



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE DIFERENTES  
MUESTRAS DE UN MATERIAL NO TEJIDO DE FIBRAS NATURALES  
COMPUESTAS DE UN GRAN PORCENTAJE DE MUSACEAE

AUTOR

MARCELO ALEJANDRO ARGOTTI GÓMEZ

AÑO

2017



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE DIFERENTES  
MUESTRAS DE UN MATERIAL NO TEJIDO DE FIBRAS NATURALES  
COMPUESTAS DE UN GRAN PORCENTAJE DE MUSACEAE

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesora Guía

MSc. María Bertomeu Rodríguez

Autor

Marcelo Alejandro Argotti Gómez

Año

2017

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

María Bertomeu Rodríguez

Master en Gestión y Evaluación de la Contaminación Acústica

Pasaporte: 210267

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Luis Alberto Bravo Moncayo  
Ingeniero Acústico, MBA  
CI: 1711710606

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

---

Marcelo Alejandro Argotti Gómez

C.C. 1719180620

## AGRADECIMIENTOS

A mi Monita bella, madre y amiga incondicional. A mi hermano Luis Alfonso, la persona a quien más amo en este mundo. A mi padre, y a todas aquellas personas que de alguna manera u otra han hecho que la realización de ésta investigación sea posible.

## DEDICATORIA

A mi sobrina Sarahi. Gracias  
por existir.

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación determina el proceso de cálculo y medición de los coeficientes de absorción de un material no tejido, de fibras naturales, compuesto de un alto porcentaje musáceo. El estudio se desarrolló en tres etapas principales, siendo: la determinación física, la medición de los coeficientes de absorción de las muestras musáceas en el tubo de impedancia y la generación de informes en base a los datos obtenidos.

Las mediciones se realizaron en base a las normativas UNE EN ISO 10534-2 “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”, segunda parte, “Método de la función de transferencia”, en la cual se establecen lineamientos para proporcionar con fiabilidad, la toma de medidas y obtención de datos referentes al coeficiente de absorción de un material en estudio.

Posteriormente, las muestras fueron analizadas en base a la normativa ASTM E 2611-09 bajo el nombre de “Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method”, para la obtención de la pérdida por transmisión (TL, por sus siglas en inglés). Las mediciones, sus respectivos resultados y las dificultades que ocurrieron durante la investigación, son discutidos y analizados con el objetivo de estimar el posible montaje del material musáceo en el campo del acondicionamiento acústico.



## ABSTRACT

This study determines the calculation process and measurement of sound absorption coefficients of a nonwoven material of natural fibers; compound of a high percentage of musaceae. The study was developed in three main stages, being: the physical determination, the measurement of the absorption coefficients of the samples in the impedance tube and the generation of reports on the basis of the data obtained.

The measurements were carried out on the basis of the standards UNE EN ISO 10534-2 "Determination of the acoustic absorption coefficient and acoustic impedance in impedance tubes", second part, "Method of the transfer function", which establishes the guidelines for providing reliably measurements and information about the absorption coefficient of a material in study.

Subsequently, the musaceae samples were analyzed based on the ASTM E 2611-09 normative, under the name of "Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method", in order to obtain the transmission loss (TL). The measurements, their respective results and the difficulties that occurred during the investigation, are discussed and analyzed with the aim of estimating the possible assembly of the musaceae material in the field of acoustic conditioning.

# ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Alcance .....	3
1.3. Justificación e Hipótesis .....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. Longitud de onda.....	6
2.1.1. Ondas planas.....	7
2.2. Propagación del sonido en un tubo .....	8
2.2.1. Ondas estacionarias en un tubo .....	9
2.3. Coeficiente de absorción sonora .....	10
2.3.1. Métodos de obtención de coeficiente de absorción sonora .....	12
2.3.1.1. Determinación de $\alpha$ en cámara reverberante .....	12
2.3.1.2. Determinación de $\alpha$ en tubo de impedancia .....	13
2.3.1.3. Determinación de $\alpha$ en campo libre o in-Situ .....	14
2.4. Reflexión Sonora.....	15
2.4.1. Coeficiente de reflexión acústica para incidencia normal .....	16
2.5. Impedancia acústica específica.....	17
2.6. Pérdida por transmisión (TL) .....	18
2.7. Función de transferencia .....	19
2.8. Materiales absorbentes del sonido .....	20
2.8.1. Materiales porosos .....	21
2.8.1.1. Materiales porosos rígidos .....	22
2.8.1.2. Materiales porosos elásticos .....	22
2.8.1.3. Materiales porosos fibrosos .....	22

2.8.2.	Cortina porosa .....	24
2.8.3.	Resonadores .....	25
2.9.	Normativas .....	25
2.9.1.	UNE EN ISO 10534-2.....	25
2.9.2.	UNE EN ISO 3382-2.....	26
2.9.3.	UNE EN ISO 11654 .....	26
2.9.4.	UNE EN ISO 354 .....	27
2.9.5.	ASTM E 2611- 09 .....	27
2.10.	Fibra de banano (musaceae).....	28
3.	<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE ENSAYO .....</b>	<b>31</b>
3.1.	Equipamiento de Medición .....	31
3.1.1.	Sistema de medición Spectronics ACUPRO 4 .....	31
3.1.2.	Altavoz JBL 2426J .....	33
3.1.3.	Tubo de impedancia ACUPRO.....	33
3.1.4.	Micrófonos .....	34
3.1.5.	Interfaz Data Translation 9837 <sup>a</sup> .....	35
3.1.6.	ACUPRO Software .....	35
3.1.7.	Portamuestras o soporte de la muestra de ensayo .....	36
3.1.8.	Cortador de muestras .....	37
3.1.9.	Anemómetro Airflow TA440 .....	37
3.2.	Montaje y Mediciones preliminares .....	38
3.2.1.	Temperatura .....	39
3.2.2.	Montaje de micrófonos .....	39
3.2.3.	Calibración de micrófonos .....	40
3.2.4.	Relación señal – ruido .....	41
3.3.	Montaje y preparación de las muestras de ensayo.....	42
3.3.1.	Corte de la muestra de ensayo.....	42
3.3.2.	Montaje de la muestra de ensayo.....	44
3.4.	Procedimiento de ensayo .....	47
3.4.1.	Parámetro ‘Absorption’ .....	48
3.4.1.1.	Configuración DAQ .....	49

3.4.1.2.	Configuración Setup.....	50
3.4.1.3.	Configuración Calibration / TF Measurement.....	52
3.4.1.4.	Calibración de fase de los micrófonos .....	53
3.4.1.5.	Obtención de los coeficientes de absorción .....	56
3.4.2.	Parámetro 'Transmission Loss'.....	60
3.4.2.1.	Configuración DAQ .....	63
3.4.2.2.	Configuración Setup.....	64
3.4.2.3.	Configuración Calibration / TF Measurement.....	65
3.4.2.4.	Calibración de fase de micrófonos .....	65
3.4.2.5.	Obtención de las mediciones por TL (Transmission Loss).....	69
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
4.1.	Panel M4.....	75
4.2.	Panel MA4.....	77
4.3.	Panel M10.....	78
4.4.	Panel MA10.....	80
4.5.	Panel M8.....	81
4.6.	Panel MA8.....	83
4.7.	Panel M20.....	84
4.8.	Panel MA20.....	86
4.9.	Panel M50A40.....	87
4.10.	Panel M75A40.....	89
4.11.	Gráficos comparativos para el coeficiente de absorción sonoro .....	90
4.11.1.	Gráfico comparativo para todas las muestras de ensayo.....	90
4.11.2.	Gráfico comparativo para muestras sin aglutinante .....	91
4.11.3.	Gráfico comparativo para muestras con aglutinante .....	92
4.11.4.	Gráfico comparativo para muestras simples .....	93
4.11.5.	Gráfico comparativo para muestras mixtas .....	95
4.11.6.	Gráfico comparativo M75A40 vs ROCDAN 231/40 .....	96

4.12. Gráfico comparativo para todas las muestras de .....ensayo (TL) .....	97
5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	100
6. CAPÍTULO VI. PROYECCIONES .....	101
6.1. Compuesto híbrido reforzado Epoxi con fibra de yute y musácea. ....	102
6.2. Compuesto híbrido reforzado Epoxi con fibra de lino y musácea.....	104
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	106
7.1. Conclusiones.....	106
7.2. Recomendaciones.....	109
REFERENCIAS.....	111
ANEXOS .....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Longitud de onda.....	6
Figura 2. Ilustración de una onda plana .....	7
Figura 3. Propagación del sonido en un tubo.....	8
Figura 4. Ondas estacionarias en un tubo para tres casos de propagación.....	10
Figura 5. Balance energético para una onda incidente en una partición. ....	11
Figura 6. $P_+$ onda incidente, $P_-$ onda reflejada en un tubo de impedancia. ....	14
Figura 7. Reflexión sonora sobre una superficie. ....	16
Figura 8. Impedancia acústica de diferentes medios de propagación.....	18
Figura 9. Esquema de un material poroso sólido. ....	21
Figura 10. Esquema de absorción de materiales fibrosos y porosos. ....	23
Figura 11. Cortina porosa frente a una pared rígida.....	24
Figura 12. Resonador con placa perforada. ....	25
Figura 13. Fibra del vástago del pseudo-tronco de la musácea. ....	29
Figura 14. Pasos para la preparación de la fibra musácea: a) planta de banano, b) corte, c) secado, d) remojo, e) resecado y f) tejido .....	30
Figura 15. Tubo de impedancia ACUPRO 4 Measurement System.....	32
Figura 16. Altavoz JBL 2426J.....	33
Figura 17. Tubo de impedancia ACUPRO.....	34
Figura 18. Micrófonos sistema ACUPRO. ....	34
Figura 19. Módulo de adquisición de datos 'Data Translation 9837. ....	35
Figura 20. Captura ACUPRO Software. ....	36
Figura 21. Portamuestras sistema ACUPRO. ....	36
Figura 22. Cortador de muestras sistema ACUPRO. ....	37
Figura 23. Anemómetro Airflow TA440. ....	38
Figura 24. Disposición del equipo de ensayo .....	38
Figura 25. Inserción del micrófono a través del soporte.....	39
Figura 26. Métodos de corte para distintas muestras.....	43
Figura 27. Cortes para muestras musáceas de distintas densidades y espesores: a) M4, b) M10, c) MA10 y d) MA4 .....	44
Figura 28. Muestra montada correctamente en el tubo.....	45

Figura 29. Ajuste de la posición del pistón .....	46
Figura 30. Ventana principal software ACUPRO.....	47
Figura 31. Captura parámetro Absorption. ....	49
Figura 32. Captura pestaña DAQ. ....	50
Figura 33. Captura parámetro Setup.....	51
Figura 34. Captura parámetros Calibration/ TF Measurement. ....	52
Figura 35. Captura para la primera calibración de micrófonos. ....	54
Figura 36. Captura para la segunda calibración de micrófonos. ....	55
Figura 37. Captura función de transferencia para espuma de 12 mm.....	57
Figura 38. Captura gráfico coeficiente de absorción espuma de 12 mm.....	58
Figura 39. Captura gráfico coeficientes de absorción para de bandas de 1/3 de octava.....	59
Figura 40. Captura archivo de Excel. ....	60
Figura 41. Conexión Tubo de impedancia para la obtención de TL. ....	61
Figura 42. Terminaciones o cargas para el tubo TL del sistema ACUPRO.....	62
Figura 43. Ventana principal para la medición de TL. ....	63
Figura 44. Captura configuración DAQ para obtención TL.....	64
Figura 45. Captura configuración Setup para la obtención de TL. ....	64
Figura 46. Captura parámetro Calibration/TF Measurement para la obtención de TL. ....	65
Figura 47. Captura diagrama obtención TL. ....	66
Figura 48. Captura primer resultado para las 3 funciones de transferencia. ....	67
Figura 49. Captura segunda toma para la función de transferencia.....	68
Figura 50. Captura obtención TL para carga anecoica A. ....	70
Figura 51. Captura medición TL para carga rígida B.....	71
Figura 52. Captura archivos de adquisición de datos para TL. ....	72
Figura 53. Captura TL para una muestra de espuma de 25 mm.....	72
Figura 54. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M4 .....	76
Figura 55. Muestra de ensayo M4 y su respectivo esquema. ....	76
Figura 56. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA4.....	77
Figura 57. Muestra de ensayo MA4 y su respectivo esquema. ....	78
Figura 58. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M10. ....	79

Figura 59. Muestra de ensayo M10 y su respectivo esquema. ....	79
Figura 60. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA10. ....	80
Figura 61. Muestra de ensayo MA10 y su respectivo esquema. ....	81
Figura 62. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M8. ....	82
Figura 63. Muestra de ensayo M8 y su respectivo esquema. ....	82
Figura 64. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA8. ....	83
Figura 65. Muestra de ensayo MA8 y su respectivo esquema. ....	84
Figura 66. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M20. ....	85
Figura 67. Muestra de ensayo M20 y su respectivo esquema. ....	85
Figura 68. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA20. ....	86
Figura 69. Muestra de ensayo MA20 y su respectivo esquema. ....	87
Figura 70. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M50A40. ....	88
Figura 71. Muestra de ensayo MA4 y su respectivo esquema. ....	88
Figura 72. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M75A40. ....	89
Figura 73. Muestra de ensayo MA4 y su respectivo esquema. ....	90
Figura 74. Gráfico comparativo para todas las muestras de ensayo. ....	91
Figura 75. Gráfico comparativo para muestras sin aglutinante. ....	92
Figura 76. Gráfico comparativo para muestras con aglutinante. ....	93
Figura 77. Gráfico comparativo para muestras simples (sin superposición de capas). ....	94
Figura 78. Gráfico comparativo para muestras mixtas (capas superpuestas)..	96
Figura 79. Gráfico comparativo DANOSA vs Musácea. ....	97
Figura 80. Gráfico comparativo M4 vs. MA4. ....	98
Figura 81. Importancia del ajuste de una muestra dentro del tubo de Kundt. ..	99
Figura 82. Gráfico termo-gravimétrico combinado para los diferentes compuestos de material de yute y musácea. ....	103
Figura 83. Representación esquemática de las capas del material híbrido compuesto de fibra de lino y musácea. ....	104



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clases de absorción sonora .....	27
Tabla 2. Especificaciones técnicas tubo de impedancia ACUPRO 4 .....	32
Tabla 3. Codificación de las muestras musáceas .....	74
Tabla 4. Datos de entrada panel M4 .....	75
Tabla 5. Datos de entrada panel MA4.....	77
Tabla 6. Datos de entrada panel M10 .....	78
Tabla 7. Datos de entrada panel MA10.....	80
Tabla 8. Datos de entrada panel M8 .....	81
Tabla 9. Datos de entrada panel MA8.....	83
Tabla 10. Datos de entrada panel M20 .....	84
Tabla 11. Datos de entrada panel MA20.....	86
Tabla 12. Datos de entrada panel M50A40.....	87
Tabla 13. Datos de entrada panel M75A40.....	89
Tabla 14. Análisis económico para completar la ficha técnica del material....	101

## 1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Las fibras vegetales atraen el interés de ingenieros, investigadores, profesionales y científicos de todo el mundo como una alternativa estructural al uso de fibras sintéticas poliméricas, debido a sus características principales como son: bajo peso, bajo coste, buenas propiedades mecánicas, componentes no abrasivos, responsable con el medio ambiente y con excelentes características biodegradables. En países como Italia y Canadá ya se hacen estudios sobre las propiedades acústicas de algunos materiales naturales de desecho como son: madera, cáñamo, coco, caña, kenaf, lana de oveja y cartón (Berardi y Iannace, 2015, p. 841).

En las últimas décadas, las fibras naturales como refuerzo alternativo en compuestos de polímeros han atraído la atención de muchos investigadores y científicos debido a sus ventajas con respecto a las fibras convencionales de vidrio y de carbono (Sanjay, Arpitha y Yogesha, 2015, p. 2960). Materiales híbridos y naturales de cualquier tipo son el ápice para las exigencias actuales.

Desde ese punto de vista, se ha llevado a cabo una revisión detallada para hacer uso de las fibras naturales (tales como la musácea, presente en el tallo del plátano), disponible en abundancia en las zonas tropicales de nuestro país. Ecuador cuenta con una gran cantidad de materia prima con alto contenido musáceo, proveniente de los procesos de separación o rechazo de las industrias bananeras. De acuerdo al Ministerio de Comercio Exterior (MCE), el 30% de la oferta mundial de banano proviene de Ecuador, siendo la actividad bananera, una importante industria generadora de trabajo e ingresos a, aproximadamente, 2 millones de personas involucradas en las diferentes

etapas de su cadena de valor. La superficie cosechada de banano se estima en unas 214,000 hectáreas, en su mayoría en plantaciones tecnificadas que cuentan con el aval de certificaciones internacionales de calidad (Ministerio de Comercio Exterior, 2015).

Complementando lo antes mencionado, la cantidad de material de rechazo en los distintos procesos de cosecha del banano y/u otras variedades musáceas, se convierte en una opción viable, como un planteamiento sostenible, a la problemática nacional del manejo y desarrollo de iniciativas que promuevan el uso de materiales reciclados.

En las visitas realizadas a empresas comercializadoras de materiales acústicos en la ciudad de Quito, se pudo constatar la ausencia de métodos investigativos sobre materiales alternativos que generen menor impacto ambiental, y que puedan ser fabricados en nuestro país. Por ende, a través de mediciones experimentales hechas en laboratorio, existe la necesidad de promover el estudio entre la estructura del material musáceo y las ondas de sonido.

Industrias Ambientales DOSEL, es una empresa ecuatoriana dedicada a la búsqueda e implementación de proyectos relacionados con el reciclaje. Hoy por hoy, fabrican geo-mantos hechos a partir del prensado de fibras vegetales provenientes de la musácea. La tendencia actual de DOSEL se encuentra en el diseño de materiales naturales absorbentes de sonido, capaces de sustituir a los materiales sintéticos más utilizados en el mercado mundial.

## 1.2. Alcance

El alcance de la presente obra está dedicado a la evaluación de las propiedades acústicas de la fibra vegetal musácea (extraído del tallo aparente de la planta). Además, se mostrará que la absorción sonora de este tipo de material, puede ser controlada y significativamente mejorada por medio de procesos de fabricación adecuados.

Las mediciones se llevarán cabo en un ambiente controlado, utilizando un sistema de tubo de impedancia ACUPRO proporcionado por la carrera de Ingeniería de Sonido y Acústica de la Universidad de las Américas (UDLA) para las frecuencias que van desde 50 Hz a 5,7 kHz. Los datos del tubo de impedancia serán utilizados para averiguar la correlación del material en base a dos indicadores principales:

- Coeficiente de Absorción ( $\alpha$ )
- Pérdida por transmisión (TL)

En la primera sección de la investigación, se introducirá el marco referencial que avala el estudio de los diferentes componentes y constituyentes del material elegido. A continuación, se analizarán las propiedades acústicas del material en base a su debido proceso de montaje, así como la caracterización del resultado de sus mediciones. En la última parte, se presentará un informe comparativo de resultados desde un enfoque basado en el modelado del material y los resultados experimentales obtenidos en laboratorio.

### 1.3. Justificación e Hipótesis

Hoy en día, existe una demanda progresiva de materiales de construcción que puedan satisfacer necesidades de tipo estructural, ambiental, térmico y acústico; incluyendo a estos últimos en distintos parámetros de aislamiento y absorción acústica. Los materiales acústicos fabricados a partir de materiales reciclados aportan una efectiva contribución medioambiental en los edificios, en comparación al uso de varios materiales sintéticos disponibles en el mercado.

Al cuantificar los parámetros acústicos claves del material en estudio, se pretende determinar su uso; ya sea éste para aislamiento o acondicionamiento acústico. Se presenta así, una nueva e importante alternativa en el mercado nacional que sirva como refuerzo estructural acústico, en contraposición a materiales como la lana de roca y lana de vidrio, que acarrearán una desventaja sustancial en cuanto a contaminación, tiempo, y coste de implementación.

Adicionalmente, se pretende promover la investigación y el reconocimiento profesional de la caracterización acústica de distintos materiales vegetales hallados en nuestro país; necesidades propias en áreas donde la Universidad de las Américas (UDLA) está incursionando recientemente.

Teniendo en cuenta lo comentado anteriormente, se plantea la siguiente hipótesis: El diseño de un material acústico absorbente, con alto contenido musáceo, enfocado al mejoramiento del manejo de los recursos naturales, y los residuos de los procesos industriales del banano en el Ecuador implicaría la implementación de técnicas que permitan la sustitución de fibras sintéticas, hacia fibras naturales que sean responsables con el medio ambiente. Consecuentemente, aumentaría la demanda nacional de materiales acústicos alternativos que puedan ser aplicados y distribuidos por todos los sectores

empresariales y comerciales dedicados, por su bajo costo y excelente desempeño acústico; aplicable a cualquier recinto o lugar en donde se desee disminuir el tiempo de reverberación  $T_{60}$ .

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Evaluar las propiedades acústicas de un material no tejido de fibras naturales compuestas de un gran porcentaje de musácea.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Examinar las mediciones del coeficiente de absorción sonora y pérdida por transmisión (TL) del material en estudio a través de un tubo de impedancia o tubo de Kundt.
- Relacionar el coeficiente de absorción sonora de diferentes muestras medidas en el laboratorio con diferentes parámetros claves (como el uso de aglutinante) que, puedan presentar enfoques apropiados a la caracterización y modelación de dicho material.
- Redactar un procedimiento de ensayo que cumpla con buenas prácticas de utilización basadas en la implementación y uso del sistema ACUPRO Version 4.5.
- Comparar el coeficiente de absorción acústico de la fibra musácea con un material de fibra sintética mineral, como es el caso de la lana de roca.

## 2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Longitud de onda

La longitud de onda corresponde a la distancia real entre dos puntos máximos consecutivos de presión acústica. Dicha distancia, se propaga en un determinado intervalo de tiempo bajo la misma condición de vibración, dirección y fase. La longitud de onda es el análogo espacial de un período de dos dimensiones, se representa por la letra griega “lambda” ( $\lambda$ ), se mide en metros y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

c : velocidad de onda [m/s]

f : frecuencia [Hz]

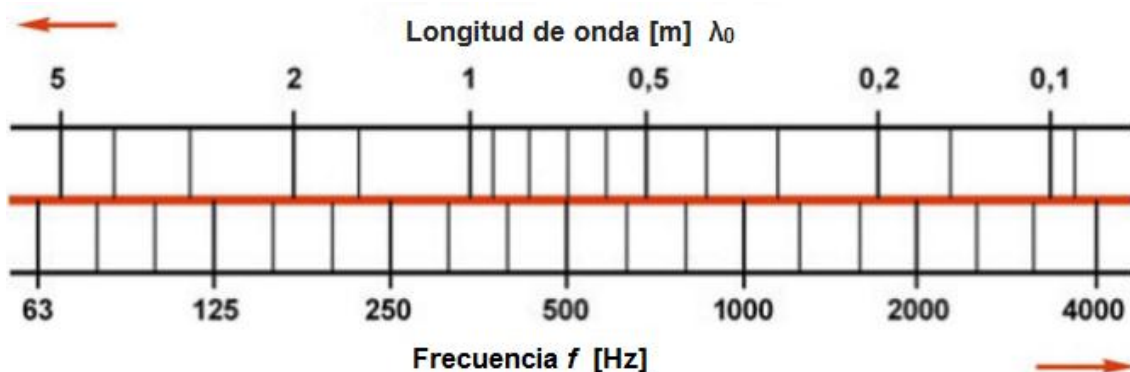


Figura 1. Longitud de onda

Adaptado de BaunetzWissen, 2016.

### 2.1.1. Ondas planas

Las ondas planas, también llamadas ondas longitudinales o unidimensionales, se caracterizan por formar frentes de onda paralelas a la dirección de propagación del movimiento de las partículas presentes en el medio. Así, cada partícula oscila entre la dirección de propagación de la onda y su estado de reposo inicial. De este modo, y debido a la compresión y descompresión del medio, que inicialmente es excitado por una fuente sonora; las consecutivas capas de aire se van empujando unas a otras transmitiendo el sonido. A continuación una gráfica que demuestra el desplazamiento de una onda plana:

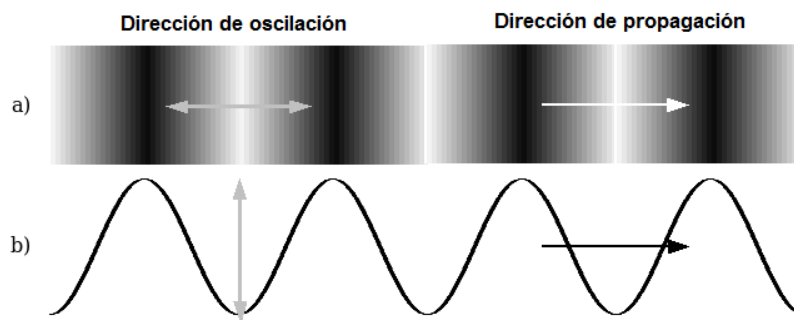


Figura 2. Ilustración de una onda plana

Adaptado de WIKIBOOKS, 2015.

La ecuación general de propagación de ondas planas, puede obtenerse a partir de la segunda ley de Newton:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:



- $\xi$  : es el desplazamiento de la partícula a lo largo del eje desde la posición inicial
- $x$  : la coordenada de la posición inicial de una partícula para el eje  $x$ .
- $c$  : es la velocidad de propagación de la onda en el medio.
- $t$  : tiempo [s]

## 2.2. Propagación del sonido en un tubo

El sonido consiste en la propagación de una perturbación a través de un medio elástico. Al utilizar un tubo de impedancia, y por lo expuesto anteriormente, se asume que a partir de cierta frecuencia para las dimensiones reales del tubo, solo pueden propagarse ondas planas. Inicialmente en el interior del tubo existe una gran cantidad de pequeñas partículas de aire, que al ser estimuladas por un altavoz (desde uno de los extremos del tubo), generan un campo sonoro esencialmente unidimensional.

Como se observa en la Figura 3, la perturbación generada viaja a lo largo del tubo desplazándose hacia la derecha, alejándose de la fuente de perturbación y comprimiendo el aire contiguo. Ésta compresión implica, otra vez, una tendencia a descomprimirse. Así, el proceso se repite en forma permanente.

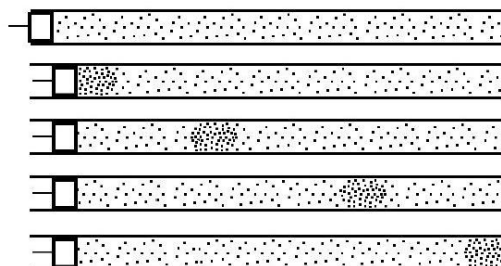


Figura 3. Propagación del sonido en un tubo

Tomado de Miyara, 2006, p. 2

Las ondas emitidas por el altavoz se reflejarán a lo largo del tubo superponiéndose unas intensidades con otras, dando lugar a las denominadas ondas estacionarias. Este tipo de ondas originan la formación de uno o más modos normales de vibración.

En estas condiciones, la ecuación de onda es de la forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

- x : representa la coordenada en la dirección axial del tubo
- p : presión acústica generada en el tubo
- t : tiempo [s]

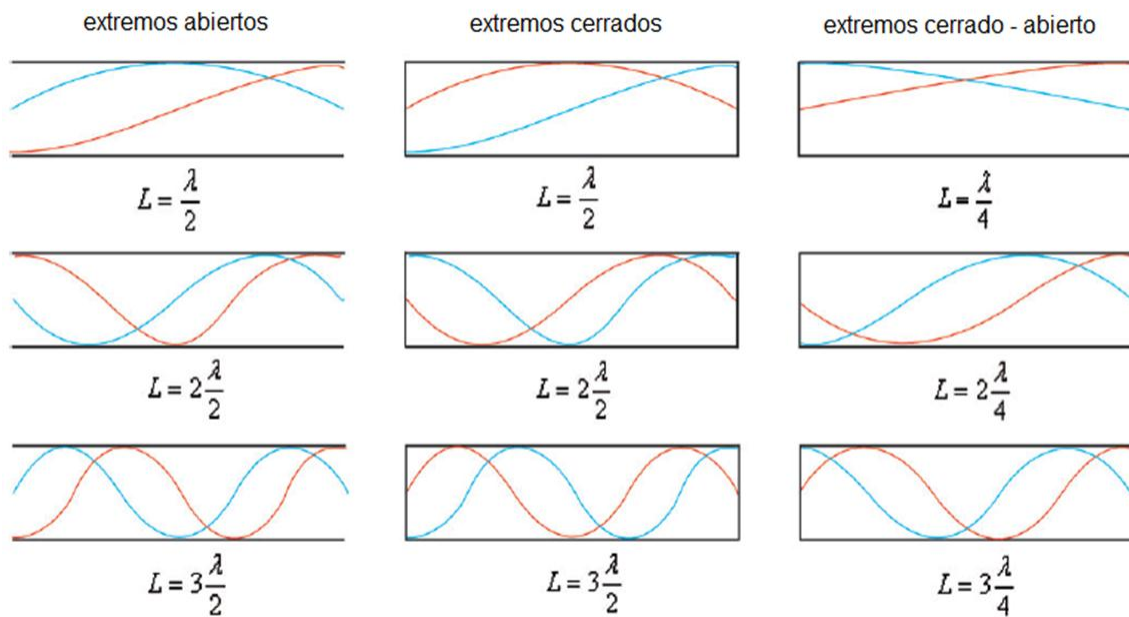
### 2.2.1. Ondas estacionarias en un tubo

Tres casos especialmente importantes se pueden distinguir para la propagación de sonido en un tubo.

- a) el tubo está abierto en ambos extremos
- b) el tubo está cerrado en ambos extremos
- c) el tubo está abierto en un extremo y cerrado en el otro extremo

Para cualquiera de los 3 casos anteriores, la interferencia de fase  $\Phi$  entre las ondas emitidas por la fuente y reflejadas por el tubo dará origen a la formación de ondas estacionarias.

Las ondas estacionarias están compuestas por movimientos ondulatorios a través de un eje referencial, que tienen la misma frecuencia y amplitud de onda pero que avanzan en sentido opuesto (Möser, 2009, p. 33).



azul: onda de presión, rojo: velocidad de onda

Figura 4. Ondas estacionarias en un tubo para tres casos de propagación

Adaptado de Ulrich, 2005, p. 86

### 2.3. Coeficiente de absorción sonora

El coeficiente de absorción sonora ( $\alpha$ ) puede describirse como la relación entre la energía sonora absorbida y la energía sonora incidente en un medio de propagación acústico. El medio de propagación o campo sonoro depende mucho de la estructura de las superficies donde se propaga el sonido ya que, una parte de la energía radiada por una fuente sonora se refleja al golpear con una superficie, mientras que el resto de energía es absorbido convirtiéndose en calor (Müller y Möser, 2013, p.49).

Un esquema de propagación de energía acústica en una pared se muestra en la Figura 5. Por lo tanto, el coeficiente de absorción cuantifica la capacidad de un material para transformar energía acústica en calor.

$$\alpha = \frac{I_A}{I_I} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$I_A$  : Intensidad absorbida

$I_I$  : Intensidad incidente

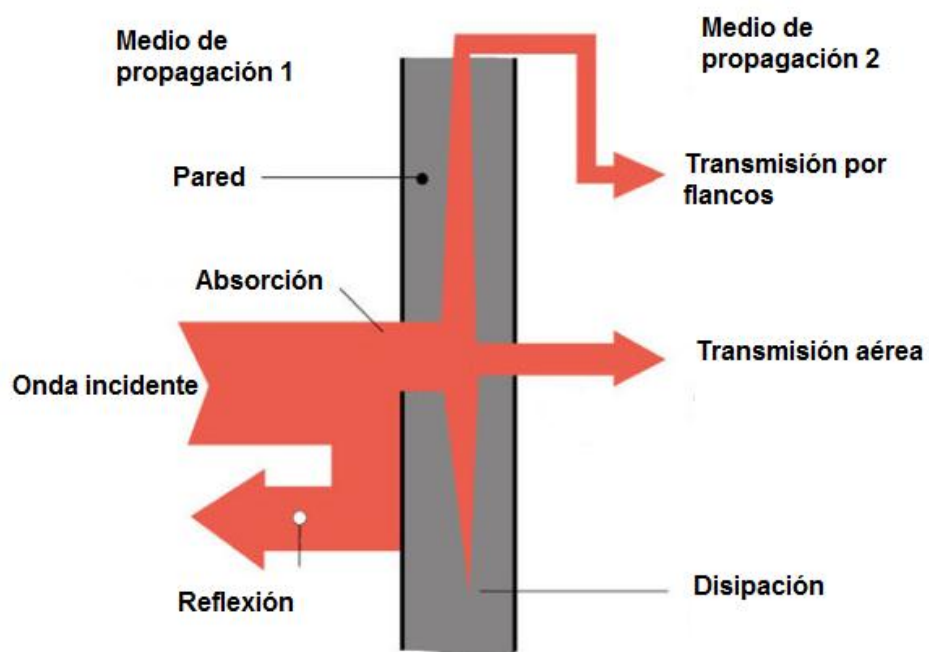


Figura 5. Balance energético para una onda incidente en una partición.  
Adaptado de BaunetzWissen, 2016.

