

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Absorbentes acústicos textiles no tejidos, con fibras naturales termoconformadas”

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:

Gonzalo Eleazar Flores Ortega

Tutor/a:

Jesus Alba Fernández

Romina María del Rey Tormos

GANDIA, 2018

Agradecimientos

Complicado es mencionar a todas las personas que me han apoyado para culminar el presente trabajo.

Como estudiante extranjero, agradezco primeramente al gobierno español y su paradójica burocracia, por enseñarme a luchar por mis sueños, a mantenerme centrado en mi objetivo a pesar de recibir un "no" como respuesta, por más anodina que sea la justificación, es un aprendizaje que le debo a la madre patria.

Ya en la materia, agradezco a la UPV Campus Gandía por permitirme ser un alumno más de sus legionarias filas. Gracias a mis tutores de tesis y profesores del máster, Romina y Jesús, por ayudarme sustancialmente en mi crecimiento profesional, dejando claro que existe aún mucho por investigar, por aprender, por descubrir y que, como profesionales que ahora somos, tenemos una gran responsabilidad. Gracias a Juan Carlos, por las múltiples ideas durante los experimentos en el laboratorio, y gracias a Rober por guiarme con los códigos en Matlab. Gracias a Espartos Albarracín S.L. y a Juan Merino, por proporcionar el esparto evaluado en el presente trabajo, confío que continuarán en comunicación con la universidad para seguir avanzando en las propiedades acústicas del esparto.

Gracias al resto de profesores del máster que se prepararon y preocuparon en revelarnos, a través del cristal de su perspectiva, una faceta de las miles que posee la acústica. Agradecido por conocer a mis compañeros del master y aprender a su lado durante todo un año; aunque cabe notar, que estoy aún más agradecido por encontrarme con aquellos que puedo llamar amigos, por compartir las mismas subnormalidades. También agradezco a Chas, por apoyarme cuando más necesitaba un lugar donde continuar trabajando.

Del otro lado del charco, agradezco a mis padres y hermanos por brindarme su apoyo en todo momento. Gracias a Rafael y su hija IkAtl por aportarme los suministros necesarios para mi sobrevivencia, sin los cuales jamás habría podido emprender el vuelo. Finalmente, aunque no en último lugar, agradezco el inmenso apoyo, paciencia y tolerancia de mi amada esposa Beatriz.

Contenido

Resum	3
Abstract	3
Resumen	3
Objetivo	4
General	4
Particular	4
Introducción	4
Capítulo 1 – Generalidades	5
1.1 Fibras	5
Kenaf	5
Sisal	6
Coco	6
Esparto	7
1.2 Métodos experimentales	8
UNE-EN ISO 10534-2:2002	8
Método de Ingard-Dear	8
1.3 Métodos predictivos empíricos	8
Capítulo 2 - Coeficiente de absorción acústica	11
2.1. Instrumentación utilizada	11
2.2 Procedimiento de medición y cálculo	11
2.3 Muestras de fibras termoconformadas	14
2.3 Esparto	16
Capítulo 3 - Resistencia y resistividad al flujo de aire	21
3.1. Instrumentación utilizada	21
3.2 Procedimiento de medición y cálculo	21
3.3 Muestras de fibras termoconformadas	23
3.4 Esparto	24
Capítulo 4 Modelo empírico	27
4.1. Modelo semi-empírico de Delany-Bazley	27
4.2. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado	29
4.3. Fibras termoconformadas	30
4.4. Esparto	32

Capítulo 5 Análisis de resultados	37
5.1. Conclusiones	39
5.2. Trabajos futuros.....	39
Referencias.....	40
ANEXO I - Coeficiente de absorción acústica	42
ANEXO II – Resistencia al flujo de aire	47
ANEXO III – Códigos de MATLAB.....	51
1. Coeficiente de absorción acústica	51
2. Resistencia y resistividad al flujo de aire.....	57
3. Modelo empírico.....	63
Índice de Figuras.....	71
Índice de Tablas	73

Resum

Aquest treball proporciona una metodologia per a caracteritzar propietats acústiques com el coeficient d'absorció sonora en incidència normal i els coeficients predictius de modelització per a fibres orgàniques no teixides. A banda, també es caracteritzen altres propietats del material que proporcionen de forma indirecta informació de les característiques acústiques d'estes fibres, com la resistència específica al flux d'aire o resistivitat al flux d'aire. La informació ha segut recollida tal i com s'indica a les normatives ISO (International Organization for Standardization, Ginebra, Suïza), mètodes indirectes de mesura que a la fi es fonamenten en aquestes normatives, així com en les investigacions de diferents autors envers a propietats acústiques de materials porosos, fibrosos, orgànics i artificials.

Paraules clau: fibres naturals, absorció acústica, model empíric, airflow resistivity, resistència al flux, espart.

Abstract

A simple methodology is provided in this work in order to characterize acoustics properties like normal incidence acoustical absorption coefficient as well as the eight empirical predictive coefficients for non-woven organic fibers; besides certain material's properties that offer indirectly information of its acoustical characteristics such as the specific airflow resistivity and airflow resistance. Information was gathered according with ISO standards (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland), along with an alternative measurement method which is fundamented in the same standard; besides the research of several authors in regard to the acoustical properties of porous, fibrous, organic and synthetic materials.

Keywords: natural fibers, acoustic absorption, empiric model, airflow resistivity, esparto.

Resumen

El presente trabajo proporciona una metodología para caracterizar las propiedades acústicas como el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal y los coeficientes predictivos de modelización para fibras orgánicas no tejidas; además de ciertas propiedades de los materiales que ofrecen indirectamente información de sus características acústicas, tales como la resistencia específica al flujo de aire y la resistividad al flujo de aire. La información se recabó conforme los lineamientos de normativas ISO (International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza), métodos alternativos de medición que finalmente se fundamentan en dichas normativas, así como en las investigaciones de varios autores respecto a las propiedades acústicas de materiales porosos, fibrosos, orgánicos y artificiales.

Palabras clave: fibras naturales, absorción acústica, modelo empírico, resistencia al flujo, esparto.

Objetivo

General

Caracterización del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal y los coeficientes predictivos de modelización empírica de los materiales textiles no tejidos con fibras naturales termoconformadas.

Particular

De las distintas variantes de esparto, obtener sus características acústicas como el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal y los coeficientes predictivos de modelización empírica, para elegir la más óptima y conformar un potencial panel acústico absorbente con aglutinante natural.

Introducción

Afortunadamente, se están incrementando los adeptos hacia una filosofía que se preocupa por la concientización del equilibrio ecológico entre el ser humano y el medio ambiente, basta con ver las considerables investigaciones al respecto. Sea por convicción o conveniencia, el hecho es que los productos verdes están en boga; sin embargo, la historia ha demostrado que los grandes avances científicos y tecnológicos obedecen a un interés fuertemente económico. Razón por la cual, es necesario tanto estrechar como consolidar a largo plazo los vínculos entre los centros de investigación y las empresas, para coadyuvar en todas aquellas investigaciones que ofrecen una alternativa significativa para el desarrollo de nuevos materiales verdes y sostenibles, ya sean de origen reciclado o no. Prueba del esfuerzo en la materia, es el programa de investigación e innovación de la Unión Europea: "Horizonte2020".

Capítulo 1 – Generalidades

1.1 Fibras

Dentro de la materia orgánica, aquella que contiene celulosa, es la forma de biomasa más abundante; de la cual, las fibras son utilizadas como refuerzos principalmente [1].

En la Figura 1.1, se visualiza una clasificación general de las fibras:

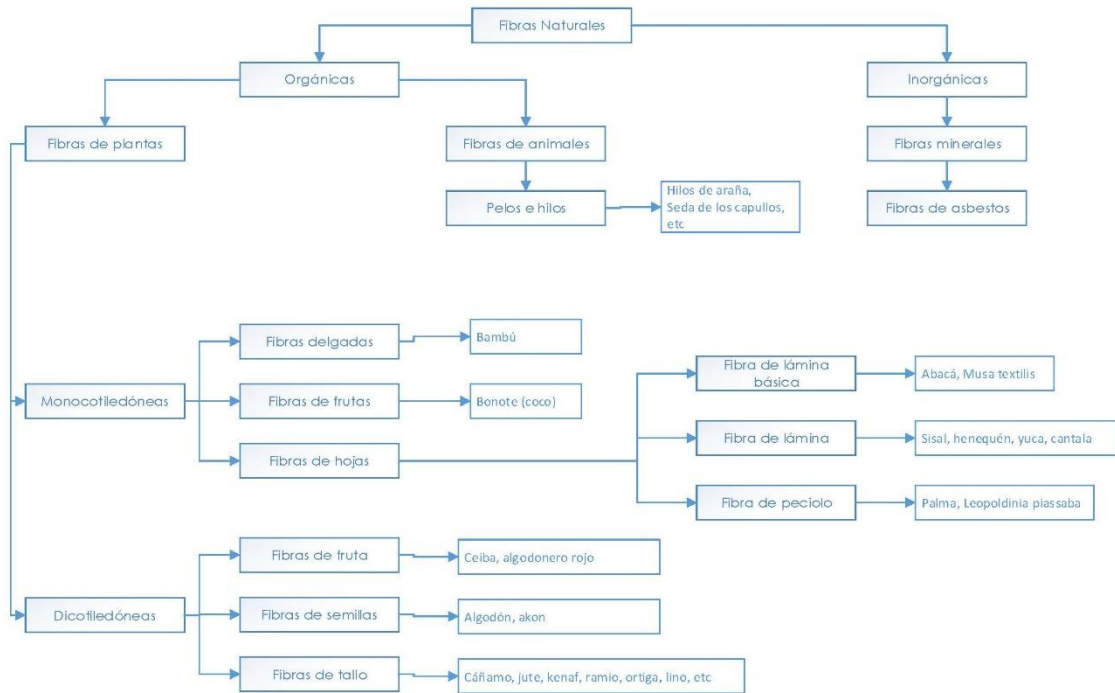


Figura 1. 1 Clasificación general de las fibras [1]

Kenaf

El kenaf, cuyo nombre científico es *Hibiscus cannabinus*, crece principalmente en China y Tailandia, aunque es originaria de África [2]. El diámetro de su fibra se encuentra entre los 13 μm y 36 μm , con un promedio de 20 μm ; y una longitud promedio de 2 a 6 mm. Es de suma importancia el momento de su cosecha. Una vez que son recolectadas, se dejan remojar en agua para separar suavizarse y separar las fibras, lo cual debe hacerse con sumo cuidado para obtener fibras de alta calidad [3].



Figura 1. 2 Kenaf

Sisal

El sisal proviene de la familia *Agavaceae*, y es cultivado principalmente en Sudamérica y el este de África. Su nombre científico es *Agave sisalana* originaria de México [4]. Sus fibras alcanzan una longitud promedio de 2.3 m y su diámetro está entre 8 μm y 30 μm , con un promedio de 20 μm . Ésta planta puede crecer prácticamente en cualquier tipo de suelo; y en cuanto a la cosecha, no existe un periodo establecido, dejándolo al criterio del agricultor [3].



Figura 1. 3 Planta de Agave

Coco

Bonote, o fibra de coco, es obtenido a partir de las fibras de la corteza exterior de la fruta de la palma de coco, *Cocos nucifera*, y es la fibra más gruesa y resistente de todas las fibras naturales comerciales [5]. No hay información que precise su origen, ya que existen variaciones entre los botánicos, hay quienes consideran su origen en las islas de Filipinas, aunque existe evidencia de su cultivo en la India alrededor del año 300 a.C. La longitud promedio de sus fibras es de 0.6 m y un diámetro promedio de 259 μm , entre 229 μm y 277 μm . Las cortezas se dejan remojar para suavizar las fibras y procesarlas posteriormente.



Figura 1. 4 Coco

Esparto

El esparto, o *Stipa tenacissima*, es una planta de las gramíneas y es originaria de la zona del Mediterráneo, cultivado principalmente en España. La longitud de sus fibra se encuentra entre 0.25 mm y 2mm, y el diámetro de las mismas está entre 0.010 μm y 0.015 μm [3].

El esparto utilizado en el presente estudio, es proveniente de los montes y sierras de Murcia. La recolección es manual, arrancándose de la tierra, para posteriormente ser atada y colocada al sol para el proceso de deshidratación. Una vez seco por completo, el esparto es introducido en recipientes repletos únicamente de agua, permaneciendo así por un periodo de 60 días aproximadamente. Posteriormente, es llevado el esparto al proceso de secado al sol, antes de llevarse a producción.

Para el proceso de elaboración, se humedece un poco el esparto para introducirlo a la máquina de picado, que permite flexibilizar la fibra. Una vez picado, el esparto pasa por una máquina cardadora que logra generar una fibra continua, capaz de formar un rollo [6].



Figura 1. 5 Esparto

1.2 Métodos experimentales

UNE-EN ISO 10534-2:2002

La normativa española, especifica dos métodos para la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal, de materiales absorbentes acústicos; mediante un tubo de impedancias, o tubo de onda estacionaria, con dos posiciones para micrófono y un sistema digital de análisis de la señal.

El primer método utiliza dos micrófonos en posiciones fijas en el tubo, necesitando un procedimiento de corrección que minimiza las diferencias en las características de amplitud y fase entre dichos micrófonos. La ventaja del método es la rapidez de implementación, combinando precisión y sencillez. El segundo método, aunque implica mayor tiempo en ejecutar la medición, elimina la corrección del primer método, permitiendo una posición óptima en cualquier frecuencia [7].

Método de Ingard-Dear

Propusieron un método alternativo a la normativa UNE-EN ISO 29053, para medir indirectamente la resistencia acústica al flujo de aire y la reactancia de materiales porosos. El dispositivo que usan es un tubo de onda estacionaria, con dos posiciones fijas para dos micrófonos, donde es media la presión sonora enfrente de la muestra y en la parte rígida del tubo. Con el uso de un analizador apropiado de dos canales, determinan la dependencia en frecuencia de la impedancia acústica al flujo de aire. La particularidad del método, radica en analizar aquellas frecuencias a las cuales se tiene que la distancia de la muestra al final del tubo, coincide con un número impar de cuartos de ondas. Y en esas frecuencias se analiza la parte real e imaginaria de la razón de presiones entre los micrófonos [8].

1.3 Métodos predictivos empíricos

Los estudios que se han realizado sobre materiales absorbentes acústicos, para proponer modelos empíricos que simulen su comportamiento acústico, basados principalmente en el cálculo de la impedancia característica y la constante de propagación, son extensos.

El modelo más utilizado, que inclusive es utilizado por la normativa UNE-EN ISO 12354-6: 2004 [9], es el propuesto por Delany y Bazley [10], estableciendo relaciones simples de la ley de potencia. Los materiales que analizó fueron elaborados mediante fibra de vidrio y lanas minerales.

Más adelante, Dunn y Davern [11], estudió cuatro tipo de espumas de poliuretano reticulado, es decir de poro abierto, de densidades diferentes. Demostró así un cálculo práctico para el cálculo de la impedancia acústica. Garai y Pompoli [12], estudiaron 32 muestras con diferentes densidades de materiales elaborados a partir de fibras de poliéster, para establecer un modelo empírico simple, capaz de predecir su impedancia acústica y el coeficiente de

absorción; con la finalidad de proporcionar una herramienta para aplicaciones de ingeniería acústica.

El modelo que propone Voronina [13] logra predecir el comportamiento del coeficiente de absorción acústica para materiales fibrosos, al tomar en cuenta el diámetro de las fibras así como la densidad de la muestra, relacionando parámetros acústicos con las características estructurales del material.

Oliva y Hongosito [14], estudiaron varias configuraciones de la lana mineral, para llegar al modelo predictivo de la impedancia acústica.

Pero es hasta los estudios de Berardi, Iannace, Arenas, Rebolledo, del Rey, Alba, Ramis, Carbajo, Godinho, Sanchis y Escuder [15, 16, 17, 18] que se tienen modelos predictivos para materiales orgánicos principalmente: fibras de coco, kenaf, lana de oveja, madera, corcho, paja, caña, cáñamo, etc. capaces de predecir el coeficiente de absorción acústica satisfactoriamente.

En las tablas siguientes, se sintetizan los ocho coeficientes calculados por los autores mencionados y, como se verá en el Capítulo 3, es a partir de dichos coeficientes predictivos que son calculados tanto la impedancia acústica como la constante de propagación, que permiten obtener finalmente el coeficiente de absorción acústica estimado.

	Lana de Roca	Foam		
	Arenas et al.	Dunn&Davern	Garai&Pompoli	Delany&Bazley
C1	0.0571	0.1140	0.0780	0.0570
C2	0.7540	-0.3690	-0.6230	-0.7540
C3	0.0870	-0.0985	0.0740	0.0870
C4	0.7320	-0.7580	-0.6600	-0.7320
C5	0.1890	0.1680	0.1590	0.1890
C6	0.5950	-0.7150	-0.5710	-0.5950
C7	0.0978	0.1360	0.1210	0.0980
C8	0.7000	-0.4910	-0.5300	-0.7000

Tabla 1. 1 Coeficientes predictivos de materiales inorgánicos

	Kenaf			Coco			Celulosa	Madera		Corcho		Paja	Caña/corteza		Cáñamo
	Del Rey	Arenas	Berardi	Del Rey	Arenas	Berardi	Arenas	Arenas	Berardi	Arenas	Berardi	Arenas	Arenas	Berardi	Berardi
C1	0.0460	1.2405	0.0009	0.0713	0.2067	0.5821	0.6224	0.0770	0.0013	0.1511	0.0809	0.0518	0.0088	0.0018	0.1308
C2	-0.2550	0.0370	-3.3742	-0.8749	-0.1153	1.9672	-0.0892	-2.4825	-2.8450	-6.3056	-0.9965	-3.9867	4.2802	-4.3614	-1.4734
C3	0.1120	-0.4082	0.3209	-0.1216	0.1339	-0.3894	-0.4816	0.8795	0.3598	0.1621	0.3436	1.3083	0.3209	0.2674	0.0003
C4	-0.9670	-0.3840	-1.3341	-0.4520	-0.3849	0.7841	0.6140	0.6510	0.4274	2.3860	-0.5786	-1.5634	-0.9552	-1.4976	-3.1691
C5	0.0600	0.8666	1.4413	0.2129	0.2756	0.4384	0.3952	0.4505	0.3625	0.2376	0.4430	1.1650	0.5619	0.4726	0.3040
C6	-1.2560	0.6454	-1.1440	-0.4857	-0.3789	2.2503	0.1273	-1.3031	-0.3819	1.7423	-0.2624	-1.0008	-0.9230	-1.0625	-0.2419
C7	0.0390	-3.6462	-0.5973	0.0997	-0.3718	0.7758	0.5823	0.0965	-0.1732	-0.4727	0.0415	0.3775	-0.7159	-0.8270	0.2556
C8	-0.5410	20.7484	2.9723	-0.5988	2.4672	-0.6159	0.0872	0.8289	1.2250	1.0326	3.2792	-1.6028	0.8210	3.0042	-1.8559

Tabla 1. 2 Coeficientes predictivos de materiales orgánicos

Capítulo 2 - Coeficiente de absorción acústica

La UNE-EN ISO 10534-2: 2002 [7] define al coeficiente de absorción acústica con incidencia normal, como la razón entre la energía acústica que se absorbe por un material y la energía acústica que impacta sobre dicho material. En otras palabras, éste coeficiente nos da información de la energía acústica que el material es capaz de contener para determinadas frecuencias.

2.1. Instrumentación utilizada

El dispositivo experimental utilizado para realizar las mediciones correspondientes, está constituido por el instrumental de medición de la Tabla 2.1, y de un tubo de ondas estacionarias fabricado de polimetilmetacrilato, con diámetro interno de 4 cm, espesor de pared 5 mm, una longitud aproximada de 1,7m y un altavoz modelo de la marca Beyma modelo CP800TI.

Elemento	Modelo	Marca	Número de serie
Sistema de análisis Pulse	3560-C	Brüel & Kjaer	2433879
Micrófono 1 1/2"	4189	Brüel & Kjaer	2506776
Micrófono 2 1/2"	4189	Brüel & Kjaer	2534152
Preamplificador 1	ZC0032	Brüel & Kjaer	4359
Preamplificador 2	ZC0032	Brüel & Kjaer	4359
Calibrador acústico	4231	Brüel & Kjaer	2528304

Tabla 2. 1 Equipo de medición.

2.2 Procedimiento de medición y cálculo

En la Figura 2.1 se indica la configuración inicial para las conexiones requeridas entre el instrumental de medición y el tubo de ondas estacionarias. Cabe señalarse que previo al montaje, es necesaria la calibración de los micrófonos para asegurar que ambos responden con la misma sensibilidad (Figura 2.2).

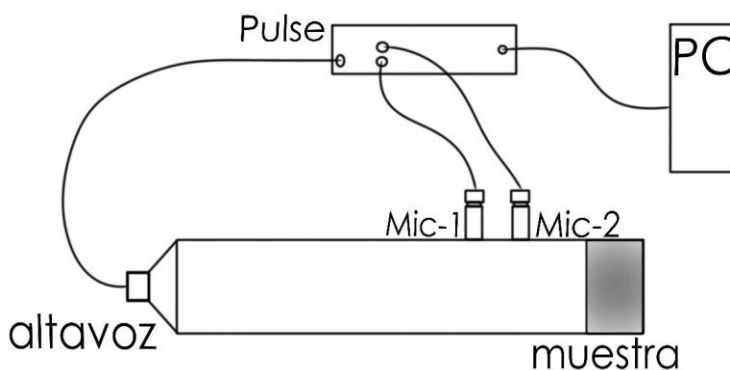
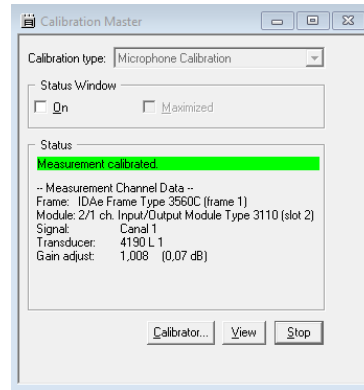
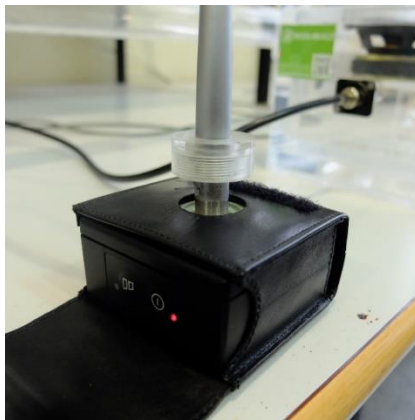


Figura 2. 1 Configuración del equipo de medición y el tubo de ondas estacionarias para la medición del coeficiente de absorción acústica



Mediante el sistema de análisis Pulse [19] de Brüel&Kjær (Figura 2.5), controlado a través del ordenador, se registra la función de transferencia H_{12}^I de las presiones registradas entre ambos micrófonos para la posición I, es decir H =Micrófono 2/ Micrófono 1. Ver Figura 2.3.

