



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Caracterización de las propiedades de absorción acústica de la fibra de la guadua**

**Darío Alfonso Páez Soto**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Artes  
Maestría en Construcción  
Bogotá, Colombia  
2016



# **Caracterización de las propiedades de absorción acústica de la fibra de la guadua**

**Darío Alfonso Páez Soto**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Construcción**

Director :  
Msc. Jorge Lozano

Línea de Investigación:  
Materiales Constructivos  
Grupo de Investigación:  
Madera y Guadua

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Artes  
Maestría en Construcción  
Bogotá, Colombia  
2016



*A mi Esposa y a mis Padres por todo y por tanto.....*



## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia por permitirme conocer y aprender mas sobre los procesos de construcción y su interacción con la acústica; así como a la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá por su apoyo incondicional con tiempo y recursos que permitieron llevar a buen termino este proceso de crecimiento personal y profesional.

## Resumen

La guadua angustifolia kunth es un elemento de construcción que se encuentra en la mayor parte de las regiones de Colombia y con ella se ha elaborado no solamente estructuras, sino elementos de acabado como pisos. Estos procesos dejan guadua de residuo que puede ser aprovechada para otros procesos como lo es la obtención de fibra con múltiples propósitos, en este caso para la caracterización y futuro uso en aplicaciones acústicas a partir de hallar su coeficiente de absorción acústico.

El objetivo general de esta investigación, fue el de caracterizar las propiedades de absorción acústica de la fibra de la guadua angustifolia kunth, proceso a través del cual mediante el método del tubo de impedancia se midió esta propiedad del material través 12 muestras de 4" de diámetro y 1" de espesor.

El resultado obtenido evidencia que la fibra de guadua es eficiente para absorber la energía acústica incidente a partir de 500 Hz, por otra parte se observó que el número de muestras y dimensiones se deben variar para ampliar el margen de aplicación.

### **Palabras clave:**

Coefficiente de absorción, Construcción sostenible, Fibra, Guadua angustifolia kunth, Acústica,



## Abstract

Guadua angustifolia Kunth is a building element that is found in most of the regions of Colombia and it has developed not only structures but finishing elements as floors. These processes leave guadua of residue that can be exploited for other processes such as the production of fiber multi-purpose, in this case for the characterization and future use in acoustic applications from finding its sound absorption coefficient.

The overall objective of this research was to characterize the properties of sound absorption fiber guadua angustifolia kunth, a process through which by the method of impedance tube this property through material was measured 12 samples of 4 " diameter and 1 "thick.

The result shows that the bamboo fiber is efficient to absorb the acoustic energy incident from 500 Hz, on the other hand it was observed that the number of samples and dimensions should be varied to expand the scope of application.

**Keywords:** Absorption coefficient, sustainable construction, Fiber, Guadua angustifolia Kunth, Acoustics.



## Contenido

<b>1</b>	<b>Estado del arte</b> .....	<b>5</b>
1.1	Fibras de coco.....	5
1.2	Fibras de kenaf.....	6
1.3	Fibras de arengas pinnata.....	7
1.4	Fibras de carrizo.....	8
1.5	Fibra de posidonia.....	9
1.6	Fibras de hojas de té.....	11
1.7	Fibras de Bambú.....	12
<b>2</b>	<b>Marco Teórico</b> .....	<b>14</b>
2.1	Clasificación de los Materiales.....	14
2.2	Características acústicas de los materiales.....	15
2.2.1	Impedancia.....	15
2.2.2	Admitancia.....	16
2.2.3	Coefficiente de Reflexión.....	16
2.2.4	Coefficiente de Absorción.....	16
2.3	La absorción del sonido a través de materiales porosos.....	17
2.4	El Bambú Guadua Angustifolia.....	18
2.4.1	El rizoma.....	18
2.4.2	El culmo.....	19
2.4.3	Propiedades químicas.....	20
2.5	Fibra de Vidrio.....	20
<b>3</b>	<b>Metodología de la investigación</b> .....	<b>23</b>
3.1	Descripción del Método de obtención de los valores de absorción.....	23
3.2	Descripción del sistema de medición.....	24
3.3	Pruebas preliminares.....	26
3.4	Calibración del sistema de medición.....	27
3.4.1	Amplitud de la señal.....	27
3.4.2	Corrección por desfases de los micrófonos.....	27
3.4.3	Repetición de la medición con micrófonos intercambiados.....	27
3.4.4	Factor de calibración.....	29
3.4.5	Determinación del Coeficiente de reflexión.....	30
3.4.6	Determinación del coeficiente de absorción del sonido.....	30
<b>4</b>	<b>Ensayos realizados</b> .....	<b>31</b>
4.1	Obtención de la fibra de la guadua.....	31
4.2	% Contenido de Humedad (CH).....	32
4.3	Densidad.....	34
4.4	Proceso de separación y extracción de la fibra.....	35
4.5	Proceso de medición.....	38
4.5.1	Características de sistema de medición.....	38

---

4.5.2	Adquisición de las señales de calibración.....	39
4.5.3	Medición de las muestras .....	41
4.5.4	Obtención del coeficiente de absorción .....	43
<b>5</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>51</b>
5.1	Promedio del coeficiente de absorción. ....	51
5.2	Comparación con otras fibras .....	55
5.3	Análisis estadístico de las muestras .....	58
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>61</b>
6.1	Conclusiones .....	61
6.2	Recomendaciones .....	62
<b>7</b>	<b>Anexo A: Código de programación en Matlab para la obtención del coeficiente de absorción. ....</b>	<b>63</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA. ....</b>	<b>65</b>

## Lista de Figuras.

Figura 1: Materiales usados en la construcción con el propósito de atenuar la energía sonora incidente.....	1
Figura 2: Muestras de prueba de fibra de coco, [6].....	6
Figura 3: Tubo de impedancias .....	6
Figura 4: Fibras naturales de Kenaf .[7] .....	7
Figura 5: Arenga Pinnata .....	7
Figura 6: Coeficiente de absorción de la Arenga Pinnata de 40mm [8] .....	8
Figura 7: Caña de carrizo .....	9
Figura 8: Coeficiente de Absorción de los paneles de carrizo. [9] .....	9
Figura 9: Posidonia .....	10
Figura 10: Posidonia en las orillas de las playas. ....	10
Figura 11: Coeficiente de absorción de la fibra de posidonia.[10] .....	11
Figura 12: Hojas de té .....	11
Figura 13: Coeficiente de absorción de la fibra del té [11] .....	12
Figura 14: Bambú .....	13
Figura 15: Coeficiente de absorción de la lana de bambú.[13] .....	13
<b>Figura 16:</b> Tipos de materiales porosos. [16] .....	17
Figura 17: A la izquierda rizoma mopoidal y a la derecha rizoma sympoidal. [12] .....	18
Figura 18: Sección de un culmo de guadua. [12].....	19
Figura 19: Sección de un culmo de bambú guadua [13].....	20
Figura 20: Esquema general del tubo de impedancia.....	24
	28
<b>Figura 21:</b> Configuración I micrófono 1 en canal A, micrófono 2 en canal B .....	28
	28
<b>Figura 22:</b> Configuración I micrófono 1 en canal B, micrófono 2 en canal A .....	
Figura 23: Guadua de desecho implementada para obtener la fibra bajo prueba .....	31
Figura 24: Guadua de desecho implementada para obtener la fibra bajo prueba .....	32
Figura 25: Muestras en solución de hidróxido de sodio .....	35
<b>Figura 26:</b> Cepillado manual de las muestras. ....	35
Figura 27: Probeta de comparación .....	37
Figura 28: Probetas finalizadas .....	37
Figura 29: Configuración del sistema de medición según normativa .....	38
Figura 30: Grafica de la función de transferencia configuración 1 y 2 .....	40
Figura 31: Ubicación de las muestras en el porta-muestras. ....	40
Figura 32: Grafica de la función de corrección.....	41
Figura 33: Montaje de la muestra en el tubo de medición. ....	41
Figura 34: Función de transferencia de la muestra #1 sin corrección.....	42
Figura 35: Función de transferencia de la muestra corregida .....	42

Figura 36:Coeficiente de absorción muestra 1 a 6.....	43
<b>Figura 37:</b> Coeficiente de absorción muestra 7 a 12.....	44
Figura 38: Coeficiente de absorción de las muestras de la 1 a la 6 con espesor individual de 2"con cámara de aire de 2".....	44
Figura 39: Coeficiente de absorción de las muestras de la 7 a la 12 con espesor individual de 2"con cámara de aire de 2".....	45
Figura 40: Coeficiente de absorción de muestras de 2".....	45
Figura 41: Coeficiente de absorción muestras de 2"con cámara de aire.....	46
Figura 42: Coeficiente de absorción muestras de 3".....	47
Figura 43: Coeficiente de absorción muestras de 3"con cámara de aire.....	47
Figura 44: Coeficiente de absorción de muestras de 4".....	48
Figura 45: Coeficiente de absorción muestras de 3"con cámara de aire.....	49
Figura 46: Promedio del coeficiente de absorción de las 12 muestras.....	51
Figura 47: Promedio coeficiente de absorción muestras 2"mas cámara de aire de 2".	52
Figura 48: Comparación del coeficiente de absorción de la fibra de 1"sin cámara de aire y con cámara de aire.....	52
Figura 49: Comparación de distintos espesores de fibra de guadua sin cámara de aire	53
Figura 50:Comparación de la fibra de guadua con diferentes espesores mas cámara de aire de 2".....	54
Figura 51:Comparación de los distintos espesores de la fibra de guadua con y sin cámara de aire con dos materiales comercialmente usados para la absorción del sonido.....	55
Figura 52:Comparación de coeficientes de absorción de diferentes fibras.....	56
Figura 53: Comparación del coeficiente de absorción de la fibra de vidrio de 1"con la fibra de guadua de 1" sin cámara de aire.....	57
Figura 54:Filamentos de la fibra de vidrio.....	57
Figura 55:Filamentos de la fibra de guadua.....	58
Figura 56:Dispersión de las muestras.....	59

## Lista de Tablas

Tabla 1:Características físicas principales de los materiales para construcción .....	14
Tabla 2:Comparación del porcentaje de compuestos químicos de la guadua y la madera suave.[12].....	20
Tabla 3:Coeficiente de absorción de panel de fibra de vidrio (Acustifibra) .....	21
Tabla 4:Características físicas de las muestras .....	33
Tabla 5:% de Contenido de humedad.....	33
Tabla 6:Peso en estado anhidro y volumen en estado verde de las muestras.....	34
Tabla 7:Densidad de cada muestra. ....	34
Tabla 8:Comparación del peso de la muestra y el peso de la fibra obtenida.....	36
Tabla 9:Comparación del coeficiente de absorción de la fibra de vidrio de 25mm de espesor con la fibra de guadua de 25 mm de espesor .....	58





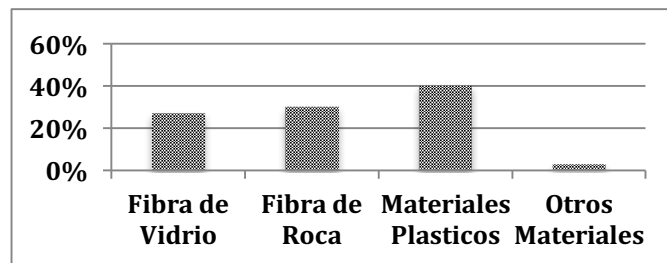
## Introducción.

El uso de materiales con fines acústicos hoy en día es una práctica común para distintas aplicaciones en la construcción. Una de estas aplicaciones relaciona la capacidad de atenuar la energía acústica incidente en un material, este fenómeno de disipación de la energía que se produce por pérdida de calor o a través del movimiento es una característica que puede ser medida y cuantificada para cualquier tipo de material, y ser relacionado con un valor porcentual de pérdida de energía llamado coeficiente de absorción ( $\alpha$ ).

El objetivo de esta investigación consiste en hallar el valor porcentual de la pérdida de la energía acústica incidente sobre la fibra del Bambú Guadua Angustifolia Kunth.

En la actualidad los materiales más usados con el propósito de atenuar la energía acústica están compuesto a base de fibras sintéticas donde las fibras a base de vidrio ocupan un 27%, las fibras a base de rocas ocupan un 30%, los derivados plásticos un 40% y otros materiales un 3% como se ve en la Figura 1.[1]

**Figura 1:** Materiales usados en la construcción con el propósito de atenuar la energía sonora incidente.



El uso de estos materiales lleva consigo un cuidado específico, ya que si los mismos no son tratados de manera correcta pueden llegar a afectar la salud. Esto se ve reflejado en la afección a las vías respiratorias si estas fibras son aspiradas, y la irritación de la piel al contacto directo con la misma.

En los últimos tiempos el cuidado de la salud y las iniciativas por el uso de materiales que permitan el cuidado del medio ambiente han despertado en la comunidad científica la necesidad de la búsqueda de nuevos materiales a bases de fibras naturales que cumplan y satisfagan las necesidades que suplen los materiales sintéticos.

La sostenibilidad como concepto desarrollado y tomado de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo que habla sobre *“aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”* [2] es nuestra base enfoque en el uso de materiales naturales que suplan los materiales sintéticos en lo relacionado con la absorción acústica y el confort acústico que este tipo de materiales brindan en su correcta aplicación.

La implementación y el uso de materiales reutilizables y renovables, que implementen eficientemente el agua, el suelo y que en su proceso reduzca la implementación de químicos que agreguen desechos tóxicos al medio ambiente en los distintos procesos de la construcción ha llevado a la investigación y desarrollo de nuevos materiales, a la implementación de materiales de origen natural y en muchos casos en el re uso de materiales que en algún momento fueron considerados materiales de desecho desde el punto de vista de la construcción o industrial.

El uso de estos materiales se basa específicamente en su capacidad de funcionar en un gran porcentaje como funcionan materiales comúnmente usados para propósitos específicos como lo es la fibra de vidrio o lana de roca desde el punto de vista de la absorción de la energía acústica.

Desde el punto de vista de la construcción sostenible se ha implementado la madera y el bambú guadua como materiales que cumplen en gran parte con el concepto de sostenibilidad, aunque parte de los mismos en el proceso constructivo generan desechos, estos desechos pueden ser reutilizados, transformándolos en elementos o materiales que cumplan funciones distintas a la función u objeto que lo llevo a ser material de desecho.

La transformación y reutilización de materiales de desecho en la construcción como en el caso de esta investigación se basa en el análisis de las propiedades acústicas de la fibra del bambú guadua como reutilización he implementación de material absorbente y aislante de la energía acústica incidente sobre el mismo del bambú guadua de desecho. Para evaluar la eficiencia de la misma en necesario caracterizar las propiedades o características de absorción y aislamiento acústico de las fibras de guadua y así responder la pregunta. ¿Cuales son las propiedades o características de absorción y aislamiento de la energía acústica incidente en la fibra de la guadua para su posible implementación en la construcción?

Otros factores importantes que invitan a el desarrollo de esta investigación, se basa en hechos como el calentamiento global debido al aumento de CO<sub>2</sub> y el deterioro ambiental de la tierra, debido al consumo de recursos naturales renovables y no renovables procesados usados como materiales para la industria de la construcción la cual se consume el 40 % de la energía total producida y el 16 % de agua que se consume en un año, a llevado [3] en los últimos años a desarrollo de estrategias, políticas y recomendaciones en el uso eficiente de los recursos aplicando y desarrollando nuevas tecnologías en los materiales de construcción así como la reutilización y reciclaje de los mismos.

Estas nuevas estrategias llevadas al campo de la investigación han propuesto el estudio del comportamiento y el uso en sus distintas formas de los distintos recursos naturales, es así en los últimos años se ha profundizado en la investigación del usos de las fibras de origen vegetal obtenidas de materiales de desecho tales como las fibras de coco, fibras de té, fibras de poseidonia, y para nuestro caso la caracterización de las fibras del bambú guadua comparándolas con el uso de las fibras de origen mineral como la fibra de vidrio o lana de roca implementadas hoy en día para tratamientos térmicos y acústicos.



# 1 Estado del arte

El uso de las fibras naturales aparecen como una tendencia mundial en el sector de la construcción y el uso de "*Materiales verdes*" como concepto del uso de materiales amigables con el ambiente, y que puedan ser considerados de uso sostenible, en los últimos tiempos han tomado posiciones importantes dentro del campo de innovación y desarrollo y en la parte gubernamental.[4]

Es claro verlo desde perspectivas como la del gobierno Italiano que ha creado recomendaciones y regulaciones para la implementación y uso de materiales ecológicos en la construcción.

El uso de nuevos materiales y su aplicación en distintos campos de la construcción incluyen la acústica un punto fuerte para el desarrollo he implementación de los mismos, es por esto que en los últimos años se han venido desarrollando investigaciones para el uso eficiente de las fibras naturales de coco, kenaf, arenga pinata (palma), carrizo, posidonia, tea-leaf y bambú, desde el punto de vista de la absorción de la energía sonora dando como resultado valores de coeficientes de absorción que salen de estos estudio.

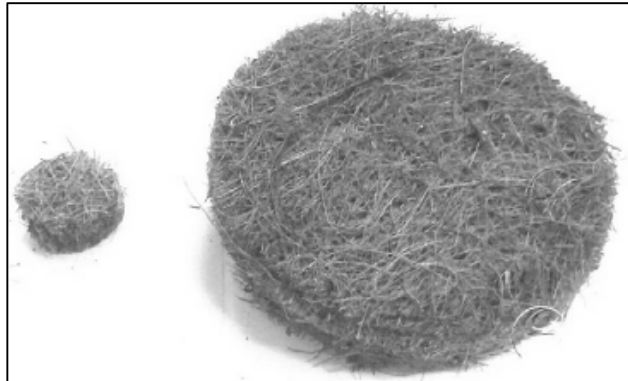
## 1.1 Fibras de coco.