### **2.3.1. Métodos de obtención de coeficiente de absorción sonora**

Dependiendo de los 3 diferentes métodos de medición, el coeficiente de absorción acústica puede estimarse en condiciones de incidencia normal u oblicua. Estos son:

- Determinación de  $(\alpha)$  en cámara reverberante
- Determinación de  $(\alpha)$  en tubo de impedancia
- Determinación de  $(\alpha)$  en campo libre

Para el presente trabajo de investigación, las mediciones de absorción fueron realizadas utilizando el método del tubo de impedancia o tubo de Kundt. A partir de este método es posible obtener fácilmente la absorción acústica de materiales utilizando pequeñas muestras que son fáciles de montar y desmontar. El procedimiento de medición se rige bajo la norma UNE EN ISO 10534-2.

#### **2.3.1.1. Determinación de $\alpha$ en cámara reverberante**

Una cámara de reverberación se utiliza para determinar la potencia acústica radiada por distintas fuentes, como también para evaluar el coeficiente de absorción de varios materiales o elementos en condiciones de laboratorio. En el mejor de los casos, prevalece al interior de la cámara una amplia gama de frecuencias que generan un campo sonoro casi perfectamente difuso (Bertó, del Rey, Alba y Teira, 2013, p. 1339).

En la norma UNE EN ISO 354 se describen ciertos parámetros de medición con desviaciones estándar, que proporcionan lineamientos de montaje dentro de la cámara reverberante y el campo de sonido requerido al interior de la

misma, para la obtención del tiempo de reverberación ( $T_{60}$ ) y el coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ). La determinación del tiempo de reverberación, según Sabine (1994, p. 3679); está basado en la formación de un balance de energía acústica en estado estacionario.

$$T_{60} = 0,161 \left( \frac{V}{A} \right) [s] \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

V : Volumen cámara reverberante

A : Absorción total de la cámara

### 2.3.1.2. Determinación de $\alpha$ en tubo de impedancia

El tubo de Kundt funciona como un filtro de modos para generar una onda plana al interior del mismo. Se utiliza para caracterizar el coeficiente de absorción acústico a incidencia normal de materiales absorbentes de sonido (Möser y Barros, 2009, p. 168).

El método puede ser utilizado también para la determinación de la impedancia acústica de los materiales absorbentes homogéneos e isótropos puesto que, sus propiedades físicas tales como resistencias al flujo de aire, porosidad, elasticidad y densidad se relacionan con los valores de impedancia.

En el tubo de Kundt la onda incidente se dirige hacia la superficie del material incorporado y se mueve a través de él. En la parte posterior del material, la onda de sonido se refleja y por lo tanto se mueve en la dirección negativa u

opuesta. La diferencia de tiempo de ejecución causado entre la onda incidente y la onda reflejada provoca un desplazamiento de fase  $\Phi$ .

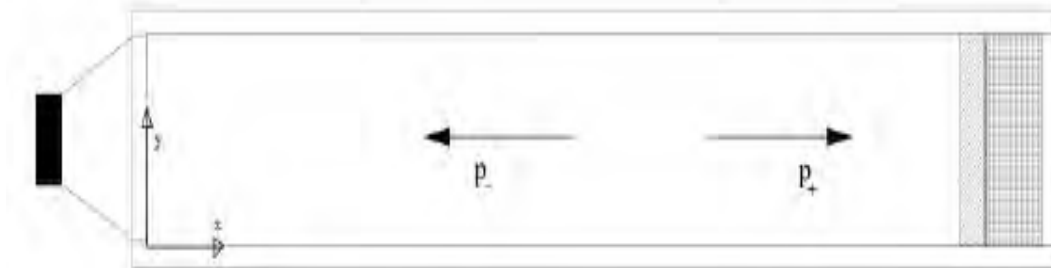


Figura 6.  $P_+$  onda incidente,  $P_-$  onda reflejada en un tubo de impedancia.

El campo sonoro producido al interior del tubo se describe matemáticamente a continuación:

$$p = p_0 \{ e^{-jkx} + r e^{jkx} \} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

- r : coeficiente de reflexión
- p : presión o amplitud de la onda
- k : número de onda

### 2.3.1.3. Determinación de $\alpha$ en campo libre o in-Situ

El método in-Situ se basa en la medición de la respuesta al impulso acústico de la superficie de un material. Una señal de secuencia de longitud máxima (MLS, por sus siglas en inglés) es reproducida a través de un altavoz y la respuesta

acústica de la superficie es registrada a través de un solo micrófono. A continuación, bajo procesamiento digital, la transformada rápida de Hadamard y de Fourier proporciona el coeficiente de absorción acústica de la superficie bajo prueba (Londhe, Rao y Blough, 2009, p. 130).

La medición debe tener lugar esencialmente en un campo libre, es decir; libre de reflexiones procedentes de superficies distintas a la superficie de ensayo. Esta técnica se basa en la norma ISO 13472-1 bajo el nombre de "Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ", primera parte, "Extended surface method". La determinación de la absorción sonora en campo libre se describe matemáticamente a continuación:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

- $\alpha$  : Coeficiente de absorción acústica
- $R$  : Factor de reflexión o grado de reflexión

#### **2.4. Reflexión Sonora**

La reflexión sonora en un medio de propagación, se genera cuando una onda incide sobre una superficie de separación contigua o cercana a la fuente de excitación inicial. Si dicha onda se desplaza hacia una superficie plana, ésta es reflejada (cambia dirección de propagación) de manera coherente hacia el punto de partida original (Kinsler, 1992, p. 288).



Si el tamaño de la superficie es demasiado pequeño en relación con la longitud de onda, el sonido la rodeara provocando difracción acústica.

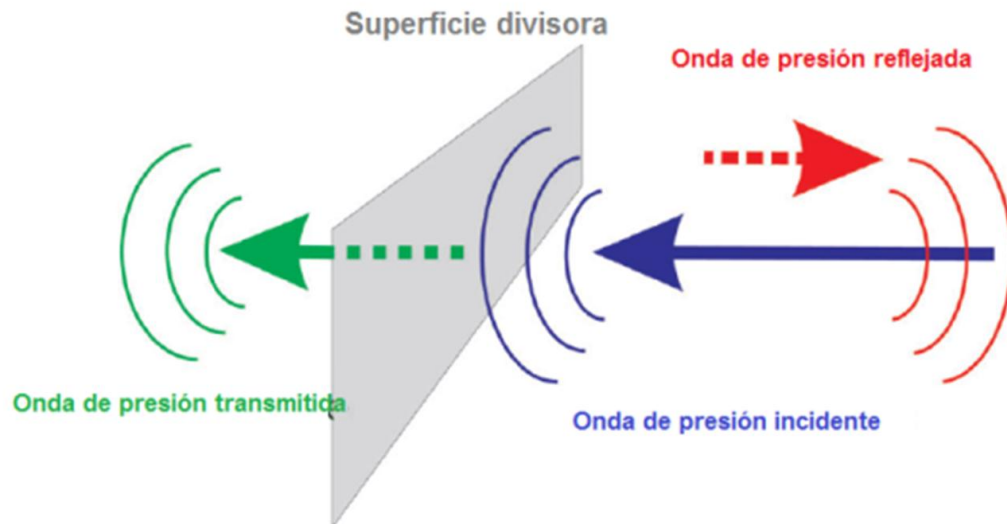


Figura 7. Reflexión sonora sobre una superficie.

Adaptado de Ulrich, 2005, p. 88

#### 2.4.1. Coeficiente de reflexión acústica para incidencia normal

El coeficiente de reflexión ( $r$ ) está definido como la relación entre las amplitudes complejas de la onda incidente y la onda reflejada, en el plano de referencia, para una onda plana con incidencia normal. Se describe matemáticamente a continuación:

$$r = \frac{p_- e^{jkx}}{p_+ e^{-jkx}} = R e^{j\phi_r} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

- $p_-, p_+$  : Amplitudes sonoras  
 $R$  : Grado de reflexión  
 $\Phi$  : Desplazamiento de fase  
 $r$  : coeficiente de reflexión  
 $k$  : número de onda

## 2.5. Impedancia acústica específica

La impedancia acústica específica ( $Z$ ) es una cantidad física que representa la resistencia u oposición de un medio a las ondas que se propagan sobre el mismo. Las influencias sobre la impedancia acústica están directamente relacionadas con las características del medio de propagación, los obstáculos, las transiciones a otros medios de propagación; así como también la frecuencia de oscilación de la onda y las superficies o áreas con propiedades acústicas determinadas.

Según la norma UNE EN ISO 10534-2, la impedancia acústica se define como la relación compleja entre la presión acústica y la velocidad del sonido presente en un plano de referencia específico.

$$Z = \frac{p}{v} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

- $Z$  : Impedancia normal de superficie  
 $p$  : Presión compleja de una onda sonora  
 $v$  : Velocidad del sonido en una superficie

Medio	Velocidad del sonido	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Impedancia acústica Pa.s/ m <sup>3</sup>
Aire (0 °C)	331 m/s	1,29	427
Agua (10 °C)	1.440 m/s	1.000	1.44 x 10 <sup>6</sup>
Acero	5.100 m/s	5.500	28 x 10 <sup>6</sup>

Figura 8. Impedancia acústica de diferentes medios de propagación.

Adaptado de ITWissen, 2016

## 2.6. Pérdida por transmisión (TL)

El índice de reducción sonora o también llamado pérdida por transmisión (TL, en sus siglas en inglés) describe el nivel de aislamiento acústico de un elemento o material constructivo. Dicho material debe tener la capacidad de evitar que la energía acústica incidente (transmitida por el aire) se propague a través del mismo (Müller y Möser, 2013, p. 137).

Su comportamiento aislante está determinado en decibelios (dB) y matemáticamente se define como:

$$TL = R = -10 \log \frac{W_2}{W_1} [dB] \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

$W_1$  : la potencia acústica incidente sobre el material

$W_2$  : la potencia transmitida a través del material

## 2.7. Función de transferencia

Una función de transferencia está representada por un modelo matemático que mediante un cociente relaciona la respuesta de un sistema lineal e invariante en el tiempo con una señal de entrada determinada; donde los cambios de dicha señal son descritos o calculados.

Para obtener la función de transferencia de un sistema, existen 2 posibilidades:

- **Análisis del sistema:** La estructura interna del sistema es conocida. Se puede modelar y calcular matemáticamente su comportamiento.
- **Identificación del sistema:** Apropiado para señales de entrada y de salida (X, Y) conocidas que puedan medirse o determinarse a través de la función de transferencia formando el cociente Y/X.

Suponiendo que las condiciones iniciales son nulas, la ecuación del sistema para el segundo caso es desconocida en el dominio de la frecuencia y del tiempo. Por consiguiente, se determina como la razón entre la transformada de Laplace de la salida del sistema, y la transformada de Laplace de la entrada del mismo.

A partir de la función de transferencia compleja, en base a la norma UNE EN ISO 10534-2; las presiones acústicas de la onda incidente  $P_I$  y reflejada  $P_R$ , para las dos posiciones de micrófono son:

$$P_1 = \widehat{P}_I e^{j k_0 X_1} + \widehat{P}_R e^{-j k_0 X_1} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$P_2 = \widehat{P}_I e^{j k_0 X_2} + \widehat{P}_R e^{-j k_0 X_2} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

$X_1$  : la distancia de la muestra a la posición de micrófono 1

$X_2$  : la distancia de la muestra a la posición de micrófono 2

$\widehat{P}_I$  y  $\widehat{P}_R$  : son módulos  $P_i$  y  $P_r$  en el plano de referencia ( $X=0$ )

La función de transferencia  $H_{12}$  para el ensayo acústico global es:

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{jk_0X_2} + r e^{-jk_0X_2}}{e^{jk_0X_1} + r e^{-jk_0X_1}} = H_r + jH_i \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

$H_r$  : es la parte real de  $H_{12}$

$H_i$  : es la parte imaginaria de  $H_{12}$

## 2.8. Materiales absorbentes del sonido

Para producir absorción sonora frecuentemente se utilizan materiales porosos o fibrosos, por ejemplo, lana mineral, lana de vidrio, fibra de coco, fieltro, viruta de madera o espumas de poros abiertos. La característica esencial de estos materiales consiste en que oponen una cierta resistencia frente al flujo de aire que se desplaza a través de las celdas o poros del material (Möser, 2009, p.199). Existe una amplia gama de materiales acústicos que brindan propiedades de absorción sonora en función de la frecuencia, el espesor, la composición química-física, el acabado superficial y el método de montaje.

### 2.8.1. Materiales porosos

Los materiales porosos están estructurados por múltiples fibras entrecruzadas y comprimidas entre sí. Al incidir una onda acústica sobre ellos, solo una porción muy pequeña es reflejada, puesto que; la energía acústica incidente es transformada en calor debido al roce interno del aire con las fibras del material. La absorción de dichos materiales depende mucho de la frecuencia incidente; siendo relativamente baja para frecuencias bajas (Kinsler, 1992, p. 340). Se clasifican en materiales porosos rígidos y materiales porosos elásticos.

La Figura 9 ejemplifica una sección transversal esquemática de un material poroso.

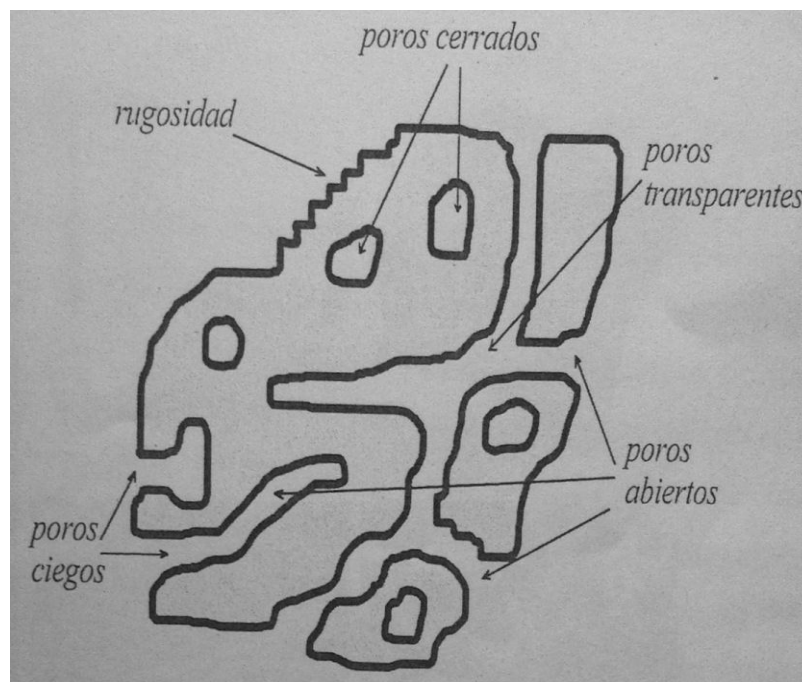


Figura 9. Esquema de un material poroso sólido.

Tomado de Arenas et al., 2011, p.31

### **2.8.1.1. Materiales porosos rígidos**

Se constituyen en forma de paneles acústicos para ser colocados en superficies suspendidas a través de componentes metálicos. Su coeficiente de absorción es pequeño en bajas frecuencias. El proceso de absorción del sonido en los materiales porosos rígidos es muy parecido al de los materiales granulares, donde la absorción de sonido se logra a partir de la viscosidad del aire contenido en el interior de los vacíos de interconexión que separan los gránulos (Llinares, Llopis y Sancho, 2008, p. 171).

### **2.8.1.2. Materiales porosos elásticos**

Su estructura se basa en la de un esqueleto elástico que permite aumentar la absorción sonora en función del aumento de la frecuencia. Se estima sin embargo, que al aumentar la densidad del mismo, comienza a comportarse como material reflejante.

### **2.8.1.3. Materiales porosos fibrosos**

Los materiales fibrosos incluyen aquellos fabricados con fibras naturales o sintéticas. Su estructura está constituida por una serie de túneles formados por los intersticios de las fibras presentes en el material (Arenas, Fernández, Tormos, Soriano y Silva, 2011, p. 30). Las fibras naturales se clasifican en vegetales (algodón, cáñamo, lino kenaf, madera, caucho, etc.), animales (lana, fieltro, etc.) y minerales como asbestos.

Las fibras sintéticas pueden componerse de celulosa (fibra de bambú), minerales (lana de vidrio, lana mineral de roca, cerámica, etc.) o polímeros (poliéster, polipropileno, etc.) (Arenas et al., 2011, p. 31).

Mientras más rígido sea la estructura el material, mayor será la velocidad relativa entre las partículas del aire en movimiento que atraviesan los canales del mismo; por lo tanto se produce mayor rozamiento y así mayor absorción acústica.

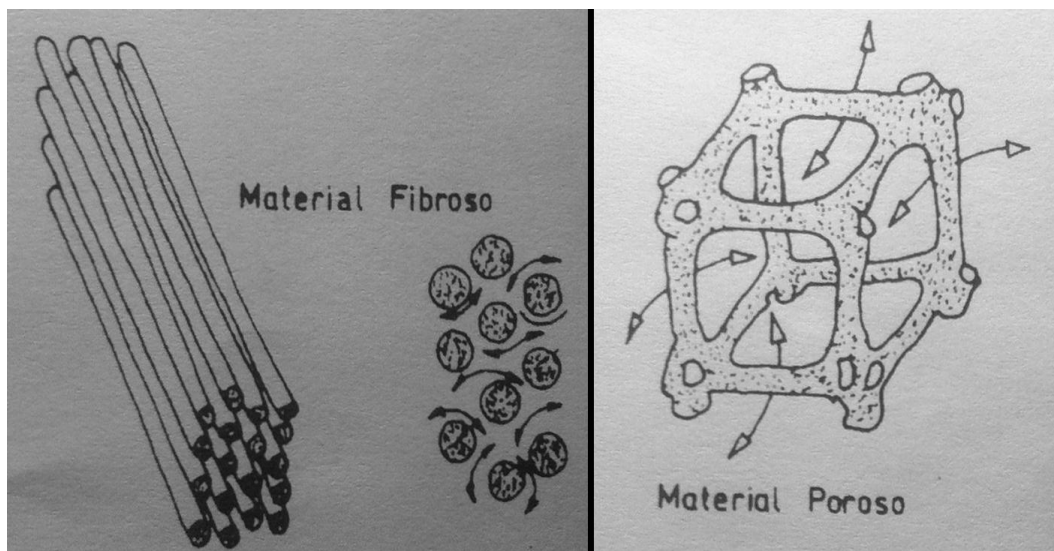


Figura 10. Esquema de absorción de materiales fibrosos y porosos.

Tomado de Llinares et al., 2008, p. 173

Para el primer caso (material poroso) de la Figura 10, interesa que la resistencia del material a la propagación del sonido sea grande. Por lo tanto su impedancia debe ser alta para facilitar la 'deformación' del material al paso de las ondas sonoras.

En el segundo caso (material fibroso), la impedancia del material debe ser muy baja para que gran parte de la energía sonora produzca una fricción contra las paredes de los poros del material.



### 2.8.2. Cortina porosa

Se puede considerar el uso de una capa delgada de material absorbente montada cerca de una pared rígida. Esto último, con el objetivo de aumentar la absorción en frecuencias bajas.

El panel absorbente o cortina porosa tiene un coeficiente de absorción elevado, ya que vibra bajo la influencia de un sonido incidente, y los componentes atenuantes del panel convierten algo de la energía acústica incidente en calor (Kinsler, 1992, p. 341).

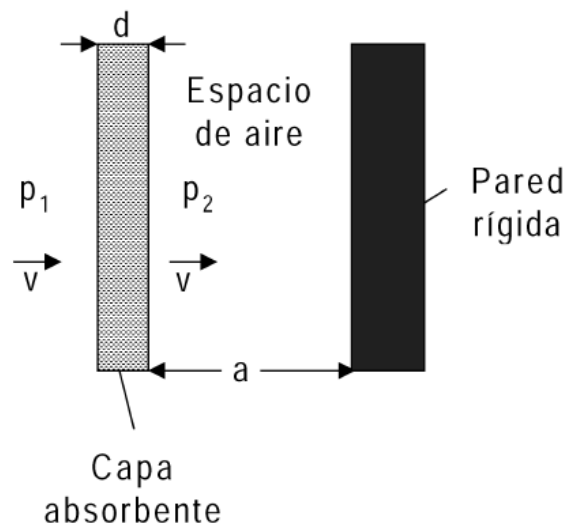


Figura 11. Cortina porosa frente a una pared rígida.

Tomado de Möser y Barros, 2009, p.196

La práctica demuestra que para conseguir una excelente absorción, la distancia del material poroso a una pared rígida, debe ser aproximadamente a  $\lambda/4$  (siendo  $\lambda$  la longitud de onda a absorber) (Llinares et al., 2008, p. 174).

### 2.8.3. Resonadores

Actúan bajo el principio del resonador de Helmholtz, es decir, absorben la energía acústica en un intervalo de frecuencias definido en función de su volumen. Dichos absorbentes pueden ser cavidades ranuradas o paneles perforados de madera separados de un fondo sólido (pared rígida) con material absorbente entre ellos (Kinsler, 1992, p.341).

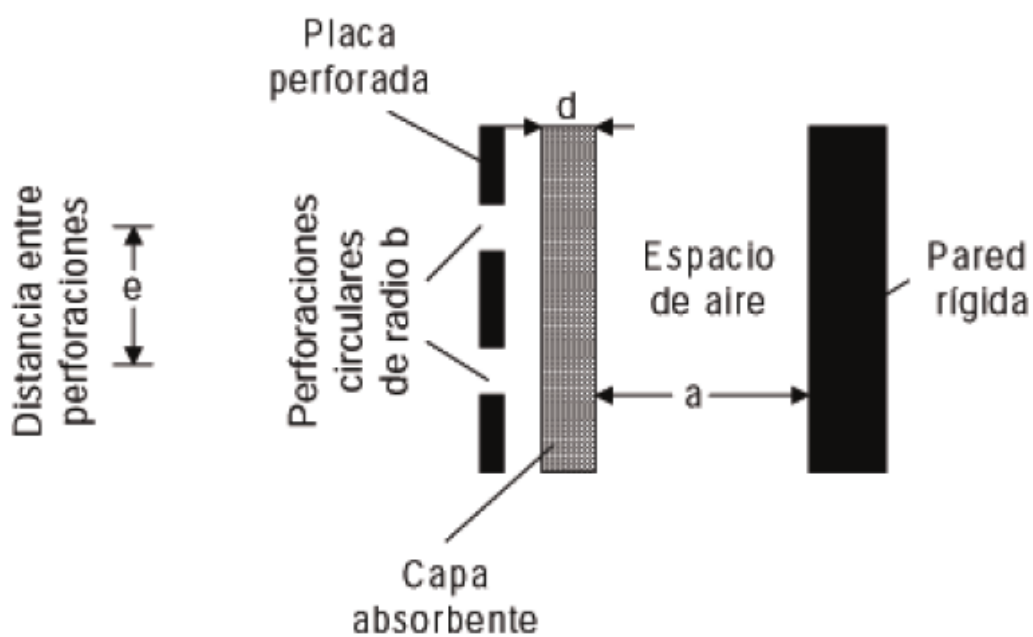


Figura 12. Resonador con placa perforada.

Tomado de Möser y Barros, 2009, p.203

## 2.9. Normativas

### 2.9.1. UNE EN ISO 10534-2

Normativa europea bajo el nombre de “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”,

segunda parte, “Método de la función de transferencia”. La presente normativa describe y cuantifica el coeficiente de absorción sonora y la impedancia acústica para incidencia normal mediante un tubo de impedancia para materiales absorbentes. El método de medición incluye dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal FFT que determina la función de transferencia acústica compleja, para luego calcular el coeficiente de reflexión compleja, el coeficiente de absorción sonora y la impedancia acústica.

### **2.9.2. UNE EN ISO 3382-2**

Normativa europea bajo el nombre de “Medición de parámetros acústicos en recintos”, segunda parte, “Tiempo de reverberación en recintos ordinarios”. La presente normativa describe tres niveles de medición en función al número de posiciones de la fuente/micrófono.

Se definen 2 rangos de evaluación diferentes para el tiempo de reverberación siendo T20 y T30. Los mismos que se obtienen de la extrapolación del tiempo que tarda la presión sonora en reducirse 60 dB (T60) en el interior de un recinto, desde el momento en que la señal de prueba es abruptamente interrumpida. Es decir, T20 es igual a la tercera parte del T60 y T30 es igual a la mitad del T60.

### **2.9.3. UNE EN ISO 11654**

Normativa europea bajo el nombre de “Absorbentes acústicos para su utilización en edificios, Evaluación de la absorción acústica”. La presente normativa posibilita la conversión de los valores del coeficiente de absorción acústica obtenidos con la norma UNE EN ISO 354 en un índice de evaluación

único ( $\alpha_w$ ). La curva de evaluación debe empezar desde la banda de una octava de 250 Hz hacia 4000 Hz.

El índice de evaluación único puede utilizarse para obtener la clase de absorción acústica de productos absorbentes de sonido destinados a oficinas, aulas, hospitales, bibliotecas, etc.

Tabla 1. Clases de absorción sonora

<b>Clase de absorción acústica</b>	<b><math>\alpha_w</math></b>
A	0.90; 0.95; 1.00
B	0.80; 0.85
C	0.60; 0.65; 0.70; 0.75
D	0.30; 0.35; 0.40; 0.45; 0.50; 0.55
E	0.25; 0.20; 0.15
Sin clasificar	0.10; 0.05; 0.00

Adaptado de UNE EN ISO 11654, 1997, p.3

#### **2.9.4. UNE EN ISO 354**

Normativa europea bajo el nombre de “Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”. La presente normativa detalla un método de medición para la obtención del coeficiente de absorción sonora de materiales acústicos en una cámara reverberante.

#### **2.9.5. ASTM E 2611- 09**

Normativa americana bajo el nombre de “Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method”. Este método de ensayo emplea el uso de un tubo de impedancia, cuatro micrófonos y un sistema digital de análisis de frecuencia para la medición de la pérdida por transmisión (TL) a incidencia normal, a través de la determinación de la matriz de transferencia acústica.

El procedimiento de ensayo se aplica principalmente para “materiales acústicos” tales como espumas, materiales semi-rígidos y materiales fibrosos utilizados para la absorción acústica. Si bien el método no puede replicar los resultados de pérdida por transmisión (TL) obtenidos en cámara reverberante, puede proporcionar datos de comparación para pequeñas muestras donde la preparación y el montaje de las mismas deben realizarse con una precisión adicional.

## **2.10. Fibra de banano (musaceae)**

La planta de banano o plátano es una planta alta herbácea que pertenece a la familia de las Musáceas (Musaceae). A pesar que su origen es del Sudoeste Asiático, a lo largo del tiempo su cultivo ha prosperado en Centroamérica, Sudamérica, y África Subtropical (PRO Ecuador, 2015).

La mayor parte del trabajo en fibras de banano se centra en el uso de las fibras provenientes del pseudo-tronco de la planta como refuerzo o relleno en polímeros compuestos. La fibra del pseudo-tronco es una fibra de líber que puede extraerse usando una máquina extractora después de que el manojó del fruto sea cosechado (Salit, 2014, p. 17).

Las fibras del vástago de la musácea se extraen cortando inicialmente en longitudes de tamaño conveniente y pelando en capas, como se muestra en la Figura 13. Las vainas individuales del pseudo-tronco se secan bajo el sol durante 2 semanas y luego son remojadas en agua durante dos semanas más con el fin de separar la lignina y la celulosa del material. Una vez separadas la lignina y la celulosa, las vainas son secadas nuevamente y se extraen las fibras (Salit, 2014, p. 19).



Figura 13. Fibra del vástago del pseudo-tronco de la musácea.

Adaptado de Salit, 2014, p. 19

La densidad típica de la fibra de banano es de  $1.350 \text{ kg/m}^3$ , la relación celulosa/lignina es de 64/5, la resistencia a la tracción final es de 529-914 MPa y la absorción de agua es del 10-11% (Salit, 2014, p.17).

Guimarães, Frollini, Da Silva, Wypych y Satyanarayana (2009, p. 410) realizaron estudios sobre la composición química, análisis morfológico y el comportamiento térmico de las fibras de banano. La estabilidad térmica de las fibras fue alrededor de  $200^\circ\text{C}$ , la descomposición de celulosa en las fibras tuvo

lugar a 300°C, mientras que la degradación de las fibras tuvo lugar por encima de 400°C.

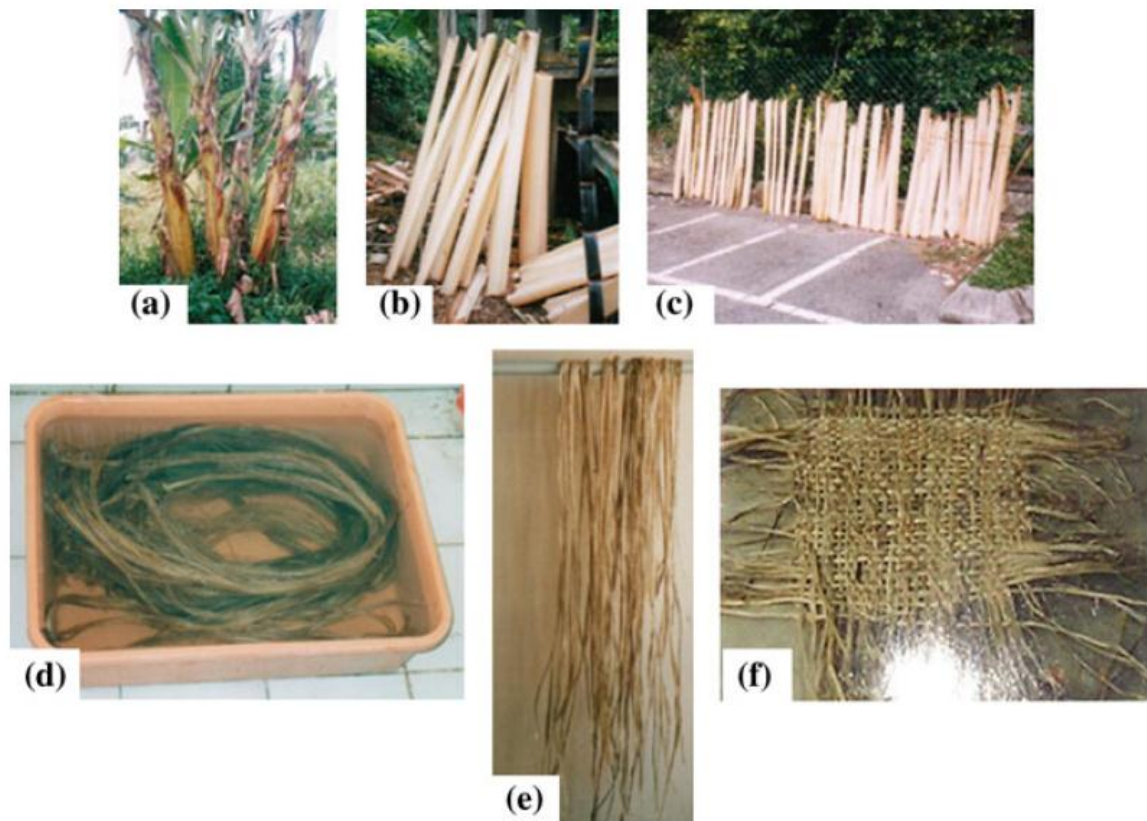


Figura 14. Pasos para la preparación de la fibra musácea: a) planta de banano, b) corte, c) secado, d) remojo, e) resecado y f) tejido

Tomado de Salit, 2014, p. 21

En Japón, las fibras musáceas se utilizan para hacer textiles de alta calidad llamados 'kimonos' (Hendrickx, 2007, p. 155). Así mismo, las fibras musáceas se utilizan como fibras de refuerzo en compuestos poliméricos, en la fabricación de papel y como materia prima para derivados de cartón y celulosa (Reddy y Yang, 2005, p. 24).

