, pero que en la práctica es irrelevante. Se observa que en las frecuencias bajas tiene un comportamiento aún más bajo, debido a que los materiales no porosos les resultan muy difícil la absorción a bajas frecuencias por tener grandes longitudes de onda ( $\lambda$ ).

4) Nombre del objeto de ensayo: Madera

a) Datos estructurales:

Espesor total: 1,2 cm

Superficie característica: Superficie suave

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.5 cm y espesor de 1.2 cm.

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares

b) Los datos del material:

Densidad aparente: Material rígido, no poroso.

Materiales de los componentes del objeto de prueba: Cedro

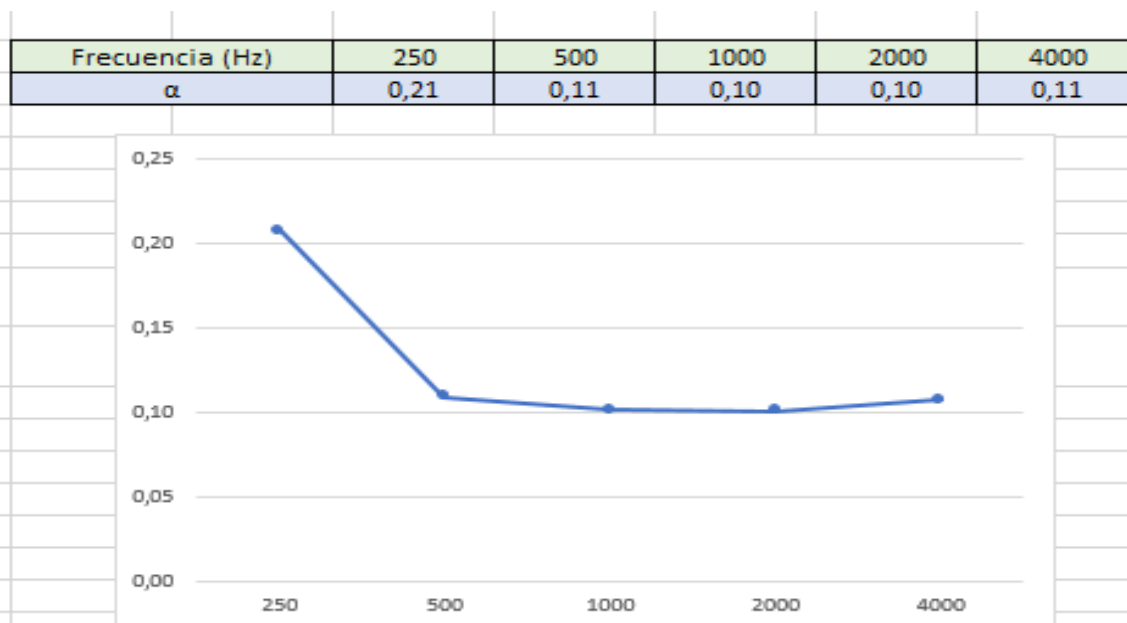


Figura 3.10: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de la madera

Fuente: elaboración propia.

**NRC= 0,12**

Caracterización acústica:

Material no poroso y por tanto no presenta porosidad intercomunicada, lo cual deriva en que su capacidad de absorción sonora sea mínima. Sus valores de coeficientes de absorción sonora se encuentran en un rango de 0,10 a 0,21. Tiene un carácter plano en cuanto a su selectividad ya que sus valores se presentan prácticamente constantes a lo largo de las frecuencias de interés, hecho que sería de importancia si sus valores fueran más altos y por ende más adecuados para ser tenidos en cuenta.

5) Nombre del objeto de ensayo: Piedra sieforé

a) Datos estructurales:

Espesor total: 1.2 cm

Superficie característica: Superficie porosa

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.5 cm y 1.2 cm de espesor

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares

b) Los datos del material:

Densidad aparente: Material ligero y poroso.

Materiales de los componentes del objeto de prueba: Piedra sieforé

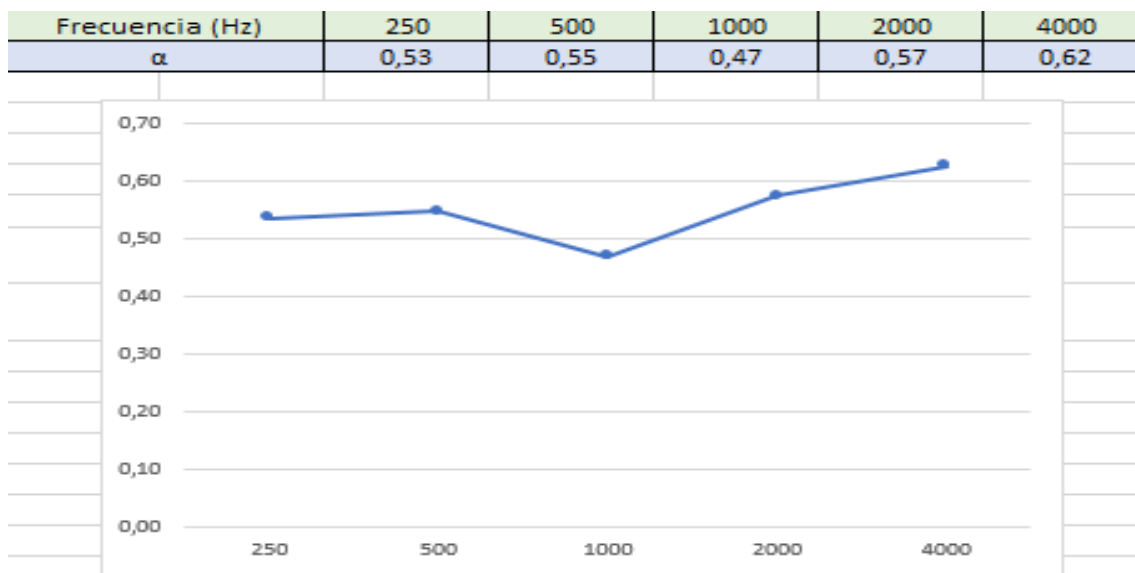


Figura 3.11: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de piedra sieforé.