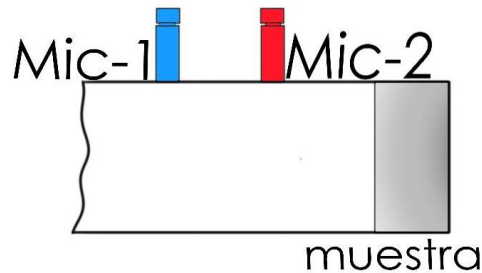
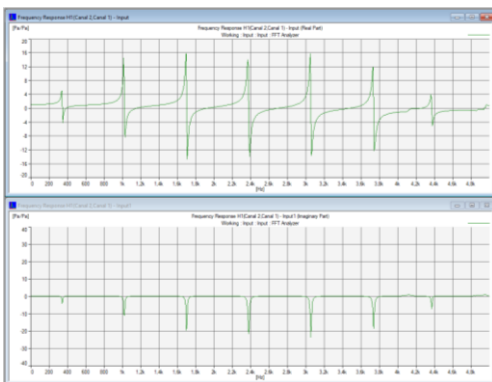


Figura 2. 3 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición I, para la medición del coeficiente de absorción acústica

Una vez almacenada la medición anterior, se intercambian los micrófonos de lugar para registrar ahora la función de transferencia H_{12}^{II} para la posición II, es decir, H =Micrófono 1/ Micrófono 2. Ver Figura 2.4.

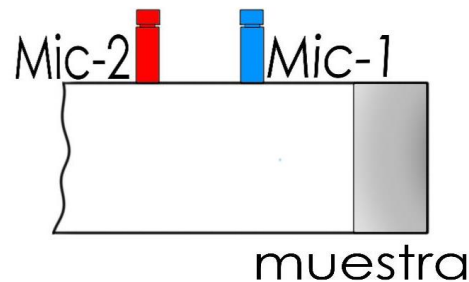
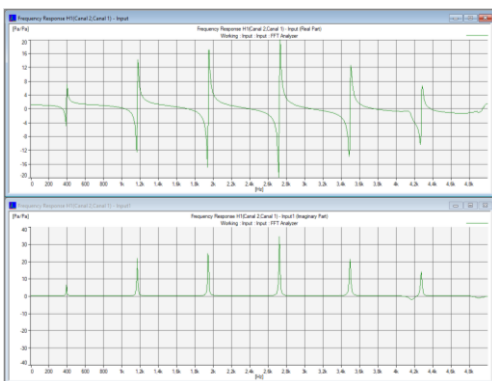


Figura 2. 4 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición II, para la medición del coeficiente de absorción acústica



Figura 2. 5 Sistema Pulse

Con los datos anteriores, es posible calcular la función de transferencia sin corregir, entre las dos posiciones de micrófonos con la ecuación 2.1:

$$\hat{H}_{12} = \left(\frac{H_{12}^I}{H_{12}^{II}} \right)^{1/2} \quad [2.1]$$

La corrección que se indica en la normativa [9] es para compensar el desajuste entre los micrófonos, y está determinada por la ecuación 2.2:

$$H_C = (H_{12}^I \cdot H_{12}^{II})^{1/2} \quad [2.2]$$

Posteriormente el cálculo continúa con la ecuación 2.3, que define la función de transferencia acústica compleja.

$$H_{12} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_C} \quad [2.3]$$

Para el cálculo del coeficiente de reflexión, se hace uso de la ecuación 2.4, donde d es la separación entre los micrófonos, l es la distancia de la posición del micrófono 2 a la muestra a analizar (Figura 2.6), ambas distancias expresadas en metros, y k es el número de onda determinado por $2\pi f/c$.

$$r = \frac{H_{12} - e^{-jkd}}{e^{jkd} - H_{12}} e^{j2k(L+d)} \quad [2.4]$$

Finalmente, una vez resuelto la ecuación anterior, es posible encontrar el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal descrito por la siguiente igualdad:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad [2.5]$$

En el Anexo-III se incluye el código en Matlab que ejecuta, a partir de los datos obtenidos del sistema Pulse, los cálculos de las ecuaciones descritas con anterioridad, y en el Anexo-I se encuentran los resultantes coeficientes de absorción para cada material.

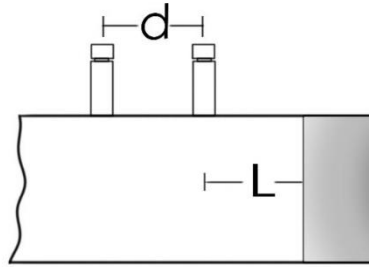


Figura 2. 6 Separación entre la posición de micrófonos "d" y la distancia "L" entre el micrófono 2 y el inicio de la muestra

2.3 Muestras de fibras termoconformadas

Las muestras textiles orgánicas que se han analizado, de la marca francesa Laroche S.A. están elaboradas al 100% de fibras de coco, kenaf, sisal blanco y sisal café, (Figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10).



Figura 2. 7 Coco, espesor de 1.2 cm



Figura 2. 8 Kenaf, espesor de 0.8 cm



Figura 2. 9 Sisal Café, espesor de 0.8 cm

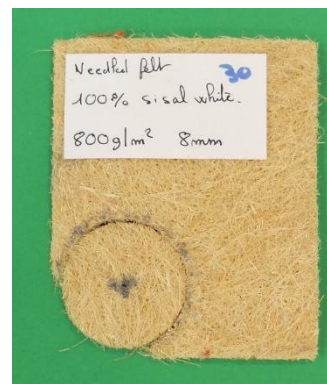


Figura 2. 10 Sisal Blanco, espesor de 0.8 cm

En las figuras siguientes se observan las gráficas del coeficiente de absorción acústica para cada uno de los materiales con fibras termoconformadas.

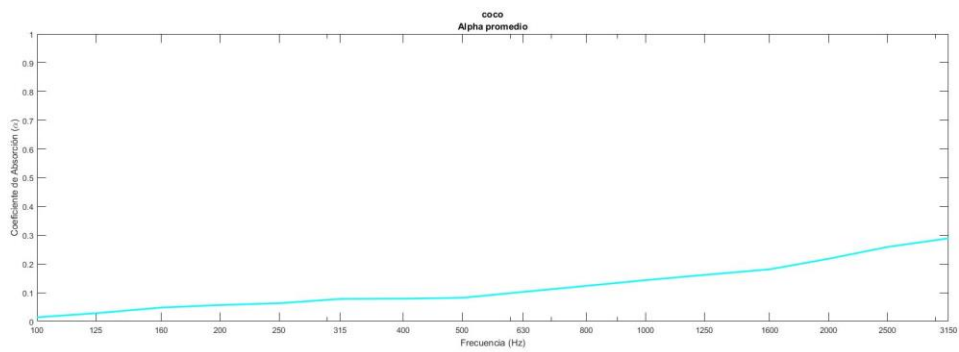


Figura 2.11 Coeficiente de absorción acústica coco

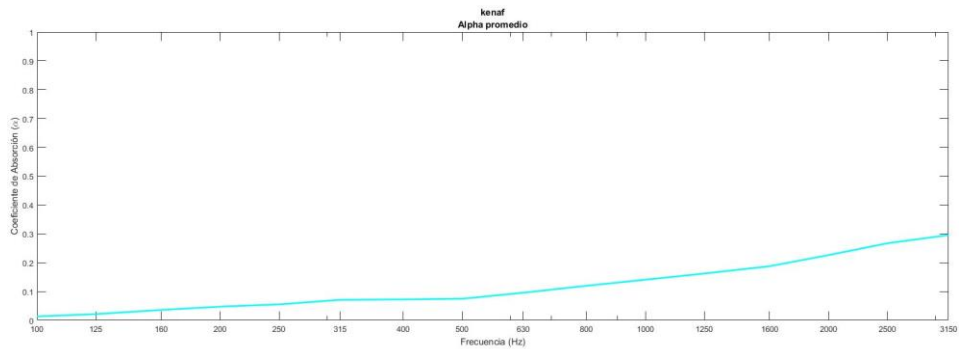


Figura 2.12 Coeficiente de absorción acústica kenaf

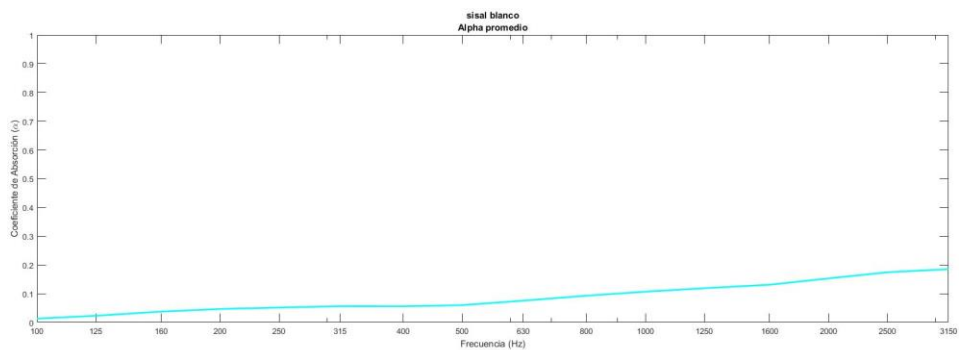


Figura 2.12 Coeficiente de absorción acústica sisal blanco

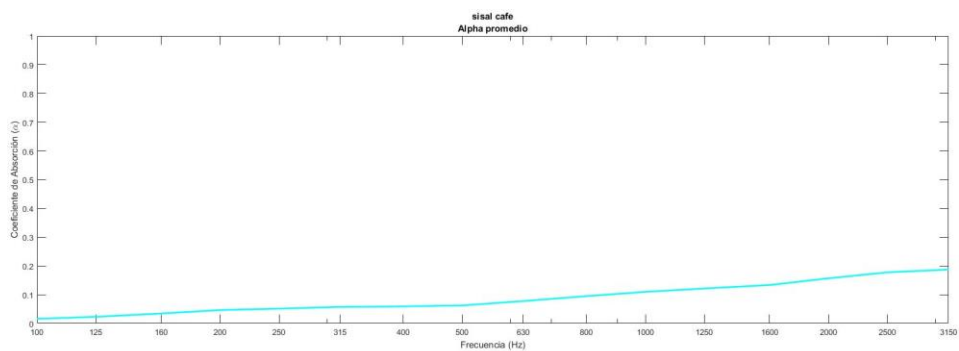


Figura 2.13 Coeficiente de absorción acústica sisal café

2.3 Esparto

El esparto fue proporcionado a la universidad por la empresa Espartos Albarracín SL, encontrándose en estado silvestre cada una de las cinco variantes: esparto verde, esparto seco, esparto cocido, esparto cocido picado y esparto estopa; para una manipulación completa del mismo (ver Figura 2.14). En virtud de las características del porta-muestras del tubo de onda estacionaria, 4 cm de diámetro, se decidió adecuar los filamentos a segmentos de 2 cm de longitud aproximadamente (Figura 2.15), principalmente para cubrir la mayor cantidad de superficie y simular así, las características aleatorias de la estructura de una fibra orgánica no tejida. En la medida de lo posible, se buscó un espesor aproximadamente de 6 cm.



Figura 2.14 Atado de esparto



Figura 2.15 Corte del material

Puesto que la intención de realizar las mediciones de los distintos tipos de esparto, es conocer la información de sus características acústicas en condiciones naturales u originales, es decir, sin ningún tipo de proceso de unión entre sus fibras; es que se coloca un anillo de sujeción confeccionado del mismo tipo de esparto que se esté evaluando, como se puede apreciar en la Figura 2.16 y generar así una muestra uniforme para la medición, Figura 2.17.



Figura 2.16 Anillo de sujeción



Figura 2.17 Muestra debidamente en posición

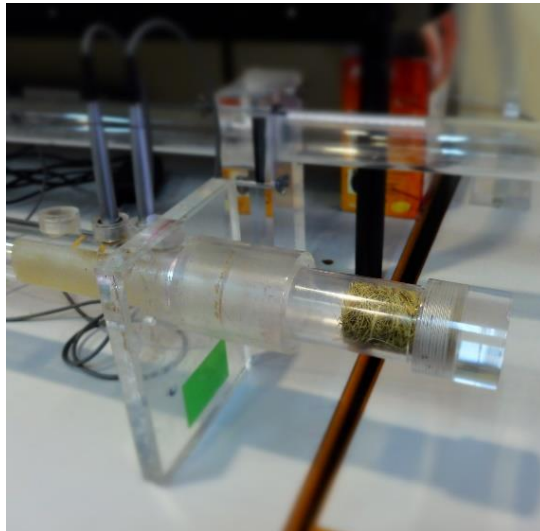


Figura 2. 18 Colocación de la muestra en el tubo de ondas estacionarias

En las figuras siguientes se observan las gráficas del coeficiente de absorción acústica para cada uno de los tipos de esparto. Las gráficas corresponden al promedio de tres mediciones realizadas con tres muestras distintas por cada tipo de esparto.

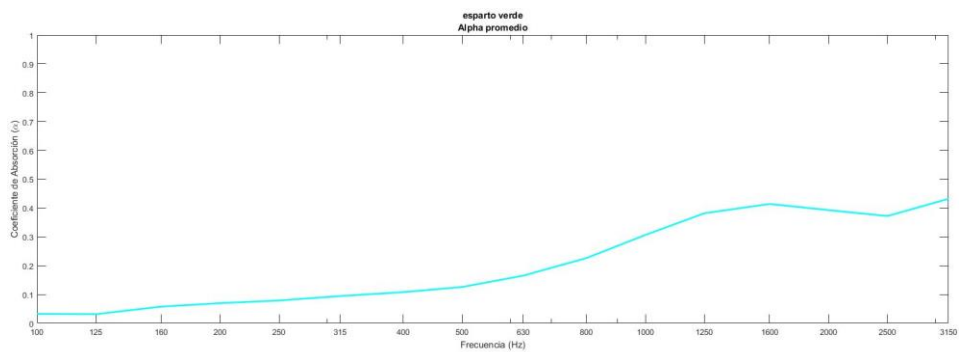


Figura 2. 19 Coeficiente de absorción acústica esparto verde

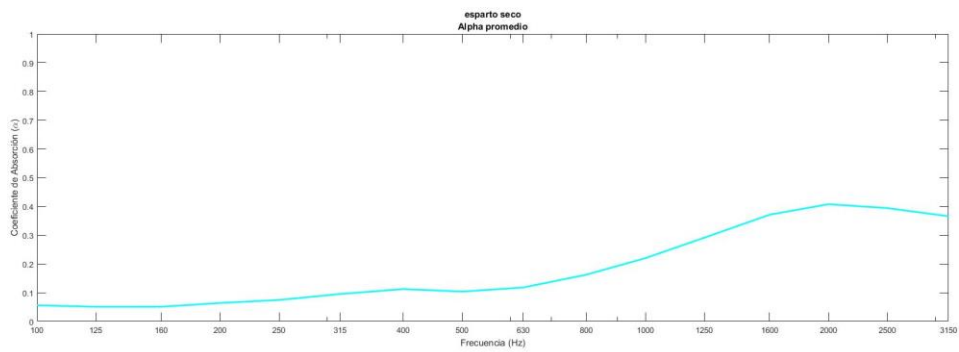


Figura 2. 20 Coeficiente de absorción acústica esparto seco

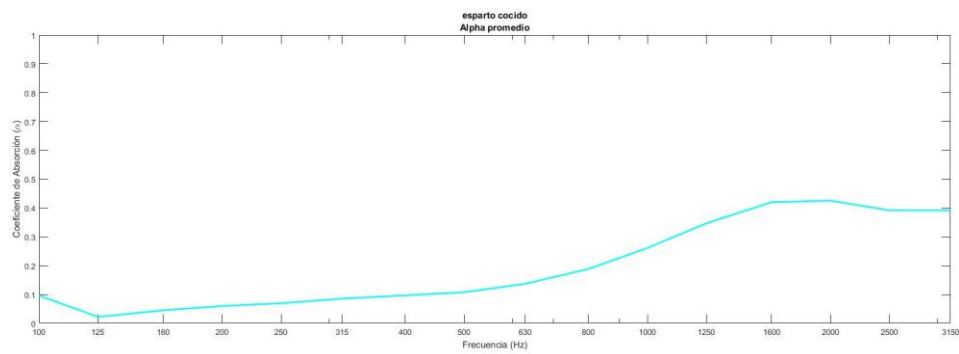


Figura 2. 21 Coeficiente de absorción acústica esparto cocido

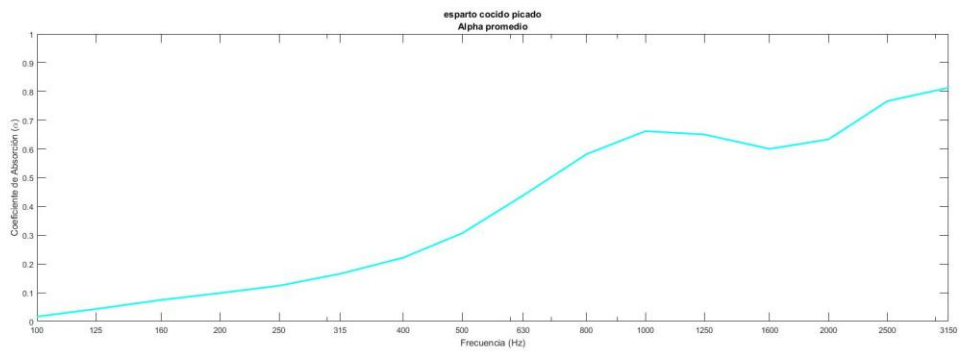


Figura 2. 22 Coeficiente de absorción acústica esparto cocido picado

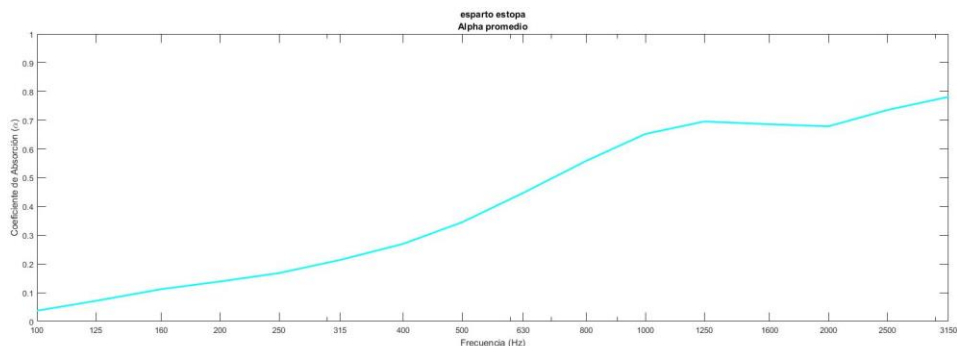


Figura 2. 23 Coeficiente de absorción acústica esparto estopa

Una vez obtenidos los coeficientes de absorción acústica de cada uno de los cinco tipos de esparto, se ha elegido al esparto estopa por poseer un coeficiente de absorción acústica mayor del resto de variantes, (más adelante, en la Figura 5.1 se observa con detalle ésta comparación); y confeccionar así un arreglo de tres muestras, aunque en esta ocasión, se añade un aglutinante orgánico para simular un prototipo de panel acústico fabricado a partir de fibras orgánicas de esparto estopa.

El pegamento orgánico utilizado para formar la nueva muestra de esparto estopa, se elaboró con base en agua, harina y azúcar [20]. Se combinó primeramente en una olla pequeña, 1 taza de harina de trigo y 1/3 de taza de azúcar blanco a fuego medio. Poco a poco se fue integrando agua corriente a la mezcla, hasta lograr una consistencia espesa. Aproximadamente 1/2 taza de agua fue usada. Posteriormente se utilizó una batidora de mano para de eliminar de la composición todos los grumos y obtener finalmente una mezcla homogénea.

En la Figura 2.24 se muestra el esparto estopa con gotas del aglutinante esparcidas lo más uniformemente posible, y a continuación se mezcló manualmente el esparto con el pegamento para combinarlos en una composición homogénea. Posteriormente se elaboró un molde a partir de papel aluminio, cuyo diámetro coincide con el diámetro interno del porta-muestras del tubo de impedancias, de tal modo que cubra completamente la sección transversal del mismo. El molde que contiene el material ya preparado, se observa en la Figura 2.25.

Se especifica en la Tabla 2.2 el peso del molde, de esparto y de pegamento orgánico utilizados para la preparación de cada una de las tres muestras de esparto estopa Glue.

	Molde	Esparto	Pegamento	Total
Muestra 1	2.40 g	8.03 g	14.23 g	24.66 g
Muestra 2	2.49 g	8.04 g	14.55 g	25.08 g
Muestra 3	2.58 g	8.03 g	15.58 g	26.46 g

Tabla 2. 2 Detalle del peso en gramos, para cada una de las muestras elaboradas de esparto estopa Glue



Figura 2. 24 Mezcla de esparto estopa y el pegamento orgánico



Figura 2. 25 Molde con la muestra preparada

Se dejó transcurrir una noche antes de retirar el molde de las muestras y una vez retirado dicho molde al día siguiente, las tres muestras se colocaron al aire libre, dejándose secar por completo a la sombra por un periodo de 3 h aproximadamente, quedando como se muestra en la Figura 2.26 y Figura 2.27.



Figura 2. 26 Muestra elaborada con esparto estopa y pegamento orgánico



Figura 2. 27 Muestra final colocada para la medición del coeficiente de absorción acústica

Finalmente, el coeficiente de absorción acústica del denominado “Esparto Estopa Glue” es el siguiente:

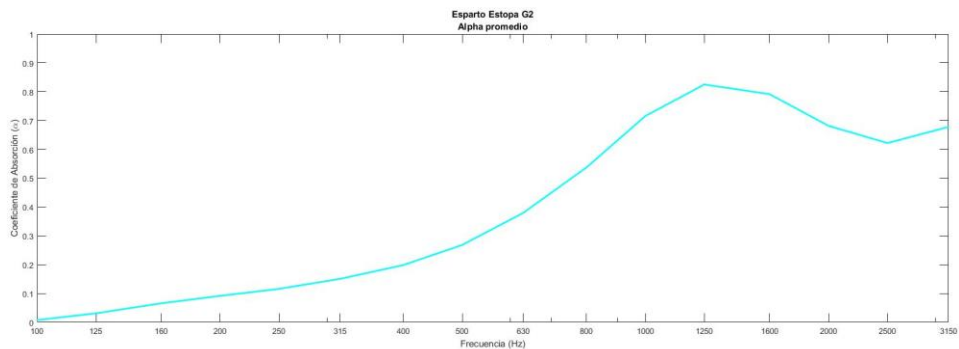


Figura 2. 28 Coeficiente de absorción acústica esparto estopa Glue

Capítulo 3 - Resistencia y resistividad al flujo de aire

Conforme la UNE-EN ISO 29053:1991 [21], la resistencia al flujo de aire de materiales porosos, proporciona una correlación entre sus propiedades acústicas y la estructura interna de los mismos; sus unidades son $[\text{Pa s m}^{-1}]$. Si el material se considera homogéneo, la resistividad al flujo de aire se define como la resistencia específica al flujo de aire dividida por el espesor de la muestra, y es expresada en $[\text{Pa s m}^{-2}]$.