### **3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE ENSAYO**

A partir de aquí, conforme a la norma UNE EN ISO 10534-2, se detallan los pasos a seguir para la caracterización de las propiedades de absorción del material musáceo, así como también el procedimiento de montaje de las distintas muestras del material.

#### **3.1. Equipamiento de Medición**

A continuación se puntualiza la instrumentación requerida e implementada en los ensayos con sus respectivas características:

##### **3.1.1. Sistema de medición Spectronics ACUPRO 4**

El sistema de medición ACUPRO 4 permite evaluar la absorción y la impedancia acústica de materiales absorbentes acústicos mediante el uso de un tubo de impedancia, una fuente emisora de sonido y dos micrófonos. Su construcción cumple con las normas ISO 10534-2 y ASTM E-1050-98 y es implementado por la firma estadounidense SPECTRONICS INC.

A continuación se detallan sus especificaciones técnicas.



Tabla 2. Especificaciones técnicas tubo de impedancia ACUPRO 4

<b>Tubo de impedancia ACUPRO 4 (especificaciones técnicas)</b>	
Requerimientos de diseño:	ISO 10534-2, ASTM E1050-98
Rango de Frecuencia:	50 Hz – 5700 Hz
Altavoz integrado:	JBL 2427J
Ruido ambiente dentro del tubo:	<30 dBA
Diámetro exterior/interior:	41,3 mm / 34,9 mm
Altura:	0,25 m
Longitud:	1,2m – 1,5m (para el caso tubo TL)
Peso:	10,5 kg
Longitud de muestras:	< 14 cm



Figura 15. Tubo de impedancia ACUPRO 4 Measurement System  
Tomado de Spectronics, 2016.

### 3.1.2. Altavoz JBL 2426J

- Acepta una potencia de 100 W para producir un nivel mayor a 130 dB.
- El altavoz está mecánicamente aislado del tubo de impedancia para evitar vibraciones estructurales en el mismo.



Figura 16. Altavoz JBL 2426J  
Tomado de Spectronics, 2016.

### 3.1.3. Tubo de impedancia ACUPRO

- Los materiales empleados para su construcción minimizan la excitación de la estructura en el tubo, incluso para altos niveles de ruido superiores a 130 dB.
- El espesor de las paredes del tubo ayudan a bloquear la influencia del ruido ambiental y vibraciones externas.
- La longitud del tubo, así como el sellado de los tubos mediante tornillos de precisión, ayudan en la incidencia de ondas planas sobre la muestra de estudio.



Figura 17. Tubo de impedancia ACUPRO.  
Tomado de Spectronics, 2016.

#### 3.1.4. Micrófonos

- El sistema ACUPRO utiliza micrófonos de presión ordinaria de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{4}$  de pulgada.
- No es necesario implementar en el tubo micrófonos especiales de corrección de fase.



Figura 18. Micrófonos sistema ACUPRO.  
Tomado de Spectronics, 2016.

### 3.1.5. Interfaz Data Translation 9837<sup>a</sup>

- Módulo de adquisición de datos de 4 canales con convertores A/D.
- Cable USB a 24 bits con frecuencia de muestreo de 52,7 kHz.
- La interfaz está totalmente integrada con el software del sistema ACUPRO para una correcta adquisición de datos.
- Posee un canal de salida de alimentación para el altavoz del sistema ACUPRO.

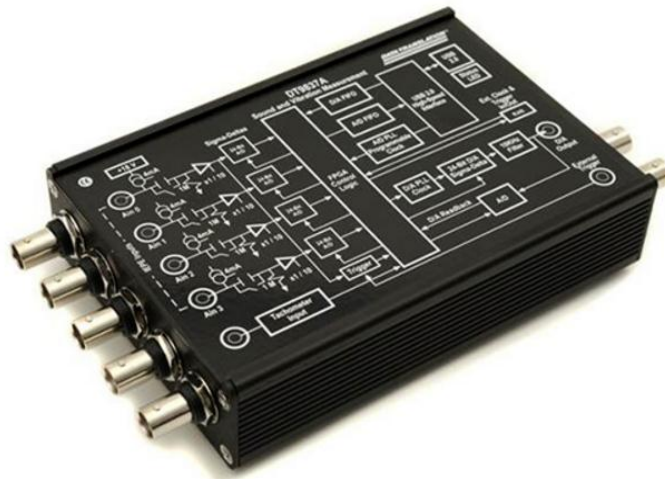


Figura 19. Módulo de adquisición de datos 'Data Translation 9837.  
Tomado de Spectronics, 2016.

### 3.1.6. ACUPRO Software

- Permite obtener el coeficiente de absorción, coeficiente de reflexión compleja y admitancia compleja de materiales
- Visualización explícita de resultados.
- Determina la pérdida por transmisión de distintos materiales.

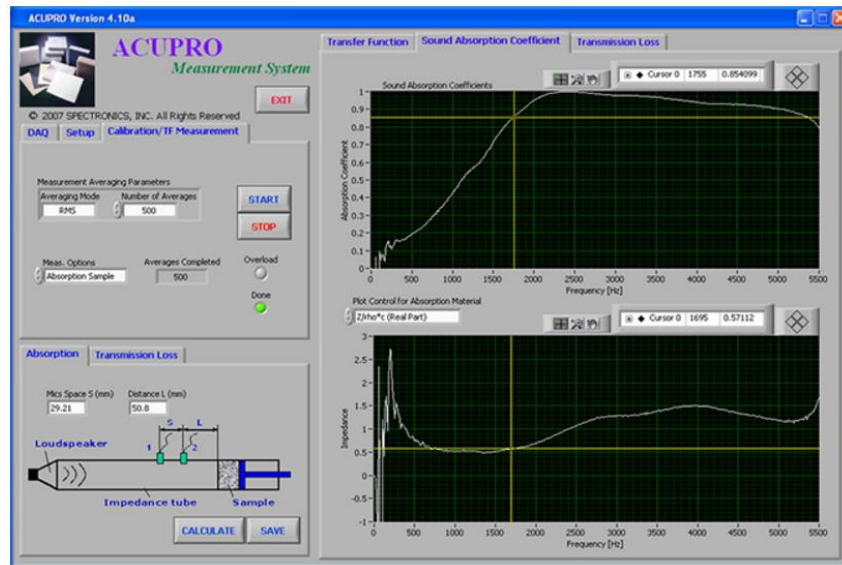


Figura 20. Captura ACUPRO Software.

### 3.1.7. Portamuestras o soporte de la muestra de ensayo

- Puede soportar muestras con distintos espesores hasta 5 pulgadas (127mm).
- Se acopla al tubo de impedancia mediante tornillos de precisión.



Figura 21. Portamuestras sistema ACUPRO.

Tomado de Spectronics, 2016.

### 3.1.8. Cortador de muestras

- Se montan en una prensa de perforación y puede cortar con precisión la mayoría de muestras de materiales como espumas blandas y láminas de fibra.
- Puede también emplearse para cortar muestras semi-rígidas.



Figura 22. Cortador de muestras sistema ACUPRO.

Tomado de Spectronics, 2016.

### 3.1.9. Anemómetro Airflow TA440

- Mide la velocidad, temperatura y humedad relativa del aire.
- Calcula el flujo volumétrico y la temperatura del punto de rocío.



Figura 23. Anemómetro Airflow TA440.

Tomado de TSI, 2016.

### 3.2. Montaje y Mediciones preliminares

Según la norma UNE EN ISO 10534-2 el altavoz debe estar en funcionamiento al menos 10 minutos antes de cada ensayo a realizarse con el fin de lograr que la temperatura se estabilice. El equipamiento de medición debe conectarse entre sí, tal como se indica en la figura a continuación.

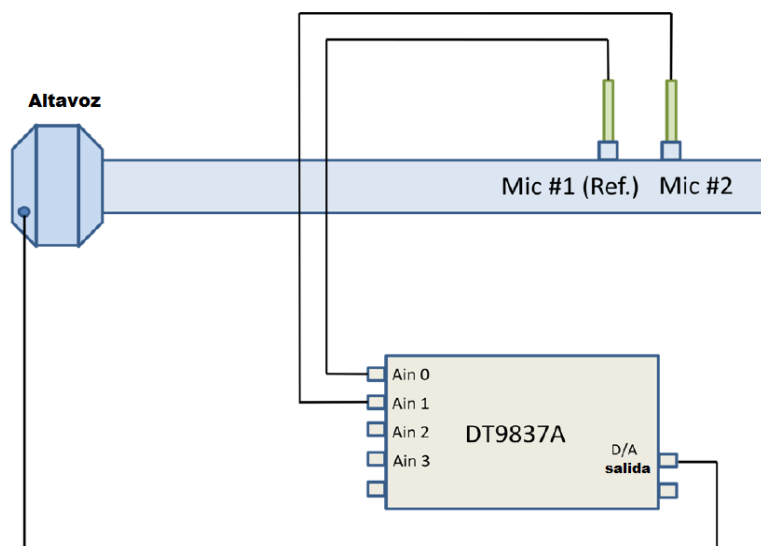


Figura 24. Disposición del equipo de ensayo

Adaptado de Spectronics, 2013.

### 3.2.1. Temperatura

La norma UNE EN ISO 10534-2 recomienda que durante el ensayo la temperatura en el interior del tubo se mantenga constante con precisión de  $\pm 1^\circ\text{K}$ . El software ACUPRO Version 4.5 tiene modalidades para la obtención de la velocidad del sonido y la densidad del aire en el tubo.

### 3.2.2. Montaje de micrófonos

Se aplica una pequeña cantidad de lubricante en el diámetro interior del soporte del micrófono para evitar daños en las juntas toroidales (O-ring) del mismo. A continuación, se tira del extremo del conector del preamplificador (micrófono) a través del soporte del micrófono y se aprieta ligeramente el tornillo de fijación de nylon usando una llave Allen de 5/64". Cuando se ha instalado correctamente, la rejilla del micrófono se alinea con la superficie curvada del soporte del micrófono.



Figura 25. Inserción del micrófono a través del soporte.



### 3.2.3. Calibración de micrófonos

En el apartado 7.5.2 de la normativa UNE EN ISO 10534-2 se sugiere el uso de una muestra de calibración especial absorbente (por ejemplo: 25 mm de espuma de poliuretano) que sirva como una corrección o referencia válida para todas las mediciones sucesivas. En ese sentido, se inserta la muestra en el porta-muestras ACUPRO y se designa la configuración de los micrófonos en el tubo de impedancia. La posición del micrófono más cercano a la fuente de sonido siempre se designa como 'posición 1 o de referencia' y la posición del micrófono más cercana a la muestra de ensayo siempre se designa como 'posición 2'. A este tipo de configuración se lo conoce como 'configuración estándar'.

Una vez fijado el porta-muestras al tubo de impedancia se realiza una medición de la función de transferencia  $H_{12}$  con los micrófonos en la posición estándar. A continuación, se intercambian las posiciones de los micrófonos de manera que el soporte del micrófono de la posición 2 se encuentre ahora en la posición 1, y viceversa. Seguidamente se realiza una segunda medición de la función de transferencia  $H'_{12}$ . El software ACUPRO Version 4.5 divide las dos funciones de respuesta de frecuencia (FRF) para calcular el factor de calibración  $H_c$  mediante la siguiente ecuación:

$$H_c = (H_{12} / H'_{12})^{1/2} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Para los siguientes ensayos se colocan los micrófonos en la configuración estándar, se inserta la muestra de ensayo y se mide la función de transferencia. Cabe recalcar que al intercambiar los micrófonos debe asegurarse que ocupen la posición precisa que ocupaban en la configuración

estándar y viceversa. Esto se debe a que un micrófono tiene un centro acústico que no necesariamente puede coincidir con su centro geométrico.

$$\widehat{H}_{12} = |\widehat{H}_{12}|e^{j\widehat{\phi}} = \widehat{H}_r + j\widehat{H}_i \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

$\widehat{H}_{12}$  : función de transferencia sin corregir

$\widehat{\phi}$  : ángulo de fase sin corregir

$\widehat{H}_r$  : parte real de  $\widehat{H}_{12}$

$\widehat{H}_i$  : parte imaginaria de  $\widehat{H}_{12}$

Por último, el software del sistema ACUPRO corrige el desajuste entre los micrófonos usando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = |H_{12}|e^{j\phi} = \frac{\widehat{H}_{12}}{H_c} \quad (\text{Ecuación 16})$$

#### 3.2.4. Relación señal – ruido

Según el anexo A.1.4 de la norma UNE EN ISO 10534-2 se debe medir el espectro de presión acústica en cada posición de micrófono con la fuente (altavoz) apagada y prendida. Las mediciones requieren que el campo de sonido sea, sustancialmente, 10 dB mayor, al ruido de fondo en todas las frecuencias referenciadas en el interior del tubo. La salida de tensión de la interfaz Data Translation DT9837A está diseñada para cumplir con esta condición.

### **3.3. Montaje y preparación de las muestras de ensayo**

A continuación, según el apartado 6 de la norma UNE EN ISO 10534-2 se detallan los diferentes procedimientos referentes al corte de la muestra de ensayo y su respectivo montaje en el interior del tubo de impedancia.

#### **3.3.1. Corte de la muestra de ensayo**

La preparación y el corte de la muestra de ensayo efectiva son una habilidad que, una vez desarrollada, asegura resultados precisos y repetibles a través del uso del tubo de impedancia ACUPRO. Se puede hacer el estudio del coeficiente de absorción acústica para distintos materiales, siendo:

- Materiales suaves: Espumas de celdas abiertas y materiales fibrosos.
- Materiales semi-rígidos: Cauchos y espumas de celdas cerradas.
- Materiales duros: Productos de madera, yeso, gypsum.

Según el tipo de material a estudiarse debe elegirse un método de corte para las muestras de ensayo. En el presente trabajo se ha elegido un material de tipo suave (musaceae), por lo que la herramienta utilizada para obtener las muestras es la suministrada con el sistema de medición ACUPRO para muestras suaves.

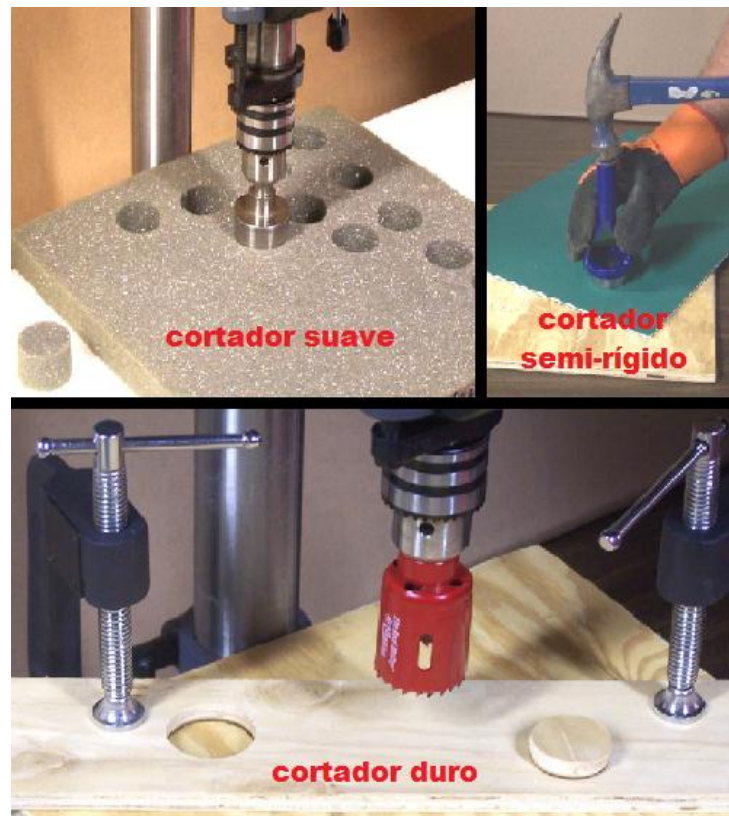


Figura 26. Métodos de corte para distintas muestras.  
Adaptado de Spectronics, 2013.

Como se muestra en la Figura 26, el cortador ‘Spectronics ACUPRO’ para materiales suaves y duros, debe acoplarse a una prensa de taladro o máquina similar mientras que para materiales semi-rígidos se hace uso de un martillo. Las características del buen corte de una muestra de ensayo se describen a continuación:

- Ambas caras de la muestra deben ser cilindros planos circulares y paralelas.
- Deben tener un diámetro correcto conforme al diámetro del tubo de impedancia.
- Las muestras no deben presentar indicios de suciedad, humedad o de materiales extraños.

- Si es necesario, el cortador de muestras deberá ser afilado después de cortar varias muestras.



Figura 27. Cortes para muestras musáceas de distintas densidades y espesores: a) M4, b) M10, c) MA10 y d) MA4

### 3.3.2. Montaje de la muestra de ensayo

De acuerdo con la norma UNE EN ISO 10534-2 la muestra de ensayo debe encajar perfectamente en el soporte de la muestra (Figura 28), no tan firmemente que sobresalga en el centro, ni tan débilmente que exista espacio entre el borde del soporte y la muestra.

Los materiales blandos, tales como espumas y fibras minerales son fáciles de cortar y colocar en el soporte. Los materiales que son rígidos o tienen capas rígidas se deben cortar ligeramente de tamaño inferior y deben ser sellados por

los bordes utilizando vaselina o envueltos con un par de capas de cinta para eliminar el espacio de aire entre la muestra y el tubo.

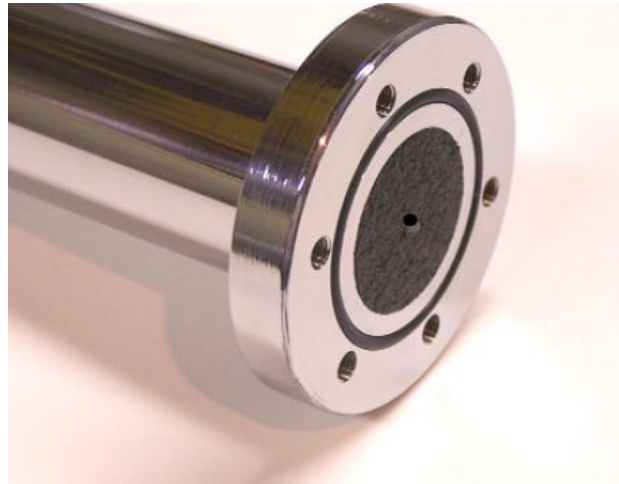


Figura 28. Muestra montada correctamente en el tubo.

A continuación se detallan algunas indicaciones:

- Se debe prestar especial atención al lado de la muestra que será colocado hacia la fuente de sonido; puesto que, las propiedades de algunos materiales difieren dependiendo de qué lado se ponen a prueba. En ese sentido, es recomendable marcar el lado de la muestra que está siendo sometido a evaluación.
- Como se muestra en la Figura 29, debe establecerse la correcta posición del pistón antes de insertar la muestra al soporte de la muestra; puesto que, el pistón puede comprimir la muestra o crear un espacio de aire detrás del mismo.
- Colocar un pedazo de cinta delgada “doble cara” (Scotch #665) a la cara del pistón. Esto mantendrá la muestra adherida al pistón.

- Insertar la muestra con el lado marcado previamente hacia la fuente de sonido. Como se muestra en la Figura 28, la muestra se encuentra ahora al ras con la brida del soporte de la muestra.
- Colocar el soporte de la muestra al tubo de impedancia a través de los tres tornillos suministrados. Los tornillos deben ser apretados a mano por igual.
- Una vez montado el sistema correctamente, la junta toroidal situada en la brida del soporte de la muestra quedará comprimida.
- Seguidamente, no debe realizarse ningún cambio en la posición del pistón mientras que el soporte de la muestra se une al tubo de impedancia. Esto debido a que el cambio de presión creado por mover el pistón también desplaza a la muestra de ensayo.



Figura 29. Ajuste de la posición del pistón

### 3.4. Procedimiento de ensayo

Una vez instalado el software ACUPRO se despliega un archivo ejecutable en el escritorio del computador que abre el módulo de medición y obtención de datos ACUPRO VERSION 4.5. La ventana principal del software después de ser ejecutado se muestra en la siguiente figura:

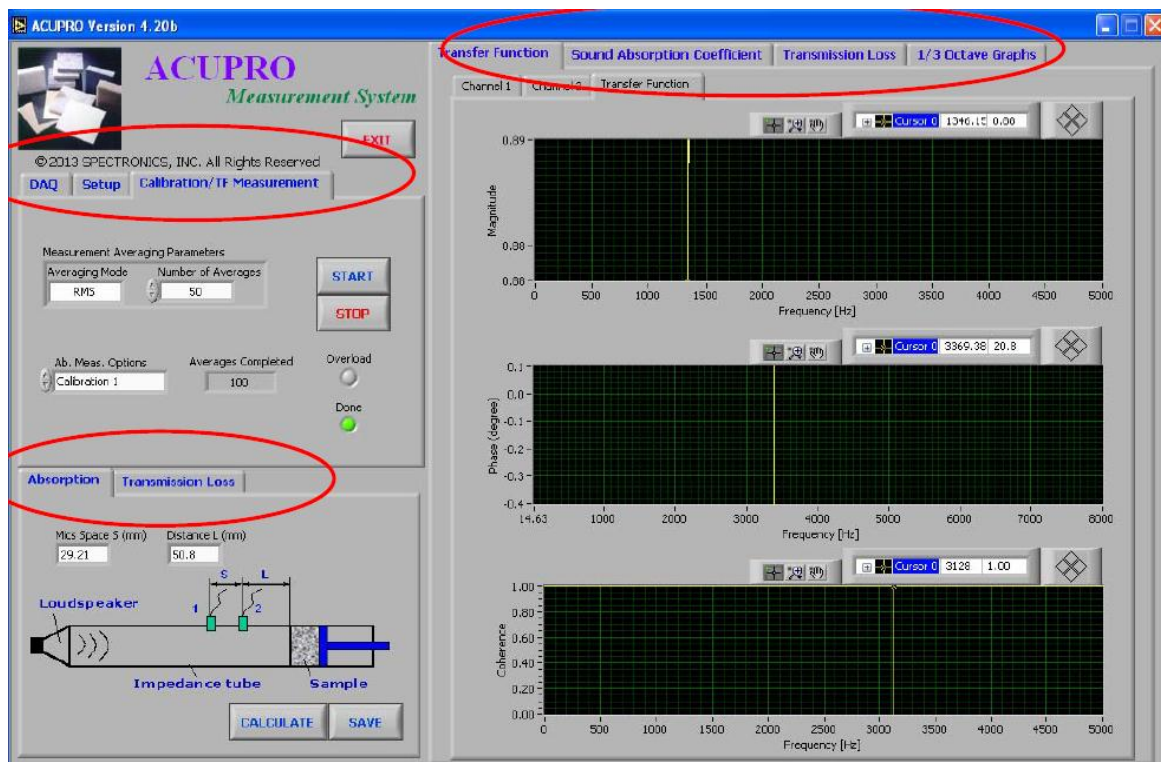


Figura 30. Ventana principal software ACUPRO.

Como se indica en la Figura 30, en la parte superior izquierda, los botones DAQ, Setup y Calibration/TF Measurements se usan para controlar el proceso de adquisición de datos. Las pestañas en la parte superior derecha (Transfer Function, Sound Absorption Coefficient, Transmission Loss, 1/3 Octave Graphs) despliegan los datos de control de las señales provenientes de los micrófonos de medición. Las dos pestañas en el panel inferior izquierdo



(Absorption, Transmission Loss) se usan para seleccionar la modalidad de medición, ya sea esta para los coeficientes de absorción acústica o la medición de pérdida por transmisión. Cada una de estas pestañas se discutirán en las siguientes secciones.

El manual de usuario del sistema ACUPRO pone a consideración el cuidado del altavoz JBL 2426J bajo las siguientes indicaciones:

- El voltaje suministrado al controlador de compresión después de conectarlo a la salida D/A es inferior a aproximadamente 100 mV. Esta tensión debe proporcionar suficiente intensidad de sonido para la mayoría de las pruebas acústicas y no dañará el controlador de compresión.
- Si se necesita una intensidad de sonido adicional, se puede conectar un amplificador de potencia entre la salida del DT9837A y el controlador de compresión; sin embargo, el voltaje máximo suministrado al controlador de compresión no debe exceder 3 Vrms. Un voltaje más alto puede dañar el controlador de compresión.

#### **3.4.1. Parámetro 'Absorption'**

Los únicos parámetros que se pueden modificar en esta pestaña son la separación (S) entre los dos micrófonos y la distancia (L) de la muestra al micrófono #2. Las posiciones de los micrófonos se encuentran fijas en el tubo, es por ello que para la mayoría de las mediciones el espaciamiento será de 29,21 mm, pero esta distancia puede ser cambiada por el usuario si los centros acústicos de los micrófonos no coinciden con sus centros geométricos, como se indica en el apartado 3.2.3 del presente informe. Cabe aclarar que los coeficientes de absorción no depende de la distancia L, más sin embargo; la impedancia acústica y otras cantidades calculadas sí.

Los parámetros de configuración descritos anteriormente se almacenan en un archivo de texto denominado 'Config.txt' situado en la carpeta ACUPRO\_testing. Este archivo es leído por el software ACUPRO cada vez que se inicia el programa con los mismos valores guardados la última vez que fue ejecutado.

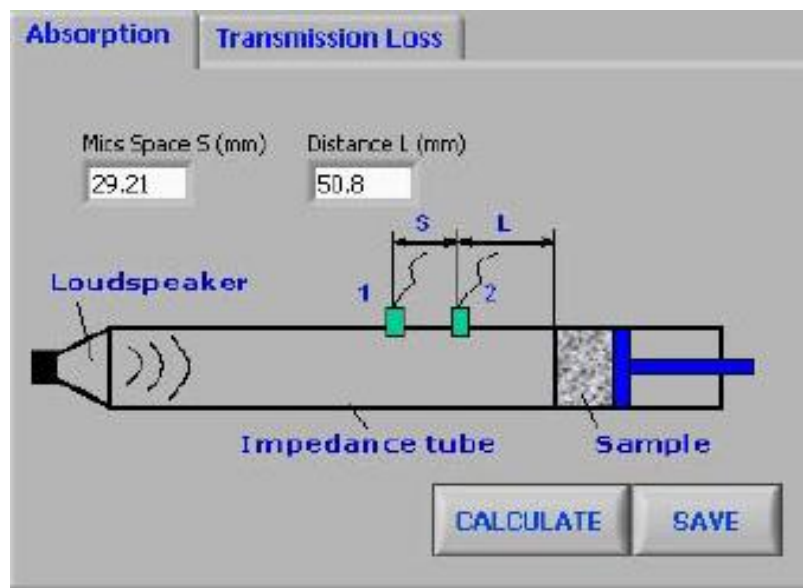


Figura 31. Captura parámetro Absorption.

#### 3.4.1.1. Configuración DAQ

El panel DAQ (Data acquisition) se utiliza para configurar el tipo de micrófonos a implementarse en la medición y los rangos de voltaje de entrada de los mismos. Existen dos posibilidades para la elección del tipo de micrófonos, estos son: micrófonos pre-polarizados (IEPE) y micrófonos de voltaje. Para la presente investigación se hizo uso de micrófonos pre-polarizados de la marca GRAS y Bayerdynamic debido a que están diseñados para medir altos niveles de presión sonora y conservar la misma magnitud de fase en cualquier posición dentro de estructuras internas tales como tubos o cavidades.

El manual de usuario del software ACUPRO recomienda que para cada canal de micrófono se seleccionen rangos de entre  $\pm 1$  ó  $\pm 2$  voltios. Ninguno de los otros parámetros de la pestaña DAQ puede ser alterado por el usuario, es decir; el tipo de onda (ruido blanco) y la amplitud de salida de la señal de salida D/A de la interfaz DT9837A (aproximadamente 2,5 Vrms) no pueden ser cambiados.

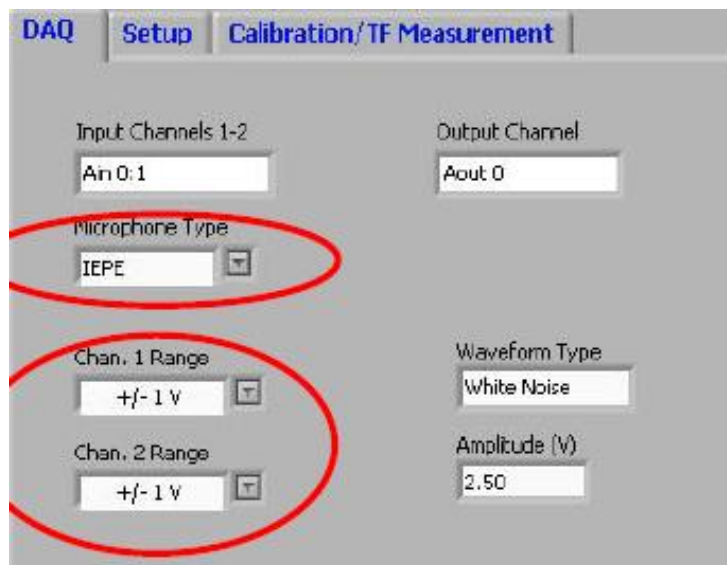


Figura 32. Captura pestaña DAQ.

#### 3.4.1.2. Configuración Setup

A continuación se selecciona una frecuencia (Hz) de análisis apropiada. Según la Tabla 2. la frecuencia máxima de trabajo del tubo ACUPRO es de 5700 Hz, por lo que; se sugiere ajustar la frecuencia del parámetro 'Analysis Freq.' A 5500 Hz. Si la frecuencia de análisis se ajusta a una frecuencia más alta, debe asegurarse de no tener en cuenta los resultados superiores a 5700 Hz.

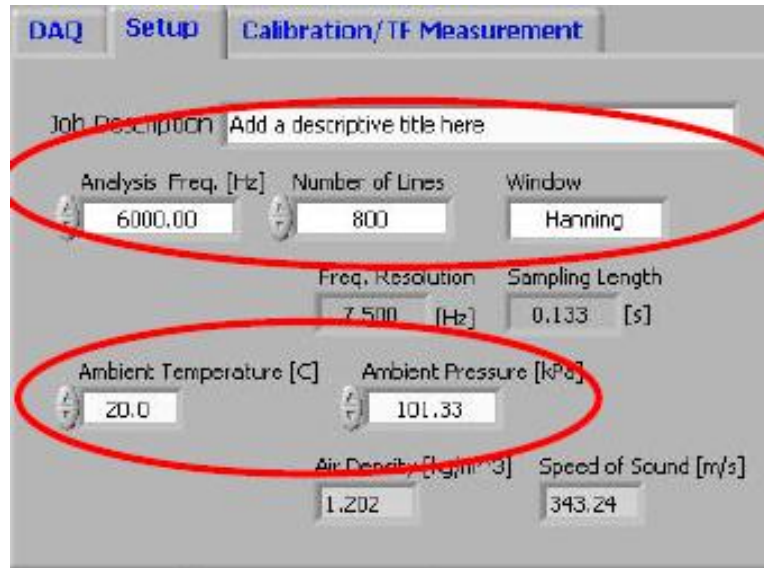


Figura 33. Captura parámetro Setup.

Seguidamente, debe indicarse el número de puntos en el dominio de la frecuencia de la medición de la función de transferencia ('Number of Lines'). El parámetro 'Freq. Resolution' se obtiene a partir de la división entre el parámetro 'Analysis Freq. (Hz)' y el número de líneas 'Number of lines'. El parámetro 'Sampling Length' es el resultado recíproco de la frecuencia de resolución 'Freq. Resolution' en el dominio del tiempo. A continuación, deben introducirse la temperatura (°C) y la presión ambiente (kPa). Estos valores se utilizan para calcular la densidad del aire y la velocidad del sonido en el interior del tubo. Dichos valores son utilizados en el cálculo de todos los demás resultados acústicos para la función de transferencia.

El parámetro 'Window' se despliega como 'Hanning' y no permite ser configurado por el usuario. El indicador 'Hanning' se utiliza típicamente como una función de ventana en el procesamiento digital de señales que selecciona un subconjunto de una serie de muestras con el fin de realizar una transformada de Fourier u otros cálculos.