Fuente: elaboración propia.

**NRC= 0,54**

Caracterización acústica:

Material ligero y poroso, que presenta una correcta intercomunicación entre sus poros. Presenta valores de absorción aceptables tanto en frecuencias bajas como agudas y tiene una pequeña caída a 1000 Hz. Su capacidad de absorción sonora aumenta en las frecuencias agudas, algo característico de los materiales porosos, pues ellos al tener menores longitudes de onda ( $\lambda$ ) absorben mejor los sonidos agudos porque ingresan con mayor facilidad a los poros. En general presenta un comportamiento acústico

bastante plano y su gráfica sugiere un empleo más eficaz en las frecuencias de 2000 Hz y 4000 Hz.

6) Nombre del objeto de ensayo: Bloque de canto

a) Datos estructurales:

Espesor total: 1.2 cm

Superficie característica: Superficie rugosa

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.5 cm y 1.2 cm de espesor

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares

b) Los datos del material:

Densidad aparente: Material rígido, no poroso.

Materiales de los componentes del objeto de prueba: Piedra de canto

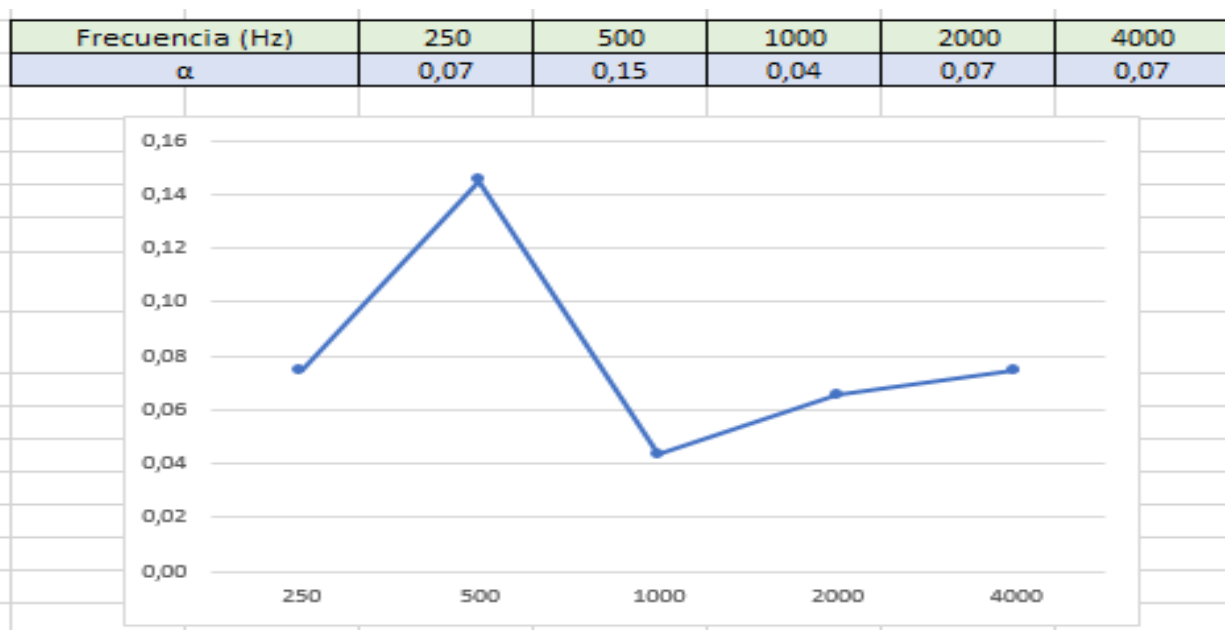


Figura 3.12: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia del bloque de canto.

Fuente: elaboración propia

**NRC= 0,08**

Caracterización acústica:

Material rígido, no poroso y por ende de coeficientes de absorción sonora muy bajos.

Presenta su mayor valor en la frecuencia de los 500 Hz y su menor valor en la frecuencia

de los 1000 HZ, lo que evidencia su inestabilidad acústica al tener máximos y mínimos en frecuencias consecutivas. Si bien todos los valores son muy bajos, al presentar un cierto nivel de rugosidad se obtienen unos coeficientes de absorción ligeramente por encima de lo que se podría esperar. Esto es debido a que su superficie se hace mayor y, por tanto, la capa de aire adyacente donde se produce la disipación de energía acústica en energía calorífica también lo es. Sin embargo, en líneas generales es un mal material absorbente.

7) Nombre del objeto de ensayo: Fieltro

a) Datos estructurales:

Espesor total: 0.4 cm

Superficie característica: Superficie rugosa

Dimensiones de las unidades estructurales: Diámetro de 4.5 cm y 0.4 cm de espesor

Posiciones de los cortes de la muestra en relación con las líneas características de los objetos de prueba con estructuras laterales: Perpendiculares

b) Los datos del material:

Densidad aparente: Ligero, no poroso.