En 1985, Ingard y Dear [8] propusieron un método alternativo al descrito en la normativa mencionada, cuyo procedimiento se ha seguido en éste capítulo.

3.1. Instrumentación utilizada

El dispositivo experimental utilizado para realizar las mediciones correspondientes, está constituido por el instrumental de medición, visto en la Tabla 2.1 del capítulo anterior, y de un tubo de ondas estacionarias fabricado de polimetilmetacrilato, con diámetro interno de 4 cm, espesor de pared 5 mm, una longitud aproximada de 1,7 m y un altavoz modelo de la marca Beyma modelo CP800TI.

3.2 Procedimiento de medición y cálculo

En la Figura 3.1 se indica la configuración inicial para las conexiones requeridas entre el instrumental de medición y el tubo de ondas estacionarias. Cabe señalarse que previo al montaje, es necesaria la calibración de los micrófonos para asegurar que ambos responden con la misma sensibilidad.

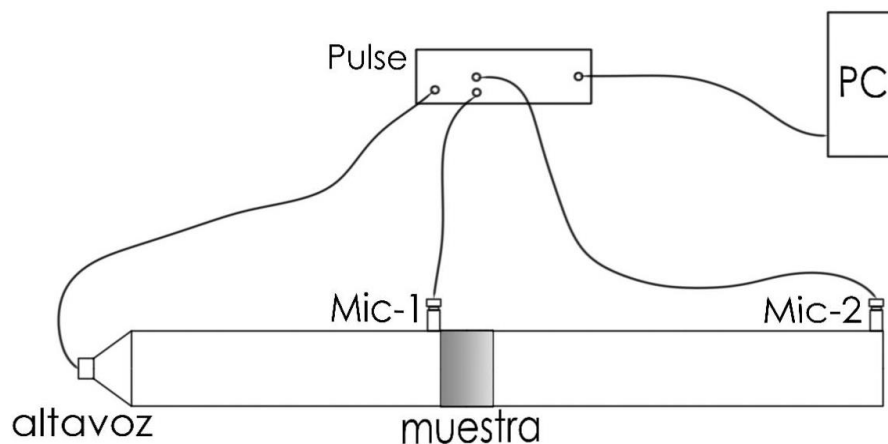


Figura 3. 1 Configuración del equipo de medición y el tubo de ondas estacionarias para la medición de la resistencia al flujo de aire

Mediante el sistema de análisis Pulse de B&K, controlado a través del ordenador, se registra la función de transferencia H_{12} de las presiones registradas entre ambos micrófonos para la posición I, es decir $H = \text{Micrófono 2} / \text{Micrófono 1}$. Ver Figura 3.2.

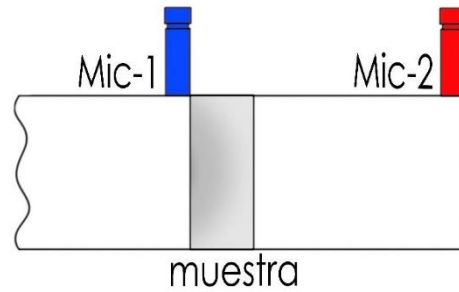
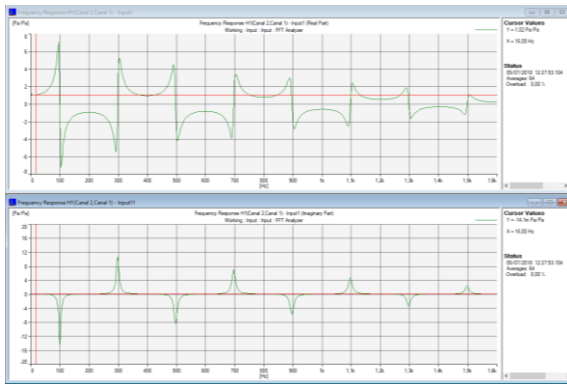


Figura 3. 2 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición I, para la medición de la resistencia al flujo de aire

Una vez almacenada la medición anterior, se intercambian los micrófonos de lugar para registrar ahora la función de transferencia H_{12}^{II} para la posición II, es decir, $H = \text{Micrófono 1} / \text{Micrófono 2}$. Ver Figura 3.3.

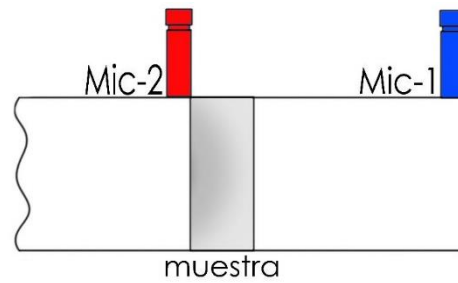
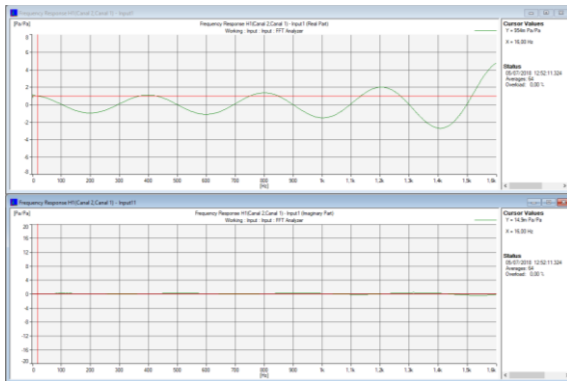


Figura 3. 3 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición II, para la medición de la resistencia al flujo de aire

Con los datos anteriores, es posible calcular la función de transferencia sin corregir, entre las dos posiciones de micrófonos con la ecuación 3.1:

$$\hat{H}_{12} = \left(\frac{H_{12}^I}{H_{12}^{II}} \right)^{1/2} \quad [3.1]$$

Se realiza una corrección para compensar el posible desajuste entre los micrófonos, y está determinada por la ecuación 3.2:

$$H_C = (H_{12}^I \cdot H_{12}^{II})^{1/2} \quad [3.2]$$

Posteriormente el cálculo continúa con la ecuación 3.3, que define la función de transferencia acústica compleja.

$$H_{12} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_C} \quad [3.3]$$

Finalmente, una vez resuelto la ecuación anterior, es posible encontrar la resistencia al flujo de aire descrito por la siguiente igualdad:

$$\sigma = \left| \text{imag} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right| \quad [3.4]$$

Para determinar aquellas frecuencias para las que está definida la resistencia al flujo, se hace uso de la ecuación 3.5, donde L es la distancia entre la muestra y la terminación rígida del tubo de ondas estacionarias, ver Figura 3.4, donde $n=1,2,3,4,5\dots$

$$L = \frac{\lambda(2n - 1)}{4} \quad [3.5]$$

En el Anexo-III se incluye el código en Matlab que ejecuta, a partir de los datos obtenidos del sistema Pulse, los cálculos de las ecuaciones descritas con anterioridad, y en el Anexo-II se encuentran las resistencias al flujo resultantes para cada material.

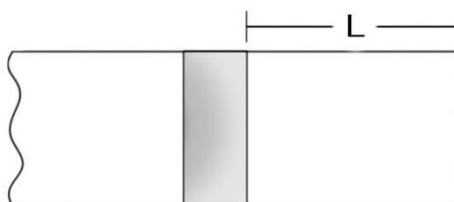


Figura 3. 4 Distancia entre la muestra y la terminación rígida del tubo de ondas estacionarias

3.3 Muestras de fibras termoconformadas

Los valores para la resistencia así como la resistividad al flujo de aire, para las muestras termoconformadas se muestra en la Tabla 3.1:

Muestra	Espesor cm	Densidad g/cm ³	Resistencia al flujo Pa*s/m	Desviación típica Pa*s/m	Resistividad al flujo kPa*s/m ²	Desviación típica kPa*s/m ²
Coco	1.2	0.09	193.6	2.9	16.1	0.2
Kenaf	0.8	0.10	155.3	2.1	19.4	0.3
Sisal Blanco	0.8	0.11	59.6	1.3	7.5	0.2
Sisal Café	0.8	0.13	48.0	0.4	6.0	0.05

Tabla 3. 1 Resistencia y Resistividad al flujo de aire para las muestras con fibras termoconformadas

3.4 Esparto

Los distintos tipos de esparto a evaluar son: verde, seco, cocido, cocido picado, estopa y estopa con pegamento orgánico. Para cada variante de esparto, se prepararon tres muestras. Los resultados que se exponen más adelante de cada ejemplar de esparto, corresponden al promedio de la medición de sus tres muestras.

Como se expuso en el capítulo anterior, para adecuar la muestra de esparto dentro del tubo de ondas estacionarias, fue necesario formar un anillo de sujeción de las mismas características del tipo de esparto a analizar; y puesto que el método utilizado por Ingard y Dear requiere colocar el material aproximadamente en la parte media del tubo, es que se utilizan en esta ocasión dos anillos en cada extremo del ejemplar medido.

Para mantener la muestra en una posición estable y uniforme, se ideó armar un báculo, a partir de una varilla metálica y un cilindro de polimetilmetacrilato cuyo diámetro exterior coincide con el diámetro interno del tubo, que ayudase a presionar suavemente las fibras del esparto por un extremo del tubo, contra un trozo de madera cuadrado colocado en mitad del tubo que servía como pared y contener así, la presión ejercida hacia el material para proporcionarle una forma adecuada (Figura 3.5).

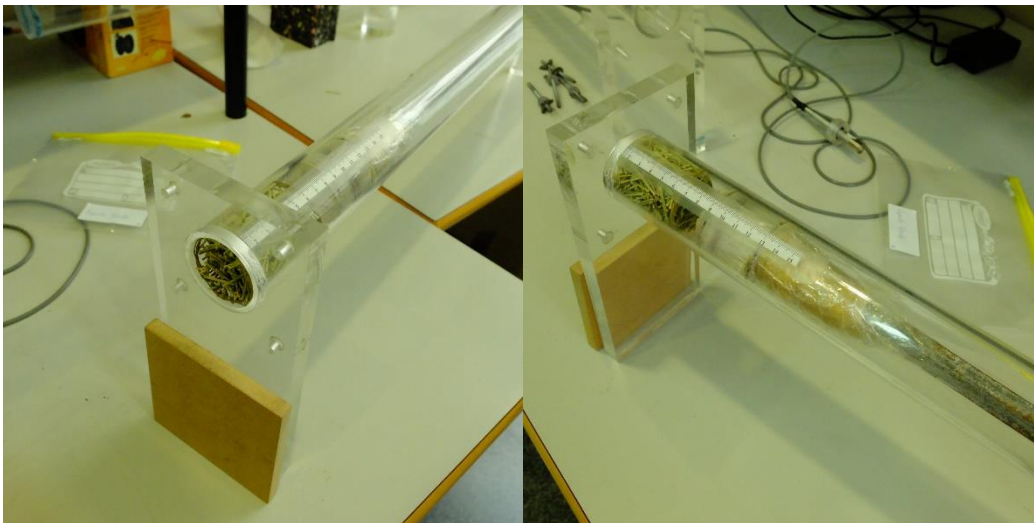


Figura 3. 5 Adecuación del esparto para realizar la medición de resistencia al flujo de aire

Finalmente, en la Figura 3.6 se aprecia la muestra de esparto verde en posición para la medición. Con los anillos de sujeción, se logra una superficie lo más uniforme posible en los extremos de la muestra, esto es, para que tanto la onda incidente como la onda reflejada impacten en una superficie plana, evaluando así un material homogéneo.

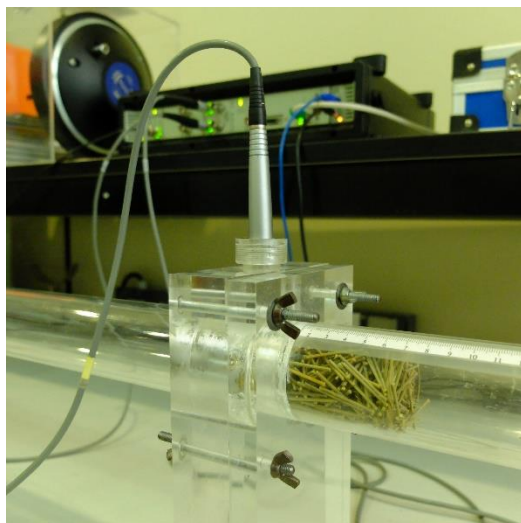


Figura 3. 6 Colocación de la muestra en el tubo de ondas estacionarias para la medición por el método de Ingard-Dear

La colocación de la muestra de esparto con aglutinante dentro del tubo de ondas estacionarias (Figura 3.7), resultó mucho más simple, puesto que no requirió los anillos de sujeción, ya que se comporta como un segmento que emula provenir de un panel acústico comercial.

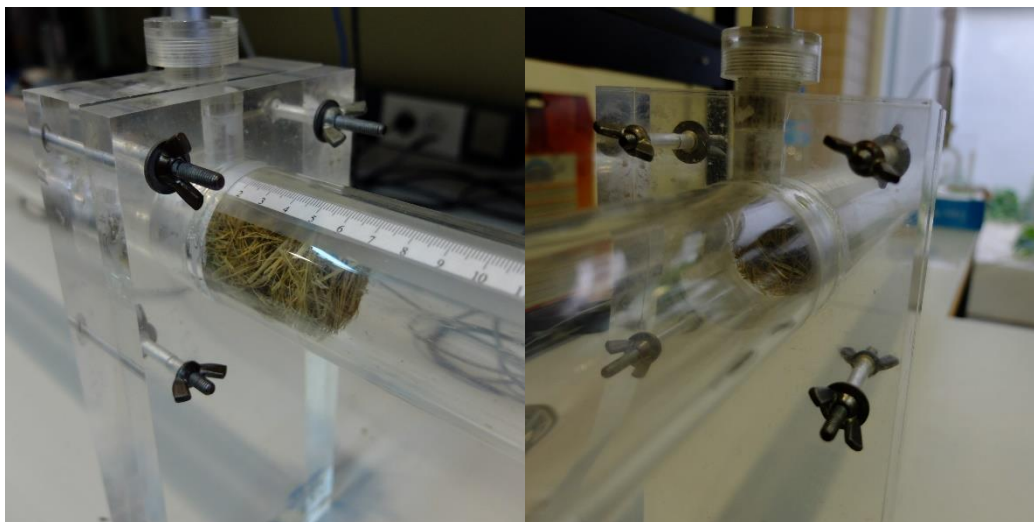


Figura 3. 7 Colocación de la muestra con pegamento en el tubo de ondas estacionarias para la medición por el método de Ingard-Dear

Los valores para la resistencia así como la resistividad al flujo de aire, para los distintos tipos de espartos evaluados, se muestran en la Tabla 3.2:

Muestra	Espesor	Densidad	Resistencia al flujo	Desviación típica	Resistividad al flujo	Desviación típica
	cm	g/cm³	Pa*s/m	Pa*s/m	kPa*s/m²	kPa*s/m²
Esparto Verde	6.7	0.22	35.7	5.2	0.5	0.1
Esparto Seco	6.2	0.17	33.0	1.5	0.5	0.04
Esparto Cocido	6.8	0.17	30.7	5.1	0.5	0.1
Esparto Cocido Picado	7.5	0.15	84.9	5.6	1.1	0.1
Esparto Estopa	6.8	0.10	131.5	16.2	1.9	0.2
Esparto Estopa Glue	5.41	0.21	148.42	19.3	2.7	0.8

Tabla 3. 2 Resistencia y Resistividad al flujo de aire para las muestras de esparto

Capítulo 4 Modelo empírico

A través de la información obtenida de los capítulos anteriores, es decir el coeficiente de absorción acústica y la resistencia al flujo de aire, es posible utilizar el modelo propuesto por Delany-Bazley [10] para conocer los coeficientes $C_i (i=1, \dots, 8)$ que definen el comportamiento acústico de los materiales bajo estudio.

4.1. Modelo semi-empírico de Delany-Bazley

Cuando se conocen los coeficientes, es posible calcular la impedancia característica normalizada con la ecuación 4.1:

$$Z = Z_0(1 + C_1 X^{C_2} - j C_3 X^{C_4}) \quad [4.1]$$

Y la constante de propagación del material con la ecuación 4.2:

$$G = K(C_5 X^{C_6} + j(1 + C_7 X^{C_8})) \quad [4.2]$$

Donde X está definida por ρ_0 la densidad del aire [kg m^{-3}], la frecuencia f [Hz] y la resistividad al flujo del aire r [Pa s m^{-2}]:

$$X = \frac{\rho_0 \cdot f}{r} \quad [4.3]$$

La variable K está definida por la frecuencia angular y la velocidad del sonido en el aire:

$$K = \frac{2 \pi f}{c_0} \quad [4.4]$$

La impedancia acústica del aire Z_0 está definida por la densidad del aire ρ_0 y la velocidad de propagación del sonido en el mismo medio c_0 .

Una vez calculado lo anterior, es posible conocer la impedancia de cierre (ecuación 4.5) donde d es el espesor de la muestra, Z_{CR} y Z_{CI} son la parte real y la parte imaginaria de la impedancia de cierre, correspondientemente.

$$Z_C = Z \coth(G \cdot d) = Z_{CR} + Z_{CI} \quad [4.5]$$

Una vez que se tiene la impedancia de cierre, se puede calcular el coeficiente de absorción acústica estimado [12]:

$$\hat{\alpha} = \frac{4Z_0 Z_{CR}}{|Z_{CR}|^2 + 2Z_0 Z_{CR} + Z_0^2} \quad [4.6]$$

El procedimiento para calcular los coeficientes predictores, es a través de un método iterativo de disminución de la función del error cuadrático [18], ecuación

4.7. Donde α_i representa el coeficiente de absorción acústica medido en el laboratorio a la frecuencia i -ésima, y $\hat{\alpha}$ es el correspondiente coeficiente de absorción acústica estimado.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \hat{\alpha}_i)^2 \quad [4.7]$$

Sin embargo, para disminuir la función del error, e igualarla a cero, es necesario derivarla parcialmente respecto de los coeficientes:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial C_j} = 2 \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \hat{\alpha}_i) \frac{\partial \hat{\alpha}_i}{\partial C_j} = 0 \quad j = 1, \dots, 8 \quad [4.8]$$

Para encontrar los ocho coeficientes que satisfacen la igualdad, se hace uso de la herramienta computacional de Matlab, para implementar el método de Nelder-Mead [22].

En el Anexo-III se incluye el código en Matlab que calcula los coeficientes de cada material, a partir de los coeficientes de absorción y las resistencias al flujo de aire correspondientes, así como de los coeficientes predictores de otros materiales y autores [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], como se observa en la Tabla 1.1 y Tabla 1.2, utilizados como valores iniciales de entrada, para evaluar las ecuaciones descritas con anterioridad en éste capítulo, y lograr converger en los coeficientes buscados.

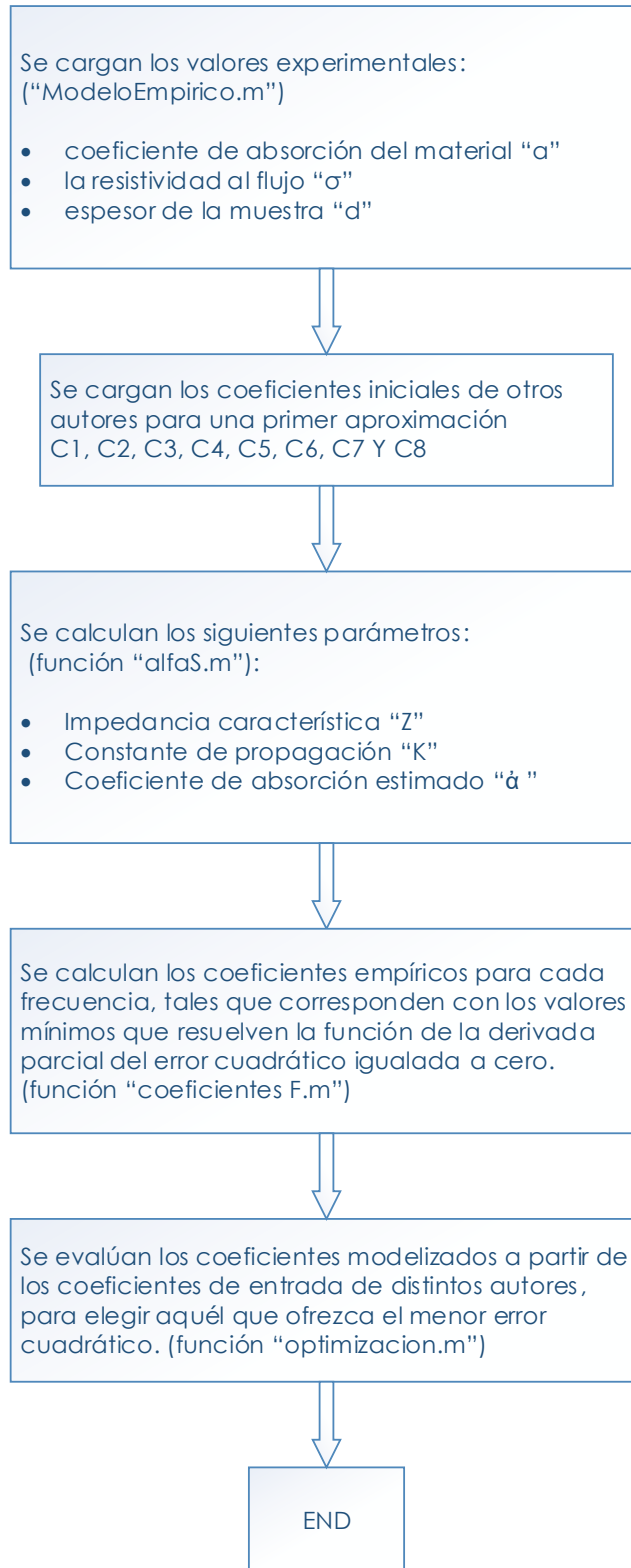
En la página siguiente se encuentra el diagrama a bloques que describe el funcionamiento del código en manera general.

Una vez que se obtienen los coeficientes, es posible calcular el error relativo de predicción [14] que describe cuantitativamente las variaciones entre el modelo empírico y los coeficientes de absorción medidos.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{\alpha}_i - \alpha_i|}{\alpha_i} \quad [4.9]$$

Donde α_i representa el coeficiente de absorción acústica medido, $\hat{\alpha}$ es el correspondiente coeficiente de absorción acústica estimado y N es el número de pruebas; en el desarrollo de este trabajo se han realizado 3 mediciones por muestra, por tanto N=3.