‘Job Description’ permite introducir una descripción rápida del trabajo o medición a efectuarse.

### 3.4.1.3. Configuración Calibration / TF Measurement

En primer lugar, debe establecerse el número de promediados ‘Number of Averages’ deseado. Dicha cifra pertenece al número de registros en función del tiempo ‘Sampling Length’ (de la pestaña ‘Setup’) utilizado para obtener una función de transferencia estable. Para determinar si el número de promedios es suficiente o no, debe prestarse especial atención al gráfico desplegado para la función de transferencia. Es decir, si la función de transferencia continua cambiando cuando el número de promedios está casi completo, debe aumentarse la cifra del número de promedios.

‘Averaging Mode’ es un valor constante (RMS) y no puede ser configurado por el usuario. El menú desplegable ‘Ab. Meas. Options’ será discutido en la sección 2.4.1.4 y 2.4.1.5.

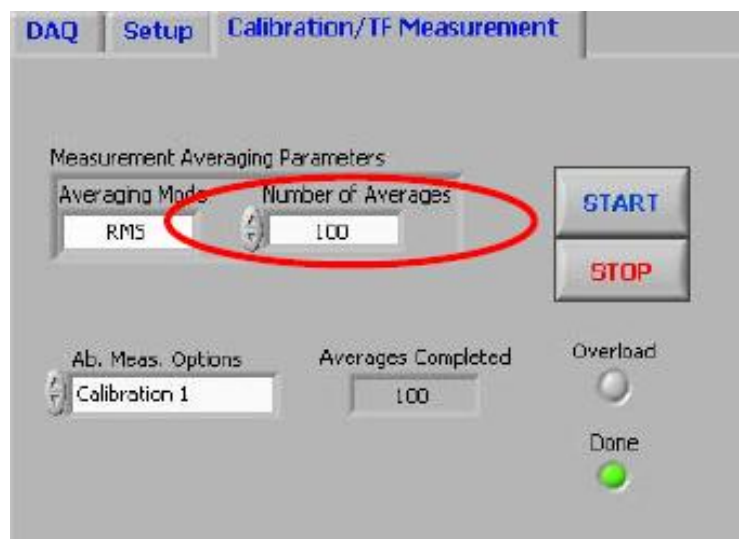


Figura 34. Captura parámetros Calibration/ TF Measurement.

#### 3.4.1.4. Calibración de fase de los micrófonos

Como se mencionó anteriormente en la sección 3.2.3 las diferencias de fase entre los micrófonos pueden causar errores en la medición de las propiedades acústicas del material en estudio. Es por eso que todo el sistema (micrófonos, preamplificadores y analizador) deberán calibrarse al principio de cada día en el que se realice una serie de mediciones.

Se inserta una muestra de material acústico absorbente (como espuma de celdas abiertas de 25 mm de grosor suministrada por el sistema ACUPRO) en el soporte de la muestra, a continuación se conecta el soporte de la muestra al tubo ACUPRO a través de los tres tornillos (los tornillos deben ser apretados a mano). Según el manual de usuario del sistema ACUPRO la muestra real de material absorbente (espuma de 25 mm) utilizada para los ensayos de calibración no es crítica; se sabe que tiene una absorción aceptable y ayuda a mejorar la relación señal-ruido durante la calibración.

Antes de empezar la calibración, el sistema ACUPRO debe estar conectado como se muestra en el esquema de la Figura 25. Es decir:

- Salida D/A del DT9837A conectada al altavoz JBL 2426J.
- Salida del micrófono #1 (micrófono de referencia situado más cerca al altavoz) conectada a la entrada Ain 0 del DT9837A.
- Salida del micrófono #2 (situado más cercano a la muestra de ensayo) conectada a la entrada Ain 1 del DT9837A.

Seguidamente, se selecciona la opción 'Calibration 1' del menú desplegable 'Ab. Meas. Options', se ingresa un valor de 100 promedios en el parámetro 'Number of Averages' y se da clic en el botón 'START'. Una vez finalizado el

promedio total, deberá desplegarse un resultado similar al de la siguiente figura.

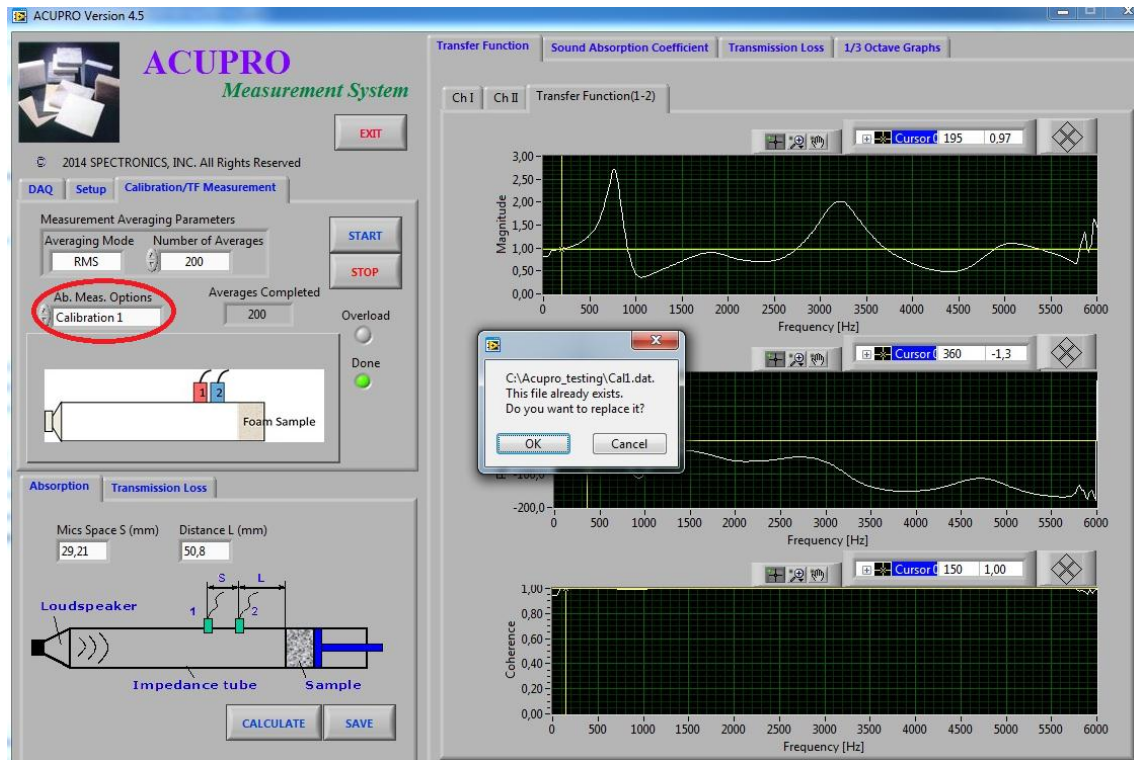


Figura 35. Captura para la primera calibración de micrófonos.

Paralelamente al término de la primera calibración, una ventana de aviso se desplegará preguntando si se desea reemplazar un archivo existente en la carpeta `c:\ACUPRO_testing` llamado 'Cal1.dat'. Si los resultados para la gráfica de 'Coherence' mantienen una constancia relativamente alta (mayor que aproximadamente 0,9 en todas las frecuencias entre 50 – 5700 Hz), se selecciona 'OK'; caso contrario 'Cancel' para volver a realizar el ensayo, teniendo en cuenta previamente que la muestra de ensayo se encuentre montada correctamente en el tubo, así también como los micrófonos y las juntas del portamuestras.

A continuación, deberán intercambiarse las posiciones de los micrófonos en el tubo ACUPRO. Cabe recalcar que deben intercambiarse simplemente los soportes de los micrófonos sin intercambiar las conexiones en la interfaz DT9837A. Posteriormente se selecciona la opción 'Calibration 2' del menú desplegable 'Ab. Meas. Options' y se da clic en 'START'. Terminado el número de promedios se despliega una segunda función de transferencia entre la nueva configuración de micrófonos. El resultado debe aproximarse a la captura de la siguiente figura.

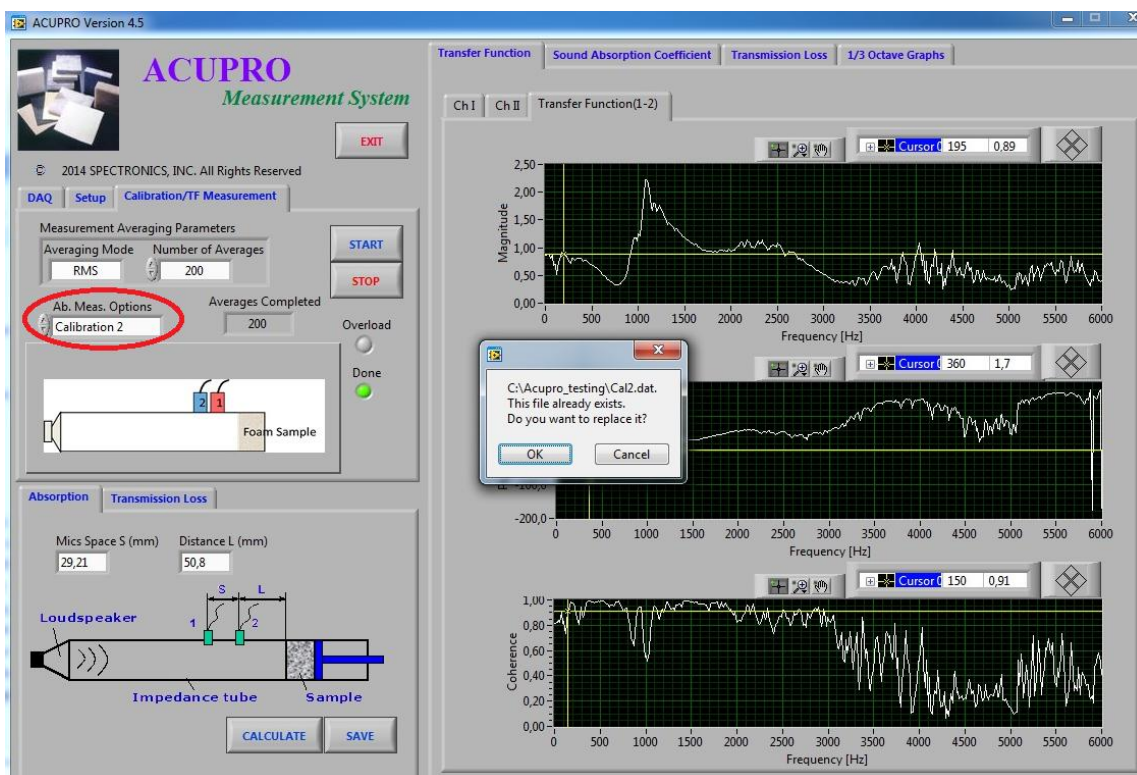


Figura 36. Captura para la segunda calibración de micrófonos.

Si los resultados para la gráfica de 'Coherence' mantienen una constancia relativamente alta (mayor que aproximadamente 0,9 en todas las frecuencias entre 50 – 5700 Hz), se selecciona 'OK' para reemplazar el archivo 'Cal2.dat' existente en la carpeta c:\ACUPRO\_testing'; caso contrario 'Cancel' para volver



a realizar el ensayo, teniendo en cuenta previamente que la muestra de ensayo se encuentre montada correctamente en el tubo, así también como los micrófonos y las juntas del portamuestras. Los micrófonos deberán ubicarse en la posición original (posición estándar) una vez obtenida la función de transferencia 'Cal2.dat'.

Cabe mencionar que, si se requiere cambiar la frecuencia de análisis o el número de líneas (en el parámetro 'Setup'), deberá repetirse el procedimiento de calibración inicial descrito anteriormente. Así mismo, convendrá realizar múltiples números de mediciones que puedan ser promediadas entre sí, para posteriormente obtener un grado de incertidumbre que ayude a determinar el grado de precisión de dichas mediciones.

#### **3.4.1.5. Obtención de los coeficientes de absorción**

Antes de la medición, el sistema debe ser calibrado como se describe en la sección 3.4.1.4. Para la obtención de los coeficientes de absorción acústica del material en estudio, el soporte de la muestra (porta-muestras) y la muestra deben ser montados al final del tubo como se describe en la sección 3.3.2. La posición de los micrófonos, previo a su respectiva calibración; deberá hacerse en posición estándar como se describe en la sección 3.2.2.

A continuación, se selecciona la opción 'Absorption Sample' en el menú desplegable 'Ab. Meas. Options'. Se presiona 'START' e inmediatamente se obtiene la función de transferencia proveniente de los dos micrófonos para la muestra de ensayo bajo prueba. El manual de usuario del sistema ACUPRO sugiere utilizar una de las muestras de espuma de 12 mm incluidas en el sistema con el fin de comprobar la precisión de los resultados posterior a la

calibración de los micrófonos. En ese sentido, el resultado deberá ser similar al de la Figura 37.

Terminado el análisis de la función de transferencia para la muestra de espuma de 12 mm de espesor, una ventana de aviso preguntará si se desea reemplazar un archivo llamado 'SAC.dat' proveniente de la carpeta 'c:\ACUPRO\_testing'. Se da clic en 'OK' si los resultados para la gráfica de 'Coherence' mantienen una constancia relativamente alta (mayor que aproximadamente 0,9 en todas las frecuencias entre 50 – 5700 Hz).

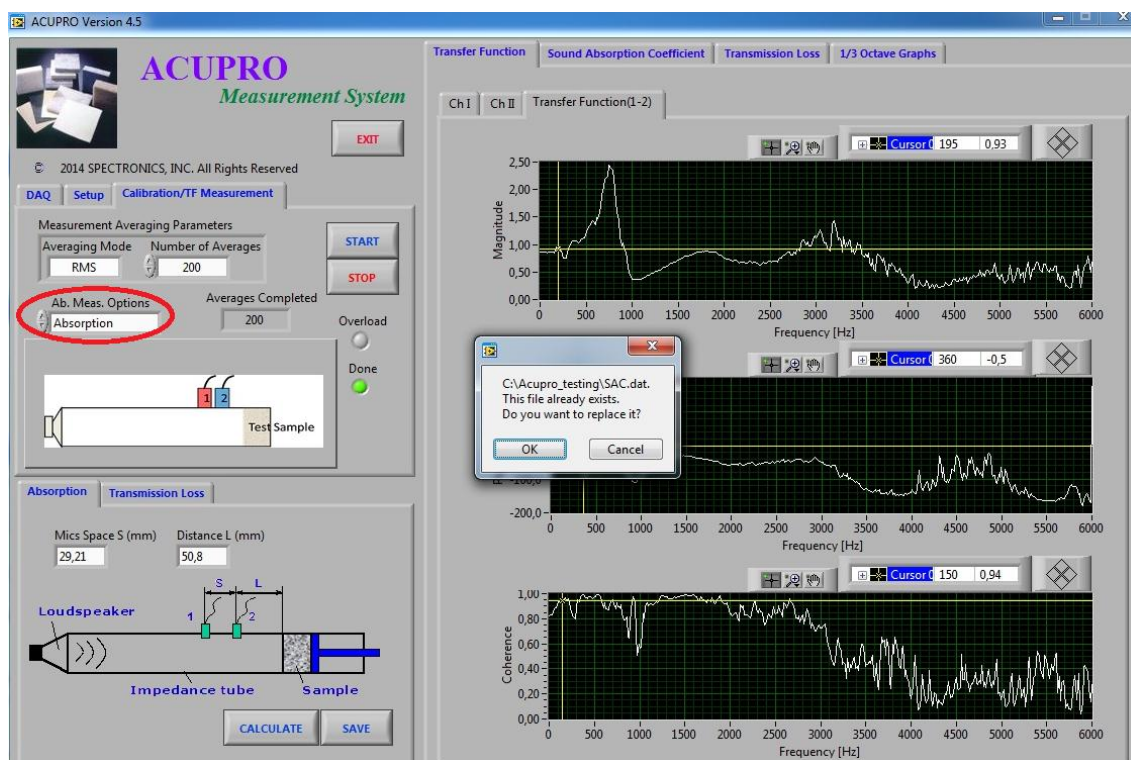


Figura 37. Captura función de transferencia para espuma de 12 mm.

A partir de ahora es posible calcular el coeficiente de absorción sonora de la muestra de ensayo bajo prueba. Para ello, simplemente se presiona el botón

‘CALCULATE’ en el panel inferior izquierdo de la ventana principal del software. El resultado del coeficiente de absorción acústica para la muestra de espuma de 12 mm será similar al mostrado en el gráfico superior de la Figura 38. El gráfico inferior contiene un menú desplegable para seleccionar la impedancia acústica del material (partes reales e imaginarias vs. frecuencia) y otras magnitudes acústicas relacionadas con la impedancia acústica.

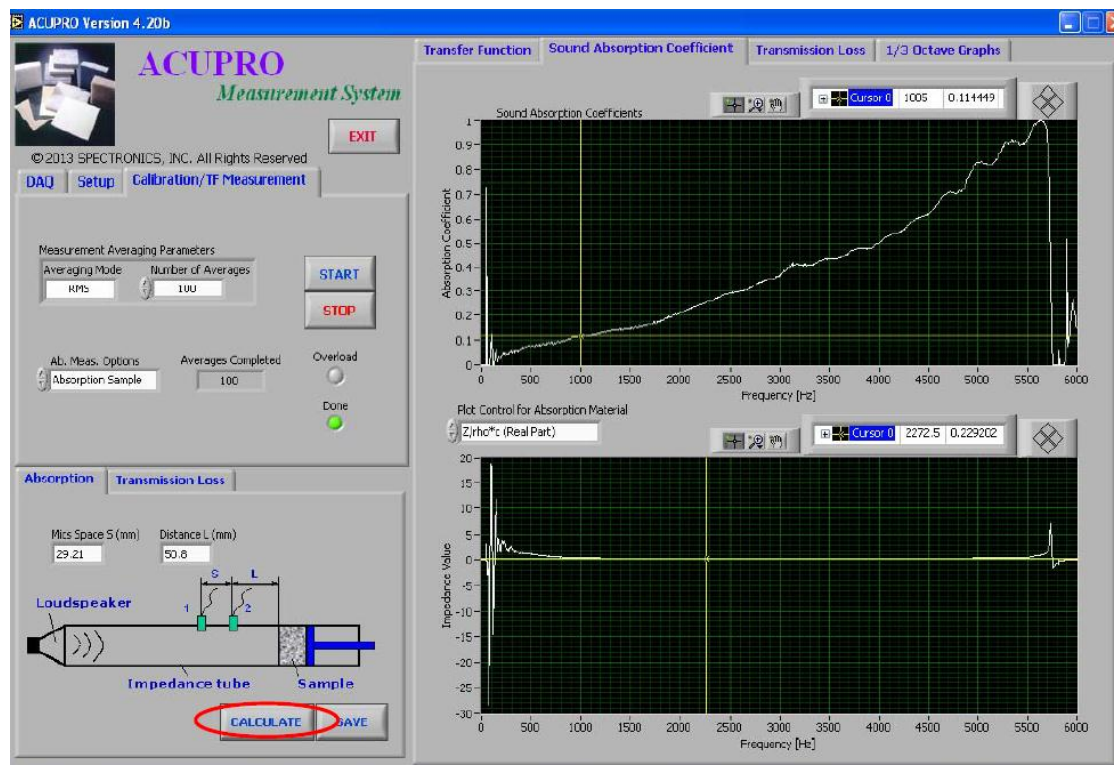


Figura 38. Captura gráfico coeficiente de absorción espuma de 12 mm.

Al seleccionar el panel ‘1/3 Octave Graphs’ en la parte superior derecha de la ventana principal, se obtendrá un gráfico de barras del coeficiente de absorción sonoro en bandas de un tercio de octava.

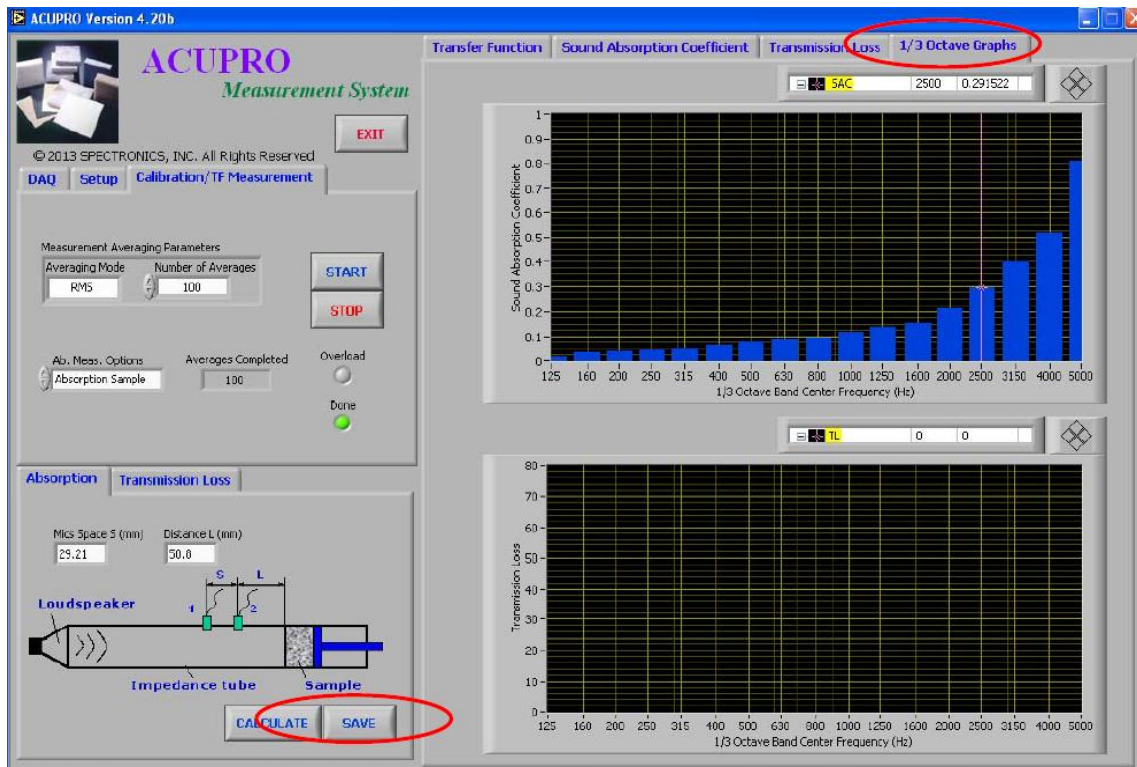


Figura 39. Captura gráfico coeficientes de absorción para de bandas de 1/3 de octava.

Como se muestra en la Figura 39, los resultados para el coeficiente de absorción sonoro desplegados por el software ACUPRO Version 4.5 pueden ser guardados al presionar el botón 'SAVE' visto en la parte inferior izquierda de la ventana principal. Automáticamente el programa creará un archivo de Excel usando la plantilla de 'Excel SAC\_Template.xls' en la carpeta c:\ACUPRO\_testing y solicitará que se le asigne un nombre a dicho archivo para que pueda ser explorado y/o guardado en una nueva carpeta que contenga los resultados de distintas mediciones.

El archivo de Excel contiene los parámetros de la ficha 'Setup', el número de promedios 'Number of Averages', las ubicaciones del micrófono y la fecha y hora de la medición. Las dos primeras columnas de la tabla del archivo

representan la frecuencia (Hz) y los coeficientes de absorción de la medición. Las columnas tercera y cuarta constituyen las partes real e imaginaria de la impedancia acústica, la quinta y sexta columnas son las partes real e imaginaria de la admitancia acústica y las dos últimas columnas figuran las partes real e imaginaria del coeficiente de reflexión de presión sonora. El coeficiente de absorción sonoro promediado en bandas de un tercio de octava se muestra en la parte superior derecha del archivo Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	ACUPRO IMPEDANCE AND ABSORPTION MEASUREMENTS AS PER ISO 10534-2 AND ASTM E1050													
2	Job Description:													
3	Date:	29/10/2016	Time:	1:42:00 PM										
4	Temperature(C) = 20,00													
5	Dist. of nearest MIC. to sample (mm) = 50,80													
6	Microphone spacing(mm) = 29,21													
7	Number of lines = 801,00													
8	Frequency resolution(Hz) = 6,87													
9	Average 1/3 Octave Band Sound Absorption Coefficient:													
10	Freq(Hz)	Absorp.	Re(Z/rho*c)	Im(Z/rho*c)	Adre(1/Z)	Adim(1/Z)	Reflection(re)	Reflection(im)	Center Freq.(Hz)		Measured			
11	0,000000E+0	0,000000E+0	0,000000E+0	0,000000E+0	NaN	NaN	-1,00E+06	0,000000E+0	1,00E+08	8,42E+04				
12	6,88E+06	0,000000E+0	-1,17E+02	-1,42E+04	-5,80E+05	7,03E+07	-1,00E+06	-2,85E+04	1,25E+08	4,10E+04				
13	1,38E+07	0,000000E+0	-1,44E+02	-2,85E+04	-1,78E+05	3,51E+07	-9,99E+05	-5,69E+04	1,60E+08	1,70E+05				
14	2,06E+07	0,000000E+0	-8,01E+01	-4,28E+04	-4,37E+04	2,34E+07	-9,96E+05	-8,55E+04	2,00E+08	2,02E+05				
15	2,75E+07	0,000000E+0	-5,47E+02	-5,84E+04	-1,60E+05	1,71E+07	-9,94E+05	-1,17E+05	2,50E+08	1,30E+05				
16	3,44E+07	1,79E+03	4,51E+02	-7,31E+04	8,43E+04	1,37E+07	-9,88E+05	-1,45E+05	3,15E+08	1,34E+05				
17	4,13E+07	0,000000E+0	-3,06E+03	-9,20E+04	-3,61E+05	1,09E+07	-9,89E+05	-1,84E+05	4,00E+08	1,29E+05				
18	4,81E+07	0,000000E+0	-4,04E+02	-1,37E+05	-2,15E+04	7,31E+06	-9,64E+05	-2,69E+05	5,00E+08	1,45E+05				
19	5,50E+07	0,000000E+0	-1,86E+03	-3,32E+05	-1,69E+04	3,01E+06	-8,04E+05	-6,00E+05	6,30E+08	1,44E+05				
20	6,19E+07	4,03E+05	2,30E+05	-8,76E+05	2,80E+05	1,07E+06	-7,92E+04	-7,69E+05	8,00E+08	1,45E+05				
21	6,88E+07	0,000000E+0	-1,13E+06	3,70E+05	-7,98E+05	-2,60E+05	2,72E+06	4,79E+06	1,00E+09	1,62E+05				
22	7,56E+07	0,000000E+0	-7,76E+05	6,36E+05	-7,71E+05	-6,31E+05	1,61E+04	2,80E+06	1,25E+09	1,80E+05				
23	8,25E+07	0,000000E+0	-3,63E+05	6,04E+05	-7,30E+05	-1,22E+06	-6,53E+05	1,57E+06	1,60E+09	2,15E+05				
24	8,94E+07	0,000000E+0	-1,71E+05	2,50E+06	-2,73E+04	-3,98E+05	7,61E+05	7,21E+05	2,00E+09	2,65E+05				
25	9,63E+07	9,89E+02	2,10E+04	9,16E+06	2,50E+02	-1,09E+05	9,76E+05	2,16E+05	2,50E+09	3,64E+05				
26	1,03E+08	1,87E+06	1,55E+07	7,61E+06	5,18E+04	2,59E+04	0,00E+06	4,57E+04	3,15E+09	4,89E+05				

Figura 40. Captura archivo de Excel.

### 3.4.2. Parámetro 'Transmission Loss'

El procedimiento para el cálculo de pérdida por transmisión 'Transmission Loss' está basado de acuerdo con la norma ASTM E2611, bajo el nombre, "Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Base on the Transfer Matrix Method". Para el presente caso, se conecta la brida del tubo TL al extremo del tubo principal ACUPRO utilizando los tres tornillos suministrados por el sistema donde, deben ser apretados solamente de forma manual. La conexión del sistema ACUPRO para

la obtención de la pérdida por transmisión (TL) se muestra en la siguiente imagen.

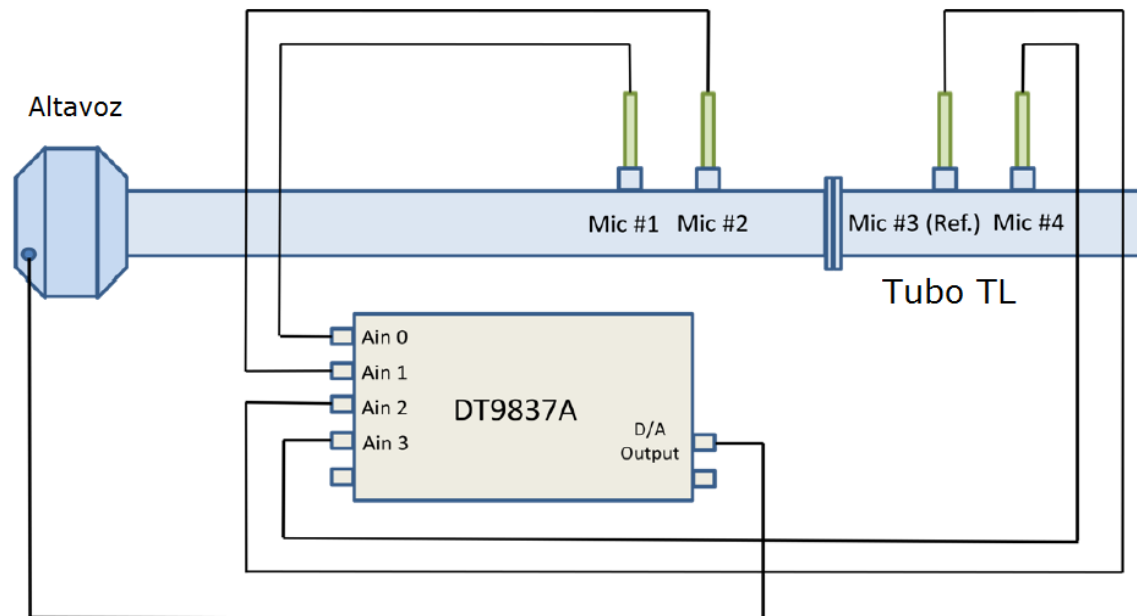


Figura 41. Conexión Tubo de impedancia para la obtención de TL.  
Adaptado de Spectronics, 2013.

La norma ASTM E2611, conocida comúnmente como "método de dos cargas", hace uso de dos terminaciones independientes (o "cargas") en el tubo TL para determinar la pérdida por transmisión 'Transmission Loss' de la muestra del material bajo prueba. Las cargas o terminaciones que el manual de Spectronics recomienda están disponibles como una opción para el sistema ACUPRO y se conocen como carga anecoica A y carga rígida B.



Figura 42. Terminaciones o cargas para el tubo TL del sistema ACUPRO.

Los micrófonos deben estar montados en posición estándar tal y como se muestra en la Figura 41. Una medición para la pérdida por transmisión (TL) requiere los siguientes pasos a seguir, mismos que serán discutidos en la sección 3.4.1.4:

- Una etapa de calibración con los micrófonos en posición estándar.
- Tres etapas de calibración adicionales en los que el micrófono de referencia es intercambiado en secuencia con cada uno de los otros micrófonos restantes.
- Una etapa de medición con los micrófonos en posición estándar y con la carga anecoica A insertada en el extremo abierto del tubo TL.
- Una etapa de medición con los micrófonos en posición estándar y con la carga rígida B insertada en el extremo abierto del tubo TL.

El programa de medición ACUPRO es ejecutado tal y como se describe en la sección 3.4 de la presente investigación. Inicialmente, el software ACUPRO deberá abrirse en la modalidad de absorción de sonido similar a la ventana que se muestra en la Figura 30. Se da clic en la pestaña 'Transmission Loss' para desplegar la pantalla que se muestra a continuación en la Figura 43.