Materiales de los componentes del objeto de prueba: Lana de fieltro

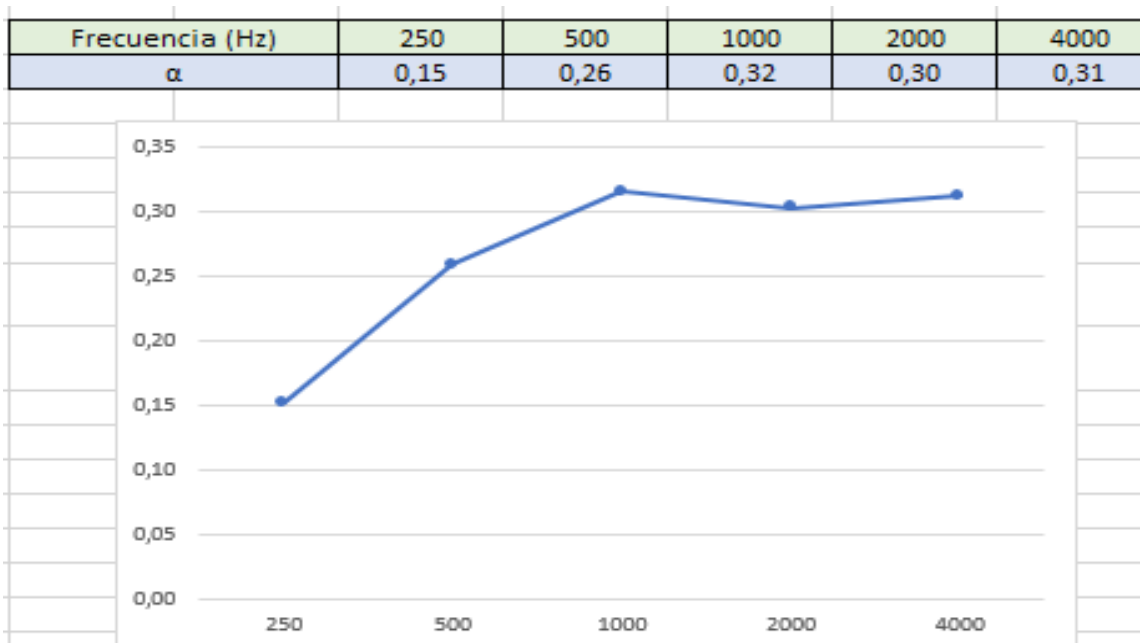


Figura 3.13: Coeficiente de absorción del fieltro en función de la frecuencia.

Fuente: elaboración propia.

**NRC= 0,26**

Caracterización acústica:

El material presentó un coeficiente de absorción sonora por encima de las expectativas si se tiene en cuenta la baja porosidad que lo caracteriza y que influye en que no tenga una alta comunicación entre los poros que lo conforman. Los mayores valores los presentó en las frecuencias de 1000 Hz y 400 Hz, con coeficientes de 0,32 y 0,31 respectivamente. A bajas frecuencias se obtuvieron valores pequeños de absorción acústica, al alcanzarse solamente 0,15 en la frecuencia de 250 Hz.

### 3.4) Obtención y análisis de los errores de medición.

A continuación, se muestran los errores que se presentaron en el estudio. De forma general se observa que, a pesar de existir dispersión en los datos, esta dispersión es ínfima, lo que corrobora la confiabilidad y la validez del estudio, ya que la confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto produce iguales resultados, en este caso el instrumento fue el osciloscopio, al cual se le tomaron diferentes lecturas en intervalos de tiempo para una misma señal patrón.

En la figura 3.14 se presenta una salida del Excel programado con los errores de medición calculados por frecuencias en cada material estudiado, mientras que en las figuras 3.15 y 3.16 se presentan dichos resultados en forma de gráfico de barras y poligonal.

Errores de medición									Error
Frecuencia	Materiales	Madera	Hormigón	Cartón	Pladur	Canto	Fieltro	Sieforé	
	250	0,01	0,11	0,06	0	0,01	0,03	0,05	0,04
	500	0,01	0,07	0,05	0	0,02	0,03	0,09	0,04
	1000	0,01	0,02	0,02	0,01	0	0,05	0,02	0,02
	2000	0	0,05	0,03	0	0	0,05	0,06	0,03
	4000	0	0,03	0,01	0	0,01	0,05	0,02	0,02

Figura 3.14: Errores de medición por frecuencias para cada material.

Fuente: elaboración propia.

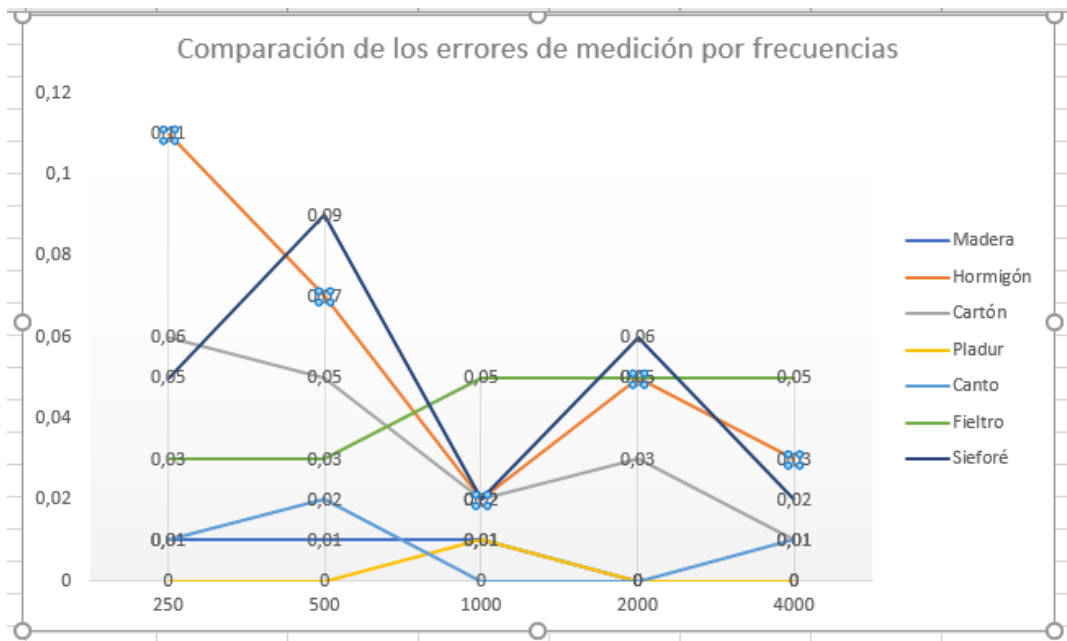


Figura 3.15: Representación gráfica de los errores calculados.

Fuente: elaboración propia.