4.2. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado



4.3. Fibras termoconformadas

Los valores de los coeficientes predictores para cada uno de los cuatro materiales termoconformados se muestran en la Tabla 4.1:

Material	Coeficientes del modelo empírico							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Coco	0.1647	-0.5795	-0.0140	-0.5708	0.0418	-0.6806	0.0687	-0.5736
Kenaf	0.0016	-2.3558	0.4366	-1.0075	0.0639	-1.5041	-0.5623	-0.4703
Sisal Blanco	0.0017	-2.7756	0.3660	-1.3567	0.2754	-1.6777	-0.9287	2.6634
Sisal Café	0.1314	-1.7464	2.1630	-0.9528	1.2927	-1.4341	-0.0693	-1.9789

Tabla 4.1 Valores de los coeficientes del modelo predictivo para las muestras termoconformadas

En las figuras siguientes, se muestra la comparación entre el coeficiente de absorción acústica medido y el coeficiente de absorción acústica estimado a partir de los coeficientes de la Tabla 4.1; además se incluye la gráfica del error relativo por frecuencia para cada material.

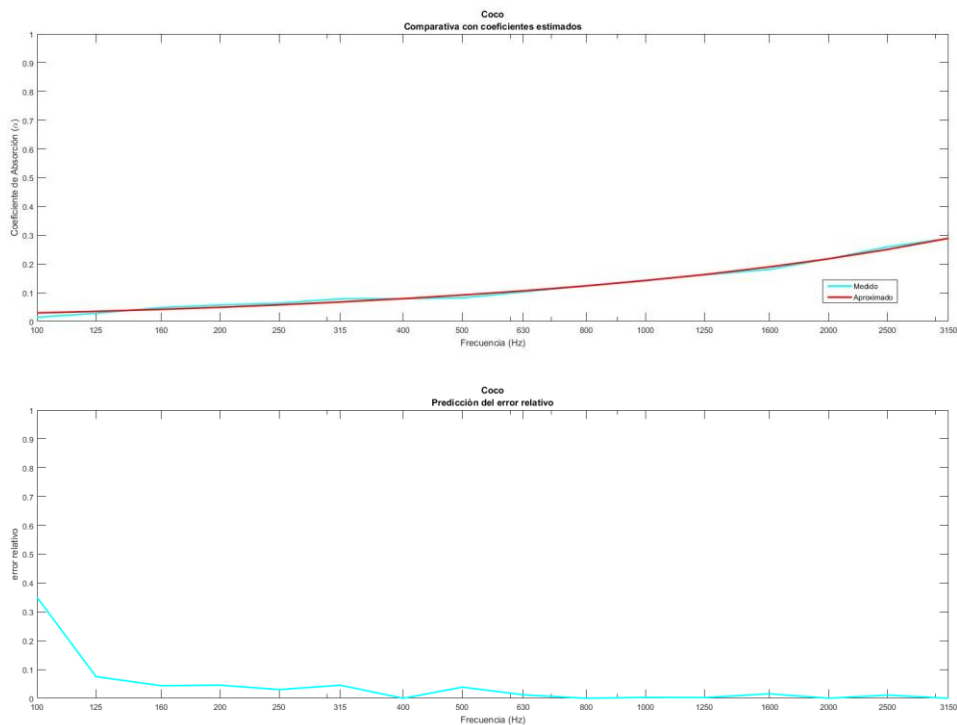


Figura 4.1 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el coco y su error relativo

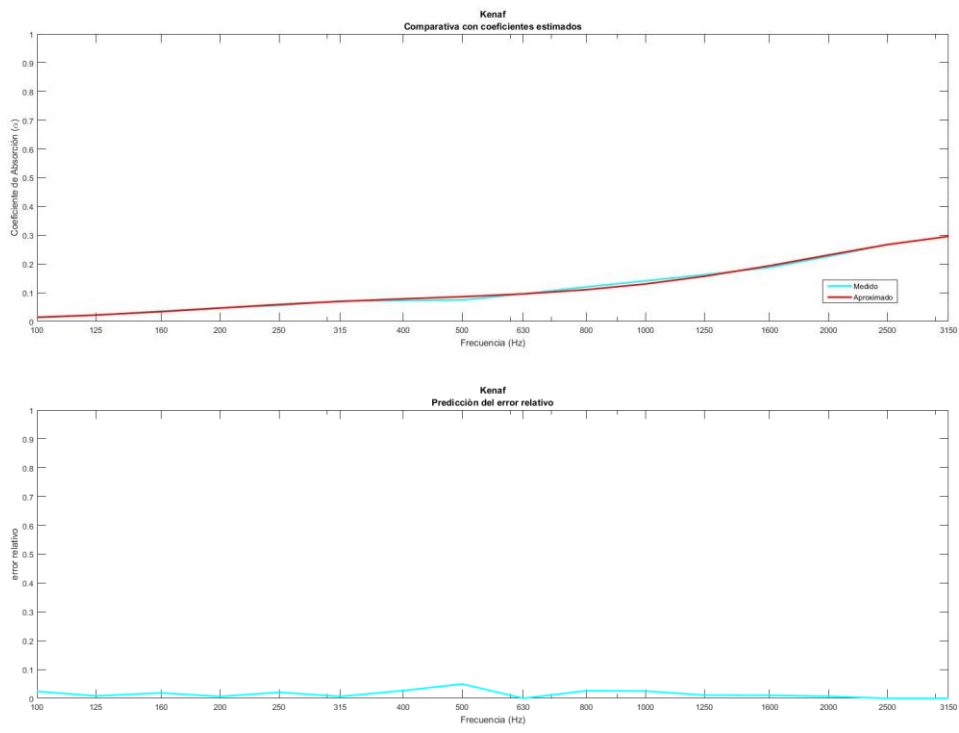


Figura 4.2 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el kenaf y su error relativo

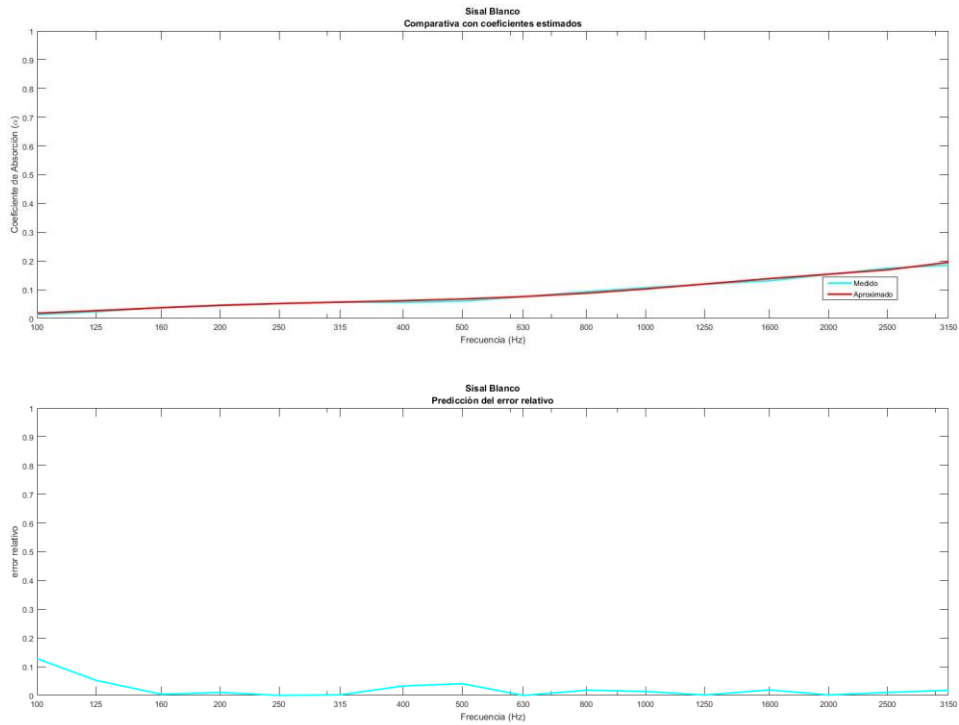


Figura 4.3 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el sisal blanco y su error relativo

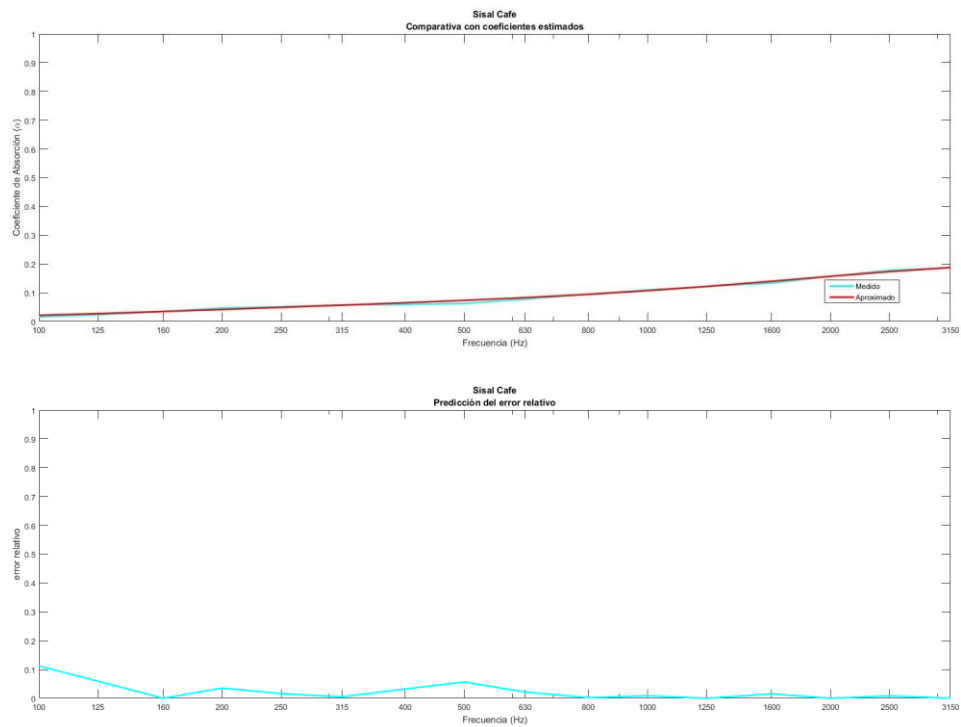


Figura 4. 4 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el sisal café y su error relativo

4.4. Esparto

Los valores de los coeficientes predictores para cada una de las seis variantes de esparto se muestran en la Tabla 4.2:

Material	Coeficientes del modelo empírico							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Esparto Verde	0.1359	0.1610	0.0650	-0.4014	0.1113	-0.5323	0.1534	-0.6343
Esparto Seco	0.2355	-0.7769	0.0678	-0.2371	0.1037	-0.5181	-0.0045	-2.2924
Esparto Cocido	0.1428	-1.0040	0.0974	-0.3971	0.1287	-0.5868	0.0735	-0.3614
Esparto Cocido Picado	0.4467	-1.0452	-0.0060	2.5556	0.1414	-0.3590	0.0897	0.2663
Esparto Estopa	1.8063	-0.0394	-0.1489	0.7933	0.3881	-0.0067	-0.6880	1.2494
Esparto Estopa Glue	1.0655	1.1523	-0.5478	1.4569	0.2682	0.4418	0.1590	-0.0310

Tabla 4. 2 Valores de los coeficientes del modelo predictivo para las muestras de esparto

En las figuras siguientes, se muestra la comparación entre el coeficiente de absorción acústico medido y el coeficiente de absorción acústica estimado a partir de los coeficientes de la Tabla 4.2; además se incluye la gráfica del error relativo por frecuencia para cada material.

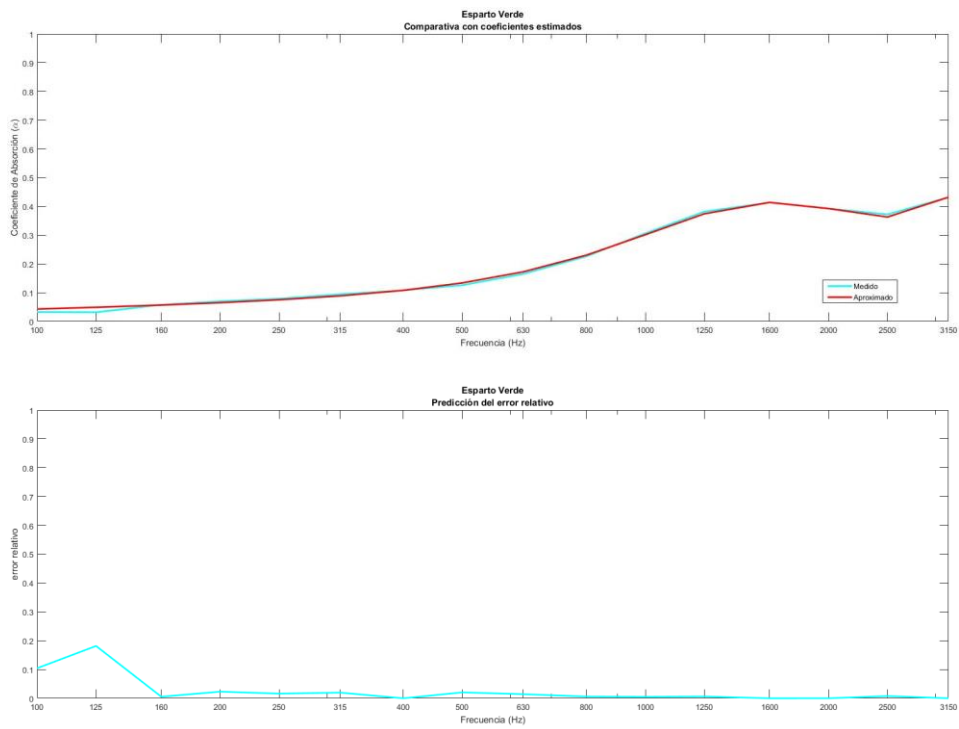


Figura 4.5 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto verde y su error relativo

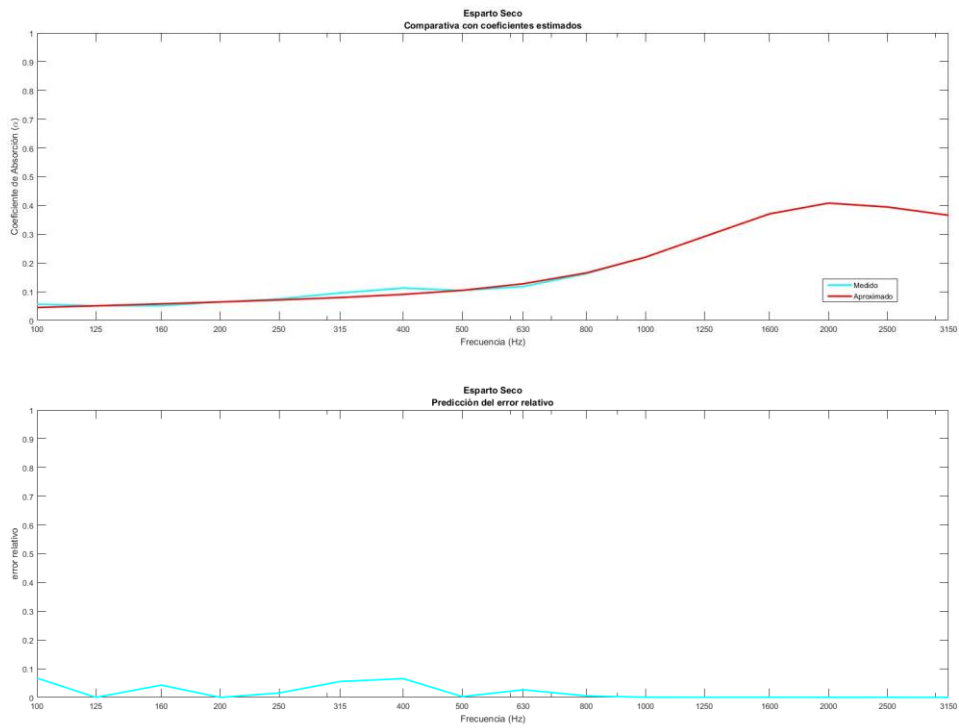


Figura 4.6 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto seco y su error relativo

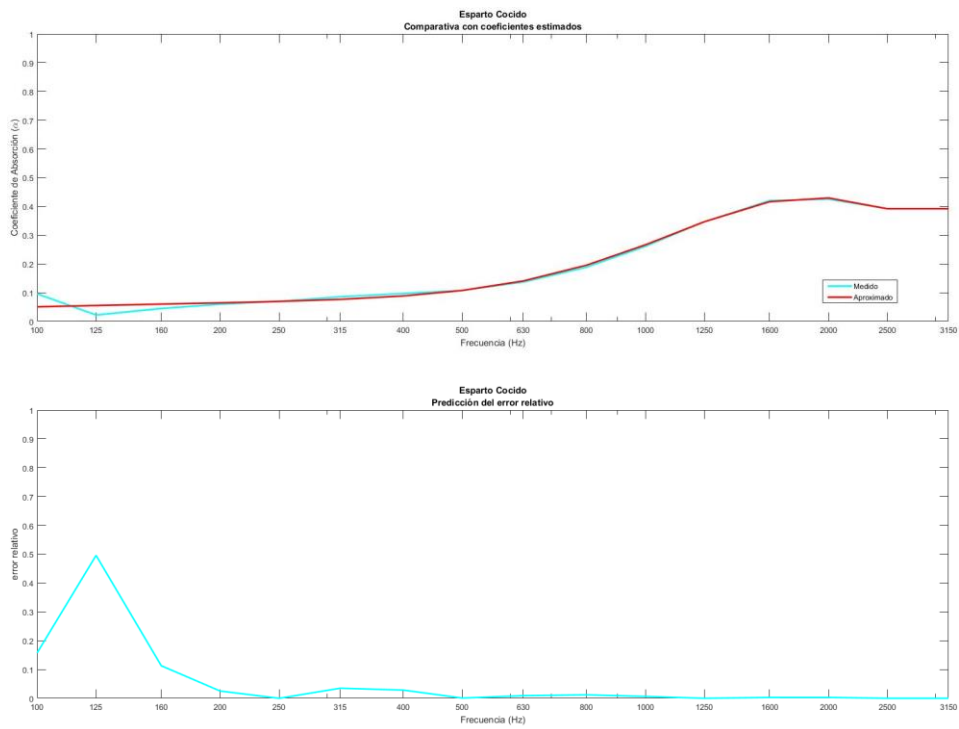


Figura 4. 7 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto cocido y su error relativo

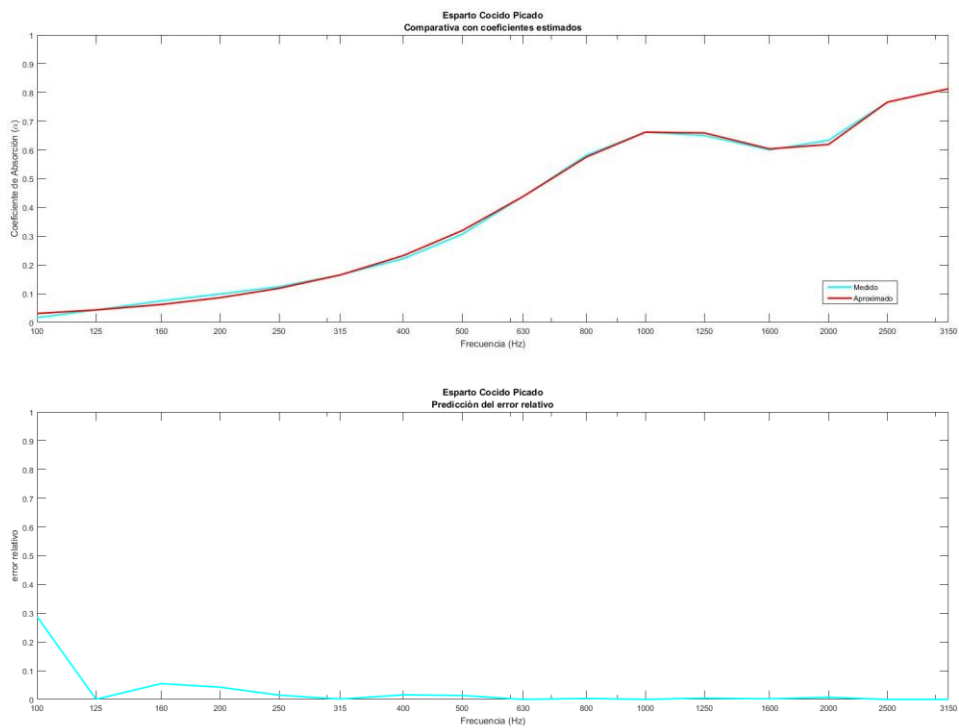


Figura 4. 8 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto cocido picado y su error relativo

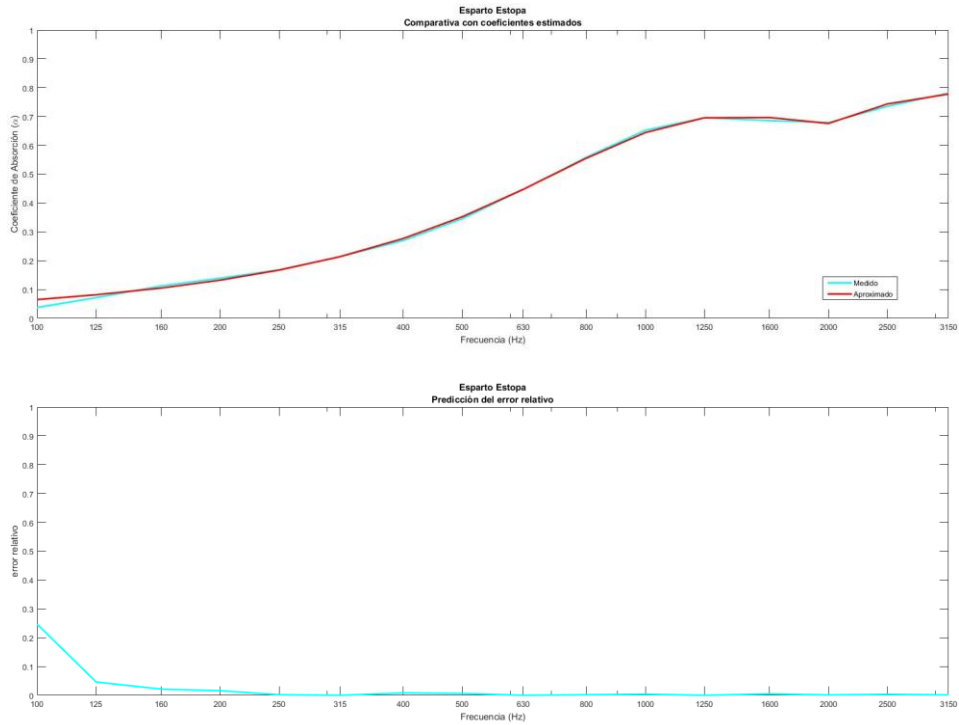


Figura 4. 9 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto estopa y su error relativo