La fibra natural de coco proviene del fruto de una clase específica de palma "*coco nucifera*, la fibra en estudio proviene de la capa externa del fruto que es separada del mismo de manera manual o mecánica una vez el fruto ha madurado, la fibra en este estado tiene un color café[5].

Este tipo de fibra es abundante en países productores de este fruto del continentes de Asia, África y América, y ha sido considerado como producto de desecho; pero debido a las iniciativas por el uso de recursos naturales y sostenibles, industrias como la automotriz ha venido utilizando las mismas como material de relleno en la tapicería, y en la industria de la construcción como fibras de refuerzo en las placas de cemento.

Las fibras de coco poseen características porosas y fibrosas con lo cual podrían cumplir con las características de materiales sintéticos usados en la industria, el proceso científico para la caracterización de las mismas de basa en la prueba de medición de una serie de quince de muestras a través de un tubo en cual permite evaluar la impedancia del material bajo prueba el tipo de muestra evaluado se puede ver en la Figura 2.[6]

**Figura 2:**Muestras de prueba de fibra de coco, [6]



**Figura 3:**Tubo de impedancias



Fuente: [www.mecanum.com](http://www.mecanum.com)

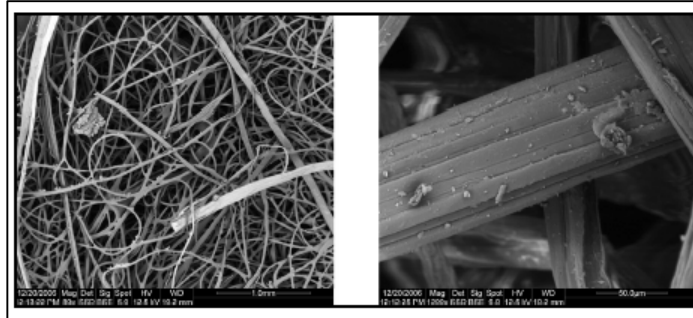
Como resultado del mismo se observó que el coeficiente de absorción media es de 0,8 y además a través de los análisis posteriores se evidenció, que las fibras de coco no son buen material absorbente para baja frecuencia y como fuente para ser industrializada en fibra natural tendrá que ser tratada para que cumpla con parámetros como los relacionados con coeficientes retardantes al fuego, anti-hongo y otro.

## 1.2 Fibras de kenaf.

La fibra de Kenaf como se muestra en la Figura 4 también llamada cáñamo de la india de la familia *cannabinus Hibiscus*, tiene características porosas y fibrosas entonces tendría que de alguna manera esperar obtener a través de ensayos de laboratorio resultados cercanos a los de fibras de vidrio y de roca.[7]

Para el estudio del caso se analizaron en laboratorio 15 muestras con diferentes espesores, densidades y resistencias al flujo del aire.

**Figura 4:**Fibras naturales de Kenaf .[7]



La prueba de laboratorio se realizo a través de la medición en un tubo de impedancias y resultado de esta prueba concluye que este material se acerca en valores de coeficientes de absorción y el valor de la resistencia al flujo del aire similares a los materiales usados actualmente por la industria que son a base de fibra de vidrio y lana de roca.

### 1.3 Fibras de arengas pinnata.

La Arenga Pinnata como se muestra en la Figura 5 es una palma que crece en el sureste asiático cerca de las riveras de los ríos su uso se relaciona principalmente con la producción de alimentos y sus fibras usadas para la elaboración de cuerdas y amarres.

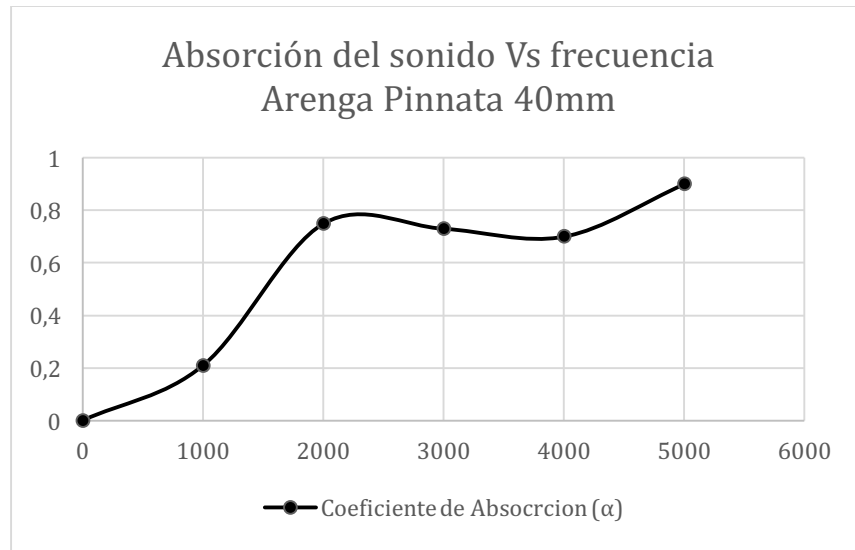
**Figura 5:**Arenga Pinnata



Fuente: [http://www.prota4u.info/protav8.asp?g=psk&p=Arenga+pinnata+\(Wurmb\)+Merr.](http://www.prota4u.info/protav8.asp?g=psk&p=Arenga+pinnata+(Wurmb)+Merr.)

De acuerdo a las características como prueba de laboratorio usaron cuatro muestras de la fibra de la Arenga Pinnata con diferentes espesores y para su caracterización se uso el método del tubo del impedancia donde encontraron que como la estructura de las fibras son porosas los coeficientes de absorción varían dependiendo de la frecuencia, entonces entre la frecuencia de análisis es mas alta la absorción al sonido será mejor.[8] Los valores obtenidos en el ensayo de este materia se observa en la Figura 6.

**Figura 6:** Coeficiente de absorción de la Arenga Pinnata de 40mm [8]



## 1.4 Fibras de carrizo.

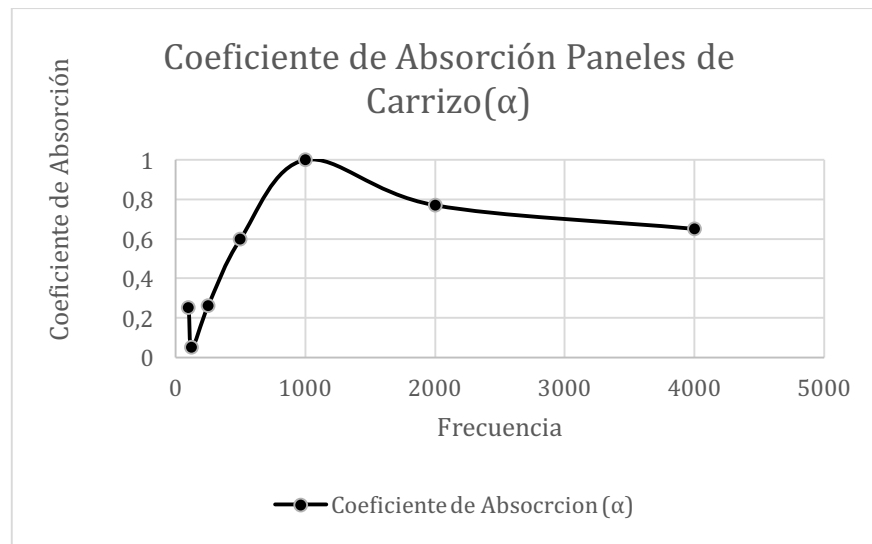
La caña de carrizo llamado científicamente *phragmites australis*, como se muestra en la Figura 7, es una planta de la familia de las gramíneas o poáceas, muy usada como refuerzo en la elaboración de divisiones interiores, y en conjunto con otros materiales como las estructuras de encofrado y además como base para yeso; es un material que al ser triturado puede ser empleado en paneles granulares con aglutinante.



**Figura 7:**Caña de carrizo

Fuente: <http://haixeder.blogspot.com/2013/06/plantas-silvestres-de-zierbena-xxxiii.html>

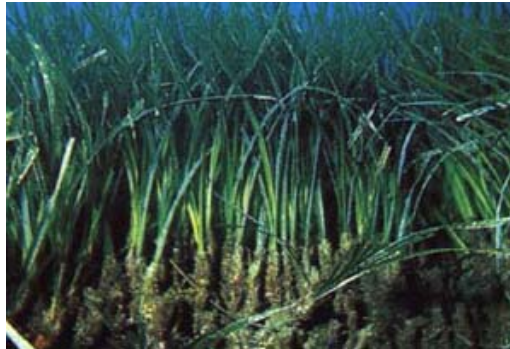
Según las investigaciones al hacer una medición acústica siguiendo la norma ISO 140-3 a un panel elaborado con este material en distintas configuraciones se evidencia que la absorción acústica es eficiente a media y alta frecuencia, además que dependiendo de la configuración del montaje de los paneles este coeficiente absorción puede extenderse también a frecuencia baja y que como el la mayoría de materiales porosos el coeficiente de absorción a partir de 1 KHz no varía con el espesor del material.[9]  
Los valores obtenidos para el ensayo de este material se observa en la Figura 8.

**Figura 8:** Coeficiente de Absorción de los paneles de carrizo. [9]

## 1.5 Fibra de posidonia

Los materiales de origen natural no solo provienen de la superficie seca de la tierra si no que analizando todo lo que produce nuestro planeta también es posible usar materiales que provienen del mar como lo es la Posidonia, Figura 9. que es una planta que crece en el fondo marino, y pertenece a la familia de las fanerógamas, formando grandes extensiones.

**Figura 9:** Posidonia



Fuente: <http://marenostrum.org/vidamarina/vegetalia/fanerogamas/posidonia/>.

Debido al ciclo de vida de esta planta las condiciones del cambio climático, la pesca y tránsito de embarcaciones esta planta pierde sus hojas y estas van a parar a la orilla de las playas y rocas cercanas.

Este material que llega a la orilla de las playas como se observa en la Figura 10, se ha analizado desde su comportamiento acústico, a través del método del tubo de onda estacionaria y el método de la función de transferencia.[10]

**Figura 10:** Posidonia en las orillas de las playas.

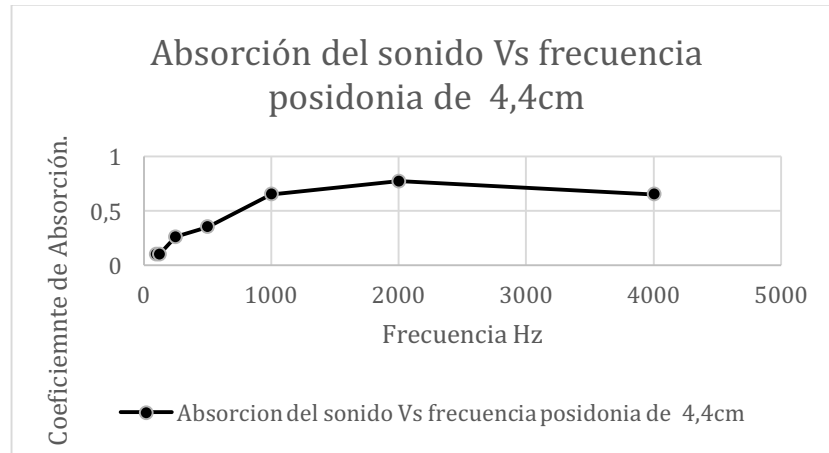


Fuente: <https://www.flickr.com/photos/ezu/70925711/>

Las fibras de posidonia son porosas y fibrosas, el experimento que realizaron los investigadores conto con el uso de tres muestras de diferentes espesores 2.7cm, 3.3cm, y 4.4cm respectivamente las cuales fueron evaluadas por el método de tubo de Kunt, los resultados como era de esperarse de acuerdo al comportamiento de materiales fibrosos y porosos es que el espesor de la muestra determina el coeficiente de absorción. Así entonces entre este sea mayor así también será el coeficiente de absorción para todo el rango de frecuencias a evaluar.

Los valores obtenidos para el ensayo de este material se observa en la Figura 11.

**Figura 11:** Coeficiente de absorción de la fibra de posidonia.[10]



## 1.6 Fibras de hojas de té

Las fibras de las hojas del té son otro material que se ha caracterizado a través de los métodos científicos mencionados anteriormente, las hojas del te provienen de una planta llamada Camellia Sinensis, y su principal uso ha sido para el consumo humano a través de la infusión de sus hojas.

**Figura 12:** Hojas de té



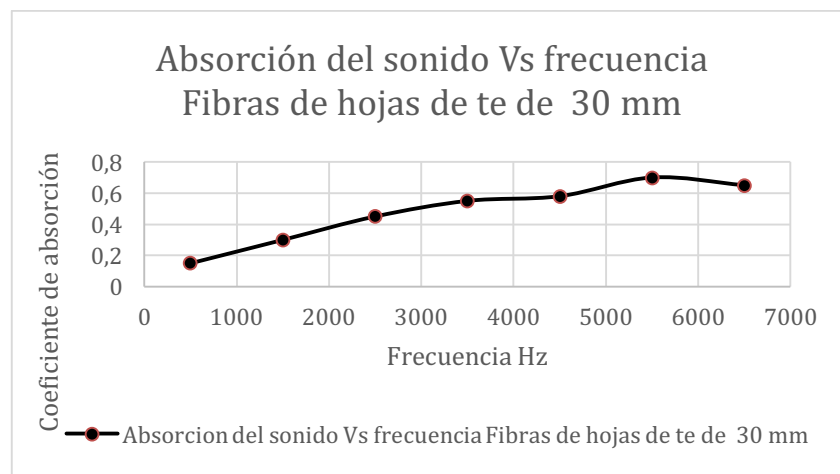
Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Camellia\\_sinensis](http://es.wikipedia.org/wiki/Camellia_sinensis).

Las bolsas de té una vez usadas pueden ser tomadas como desecho, pero adicional teniendo en cuenta sus características morfológicas se han evaluado para reconocer sus características de absorción acústica y poder ser implementadas en diferentes industrias como la automotriz, y la construcción.

Las propiedades de las fibras de las hojas de té son porosas y fibrosas características que también corresponde a los materiales sintéticos, y en el ejercicio científico desarrollado resultante de la evaluación de las propiedades de esta fibra natural, se pudo observar que para la absorción del sonido es mayor cuando el espesor del material es mayor.[11]

Los valores obtenidos en para el ensayo de este materia se observa en la Figura 13.

**Figura 13:** Coeficiente de absorción de la fibra del té [11]



## 1.7 Fibras de Bambú.

Las fibras de bambú *Phyllostachys viridis*, provienen de la planta del bambú, Figura 14, de la familia de gramíneas, y es usada convencionalmente en la construcción, elaboración de papel, e instrumentos musicales.

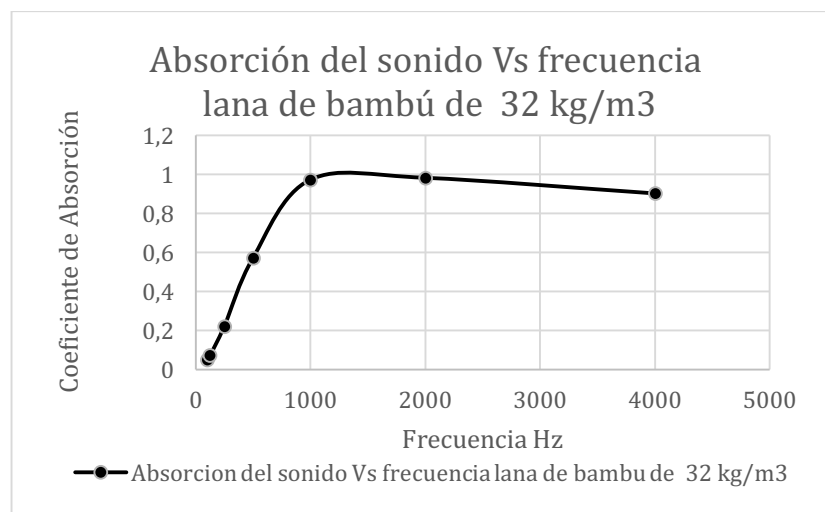
**Figura 14:**Bambú

Fuente: [http://uncap.smugmug.com/gallery/4587263\\_vWbUu#271651869](http://uncap.smugmug.com/gallery/4587263_vWbUu#271651869).

Las características de las fibras de bambú corresponden a un material poroso y que al recibir un tratamiento específico se puede obtener lana de bambú la cual puede ser usado para la elaboración de paneles y ser usado en diferentes industrias como la automotriz y la construcción para absorber sonido.[12]

Algunas de las características halladas dentro del rigor de la prueba de laboratorio sobre la lana de bambú relacionan valores cercano a los que se hallaron en materiales como la lana de vidrio.

Los valores obtenidos para el ensayo de este material se observa en la Figura 15.

**Figura 15:**Coefficiente de absorción de la lana de bambú.[13]

## 2 Marco Teórico.

Los referentes teóricos aquí planteados son la base fundamental para comprender las propiedades acústicas de un material, y así darle una posible aplicación.

### 2.1 Clasificación de los Materiales.

Los elementos empleados para construir o desarrollar actividades tecnológicas pueden ser compuestos o de origen natural y para cada aplicación específica se requieren entender y definir sus características y propiedades evaluadas desde distintas áreas del conocimiento como lo es su composición, respuesta a cambios térmicos, cambios eléctricos, respuesta a esfuerzos, además de cambios químicos entre otros como se puede evidenciar en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Características físicas principales de los materiales para construcción

Clase	Propiedad	Símbolo	Unidad
General	Costo Relativo	Cr	(\$/Kg)
	Densidad	$\rho$	Kg/Mt <sup>3</sup>
Mecánica	Modulo de elasticidad	E,G,K	Pa
	Esfuerzo	$\sigma\gamma$	Pa
	Dureza	Gc	J/m <sup>3</sup>
	Dureza a la fractura	Kc	Pa*m <sup>1/2</sup>
	Capacidad de amortiguamiento	$\eta$	(--)
	Relación de fatiga	$f$	(--)
Térmico	Conductividad térmica	$\lambda$	(W/m*k)
	Difusividad térmica	a	(m <sup>2</sup> /s)
	Calor específico	Cp	(J/Kg*K)
	Punto de fusión	Tm	(K)
	Coefficiente de expansión térmica	$\alpha$	(1/K)
Acústico	Coefficiente de absorción	$\alpha$	(--)
	Coefficiente de reflexión	R	(--)

Impedancia	Z	Rayls
Admitancia	$\zeta$	(--)

En la actualidad para la construcción se implementan materiales como los cerámicos, los metales y los compuestos pero desde el punto de vista de la absorción del sonido los materiales implementados provienen de la fibra de vidrio y la lana de roca, así como algunos elementos elaborados con fibras de algodón.