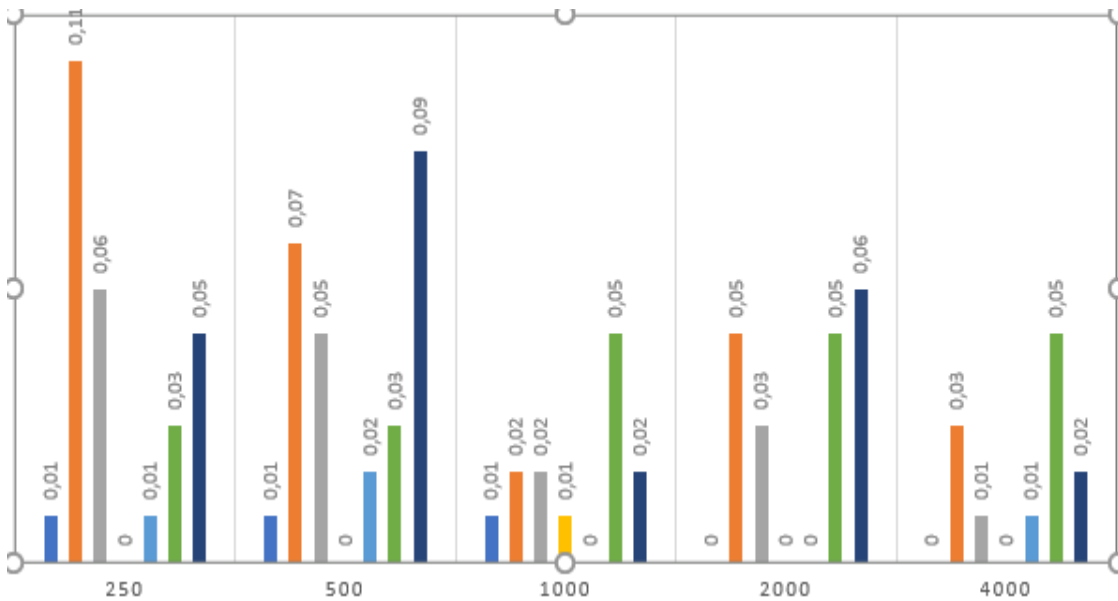


Figura 3.16: Representación gráfica de los errores de medición calculados.

Fuente: elaboración propia.

A partir de la observación de los datos obtenidos, se puede apreciar que los errores de medición por materiales para cada frecuencia fueron mínimos. El mayor error se presentó para las frecuencias de 250 Hz y 500 Hz con un valor de 0,04, mientras el menor valor lo tuvieron las frecuencias para 1000 Hz y 4000 Hz con 0,02.



Más específicamente, el mayor error se produjo en la medición del coeficiente de absorción del hormigón a la frecuencia de 250 Hz, con un valor de 0,11.

Las frecuencias de mayor dispersión son las bajas, esto tiene su origen en que el método de medición del coeficiente de absorción mediante el tubo de Kundt es utilizado especialmente para medir materiales absorbentes de tipo poroso, ya que, para otro tipo de materiales absorbentes, como los que se estudian en este experimento, las muestras pequeñas no son tan representativas para el comportamiento de la absorción en las muestras grandes.

Para una mayor comprensión del proceso de cálculo de errores se muestran los análisis de medidas de dispersión en el **Anexo 2**.

### **Conclusiones parciales del Capítulo III:**

- La fase de validación realizada con el material espuma de poliuretano permitió determinar la efectividad del equipo empleado
- Se aplicó la metodología propuesta a probetas de hormigón, madera, cartón, pladur, piedra sieforé, bloque de canto y fieltro; materiales utilizados en las construcciones y recintos acústicos en Cuba.
- Se determinaron los coeficientes de absorción acústica de los materiales para las frecuencias de 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, donde la piedra sieforé mostró el mayor NRC y el hormigón el menor.
- Los resultados estuvieron en concordancia con lo esperado en materiales no porosos, ya que los valores obtenidos fueron muy bajos en general.
- El análisis de los errores de medición mostró baja dispersión de los datos con respecto a la media central, lo cual demuestra validez en los experimentos realizados.

## **Conclusiones generales**

- 1- Se construyó el marco teórico-referencial de la investigación, que contempló un análisis de las características que influyen en el coeficiente de absorción y uno de los antecedentes en la creación de materiales absorbentes acústicos, los modelos matemáticos y métodos para el cálculo del coeficiente de absorción.
- 2- Se propuso una metodología para calcular el coeficiente de absorción sonora de materiales, la cual se basa en las indicaciones recogidas en la norma ISO 10534 parte I: Método de ondas estacionarias.
- 3- Los materiales seleccionados para el estudio fueron hormigón, cartón, madera, pladur, fieltro, bloque de canto y piedra sieforé.
- 4- Se determinaron los coeficientes de absorción acústica de los materiales para las frecuencias de 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.
- 5- Entre los materiales seleccionados para el estudio, la piedra sieforé mostró el mayor NRC y el hormigón el menor, con valores de 0,54 y 0,04 respectivamente.
- 6- El análisis de los errores de medición mostró baja dispersión de los datos con respecto a la media central, lo cual demuestra validez en los experimentos realizados.

## **Recomendaciones**

1. Extender el estudio a otros materiales que no fueron contemplados en la investigación con el fin de completar una base de datos nacional que recoja los coeficientes de absorción de los materiales existentes en Cuba.
2. Presentar los resultados del estudio al MICONS a fin de que puedan ser tomado como bases para futuros trabajos e investigaciones.
3. Diseñar prácticas de laboratorio donde se emplee la metodología propuesta sobre la base del equipamiento existente y los resultados del presente estudio como referencia para la formación de profesionales.
4. Trabajar en la obtención de equipamiento industrial más preciso que permita aumentar la validez de los resultados.