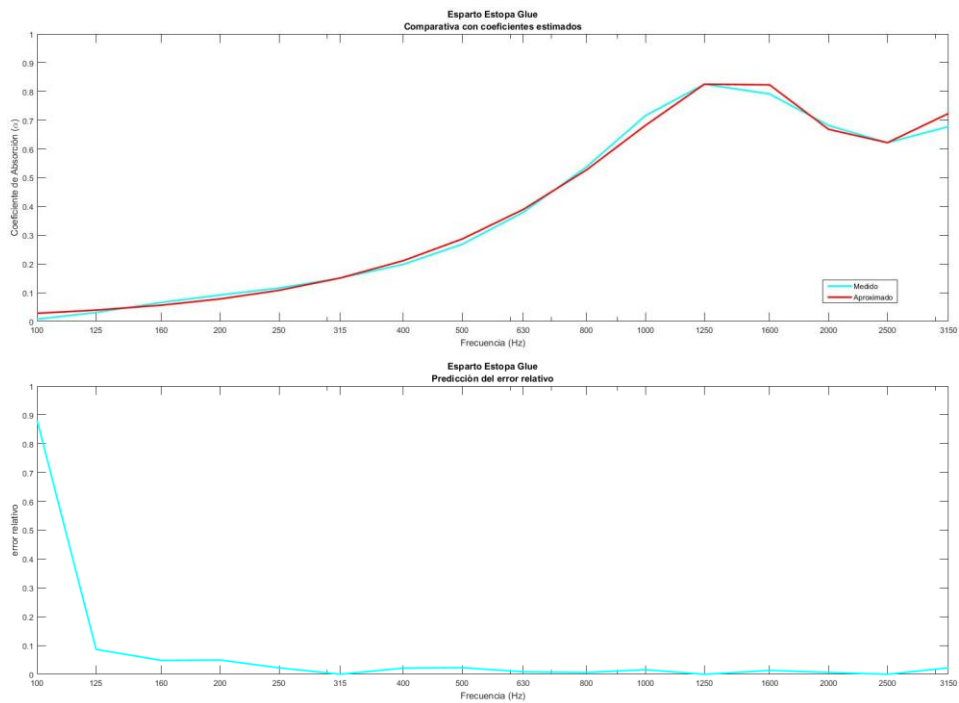


Figura 4. 10 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto estopa glue y su error relativo

Frecuencia [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Coco	3.50E-01	7.50E-02	4.36E-02	4.55E-02	3.01E-02	4.53E-02	1.55E-10	3.87E-02	1.21E-02	1.10E-10	3.19E-03	2.47E-03	1.55E-02	2.40E-04	1.12E-02	1.76E-11
Kenaf	2.40E-02	8.38E-03	1.87E-02	6.47E-03	2.08E-02	6.56E-03	2.67E-02	4.97E-02	3.77E-10	2.63E-02	2.51E-02	1.12E-02	1.07E-02	6.90E-03	3.63E-11	2.35E-10
Sisal Blanco	1.28E-01	5.21E-02	3.83E-03	1.03E-02	1.31E-05	2.11E-03	3.28E-02	4.05E-02	4.03E-07	1.82E-02	1.36E-02	1.48E-03	1.89E-02	1.69E-03	1.03E-02	1.75E-02
Sisal Café	1.12E-01	5.92E-02	1.03E-04	3.54E-02	1.61E-02	5.05E-03	3.25E-02	5.63E-02	2.16E-02	2.30E-03	8.90E-03	9.26E-05	1.53E-02	6.89E-05	8.63E-03	9.91E-09
Promedio	0.1533	0.0487	0.0166	0.0244	0.0168	0.0148	0.0230	0.0463	0.0084	0.0117	0.0127	0.0038	0.0151	0.0022	0.0075	0.0044

Tabla 4. 3 Error relativo de predicción para fibras orgánicas termoconformadas

Frecuencia [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Esparto Verde	1.04E-01	1.82E-01	5.49E-03	2.30E-02	1.63E-02	1.97E-02	2.91E-05	2.05E-02	1.42E-02	6.14E-03	5.11E-03	6.36E-03	5.54E-08	9.30E-05	7.89E-03	6.74E-05
Esparto Seco	6.67E-02	3.00E-05	4.27E-02	3.90E-07	1.53E-02	5.53E-02	6.51E-02	2.80E-03	2.64E-02	5.30E-03	5.42E-04	4.37E-04	5.00E-04	2.51E-04	3.29E-04	5.01E-07
Esparto Cocido	1.57E-01	4.96E-01	1.13E-01	2.51E-02	7.53E-08	3.49E-02	2.84E-02	8.04E-04	9.19E-03	1.20E-02	6.52E-03	3.07E-12	2.96E-03	3.05E-03	3.64E-12	9.84E-11
Esparto Cocido Picado	2.88E-01	5.52E-04	5.49E-02	4.24E-02	1.47E-02	1.21E-03	1.58E-02	1.36E-02	4.30E-11	3.49E-03	1.06E-11	4.48E-03	1.96E-03	7.48E-03	4.16E-11	7.24E-12
Esparto Estopa	2.46E-01	4.61E-02	2.13E-02	1.59E-02	1.99E-03	2.09E-06	8.52E-03	6.69E-03	6.14E-06	2.01E-03	4.02E-03	6.39E-07	5.16E-03	1.33E-03	3.64E-03	1.37E-03
Esparto Estopa Glue	8.81E-01	8.64E-02	4.82E-02	4.94E-02	2.22E-02	1.71E-04	2.15E-02	2.28E-02	8.56E-03	6.42E-03	1.58E-02	1.55E-05	1.33E-02	6.48E-03	3.40E-05	2.25E-02
Promedio	0.2906	0.1350	0.0476	0.0260	0.0118	0.0185	0.0232	0.0112	0.0097	0.0059	0.0053	0.0019	0.0040	0.0031	0.0020	0.0040

Tabla 4. 4 Error relativo de predicción para las variantes de esparto

Puesto que el error relativo de predicción depende de la frecuencia, es posible observar a partir de los valores obtenidos de la Tabla 4.3 que, para las fibras termoconformadas, hay un máximo error relativo promedio del 15% a los 100Hz; mientras que el máximo error relativo promedio para los diferentes tipos de esparto analizados, Tabla 4.4, se halla al 29% también en 100Hz. Sin embargo, para el resto de frecuencias, el error relativo promedio para las muestras termoconformadas y los tipos de esparto es del 1.7% y 2% respectivamente. Por tanto, se considera que los coeficientes predictores han sido calculados con adecuada aproximación al comportamiento empírico de los materiales analizados.

Capítulo 5 Análisis de resultados

Cuando se comparan los coeficientes de absorción acústica de las distintas variantes de esparto, Figura 5.1, es posible observar que el esparto estopa es la muestra con mejores valores para considerarse un adecuado material absorbente en frecuencias medias principalmente.

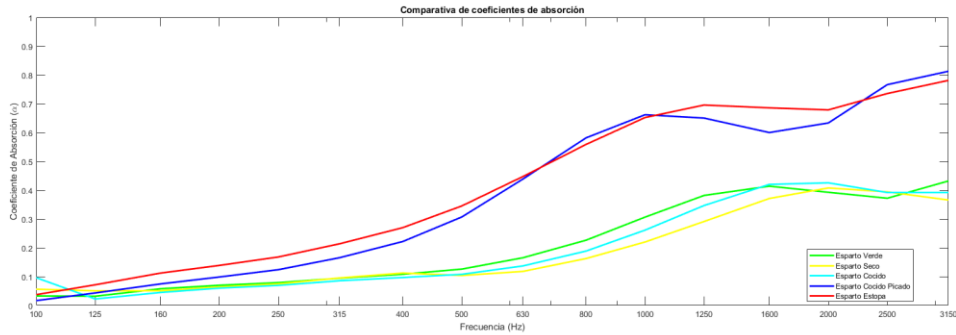


Figura 5. 1 Comparativa del coeficiente de absorción acústica de los distintos tipos de esparto

Razón por la cual, se eligió el esparto estopa para preparar una muestra con aglutinante orgánico, y evaluar sus características acústicas para contrastarlas con las muestras elaboradas con fibras termoconformadas. En la Figura 5.2, se muestra que la nueva variante de esparto estopa Glue, ofrece una mejora entre 1 kHz y 2 kHz, debido al aumento en la resistencia al flujo de aire (Tabla 3.2) originado por la reducción de los poros entre las fibras del material al añadirle el pegamento.

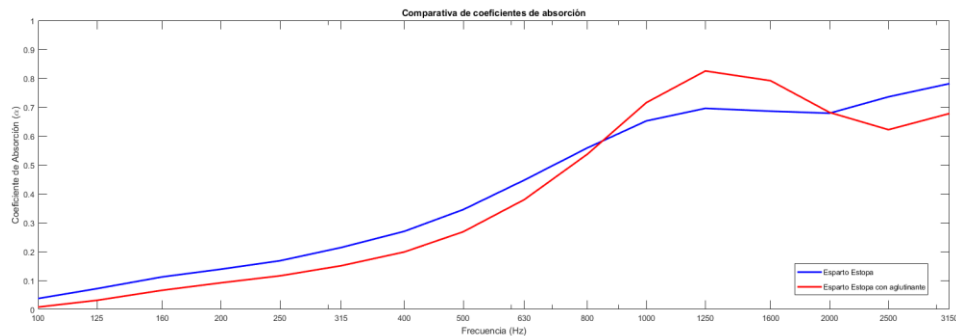


Figura 5. 2 Comparativa del coeficiente de absorción acústica entre el esparto estopa con pegamento orgánico y el esparto estopa en modo silvestre

Debido a la obtención de los coeficientes predictivos de los distintos materiales evaluados, es posible calcular el coeficiente de absorción acústica, por ejemplo, del esparto estopa Glue con un espesor semejante a las muestras con fibras termoconformadas y compararlos de esta forma, bajo un factor en similitud.

En la Figura 5.3 se visualizan las gráficas de los coeficientes de absorción estimados para las muestras de coco y esparto estopa Glue, simulados con un espesor de 0.8 cm para compararlos con los coeficientes de absorción medidos de las muestras de kenaf, sisal blanco y sisal café.

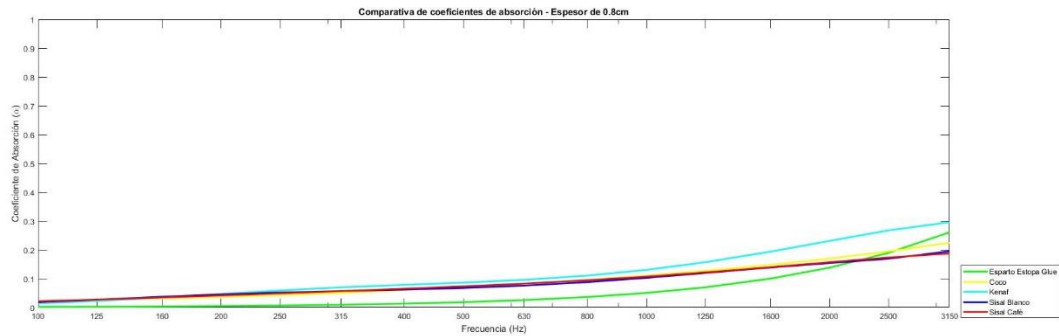


Figura 5.3 Coeficientes de absorción acústica para muestras con 0.8 cm de espesor

En un ambiente virtualmente en igualdad del tamaño de muestra, que permite conservar las características acústicas intrínsecas del material, se observa que el kenaf posee el coeficiente de absorción acústica más elevado entre todas las muestras contrastadas.

Sin embargo, al simular los coeficientes de absorción acústica para el kenaf, sisal blanco y sisal café con un espesor de muestra de 1.2 cm, se distingue que el esparto estopa Glue comienza a tener un incremento en la absorción acústica.

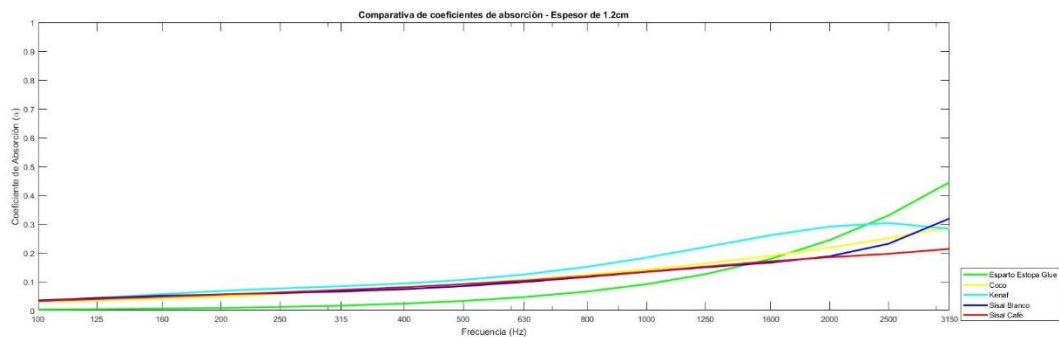


Figura 5.4 Coeficientes de absorción acústica para muestras con 1.2 cm de espesor

En el caso de comparar las muestras de esparto estopa Glue, sisal blanco, sisal café, coco [17] y kenaf [18] con un espesor virtual de 5 cm, se puede constatar que el esparto estopa comienza a mejorar considerablemente su absorción acústica.

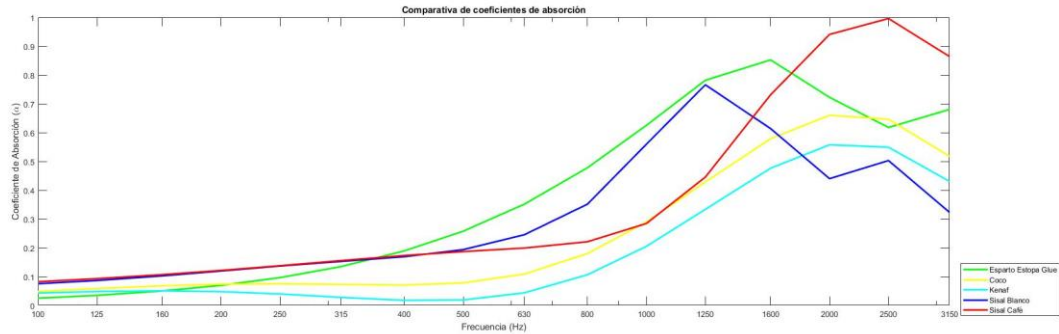


Figura 5.5 Coeficientes de absorción acústica para muestras con 5 cm de espesor

Con lo cual, se puede comprobar que el esparto es un material natural que ofrece propiedades acústicas comparables con aquellos materiales orgánicos que ya están siendo estudiados por varios autores [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], ver Tablas 1.1 y 1.2 del Capítulo 1.

5.1. Conclusiones

Se ha comprobado en el presente trabajo que, así como otros autores [23,24,25], en la fabricación de un nuevo panel acústico absorbente, el aglutinante es un factor decisivo para garantizar un adecuado desempeño acústico; y en el caso de un panel acústico elaborado a partir de fibras orgánicas, es imperativo que el pegamento también posea una cualidad equivalente, sin componentes sintéticos, apto de mantener la sostenibilidad del mismo.

De las fibras orgánicas analizadas en éste trabajo, a pesar que el sisal café posee el coeficiente de absorción acústica más alto, aproximadamente en el intervalo de los 1.7 kHz y 3.15 kHz, el esparto estopa Glue logra los niveles más altos de absorción para un mayor intervalo de frecuencias que van de 350 Hz a 1.7 kHz aproximadamente.

5.2. Trabajos futuros

Aún existe una amplia investigación para obtener el pegamento más óptimo, dependiendo de las fibras orgánicas del material, que permita mantener o mejorar sus propiedades acústicas. Y aunque se utilicen técnicas como la termofusión, se deberán comprobar nuevamente todos los parámetros acústicos descritos en éste trabajo.

Ya que existen tratamientos que pueden añadirse a los materiales, ya sea para evitar la proliferación hongos producidos por la humedad, o para evitar la generación y expansión de las llamas en caso de incendio; es importante evaluar los cambios en las propiedades acústicas que se produzcan en las fibras orgánicas al agregar dichos tratamientos, necesarios para garantizar un producto con una vida útil adecuada que cumpla requerimientos mínimos de seguridad.

Referencias

- [1] Baillie Caroline. (2010): "Green composites Polymer composites and the environment", Cambridge, England, Woodhead Publishing Limited, pp 49,185.
- [2] https://www.agro.uba.ar/catedras/cul_indus/galeria/kenaf Última consulta 04 de Setiembre de 2018.
- [3] Franck, R. (2005): "Bast and other plant fibres", Cambridge, England, Woodhead Publishing Limited, pp 56.
- [4] <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/es/> Última consulta 04 de Setiembre de 2018.
- [5] <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/coir/es/> Última consulta 04 de Setiembre de 2018.
- [6] Espartos Albarracín S.L. Murcia, España. (2018). "Ficha Técnica".
- [7] UNE-EN ISO 10534-2:2002: Acústica. "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia", parte 2, "Método de la función de transferencia". (ISO 10534-2:1998).
- [8] Ingard K.U., Dear T.A. (1985), "Measurement of acoustic flow resistance", Journal of Sound and Vibration, 103, 4, pp567–572.
- [9] UNE-EN ISO 12354-6:2004: Acústica de la edificación. "Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos", parte 6, "Absorción sonora en espacios cerrados". (ISO 12354-6:2003).
- [10] Delany M.E., Bazley E.N. (1970), "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", Applied Acoustics, 3, pp 105–116.
- [11] Dunn I.P., Davern W.A. (1986), "Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers", Applied Acoustics, 19, pp 321-334.
- [12] Garai M., Pompoli F. (2005): "A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications", Applied Acoustics, 66, pp 1383-1398.
- [13] Voronina N. (1994), "Acoustic Properties of Fibrous Materials", Applied Acoustics, 42, pp 165-174.
- [14] Oliva D., Hongisto V. (2013), "Sound absorption of porous materials – Accuracy of predictions methods", Applied Acoustics, 74, pp 1473–1479.

- [15] Berardi U., Iannace G. (2015), "Determination through an inverse method of the acoustic impedance and the propagation constant for some natural fibers", *Internoise 2015*, San Francisco, California, U.S.A., 9-12 Agosto de 2015.
- [16] Arenas J., Rebolledo J., del Rey R., Alba J. (2014): "Sound Absorption Properties of Unbleached Cellulose Loose-Fill Insulation Material". *BioResources* 9, 4, pp 6227-6240.
- [17] Ramis J., Godinho L., Del Rey R., Alba J. Carbajo V. (2012): "Un modelo para materiales absorbentes acústicos derivados de la fibra de coco". Octavo Congreso Ibero-americano de Acústica. Évora-Portugal, 1-3 octubre de 2012.
- [18] Ramis J., Alba J., Del Rey R., Escuder E., Sanchís V. (2009): "Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf", *Materiales de Construcción*, Vol.60, 299, pp 133-143.
- [19] Brüel&Kjær: "System Data. Hardware configurations for PULSE, types 3560-B, 3560-C and 3560-E".
- [20] <http://www.muciza.com.mx/project/pegamento-casero/> Última consulta 02 de Septiembre de 2018.
- [21] UNE-EN ISO 29053:1993: Acústica. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo de aire. (ISO 9053:1991).
- [22] Mathews J.H., Fink K. (2004), "Numerical Methods using MATLAB", New Jersey, U.S.A., Prentice Hall Inc. pp 430-436.
- [23] Berardi U., Iannace G. (2015), "Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications", *Building and Environment*, (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029>
- [24] Martellotta F., Cannavale A. De Matteis V., Ayr U. (2018), "Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder", *Applied Acoustics*, 141, pp 71-78.
- [25] Arenas J.P., Asdrubali F. (2018), "Eco-Materials with Noise Reduction Properties", *Handbook of Ecomaterials*, Springer International Publishing A.G., https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_137-1

ANEXO I - Coeficiente de absorción acústica

Coco		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Muestra1	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.17087832	20	0.17087832	20	0.17087832	20	0.17393385
25	0.12740905	25	0.12740905	25	0.12740905	25	0.11933028
31.5	0.09169965	31.5	0.09169965	31.5	0.09169965	31.5	0.09611496
40	0.05249113	40	0.05249113	40	0.05249113	40	0.06755522
50	0.02698727	50	0.02698727	50	0.02698727	50	0.04552187
63	0.0080234	63	0.0080234	63	0.0080234	63	0.02418095
80	0.00474987	80	0.00474987	80	0.00474987	80	0.00982023
100	0.01631151	100	0.01631151	100	0.01631151	100	0.01436505
125	0.02648108	125	0.02648108	125	0.02648108	125	0.02843932
160	0.04001633	160	0.04001633	160	0.04001633	160	0.0481044
200	0.05044961	200	0.05044961	200	0.05044961	200	0.05688139
250	0.05943589	250	0.05943589	250	0.05943589	250	0.06320468
315	0.07459925	315	0.07459925	315	0.07459925	315	0.07804338
400	0.07662446	400	0.07662446	400	0.07662446	400	0.07918148
500	0.08044679	500	0.08044679	500	0.08044679	500	0.08214551
630	0.10000387	630	0.10000387	630	0.10000387	630	0.10261471
800	0.12071683	800	0.12071683	800	0.12071683	800	0.12361715
1000	0.14027072	1000	0.14027072	1000	0.14027072	1000	0.14335086
1250	0.1590665	1250	0.1590665	1250	0.1590665	1250	0.16168567
1600	0.1804406	1600	0.1804406	1600	0.1804406	1600	0.18114262
2000	0.21715237	2000	0.21715237	2000	0.21715237	2000	0.21785214
2500	0.25615447	2500	0.25615447	2500	0.25615447	2500	0.25897131
3150	0.28866248	3150	0.28866248	3150	0.28866248	3150	0.28903731
4000	0.22848115	4000	0.22848115	4000	0.22848115	4000	0.23625354
5000	0.17019525	5000	0.17019525	5000	0.17019525	5000	0.18609321

Kenaf		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Muestra1	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.09072364	20	0.09072364	20	0.09072364	20	0.04490497
25	0.03403872	25	0.03403872	25	0.03403872	25	0.01806575
31.5	0.0171309	31.5	0.0171309	31.5	0.0171309	31.5	0.01084982
40	0.02304161	40	0.02304161	40	0.02304161	40	0.01103574
50	0.02537363	50	0.02537363	50	0.02537363	50	0.01058714
63	0.02346049	63	0.02346049	63	0.02346049	63	0.00892652
80	0.01676902	80	0.01676902	80	0.01676902	80	0.00867256
100	0.01824706	100	0.01824706	100	0.01824706	100	0.01334375
125	0.02591474	125	0.02591474	125	0.02591474	125	0.02159204
160	0.04133596	160	0.04133596	160	0.04133596	160	0.03587633
200	0.04973455	200	0.04973455	200	0.04973455	200	0.0472688
250	0.05713023	250	0.05713023	250	0.05713023	250	0.0552854
315	0.07193779	315	0.07193779	315	0.07193779	315	0.07094898
400	0.0723421	400	0.0723421	400	0.0723421	400	0.07248615
500	0.07520264	500	0.07520264	500	0.07520264	500	0.07470527
630	0.09566808	630	0.09566808	630	0.09566808	630	0.09560032
800	0.11951806	800	0.11951806	800	0.11951806	800	0.11979379
1000	0.13805279	1000	0.13805279	1000	0.13805279	1000	0.14079956
1250	0.15980821	1250	0.15980821	1250	0.15980821	1250	0.16221959
1600	0.18428851	1600	0.18428851	1600	0.18428851	1600	0.18751244
2000	0.22333942	2000	0.22333942	2000	0.22333942	2000	0.22617827
2500	0.26660816	2500	0.26660816	2500	0.26660816	2500	0.26726755
3150	0.29811046	3150	0.29811046	3150	0.29811046	3150	0.29564357
4000	0.23735241	4000	0.23735241	4000	0.23735241	4000	0.2356581
5000	0.18021573	5000	0.18021573	5000	0.18021573	5000	0.18094522