## 2.2 Características acústicas de los materiales

Cualquier tipo de material usado para la construcción se puede cualificar desde el punto de vista acústico desde cuatro características claras como lo son, impedancia, admitancia, coeficiente de reflexión y coeficiente de absorción; Este tipo de propiedades permiten caracterizar el lugar construido con estos materiales cualificándolo desde el punto de vista del confort acústico según la aplicación para la cual la construcción se halla diseñado.

La absorción de la energía sonora incidente sobre una superficie, es evaluada a partir de de las diferencias de energía sonora transmitida y reflejada, bajo estos conceptos puede darse una calificación del confort acústico de la construcción o edificación en términos de la inteligibilidad del mensaje transmitido en dicho lugar, un ejemplo claro seria un aula de clases donde la energía sonora reflejada se combina con la energía sonora directa causando a los estudiantes una dificultad para comprender el mensaje transmitido por el profesor, es por esto que es de gran importancia caracterizar las propiedades de absorción del sonido de los materiales para sus aplicaciones propias.

Las propiedades acústicas de estos materiales se describen a continuación así:

### 2.2.1 Impedancia.

Podemos describir la característica como la propiedad del material de impedir el paso de la energía acústica incidente describiéndola en dos partes , la parte real (resistencia ) describe la disipación de la energía y la parte imaginaria (reactancia) que describe la fase o relación de la energía almacenada.

Matemáticamente podía definirse como el cociente entre presión y velocidad sobre la superficie del material . ver Ecuación 1.[14]

$$z = \frac{p(0)}{v(0)} \quad (\text{E- 1})$$

Z=impedancia

P= presión

V=velocidad

### 2.2.2 Admitancia.

La admitancia en términos generales se describe como la propiedad del material que permitir el paso de la energía acústica que incide sobre el mismo y es el reciproco de la impedancia ver Ecuación 2.[15]

$$\beta = \frac{1}{z} \quad (\text{E- 2})$$

$\beta$ =Admitancia  
 $z$ = Impedancia

### 2.2.3 Coeficiente de Reflexión

Cuando a un material le incide una onda sonora parte de la energía de la misma es reflejada, esta reflexión tendrá una amplitud y fase diferente a la onda incidente pero dependerá de la misma, los cambios de amplitud y de fase que suceden durante la reflexión se expresan por el coeficiente de reflexión complejo que es una característica propia del material. ver Ecuación 3.[15]

$$r = [r]e^{i\phi r} \quad (\text{E- 3})$$

El valor absoluto así como su amplitud y fase dependen de la onda incidente

### 2.2.4 Coeficiente de Absorción

De acuerdo a la teoría sobre el comportamiento de las ondas planas la intensidad de la misma es proporcional al cuadrado de la presión, por lo tanto la intensidad de la onda reflejada es menor por el factor de  $[R^2]$  que la onda incidente y la fracción  $1 - [R^2]$  de la energía de la onda incidente se pierde durante la reflexión, a esta fracción de energía que se pierde se le llama el coeficiente de absorción. ver Ecuación 4[15]

$$\alpha = 1 - [r]^2 \quad (\text{E- 4})$$

Donde:

$[r]^2$ = Valor absoluto del coeficiente de reflexión al cuadrado.

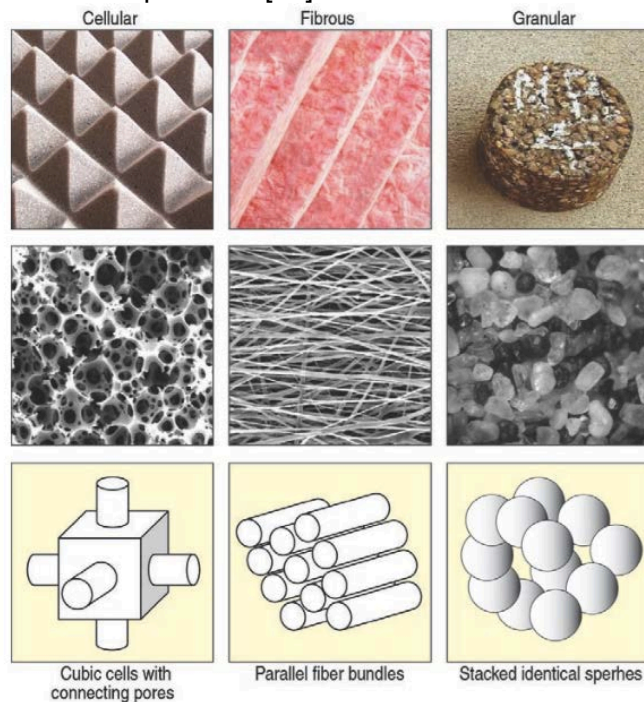


## 2.3 La absorción del sonido a través de materiales porosos.

Se definen los materiales porosos como sólidos que contiene cavidades, canales o espacios entre sus elementos internos, las ondas de sonido son capaces de entrar por estas cavidades y se pueden clasificar dependiendo si un fluido como el aire es capaz de atravesarlos, ya que si la composición interna del material es aislada o no se encuentra interconexión con la otras cavidades este será un material cerrado y no será tan eficiente en la absorción del sonido. Por otro lado si estas cavidades se encuentra interconectadas el material tendrá la característica de poro abierto lo cual aumenta las propiedades de la absorción del sonido.

Los materiales porosos absorbente se pueden clasificar en celulares, fibrosos o granulares, basados en sus configuraciones microscópicas, y se puede ver un ejemplo de su estructura en la Figura 16.

Figura 16: Tipos de materiales porosos. [16]



Cuando un material poroso ha sido impactado por una onda sonora incidente en el, las moléculas de aire en la superficie y en las cavidades internas del material vibran; el movimiento de las mismas hace que estas pierdan energía ya que parte de la misma se convierte en calor debido a las pérdidas térmicas y viscosas de los poros interiores y cavidades, la pérdida de energía por temperatura sucede en función de la frecuencia, esto quiere decir que para baja frecuencia el calor se trasfiere muy lentamente, pero a altas

temperaturas en el proceso no hay transferencia de calor. Adicionalmente la energía sonora en los materiales fibrosos puede ser disipada por el movimiento mismo de las fibras.

En relación a la porosidad de una muestra de material, se puede definir como la relación del volumen de aire en el espacio vacío de la muestra contra el volumen total de la muestra.

## 2.4 El Bambú *Guadua Angustifolia*

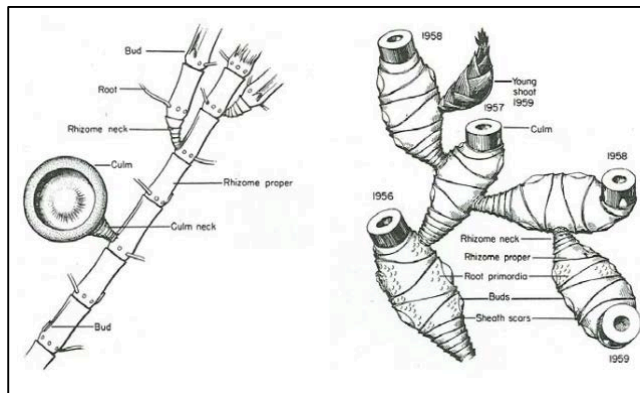
El bambú *Guadua angustifolia* kunth pertenece a la familia del bambú, es una especie de la familia de las gramíneas y su crecimiento se da en los climas cálidos y húmedos de algunos países de sur américa y centro américa, en temperaturas entre 20 y 30 grados centígrados.[12]

### 2.4.1 El rizoma

Constituye la base estructural de la planta, se encuentra en la parte inferior de la planta bajo tierra, y se dividen básicamente en dos grupos así:

- Lptomorpheos, o monopodiales los cuales tiene rizomas largos y delgados los cuales producen brotes individuales y regulares.
- Pachymorphos o también llamadas sympodial, que tienen rizomas cortos y gruesos este es el tipo de rizoma que tiene la *Guadua angustifolia* como se puede ver en la Figura 17

**Figura 17:**A la izquierda rizoma mopoidal y a la derecha rizoma sympodial. [12]

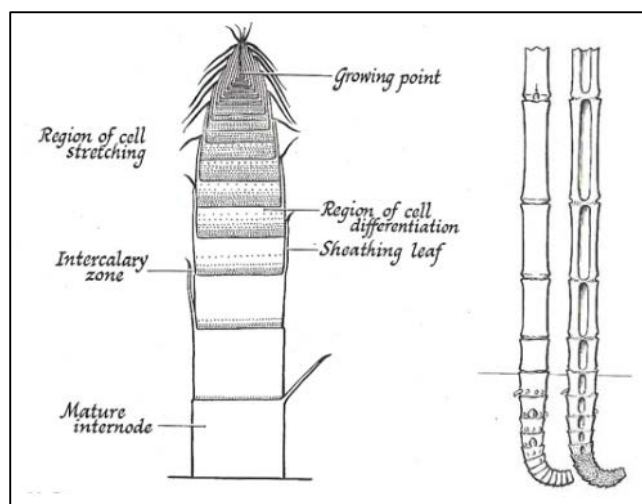


## 2.4.2 El culmo.

Consiste en una serie de nudos y entrenudos cuyo crecimiento comienza en el capullo de los rizomas, es de estructura tubular y hueca, esta dividida en secciones que varían su longitud dependiendo de la especie.

El crecimiento del mismo se realiza de la parte inferior a la superior y el diámetro del mismo modo al igual que el espesor de la pared que es mayor en la parte inferior. La característica principal de la guadua a diferencia de los árboles, es que está no posee cambium vascular por lo que su crecimiento no es igual al de los árboles que crecen diametralmente cada año. Esto se puede ver en la Figura 18.

**Figura 18:**Sección de un culmo de guadua. [12]

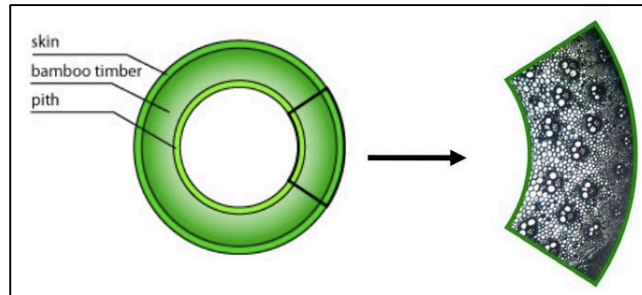


Para identificar las secciones del culmo y hacer un análisis bajo el microscopio se puede hacer una división en tres partes importantes como lo son:

- La piel : Corteza o capa externa de culmo la cual protege a mismo de la pérdida de humedad desde el interior, esta capa no contiene haces vasculares.
- La madera: Compuesta por haces vasculares y tejidos de parénquima es la parte estructural y funcional del culmo.
- La médula: Es la superficie interna de la cavidad del la guadua compuesta de tejido de parénquima sin haces vasculares.

El culmo esta compuesto porcentualmente de la siguiente manera un 50% de parénquima, un 40% de fibra y un 10 % de tejidos conductores; La parénquima es el tejido base en el que están incrustados los haces vasculares, además de ser el material que permite unir la fibra dándole el soporte estructural al culmo y ahora bien los tejidos conductores que permiten el flujo y transporte de nutrientes y agua a través de todo el culmo. Los tejidos conductores protegidos por capas densas de fibra, juntos forma los haces vasculares como se puede observar en la Figura 19.

**Figura 19:**Sección de un culmo de bambú guadua [13]



### 2.4.3 Propiedades químicas.

Las propiedades químicas de la guadua influyen directamente en el crecimiento y comportamiento de la misma; esta compuesta principalmente de celulosa, lignina y hemicelulosa los mismos compuestos de los árboles, la diferencia esta en el porcentaje de cada uno de estos elementos como se puede observar en la Tabla 2.

**Tabla 2:**Comparación del porcentaje de compuestos químicos de la guadua y la madera suave.[12]

	Celulosa %	Lignina %	Hemicelulosa %
Guadua	55	25	20
Madera suave	50	25	25

## 2.5 Fibra de Vidrio.

La fibra de vidrio es considerado un material compuesto, ya que puede contener la combinación de uno o mas materiales llamados “fundamentales”, como lo es la fibra de vidrio y una matriz de polímeros, el refuerzo de polímero con las fibras de vidrio pueden estar configuradas de tres maneras diferentes o configuraciones primarias: trenzada en un tejido que es laminado con la matriz, cortada aleatoriamente o alineada en una sola dirección.

Las características generales de la fibra de vidrio son: químicamente estables, repelen la humedad, retardantes al fuego, aislantes de calor, además por su composición y estructura como se vera mas adelante es eficiente para absorber la energía acústica incidente en ella.[17]

Como material implementado para absorber la energía acústica incidente en el, se usa en las construcciones en distintas presentaciones cambiando su densidad y forma, así también el coeficiente de absorción.

La presentación comercial mas usada en la construcción es principalmente la de paneles prensados de dimensiones de 1,22mts X 2,44 mts y de espesores que varían desde 1", hasta 2" los valores de coeficiente de absorción para estas dimensiones de espesores como la indica el fabricante en función de la frecuencia se puede observar en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Coeficiente de absorción de panel de fibra de vidrio (Acustifibra)

<b>Coeficiente de absorción de panel de fibra de vidrio( Acustifibra)</b>						
<b>Frecuencia. (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
1"	0,06	0,25	0,62	0,91	0,99	0,98
2"	0,18	0,71	1,12	1,12	1,03	1,02



## **3 Metodología de la investigación**

La investigación planteada se basa en la experimentación realizada a las fibras del Bambú *Guadua angustifolia* que se obtiene como desecho de otros procesos industriales o artesanales con el fin de evidenciar las propiedades de absorción de la energía acústica incidente sobre la fibra.

El método utilizado para obtener estos valores es el recomendado a través de la norma ISO 10534-2 “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”[18] parte 2 llamado método de la función de transferencia.

El fin de obtener estos valores es el de poder cualificar las fibras de la guadua para usos industriales relacionados con el aislamiento y acondicionamientos acústico en sus diferentes aplicaciones.

El método propuesto y aplicado para la obtención de los valores implementa la función de transferencia como base para la comparación de dos señales que se obtienen a través de dos transductores de entrada y en este caso en un ambiente controlado mediante las especificaciones técnicas implementadas en el equipo de medición, llamado tubo de impedancia.

### **3.1 Descripción del Método de obtención de los valores de absorción.**

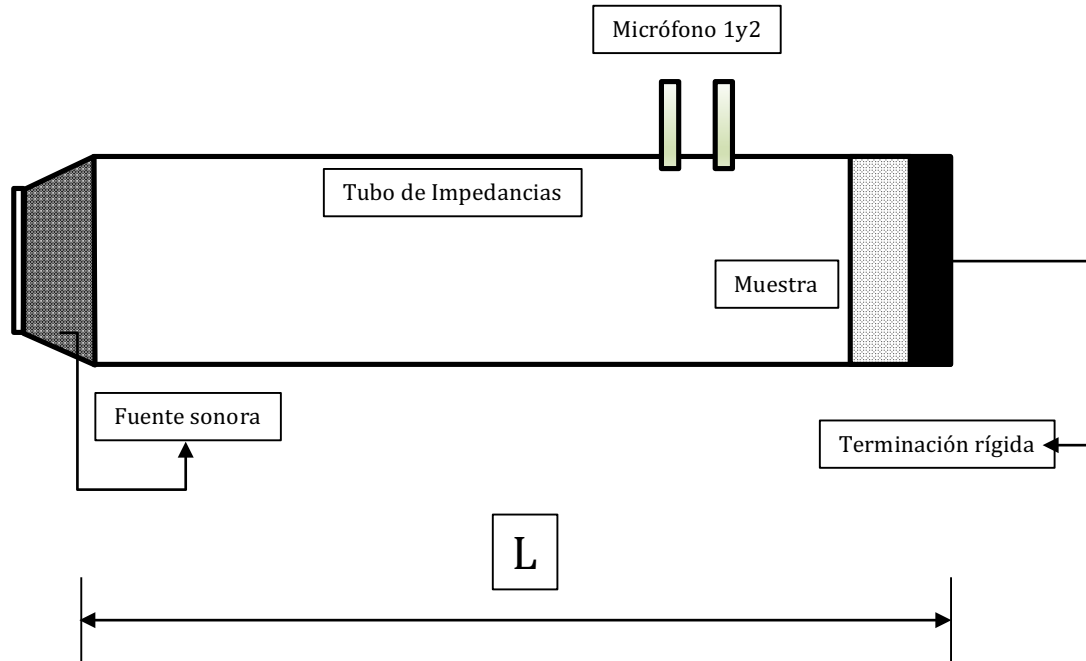
El método de ensayo se aplica para determinar el coeficiente de absorción acústica mediante el uso de un tubo de impedancia el cual consta de poder ubicar dos micrófonos, una fuente en el extremo del tubo y una muestra en el otro y a través de un analizador digital de señales.

Este método permite el análisis y evaluación de muestras de materiales pequeñas, además de la implementación de un lugar pequeño para la ubicación del tubo.