## Referencias bibliográficas

1. Almeda Barrios, Yoel, «Evaluación y propuestas de control del ruido en la UEB Estación de rebombeo Versailles», [Tesis en opción al título], Matanzas, Universidad de Matanzas, Facultad de Ciencias Económicas e Informática, 2015.
2. Almeda Barrios, Yoel, «Contribución al control de ruido y su valoración socioeconómica en instalaciones hoteleras.», [Maestría en Administración de Empresas], Universidad de Matanzas Facultad de Ciencias Empresariales 2018.
3. Amable, Isabel; Méndez, Jesús ; Delgado, Lenia ; Acebo, Fernando; de Armas, Joanna y Rivero, Marta Lidia *Contaminación ambiental por ruido Revista Médica Electrónica* Matanzas 2017 vol.39.[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_serial&pid=1684-1824&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_serial&pid=1684-1824&lng=es&nrm=iso)
4. Attenborough, K., *Acoustical characteristics of porous materials*, 3, 1982, 179-227.
5. Barron, Randall F., *Industrial Noise Control and Acoustics* [en línea], Louisiana Tech University, Ruston, Louisiana, U.S.A., Marcel Dekker, Inc., 2003 [consulta: 3 de febrero 2018]. Disponible en: <<http://www.dekker.com>>
6. Barros, M Möser and J.L., *Ingeniería acústica: Teoría y aplicaciones*, 2da Edición, New York, USA, 2009.
7. Berglund, Birgitta; Lindvall, Thomas y Schwela, Dietrich H, «Guías para el ruido urbano» *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, OPS/CEPIS*, 1999, 18-22,
8. Biot, M. A., *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I. Low frequency range*, 28, 1956, 168-178.
9. Caballero Núñez, Antonio ; Díaz Marrero, Miguel Ángel y Trujillo García, Teresa Alejandra. *Evaluación del ambiente sonoro en la actividad de un astillero. RCI Revista Cubana de Ingeniería*, 2016. Vol. VII: pp. 64 - 70
10. Cabrera Ortiz, Juan Gabriel *Acústica y fundamentos del sonido (E-Learning)*, 1, Bogota, Colombia, 2010.
11. Carlos G. García Garino, Aníbal E. Mirasso, Mario A. Storti, Miguel E. Tornello, *Mecánica Computacional*, XXXII, Mendoza, Argentina, 2013, 2901-2908.
12. Castañeda, Jaime Andrés; González, Héctor Álvaro. *Medición del coeficiente de absorción del sonido. Scientia et Technica*, UTP, 2004. 25: 101-106

13. Castillo, Joaquín; Costa, Alejandro, *Características Físicas de Materiales Absorbentes Sonoros Porosos*, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, 2012.
14. CERVELLE. B., LEVY. C.. HENRY. N. F. M.. SHADLUN. T., *Developpements recents dans la mesure au microscope des reflectances spectrales des mineraux opaques.*, France, 1978, 234-244.
15. Coeficientes de absorción acústica en función de la frecuencia para distintos materiales. 2016, [fecha de consulta: Disponible en: [www.cibel.cl](http://www.cibel.cl)]
16. Cortés Polanco, Claudio, *Introducción al sonido y a la acústica*, 1, 2010, 978-956-332-776-2.
17. Cristian D. Carrizo, Jose S. Melian y Guillermo O. Stettler., *Absorción Sonora*, Córdoba, Argentina, 2011.
18. Degrandi Oliveira, Carlos Rogerio; Nogueira Arena; Gilberto Walter., «Exposición ocupacional a la contaminación sonora en Anestesiología» *Revista Brasileira de Anestesiología*,, 2012, 2, 62, 257-261, 1806-907X.
19. Del Río Merino, Mercedes, « Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio y otros aditivos.», [Tesis de Doctorado], Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura., 1999.
20. Delany, M. E; Bazley, V., *Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials*, 3, 1970, 105-116.
21. Domínguez Alejo, Manuel, «Elaboración del mapa de ruido de la termoeléctrica Antonio Guiteras con la utilización del software Smaart 7», [Tesis de grado], Matanzas, Universidad de Matanzas, Departamento de Ingeniería industrial, 2014.
22. Electrónica, Departamento de. *Fenómenos Acústicos: Reverberación*. Buenos Aires, Argentina, 2008. p.
23. European Environment Agency, *Noise in Europe* Copenhagen, Denmark, ,, 2014 -, publ. -[consulta: 6 de febrero 2018]. Disponible en: <<http://forum.eionet.europa.eu/nrc-noise/library/noise-report-2014>>.
24. Fahy, Frank, *Foundations of engineering acoustics*, Oxford, England, 2001.

25. Faulkner, L. , *Handbook of Industrial Noise Control*, New York, United States of America, 1976, 506-555.
26. Feliú González, Yunet, «Método de diseño de pantallas acústicas para el control del ruido. Aplicación en el área de pailería 1 de la Empresa Industrial Ferroviaria "José Valdés Reyes"», [Tesis de pregrado], Matanzas, Universidad de Matanzas, Departamento Industrial, 2018.
27. Fernández, Eloísa Arcilla, «CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN MATERIAL DE USO ALTERNATIVO A PARTIR DE LA RESISTENCIA AL FLUJO Y EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN PARA EVALUAR SU POSIBLE APLICACIÓN EN SOLUCIONES ACÚSTICAS.», Medellín, clombia, UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SECCIONAL MEDELLÍN, Facultad de Ingenierías, 2015.
28. Fernández González, Eduardo, «Estudio de la reverberación en las aulas y zonas comunes de la ETSAV», [Trabajo de Fin de Grado], Valladolid, España, Universidad de Valladolid, Departamento de Instalaciones Arquitectónicas, 2016.
29. García-Vallés, M; Avila, G; Martínez, S; Terradas, R; Nogués, J.M., *Acoustic barriers obtained from industrial wastes*, 72, 2008.
30. García, A. *Environmental Urban Noise (Advances in Ecological Sciences)*. Southampton, WIT Press, 2001.
31. García Dihigo, Joaquín, *Ruido, vibraciones y presiones anormales*, Universidad de Matanzas, 2016.
32. García Dihigo, Joaquín y Real Perez, Grether, *El hombre y su ambiente laboral*, Matanzas, Cuba, Universidad de Matanzas, 2005, ISBN: 1488:2008
33. García Rodríguez, A, *La contaminación acústica. Fuentes, evaluación, efectos y control*, 2006.
34. Giménez de Paz, Juan C, *Ruidos y Vibraciones. Control y Efectos. Enfoque técnico, médico y jurídico*, Parte Tercera, Buenos Aires, Argentina, 1998, 950-9792-21-7, 232.
35. H., PILLER., *Microscope Photometry*, Springer Verlag, Berlin, Germany, 1977.
36. Hansen, Colin H, *Fundamentals of acoustics» Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control*, 2001, 23-52.
37. Infante Salamanca, Jonathan; Proaño Navas, Edgar Darío, «Diseño y construcción de un panel absorbente con materiales de residuo sólido», [Tesis de grado],