Sisal Blanco

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.61554571	20	0.61554571	20	0.61554571	20	0.29213833
25	0.57162257	25	0.57162257	25	0.57162257	25	0.23073716
31.5	0.51206578	31.5	0.51206578	31.5	0.51206578	31.5	0.20933998
40	0.40225795	40	0.40225795	40	0.40225795	40	0.16107552
50	0.28537774	50	0.28537774	50	0.28537774	50	0.10961572
63	0.14169698	63	0.14169698	63	0.14169698	63	0.05277853
80	0.03255577	80	0.03255577	80	0.03255577	80	0.01429601
100	0.01474606	100	0.01474606	100	0.01474606	100	0.01310097
125	0.01692998	125	0.01692998	125	0.01692998	125	0.02320341
160	0.02385321	160	0.02385321	160	0.02385321	160	0.03754903
200	0.03690865	200	0.03690865	200	0.03690865	200	0.04671341
250	0.04502911	250	0.04502911	250	0.04502911	250	0.05159286
315	0.05171872	315	0.05171872	315	0.05171872	315	0.05631238
400	0.05440641	400	0.05440641	400	0.05440641	400	0.05611193
500	0.05888971	500	0.05888971	500	0.05888971	500	0.06005276
630	0.07366444	630	0.07366444	630	0.07366444	630	0.07566779
800	0.09167943	800	0.09167943	800	0.09167943	800	0.09282061
1000	0.10677695	1000	0.10677695	1000	0.10677695	1000	0.1068044
1250	0.11870884	1250	0.11870884	1250	0.11870884	1250	0.11891166
1600	0.13573279	1600	0.13573279	1600	0.13573279	1600	0.13103593
2000	0.15815478	2000	0.15815478	2000	0.15815478	2000	0.152955
2500	0.17557563	2500	0.17557563	2500	0.17557563	2500	0.17438526
3150	0.18874722	3150	0.18874722	3150	0.18874722	3150	0.18520369
4000	0.16344043	4000	0.16344043	4000	0.16344043	4000	0.15841577
5000	0.13840309	5000	0.13840309	5000	0.13840309	5000	0.13483123

Sisal Café

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.22609884	20	0.22609884	20	0.22609884	20	0.29445731
25	0.1851031	25	0.1851031	25	0.1851031	25	0.23264995
31.5	0.12169515	31.5	0.12169515	31.5	0.12169515	31.5	0.17081776
40	0.04028767	40	0.04028767	40	0.04028767	40	0.09658815
50	0.01036261	50	0.01036261	50	0.01036261	50	0.05309686
63	0.00365384	63	0.00365384	63	0.00365384	63	0.02148845
80	0.00305371	80	0.00305371	80	0.00305371	80	0.01049896
100	0.01096359	100	0.01096359	100	0.01096359	100	0.01585914
125	0.02664997	125	0.02664997	125	0.02664997	125	0.02302969
160	0.04747327	160	0.04747327	160	0.04747327	160	0.03442954
200	0.05404946	200	0.05404946	200	0.05404946	200	0.04642035
250	0.05490843	250	0.05490843	250	0.05490843	250	0.05125386
315	0.05822341	315	0.05822341	315	0.05822341	315	0.05735167
400	0.05616193	400	0.05616193	400	0.05616193	400	0.05900117
500	0.05926824	500	0.05926824	500	0.05926824	500	0.06248647
630	0.07557674	630	0.07557674	630	0.07557674	630	0.07761876
800	0.09224084	800	0.09224084	800	0.09224084	800	0.09481288
1000	0.10758205	1000	0.10758205	1000	0.10758205	1000	0.10972873
1250	0.11965094	1250	0.11965094	1250	0.11965094	1250	0.121389
1600	0.12617227	1600	0.12617227	1600	0.12617227	1600	0.13345485
2000	0.14927976	2000	0.14927976	2000	0.14927976	2000	0.15681525
2500	0.17629922	2500	0.17629922	2500	0.17629922	2500	0.17769664
3150	0.1831908	3150	0.1831908	3150	0.1831908	3150	0.18730521
4000	0.15407973	4000	0.15407973	4000	0.15407973	4000	0.14455584
5000	0.1325066	5000	0.1325066	5000	0.1325066	5000	0.1086778

Esparto Verde

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.08473298	20	0.08473298	20	0.08473298	20	5.26408071
25	0.06733686	25	0.06733686	25	0.06733686	25	4.17885432
31.5	0.05250907	31.5	0.05250907	31.5	0.05250907	31.5	3.25353673
40	0.03506159	40	0.03506159	40	0.03506159	40	2.16435741
50	0.02225421	50	0.02225421	50	0.02225421	50	1.36481082
63	0.01037143	63	0.01037143	63	0.01037143	63	0.62363087
80	0.00264934	80	0.00264934	80	0.00264934	80	0.14694143
100	0.01007981	100	0.01007981	100	0.01007981	100	0.03275598
125	0.03127656	125	0.03127656	125	0.03127656	125	0.03177754
160	0.05820839	160	0.05820839	160	0.05820839	160	0.05774826
200	0.07021861	200	0.07021861	200	0.07021861	200	0.06989751
250	0.07711525	250	0.07711525	250	0.07711525	250	0.07908812
315	0.09113306	315	0.09113306	315	0.09113306	315	0.09435994
400	0.1036157	400	0.1036157	400	0.1036157	400	0.10806336
500	0.11873481	500	0.11873481	500	0.11873481	500	0.12596858
630	0.15320681	630	0.15320681	630	0.15320681	630	0.16535348
800	0.20590196	800	0.20590196	800	0.20590196	800	0.22632005
1000	0.27622893	1000	0.27622893	1000	0.27622893	1000	0.30646269
1250	0.35153581	1250	0.35153581	1250	0.35153581	1250	0.38169413
1600	0.40233198	1600	0.40233198	1600	0.40233198	1600	0.41391623
2000	0.39040182	2000	0.39040182	2000	0.39040182	2000	0.39265107
2500	0.35900814	2500	0.35900814	2500	0.35900814	2500	0.37197295
3150	0.38724346	3150	0.38724346	3150	0.38724346	3150	0.43195948
4000	0.26387792	4000	0.26387792	4000	0.26387792	4000	0.31028279
5000	0.1440964	5000	0.1440964	5000	0.1440964	5000	0.17792566

Esparto Seco

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	-0.82043328	20	-0.82043328	20	-0.82043328	20	0.03897616
25	-0.53375702	25	-0.53375702	25	-0.53375702	25	0.0805347
31.5	-0.25572254	31.5	-0.25572254	31.5	-0.25572254	31.5	0.12553533
40	0.14150618	40	0.14150618	40	0.14150618	40	0.19868124
50	0.35224369	50	0.35224369	50	0.35224369	50	0.22218094
63	0.31533689	63	0.31533689	63	0.31533689	63	0.16259932
80	0.16868453	80	0.16868453	80	0.16868453	80	0.07680962
100	0.13185184	100	0.13185184	100	0.13185184	100	0.05614565
125	0.09584162	125	0.09584162	125	0.09584162	125	0.05068109
160	0.06411363	160	0.06411363	160	0.06411363	160	0.05097509
200	0.08166164	200	0.08166164	200	0.08166164	200	0.06405994
250	0.09475946	250	0.09475946	250	0.09475946	250	0.07458747
315	0.13750092	315	0.13750092	315	0.13750092	315	0.09536582
400	0.16924798	400	0.16924798	400	0.16924798	400	0.11236664
500	0.12168052	500	0.12168052	500	0.12168052	500	0.10378344
630	0.11176565	630	0.11176565	630	0.11176565	630	0.11795639
800	0.15732639	800	0.15732639	800	0.15732639	800	0.1626338
1000	0.21323922	1000	0.21323922	1000	0.21323922	1000	0.22007334
1250	0.27664654	1250	0.27664654	1250	0.27664654	1250	0.29123468
1600	0.34918015	1600	0.34918015	1600	0.34918015	1600	0.37113094
2000	0.40053006	2000	0.40053006	2000	0.40053006	2000	0.40769656
2500	0.39939637	2500	0.39939637	2500	0.39939637	2500	0.3941031
3150	0.35871756	3150	0.35871756	3150	0.35871756	3150	0.36582426
4000	0.2756161	4000	0.2756161	4000	0.2756161	4000	0.2645504
5000	0.22669328	5000	0.22669328	5000	0.22669328	5000	0.1934294

Esparto Cocido

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.01373185	20	0.01373185	20	0.01373185	20	7.02554356
25	0.01195554	25	0.01195554	25	0.01195554	25	5.74492165
31.5	0.01040785	31.5	0.01040785	31.5	0.01040785	31.5	4.62978027
40	0.00851986	40	0.00851986	40	0.00851986	40	3.27093284
50	0.0070615	50	0.0070615	50	0.0070615	50	2.22312876
63	0.00561366	63	0.00561366	63	0.00561366	63	1.18566067
80	0.00447982	80	0.00447982	80	0.00447982	80	0.38123003
100	0.00561656	100	0.00561656	100	0.00561656	100	0.09613498
125	0.01743685	125	0.01743685	125	0.01743685	125	0.02224107
160	0.04390877	160	0.04390877	160	0.04390877	160	0.04490821
200	0.06036559	200	0.06036559	200	0.06036559	200	0.05995253
250	0.07273684	250	0.07273684	250	0.07273684	250	0.06948056
315	0.09060147	315	0.09060147	315	0.09060147	315	0.08558487
400	0.10167697	400	0.10167697	400	0.10167697	400	0.09682393
500	0.11609213	500	0.11609213	500	0.11609213	500	0.10786892
630	0.15196535	630	0.15196535	630	0.15196535	630	0.13696896
800	0.2134986	800	0.2134986	800	0.2134986	800	0.18857962
1000	0.30028012	1000	0.30028012	1000	0.30028012	1000	0.26129121
1250	0.39579517	1250	0.39579517	1250	0.39579517	1250	0.34669428
1600	0.45711653	1600	0.45711653	1600	0.45711653	1600	0.42006775
2000	0.43887567	2000	0.43887567	2000	0.43887567	2000	0.42551694
2500	0.39827984	2500	0.39827984	2500	0.39827984	2500	0.39185939
3150	0.42384392	3150	0.42384392	3150	0.42384392	3150	0.39194959
4000	0.29145381	4000	0.29145381	4000	0.29145381	4000	0.28536779
5000	0.16493815	5000	0.16493815	5000	0.16493815	5000	0.19211869

Esparto cocido picado

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.58438873	20	0.58438873	20	0.58438873	20	1.44934607
25	0.46031867	25	0.46031867	25	0.46031867	25	1.06235363
31.5	0.3541593	31.5	0.3541593	31.5	0.3541593	31.5	0.7495747
40	0.22885031	40	0.22885031	40	0.22885031	40	0.41414956
50	0.13710749	50	0.13710749	50	0.13710749	50	0.20116338
63	0.05349972	63	0.05349972	63	0.05349972	63	0.04319194
80	0.00862507	80	0.00862507	80	0.00862507	80	0.00168484
100	0.01704385	100	0.01704385	100	0.01704385	100	0.0166169
125	0.0467851	125	0.0467851	125	0.0467851	125	0.04320423
160	0.08477217	160	0.08477217	160	0.08477217	160	0.07455722
200	0.107216	200	0.107216	200	0.107216	200	0.0986172
250	0.13241961	250	0.13241961	250	0.13241961	250	0.1240657
315	0.17488151	315	0.17488151	315	0.17488151	315	0.16557052
400	0.23008458	400	0.23008458	400	0.23008458	400	0.22174898
500	0.31564635	500	0.31564635	500	0.31564635	500	0.30691101
630	0.44781865	630	0.44781865	630	0.44781865	630	0.43850214
800	0.59273354	800	0.59273354	800	0.59273354	800	0.58162883
1000	0.67040402	1000	0.67040402	1000	0.67040402	1000	0.66190552
1250	0.65612648	1250	0.65612648	1250	0.65612648	1250	0.65029659
1600	0.60578528	1600	0.60578528	1600	0.60578528	1600	0.60007483
2000	0.64265734	2000	0.64265734	2000	0.64265734	2000	0.63330914
2500	0.78569465	2500	0.78569465	2500	0.78569465	2500	0.76637238
3150	0.83484997	3150	0.83484997	3150	0.83484997	3150	0.81282857
4000	0.45278468	4000	0.45278468	4000	0.45278468	4000	0.46363902
5000	0.18461128	5000	0.18461128	5000	0.18461128	5000	0.2184377

Esparto Estopa

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.08298824	20	0.08298824	20	0.08298824	20	0.07221895
25	0.07171069	25	0.07171069	25	0.07171069	25	0.05783925
31.5	0.06129714	31.5	0.06129714	31.5	0.06129714	31.5	0.0458179
40	0.04763616	40	0.04763616	40	0.04763616	40	0.03214663
50	0.03637848	50	0.03637848	50	0.03637848	50	0.0226352
63	0.02485698	63	0.02485698	63	0.02485698	63	0.01451373
80	0.02170267	80	0.02170267	80	0.02170267	80	0.01757888
100	0.03741359	100	0.03741359	100	0.03741359	100	0.03729719
125	0.07396114	125	0.07396114	125	0.07396114	125	0.07155245
160	0.11815967	160	0.11815967	160	0.11815967	160	0.1121364
200	0.14693339	200	0.14693339	200	0.14693339	200	0.13889342
250	0.17915471	250	0.17915471	250	0.17915471	250	0.16819269
315	0.23191869	315	0.23191869	315	0.23191869	315	0.21387566
400	0.29866993	400	0.29866993	400	0.29866993	400	0.26992963
500	0.38735722	500	0.38735722	500	0.38735722	500	0.34523436
630	0.50343138	630	0.50343138	630	0.50343138	630	0.44735478
800	0.62833105	800	0.62833105	800	0.62833105	800	0.55885143
1000	0.72212237	1000	0.72212237	1000	0.72212237	1000	0.65219431
1250	0.75070444	1250	0.75070444	1250	0.75070444	1250	0.695596
1600	0.71873864	1600	0.71873864	1600	0.71873864	1600	0.68579253
2000	0.69819994	2000	0.69819994	2000	0.69819994	2000	0.67871087
2500	0.7648903	2500	0.7648903	2500	0.7648903	2500	0.73551889
3150	0.84911273	3150	0.84911273	3150	0.84911273	3150	0.7811941
4000	0.52449281	4000	0.52449281	4000	0.52449281	4000	-0.43996389
5000	0.26006836	5000	0.26006836	5000	0.26006836	5000	-1.37414124

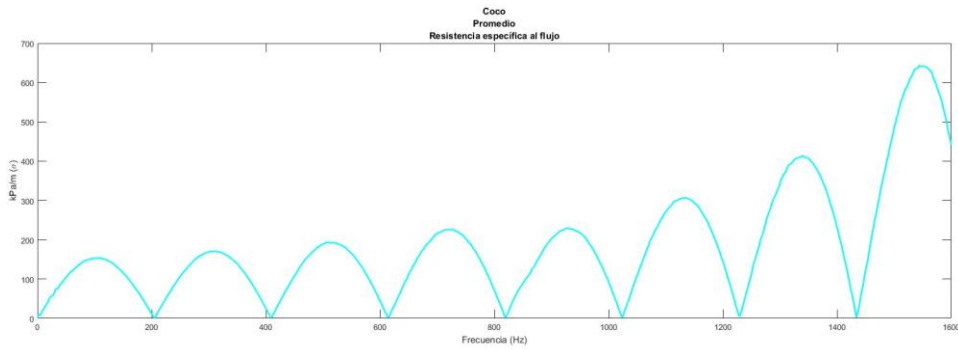
Esparto Estopa Glue

Muestra1		Muestra2		Muestra3		Promedio	
Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha	Hz	alpha
20	0.06655102	20	0.06655102	20	0.06655102	20	0.27305647
25	0.06050777	25	0.06050777	25	0.06050777	25	0.20816289
31.5	0.05480476	31.5	0.05480476	31.5	0.05480476	31.5	0.15375446
40	0.04698333	40	0.04698333	40	0.04698333	40	0.09169574
50	0.04001478	50	0.04001478	50	0.04001478	50	0.04853564
63	0.03190389	63	0.03190389	63	0.03190389	63	0.01210006
80	0.02306586	80	0.02306586	80	0.02306586	80	-0.00168383
100	0.0199601	100	0.0199601	100	0.0199601	100	0.00773024
125	0.03229508	125	0.03229508	125	0.03229508	125	0.03108694
160	0.06426747	160	0.06426747	160	0.06426747	160	0.06583541
200	0.08941805	200	0.08941805	200	0.08941805	200	0.09176222
250	0.11167471	250	0.11167471	250	0.11167471	250	0.1159211
315	0.14495756	315	0.14495756	315	0.14495756	315	0.1507898
400	0.19094027	400	0.19094027	400	0.19094027	400	0.19845209
500	0.25878445	500	0.25878445	500	0.25878445	500	0.26845257
630	0.36836313	630	0.36836313	630	0.36836313	630	0.37978772
800	0.52695208	800	0.52695208	800	0.52695208	800	0.53718383
1000	0.71537575	1000	0.71537575	1000	0.71537575	1000	0.71562911
1250	0.84059041	1250	0.84059041	1250	0.84059041	1250	0.82506917
1600	0.81360772	1600	0.81360772	1600	0.81360772	1600	0.79135066
2000	0.69856316	2000	0.69856316	2000	0.69856316	2000	0.6815777
2500	0.63142716	2500	0.63142716	2500	0.63142716	2500	0.62170534
3150	0.65385089	3150	0.65385089	3150	0.65385089	3150	0.67782843
4000	-0.54180302	4000	-0.54180302	4000	-0.54180302	4000	0.0174756
5000	-1.47503605	5000	-1.47503605	5000	-1.47503605	5000	-0.52491342

ANEXO II – Resistencia al flujo de aire

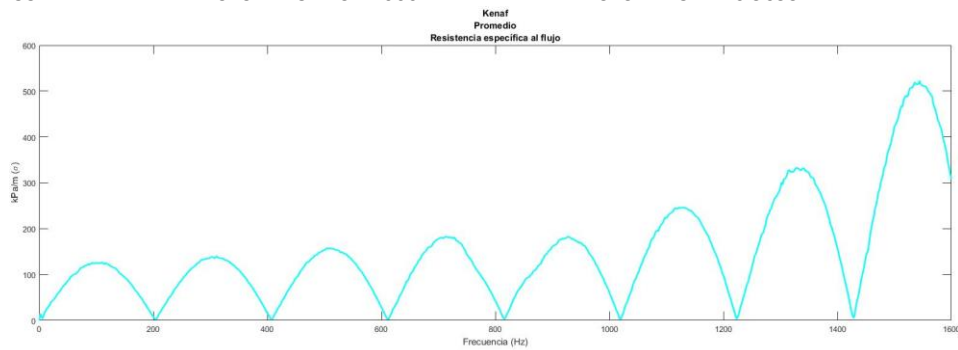
Coco

Muestra1			Muestra2			Muestra3			Promedio
Hz	kPa/m	Sigma M1	Hz	kPa/m	Sigma M2	Hz	kPa/m	Sigma M3	Sigma (Pa s/m)
102.6786	150.1330	192.4333	102.6786	151.3348	190.7834	102.6786	156.4264	197.6567	193.6245
308.0357	165.8637		308.0357	170.0854		308.0357	172.1247		
513.3929	191.7114		513.3929	187.1374		513.3929	197.3637		
718.7500	224.3790		718.7500	223.8538		718.7500	229.4735		
924.1071	230.0797		924.1071	221.5056		924.1071	232.8954		



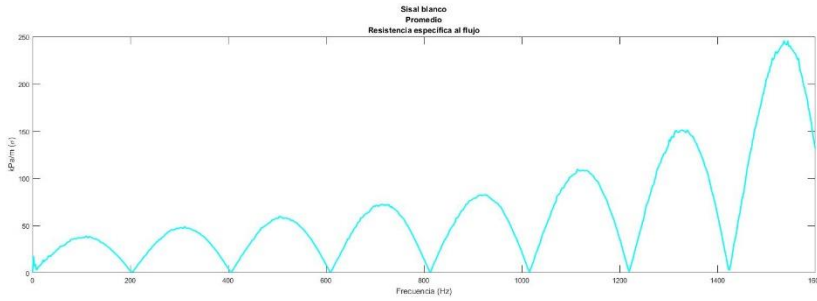
Kenaf

Muestra1			Muestra2			Muestra3			Promedio
Hz	kPa/m	Sigma M1	Hz	kPa/m	Sigma M2	Hz	kPa/m	Sigma M3	Sigma (Pa s/m)
102.1919	123.7138	152.4064	102.1919	122.6343	157.3035	102.1919	126.2394	156.1368	155.2822
306.5758	135.9367		306.5758	135.5264		306.5758	138.0937		
510.9597	155.6997		510.9597	156.2035		510.9597	157.6479		
715.3436	179.5665		715.3436	180.9867		715.3436	181.7932		
919.7275	167.1153		919.7275	191.1666		919.7275	176.9099		



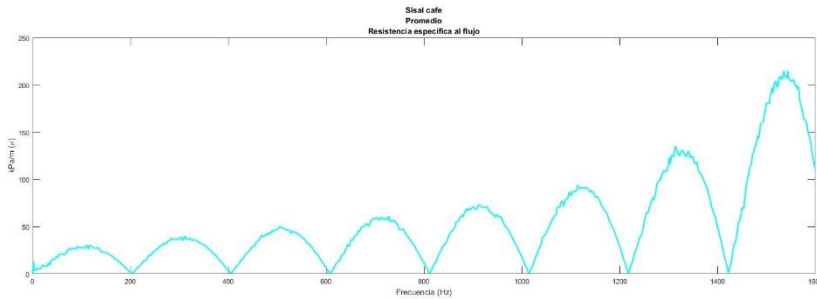
Sisal Blanco

Muestra1			Muestra2			Muestra3			Promedio
Hz	kPa/m	Sigma M1	Hz	kPa/m	Sigma M2	Hz	kPa/m	Sigma M3	Sigma (Pa s/m)
102.1919	39.2947	61.4950	102.1919	36.2136	58.5351	102.1919	36.2199	58.8383	59.6228
306.5758	50.8216		306.5758	46.3232		306.5758	45.7688		
510.9597	58.6663		510.9597	59.6311		510.9597	58.8488		
715.3436	73.4249		715.3436	70.6096		715.3436	71.1364		
919.7275	85.2675		919.7275	79.8983		919.7275	82.2176		