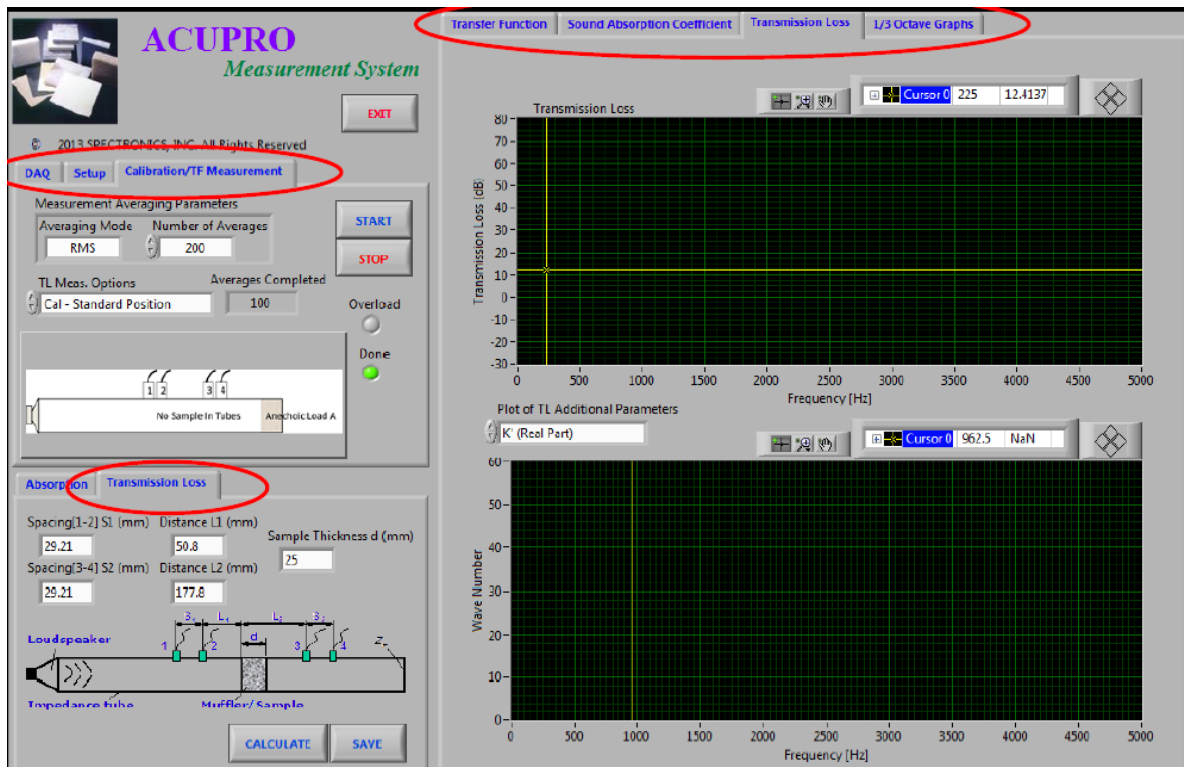


Figura 43. Ventana principal para la medición de TL.

El esquema en la esquina inferior izquierda de la pantalla define las distancias de separación del micrófono S1 y S2, las distancias de los micrófonos 2 y 3 a la cara frontal de la muestra, L1 y L2, y el grosor de la muestra de ensayo d. Según el manual de usuario ACUPRO, los únicos parámetros que influyen en el cálculo del TL son las distancias de separación del micrófono S1 y S2; y deben ajustarse a 29,21 mm.

### 3.4.2.1. Configuración DAQ

Al igual que en la sección 3.4.1.1, el panel de adquisición de datos DAQ (Data acquisition) se utiliza para configurar el tipo de micrófonos y los rangos de voltaje de entrada de los mismos. La única diferencia radica en el número de micrófonos implementados en la medición.



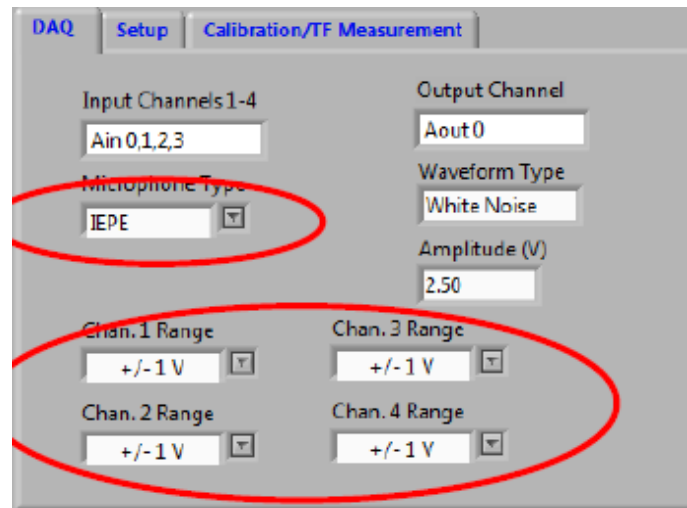


Figura 44. Captura configuración DAQ para obtención TL.

### 3.4.2.2. Configuración Setup

Los parámetros de control de la configuración 'Setup' se aplican al igual que la descripción proveniente de la sección 3.4.1.2.

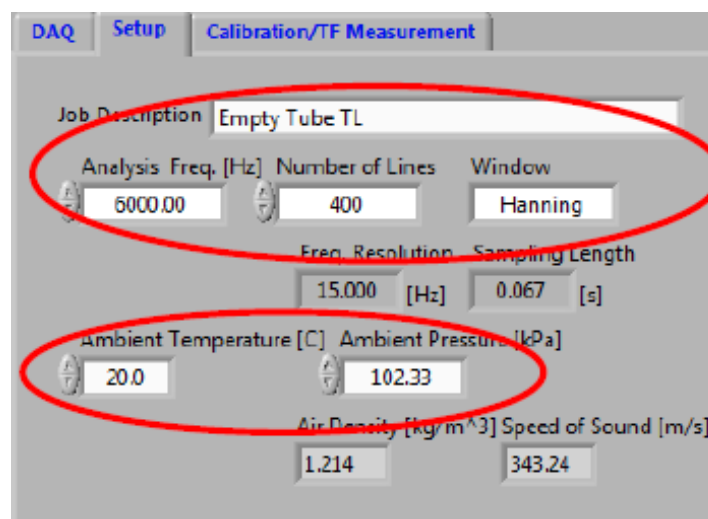


Figura 45. Captura configuración Setup para la obtención de TL.

### 3.4.2.3. Configuración Calibration / TF Measurement

Al igual que la sección 3.4.1.3, debe establecerse el número de promedios a un valor deseado, normalmente de 100 a 200. Las opciones del menú desplegable denominado 'TL Meas. Options' serán discutidas en las secciones 3.4.2.4 y 3.4.2.5.

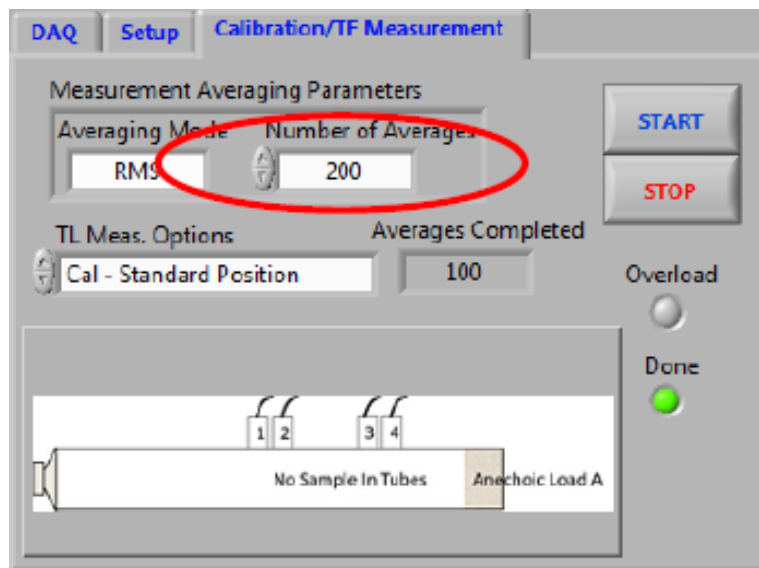


Figura 46. Captura parámetro Calibration/TF Measurement para la obtención de TL.

### 3.4.2.4. Calibración de fase de micrófonos

Según la norma ASTM E2611, antes de realizar las mediciones para la pérdida por transmisión (TL), debe llevarse a cabo una calibración de fase entre cada par de micrófonos (1-3, 2-3 y 4-3) donde el micrófono #3 es el micrófono de referencia, tal y como se muestra en la Figura 41. Se requieren cuatro pasos, descritos a continuación, para completar las calibraciones de dichos micrófonos.

En primera instancia, la carga anecoica A deberá ser insertada en el extremo abierto del tubo TL, como se muestra en la Figura 42. A continuación, usando el menú desplegable 'TL Meas. Options', se selecciona la opción 'Cal – Standard Position'. 'Cal – Standard Position' o posición estándar, se refiere a la posición de los micrófonos cuando estos se encuentran ubicados en secuencia del 1 al 4, como se muestra en la Figura 47. Al seleccionar 'Cal – Standard Position' se mostrará un pequeño diagrama en el panel del software de ACUPRO. Este diagrama muestra los micrófonos en la posición estándar con la carga anecoica A insertada en el extremo abierto del tubo TL.

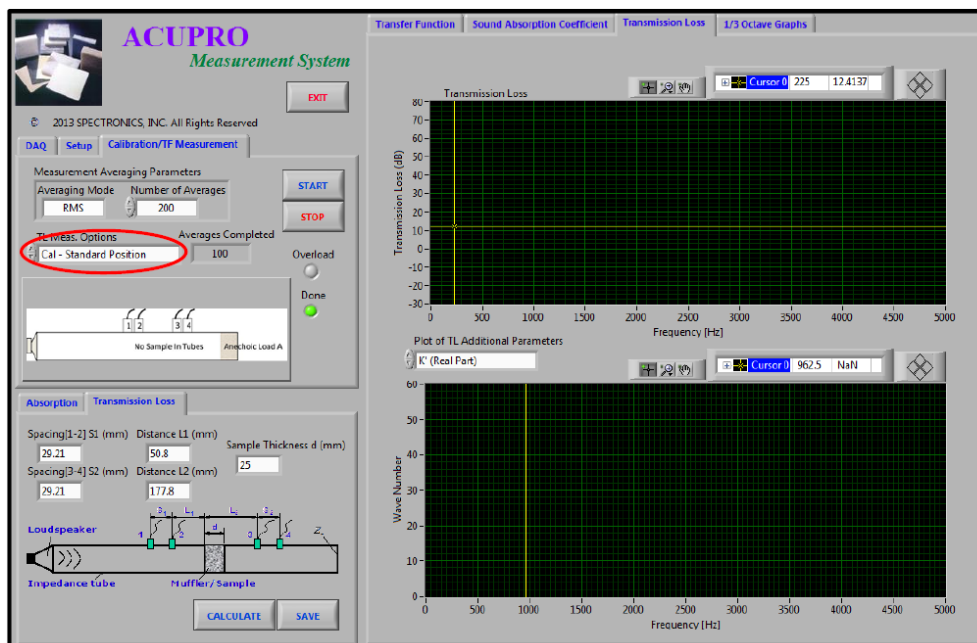


Figura 47. Captura diagrama obtención TL.

Seguidamente, se presiona el botón 'START' y mientras la adquisición de datos está en progreso, deben examinarse las señales de entrada en el dominio del tiempo seleccionando cada una de las pestañas 'Ch I', 'Ch II', 'Ch III' y 'Ch IV' para confirmar que las señales tengan una intensidad adecuada, deben examinarse además las tres funciones de transferencia (1-3, 2-3 y 4-3). Si

alguna de las funciones de transferencia continua cambiando cerca de la finalización de la adquisición de datos, debe aumentarse el número de promedio. También se sugiere el inspeccionar el gráfico de coherencia (gráfico inferior) de cada función de transferencia para asegurarse de que el nivel esté cerca de la unidad; excepto por encima de aproximadamente 5 kHz y por debajo de aproximadamente 300 Hz.

Una vez completados el número de promedios, se crearán tres archivos para la función de transferencia llamados 'CAL13\_1.dat', 'CAL23\_1.dat' y 'CAL43\_1.dat' en la carpeta c:\ACUPRO\_testing. El programa solicitará si se desea o no reemplazar los archivos existentes, como se muestra en la Figura 49. Consecutivamente se presiona el botón 'OK'.

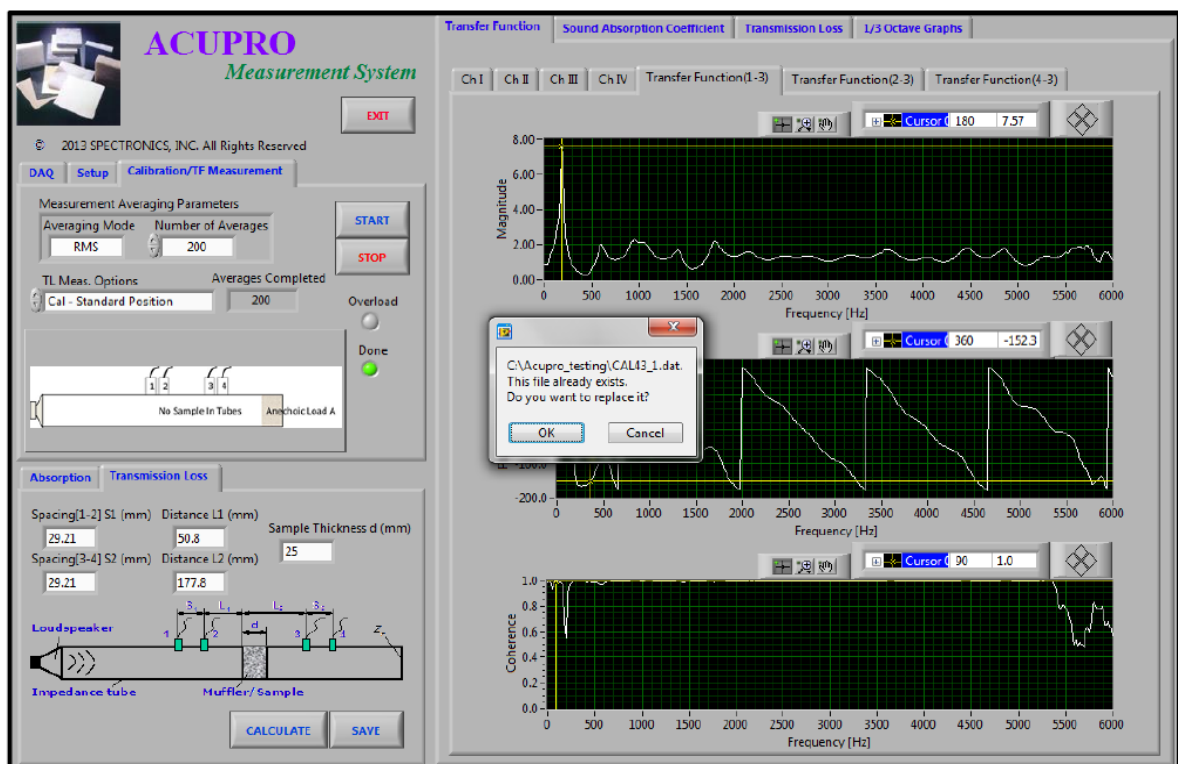


Figura 48. Captura primer resultado para las 3 funciones de transferencia.

A partir de ahora, el proceso de calibración implica intercambiar secuencialmente las posiciones del micrófono 3 con los micrófonos 1, 2 y 4 y realizar otras tres mediciones de la función de transferencia. Estos tres pasos se llevan a cabo utilizando el menú desplegable 'TL Meas. Options' para seleccionar en secuencia las opciones 'Cal-H13', 'Cal-H23' y 'Cal-H43'.

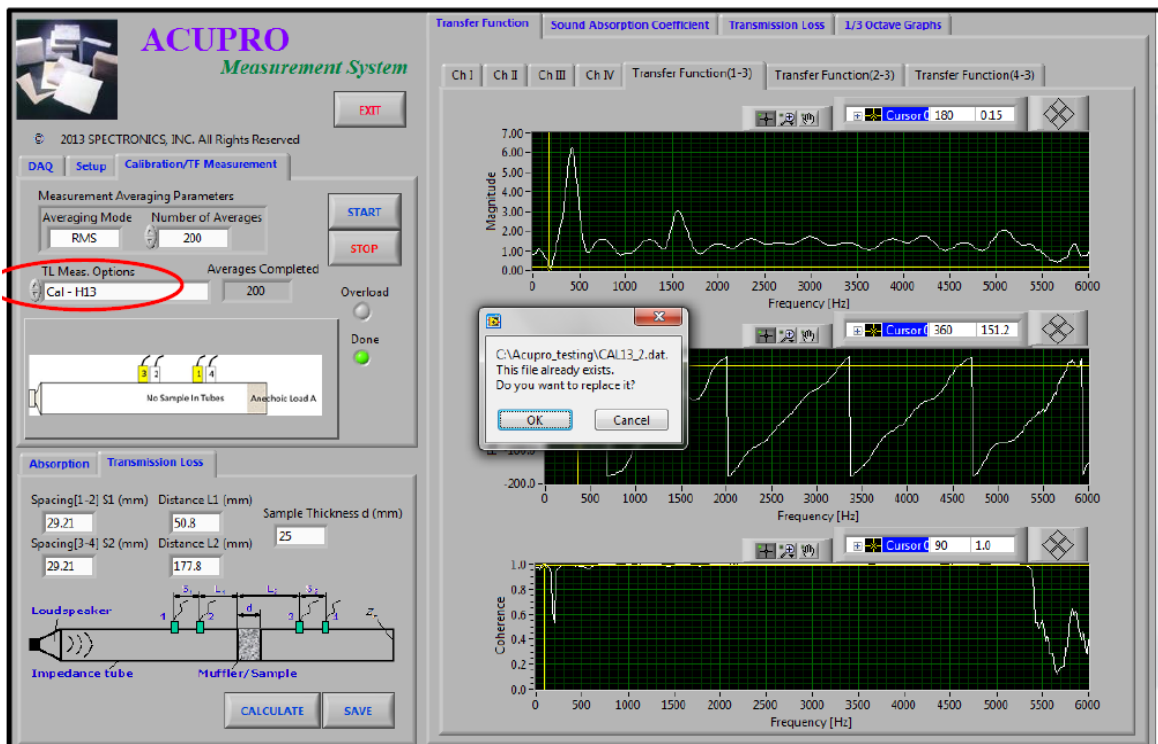


Figura 49. Captura segunda toma para la función de transferencia.

En la Figura 49 la calibración se muestra para la opción 'Cal-H13'. La pequeña imagen debajo del menú desplegable muestra que para esta opción de medición se han intercambiado los micrófonos 1 y 3 (estos son los únicos micrófonos que están siendo calibrados durante proceso de calibración). A continuación se presiona 'START' para comenzar la medición. Si existe un archivo previamente almacenado denominado 'CAL13\_2.dat', el programa preguntará si se desea o no reemplazarlo; seleccionar 'OK'.

Terminado el proceso de calibración deben aparecer un nuevo par de archivos de calibración llamados 'CAL13\_1.dat' y 'CAL13\_2.dat' para el par de micrófonos 1 y 3. Estos dos archivos son almacenados en la carpeta 'c:\ACUPRO\_testing' y son utilizados por el software ACUPRO para calcular una función de calibración para el par de micrófonos 1 y 3.

La calibración para los pares de micrófonos 2-3 y 4-3 implica repetir el proceso de calibración descrito anteriormente. Esto se hace seleccionando a su vez las otras dos opciones 'Cal-H23' y 'Cal-H43' del menú desplegable 'TL. Meas. Options', adquiriendo datos para cada medición y seleccionando 'OK' cuando el programa pregunte si se desea reemplazar el archivo existente. Una vez completado el procedimiento de calibración para todos los pares de micrófonos, deben reubicarse los micrófonos a la posición estándar.

#### **3.4.2.5. Obtención de las mediciones por TL (Transmission Loss)**

La obtención de los resultados para pérdida por transmisión (TL) consiste en hacer dos mediciones con los micrófonos en posición estándar y la muestra de ensayo situada entre los dos pares de micrófonos: 1-2 y 3-4. Posterior al proceso de calibración descrito anteriormente, la primera medición se realiza utilizando la carga anecoica A. La segunda medición se realiza después de sustituir la carga anecoica A por la carga Rígida B.

A continuación, desde el menú desplegable 'TL Meas. Options' se selecciona la opción 'Measurement – Load A'. Con los micrófonos en la posición estándar y la carga anecoica A ubicada en el extremo del tubo TL, se presiona el botón 'START'. Mientras la adquisición de datos está en progreso, deben examinarse las tres funciones de transferencia 1-3, 2-3 y 4-3; para comprobar si alguna de ellas sigue cambiando cerca de la finalización del número de promedios. Debe

ajustarse el número de promedios y / o el rango si hay algún problema durante la adquisición de datos. Como se muestra en la Figura 50, el programa solicitará reemplazar las tres funciones de transferencia 'H13A.dat', 'H23A.dat' y 'H43A.dat' provenientes de la carpeta 'c:\ACUPRO\_testing'; seleccionar 'OK'.

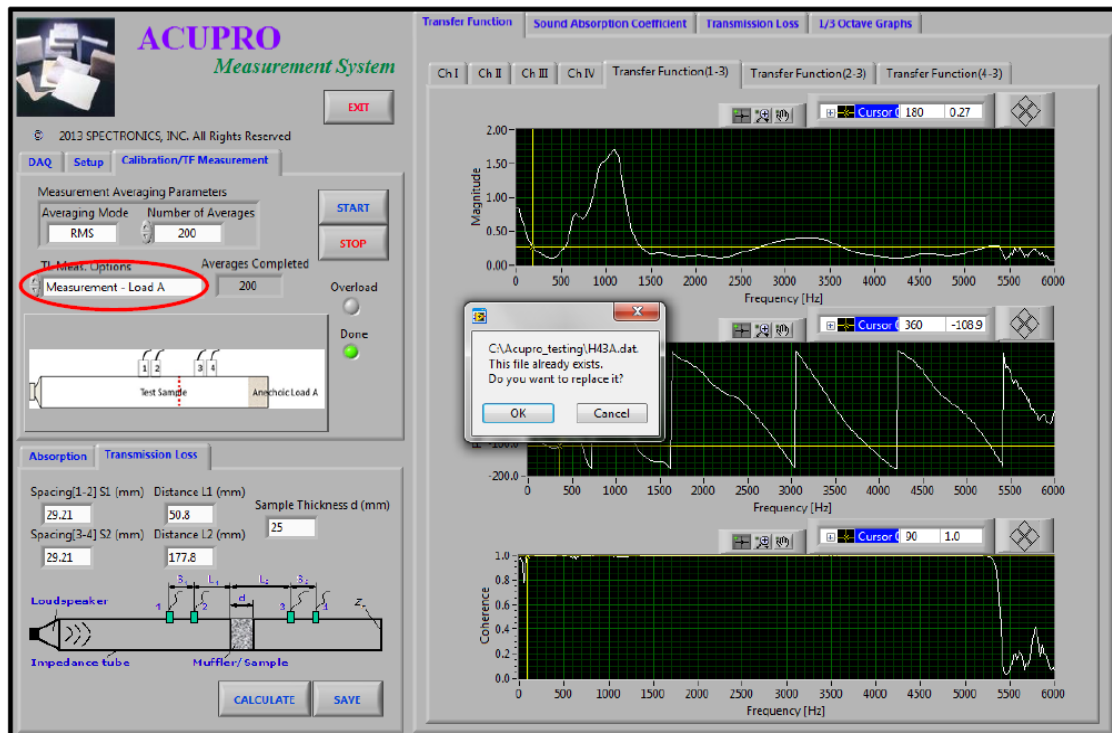


Figura 50. Captura obtención TL para carga anecoica A.

Para el paso final de la medición TL, debe reemplazarse la carga anecoica A por la carga rígida B, como se muestra en la Figura 42. En el menú desplegable 'TL Meas. Options' se selecciona la opción 'Measurement - Load B' y se pulsa el botón 'START' para la adquisición de datos. Como es habitual, mientras la adquisición de datos está en curso; deben examinarse las tres funciones de transferencia (1-3, 2-3 y 4-3) y la coherencia de cada una de ellas con el fin de reajustarlas en caso de que se produzcan problemas en la medición. Como se ilustra en la Figura 51, el programa solicitará el reemplazo

de las tres funciones de transferencia 'H13B.dat', 'H23B.dat' y 'H43B.dat' provenientes de la carpeta 'c:\ACUPRO\_testing'.

En este punto de la medición es una buena idea revisar la carpeta 'c:\ACUPRO\_testing', mostrada en la Figura 52, para asegurarse de que todos los archivos de adquisición de datos acaban de completarse. En la práctica, deberían existir seis archivos "CAL" y seis archivos "H". Si la fecha en cualquiera de estos archivos no es actual, significa que no ha sido reemplazado con un nuevo archivo cuando se completó la adquisición de datos para esa medición. En ese caso, habrá que repetir la medición y reemplazar el archivo antiguo por uno nuevo.

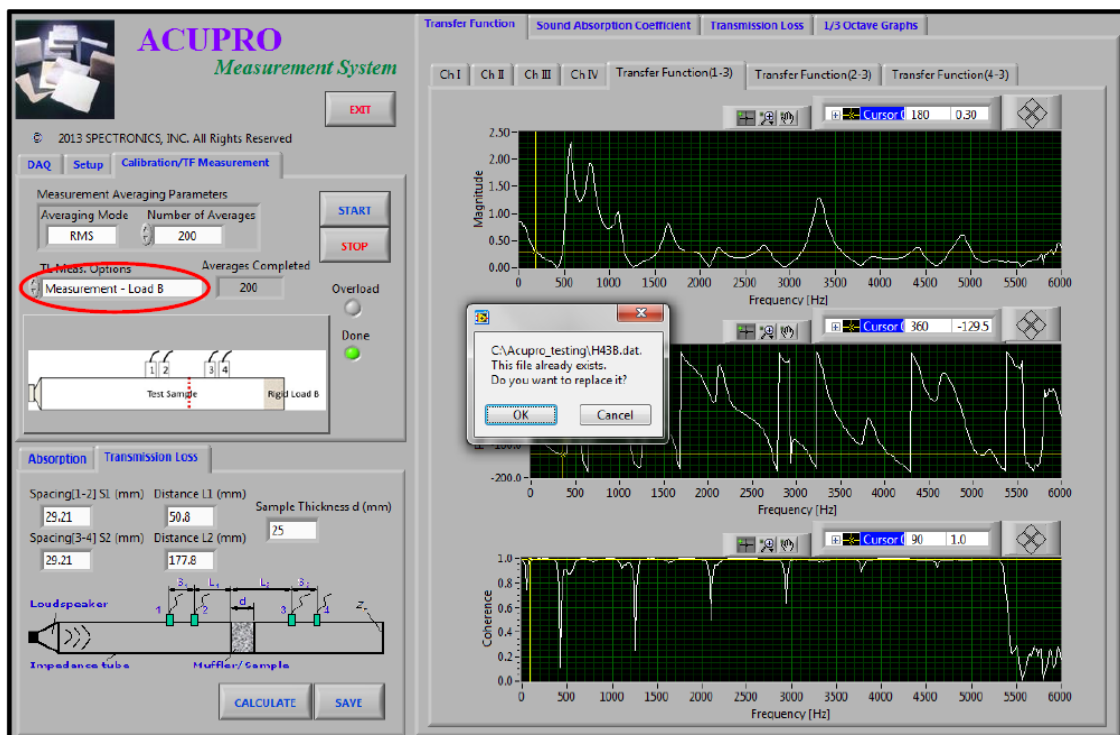


Figura 51. Captura medición TL para carga rígida B.



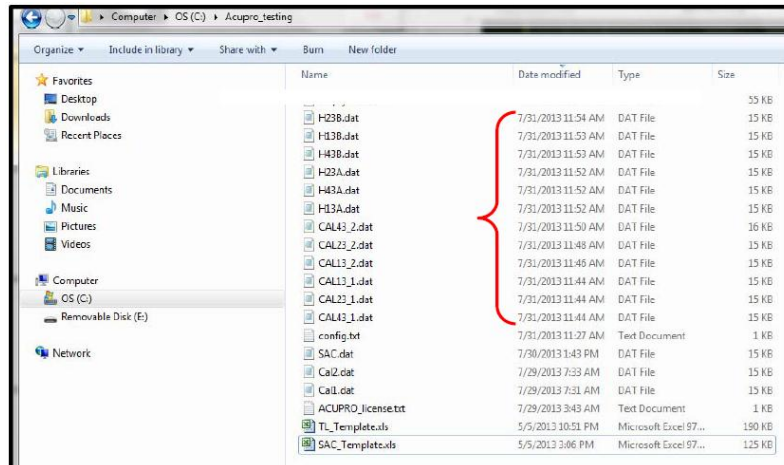


Figura 52. Captura archivos de adquisición de datos para TL.

Finalmente, se da clic en el botón 'CALCULATE' para desplegar el valor TL del material bajo prueba. El resultado de la Figura 53 es para una muestra de espuma de 25 mm de espesor.

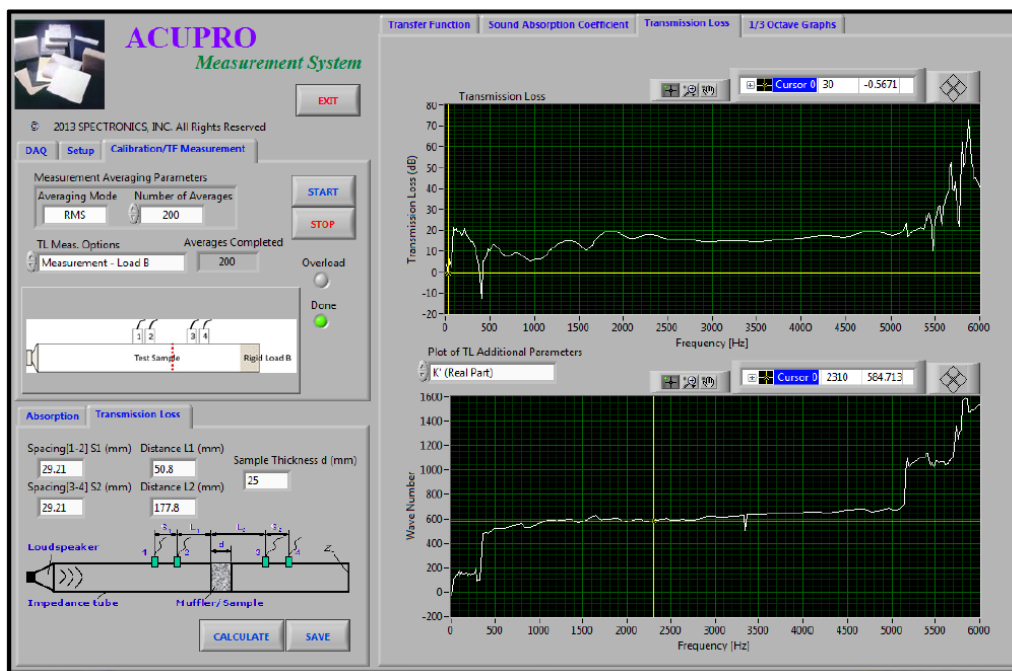


Figura 53. Captura TL para una muestra de espuma de 25 mm.

Al presionar el botón SAVE se crean dos tipos de archivos para procesar posteriormente los datos TL. El primer tipo de archivo es un archivo de texto y el segundo es un archivo de Excel. Estos archivos son similares a los creados para la medición de absorción acústica descritos en la sección 3.4.1.5.

#### **4. CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En el presente capítulo se detallan los datos obtenidos según el procedimiento de medición descrito en el capítulo anterior. Cabe aclarar que Industrias Ambientales DOSEL se reserva el derecho de modificar las especificaciones técnicas del material musáceo para garantizar la óptima calidad y funcionalidad del producto. Esto, debido a que las dimensiones y peso de los paneles o rollos del material pueden variar en +/- 5%. En ese sentido, Industrias Ambientales DOSEL tampoco especifica el tipo de aglutinante implementado en las muestras de ensayo. Por lo que, para la presente investigación, entiéndase como material aglutinado aquel en donde sus fibras no tejidas se encuentran unidas o pegadas unas con otras formando una estructura compacta.

Los códigos inscritos en la Tabla 3 para la identificación de los paneles o muestras musáceas utilizadas en las pruebas de ensayo, pertenecen a las muestras obtenidas por el procedimiento descrito en el apartado 3.3.1 y a la ilustración de la Figura 27, donde: A, B, C y D corresponden a los códigos M4, M10, MA10 y MA4 respectivamente. El valor de las densidades de dichas muestras son conferidas por Industrias Ambientales DOSEL. Los demás códigos de la Tabla 3 atañen a la incorporación de capas superpuestas (de las mismas muestras) con el objetivo de incrementar su espesor.