- Bogotá, Colombia, Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería, 2012.
38. J. A. González Ganso, C. García Serrada, M. A. Morcillo López, M<sup>a</sup> J. Hernández Echegaray, *PROPIEDADES ACÚSTICAS INTRÍNECAS DE LOS ASFALTOS POROSOS: POROSIDAD, TORTUOSIDAD Y RESISTIVIDAD AL FLUJO ESTÁTICO DE AIRE. DISEÑO ÓPTIMO DE UN ASFALTO*, Madrid, 2008.
  39. Juliá, E., «Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica», [doctorado], Valencia, España, Universidad Politécnica de Valencia, Mecánica de los medios continuos y teoría de estructuras, 2008.
  40. Kuttruff, Heinrich, *Room Acoustics*, Fifth Edition, Spon Press, 2009, ISBN: 0-203-87637-7.
  41. López, Antonio Pérez, *Absorción y aislamiento acústico*, Zaragoza, España, 1989, 378.
  42. Marín, Beatriz E. , Benavidez, Alberto , Delvasto, Silvio , Mejía de Gutiérrez Ruby , Chavarro, Santiago, «ESTUDIO DE MATERIALES ABSORBENTES DEL SONIDO EN CAJAS ACUSTICAS» *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 2009, 3, 1135-1142,
  43. Miyara, Federico, *Control de Ruido* [en línea], 1999 [consulta: 2 de febrero 2018]. Disponible en: <<http://docplayer.es/10588694-Federico-miyara-control-de-ruido.html>>
  44. Miyara, Federico, «Acústica Arquitectónica», *Acústica y Sistemas de Sonido*, Cuarta Edición, Rosario, Argentina, UNR Editora (Universidad Nacional de Rosario), 2006, Capítulo 4, ISBN: 978-950-673-557-9.
  45. Materiales acústicos. Roger Nichols, 2006, [fecha de consulta: Disponible en:
  46. Moya Pon, Frank; Ledesma, René, *Normas ambientales para la protección contra ruidos*, Santo Domingo, República Dominicana, 2003.
  47. Náf Cortés, Robert «Análisis y gestión del ruido industrial», *Santander, España* [en línea], 2014, [consulta: 5 de febrero 2018], Disponible en: <<http://www.icasst.es/archivos/documentos contenidos/3653 2.SANTANDER.pdf>>

48. Navacerrada, M<sup>a</sup> Ángeles; Díaz, César; Pedrero, Antonio; García, Luis E., *ABSORCIÓN ACÚSTICA A INCIDENCIA NORMAL DE ESPUMAS DE ALUMINIO*, Madrid, 2006.
49. Oficina Nacional de normalización, *NC 412:2005 Guía para la preparación, mezclado, transporte y vertido del hormigón*, 412:2005, Primera, Cuba, 2005.
50. Parejo Gamboa, Marta, «Absorbentes acústicos a partir de residuos agrícolas», Sevilla, Universidad de Sevilla, 2013.
51. Parma, Leonardo, *Manual Práctico de Control de Ruido* [en línea], Santiago, Chile, Sistemas Acústicos Modulares SAM Ltda, 2015 [consulta: 3 de febrero 2018]. Disponible en: <<http://www.ingenieroambiental.com/4002/Manual%20Practico%20del%20Control%20de%20Ruido.pdf>>
52. Peiró Torresa, M.P; Redondob, J.; Bravoc, J.M. y Sánchez Pérez, J.V, «Open noise barriers based on sonic crystals. Advances in noise control in transport infrastructures», *ScienceDirect* [en línea], 2016, [consulta: 5 de febrero 2018], Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516308067>>
53. Real Pérez, Grether; García Dihigo, Joaquín, *El Hombre y su ambiente laboral*, Matanzas, Cuba, 2005, 1488:2008.
54. Rodríguez González, et.al, *Seguridad y salud en el trabajo*, , La Habana, Cuba, 2007.
55. Rodríguez Montejano, Rosa María, «Propiedades Acústicas del Caucho Granular», [Tesis de Doctorado], Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, 2003.
56. Salazar, G.M Montoya and J.C, «Caracterización Acústica de materiales de construcción en la industria Colombiana», Medellín, Colombia, Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingenierías, 2013.
57. Sánchez Fernández, Luis, *Evaluación de ruido*, Culhuacan, México DF, 2008.
58. Secretaría de Salud Laboral, *Cuadernillo Informativo de PRL: Ruido y Vibraciones* [en línea], 2012 [consulta: 27 de enero 2019]. Disponible en: <<https://books.google.com.cu/books?id=kv6LoAEACAAJ>>
59. Secretaría de Salud Laboral y Medio Ambiente de CC.OO. de Asturias, Departamento de Salud Laboral de CC.OO. de Asturias, *El ruido: del riesgo silencioso al daño sonoro.* , Asturias, España 2007.



60. Seddeq, H.S. , Aly, N.M. , Marwa A, A. , Elshakankery, M. H., *Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials.*, 43, Cairo, Egipto, 2013, 56-73.
61. Sierra Calderón, Darío David; Bedoya Marrugo, Elías Alberto, «Prevalencia de hipoacusia neurosensorial inducida por ruido en empresas del sector madera de la ciudad de Cartagena 2015», *Revista Nova*, Colombia, 13, 25, 47-56,
62. Trevor J. C., Dantonio P., *Acoustic absorbers*, 2004.
63. Vendrell Saz, Mario; López Soler, Ángel *Condiciones críticas en las mediciones cuantitativas de reflectancia. Errores sistemáticos.*, Barcelona, España, Acta Geológica Hispana, 1979, 71-74.
64. Verdejo, Alvaro. *Elaboración de antecedentes relativos a la emisión de ruidos generados por actividades de construcción*, 2001. Contrato N° 21-21-001/01
65. Viña Brito, Silvio y Marsán Castellanos, Juan, *Seguridad y salud en el trabajo*, La Habana, Ed. Félix Varela, 2007.
66. Virginis, Jose Antonio, «La prevención contra el ruido en el ambiente de trabajo», [Tesis de Maestría en Derecho del Trabajo y Relaciones Laborales Internacionales], Buenos Aires, Argentina, Universidad Nacional de Tres de Febrero, 2015.
67. Werner, Antonio F. , *Afecciones Auditivas de Origen Ocupacional. De la Prevención a la rehabilitación. Dos y Una.* , Buenos Aires 2006, 1.
68. Zwicker, C; Kosten, C. W., *Sound Absorbing Materials*, Amsterdam, 1949.