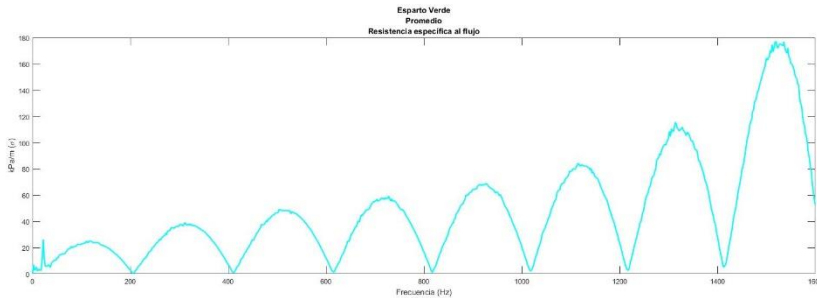
Sisal Café

Muestra1			Muestra2			Muestra3			Promedio
Hz	kPa/m	Sigma M1	Hz	kPa/m	Sigma M2	Hz	kPa/m	Sigma M3	Sigma (Pa s/m)
102.1919	26.3724	47.9737	102.1919	26.5526	47.4826	102.1919	27.7186	48.4365	47.9643
306.5758	36.1454		306.5758	35.7216		306.5758	37.2406		
510.9597	48.5603		510.9597	47.3534		510.9597	49.4762		
715.3436	57.3626		715.3436	56.5382		715.3436	58.9798		
919.7275	71.4278		919.7275	71.2470		919.7275	68.7674		



Esparto Verde

Muestra1			Muestra2			Muestra3			Promedio
Hz	kPa/m	Sigma M1	Hz	kPa/m	Sigma M2	Hz	kPa/m	Sigma M3	Sigma (Pa s/m)
109.5934	29.9938	42.9392	109.5934	22.0943	33.5460	110.2941	23.2738	30.6513	35.7122
328.7802	42.7757		328.7802	35.0700		330.8824	33.9780		
547.9670	50.9965		547.9670	37.3559		551.4706	37.3192		
767.1537	49.5133		767.1537	39.0624		772.0588	34.7140		
986.3405	41.4167		986.3405	34.1473		992.6471	23.9717		



Esparto Seco
Muestra1

Hz	kPa/m
108.9015	20.1180
326.7045	31.9498
544.5076	39.2949
762.3106	41.5082
980.1136	37.4763

Muestra2

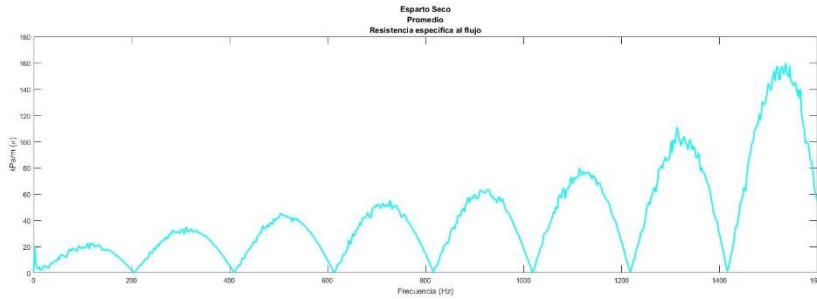
Hz	kPa/m
109.5934	21.8774
328.7802	29.3588
547.9670	36.3538
767.1537	36.3639
986.3405	30.7249

Muestra3

Hz	kPa/m
108.9015	20.9075
326.7045	31.8648
544.5076	38.8863
762.3106	41.2133
980.1136	37.6350

Promedio

Sigma (Pa s/m)
33.0355



Esparto Cocido
Muestra1

Hz	kPa/m
111.0039	19.3384
333.0116	29.9002
555.0193	31.9307
777.0270	25.9756
999.0347	10.3163

Muestra2

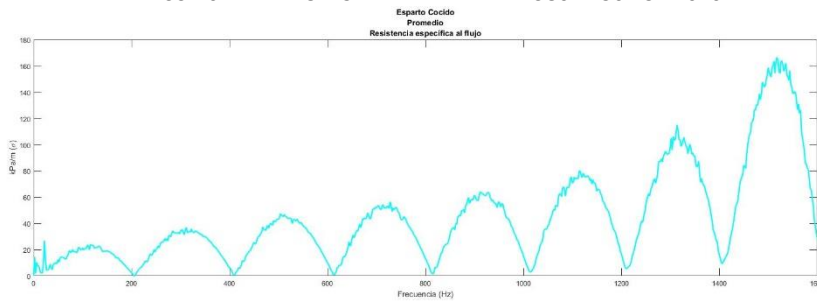
Hz	kPa/m
110.2941	27.1203
330.8824	39.4579
551.4706	42.5757
772.0588	38.7590
992.6471	24.8473

Muestra3

Hz	kPa/m
108.9015	20.4145
326.7045	32.0257
544.5076	39.1791
762.3106	41.4378
980.1136	37.4610

Promedio

Sigma (Pa s/m)
30.7160



Esparto Cocido Picado
Muestra1

Hz	kPa/m
111.0039	88.9761
333.0116	125.0872
555.0193	122.8008
777.0270	80.5754
999.0347	0.4772

Muestra2

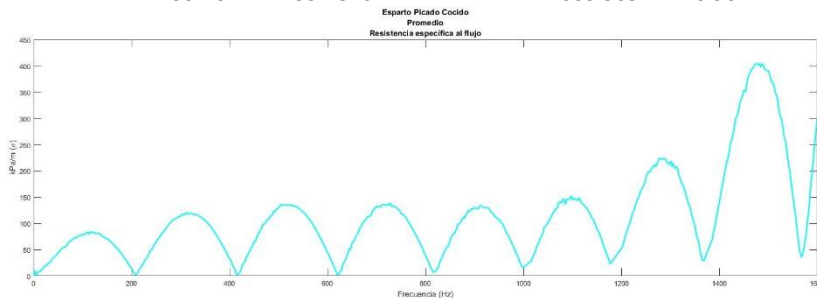
Hz	kPa/m
110.2941	75.1185
330.8824	109.6645
551.4706	116.1905
772.0588	104.4698
992.6471	55.7876

Muestra3

Hz	kPa/m
111.7228	82.3537
335.1684	113.7326
558.6140	111.2070
782.0596	65.5146
1005.5052	20.9622

Promedio

Sigma (Pa s/m)
84.8612



Esparto Estopa
Muestra1

Hz	kPa/m
108.9015	100.4009
326.7045	127.4863
544.5076	139.6746
762.3106	136.2102
980.1136	118.8071

Muestra2

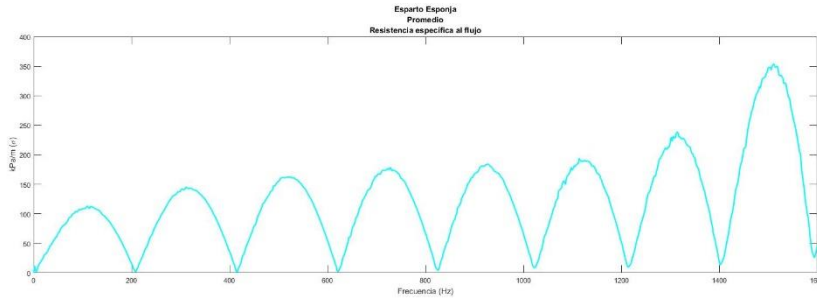
Hz	kPa/m
108.9015	131.0459
326.7045	165.4709
544.5076	177.6521
762.3106	168.0065
980.1136	127.3381

Muestra3

Hz	kPa/m
109.5934	103.8883
328.7802	128.3696
547.9670	135.2834
767.1537	125.3544
986.3405	88.0769

Promedio

Sigma (Pa s/m)
131.5377



Esparto Estopa Glue
Muestra1

Hz	kPa/m
108.0827	111.4466
324.2481	155.1140
540.4135	176.2658
756.5789	178.3651
972.7444	159.4066

Muestra2

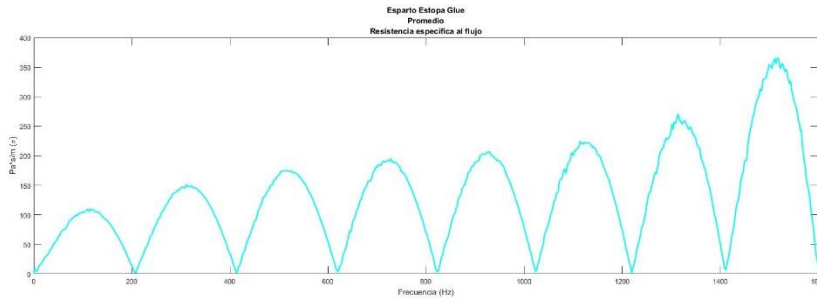
Hz	kPa/m
108.1369	115.0776
324.4107	153.4626
540.6846	172.8519
756.9584	174.2733
973.2322	153.1031

Muestra3

Hz	kPa/m
108.0827	95.5635
324.2481	131.8132
540.4135	151.1870
756.5789	155.2534
972.7444	142.8735

Promedio

Sigma (Pa s/m)
148.4038



ANEXO III – Códigos de MATLAB

1. Coeficiente de absorción acústica

```
%Cálculo del coeficiente de absorción
clear all; close all; clc;

%lectura de ficheros excel
filename = 'Medidas Esparto-A.xlsx';
sheet = 'Esparto Estopa';
%Frecuencias
xlRange_0 = 'B93:B893';
freq = xlsread(filename,sheet,xlRange_0);

%Muestra 1
%Posición Micro 1-2
%parte real
xlRange_1 = 'C93:C893';
h12_re_1 = xlsread(filename,sheet,xlRange_1);
%parte imaginaria
xlRange_2 = 'F93:F893';
h12_im_1 = xlsread(filename,sheet,xlRange_2);
%Posición Micro 2-1
%parte real
xlRange_3 = 'J93:J893';
h21_re_1 = xlsread(filename,sheet,xlRange_3);
%parte imaginaria
xlRange_4 = 'M93:M893';
h21_im_1 = xlsread(filename,sheet,xlRange_4);

%Unión de las partes real e imaginaria de la función de transferencia
h12_T_1 = h12_re_1 + (1i*h12_im_1); %H12=p1/p2
h21_T_1 = h21_re_1 + (1i*h21_im_1); %H21=p2/p1

%Valores iniciales
c = 345; % Velocidad del sonido en aire m/s
rho = 1.21; % Densidad del aire kg/m3
k = 2*pi.*(freq./c); % Número de onda
d = (3.2/100); % Distancia entre micros
m = (5.4/100); % Espesor de la muestra
L = (25.5/100)-d-m; % Distancia desde mic2 hasta la muestra

fc = [20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150 4000 5000]';
bw = 1/3;
flow = fc.*(2^(-bw)); % frecuencia corte inferior
fup = fc.*(2^(+bw)); % frecuencia corte superior
bandas = length(fc);
freq_tot = length(freq);

%Función de transferencia de la correlación de los micros
H12_1 = sqrt(h12_T_1./h21_T_1);

%Factor de calibración
Hc_1 = sqrt(h12_T_1.*h21_T_1);
```

```

%Función de transferencia corregida
H12_1c = H12_1./Hc_1;

% Factor de Reflexión
Hl = exp(-1i*k*d);
HR = exp(1i*k*d);
r_1 = ((H12_1c-Hl)./(HR-H12_1c)) .* (exp(2*1i*k*(d+L)));

% Coeficiente de Absorción en incidencia normal
alpha_1 = 1-((abs(r_1)).^2);

%Eliminación de frecuencias negativas
zz = 1;
for z=1:freq_tot
    if alpha_1(z,1)>0
        alpha_1a(zz,1) = alpha_1(z,1);
        freq_1a(zz,1) = freq(z,1);
        zz = zz+1;
    end
end
alpha_1b = pchip(freq_1a,alpha_1a,freq);

%Tercios de octava
aux1 = 0;
for i=1:bandas
    for j=1:freq_tot
        if (flow(i)<=freq(j)) && (freq(j)<=fup(i))
            if aux1 == 0
                aux1 = alpha_1b(j);
            else
                aux1 = [aux1,alpha_1b(j)];
            end
        end
    end
    alpha_T_1(i,1) = mean(aux1);
    aux1 = 0;
end

figure
semilogx(fc,alpha_T_1,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Coeficiente de Absorción (\alpha)');title({sheet'';'Muestra 1'});
axis([100 3150 0 1.0])
xticks([20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150 4000 5000]);

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Muestra 1','-djpeg','-r0');

figure
semilogx(freq,alpha_1); title({sheet'';'Muestra 1'});

%Exportación de alpha muestra 1
filename_2 = 'Output\Alpha.xlsx';
xlswrite(filename_2,sheet,sheet,'A1');

```



```

xlswrite(filename_2,{'Muestral'},sheet,'B2');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'B3');
xlswrite(filename_2,fc,sheet,'B4');
xlswrite(filename_2,{'alpha'},sheet,'C3');
xlswrite(filename_2,alpha_T_1,sheet,'C4');

%%

%Muestra 2
%Micro 1-2
%parte real
xlRange_5 = 'Q93:Q893';
h12_re_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_5);
%parte imaginaria
xlRange_6 = 'T93:T893';
h12_im_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_6);
%Micro 2-1
%parte real
xlRange_7 = 'X93:X893';
h21_re_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_7);
%parte imaginaria
xlRange_8 = 'AA93:AA893';
h21_im_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_8);

%Unión de las partes real e imaginaria de la función de transferencia
h12_T_2 = h12_re_2 + (1i*h12_im_2); %H12=p1/p2
h21_T_2 = h21_re_2 + (1i*h21_im_2); %H21=p2/p1

%Función de transferencia de la correlación de los micros
H12_2 = sqrt(h12_T_2./h21_T_2);

%Factor de calibración
Hc_2 = sqrt(h12_T_2.*h21_T_2);

%Función de transferencia corregida
H12_2c = H12_2./Hc_2;

% Factor de Reflexión
r_2 = ((H12_2c-H1)./(HR-H12_2c)) .* (exp(2*1i*k*(d+L)));

% Coeficiente de Absorción en incidencia normal
alpha_2 = 1-((abs(r_2)).^2);

%Eliminación de frecuencias negativas
zz = 1;
for z=1:freq_tot
    if alpha_2(z,1)>0
        alpha_2a(zz,1) = alpha_2(z,1);
        freq_2a(zz,1) = freq(z,1);
        zz = zz+1;
    end
end
alpha_2b = pchip(freq_2a,alpha_2a,freq);

```

```

%Tercios de octava
aux1 = 0;
for i=1:bandas
    for j=1:freq_tot
        if (flow(i)<=freq(j)) && (freq(j)<=fup(i))
            if aux1 == 0
                aux1 = alpha_2b(j);
            else
                aux1 = [aux1,alpha_2b(j)];
            end
        end
    end
    alpha_T_2(i,1) = mean(aux1);
    aux1 = 0;
end

figure
semilogx(fc,alpha_T_2,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Coeficiente de Absorción (\alpha)');title({'sheet';'Muestra 2'});
axis([100 3150 0 1.0])
xticks([20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150 4000 5000]);

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Muestra 2','-djpeg','-r0');

figure
semilogx(freq,alpha_2); title({'sheet';'Muestra 2'});

%Exportación de alpha muestra 2
filename_2 = 'Output\Alpha.xlsx';
xlswrite(filename_2,{'Muestra2'},sheet,'E2');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'E3');
xlswrite(filename_2,fc,sheet,'E4');
xlswrite(filename_2,{'alpha'},sheet,'F3');
xlswrite(filename_2,alpha_T_1,sheet,'F4');

%%

%Muestra 3
%Micro 1-2
%parte real
xlRange_9 = 'AE93:AE893';
h12_re_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_9);
%parte imaginaria
xlRange_10 = 'AH93:AH893';
h12_im_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_10);
%Micro 2-1
%parte real
xlRange_11 = 'AL93:AL893';
h21_re_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_11);
%parte imaginaria
xlRange_12 = 'AO93:A0893';
h21_im_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_12);

```

```

%Unión de las partes real e imaginaria de la función de transferencia
h12_T_3 = h12_re_3 + (1i*h12_im_3); %H12=p1/p2
h21_T_3 = h21_re_3 + (1i*h21_im_3); %H21=p2/p1

%Función de transferencia de la correlación de los micros
H12_3 = sqrt(h12_T_3./h21_T_3);

%Factor de calibración
Hc_3 = sqrt(h12_T_3.*h21_T_3);

%Función de transferencia corregida
H12_3c = H12_3./Hc_3;

% Factor de Reflexión
r_3 = ((H12_3c-H1)./(HR-H12_3c)) .* (exp(2*1i*k*(d+L)));

% Coeficiente de Absorción en incidencia normal
alpha_3 = 1-((abs(r_3)).^2);

%Eliminación de frecuencias negativas
zz = 1;
for z=1:freq_tot
    if alpha_3(z,1)>0
        alpha_3a(zz,1) = alpha_3(z,1);
        freq_3a(zz,1) = freq(z,1);
        zz = zz+1;
    end
end
alpha_3b = pchip(freq_3a,alpha_3a,freq);

%Tercios de octava
aux1 = 0;

for i=1:bandas
    for j=1:freq_tot
        if (flow(i)<=freq(j)) && (freq(j)<=fup(i))
            if aux1 == 0
                aux1 = alpha_3b(j);
            else
                aux1 = [aux1,alpha_3b(j)];
            end
        end
    end
    alpha_T_3(i,1) = mean(aux1);
    aux1 = 0;
end

figure
semilogx(fc,alpha_T_3,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Coeficiente de Absorción (\alpha)');title({'sheet';'Muestra 3'});
axis([100 3150 0 1.0])
xticks([20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150 4000 5000]);

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];

```

```

print('Output\Muestra 3', '-djpeg', '-r0');

figure
semilogx(freq,alpha_3); title({sheet'';'Muestra 3'});

%Exportación de alpha muestra 2
filename_2 = 'Output\Alpha.xlsx';
xlswrite(filename_2,{'Muestra3'},sheet,'H2');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'H3');
xlswrite(filename_2,fc,sheet,'H4');
xlswrite(filename_2,{'alpha'},sheet,'I3');
xlswrite(filename_2,alpha_T_1,sheet,'I4');

%%

%Promedios
alpha_full = (alpha_1+alpha_2+alpha_3)/3;
alpha = (alpha_T_1+alpha_T_2+alpha_T_3)/3;

figure
semilogx(fc,alpha,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Coeficiente de Absorción (\alpha)');title({sheet'';'Alpha promedio'});
axis([100 3150 0 1.0])
xticks([20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150 4000 5000]);

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Promedio', '-djpeg', '-r0');

figure
semilogx(freq,alpha_full); title({sheet'';'Promedio FS'});

%Frecuencia superior

%%
%Exportación de alpha promedio
filename_2 = 'Output\Alpha.xlsx';
xlswrite(filename_2,{'Promedio'},sheet,'K2');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'K3');
xlswrite(filename_2,fc,sheet,'K4');
xlswrite(filename_2,{'alpha'},sheet,'L3');
xlswrite(filename_2,alpha,sheet,'L4');

```

2. Resistencia y resistividad al flujo de aire

```
%Cálculo de la resistencia específica al flujo
clear all; close all; clc;

%Valores iniciales
c = 345; % Velocidad del sonido en aire m/s
rho = 1.21; % Densidad del aire kg/m3
Z = c*rho; % Impedancia acústica del aire
d = (82/100); % Distancia entre micrófonos
T = (86.7/100); % Distancia del micro 1 a la parte rígida del tubo
G = (1.5/100); % Distancia del micro 1 al inicio de la muestra
m1 = (6/100); % Espesor de la muestra
L = T-G-m1; % Distancia desde la muestra hasta la parte rígida del tubo

%lectura de ficheros excel
filename = 'Medidas Resistencia.xlsx';
sheet = 'Esparto Estopa';
%Frecuencias
xlRange_0 = 'B93:B893';
freq = xlsread(filename, sheet, xlRange_0);

%Muestra 1
%Posición Micro 1-2
%parte real
xlRange_1 = 'C93:C893';
h12_re_1 = xlsread(filename, sheet, xlRange_1);
%parte imaginaria
xlRange_2 = 'F93:F893';
h12_im_1 = xlsread(filename, sheet, xlRange_2);
%Posición Micro 2-1
%parte real
xlRange_3 = 'J93:J893';
h21_re_1 = xlsread(filename, sheet, xlRange_3);
%parte imaginaria
xlRange_4 = 'M93:M893';
h21_im_1 = xlsread(filename, sheet, xlRange_4);

%Unión de las partes real e imaginaria de la función de transferencia
h12_T_1 = h12_re_1 + (1i*h12_im_1); %H12=p1/p2
h21_T_1 = h21_re_1 + (1i*h21_im_1); %H21=p2/p1

%Frecuencias de interés  $L=(2n-1)(\lambda/4)$ 
n = [1;2;3;4;5];
f = c./((4*L)./(2.*n)-1));

%Función de transferencia de la correlación de los micros
H12_1 = sqrt(h12_T_1./h21_T_1);

%Factor de calibración
Hc_1 = sqrt(h12_T_1.*h21_T_1);

%Función de transferencia corregida
H12_1c = H12_1./Hc_1;
```

```

% Resistencia al flujo
sigma_1 = Z*(abs(imag(1./H12_1c)));

aux_1(1,1) = 0;
for i=1:length(f)
    for j=1: length(freq)
        if(f(i,1) == freq(j,1))
            aux1(i,1) = sigma_1(j,1);
        elseif (freq(j,1)<f(i,1)) && (f(i,1)<freq(j+1,1))
            if (f(i,1)-freq(j,1)<(freq(j+1,1)-f(i,1)))
                aux_1(i,1) = sigma_1(j,1);
            elseif (f(i,1)-freq(j,1))>(freq(j+1,1)-f(i,1))
                aux_1(i,1) = sigma_1(j+1,1);
            else
                aux_1(i,1) = (sigma_1(j,1)+sigma_1(j+1,1))/2;
            end
        end
    end
end

sigma_1F = mean(aux_1);

%Graficas
figure
plot(freq,sigma_1,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Pa*s/m (\sigma)');title({'sheet';'Muestra 1'; 'Resistencia específica al
flujo'});

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Muestra 1','-djpeg','-r0');

%Exportación de sigma muestra 1
filename_2 = 'Output\Flujo.xlsx';
xlswrite(filename_2, sheet, sheet, 'A1');
xlswrite(filename_2, {'Muestral'}, sheet, 'B2');
xlswrite(filename_2, {'Hz'}, sheet, 'B3');
xlswrite(filename_2, freq, sheet, 'B4');
xlswrite(filename_2, {'Pa*s/m'}, sheet, 'C3');
xlswrite(filename_2, sigma_1, sheet, 'C4');
xlswrite(filename_2, {'Hz'}, sheet, 'E3');
xlswrite(filename_2, f, sheet, 'E4');
xlswrite(filename_2, {'Pa*s/m'}, sheet, 'F3');
xlswrite(filename_2, aux_1, sheet, 'F4');
xlswrite(filename_2, {'Sigma M1'}, sheet, 'H3');
xlswrite(filename_2, sigma_1F, sheet, 'H4');

% sigma2 = sigma3/0.06; %Resistividad al flujo Rayls/m Pa*s/m2

%%
%Muestra 2

%Valores iniciales de Muestra 2
m2 = (6/100); % Espesor de la muestra
L = T-G-m2; % Distancia desde la muestra hasta la parte rígida del tubo