Los datos de entrada para la densidad de las muestras M50A40 y M75A40 están sujetos a pequeñas variaciones y deben ser entendidas como

referenciales. Esto, debido a que su disposición se basa en la combinación de distintos espesores y densidades de musácea. Dichos valores fueron obtenidos mediante la siguiente ecuación:

$$D_{(mezcla)} = \frac{m_A + m_B}{V_A + V_B} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

$D_{(mezcla)}$	: densidad de la mezcla
$M_A$	: masa del material A
$M_B$	: masa del material B
$V_A$	: volumen del material A
$V_B$	: volumen del material B

En los apartados 4.11, 4.12 se representa una serie de comparaciones del coeficiente de absorción sonora y pérdida por transmisión (TL) para las muestras musáceas provenientes de la Tabla 3.

Cabe aclarar que para la obtención de los resultados de cada curva de absorción y pérdida por transmisión, se hizo un promedio de 3 medidas por cada muestra de ensayo. Esto, con el fin de optimizar la repetibilidad de las mediciones hechas en laboratorio.

Tabla 3. Codificación de las muestras musáceas

<b>Panel</b>	<b>Código</b>
Panel musáceo de 4 mm de espesor	M4
Panel musáceo aglutinado de 4mm de espesor	MA4
Panel musáceo de 10 mm de espesor	M10
Panel musáceo aglutinado de 10 mm de espesor	MA10
Panel musáceo de 8 mm de espesor	M8
Panel musáceo aglutinado de 8 mm de espesor	MA8
Panel musáceo de 20 mm de espesor	M20
Panel musáceo aglutinado de 20 mm de espesor	MA20
Panel musáceo 50% aglutinado de 40 mm de espesor	M50A40
Panel musáceo 75% aglutinado de 40 mm de espesor	M75A40

#### 4.1. Panel M4

##### — Datos de Entrada

Tabla 4. Datos de entrada panel M4

<b>Datos</b>	<b>Panel musáceo de 4 mm de espesor</b>
Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )	0,24
Densidad volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )	60
Espesor (m)	0,004
Volumen (m <sup>3</sup> )	3,85X10 <sup>-6</sup>
Masa (kg)	0,00023

— Coeficiente de absorción sonoro

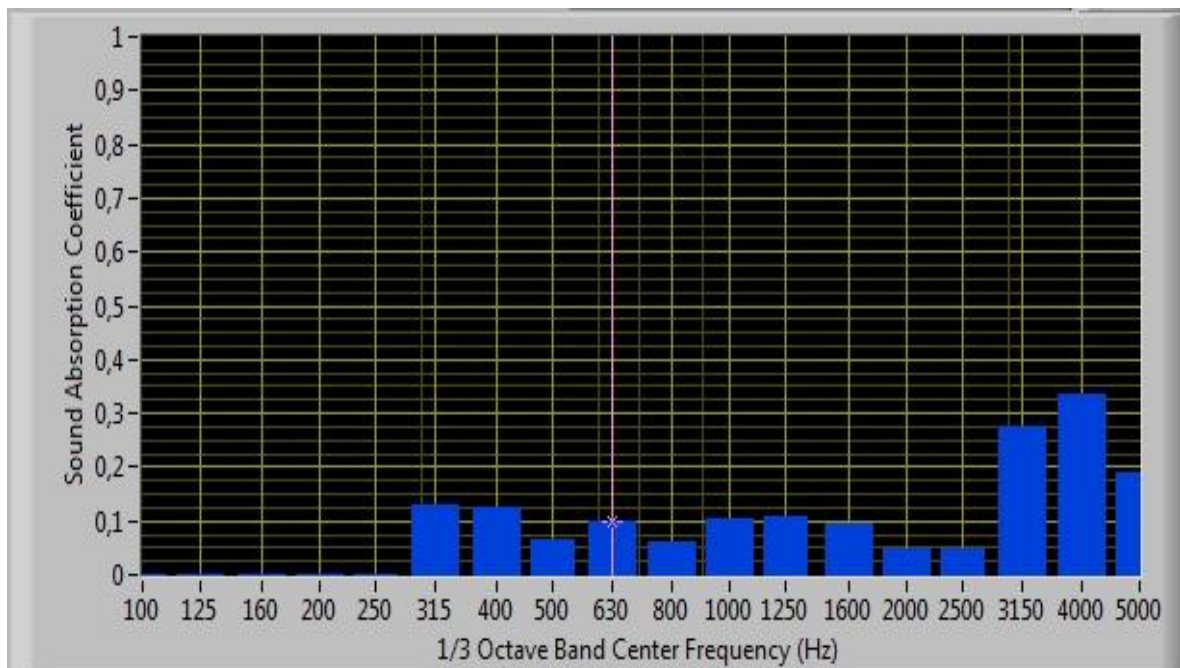


Figura 54. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M4



Figura 55. Muestra de ensayo M4 y su respectivo esquema.

## 4.2. Panel MA4

### — Datos de Entrada

Tabla 5. Datos de entrada panel MA4

Datos	Panel musáceo aglutinado 4 mm de espesor
Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )	0,6
Densidad volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )	150
Espesor (m)	0,004
Volumen (m <sup>3</sup> )	3,85X10 <sup>-6</sup>
Masa (kg)	0,00058

### — Coeficiente de absorción sonoro

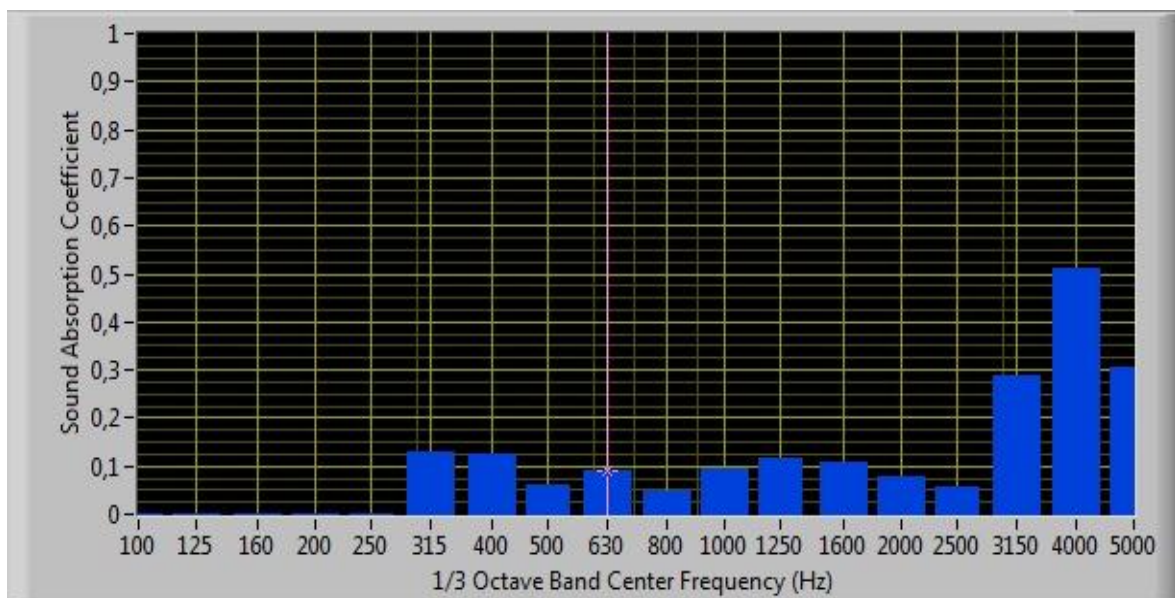


Figura 56. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA4.

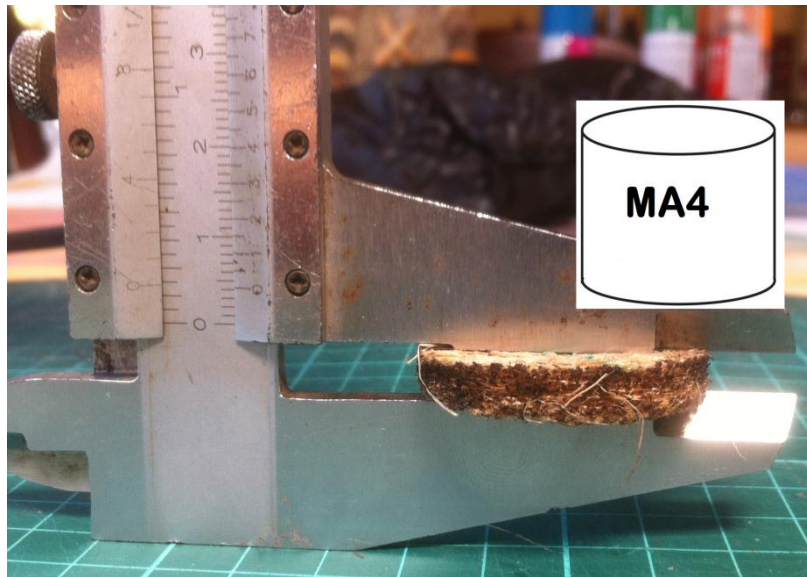


Figura 57. Muestra de ensayo MA4 y su respectivo esquema.

#### 4.3. Panel M10

##### — Datos de Entrada

Tabla 6. Datos de entrada panel M10

Datos	Panel musáceo de 10 mm de espesor
Densidad superficial ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	0,35
Densidad volumétrica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	35
Espesor (m)	0,01
Volumen ( $\text{m}^3$ )	$9,62 \times 10^{-6}$
Masa (kg)	0,00034

— Coeficiente de absorción sonoro

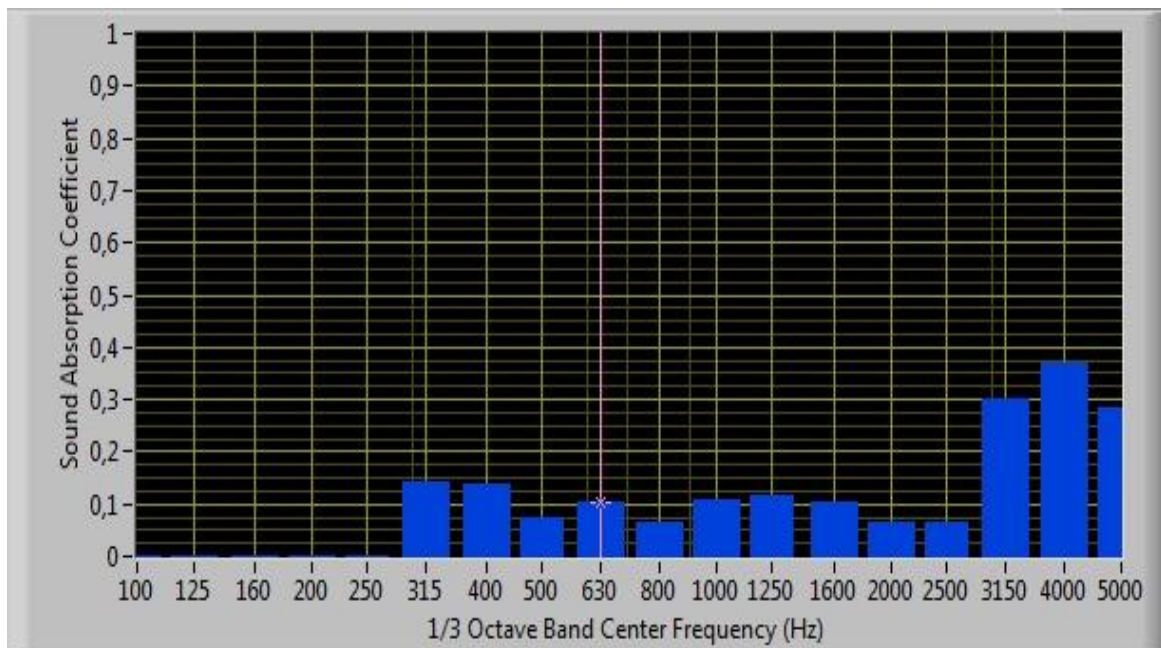


Figura 58. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M10.

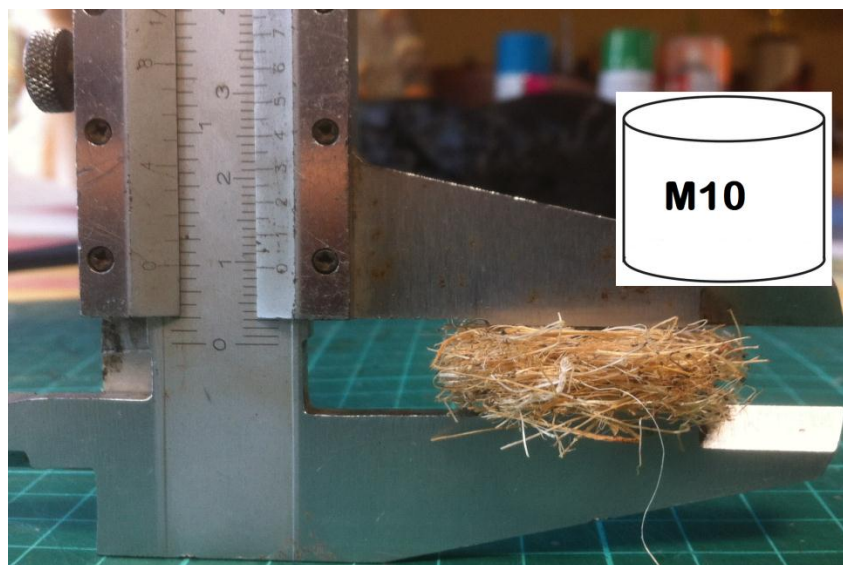


Figura 59. Muestra de ensayo M10 y su respectivo esquema.



#### 4.4. Panel MA10

##### — Datos de Entrada

Tabla 7. Datos de entrada panel MA10

Datos	Panel musáceo aglutinado 10 mm espesor
Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )	0,8
Densidad volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )	80
Espesor (m)	0,01
Volumen (m <sup>3</sup> )	9,62X10 <sup>-6</sup>
Masa (kg)	0,00077

##### — Coeficiente de absorción sonoro

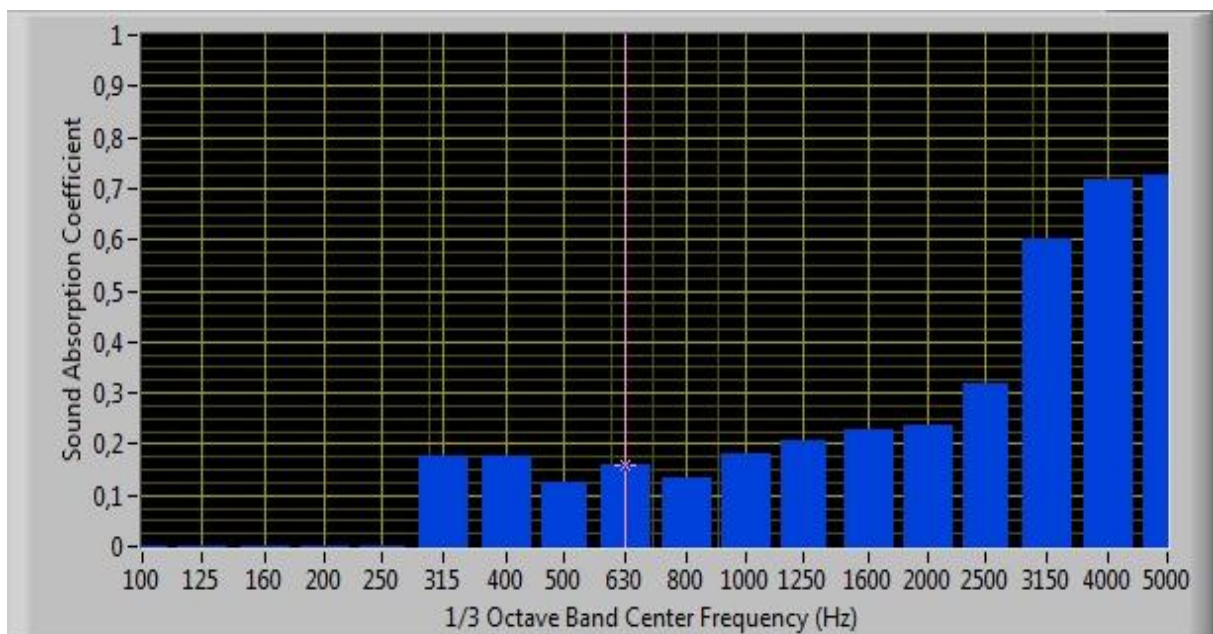


Figura 60. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA10.

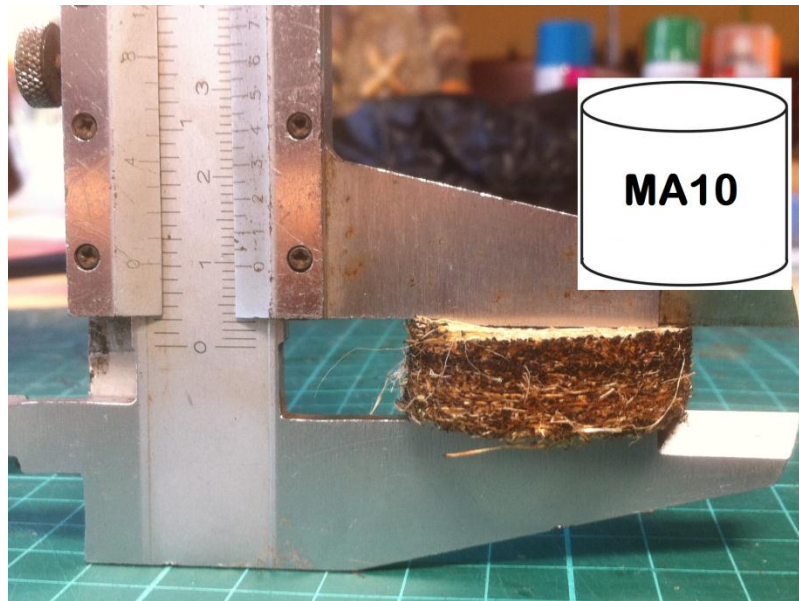


Figura 61. Muestra de ensayo MA10 y su respectivo esquema.

#### 4.5. Panel M8

##### — Datos de Entrada

Tabla 8. Datos de entrada panel M8

Datos	Panel musáceo de 8 mm de espesor
Densidad superficial ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	0,24
Densidad volumétrica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	30
Espesor (m)	0,008
Volumen ( $\text{m}^3$ )	$7,70 \times 10^{-6}$
Masa (kg)	0,00023

— Coeficiente de absorción sonoro

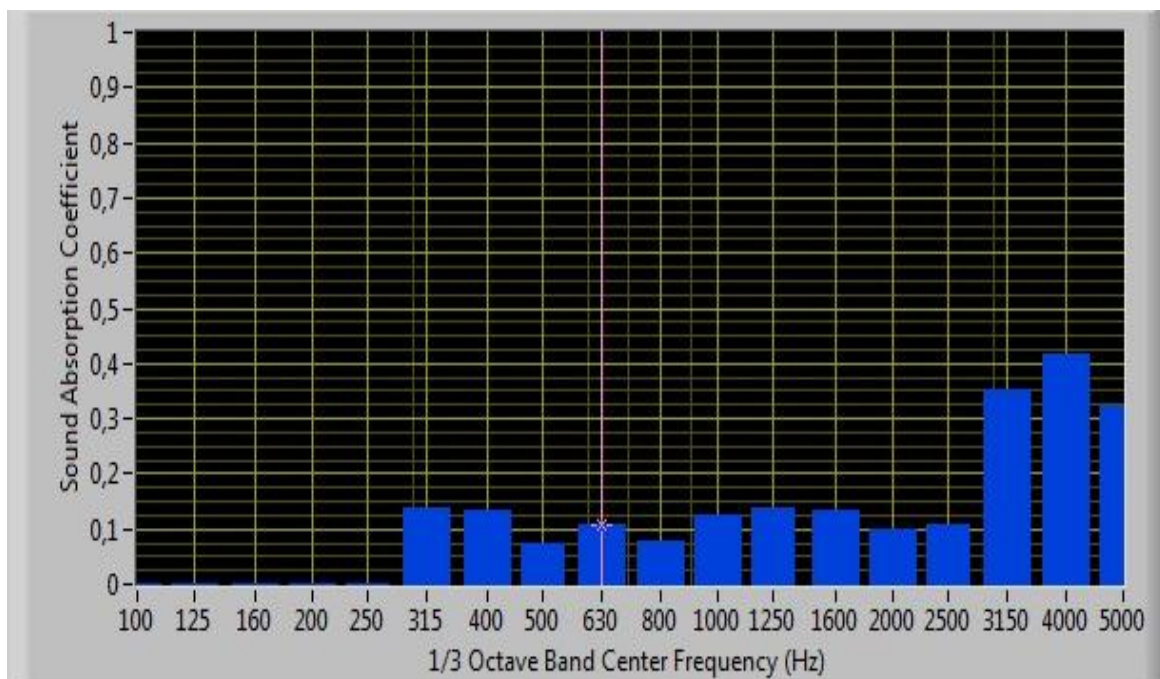


Figura 62. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M8.



Figura 63. Muestra de ensayo M8 y su respectivo esquema.

#### 4.6. Panel MA8

##### — Datos de Entrada

Tabla 9. Datos de entrada panel MA8

Datos	Panel musáceo aglutinado 8 mm de espesor
Densidad superficial ( $\text{kg/m}^2$ )	0,6
Densidad volumétrica ( $\text{kg/m}^3$ )	75
Espesor (m)	0,008
Volumen ( $\text{m}^3$ )	$7,70 \times 10^{-6}$
Masa	0,00058

##### — Coeficiente de absorción sonoro

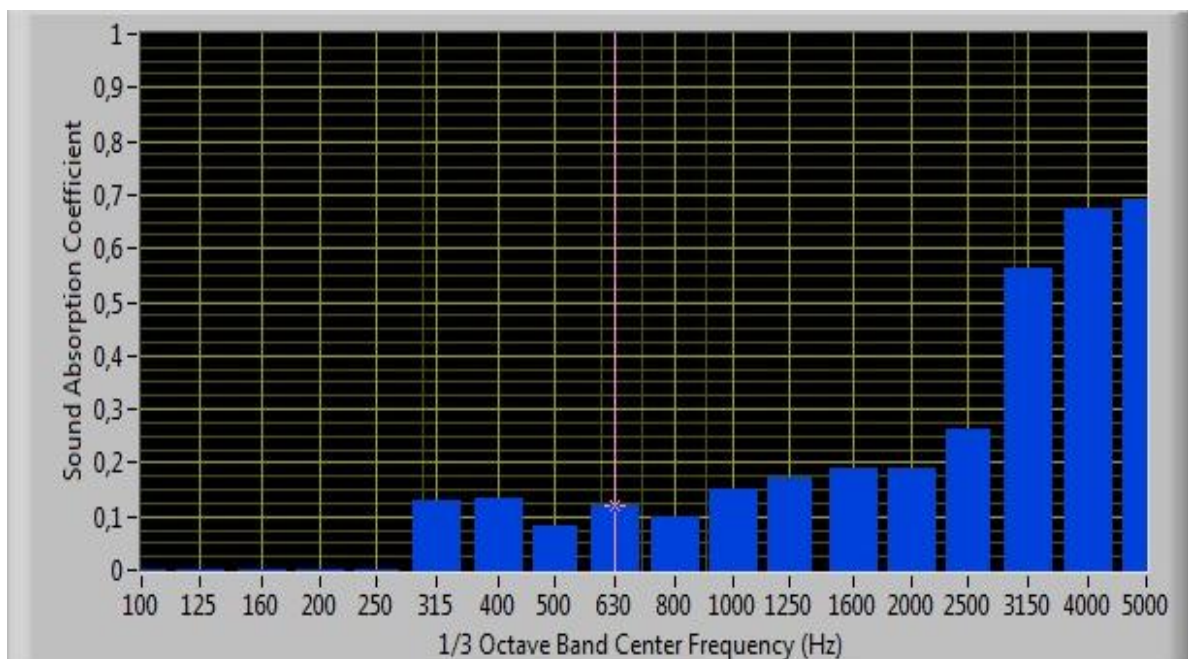


Figura 64. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA8.

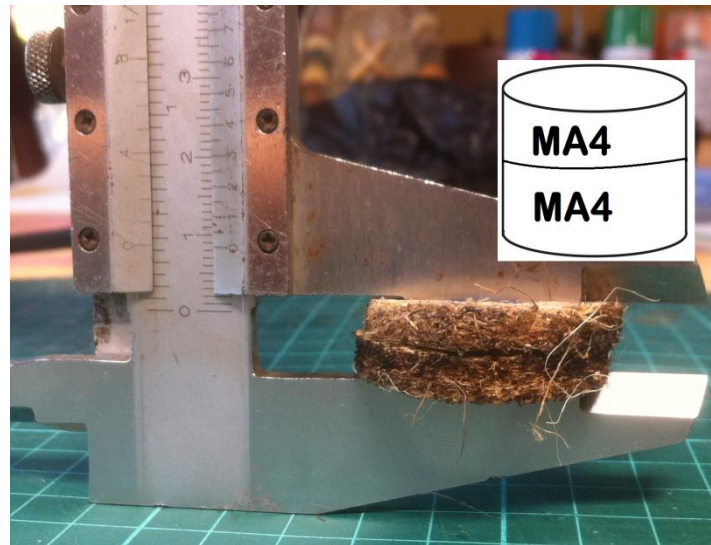


Figura 65. Muestra de ensayo MA8 y su respectivo esquema.

#### 4.7. Panel M20

##### — Datos de Entrada

Tabla 10. Datos de entrada panel M20

<b>Datos</b>	<b>Panel musáceo de 20 mm de espesor</b>
Densidad superficial ( $\text{kg/m}^2$ )	0,35
Densidad volumétrica ( $\text{kg/m}^3$ )	17,5
Espesor (m)	0,02
Volumen ( $\text{m}^3$ )	$1,92 \times 10^{-5}$
Masa (kg)	0,00034

— Coeficiente de absorción sonoro

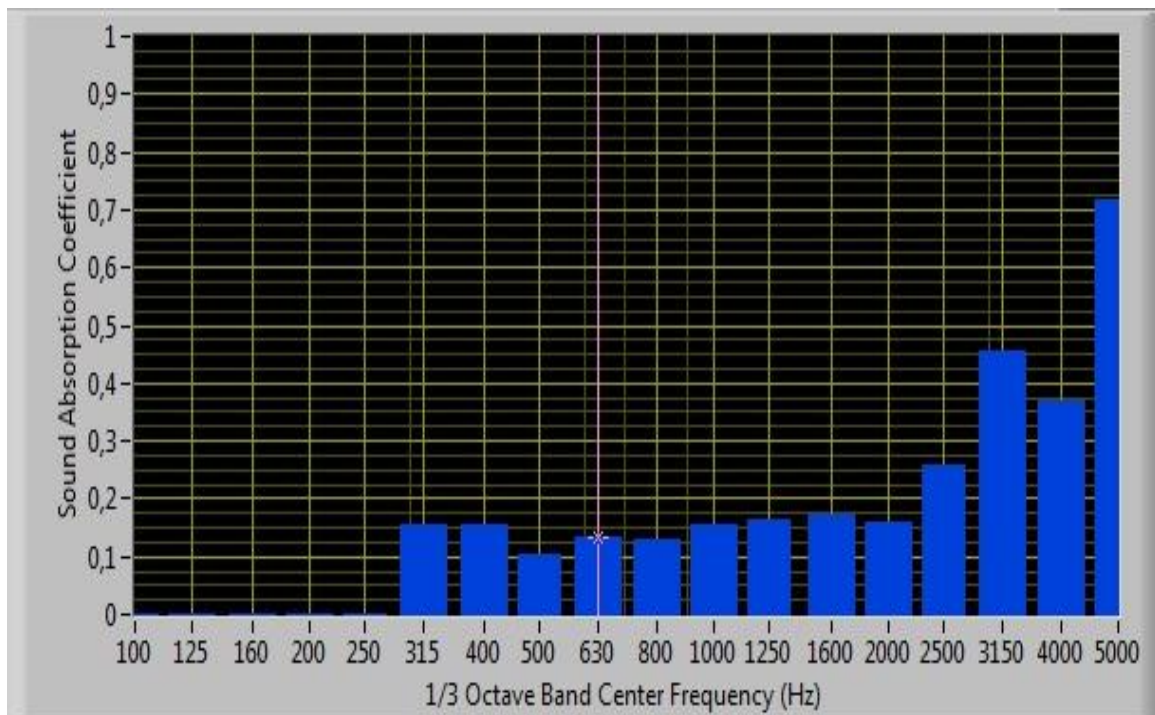


Figura 66. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M20.



Figura 67. Muestra de ensayo M20 y su respectivo esquema.

#### 4.8. Panel MA20

##### — Datos de Entrada

Tabla 11. Datos de entrada panel MA20

Datos	Panel musáceo aglutinado 20 mm espesor
Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )	0,8
Densidad volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )	40
Espesor (m)	0,02
Volumen (m <sup>3</sup> )	1,92X10 <sup>-5</sup>
Masa (kg)	0,00077

##### — Coeficiente de absorción sonoro

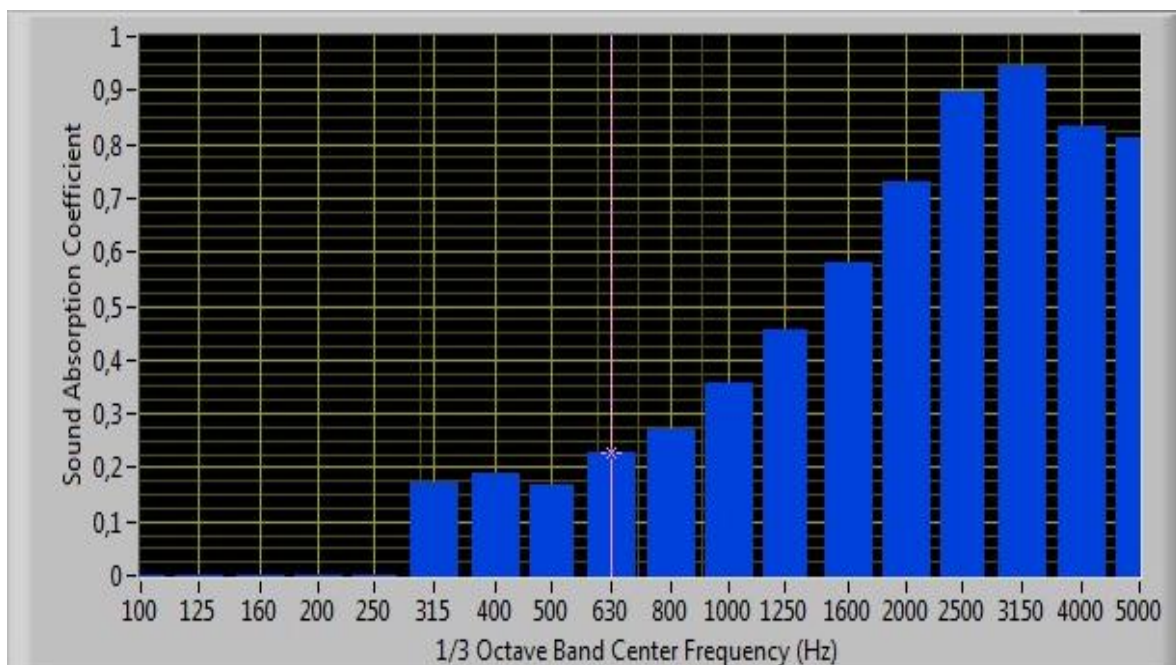


Figura 68. Captura coeficiente de absorción sonoro panel MA20.