A través de la fuente ubicada en el extremo de tubo se generan ondas planas en el interior del mismo y se realiza una descomposición del campo sonoro de las ondas incidentes y reflejadas mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones de micrófonos ubicados en las paredes del tubo, para posteriormente calcular la función de transferencia acústica compleja.

### 3.2 Descripción del sistema de medición.

Figura 20: Esquema general del tubo de impedancia.



Como se observa en la Figura 20, el sistema de medición, está compuesto por un altavoz el cual está ubicado en un extremo del tubo que debe estar desacoplado mecánicamente del mismo para evitar transmisiones mecánicas y vibraciones al interior del tubo, en el otro extremo del mismo se ubica la muestra a caracterizar y el tubo debe terminar en una terminación rígida.

El tubo debe ser rectilíneo, con paredes rígidas, lisas y no porosas sin huecos ni fisuras en la sección del ensayo, y las paredes deben ser lo suficientemente gruesas y macizas para evitar que al interior del tubo aumente el ruido de fondo; se recomienda que las paredes sean el 10% de la sección transversal de tubo.

La frecuencia de trabajo del tubo está dada por el rango delimitado entre la frecuencia inferior o de mayor longitud de onda ( $f_l$ ) y la frecuencia superior o de menor longitud de onda ( $f_u$ ), adicional de las distancias entre los micrófonos ( $s$ ) expresado en metros, y el diámetro interno del tubo ( $d$ ) expresado en metros.

La condición para hallar  $f_u$  es la de evitar que se produzcan modos de propagación de ondas no planas en el tubo y esta dada por la siguiente condición:

$$d < 0,50\lambda_u; f_u * d < 0,50c_0$$

donde:

$s$ = distancia entre micrófonos en el tubo.

$d$ = diámetro interno del tubo.



$f_u$  = frecuencia superior de trabajo  
 $f_l$  = frecuencia inferior de trabajo

y la distancia entre los micrófonos debe elegirse de manera que:

$$f_u * s < 0,45c_0$$

La longitud del tubo debería ser lo suficiente para que se generen ondas planas entre la fuente y la muestra; la ubicación de los micrófonos se sugiere que sea por lo menos tres veces el diámetro del tubo y la distancia entre las muestras y los micrófonos se sugiere dependiendo del tipo de muestra de la siguiente manera:

Sin elementos de estructura	½ diámetro
Estructura semi lateral	1 diámetro
Fuertemente asimétrica	2 diámetros

Los micrófonos a usar deben ser idénticos en cada posición y si se usan montados en la pared deben ser de diámetro pequeño comparado con  $c_0/f_u$  y se sugiere que el diámetro de los mismos sea inferior al 20% que la distancia entre ellos.

Los instrumentos necesarios para el procesado deben estar constituidos por: un amplificador, un analizador de dos canales de FFT, un generador de señal capaz de reproducir una señal aleatoria, pseudo-aleatoria, pseudo-aleatorias periódicas o barrido de frecuencia.

Las mediciones se pueden realizar mediante el empleo de una de las dos técnicas siguientes:

- Método de dos micrófonos (utilizando dos micrófonos en lugares fijos);
- Método de un micrófono (usando un micrófono sucesivamente en dos lugares).

Técnica 1: Requiere un pre-test o procedimiento de corrección en la prueba para reducir al mínimo las características de amplitud y diferencia de fase entre los micrófonos; sin embargo, se combina la velocidad, de alta precisión y facilidad de aplicación. Esta técnica se recomienda para los propósitos generales de la prueba.

Técnica 2: Tiene requisitos particulares de generación y procesamiento de señales y puede requerir más tiempo; sin embargo, elimina errores de fase entre los micrófonos y permite la selección de los lugares óptimos de micrófono para cualquier frecuencia. Se recomienda para la obtención de mejor precisión.

### 3.3 Pruebas preliminares.

La velocidad del sonido en el tubo tiene que ser determinada después de lo cual las longitudes de onda a las frecuencias de las mediciones tienen que ser calculadas. La velocidad del sonido se puede evaluar con precisión con el conocimiento de la temperatura del aire del tubo. Ver Ecuación 5.

$$c_0 = 343.2 \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (\text{E- 5})$$

donde T es la temperatura en grados Kelvin.

La longitud de onda :

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad (\text{E- 6})$$

Donde:

$c_0$  =Velocidad del sonido

$f$  = frecuencia

La densidad  $\rho_0$  el aire es calculada por:

$$\rho = \rho_0 \frac{p_a T_0}{p_0 T} \quad (\text{E- 7})$$

Donde:

T es temperatura en grados Kelvin;

$p_a$  es la presión atmosférica, en kPa;

$T_0 = 293$  K;

$p_0 = 101.325$  kPa

$\rho_0 = 1.186$  kg/m<sup>3</sup>.

La característica de la impedancia  $Z_0$  del aire es el producto de  $\rho_0 c_0$ .

### 3.4 Calibración del sistema de medición.

#### 3.4.1 Amplitud de la señal.

La amplitud de la señal tiene que ser al menos 10 dB mayor que el ruido de fondo en todas las frecuencias de interés, tal como se mide en los lugares de micrófono elegidos. Durante una prueba, cualquier frecuencia que tiene un valor de respuesta de 60 dB por debajo del valor máximo de respuesta de frecuencia tiene que ser rechazada.

#### 3.4.2 Corrección por desfases de los micrófonos.

Cuando se utiliza la técnica de dos micrófonos, uno de los siguientes procedimientos para la corrección de los datos de la función de transferencia medida para canales de falta de coincidencia, debe usarse: mediciones repetidas con canales intercambiados o factor de calibración predeterminado.

#### 3.4.3 Repetición de la medición con micrófonos intercambiados.

La corrección por la posición de los micrófonos se realiza intercambiando los canales de los micrófonos de medición con una misma muestra. Este procedimiento es preferido en gran manera cuando se tiene un número limitado de muestras bajo prueba.

El intercambio de la posición de los micrófonos genera dos funciones de transferencia  $H_{12}^I(\omega)$ , y  $H_{12}^{II}(\omega)$  que usa la misma expresión matemática para las dos.

La posición de los micrófonos en configuración I o posición estándar como se muestra en la Figura 21, donde se obtiene la función de transferencia  $H_{12}^I(\omega)$  al intercambiar los micrófonos de posición como a la configuración II como se observa en la Figura 22, se obtiene la función de transferencia  $H_{12}^{II}(\omega)$ , teniendo en cuenta que el analizador y el preamplificador no se modifican, que únicamente se intercambian la posición de los micrófonos.

La función de transferencia se computa usando la Ecuación 8.

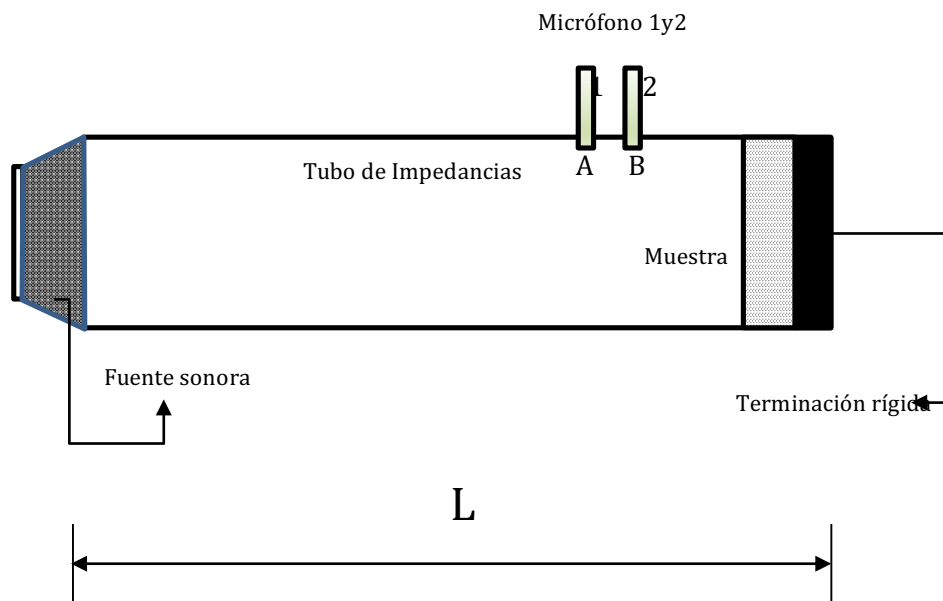
$$H_{12}(\omega) = \sqrt{H_{12}^I(\omega) H_{12}^{II}(\omega)} = |H_{12}| e^{j\phi} \quad (\text{E- 8})$$

Donde:

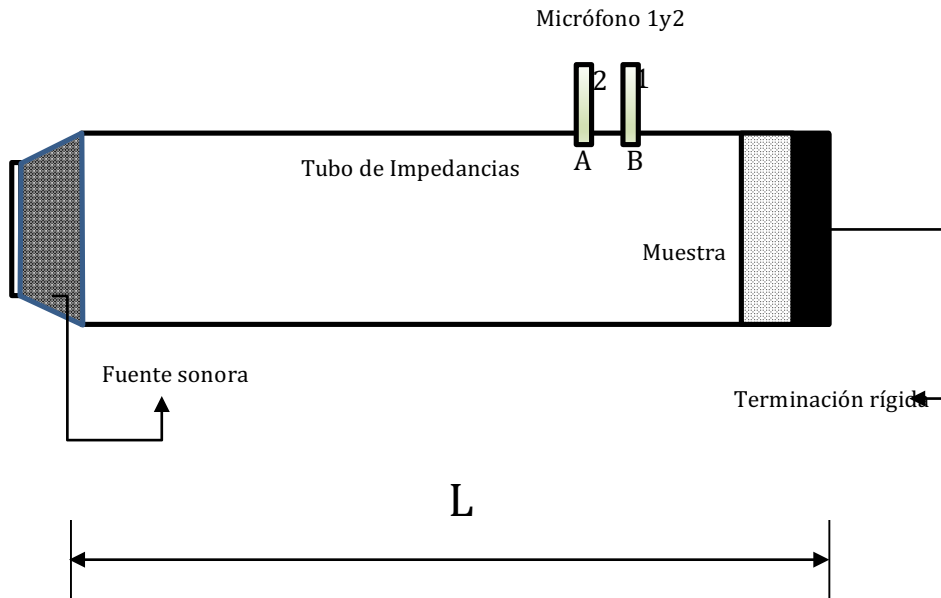
$H_{12}^I(\omega)$  = Función de transferencia posición 1.

$H_{12}^{II}(\omega)$  = Función de transferencia posición 2.

**Figura 21:** Configuración I micrófono 1 en canal A, micrófono 2 en canal B



**Figura 22:** Configuración I micrófono 1 en canal B, micrófono 2 en canal A



### 3.4.4 Factor de calibración.

La calibración se realiza usando una muestra conocida y es válida para todas las mediciones sucesivas que se realicen después del proceso de calibración. Se deben medir las dos funciones de transferencia  $H_{12}^I(\omega)$  y  $H_{12}^{II}(\omega)$  y se computan usando la Ecuación 9.

$$H_c(\omega) = \sqrt{\frac{H_{12}^I(\omega)}{H_{12}^{II}(\omega)}} = |H_c| e^{j\phi} \quad (\text{E- 9})$$

O si el analizador solo puede medir la función de transferencia en una dirección por ejemplo del micrófono 1 al micrófono 2 entonces se debe computar usando la Ecuación 8, para las siguientes pruebas se debe posicionar los micrófonos en la configuración I, e insertar las muestras y medir la función de transferencia:

$$\hat{H}_{12}(\omega) = |\hat{H}_{12}| e^{j\hat{\phi}} = \text{Re}(\hat{H}_{12}) + j \text{Im}(\hat{H}_{12}) \quad (\text{E- 10})$$

donde:

$\hat{H}_{12}(\omega)$  es la función de transferencia sin corrección y  $\hat{\phi}$  es la fase sin corrección; para obtener la función de transferencia corregida se usa la siguiente ecuación:

$$H_{12}(\omega) = |H_{12}| e^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}(\omega)}{H_c(\omega)} \quad (\text{E- 11})$$

### 3.4.5 Determinación del Coeficiente de reflexión.

Para el cálculo a incidencia normal del coeficiente de reflexión se utiliza la siguiente expresión:

$$R(\omega) = |R| e^{j\phi_R} = \frac{H_{12}(\omega) - H_i}{H_r - H_{12}(\omega)} e^{2jk_0x_1} \quad (\text{E- 12})$$

Donde:

$x_1$  Es la distancia entre la muestra y el micrófono mas lejano.

$\phi_R$  Es el Angulo de la fase del coeficiente de reflexión a incidencia normal.

$$H_i = \frac{P_{i2}}{P_{i1}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0s} \quad \text{Es la función de transferencia de la onda incidente.}$$

$$H_r = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0s} \quad \text{Es la función de transferencia de la onda reflejada.}$$

$s = x_1 - x_2$  Es el espacio entre los micrófonos.

### 3.4.6 Determinación del coeficiente de absorción del sonido.

A incidencia normal el coeficiente de absorción del sonido esta dado por la siguiente expresión:

$$\alpha(\omega) = 1 - |R|^2 \quad (\text{E- 13})$$

## 4 Ensayos realizados

A continuación se describe el proceso de obtención de la fibra de la guadua y los ensayos realizados con el fin de obtener los valores relacionados con el coeficiente de absorción del sonido.

El número de muestras ensayadas fueron 12, cada una de 4" de diámetro y 1" de espesor, cada muestra se ensayo bajo dos condiciones, la primera ubicando la placa rígida exactamente en la terminación de la muestra y la otra dejando una cámara de aire entre la terminación de la muestra y la plana rígida de 2".

Otro ensayo realizado fue el de medir el coeficiente de absorción, aumentando el espesor de la muestra para ello se apilaron las muestra en pruebas de 2, 3 y 4 muestras agrupadas dentro del tubo de medición y de nuevo manteniendo la placa rígida y espacio de aire de 2", todo esto con el propósito de establecer las diferencias que se puedan generar por la variación de espesor y cámara de aire.

### 4.1 Obtención de la fibra de la guadua.

La guadua utilizada para el proceso de obtención de la fibra fue tomada de material de desecho implementado para otras aplicaciones por el grupo de investigación de madera y guadua de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá como se observa en la Figura 23.

**Figura 23:** Guadua de desecho implementada para obtener la fibra bajo prueba



A partir de este elemento se dividió en los respectivos entrenudos como se puede observar en la figura 24 y se marcaron para identificar cada una de las probetas, estas se pesaron y se midieron para obtener los respectivos valores iniciales.

**Figura 24:**Guadua de desecho implementada para obtener la fibra bajo prueba



Los pasos realizados para la obtención de la fibra de la guadua fueron los siguientes.

1. Caracterización física de la probetas ( Dimensiones y pesos).
2. Determinación del contenido de humedad a partir de la norma técnica colombiana NTC 5525.
3. Determinación de la densidad a partir de la norma técnica colombiana NTC 5525[19].
4. Separación de las fibras mediante un proceso químico al insertar la probetas en una solución de hidróxido de sodio al 10% durante 72 horas.
5. Cepillado manual de las probetas mediante una grata metálica fina para la obtención de la fibra.
6. Peso de la fibra en función de la probeta inicial
7. Armado de las probetas de fibra para la medición del coeficiente de absorción.

## 4.2 % Contenido de Humedad (CH)

A partir de la muestra de guadua inicial se obtiene 7 probetas a las cuales se les inicia el proceso de determinación del contenido de humedad para lo cual se midió el peso inicial de la probeta, el peso en verde y en estado anhidro datos se pueden observar en la Tabla 4.



El cálculo para obtener el contenido de humedad (CH) se realiza a partir de la Ecuación 14.

$$CH = \frac{m - m_o}{m_o} \times 100 \quad (\text{E- 14})$$

En donde:

m= es la masa de la probeta antes del secado.

m<sub>o</sub>= es la masa de la probeta después del secado.

**Tabla 4:**Características físicas de las muestras

# de muestra	Peso Inicial (gr)	Peso verde(gr)	Peso Anhidro(gr)
Muestra 1	150,38	220,12	134,63
Muestra 2	124,8	190,14	111,38
Muestra 3	156,07	229,89	140,01
Muestra 4	141,9	196,89	128,05
Muestra 5	132,5	192,45	118,3
Muestra 6	167,58	239,48	150,97
Muestra 7	115,2	163,30	102,9

El contenido de humedad fue calculado teniendo en cuenta el peso inicial y en estado anhidro y los valores de cada muestra se observa en la Tabla 5.

**Tabla 5:**% de Contenido de humedad.

# de muestra	% de Contenido de Humedad
Muestra 1	11,7
Muestra 2	12,0
Muestra 3	11,5
Muestra 4	10,8
Muestra 5	12,0
Muestra 6	11,0
Muestra 7	12,0

El promedio del contenido de humedad es de 11,6 %

### 4.3 Densidad.

De acuerdo a la norma técnica colombiana NTC5525 para la obtención de la densidad de las muestras se requiere obtener la masa en estado anhidro y el volumen en estado verde ya que estos valores no varían respecto a las condiciones climáticas. Los valores de la masa en estado anhidro y el volumen en estado verde se pueden observar en la Tabla 5.

**Tabla 6:** Peso en estado anhidro y volumen en estado verde de las muestras.

# de muestra	Peso Anhidro(gr)	Volumen en verde(mm <sup>3</sup> )
Muestra 1	134,63	310
Muestra 2	111,38	282
Muestra 3	140,01	310
Muestra 4	128,05	254
Muestra 5	118,3	260
Muestra 6	150,97	326
Muestra 7	102,9	227

La densidad de cada muestra expresada en (Kg/m<sup>3</sup>) se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 7:** Densidad de cada muestra.