## Anexos

### Anexo 1: Tabla informativa por materiales

Por medio de las siguientes tablas se podrá comparar la absorción de sonido de 8 materiales: hormigón, bloque de canto, fieltro, piedra sieforé, pladur, cartón, madera y espuma de poliuretano. Las tablas muestran los resultados de las 8 mediciones realizadas por frecuencia a cada material, las cuales permitieron obtener los valores de máximo (A + B) y mínimo (A- B) de presión, magnitudes estas a partir de las cuales se logró calcular el coeficiente de absorción acústica de los materiales estudiados.

Inicio	Nombre del material		Fieltro			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	9,60	15,73	16,80	17,16	16,98
	A-B	0,40	1,21	2,10	1,56	1,83
2	A+B	13,44	15,96	17,16	17,04	15,35
	A-B	0,56	1,14	1,32	2,13	1,40
3	A+B	15,20	19,38	19,35	15,96	17,10
	A-B	0,95	1,02	2,15	0,84	1,73
4	A+B	16,20	18,00	12,30	12,33	17,40
	A-B	0,54	1,80	1,23	1,37	1,45
5	A+B	8,25	14,70	16,80	17,36	17,66
	A-B	0,25	0,98	1,05	1,24	1,50
6	A+B	18,00	13,65	16,38	18,70	17,54
	A-B	0,75	1,05	1,82	1,87	1,85
7	A+B	19,60	18,48	17,40	17,40	12,32
	A-B	0,98	1,32	1,45	1,45	1,30
8	A+B	16,10	18,48	13,53	17,16	17,00
	A-B	0,46	1,54	1,23	1,56	1,15

Inicio	Nombre del material		Piedra Sieforé			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	3,10	2,80	5,60	3,00	5,20
	A-B	0,60	0,40	0,80	0,70	1,20
2	A+B	3,30	2,60	6,00	3,50	7,00
	A-B	0,70	0,80	0,90	0,60	1,80
3	A+B	3,20	2,80	5,40	2,90	5,10
	A-B	0,70	0,40	1,00	0,80	1,10
4	A+B	4,20	2,80	6,00	3,50	7,00
	A-B	0,60	0,60	0,90	0,60	1,80
5	A+B	3,20	2,70	5,80	3,25	6,10
	A-B	0,65	0,60	0,85	0,65	1,50
6	A+B	2,95	2,80	5,70	3,20	6,05
	A-B	0,65	0,50	0,95	0,70	1,45
7	A+B	4,90	2,80	5,50	2,95	5,15
	A-B	0,70	0,40	0,90	0,75	1,15
8	A+B	3,15	2,70	6,00	3,50	7,00
	A-B	0,60	0,70	0,90	0,60	1,80

Inicio	Nombre del material		Pladur			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	8,51	12,80	16,00	7,76	12,61
	A-B	0,23	0,20	0,25	0,08	0,13
2	A+B	17,50	13,02	8,40	7,20	8,80
	A-B	0,50	0,21	0,12	0,06	0,10
3	A+B	16,65	7,68	13,80	18,00	12,60
	A-B	0,45	0,12	0,23	0,20	0,15
4	A+B	15,20	14,95	9,72	11,28	17,85
	A-B	0,40	0,23	0,18	0,12	0,21
5	A+B	8,84	9,15	13,11	11,48	12,00
	A-B	0,26	0,15	0,19	0,14	0,12
6	A+B	14,04	11,88	16,79	12,00	12,61
	A-B	0,36	0,18	0,23	0,12	0,13
7	A+B	13,30	10,40	14,88	9,60	17,20
	A-B	0,35	0,16	0,24	0,12	0,20
8	A+B	9,45	8,68	7,95	15,48	10,20
	A-B	0,27	0,14	0,15	0,18	0,12

Inicio	Nombre del material		Canto			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	17,60	19,60	11,64	14,72	12,65
	A-B	0,32	0,70	0,12	0,23	0,23
2	A+B	17,00	15,66	18,48	18,60	17,98
	A-B	0,34	0,64	0,21	0,31	0,31
3	A+B	13,80	16,53	19,32	7,20	8,93
	A-B	0,23	0,87	0,23	0,12	0,19
4	A+B	15,84	15,80	12,75	12,18	18,36
	A-B	0,33	0,79	0,15	0,21	0,34
5	A+B	8,55	16,50	18,00	17,60	15,75
	A-B	0,19	0,50	0,18	0,28	0,35
6	A+B	5,94	19,60	9,70	19,61	18,72
	A-B	0,11	0,56	0,10	0,37	0,39
7	A+B	15,98	15,66	19,78	17,28	9,60
	A-B	0,34	0,64	0,23	0,34	0,16
8	A+B	19,14	19,60	14,45	11,73	12,00
	A-B	0,33	0,70	0,17	0,17	0,24