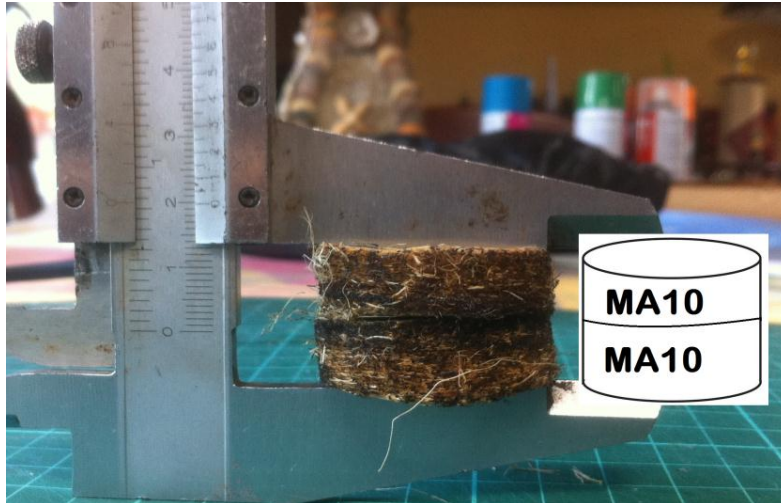


Figura 69. Muestra de ensayo MA20 y su respectivo esquema.

#### 4.9. Panel M50A40

##### — Datos de Entrada

Tabla 12. Datos de entrada panel M50A40

<b>Datos</b>	<b>Panel musáceo 50% aglutin. 40 mm espesor</b>
Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )	1,15
Densidad volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )	28,75
Espesor (m)	0,04
Volumen (m <sup>3</sup> )	3,85X10 <sup>-5</sup>
Masa (kg)	0,00111



— Coeficiente de absorción sonoro

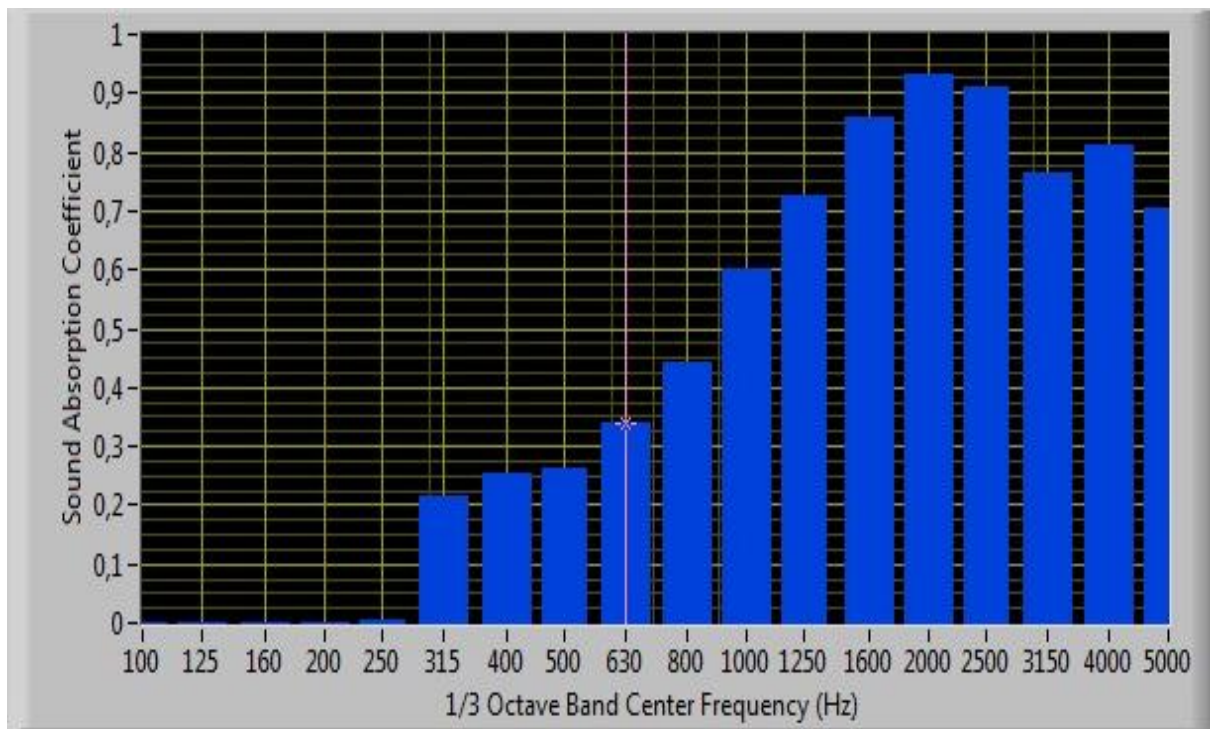


Figura 70. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M50A40.

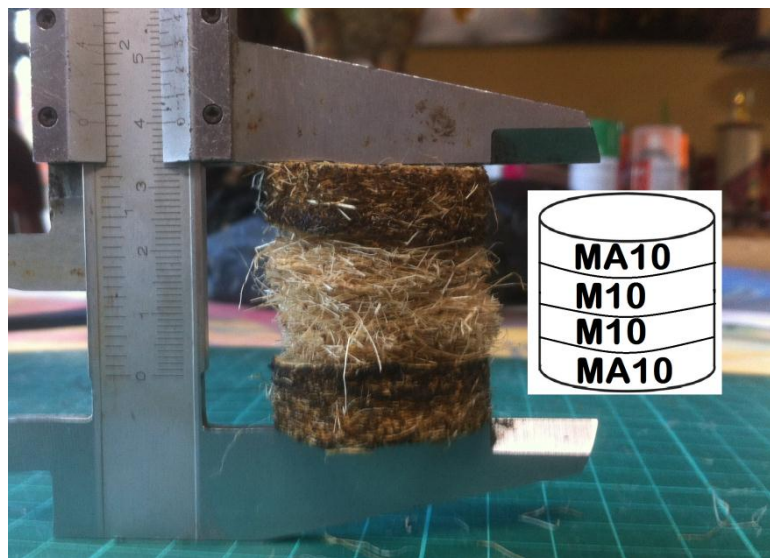


Figura 71. Muestra de ensayo MA4 y su respectivo esquema.

#### 4.10. Panel M75A40

##### — Datos de Entrada

Tabla 13. Datos de entrada panel M75A40

Datos	Panel musáceo 75% aglutin. 40 mm espesor
Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )	2,78
Densidad volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )	6,95
Espesor (m)	0,40
Volumen (m <sup>3</sup> )	3,85X10 <sup>-5</sup>
Masa (kg)	0,00175

##### — Coeficiente de absorción sonoro

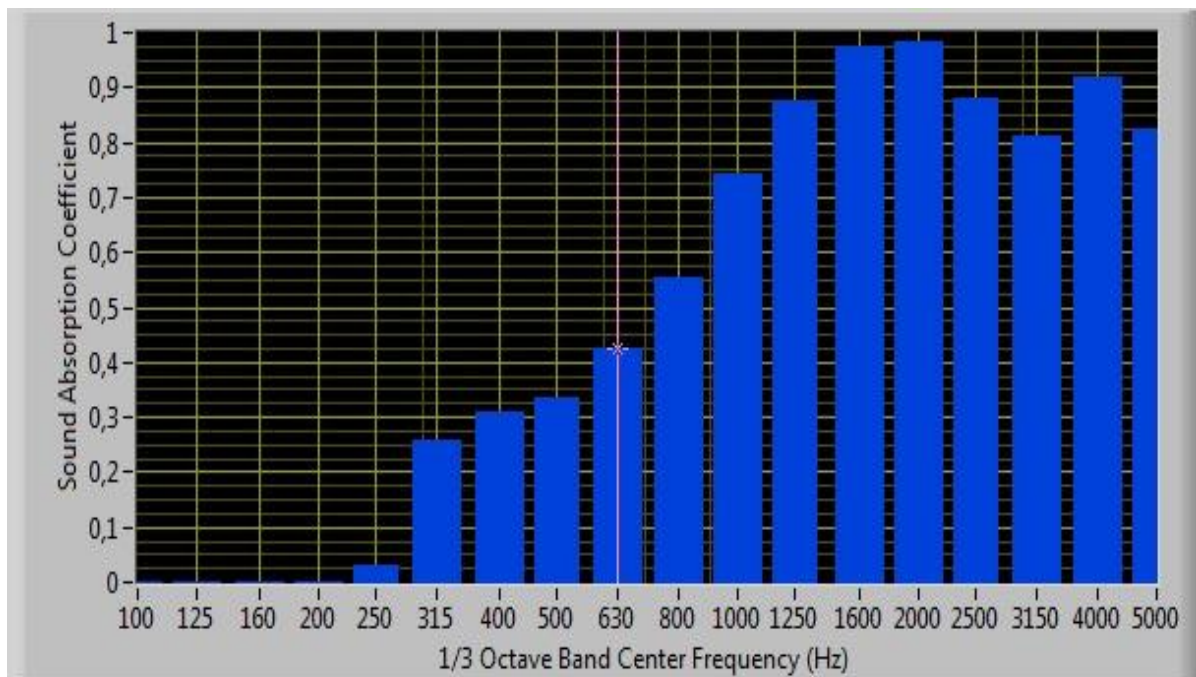


Figura 72. Captura coeficiente de absorción sonoro panel M75A40.

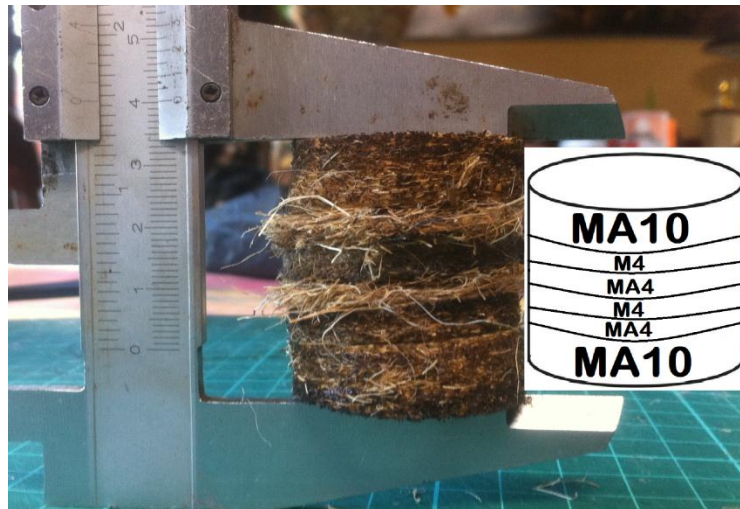


Figura 73. Muestra de ensayo MA4 y su respectivo esquema.

#### 4.11. Gráficos comparativos para el coeficiente de absorción sonoro

En la siguiente sección se describe el comportamiento de absorción acústico de las distintas muestras de ensayo puestas a prueba en el tubo de impedancia. Dichas muestras guardan relación directa con el espesor del material y con la cantidad de aglutinante implementado en la elaboración de la misma. Para mayor detalle acerca de los resultados obtenidos e información de las distintas muestras, referirse a la Tabla 3 y a las secciones anteriores a este apartado.

##### 4.11.1. Gráfico comparativo para todas las muestras de ensayo

En la Figura 74 se ilustran las curvas de absorción obtenidas para cada una de las muestras bajo prueba. Para bajas frecuencias, por debajo de 250 Hz, el material no presenta alguna reacción significativa. Para las muestras M10, M4, MA4, M8 y M20 el incremento en el coeficiente de absorción es paulatino, tan

solo diferenciándose entre ellas para frecuencias entre 3150 Hz y 4 kHz. Hasta ahora el material en estudio demuestra que no es adecuado para la absorción acústica. Sin embargo, para las muestras con aglutinante (MA10 y MA8) el incremento en los coeficientes de absorción a partir de los 2 kHz se hace notable. A partir de aquí, el material en estudio tiene potencial para la absorción acústica en frecuencias altas.

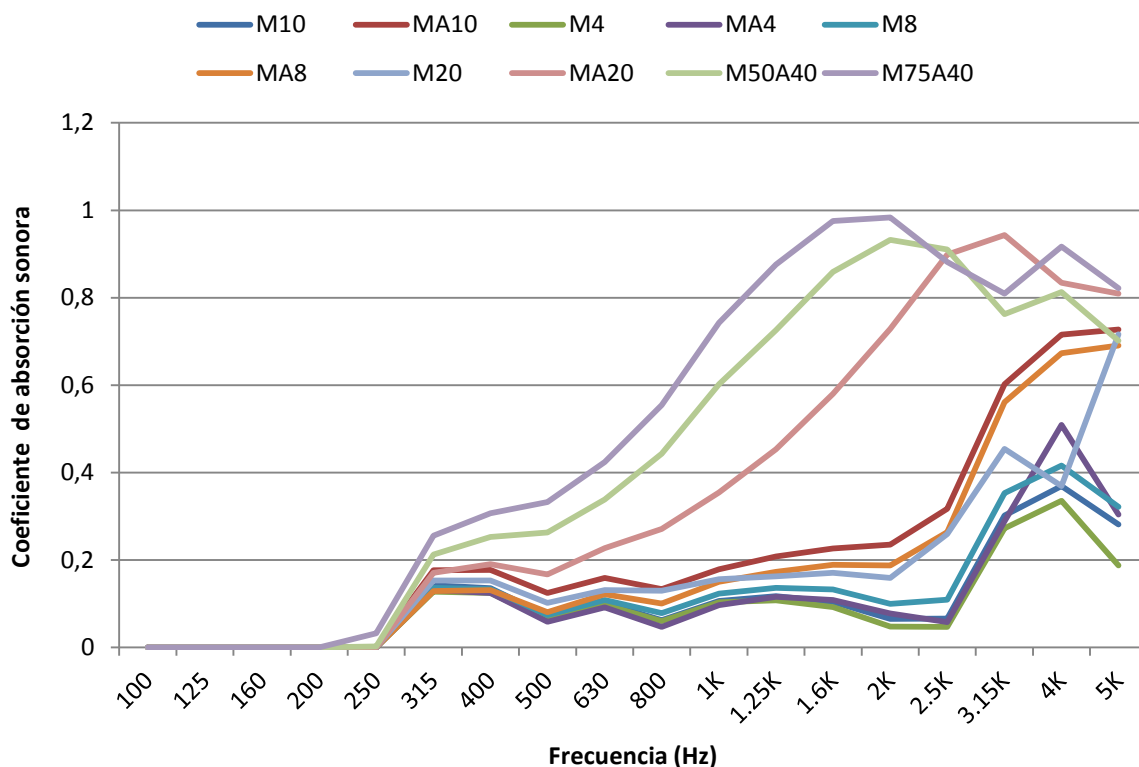


Figura 74. Gráfico comparativo para todas las muestras de ensayo.

#### 4.11.2. Gráfico comparativo para muestras sin aglutinante

En la Figura 75 se comparan los coeficientes de absorción de las muestras que no contienen aglutinante en su estructura física. Las muestras M8 y M20 corresponden a la superposición de dos capas de material provenientes de las muestras M4 y M10 respectivamente. La curva que contiene los valores más

altos para el coeficiente de absorción proviene de la muestra M20. Dicha muestra se caracteriza por tener mayor grosor que las demás muestras (20 mm). Está clara la tendencia de que al aumentar el grosor de la muestra, la curva para el coeficiente de absorción aumenta. Cabe mencionar también que la densidad para la muestra M10 y M20 es la misma, así como también para las muestras M4 y M8.

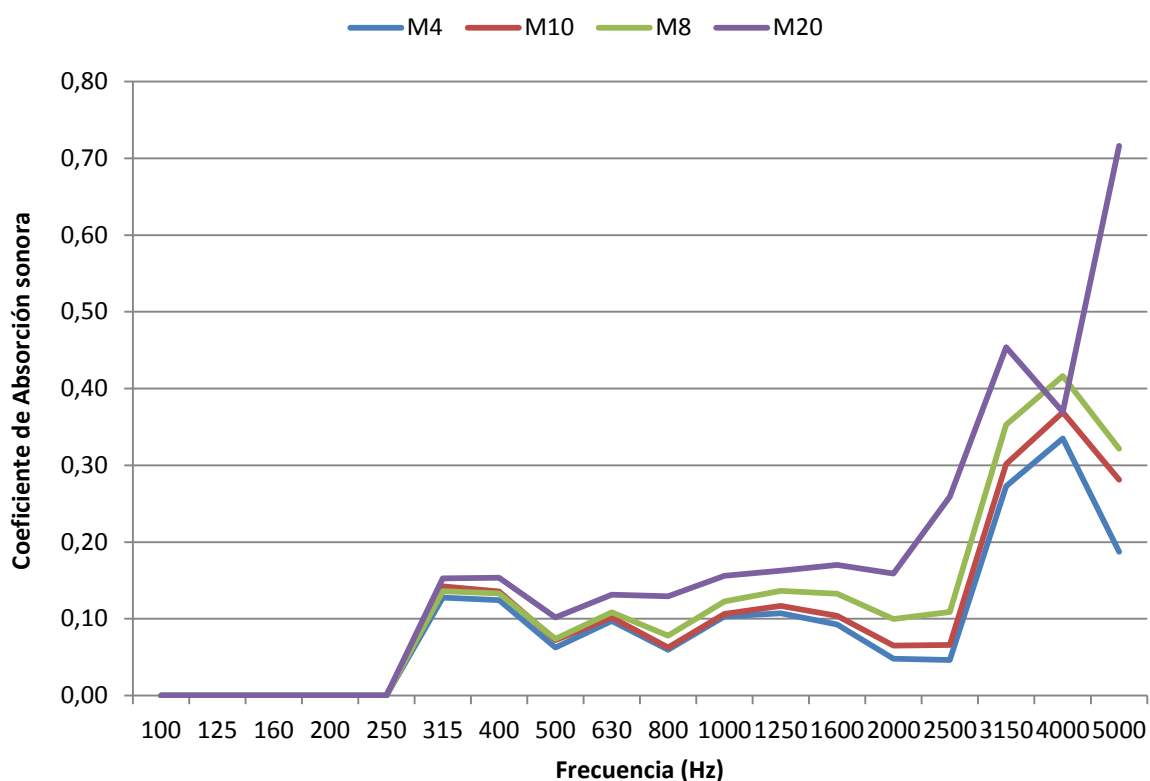


Figura 75. Gráfico comparativo para muestras sin aglutinante.

#### 4.11.3. Gráfico comparativo para muestras con aglutinante

En la Figura 76 se comparan los coeficientes de absorción de las muestras que contienen aglutinante en su estructura física. Las muestras MA8 y MA20 corresponden a la superposición de dos capas de material provenientes de las muestras MA4 y MA10 respectivamente.

Al igual que en el caso descrito anteriormente, nuevamente existe una tendencia de crecimiento en el coeficiente de absorción a medida que el grosor del material aumenta. Sin embargo cabe recalcar que, para este caso en particular, se ha hecho uso de aglutinante en la estructura de las muestras. Esto quiere decir que la densidad de las muestras también ha aumentado. Debe notarse de nuevo que la densidad para las muestras MA10 y MA20 es la misma, así como también para las muestras MA4 y MA8.

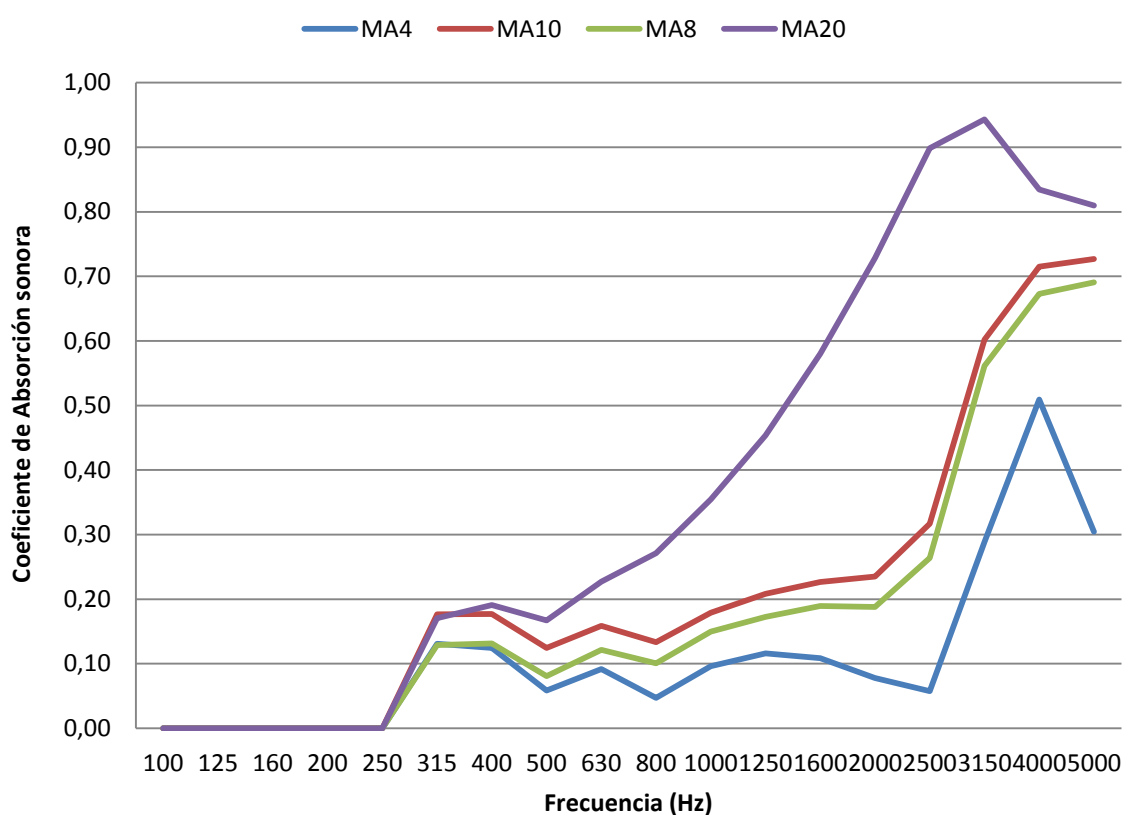


Figura 76. Gráfico comparativo para muestras con aglutinante.

#### 4.11.4. Gráfico comparativo para muestras simples

En la Figura 77 se comparan las 4 muestras de musácea (M4, M10, MA10 y MA4) que complementan al resto de muestras puestas bajo prueba y descritas

en la Tabla 3 de la presente investigación. Dichas muestras presentan diferentes densidades entre sí. Como se puede observar, las curvas de absorción para las muestras M4, M10 y MA4 son muy parecidas a pesar de que difieren entre sí por su densidad y grosor. Para los tres casos existe una clara tendencia a aumentar su valor de absorción alrededor de los 4000 Hz.

Es muy notable para el caso de la muestra MA10, cómo sus valores de absorción han aumentado en comparación con las demás muestras. Cabe mencionar que la muestra MA10 es aglutinada y además tiene la mayor densidad en comparación con las otras muestras. El grosor de la muestra MA10 y M10 es la misma (10 mm) con la única diferencia de que MA10 está aglutinada y M10 no.

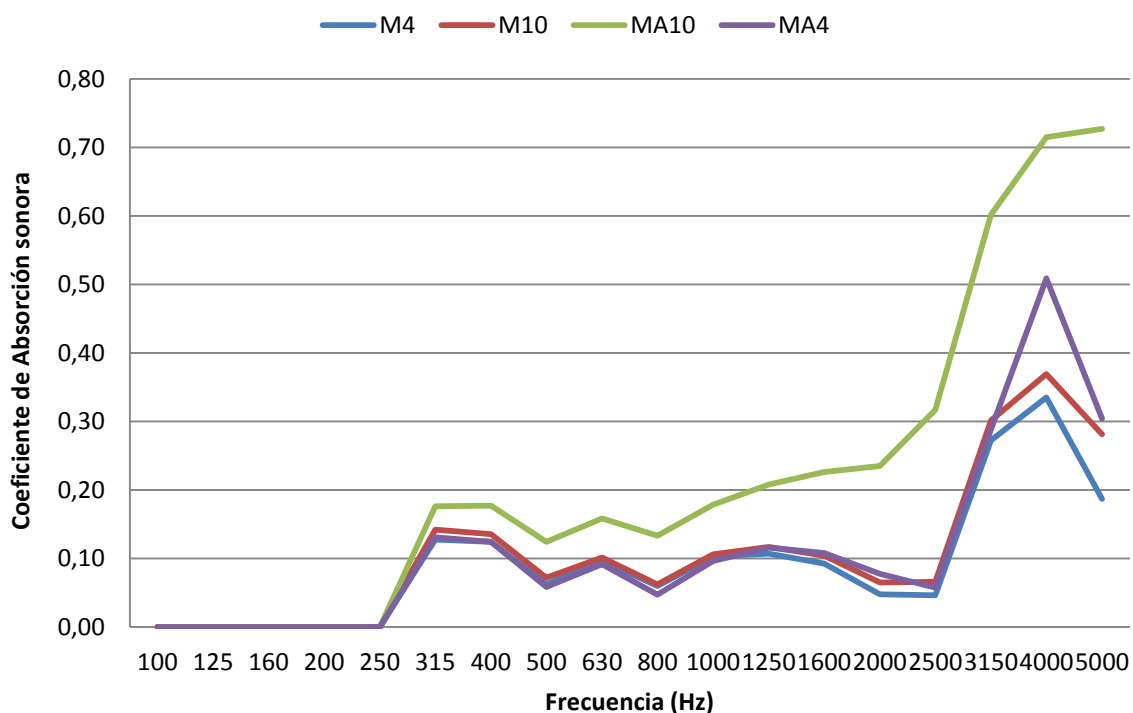


Figura 77. Gráfico comparativo para muestras simples (sin superposición de capas).

#### **4.11.5. Gráfico comparativo para muestras mixtas**

En la Figura 78 se comparan las distintas muestras del material musáceo que contienen aglutinante y/o superposición de capas de dicho material. Puede observarse que para las muestras M8, M20 y MA8, las curvas de absorción mantienen cierta regularidad para todo el espectro de frecuencias con excepción entre los 2000 Hz y 5000 Hz.

La muestra MA8 tiene mayor densidad que las muestras M20 y M8, mismo espesor que M8 y diferente espesor que M20. Es notable como al aumentar el grosor de la muestra aglutinada, como es el caso de MA20, los valores para el coeficiente de absorción aumentan considerablemente a partir de los 500 Hz.

Finalmente, las muestras que contienen capas superpuestas aglutinadas y no aglutinadas (M50A40 y M75A40) son las que presentan mayor absorción entre todas las muestras bajo comparación. Para el caso de ambas muestras, el espesor es igual (40 mm), la cantidad de aglutinante y el valor de sus respectivas densidades es diferente. Siendo M75A40 la muestra con los mayores resultados del coeficiente de absorción sonora. Ambas muestras presentan una caída de nivel para la frecuencia de 3150 Hz, esto puede deberse a un factor de resonancia propio de las capas del material bajo ensayo.



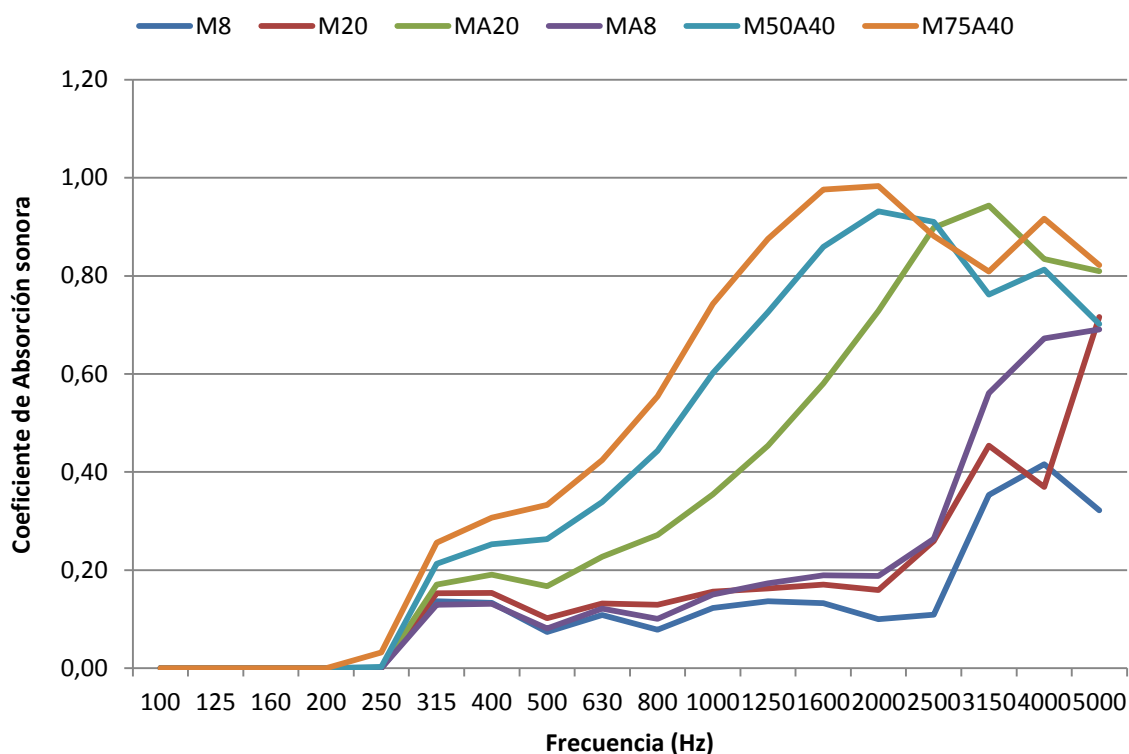


Figura 78. Gráfico comparativo para muestras mixtas (capas superpuestas).

#### 4.11.6. Gráfico comparativo M75A40 vs ROCDAN 231/40

En la Figura 79 se detalla una comparación del coeficiente de absorción sonora entre un panel absorbente de lana de roca fabricado por la empresa DANOSA (Derivados Asfálticos Normalizados S.A.) y la muestra evaluada en laboratorio M75A40 de la presente investigación. ROCDAN 231/40 es un panel ligero conformado por lana de roca impregnado con resina fenólica que funciona como un absorbente acústico. Cabe mencionar que la densidad volumétrica del ROCDAN 231/40 es mayor que el de la musácea. El espesor de la lana de roca (ROCDAN 231/40) y de la musácea (M75A40) es de 40 mm.

Para mayor información acerca de la ficha técnica del panel ROCDAN 231/40 de DANOSA, referirse al apartado de ANEXOS de la presente investigación.

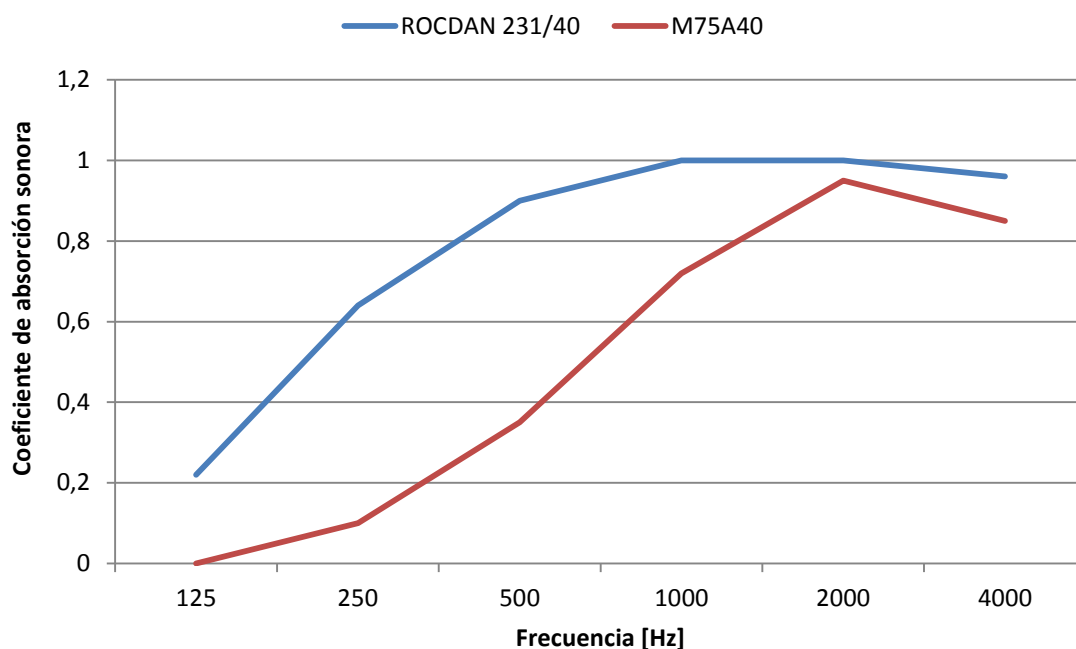


Figura 79. Gráfico comparativo DANOSA vs Musácea.