# de muestra	Densidad(Kg/m <sup>3</sup> )
Muestra 1	0,434
Muestra 2	0,394
Muestra 3	0,451
Muestra 4	0,504
Muestra 5	0,455
Muestra 6	0,463
Muestra 7	0,453

La densidad promedio de es de 0,45 Kg/m<sup>3</sup>

#### 4.4 Proceso de separación y extracción de la fibra .

El proceso implementado para la separación y extracción de la fibra se realiza a través de método químico mecánico mediante la utilización del hidróxido de sodio que como método alcalino ya rompe los enlaces entre las moléculas de lignina en una solución al 10%, en esta solución se mantuvieron las muestras por aproximadamente 120 horas, después de esto las muestras se lavaron con abundante agua limpia y se procedió a realizar el cepillado de las mismas con un cepillo metálico de cerdas finas para obtener así una fibra muy fina. En las figuras 25 y 26, se pueden observar las muestras en la solución de hidróxido de sodio y el proceso de cepillado de la fibra.

**Figura 25:**Muestras en solución de hidróxido de sodio



**Figura 26:**Cepillado manual de las muestras.



Una vez finalizado el proceso de cepillado y extracción manual de las fibras, se pesó en húmedo y en seco, la cantidad de fibra que se obtuvo de cada muestra para así poder armar las probetas necesarias para la medición del coeficiente de absorción.

Cada muestra fue cepillada y se extrajo la fibra teniendo en cuenta que la corteza externa de la guadua es más dura; motivo por el cual es imposible sacar la totalidad de la fibra, la cantidad de fibra obtenida por muestra se referencia en la Tabla 8.

**Tabla 8:** Comparación del peso de la muestra y el peso de la fibra obtenida

# de muestra	Peso Inicial (gr)	Peso fibra(gr)
Muestra 1	150,38	37,595
Muestra 2	124,8	31,2
Muestra 3	156,07	39,0175
Muestra 4	141,9	35,475
Muestra 5	132,5	33,125
Muestra 6	167,58	41,895
Muestra 7	115,2	28,8

El total de la fibra obtenida es 247,1 gramos con esta cantidad de fibra, se procede a elaborar las probetas para la medición; para ello se selecciona una muestra de un material de absorción de sonido conocido como fibra de vidrio y se elabora una probeta de comparación.

Teniendo en cuenta que el tubo usado para la medición tiene un diámetro interior de 4 “, se procede a cortar la muestra de dicho diámetro y con espesor de 1” se procede luego a pesar esta probeta de comparación y se halla un peso de 20,5 gramos, como se puede observar en la Figura 27.

**Figura 27:** Probeta de comparación

Teniendo en cuenta de las dimensiones de la probeta de comparación se procedió a elaborar las probetas de fibra de guadua, para lo cual se tomo para cada una lo correspondiente a 20,6 gramos, con lo cual se elaboraron 12 probetas; para mantener la forma y las dimensiones de la probeta de comparación y el porta muestras la fibra de cada una de las probetas se comprimió con un peso estándar de 258,08 gramos en un molde circular que tenia la dimensión interna de 4 " y se mantuvo cada una de las probetas bajo este peso por aproximadamente 5 días. Las probetas finalizadas se pueden observar en la Figura 28.

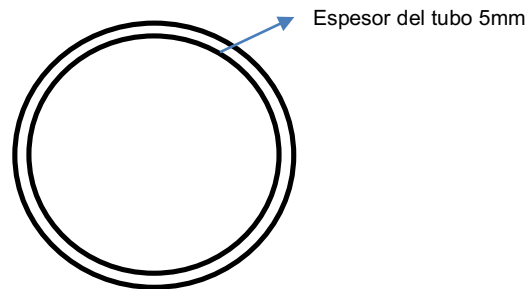
**Figura 28:** Probetas finalizadas

## 4.5 Proceso de medición.

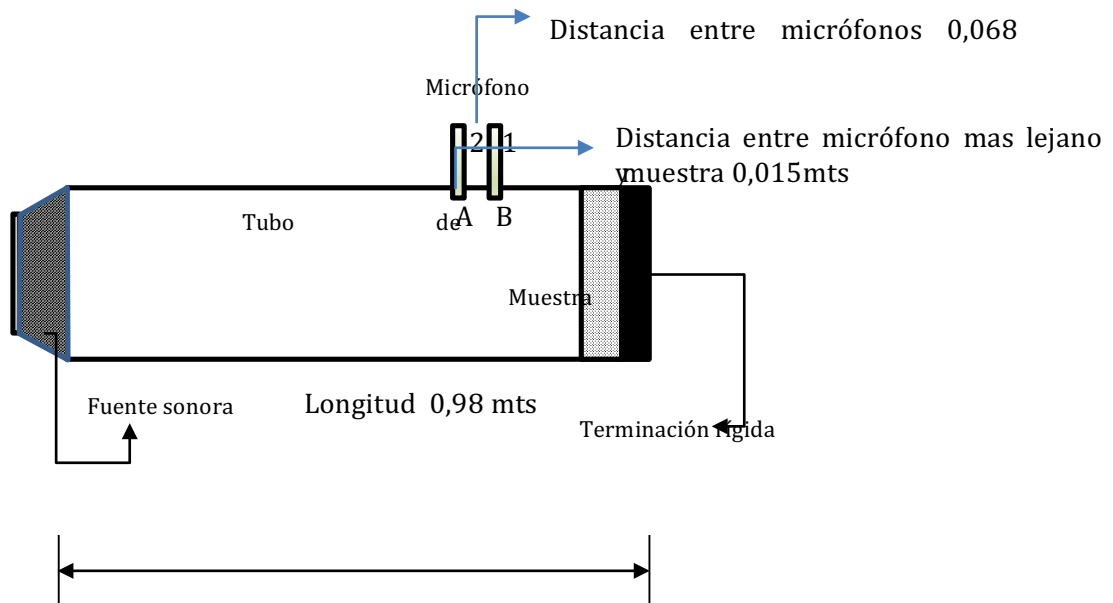
El proceso de medición se realizó bajo el proceso estandarizado por la norma ISO 10534-2 donde las características del sistema de medición y el proceso de medición se describen a continuación.

### 4.5.1 Características de sistema de medición.

Las dimensiones del tubo empleado y la ubicación de la muestra y posición de los micrófonos se puede ver en la Figura 29, donde de acuerdo a lo establecido por la norma se obtienen los valores límites de trabajo para las frecuencias útiles a nuestro análisis, así:



**Figura 29:** Configuración del sistema de medición según normativa



De acuerdo a las dimensiones anteriormente referenciadas las distancias objeto para las mediciones corresponden a los siguientes cálculos:

La frecuencia de trabajo mas alta del tubo corresponde a

$$d < 0,5\lambda_u; f_u \times d < 0,5c_o$$

donde d es el diámetro interno del tubo en metros y  $c_o$  es la velocidad del sonido entonces la frecuencia superior de trabajo  $f_u$  esta dada por la relación:

$$f_u < \frac{0,5c_o}{d}$$

$$d = 0,1016mts$$

$$c_o = 343mts/seg$$

$$f_u = 1687 \text{ Hz}$$

La frecuencia límite más baja depende de la distancia entre los micrófonos y de la precisión del sistema pero, como regla general, la distancia entre micrófonos debería exceder en el 5% la longitud de onda de la frecuencia más baja de interés, supuesto que se satisfagan los requisitos de la distancia entre los micrófonos, así que la distancia entre los micrófonos (s), esta dada por:

$$f_u \times s < 0,45c_o$$

$$s < \frac{0,45c_o}{f_u}$$

$$s < 0,091mts$$

#### 4.5.2 Adquisición de las señales de calibración.

Para la adquisición de las señales de calibración y las de medición el software de adquisición me permite capturar el valor de la amplitud y la fase en cada posición micrófono la adquisición de esta señal se puede ver en la Figura 30.

Una vez se obtienen estos datos iniciales, se procede a procesarlos a través de un software de análisis de señales como lo es Matlab y se procede a programar las ecuaciones indicadas anteriormente para obtener la función de calibración. Que siguiendo con los parámetros establecidos en la norma ISO 10534-2, se añadió un material absorbente para así evitar las posibles turbulencias generadas por la fuente y en el porta muestras se ubica la muestra a medir y se posicionan los micrófonos en la posición 1 y se adquiere la señal correspondiente a la transferencia  $H_{12}^I(\omega)$  de trazo café y al intercambiar la posición de los micrófonos se obtiene la función de transferencia  $H_{12}^{II}(\omega)$  de trazo rosado.

En la Figura 31 se puede observar la posición de la muestra en el tubo.

**Figura 30:** Grafica de la función de transferencia configuración 1 y 2



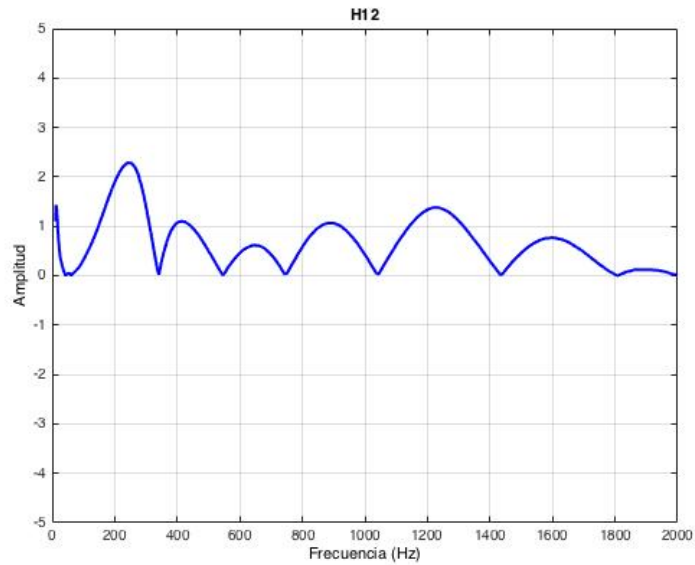
**Figura 31:** Ubicación de las muestras en el porta-muestras.



Una vez se obtienen las funciones en las posiciones 1 y 2 se obtiene la función de calibración mediante  $H_{12}(\omega) = \sqrt{H_{12}^I(\omega)H_{12}^{II}(\omega)} = |H_{12}|e^{j\phi}$  procesada en el software Matlab, para lo cual que como resultado se tiene la Figura 32.



**Figura 32:** Grafica de la función de corrección.



### 4.5.3 Medición de las muestras

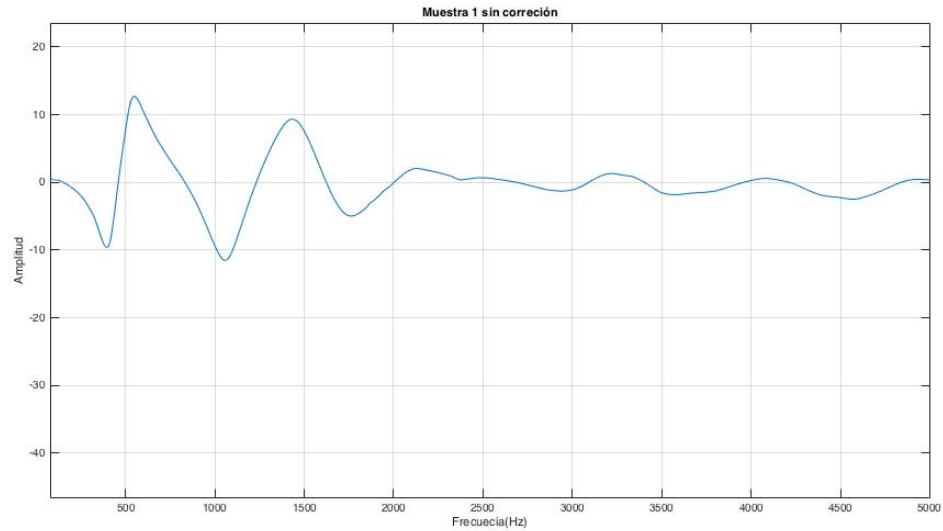
Una vez se obtiene la función de calibración se procede a ubicar la muestra de guadua # 1 y el sistema se configura en la posición 1, para así adquirir la función de transferencia el montaje de todo el sistema se puede ver en la Figura 33.

**Figura 33:** Montaje de la muestra en el tubo de medición.



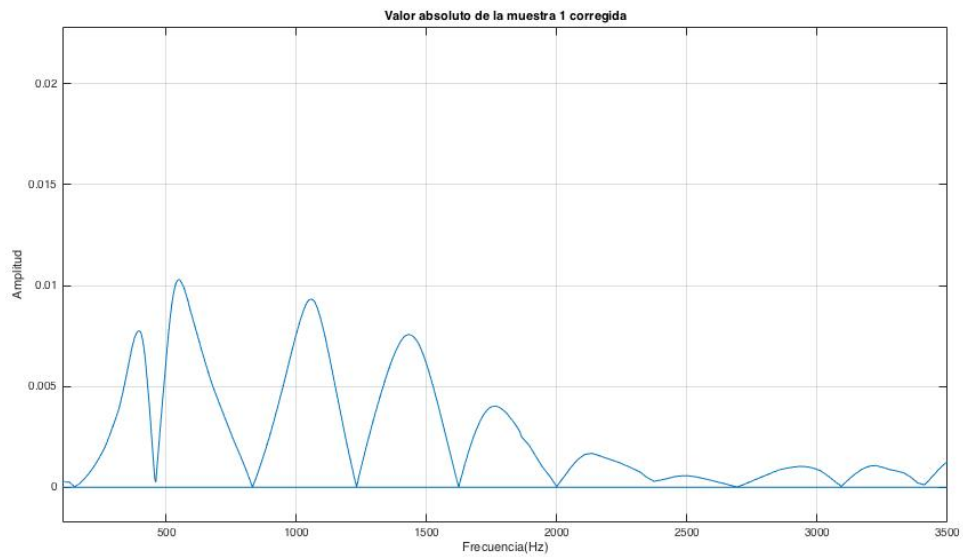
$\hat{H}_{12}(\omega)$  la cual aun no ha sido corregida y para la cual se obtuvo la Figura 33, este mismo procedimiento se realizó para cada una de las muestras.

**Figura 34:** Función de transferencia de la muestra #1 sin corrección.



La función de transferencia de la muestra una vez a sido corregida y sacado su valor absoluto se puede evidenciar en la Figura 33.

**Figura 35:** Función de transferencia de la muestra corregida

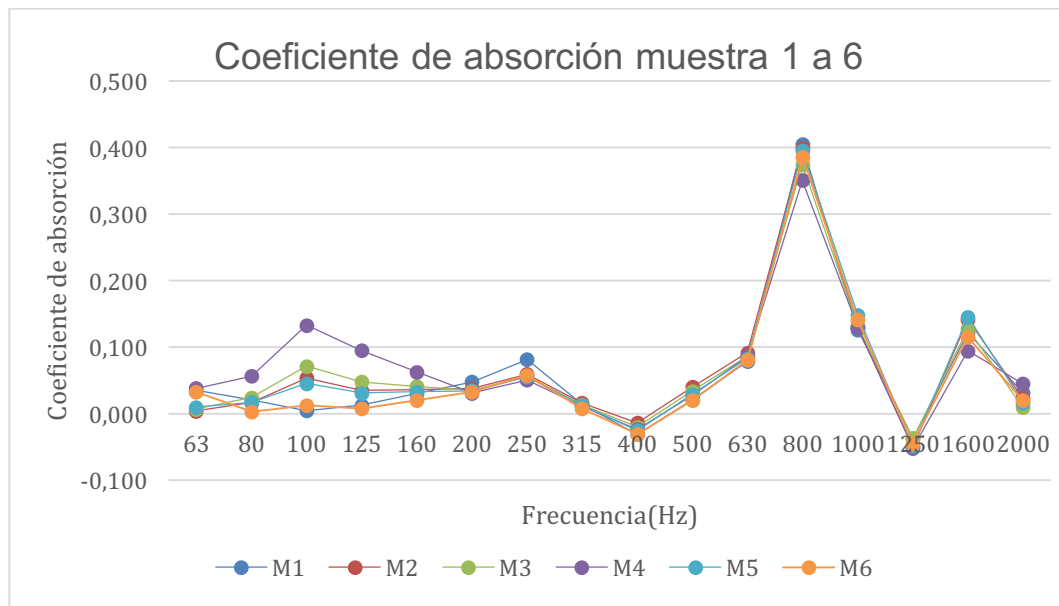


#### 4.5.4 Obtención del coeficiente de absorción

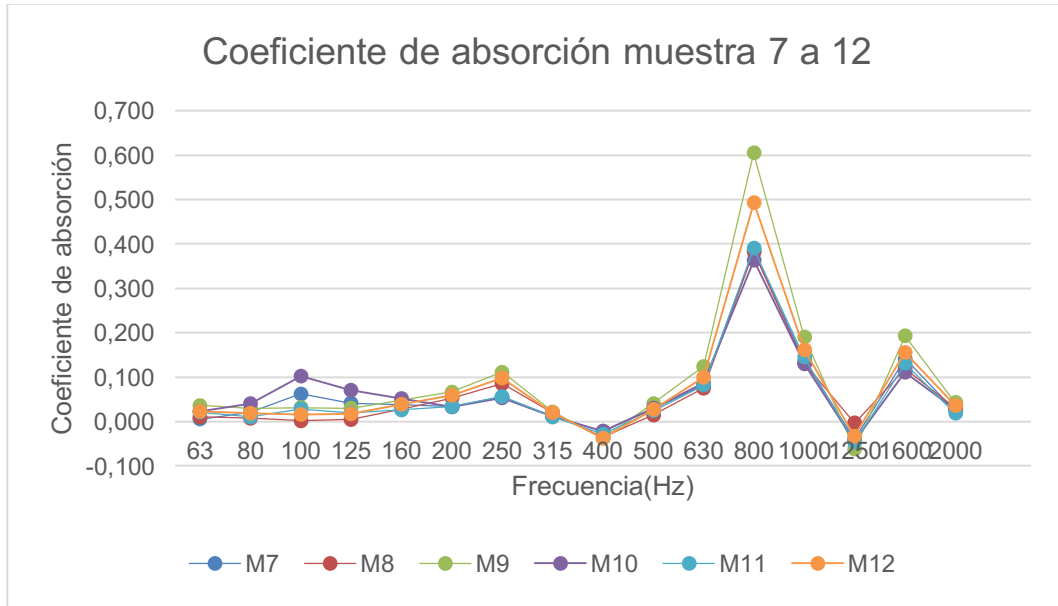
Una vez se obtiene la señal de la muestra corregida se procede a hallar el coeficiente de reflexión para después hallar el coeficiente de absorción.