Inicio	Nombre del material		Cartón			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	1,80	6,00	5,70	3,80	3,60
	A-B	0,80	1,80	0,80	0,47	0,60
2	A+B	2,20	7,00	5,50	2,70	1,20
	A-B	0,60	1,20	0,70	0,40	0,20
3	A+B	2,40	5,00	5,80	2,80	1,20
	A-B	0,60	1,00	0,60	0,50	0,18
4	A+B	2,20	5,00	5,60	2,60	1,10
	A-B	0,60	1,20	0,70	0,42	0,20
5	A+B	2,00	6,50	5,60	3,25	2,40
	A-B	0,70	1,50	0,75	0,43	0,40
6	A+B	2,30	5,00	5,70	2,70	1,15
	A-B	0,60	1,10	0,65	0,46	0,19
7	A+B	2,10	5,50	5,75	3,30	2,40
	A-B	0,70	1,40	0,70	0,48	0,39
8	A+B	2,20	6,00	5,55	2,65	1,15
	A-B	0,60	1,20	0,70	0,41	0,20

Inicio		Nombre del material	Espuma de Poliuretano			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	2,70	4,25	3,00	3,25	3,90
	A-B	0,25	1,30	1,35	1,90	2,35
2	A+B	3,10	4,50	3,20	3,20	3,75
	A-B	0,30	1,25	1,30	1,80	2,40
3	A+B	3,00	4,00	3,90	3,95	3,20
	A-B	0,35	0,90	1,45	1,90	2,25
4	A+B	2,50	4,80	2,80	4,10	3,05
	A-B	0,20	1,20	1,25	2,20	2,45
5	A+B	2,75	4,25	3,50	3,50	3,50
	A-B	0,25	1,25	1,65	2,40	2,30
6	A+B	2,90	4,50	4,10	3,10	3,70
	A-B	0,30	1,30	1,80	2,00	3,00
7	A+B	3,80	3,60	3,70	3,25	3,75
	A-B	0,35	1,25	1,70	2,20	2,65
8	A+B	2,40	3,80	3,40	2,90	3,00
	A-B	0,35	1,40	1,60	2,00	2,20

Inicio		Nombre del material	Hormigón			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	2,70	13,20	14,56	6,72	17,18
	A-B	0,45	1,20	1,12	0,96	1,55
2	A+B	3,20	8,10	19,80	9,76	19,88
	A-B	0,80	0,80	1,98	1,22	1,61
3	A+B	2,25	7,52	14,56	5,88	17,99
	A-B	0,25	0,94	1,12	0,98	1,19
4	A+B	4,35	18,45	15,30	6,78	17,96
	A-B	0,87	1,23	1,02	1,13	1,61
5	A+B	10,23	16,92	14,76	8,91	14,93
	A-B	0,93	1,41	1,23	0,99	1,07
6	A+B	4,50	8,61	18,00	11,20	17,18
	A-B	0,45	1,23	1,50	1,12	1,55
7	A+B	3,56	6,65	15,30	10,15	14,56
	A-B	0,89	0,95	1,02	1,45	1,12
8	A+B	5,70	17,60	16,12	6,00	17,99
	A-B	0,95	1,10	1,24	0,75	1,19

Inicio		Nombre del material	Madera			
	Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
1	A+B	14,28	7,00	9,25	2,96	8,13
	A-B	0,84	0,20	0,25	0,08	0,23
2	A+B	7,50	3,42	4,56	2,45	3,51
	A-B	0,50	0,09	0,12	0,07	0,10
3	A+B	11,56	3,84	8,74	2,45	5,60
	A-B	0,68	0,12	0,23	0,07	0,15
4	A+B	7,60	7,59	5,94	3,42	6,77
	A-B	0,40	0,23	0,18	0,09	0,21
5	A+B	4,42	5,21	7,98	3,36	4,29
	A-B	0,26	0,15	0,19	0,08	0,12
6	A+B	6,48	5,72	9,25	3,36	4,54
	A-B	0,36	0,18	0,23	0,08	0,13
7	A+B	5,60	5,92	9,00	3,04	7,46
	A-B	0,35	0,16	0,24	0,08	0,20
8	A+B	5,40	5,32	5,25	2,96	4,11
	A-B	0,27	0,14	0,15	0,08	0,12

**Anexo 2: Análisis de medidas de dispersión para los coeficientes de absorción sonoras de los diferentes materiales.**

**Filtro**

<b>Cálculo de errores estadísticos</b>					
<b>Medidas de dispersión</b>					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,0374	0,0404	0,0573	0,0639	0,0399
Varianza	0,0012	0,0014	0,0029	0,0036	0,0014
Desviación típica	0,0132	0,0143	0,0203	0,0226	0,0141

**Hormigón**

<b>Cálculo de errores estadísticos</b>					
<b>Medidas de dispersión</b>					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,1332	0,0853	0,0309	0,0575	0,0306
Varianza	0,0155	0,0064	0,0008	0,0029	0,0008
Desviación típica	0,0471	0,0302	0,0109	0,0203	0,0108

### Madera

Cálculo de errores estadísticos					
Medidas de dispersión					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,0168	0,0075	0,0073	0,0066	0,0048
Varianza	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desviación típica	0,0060	0,0026	0,0026	0,0023	0,0017

### Piedra sieforé

Cálculo de errores estadísticos					
Medidas de dispersión					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,0630	0,1081	0,0299	0,0704	0,0262
Varianza	0,0035	0,0102	0,0008	0,0043	0,0006
Desviación típica	0,0223	0,0382	0,0106	0,0249	0,0093

### Pladur

Cálculo de errores estadísticos					
Medidas de dispersión					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,0048	0,0017	0,0072	0,0051	0,0030
Varianza	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desviación típica	0,0017	0,0006	0,0025	0,0018	0,0011

### Bloque de canto

Cálculo de errores estadísticos					
Medidas de dispersión					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,0074	0,0293	0,0030	0,0063	0,0074
Varianza	0,0000	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000
Desviación típica	0,0026	0,0104	0,0011	0,0022	0,0026

## Cartón

Cálculo de errores estadísticos					
Medidas de dispersión					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,07	0,06	0,03	0,04	0,02
Varianza	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desviación típica	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01

## Espuma de poliuretano

Cálculo de errores estadísticos					
Medidas de dispersión					
Frecuencia	250	500	1000	2000	4000
Desviación Estándar	0,0528	0,0611	0,0277	0,0321	0,0176
Varianza	0,0024	0,0033	0,0007	0,0009	0,0003
Desviación típica	0,0187	0,0216	0,0098	0,0113	0,0062