#### 4.12. Gráfico comparativo para todas las muestras de ensayo (TL)

Como se puede apreciar en la Figura 80 los resultados obtenidos para la pérdida por transmisión (TL) de las distintas muestras, tienen un comportamiento muy inusual en todo el espectro de frecuencia. En términos técnicos, una vez obtenidos los coeficientes de absorción (como se detallan en el capítulo 4), es de esperarse que la pérdida por transmisión del material en estudio sea entre frecuencias medias-altas y altas. Sin embargo, esto no sucede en el resultado final.

Es así que, en el Apéndice 1 del manual de usuario del sistema ACUPRO Version 4.5 se comentan y se prevén las inconsistencias de los resultados para pérdida por transmisión como un problema inherente al método de ensayo y a la forma de preparación e instalación de la muestra de ensayo en el interior del tubo de impedancia. Es decir, cualquier grieta periférica o pequeñas aberturas

alrededor del borde de las juntas del tubo de impedancia y/o de la muestra de ensayo, tendrá un impacto dramático en los cálculos de pérdida por transmisión (TL).

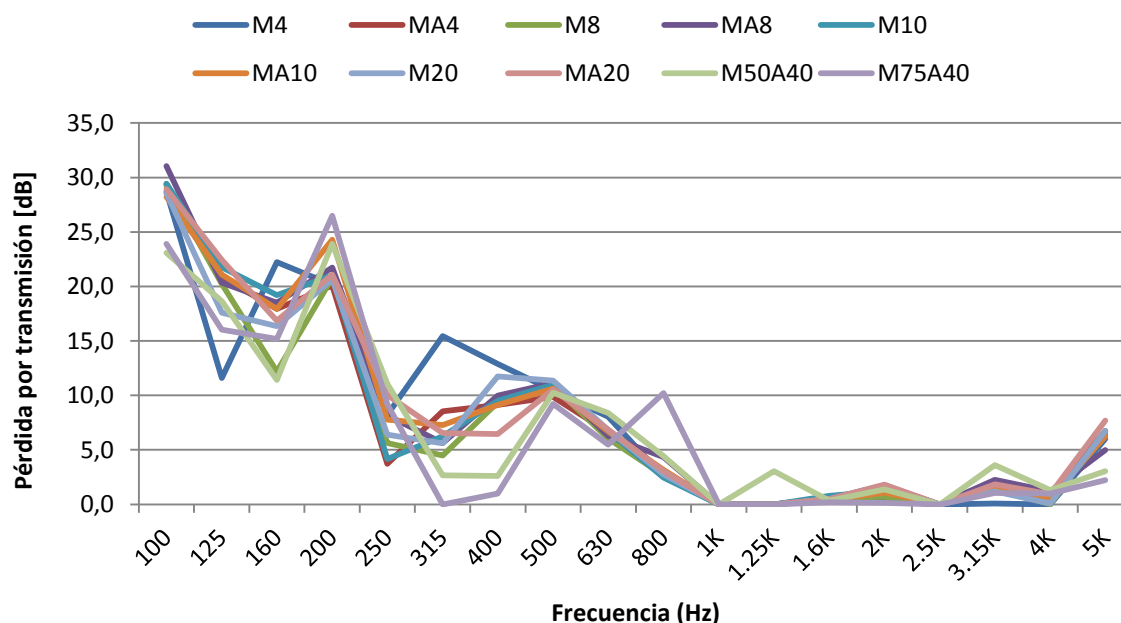


Figura 80. Gráfico comparativo M4 vs. MA4.

Para ilustrar la importancia del ajuste de una muestra de ensayo en el interior del tubo, el manual del sistema ACUPRO utiliza de ejemplo una muestra de espuma de 8 mm de grosor. A continuación, calcula la pérdida por transmisión (TL). Seguidamente se evalúa la misma muestra una segunda vez pero utilizando un porta-muestras con un diámetro ligeramente menor. La pérdida por transmisión para ambos ensayos se muestra en la Figura 81.

Puede verse en la gráfica de la Figura 81 que cuando la muestra es demasiado grande para el diámetro del tubo, la pérdida por transmisión (TL) en baja frecuencia se distorsiona. Esta gráfica al igual que la Figura 81 ilustran las

advertencias de la norma ASTM E 2611- 09 con respecto al ajuste apropiado de la muestra, tal y como se describe en el apartado 2.9.5.

Las curvas desplegadas en la Figura 82 funcionan más bien como un punto de referencia para futuras líneas de investigación donde pueda comprobarse el correcto posicionamiento y acotamiento de las muestras en el tubo de impedancia ACUPRO. Cabe mencionar que para la obtención de pérdida por transmisión de las muestras se hizo uso de 2 micrófonos adicionales adaptados al tubo bajo normas de calibración ajenas al sistema ACUPRO, por lo que; los resultados de la Figura 81 también están ligados a ese hecho.

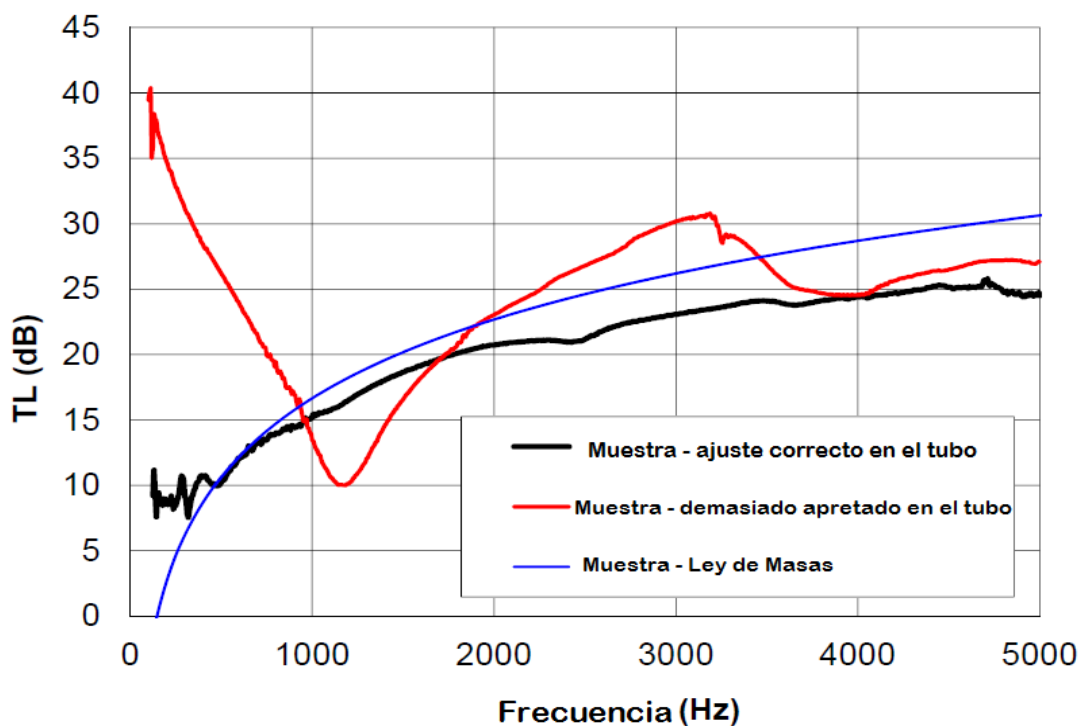


Figura 81. Importancia del ajuste de una muestra dentro del tubo de Kundt. Tomado de Spectronics, 2013.

## 5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS ECONÓMICO

En el alcance de este proyecto se descarta una valoración económica para el coste de producción de paneles o rollos musáceos que pueden implementar las propuestas de aglomerado y sellado como se figuran en el apartado 4 de la presente investigación. Esto debido a que en primera instancia, fue necesario el análisis preliminar de los coeficientes de absorción de la musácea para diferentes densidades y espesores. Bajo esa línea, empresas DOSEL se reserva el derecho de elaborar o no el material bajo los parámetros del presente trabajo y otorgarle un precio a convenir al público en general.

Sin embargo, se plantea una valoración económica hacia una tentativa de completar la ficha técnica del material, que contenga medidas más precisas en lo que respecta a la obtención de los coeficientes de elasticidad y densidad volumétrica de las muestras a través de un laboratorio de materiales certificado como el de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE). En ese sentido, se describe el costo nominal de la investigación para la obtención de los coeficientes de absorción del material y de los ensayos futuros en dicho laboratorio.

En lo que respecta al precio por alquiler del equipamiento de medición (sistema ACUPRO Version 4.5), se despliega un cálculo en base a una aproximación de los precios fijados por empresas acústicas vigentes en el mercado nacional.

Tabla 14. Análisis económico para completar la ficha técnica del material.

Detalle	Por día	Por unidad	Cantidad	Valor Total \$
Alquiler sistema ACUPRO obtención coeficientes de absorción – UNE EN ISO 10534-2	\$ 110		2	\$ 220
Alquiler sistema ACUPRO obtención pérdida por transmisión – ASTM E2611-09	\$ 130		3	\$ 390
Medición densidad, laboratorio PUCE		\$ 5	10	\$ 50
Medición Resistividad al fuego, laboratorio PUCE		\$ 20	10	\$ 200
Medición tracción paralela, laboratorio PUCE		\$ 25	10	\$ 250
Ayudante de montaje y ensayo	\$ 20		5	\$ 100
Generación Informe	\$ 30		3	\$ 90
			Subtotal	<b>\$ 1.300</b>
			IVA 14%	\$ 182,0
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.482,0</b>

## 6. CAPÍTULO VI. PROYECCIONES

Puesto que esta investigación contempla la evaluación de las propiedades acústicas de la musácea, las proyecciones de trabajo con el material en estudio podrán estar enfocadas hacia la elaboración de paneles musáceos orientados al aislamiento acústico (trasdosados con varias capas de material). En ese sentido, la investigación propuesta puede mejorar con la implementación de una base de datos mucho más extensa donde puedan compararse las densidades y cantidad de aglutinante en las muestras de ensayo. Esto, con la finalidad de comprobar si la combinación de distintas capas aglutinadas y no

aglutinadas, con distintas densidades y espesores; pueden mejorar o potenciar el coeficiente de absorción acústica del material.

Así mismo, conforme a los resultados obtenidos en ésta investigación y a las experiencias otorgadas por otros autores en cuanto al estudio de las propiedades acústicas de fibras naturales; se propone el estudio para la hibridación de fibras naturales para aplicaciones de absorción acústica y de construcción. Esta propuesta corresponde al hecho de que Industrias Ambientales DOSEL hace uso de fibras como el yute, cabuya, coco, sisal y variedades de musáceas para la elaboración de productos versátiles y adecuados a la necesidad de cada cliente.

#### **6.1. Compuesto híbrido reforzado Epoxi con fibra de yute y musácea.**

Boopalan, Niranjanaa y Umapathy (2013, p. 54-57) compararon las propiedades mecánicas y térmicas de los compuestos híbridos reforzados de Epoxi con fibra de yute y musácea. Para mejorar las propiedades mecánicas, la fibra de yute fue sometida a un proceso de hibridación con la fibra musácea en diferentes relaciones en peso (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100) para luego ser incorporadas a la matriz Epoxi mediante la técnica de moldeo para formar compuestos. Este estudio muestra que la adición de fibra musácea en compuestos de yute/Epoxi de hasta 50% en peso da como resultado el aumento de las propiedades mecánicas, térmicas y la disminución de la propiedad de absorción de humedad.

Las propiedades térmicas del yute y de la musácea se obtuvieron mediante análisis termo-gravimétrico (TGA). El análisis termogravimétrico mide la cantidad y la tasa de cambio en el peso (debido a la descomposición, oxidación y deshidratación) de un material en función de la temperatura en una

atmósfera controlada. Las mediciones se utilizan principalmente para predecir la estabilidad térmica de los materiales a una temperatura de hasta 1000 ° C. El resultado de TGA de yute al 50% y fibra de banano al 50% reforzado con compuesto híbrido Epoxi se ilustran en la siguiente figura.

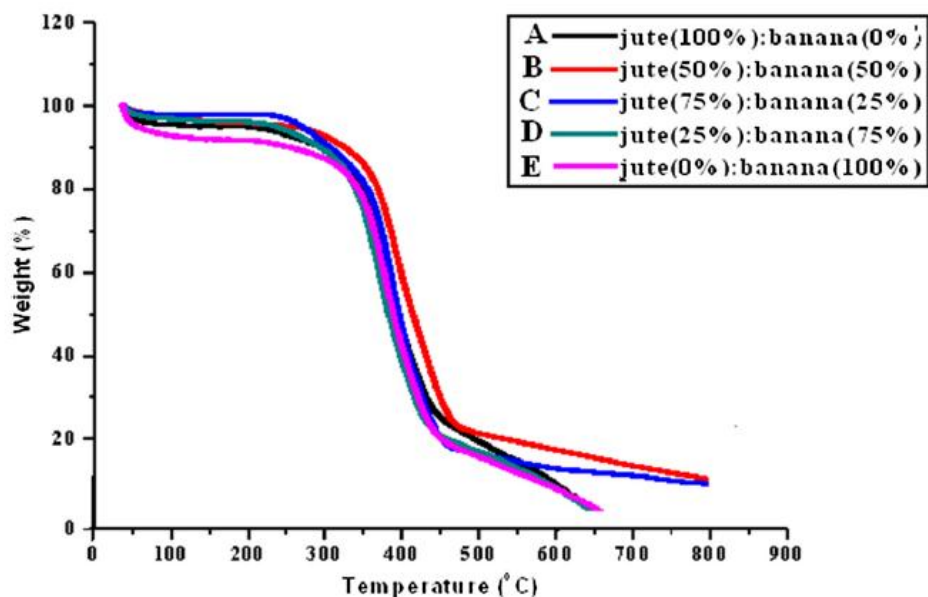


Figura 82. Gráfico termo-gravimétrico combinado para los diferentes compuestos de material de yute y musácea.

Tomado de Boopalan et al., 2013, p.56

Como se indica en la Figura 82, la mayor pérdida de peso del material ocurre alrededor de 380°C. La normativa NTE INEN 756, bajo el nombre, “Protección contra incendios. Determinación del índice de propagación del fuego en materiales de construcción. Método de ensayo”; consiste en someter una muestra de ensayo (materiales de construcción, tales como recubrimientos de paredes o de cielos rasos) a la acción del fuego dentro de una cámara controlada y medir la temperatura de los gases de combustión, para luego calcular el índice de propagación. Con la ayuda de dicha normativa, corroborando los estudios de Boopalan et al (2013); es posible facilitar la



producción del compuesto híbrido de yute y musácea para la elaboración de paneles absorbentes acústicos que cumplan con criterios de seguridad y confort.

## 6.2. Compuesto híbrido reforzado Epoxi con fibra de lino y musácea.

Otro estudio de hibridación de fibras naturales es el propuesto por Srinivasan, Boopathy, Sangeetha, y Ramnath (2014, p. 620-627) donde se evalúan las propiedades mecánicas y térmicas para compuestos híbridos hechos a partir de fibra musácea y lino. Como se muestra en la Figura 83, el ordenamiento estructural del híbrido se compone de una capa de fibra musácea intercalada entre dos capas de fibras de lino mediante un método de colocación a mano usando resina Epoxi y endurecedor HY951. El polímero de refuerzo de fibra de vidrio (GFRP) es utilizado para la laminación en ambos lados del material híbrido.

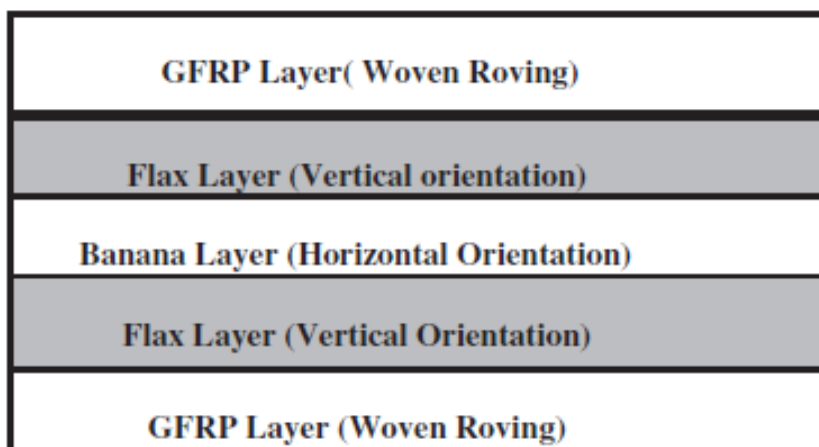


Figura 83. Representación esquemática de las capas del material híbrido compuesto de fibra de lino y musácea.

Tomado de Srinivasan et al., 2014, p. 621.

Las propiedades mecánicas de este compuesto híbrido se determinan probando sus niveles de impacto, carga de tracción y flexión usando una máquina de prueba Universal. Las propiedades térmicas para compuestos híbridos de lino y musácea con GFRP mostraron mayor estabilidad térmica y resistencia a la llama que materiales compuestos de una sola fibra (ya sea lino o musácea) con GFRP.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. Conclusiones

Se concluye con éxito la evaluación de los coeficientes de absorción sonora de diferentes muestras musáceas a través del sistema de tubo de impedancia ACUPRO.

Los resultados obtenidos para el coeficiente de absorción de las muestras M50A40 y M75A40 presentan los mayores niveles de absorción acústica, y demuestran claramente la influencia de la composición de capas superpuestas con distintas densidades y de la presencia de aglutinante. Al momento de la medición se ha estudiado una densidad global, pero se entiende que hay cambios de densidad a lo largo del proceso de reflexión de la onda, favoreciendo al aumento significativo de las propiedades de absorción acústica del material en estudio.

Es de interés recalcar el comportamiento del material con la aplicación de aglutinante y sin la aplicación del mismo. Como se muestra en la Figura 78, para una muestra del mismo espesor pero con diferente sellado, la diferencia del coeficiente de absorción final es casi del doble, tal y como se figura en el caso de la muestra M20 en contraposición con la muestra MA20.

Al aumentar el espesor del material no se ha podido apreciar una absorción acústica significativa por debajo de los 250 Hz, por lo que se concluye que el material no es adecuado para absorción en baja frecuencia.

En este trabajo se presenta la posibilidad de elaboración de un material musáceo que presente varios cambios de medio por la superposición de capas de diferentes densidades, aglutinadas y no aglutinadas. La capacidad de absorción de sonido del material superpuesto mejora en gran medida a través de dicho diseño. Mediante el tubo de impedancia, se pudieron evaluar los coeficientes de absorción para el material 'compuesto' (M50A40 y M75A40) y se confirma la contribución del aglutinante a la absorción acústica para frecuencias medias y altas. Aunque se requiere mayor investigación para verificar el efecto del aglutinante en diferentes capas de musácea, los resultados pueden conducir a un nuevo tipo de material de absorción acústica con alto rendimiento.

Las mediciones llevadas a cabo muestran que la falta de adición de aglutinante al material en ensayo influye claramente en el comportamiento acústico de las muestras. Así mismo, no está relacionado el crecimiento de la absorción acústica únicamente con el aumento del espesor de la muestra; sino más bien con el aumento de la densidad del mismo.

La baja absorción acústica de la muestra musácea M75A40 con respecto a la del panel de lana de roca ROCDAN 231/40, como se muestra en la Figura 79, puede deberse a que la fibra no tejida (musácea) es de baja densidad y de poca masa. Mientras la lana de roca ROCDAN 231/40 presenta una densidad volumétrica de  $70 \text{ kg/m}^3$ , la densidad volumétrica de la muestra M75A40 es de apenas  $6,95 \text{ kg/m}^3$ .

Los resultados provenientes de la pérdida por transmisión (TL) depende en gran medida de las condiciones límite inherente al método de ensayo y de los detalles de la forma en que se manipula y se coloca el material en el tubo. Esto

debe tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados obtenidos por este método de ensayo.

El software incluido en el sistema de medición ACUPRO Version 4.5 es muy práctico en cuanto a la obtención de valores para el coeficiente de absorción sonoro de los materiales bajo ensayo. Sin embargo, para el cálculo de pérdida por transmisión, presenta considerables desviaciones que pueden deberse al tipo de montaje de la muestra en el interior del tubo. Para ambos casos de medición, un análisis de incertidumbre es necesario.

El diámetro de las muestras de ensayo cortadas depende mucho de las propiedades del material, especialmente por ser no tejido y fibroso. Las muestras musáceas de diferente rigidez se comprimen y se perforan a diferentes velocidades, y esto da lugar a muestras que tienen diámetros ligeramente diferentes incluso cuando se cortan con el mismo cortador.

Aunque es evidente que deben realizarse más investigaciones para estandarizar el proceso de fabricación e hibridación de los tratamientos de absorción acústica con fibras musáceas, esta investigación demuestra la posibilidad de aplicar tratamientos de absorción acústica utilizando solo fibras musáceas.

La presente investigación concluye con varios hallazgos. En primer lugar, la absorción acústica de la musácea depende significativamente de la densidad del material. Dos, la combinación de material musáceo con aglutinante tiene características de sonido altamente absorbentes y algunos valores y condiciones de superposición de capas musáceas han sido cuantificadas para la obtención de una óptima absorción.

## 7.2. Recomendaciones

Se debe tener en cuenta que las muestras de ensayo utilizadas a lo largo de este trabajo (excepto MA4 y MA10) no fueron sometidas a un proceso de elaboración de prensado, lo que puede afectar a las propiedades de atenuación de sonido. El estudio del efecto de la presión sobre las propiedades de absorción acústica del material musáceo podría ser una extensión de la investigación actual.

Se recomienda plantear en investigaciones futuras un sistema que permita mantener la forma de las distintas capas superpuestas del material musáceo.

Se recomienda incluir en la ficha técnica del material estudios pertinentes para su uso en construcción, por ejemplo: resistencia a la temperatura, conductividad térmica, resistencia térmica, reacción al fuego y aislamiento acústico.

Se recomienda cortar una cantidad de muestras necesarias para producir una incertidumbre aceptable basada en la variabilidad de material, la variabilidad de corte, y otros factores de prueba.

El objetivo de la preparación de las muestras de ensayo es tener una muestra que se deslice fácilmente con una ligera presión de los dedos en el porta-muestras, pero que no contenga espacios. Si la muestra se mueve libremente dentro del soporte de la muestra o se cae cuando el soporte de la muestra se mantiene vertical, significa que el diámetro de la muestra es demasiado pequeño. Si la muestra se deforma cuando se aplica la presión del dedo en el interior del porta-muestras, es probable que el diámetro de la muestra sea demasiado grande.

Una vez que se obtiene una muestra con el diámetro correcto, se recomienda usar una pequeña cantidad de vaselina para sellar pequeñas imperfecciones alrededor de la circunferencia de la muestra. La práctica y el cuidado por parte del experimentador producirán resultados repetibles.

Las muestras de ensayo no deben ser cortadas con un cuchillo de forma desordenada ya que estos métodos invariablemente conllevan a espacios entre la muestra y el tubo que, permitirá el paso del sonido a través del mismo. Un mejor método es utilizar un cortador de metal circular montado en una prensa de perforación como el cortador de muestras suministrado por el sistema ACUPRO Version 4.5.

## REFERENCIAS

- Arenas Bermúdez, J. P., Alba Fernández, J., del Rey Tormos, R., Ramis Soriano, J., & Suárez Silva, E. (2011). *Materiales absorbentes ecológicos para pantallas acústicas*. Valdivia, Chile: Ediciones Universidad Austral de Chile.
- ASTM. (2009). ASTM E2611-09. *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Baunetz Wissen. (2016). *Wellenlänge*. Recuperado el 26 de mayo de 2016 de <https://www.baunetzwissen.de/glossar/w/wellenlaenge-44949>
- Berardi, U., & Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, 94, 840-852.
- Bertó, L., del Rey, R., Alba, J., & Teira, A. (2013, September). Characterization and validation of a reverberation chamber built to scale in order to test small prototypes of acoustic barriers. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 247, No. 7, pp. 1335-1344). Institute of Noise Control Engineering.
- Boopalan, M., Niranjanaa, M., & Umapathy, M. J. (2013). Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 54-57.
- Guimarães, J. L., Frollini, E., Da Silva, C. G., Wypych, F., & Satyanarayana, K. G. (2009). Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, 30(3), 407-415.
- Hendrickx, K. (2007). *The Origins of Banana-fibre Cloth in the Ryukyus, Japan*. Ryukyu, Japón: Leuven University Press.



- ISO. (2002). EN ISO 13472-1:2002. *Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ*. Part 1: Extended surface method. Génova, Suiza: ISO.
- ITWissen, Das große Online-Lexikon für Informationstechnologie. (2016). *Schallkennimpedanz*. Characteristic acoustical impedance. Recuperado el 24 de mayo de 2016 de <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Schallkennimpedanz-characteristic-acoustical-impedance.html>
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1992). *Fundamentos de acústica*. México: Limusa.
- Llinares, J., Llopis, A. & Sancho, J. (2008). *Acústica Arquitectónica y Urbanística*. México: Limusa.
- Londhe, N., Rao, M. D., & Blough, J. R. (2009). Application of the ISO 13472-1 in situ technique for measuring the acoustic absorption coefficient of grass and artificial turf surfaces. *Applied Acoustics*, 70(1), 129-141.
- Ministerio de Comercio Exterior. (2016). *Banano y Plátano*. Recuperado el 12 de abril de 2016 de <http://www.proecuador.gob.ec/compradores/oferta-exportable/banano/>
- Miyara, F. (2003). *Acústica y sistemas de sonido*. Rosario, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.
- Möser, M. (2009). *Technische Akustik*. Munich, Alemania: Springer.
- Möser, M., Barros, J.L. (2009). *Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones*. Heidelberg, New York: Springer.
- Müller, G., & Möser, M. (2013). *Taschenbuch der technischen Akustik*. Berlin, Alemania: Springer.

- NTE. (1987). NTE INEN 0756. *Prevención de incendios*. Determinación del índice de propagación del fuego en materiales de construcción. Quito, Ecuador.
- PRO Ecuador, Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones. (2015). *Análisis Sectorial Plátano*. Recuperado el 12 de abril de 2016 de [http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/06/PROEC\\_AS2015\\_PLATANO1.pdf](http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/06/PROEC_AS2015_PLATANO1.pdf)
- Reddy, N., & Yang, Y. (2005). Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *TRENDS in Biotechnology*, 23(1), 22-27.
- Sabine, W. C., & Egan, M. D. (1994). Collected papers on acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(6), 3679-3680.
- Salit, M. S. (2014). *Tropical natural fibre composites: properties, manufacture and applications*. Singapore, Heidelberg, New York: Springer.
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., & Yogesha, B. (2015). Study on mechanical properties of natural-glass fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Materials today: proceedings*, 2(4-5), 2959-2967.
- Spectronics, Inc. (2013). *BEST PRACTICES: A Guide to Making Effective Measurements of Sound Absorption Coefficient*. Recuperado el 06 de julio de 2016 de <http://spectronics.net/resources/General%20Documents/Best%20Practices%20Manual%202014.pdf>
- Spectronics, Inc. (s. f). *ACUPRO Measurement System*. Recuperado el 04 de noviembre de 2015 de <http://spectronics.net/products/acupro.html>
- Srinivasan, V. S., Boopathy, S. R., Sangeetha, D., & Ramnath, B. V. (2014). Evaluation of mechanical and thermal properties of banana–flax based natural fibre composite. *Materials & Design*, 60, 620-627.

- TSI. (2017). *Airflow Instruments Velocity Meter TA440-A*. Recuperado el 22 de octubre de 2016 de <http://www.tsi.com/airflow-instruments-velocity-meter-ta440-a>
- Ulrich, J. (2005). *Schallausbreitung in Rohren*. Heidelberg: DOZ Verlag.
- UNE. (1998). UNE EN 11654. *Absorbentes acústicos para su utilización en edificios*. Evaluación de la absorción acústica. Madrid, España.
- UNE. (2002). UNE EN 10534-2:2002. *Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia*. Parte 2: Método de la función de transferencia. Madrid, España.
- UNE. (2004). UNE EN 354. *Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante*. Madrid, España.
- UNE. (2008). UNE EN 3382-2:2008. *Medición de parámetros acústicos en recintos*. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Madrid, España.
- WIKIBOOKS, Die freie Bibliothek. (2015). *Grundlagen der Akustik: Physikalische Grundlagen*. Recuperado el 08 de junio de 2016 de [https://de.wikibooks.org/wiki/Grundlagen\\_der\\_Akustik:\\_Physikalische\\_Grundlagen](https://de.wikibooks.org/wiki/Grundlagen_der_Akustik:_Physikalische_Grundlagen)

## **ANEXOS**



DOSEL S.A.  
FIBRAS NATURALES

## Manto para Control de Erosion GMAT – VT 400 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

La gran variedad de fibras naturales con las que trabajamos en DOSEL, nos permite ofrecer un amplio abanico de productos, versátiles y adecuados a la necesidad de cada cliente. Algunas de las fibras con las que trabajamos son: Yute, cabuya, coco, sisal y variedades de musaceas.

GMAT - VT 400, un ejemplo de nuestra gama de productos, es un geomanto compuesto de fibras naturales vegetales. Estas fibras además de tener un gran valor ecológico-ambiental aportan resistencia y durabilidad al geomanto. La riqueza en ligninas de las fibras la hace ideal como materia de refuerzo. Su carácter biodegradable lo convierte en un material inocuo a lo largo de todo su ciclo de vida.

### Aplicaciones/Usos



Estabilización de taludes menores



Control de erosión



Manto de riego orgánico

Características de gMAT (mezcla de fibras vegetales)	
Descripción	Geomanto 240 (+/-10%) gr/m <sup>2</sup> con dos mallas de refuerzo PP
<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Resistencia a la tensión	3.50 kN/m – 4.12 kN/m (ASTM D6818)
Elongación	30% (ASTM D4595)
<b>Propiedades Físicas</b>	
Masa por unidad de área	240 g/m <sup>2</sup> (ASTM D6475)
Espesor	4.0mm (ASTM D5199)
Penetración de luz (% absorción)	16.70 (Método ECTC)
Absorción de agua	3.5 a 4.0 veces su peso (ASTM D1117)
<b>Duración y Presentación de Rollos</b>	
Duración predecible	18 a 36 meses
Peso del rollo	12.0 Kg
Ancho	1.50 m
Largo	33.3 metros
Área	50.0 m <sup>2</sup>

Nota: Dado el origen natural del producto los valores están sujetos a pequeñas variaciones y debe ser entendido que son referenciales. Las dimensiones y peso del rollo pueden variar en +/- 5%. Doisel se reserva el derecho de modificar las especificaciones para garantizar la óptima calidad y funcionalidad de nuestros productos.

Edificio Almagro Plaza, Av. Diego de Almagro EO-24 y Ponce Carrasco. Oficina 1215  
Telf: 3909003 Cel: 099-388-9852 / 099-2724-4980  
e-mail: ggangotens@doiselconsultoria.com



## AISLAMIENTO ACÚSTICO

### ROCDAN 231/40

Panel flexible y ligero de lana de roca desnudo, levemente impregnado con resina fenólica, Acústicamente el ROCDAN 231/40 funciona como un absorbente acústico.



#### DATOS TÉCNICOS

DATOS TÉCNICOS	VALOR	UNIDAD	NORMA
Aislamiento acústico entre tabiques hueco doble	47	dB(A)	EN 140-3 EN 717
Resistencia a la temperatura	600	°C	AGI-Q 132
Coefficiente de resistencia a la difusión del vapor de agua	± 1,3	μ	-
Resistencia a la compresión al 25%	7,8	Kpa	DIN 52272
Estabilidad dimensional	< 1	%	EN 1107-01
Densidad	70	Kg/m <sup>3</sup>	EN 845
Reacción al fuego del producto	A1	Euroclase	EN 13501-01
Conductividad térmica a 20°C	0,037	w/mK	DIN 52612
Resistencia térmica	1.08	m <sup>2</sup> K/w	DIN 52612

#### DATOS TÉCNICOS ADICIONALES

Facilitamos los coeficientes de absorción del material en 50 mm de espesor.

Frecuencia, Hz	α <sub>SAB</sub>
125	0,22
250	0,64
500	0,90
1000	1,00
2000	1,00
4000	0,96

#### PRESENTACIÓN

PRESENTACIÓN	VALOR	UNIDAD
Longitud	120	cm
Ancho	60	cm
Densidad	70	Kg/m <sup>3</sup>
Espesor total	40	mm
m <sup>2</sup> por paquete	7.2	m <sup>2</sup>
m <sup>2</sup> por palet	86.4	m <sup>2</sup>
Código de Producto	730220	-

Tomado de: DANOSA, 2017