A continuación podemos observar en la Figura 36, el comportamiento del coeficiente de absorción de la muestra 1 a la 6 y en la Figura 37, de la muestra 7 a la 12

**Figura 36:** Coeficiente de absorción muestra 1 a 6

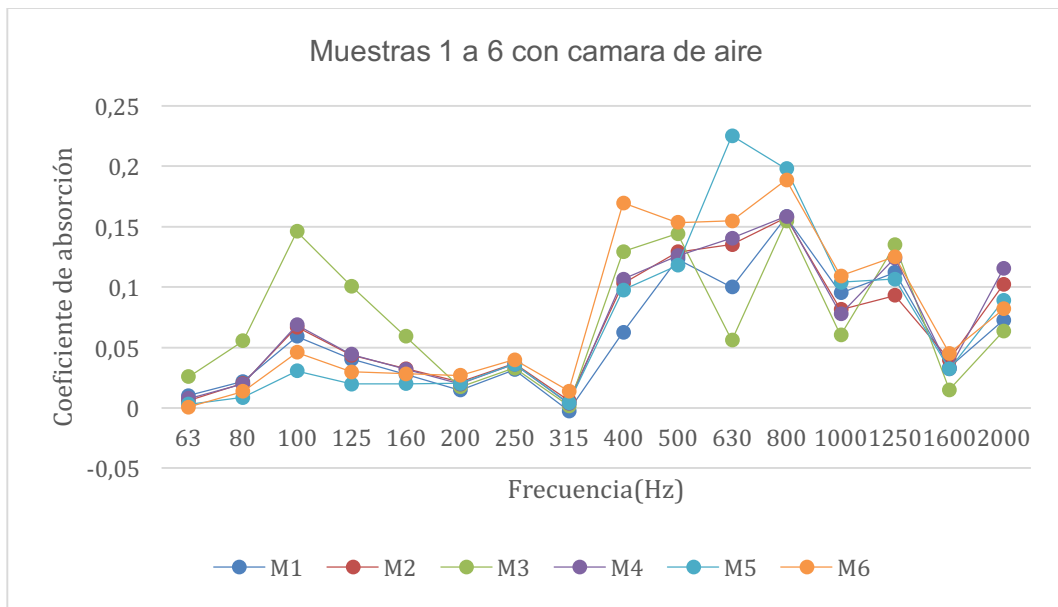


**Figura 37:** Coeficiente de absorción muestra 7 a 12

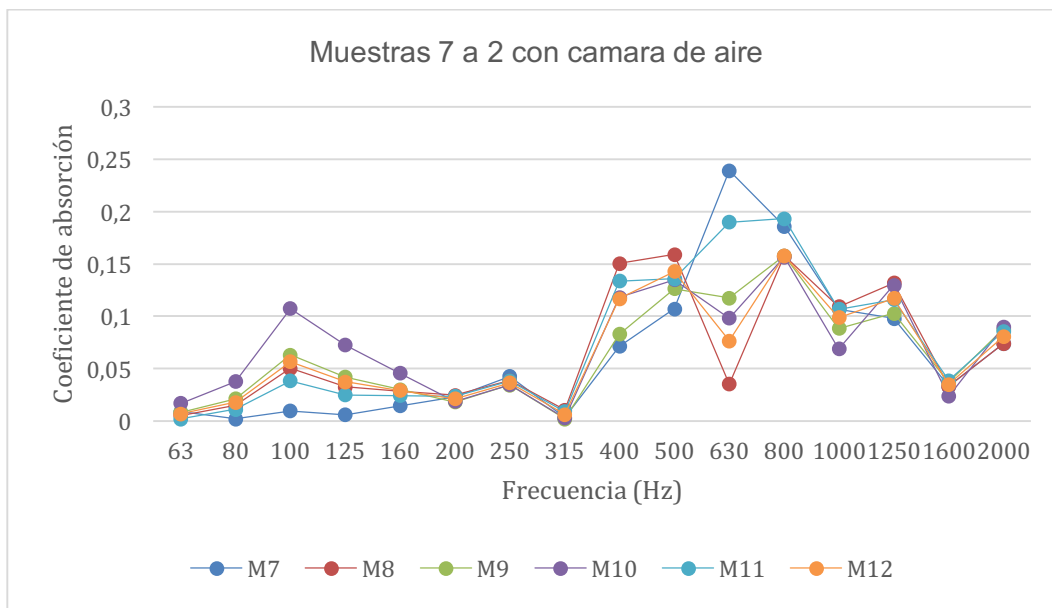


Para la configuración de las muestras de 1" con cámara de aire de 2" detrás de la muestra los resultados del coeficiente de absorción se pueden observar en las Figura 38 y Figura 39.

**Figura 38:** Coeficiente de absorción de las muestras de la 1 a la 6 con espesor individual de 2" con cámara de aire de 2".

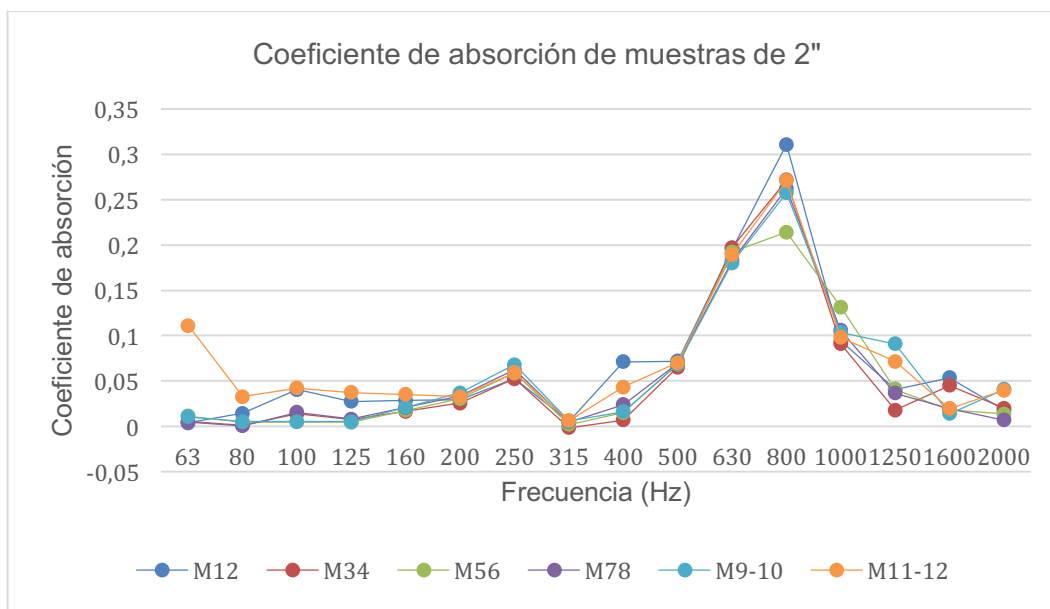


**Figura 39:** Coeficiente de absorción de las muestras de la 7 a la 12 con espesor individual de 2" con cámara de aire de 2".



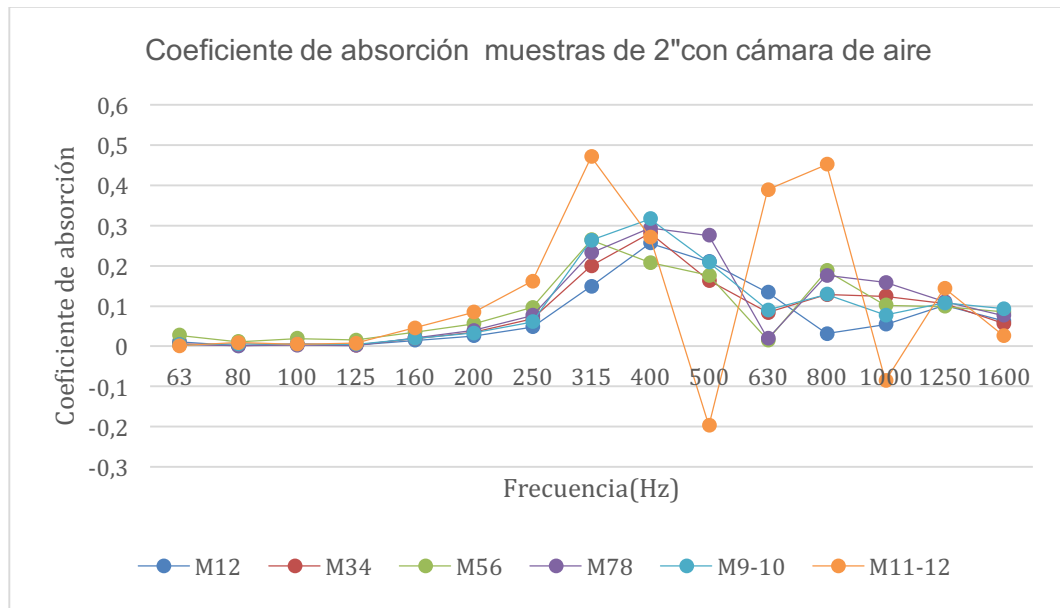
Para la siguiente configuración se apilaron dos muestras con el fin de aumentar el espesor y evaluar los posibles cambios que se puedan causar a propósito de la variable del espesor en función del coeficiente de absorción para ello se realizaron seis ensayos con las siguientes combinaciones M 1-2, M 3-4, M 5-6, M 7-8, M 9-10, M 11-12, los coeficientes de absorción obtenidos se presentan en la Figura 40.

**Figura 40:** Coeficiente de absorción de muestras de 2"



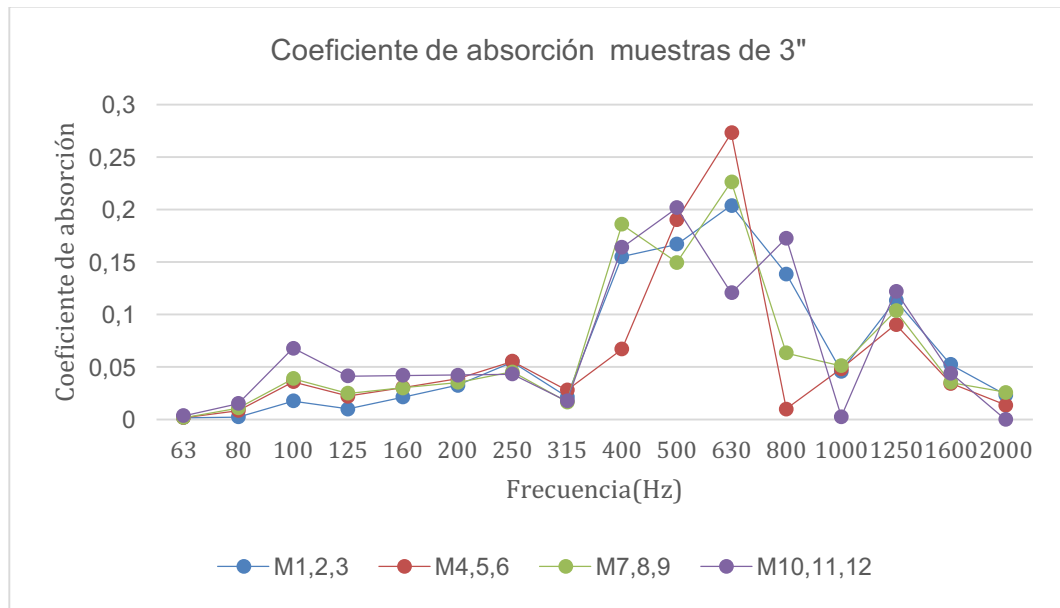
A continuación se presenta el coeficiente de absorción obtenido con la configuración anterior pero añadiendo a cada ensayo una cámara de aire de 2" los resultados se pueden ver en la Figura 41.

**Figura 41:** Coeficiente de absorción muestras de 2" con cámara de aire



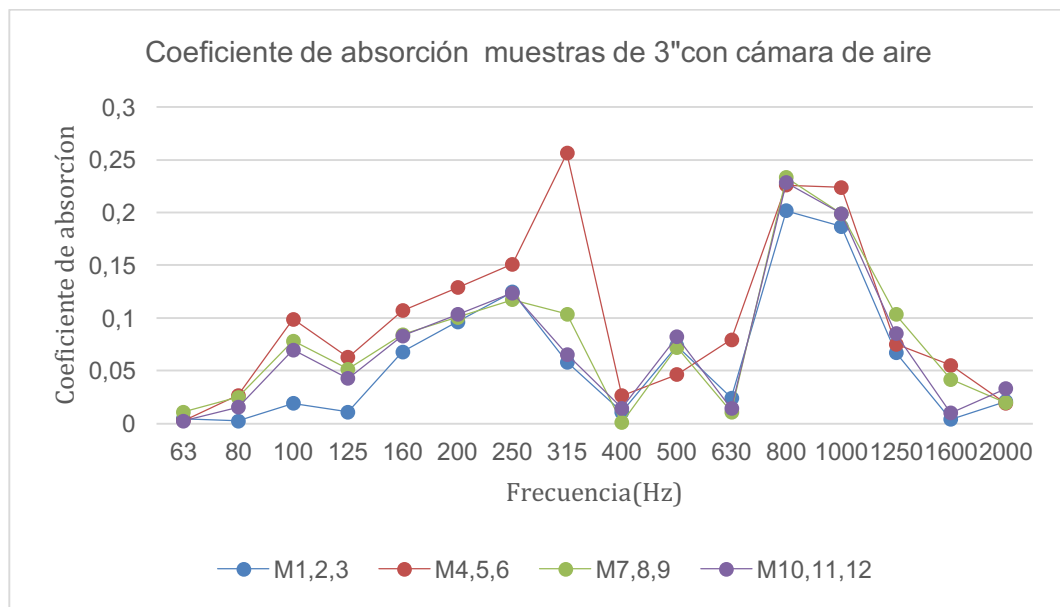
Para la siguiente configuración se apilaron tres muestras con el fin de aumentar el espesor y evaluar los posibles cambios que se puedan causar a propósito de la variable del espesor en función del coeficiente de absorción para ello se realizaron seis ensayos con las siguientes combinaciones M 1-2-3, M 4-5-6, M 7-8-9, M 10-11-12, los coeficientes de absorción obtenidos se presentan en la Figura 42.

**Figura 42:** Coeficiente de absorción muestras de 3"



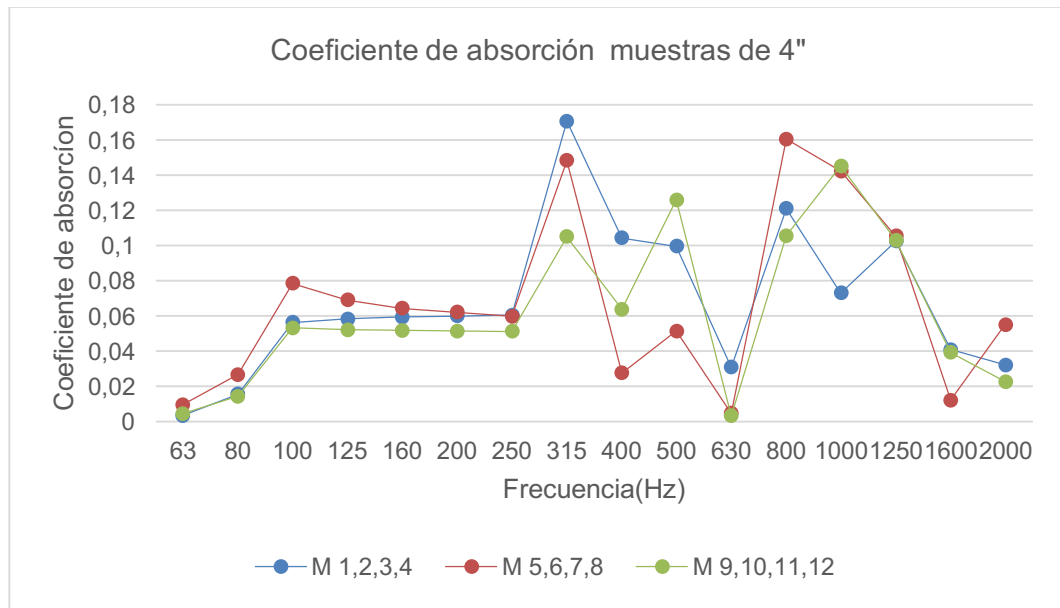
A continuación se presenta el coeficiente de absorción obtenido con la configuración anterior pero añadiendo a cada ensayo una cámara de aire de 2" los resultados se pueden ver en la Figura 43.

**Figura 43:** Coeficiente de absorción muestras de 3" con cámara de aire.



Para la siguiente configuración se apilaron cuatro muestras con el fin de aumentar el espesor y evaluar los posibles cambios que se puedan causar a propósito de la variable del espesor en función del coeficiente de absorción para ello se realizaron seis ensayos con las siguientes combinaciones M 1-2-3-4, M 5-6-7-8, M 9-10-11-12, los coeficientes de absorción obtenidos se presentan en la Figura 44.

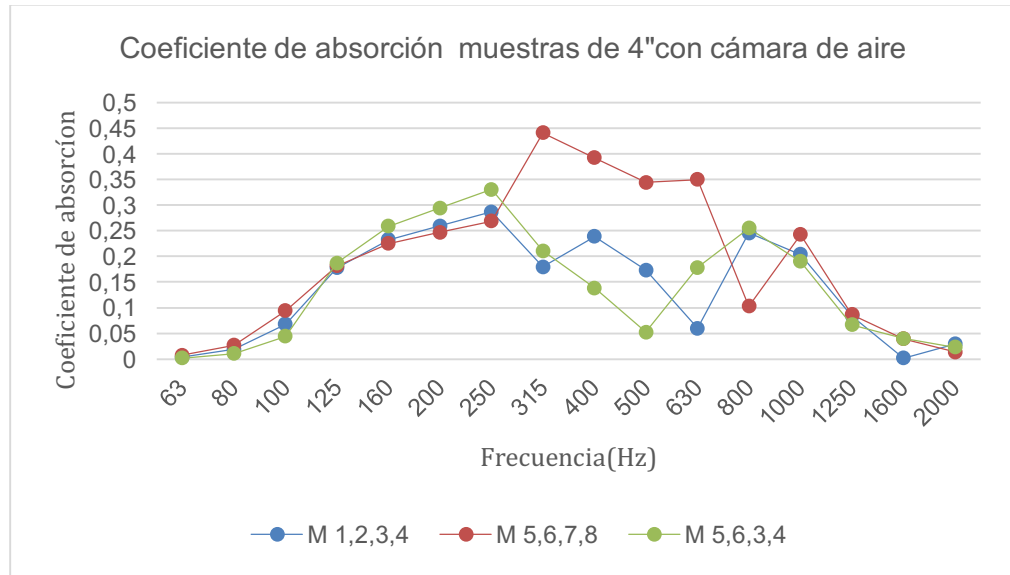
**Figura 44:** Coeficiente de absorción de muestras de 4"



A continuación se presenta el coeficiente de absorción obtenido con la configuración anterior pero añadiendo a cada ensayo una cámara de aire de 4", los resultados se pueden ver en la Figura 45.



**Figura 45:** Coeficiente de absorción muestras de 3" con cámara de aire.



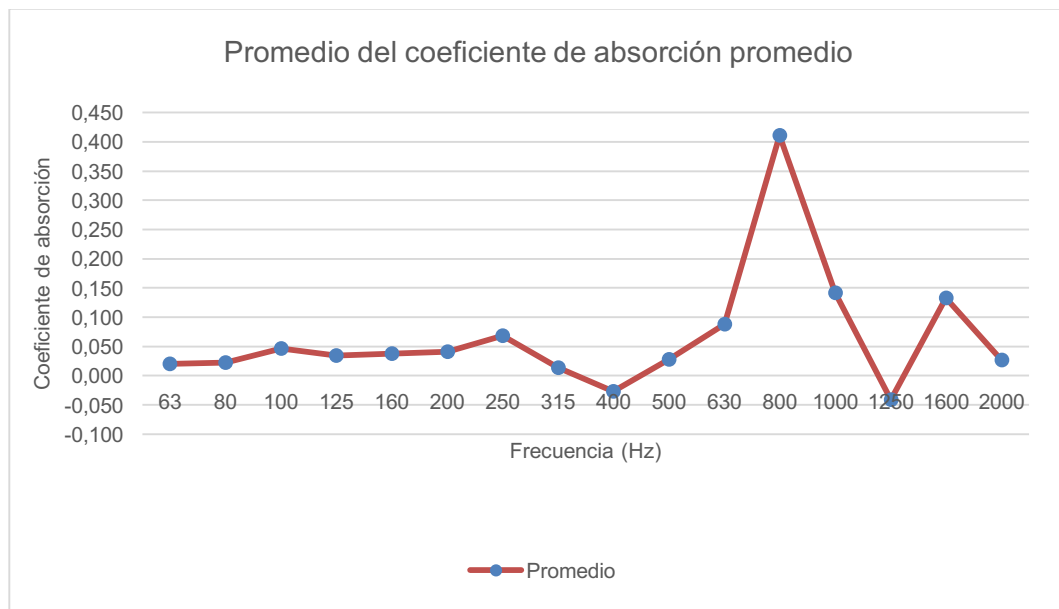


## 5 Análisis de resultados

### 5.1 Promedio del coeficiente de absorción.

De los resultados obtenidos correspondientes al coeficiente de absorción se obtiene un promedio dado por frecuencia de las 12 muestras que podemos ver en la Figura 46, la cual nos indica que los valores son significativamente útiles a valores por encima de 630 Hz ya que a partir de este punto se puede atenuar la energía incidente sobre la fibra cerca de un 30 % para el promedio de las muestras.

**Figura 46:** Promedio del coeficiente de absorción de las 12 muestras



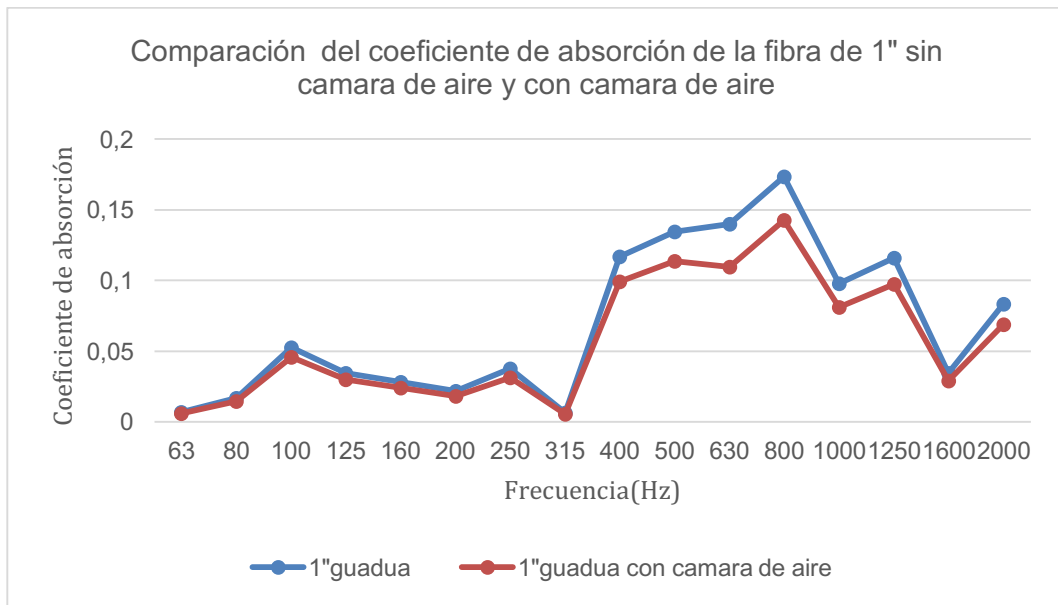
De los resultados obtenidos correspondientes al coeficiente de absorción se obtiene un promedio dado por frecuencia de las 12 muestras, mas la cámara de aire posterior a las muestras de 2" que podemos ver en la Figura 47, la cual nos indica que los valores son no son significativamente distintos.

**Figura 47:** Promedio coeficiente de absorción muestras 2"mas cámara de aire de 2"



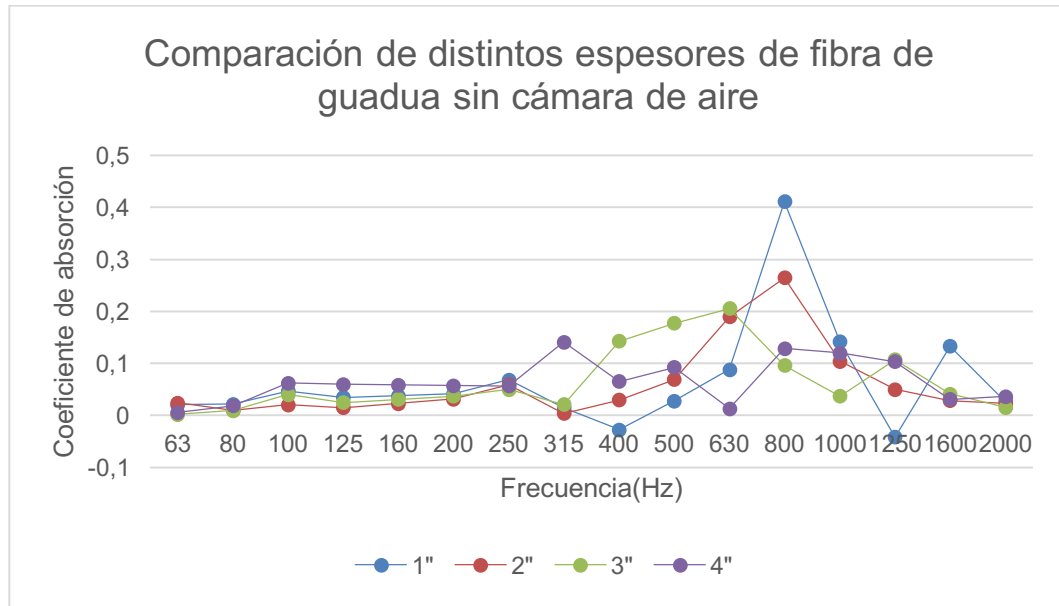
En la Figura 45. podemos observar la diferencia de los promedios de los ensayos de la fibra de guadua de 1"de espesor con y sin cámara de aire .

**Figura 48:** Comparación del coeficiente de absorción de la fibra de 1"sin cámara de aire y con cámara de aire.



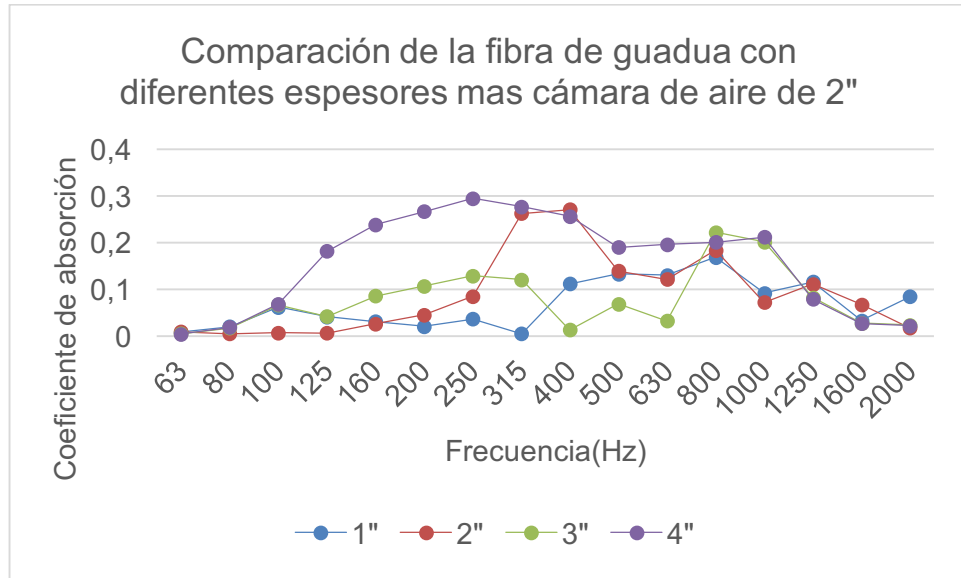
La comparación que se realizó entre los distintos espesores de la fibra del bambú guadua sin cámara de aire posterior se puede ver en la Figura 49. Donde se evidencia un aumento del coeficiente de absorción entre las frecuencias de 350Hz a 1250Hz de hasta un 10 %.

**Figura 49:** Comparación de distintos espesores de fibra de guadua sin cámara de aire

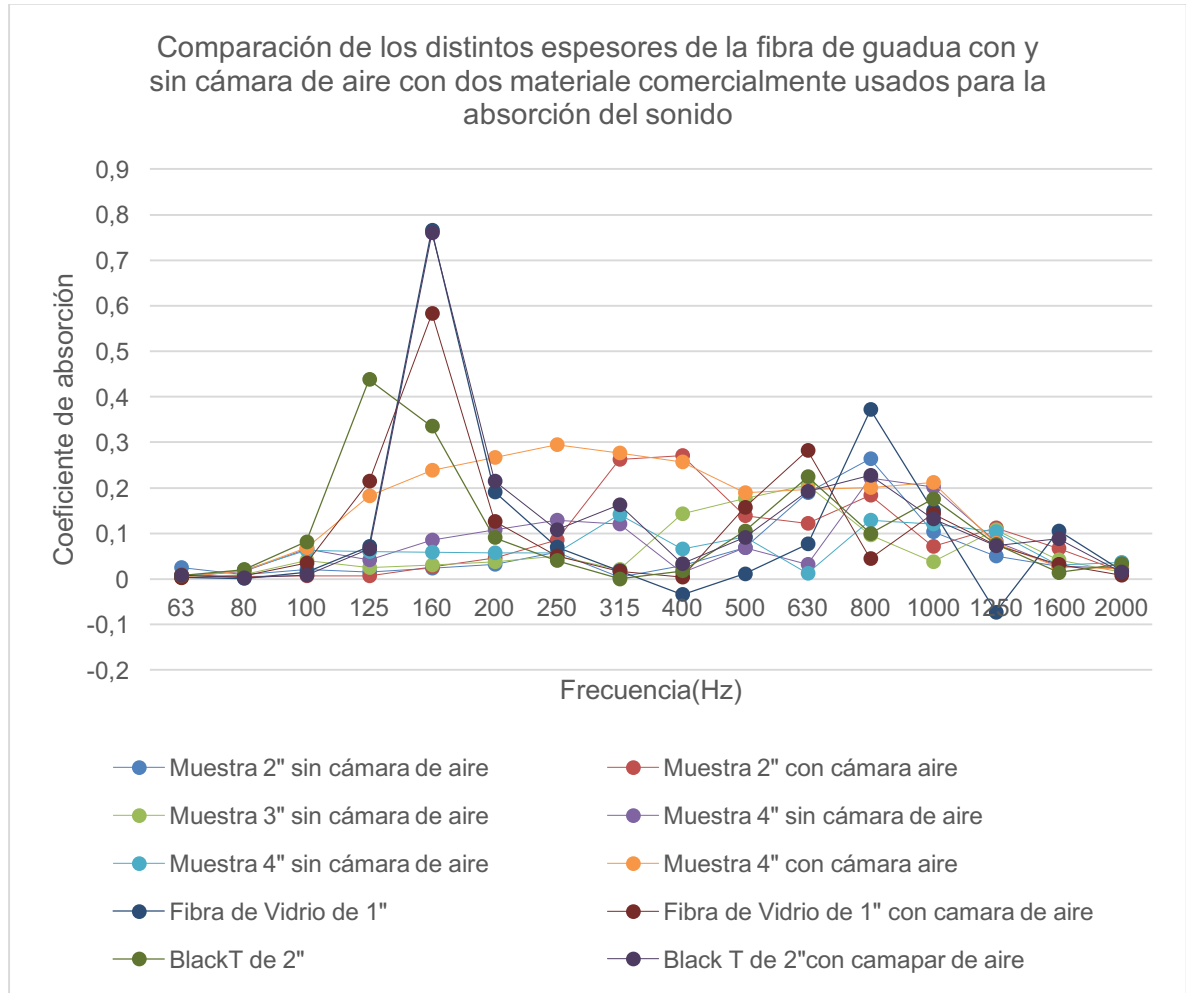


La diferencia del coeficiente de absorción de la fibra mas cámara de aire aumenta en una relación de 15% desde frecuencias aun mas bajas cerca de los 250Hz hasta los 1500Hz cuando se añade la cámara de aire para espesores mayores a 2" como se puede observar en la Figura 50.

**Figura 50:** Comparación de la fibra de guadua con diferentes espesores mas cámara de aire de 2"



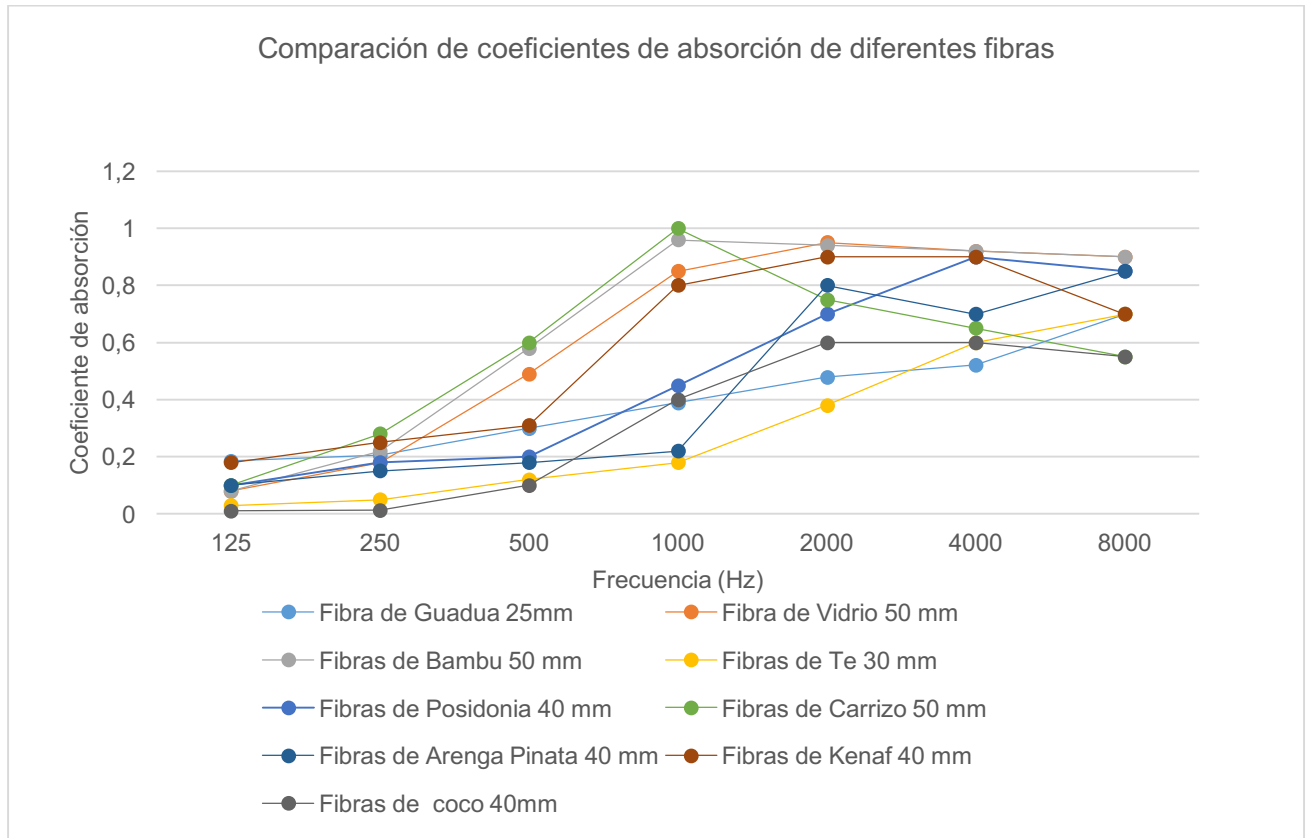
**Figura 51:** Comparación de los distintos espesores de la fibra de guadua con y sin cámara de aire con dos materiales comercialmente usados para la absorción del sonido



## 5.2 Comparación con otras fibras

Realizando un análisis comparativo con los valores de absorción evidenciado en el estado del arte con otras fibras naturales se encuentra que el coeficiente de absorción varía directamente con el espesor del material además de la densidad por metro cuadrado, en la Figura 37, se puede ver la diferencia que existe entre los distintos materiales, teniendo en cuenta los parámetros anteriormente mencionados, además se evidencia la correlación que existe con las fibras de té ya que los valores obtenidos para esta fueron medidos con una muestra con dimensiones parecidas a la planteada para la fibra de la guadua.

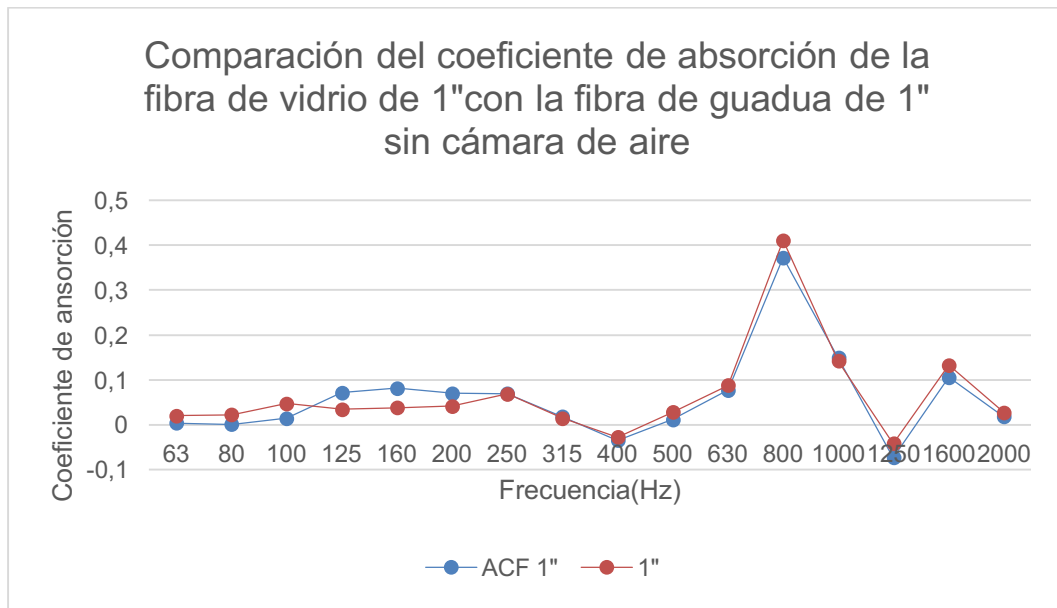
**Figura 52:** Comparación de coeficientes de absorción de diferentes fibras



Se realizó la comparación también para el coeficiente de absorción de la fibra de la guadua con la fibra de vidrio prensada de densidad  $34 \text{ Kg/m}^2$  en comparación la guadua cuya densidad es de  $9,6 \text{ Kg/m}^2$  por otro lado se evidencio que el orden y tamaño de los filamentos de la fibra de vidrio son mas pequeñas y están aglomeradas formado mayor cantidad de cavidades y mas pequeñas que los filamentos de la fibra de guadua como se puede ver en la Figura 53. Esto afecta directamente la energía disipada por las pequeñas cavidades de aire, por lo cual la absorción en la fibra de vidrio el mucho mayor que la de la fibra de la guadua.



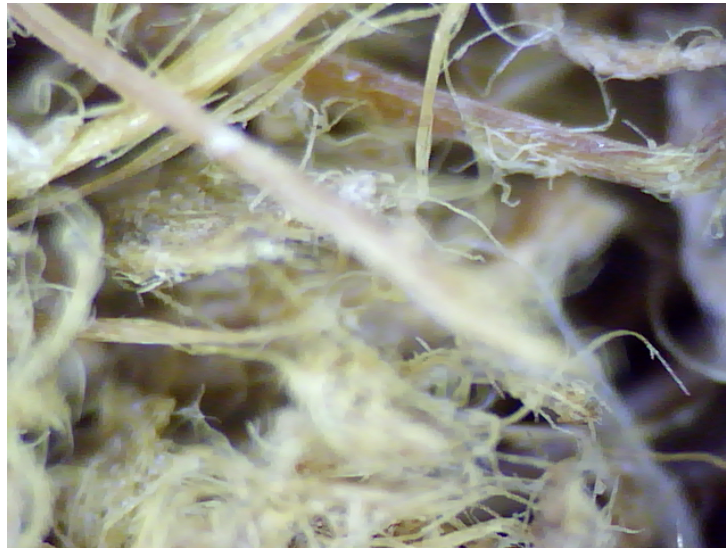
**Figura 53:** Comparación del coeficiente de absorción de la fibra de vidrio de 1" con la fibra de guadua de 1" sin cámara de aire.



**Figura 54:** Filamentos de la fibra de vidrio



**Figura 55:**Filamentos de la fibra de guadua

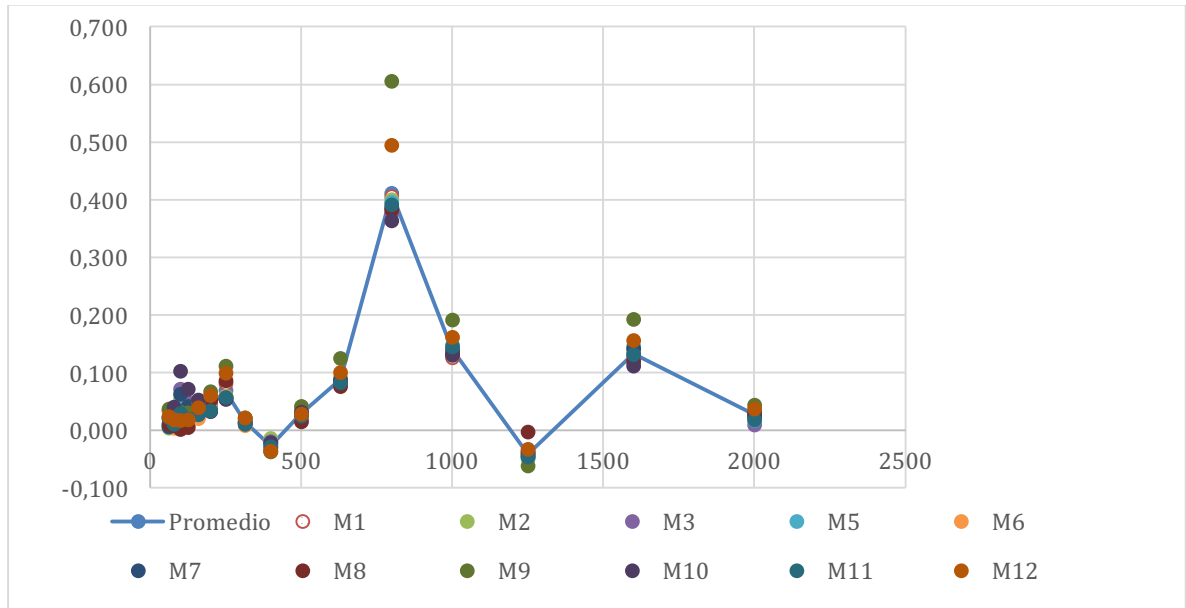


**Tabla 9:**Comparación del coeficiente de absorción de la fibra de vidrio de 25mm de espesor con la fibra de guadua de 25 mm de espesor

Frecuencia(Hz)	Acustifibra de 25mm	Fibra de Guadua 25mm
125	0,06	0,185
250	0,25	0,205
500	0,62	0,299
1000	0,91	0,389
2000	0,99	0,479

### 5.3 Análisis estadístico de las muestras

La dispersión encontrada muestra que no se tiene una variación importante entre cada muestra en función de la frecuencia, como se puede observar en la Figura 53, teniendo en cuenta que el promedio de la desviación estándar es 0,00479.

**Figura 56:**Dispersión de las muestras.

Para calcular el error estadístico tenemos en cuenta la desviación estándar de las muestras, pero como para este caso cada muestra fue evaluada para distintas frecuencias tomaremos el dato referente a la frecuencia de 1000 Hz como dato relevante a analizar.



## 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Como se pudo observar en la Tabla 9, el coeficiente de absorción de la energía acústica incidente en la muestra de la fibra de guadua es poco eficiente a frecuencias bajas y comienza a ser funcional a medida que aumenta la frecuencia como se indica en los valores de 500Hz, 1000Hz y 2000Hz.

Comparando los valores de absorción de la fibra del bambú guadua de 1" sin cámara de aire con el de la fibra de vidrio de 1" también sin cámara de aire como se puede ver en la Figura 53, es más eficiente la fibra de vidrio debido a que los filamentos son más pequeños creando mayor cantidad de cavidades.

En función del espesor de la fibra del bambú guadua se nota un aumento del coeficiente de absorción de cerca del 10 % para frecuencias entre 300Hz y 1250Hz lo que indica que el espesor aumenta el ancho de banda de uso del material.

El funcionamiento de la cámara de aire mejora el coeficiente de absorción si el espesor de la muestra es mayor a 2", además aumenta el ancho de banda de trabajo ya que como se evidencia en la Figura 50 este comienza a trabajar desde los 125 Hz.

La comparación del bambú *Phyllostachys viridis*, con respecto al bambú guadua nos evidencia un comportamiento de absorción similar para frecuencias por encima de los 1000Hz

Al tener en cuenta que a la fibra de la guadua no se le añadió ningún tipo de aglutinante para mantener su forma, se evidenció durante los ensayos la fragilidad en la manipulación de la misma motivo por el cual para futuras aplicaciones es necesario evaluar la posibilidad de añadir algún tipo de elemento que mejore la estabilidad física del material.

## **6.2 Recomendaciones**

Para futuras investigaciones es recomendable hallar filamentos de fibra mas finos y usar un aglutinante para darles firmeza y así realizar la caracterización y comparación con otras fibras de estructuras similares.

El uso comercial de la fibra de guadua dependerá también de las propiedades relacionadas con la temperatura y resistencia a la humedad para así poderse comparar en la mayoría de los aspectos a fibras de vidrio o lanas de roca se debería hacer un estudio correspondiente a estos ítems.

## 7 Anexo A: Código de programación en Matlab para la obtención del coeficiente de absorción.

```
clc
% Define constants:
freq = xlsread('Medicion final.xlsx','Simples','A:A'); % frequency
vector (Hz)
rho = 1.21; % densidad del aire (kg/m^3)
c = 343; % velocidad del sonido a 23 grados Celsius (m/s)
s = 0.068; % distancia entre microfones (m)
Zair = rho*c; % impedancia característica del aire (kg/m^2/s)
k = (2*pi*freq)/c; % numero de onda air (m^-1)
x1 = 0.218; % Distancia entre la muestra y el micrófono mas
alejado
Call1=xlsread('Medicion final.xlsx','Dobles Ar','V:V');% Llamado de la
amplitud de la función de transferencia de la muestra en posicion1
FCall1=xlsread('Medicion final.xlsx','Dobles Ar','W:W'); % Llamado de
la fase de la función de transferencia de la muestra
CAL11=Call11.*exp(1i*FCall1*pi/180);% Computo de la función de la fase y
la amplitud de la función de transferencia de la muestra.
Cal21=xlsread('Medicion final.xlsx','Dobles Ar','X:X'); % Llamado de la
amplitud de la función de transferencia de la muestra en posicion2
FCal21=xlsread('Medicion final.xlsx','Dobles Ar','Y:Y'); % Llamado de
la fase de la función de transferencia de la muestra en la posición 2
CAL21=Call11.*exp(1i*FCal21*pi/180); % Computo de la función de la fase
y la amplitud de la función de transferencia de la muestra de la
posicion2
H12=sqrt(CAL11.*CAL21);% Calculo de la función corregida para hallar el
coeficiente de reflexión.
R = ( H12 - exp(-1i.*k.*s) )./(exp(1i.*k.*s) - H12).*exp(2.*1i.*k.*x1);
alpha = 1 - abs(R).^2;% Calculo del coeficiente de reflexión

Fteroc=xlsread('Medicion final.xlsx','Teroct','A:A');% Vector de valores
de frecuencias en 1/3 de octava

%Ajuste de los valores de amplitud y fase a 1/3 de octava

for i=1:length(Fteroc)
    indice(i,1)=find(freq(:, :)<=Fteroc(i),1,'last')
end

for i=1:length(indice)
```

```

        alphater(i,1)=alpha(indice(i))
        Rteroc(i,1)=R(indice(i))
end

% Plots
figure(1)
plot(Fteroc,alphater,'o--b')
axis([0 4000 -1 2])
title('Absorption Coefficient','FontSize',12)
xlabel('Frequency (Hz)'), ylabel('Absorption Coefficient')
grid on
hold on

% Plots
figure(6)
plot(freq,Cal11,'b','LineWidth',2)
axis([0 1600 -5 5])
title('Cal11','FontSize',12)
xlabel('Frequency (Hz)'), ylabel('Absorption Coefficient')
grid on
hold on
plot(freq,Cal21,'r','LineWidth',2)
axis([0 1600 -5 5])
title('Cal21','FontSize',12)
xlabel('Frequency (Hz)'), ylabel('Absorption Coefficient')
grid on

% Plots
figure(4)
plot(freq,alpha,'r','LineWidth',2)
axis([0 1600 0 1])
title('HC','FontSize',12)
xlabel('Frequency (Hz)'), ylabel('Absorption Coefficient')
grid on

% Plots
figure(5)
plot(freq,abs(R),'r','LineWidth',2)
axis([0 1600 0 1])
title('HC','FontSize',12)
xlabel('Frequency (Hz)'), ylabel('Absorption Coefficient')
grid on

Datos=[Fteroc alphater abs(Rteroc)];

```



## BIBLIOGRAFIA.

- [1] F. Asdrubali, "Survey on The Acoustical Properties of New Sustainable Materials for Noise Control," *Euronoise*, pp. 1–10, 2006.
- [2] Organización de las Naciones Unidas, "Our Common Future," p. 318, 1987.
- [3] M. K. Dixit, J. L. Fernandez-Solis, S. Lavy, and C. H. Culp, "Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review," *Energy Build.*, vol. 42, no. 8, pp. 1238–1247, 2010.
- [4] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, "Decreto número 1285 de 2015, 'Por el cual se se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones,'" p. 4, 2015.
- [5] J. Ramis, R. Rey, J. Alba, L. Godinho, and J. Carbajo, "A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber," vol. 64, no. 313, 2014.
- [6] M. Hosseini Fouladi, M. Ayub, and M. Jailani Mohd Nor, "Analysis of coir fiber acoustical characteristics," *Appl. Acoust.*, vol. 72, no. 1, pp. 35–42, 2011.
- [7] J. Ramis, J. Alba, R. Del Rey, E. Escuder, and V. J. Sanchís, "Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf," *Mater. Construcción*, vol. 60, no. 299, pp. 133–143, 2010.
- [8] L. Ismail and M. Ghazali, "Sound Absorption of Arenga Pinnata Natural Fiber," *World Acad. Sci. ...*, pp. 804–806, 2010.
- [9] C. Díaz, M. Jiménez, M. a. Navacerrada, and A. Pedrero, "Propiedades acústicas de los paneles de carrizo," *Mater. Construcción*, vol. 62, no. 305, pp. 55–66, 2010.
- [10] U. P. D. E. Valencia, A. Rafael, and N. Lara, "“ Caracterización acústica de un material de origen biológico : fibras de posidonia ’ Agradecimientos.”
- [11] S. Ersoy and H. Küçük, "Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties," *Appl. Acoust.*, vol. 70, no. 1, pp. 215–220, 2009.
- [12] X. Yu, "Bamboo : Structure and Culture," 2007.
- [13] N. Tsujiuchi, T. Koizumi, Y. Ohshima, and T. Kitagawa, "An optimal design and application of sound-absorbing material made of exploded bamboo fibers Department of Mechanical Engineering," no. 1, pp. 2–8.
- [14] D. R. Griffin, F. a Webster, C. R. Michael, F. A. Everest, K. C. Pohlmann, T. Cox, P. D'Antonio, D. Albuquerque, J. Vieira, and C. Bastos, *Master Handbook of Acoustics*, vol. 4, no. 77. 2009.
- [15] H. Kuttruff, *Room acoustics*. 2009.
- [16] M. Arenas, Jorge Crocker, "Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials," *Noise Vib. Control Mag.*, pp. 12–17, 2010.
- [17] Sergio A.Morales, "Fibra de vidrio, pruebas y aplicaciones," *Inst. Politécnico Nac.*, p. 65, 2008.
- [18] N. E. En and N. Une-env, "Norma Española," 2004.
- [19] N. Técnica, "NTC," no. 571, 2007.