```

```

%Frecuencias de interés  $L=(2n-1)$  ( $\lambda/4$ )
n = [1;2;3;4;5];
f = c./((4*L)./(2.*n)-1));

%Micro 1-2
%parte real
xlRange_5 = 'Q93:Q893';
h12_re_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_5);
%parte imaginaria
xlRange_6 = 'T93:T893';
h12_im_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_6);
%Micro 2-1
%parte real
xlRange_7 = 'X93:X893';
h21_re_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_7);
%parte imaginaria
xlRange_8 = 'AA93:AA893';
h21_im_2 = xlsread(filename,sheet,xlRange_8);

%Unión de las partes real e imaginaria de la función de transferencia
h12_T_2 = h12_re_2 + (1i*h12_im_2); %H12=p1/p2
h21_T_2 = h21_re_2 + (1i*h21_im_2); %H21=p2/p1

%Función de transferencia de la correlación de los micros
H12_2 = sqrt(h12_T_2./h21_T_2);

%Factor de calibración
Hc_2 = sqrt(h12_T_2.*h21_T_2);

%Función de transferencia corregida
H12_2c = H12_2./Hc_2;

% Resistencia al flujo
sigma_2 = Z*(abs(imag(1./H12_2c)));

aux_2(1,1) = 0;
for i=1:length(f)
    for j=1: length(freq)
        if(f(i,1) == freq(j,1))
            aux2(i,1) = sigma_2(j,1);
        elseif (freq(j,1)<f(i,1)) && (f(i,1)<freq(j+1,1))
            if (f(i,1)-freq(j,1)<(freq(j+1,1)-f(i,1)))
                aux_2(i,1) = sigma_2(j,1);
            elseif (f(i,1)-freq(j,1))>(freq(j+1,1)-f(i,1))
                aux_2(i,1) = sigma_2(j+1,1);
            else
                aux_2(i,1) = (sigma_2(j,1)+sigma_2(j+1,1))/2;
            end
        end
    end
end

sigma_2F = mean(aux_2);

%Graficas

```

```

figure
plot(freq,sigma_2,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Pa*s/m (\sigma)');title({sheet'';'Muestra 2'; 'Resistencia especifica al
flujo''});

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Muestra 2','-djpeg','-r0');

%Exportación de sigma muestra 2
filename_2 = 'Output\Flujo.xlsx';
xlswrite(filename_2,{'Muestra2'},sheet,'J2');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'J3');
xlswrite(filename_2,freq,sheet,'J4');
xlswrite(filename_2,{'Pa*s/m'},sheet,'K3');
xlswrite(filename_2,sigma_2,sheet,'K4');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'M3');
xlswrite(filename_2,f,sheet,'M4');
xlswrite(filename_2,{'Pa*s/m'},sheet,'N3');
xlswrite(filename_2,aux_2,sheet,'N4');
xlswrite(filename_2,{'Sigma M2'},sheet,'P3');
xlswrite(filename_2,sigma_2F,sheet,'P4');

%%
%Muestra 3

%Valores iniciales de Muestra 3
m3 = (6.5/100); % Espesor de la muestra
L = T-G-m3; % Distancia desde la muestra hasta la parte rígida del tubo

%Frecuencias de interés  $L=(2n-1)(\lambda/4)$ 
n = [1;2;3;4;5];
f = c./((4*L)./(2.*n)-1));

%Micro 1-2
%parte real
xlRange_9 = 'AE93:AE893';
h12_re_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_9);
%parte imaginaria
xlRange_10 = 'AH93:AH893';
h12_im_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_10);
%Micro 2-1
%parte real
xlRange_11 = 'AL93:AL893';
h21_re_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_11);
%parte imaginaria
xlRange_12 = 'AO93:A0893';
h21_im_3 = xlsread(filename,sheet,xlRange_12);

%Unión de las partes real e imaginaria de la función de transferencia
h12_T_3 = h12_re_3 + (1i*h12_im_3); %H12=p1/p2
h21_T_3 = h21_re_3 + (1i*h21_im_3); %H21=p2/p1

%Función de transferencia de la correlación de los micros
H12_3 = sqrt(h12_T_3./h21_T_3);

```



```

%Factor de calibración
Hc_3 = sqrt(h12_T_3.*h21_T_3);

%Función de transferencia corregida
H12_3c = H12_3./Hc_3;

% Resistencia al flujo
sigma_3 = Z*(abs(imag(1./H12_3c)));

aux_3(1,1) = 0;
for i=1:length(f)
    for j=1: length(freq)
        if(f(i,1) == freq(j,1))
            aux3(i,1) = sigma_3(j,1);
        elseif (freq(j,1)<f(i,1) && (f(i,1)<freq(j+1,1))
            if (f(i,1)-freq(j,1))<(freq(j+1,1)-f(i,1))
                aux_3(i,1) = sigma_3(j,1);
            elseif (f(i,1)-freq(j,1))>(freq(j+1,1)-f(i,1))
                aux_3(i,1) = sigma_3(j+1,1);
            else
                aux_3(i,1) = (sigma_3(j,1)+sigma_2(j+1,1))/2;
            end
        end
    end
end
end

sigma_3F = mean(aux_3);

%Graficas
figure
plot(freq,sigma_3,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Pa*s/m (\sigma)');title({'sheet';'Muestra 3'; 'Resistencia especifica al
flujo'});

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Muestra 3','-djpeg','-r0');

%Exportación de sigma muestra 3
filename_2 = 'Output\Flujo.xlsx';
xlswrite(filename_2,{'Muestra3'},sheet,'R2');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'R3');
xlswrite(filename_2,freq,sheet,'R4');
xlswrite(filename_2,{'Pa*s/m'},sheet,'S3');
xlswrite(filename_2,sigma_3,sheet,'S4');
xlswrite(filename_2,{'Hz'},sheet,'U3');
xlswrite(filename_2,f,sheet,'U4');
xlswrite(filename_2,{'Pa*s/m'},sheet,'V3');
xlswrite(filename_2,aux_3,sheet,'V4');
xlswrite(filename_2,{'Sigma M3'},sheet,'X3');
xlswrite(filename_2,sigma_3F,sheet,'X4');

%%

%Promedios

```

```

sigma_full = (sigma_1+sigma_2+sigma_3)/3;
sigma = (sigma_1F+sigma_2F+sigma_3F)/3;
m = (m1+m2+m3)/3;

figure
plot(freq,sigma_full,'LineWidth',2,'Color','c'); xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Pa*s/m (\sigma)');title({sheet'';'Promedio';'Resistencia especifica al
flujo'});

fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Promedio','-djpeg','-r0');

%Exportación de sigma promedio
filename_2 = 'Output\Flujo.xlsx';
xlswrite(filename_2,{'Sigma (Pa*s/m)'},sheet,'Z2');
xlswrite(filename_2,sigma,sheet,'Z3');
% xlswrite(filename_2,{'Espesor (m)'},sheet,'AA2');
% xlswrite(filename_2,m,sheet,'AA3');

```

3. Modelo empírico

```
%Modelo Empírico del comportamiento acústico, de materiales elaborados a partir de
fibras, basado en las ecuaciones de Delany&Bazley
close all; clear all; clc;

%Lectura de ficheros excel
filename = 'Alpha.xlsx';
sheet = 'Sisal Blanco';
xlRange = 'L11:L26';
Alpha = xlsread(filename,sheet,xlRange);

%Lectura de coeficientes basales de modelización
filename2 = 'CoeficientesVarios.xlsx';
sheet2 = 'Coeficientes';
xlRange2 = 'B4:X11';
CoefOld = xlsread(filename2,sheet2,xlRange2);

d = 0.8/100;           % Espesor de la muestra
r = 59.6;             % Resistencia al flujo Pa*s/m

freq = [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150]';

%Limites
X_Del = freq./(r/d);
f_min = 0.01*(r/d);
f_max = 1.00*(r/d);

%Cálculo de los coeficientes óptimos de modelización para el material
[AlphaOp,CoefOp,P] = optimizacion(d,r,Alpha,CoefOld);

%Cálculo de alfa con los coeficientes iniciales VS valores medidos
AlphaOld = alfaS(d,r,CoefOld(:,P));

%Grafica
figure,
semilogx(freq,Alpha,'LineWidth',2,'Color','c'); hold on;
semilogx(freq,AlphaOld,'LineWidth',2,'Color','r');
axis([100 3150 0 1.0]); xticks([100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150]);
legend('Medido','Aproximado'); xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Coeficiente de
Absorción (\alpha)');title(sheet';'Coeficientes "zero"');
set(legend,'Position',[0.72 0.15 0.22 0.09]);
%Guardar imagen
fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Coeficientes zero','-djpeg','-r0');

%Alfa con los óptimos coeficientes VS valores medidos
%Grafica
figure,
semilogx(freq,Alpha,'LineWidth',2,'Color','c'); hold on;
semilogx(freq,AlphaOp,'LineWidth',2,'Color','r');
```

```

axis([100 3150 0 1.0]); xticks([100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150]);
legend('Medido','Aproximado'); xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Coeficiente de
Absorción (\alpha)');title({sheet'';'Comparativa con coeficientes estimados''});
set(legend,'Position',[0.72 0.15 0.22 0.09]);
%Guardar imagen
fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output\Comparativa','-djpeg','-r0');

%Error cuadrático con los coeficientes iniciales
E_pre = sum((Alpha - AlphaOld).^2);

%Error cuadrático con los óptimos coeficientes
E_post = sum((Alpha - AlphaOp).^2);

%Error relativo
e = (1/1)*((abs(AlphaOp-Alpha))./(Alpha));
figure,
semilogx(freq,e,'LineWidth',2,'Color','c');
axis([100 3150 0 1.0]); xticks([100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
2000 2500 3150]);
xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('error relativo');title({sheet'';'Predicción del
error relativo''});
%Guardar imagen
fig = gcf;
fig.PaperPosition = [-5 2 20 6];
print('Output>Error relativo','-djpeg','-r0');

%%
%Exportación del coeficiente calculado
CC = ["C1";"C2";"C3";"C4";"C5";"C6";"C7";"C8"];
filename3 = 'Output\Coeficientes.xlsx';
xlswrite(filename3,sheet,sheet,'A1');
xlswrite(filename3,{'Coeficientes'},sheet,'C3');
xlswrite(filename3,CC,sheet,'C4');
xlswrite(filename3,CoefOp,sheet,'D4');
xlswrite(filename3,{'Hz'},sheet,'F3');
xlswrite(filename3,freq,sheet,'F4');
xlswrite(filename3,{'Alpha Estimado'},sheet,'G3');
xlswrite(filename3,AlphaOp,sheet,'G4');
xlswrite(filename3,{'Coeficientes usados'},sheet,'I3');
xlswrite(filename3,P,sheet,'I4');

```

```

%Función de busca los coeficientes de modelización empírica más óptimos

function [AlphaOp,CoefOp,puntero] = optimizacion(d,r,Alpha,CoefOld)

freq = [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150]';

for ii=1:length(CoefOld)

    %Estimación de coeficientes para el material
    CoefNew(:,ii) = coeficientesF(d,r,Alpha,CoefOld(:,ii));

    %Cálculo de alfa con los nuevos coeficientes
    alphaNew(:,ii) = alfaS(d,r,CoefNew(:,ii));
    figure,plot(freq,Alpha,freq,alphaNew(:,ii)); drawnow;

    %Error cuadrático con los nuevos coeficientes
    E_post(:,ii) = sum((Alpha - alphaNew(:,ii)).^2);

end

%Se busca el coeficiente de absorción con el menor error
mini = min(E_post);
puntero = find(abs(E_post-mini) < 0.000001);
CoefOp = CoefNew(:,puntero);
AlphaOp = alphaNew(:,puntero);

end

%Función que calcula el coeficiente de absorción estimado

function AlphaS = alfaS(d,r,C)

%d es el espesor de la muestra
%r es la resistencia al flujo
%C es el vector con los coeficientes iniciales

c = 343; % Velocidad del sonido en aire m/s
rho = 1.21; % Densidad del aire kg/m3
freq = [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150]';

Z0 = c*rho;
K = (2*pi*freq)/c;
X = (rho*freq)./(r/d);

Z = Z0*((1+(C(1)*(X.^C(2)))) - ((1i)*(C(3)*(X.^C(4))))); %Impedancia característica
G = K.*(C(5)*(X.^C(6)) + ((1i)*(1+(C(7)*(X.^C(8)))))); %Constante de propagación
ZD = Z.*coth(G.*d); %Impedancia de cierre
AlphaS = (4*Z0.*(real(ZD)))./ (((abs(ZD)).^2) + (2*Z0.*(real(ZD))) + (Z0^2));
%Coeficiente de absorción estimado

end

```

%Función que calcula los coeficientes de modelización empírica

function CF = coeficientesF(d,r,Alpha,C)

c = 343; % Velocidad del sonido en aire m/s
rho = 1.21; % Densidad del aire kg/m3
Z0 = c*rho;
freq = [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150]';

K1 = (2*pi*freq(1,1))/c;
W1 = (rho*freq(1,1))./(r/d);

f1 = @(x) (abs(Alpha(1,1)-((4*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W1.^x(2)))) - ...
((1i)*(x(3)*(W1.^x(4)))))).*coth((K1.*((x(5)*(W1.^x(6)))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W1.^x(8)))))).*d)))))./ ...
((abs((Z0*((1+(x(1)*(W1.^x(2)))) -
((1i)*(x(3)*(W1.^x(4)))))).*coth((K1.*((x(5)*(W1.^x(6)))) + ...
((1i)*(1+(x(7)*(W1.^x(8)))))).*d))))).^2) +
(2*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W1.^x(2)))) - ...
((1i)*(x(3)*(W1.^x(4)))))).*coth((K1.*((x(5)*(W1.^x(6)))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W1.^x(8)))))).*d)))) + (Z0^2)))));

K2 = (2*pi*freq(2,1))/c;
W2 = (rho*freq(2,1))./(r/d);

f2 = @(x) (abs(Alpha(2,1)-((4*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W2.^x(2)))) - ...
((1i)*(x(3)*(W2.^x(4)))))).*coth((K2.*((x(5)*(W2.^x(6)))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W2.^x(8)))))).*d)))))./ ...
((abs((Z0*((1+(x(1)*(W2.^x(2)))) -
((1i)*(x(3)*(W2.^x(4)))))).*coth((K2.*((x(5)*(W2.^x(6)))) + ...
((1i)*(1+(x(7)*(W2.^x(8)))))).*d))))).^2) +
(2*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W2.^x(2)))) - ...
((1i)*(x(3)*(W2.^x(4)))))).*coth((K2.*((x(5)*(W2.^x(6)))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W2.^x(8)))))).*d)))) + (Z0^2)))));

K3 = (2*pi*freq(3,1))/c;
W3 = (rho*freq(3,1))./(r/d);

f3 = @(x) (abs(Alpha(3,1)-((4*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W3.^x(2)))) - ...
((1i)*(x(3)*(W3.^x(4)))))).*coth((K3.*((x(5)*(W3.^x(6)))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W3.^x(8)))))).*d)))))./ ...
((abs((Z0*((1+(x(1)*(W3.^x(2)))) -
((1i)*(x(3)*(W3.^x(4)))))).*coth((K3.*((x(5)*(W3.^x(6)))) + ...
((1i)*(1+(x(7)*(W3.^x(8)))))).*d))))).^2) +
(2*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W3.^x(2)))) - ...
((1i)*(x(3)*(W3.^x(4)))))).*coth((K3.*((x(5)*(W3.^x(6)))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W3.^x(8)))))).*d)))) + (Z0^2)))));

K4 = (2*pi*freq(4,1))/c;
W4 = (rho*freq(4,1))./(r/d);

$$\begin{aligned}
f4 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(4,1) - ((4 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W4.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W4.^x(4)))))) * \text{coth}((K4 * ((x(5) * (W4.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W4.^x(8)))))) * d)))))) ./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W4.^x(2)))) - \\
& ((1i) * (x(3) * (W4.^x(4)))))) * \text{coth}((K4 * ((x(5) * (W4.^x(6))) + \dots \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W4.^x(8)))))) * d))))).^2) + \\
& (2 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W4.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W4.^x(4)))))) * \text{coth}((K4 * ((x(5) * (W4.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W4.^x(8)))))) * d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K5 &= (2 * \pi * \text{freq}(5,1)) / c; \\
W5 &= (\rho * \text{freq}(5,1)) ./ (r/d);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f5 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(5,1) - ((4 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W5.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W5.^x(4)))))) * \text{coth}((K5 * ((x(5) * (W5.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W5.^x(8)))))) * d)))))) ./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W5.^x(2)))) - \\
& ((1i) * (x(3) * (W5.^x(4)))))) * \text{coth}((K5 * ((x(5) * (W5.^x(6))) + \dots \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W5.^x(8)))))) * d))))).^2) + \\
& (2 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W5.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W5.^x(4)))))) * \text{coth}((K5 * ((x(5) * (W5.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W5.^x(8)))))) * d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K6 &= (2 * \pi * \text{freq}(6,1)) / c; \\
W6 &= (\rho * \text{freq}(6,1)) ./ (r/d);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f6 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(6,1) - ((4 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W6.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W6.^x(4)))))) * \text{coth}((K6 * ((x(5) * (W6.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W6.^x(8)))))) * d)))))) ./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W6.^x(2)))) - \\
& ((1i) * (x(3) * (W6.^x(4)))))) * \text{coth}((K6 * ((x(5) * (W6.^x(6))) + \dots \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W6.^x(8)))))) * d))))).^2) + \\
& (2 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W6.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W6.^x(4)))))) * \text{coth}((K6 * ((x(5) * (W6.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W6.^x(8)))))) * d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K7 &= (2 * \pi * \text{freq}(7,1)) / c; \\
W7 &= (\rho * \text{freq}(7,1)) ./ (r/d);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f7 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(7,1) - ((4 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W7.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W7.^x(4)))))) * \text{coth}((K7 * ((x(5) * (W7.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W7.^x(8)))))) * d)))))) ./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W7.^x(2)))) - \\
& ((1i) * (x(3) * (W7.^x(4)))))) * \text{coth}((K7 * ((x(5) * (W7.^x(6))) + \dots \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W7.^x(8)))))) * d))))).^2) + \\
& (2 * Z0 * (\text{real}(((Z0 * (1 + (x(1) * (W7.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i) * (x(3) * (W7.^x(4)))))) * \text{coth}((K7 * ((x(5) * (W7.^x(6))) + \\
& ((1i) * (1 + (x(7) * (W7.^x(8)))))) * d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K8 &= (2 * \pi * \text{freq}(8,1)) / c; \\
W8 &= (\rho * \text{freq}(8,1)) ./ (r/d);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f8 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(8,1) - ((4*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W8.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W8.^x(4)))))).*\text{coth}((K8.*((x(5)*(W8.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W8.^x(8)))))).*d)))))./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0*(1+(x(1)*(W8.^x(2)))) - \\
& ((1i)*(x(3)*(W8.^x(4)))))).*\text{coth}((K8.*((x(5)*(W8.^x(6))) + \dots \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W8.^x(8)))))).*d))))).^2) + \\
& (2*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W8.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W8.^x(4)))))).*\text{coth}((K8.*((x(5)*(W8.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W8.^x(8)))))).*d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K9 &= (2*\text{pi}*\text{freq}(9,1))/c; \\
W9 &= (\text{rho}*\text{freq}(9,1))./(r/d);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f9 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(9,1) - ((4*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W9.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W9.^x(4)))))).*\text{coth}((K9.*((x(5)*(W9.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W9.^x(8)))))).*d)))))./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0*(1+(x(1)*(W9.^x(2)))) - \\
& ((1i)*(x(3)*(W9.^x(4)))))).*\text{coth}((K9.*((x(5)*(W9.^x(6))) + \dots \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W9.^x(8)))))).*d))))).^2) + \\
& (2*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W9.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W9.^x(4)))))).*\text{coth}((K9.*((x(5)*(W9.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W9.^x(8)))))).*d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K10 &= (2*\text{pi}*\text{freq}(10,1))/c; \\
W10 &= (\text{rho}*\text{freq}(10,1))./(r/d);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f10 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(10,1) - ((4*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W10.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W10.^x(4)))))).*\text{coth}((K10.*((x(5)*(W10.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W10.^x(8)))))).*d)))))./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0*(1+(x(1)*(W10.^x(2)))) - \\
& ((1i)*(x(3)*(W10.^x(4)))))).*\text{coth}((K10.*((x(5)*(W10.^x(6))) + \dots \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W10.^x(8)))))).*d))))).^2) + \\
& (2*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W10.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W10.^x(4)))))).*\text{coth}((K10.*((x(5)*(W10.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W10.^x(8)))))).*d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K11 &= (2*\text{pi}*\text{freq}(11,1))/c; \\
W11 &= (\text{rho}*\text{freq}(11,1))./(r/d);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f11 = & @ (x) (\text{abs}(\text{Alpha}(11,1) - ((4*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W11.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W11.^x(4)))))).*\text{coth}((K11.*((x(5)*(W11.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W11.^x(8)))))).*d)))))./ \dots \\
& (((\text{abs}(((Z0*(1+(x(1)*(W11.^x(2)))) - \\
& ((1i)*(x(3)*(W11.^x(4)))))).*\text{coth}((K11.*((x(5)*(W11.^x(6))) + \dots \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W11.^x(8)))))).*d))))).^2) + \\
& (2*Z0.*(\text{real}(((Z0*(1+(x(1)*(W11.^x(2)))) - \dots \\
& ((1i)*(x(3)*(W11.^x(4)))))).*\text{coth}((K11.*((x(5)*(W11.^x(6))) + \\
& ((1i)*(1+(x(7)*(W11.^x(8)))))).*d)))))) + (Z0^2)))));
\end{aligned}$$

$$K12 = (2*\text{pi}*\text{freq}(12,1))/c;$$


```

K16 = (2*pi*freq(16,1))/c;
W16 = (rho*freq(16,1))./(r/d);

f16 = @(x) (abs(Alpha(16,1)-((4*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W16.^x(2)))) - ...
    ((1i)*(x(3)*(W16.^x(4)))))).*coth((K16.*((x(5)*(W16.^x(6))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W16.^x(8)))))).*d)))))./ ...
    ((abs((Z0*((1+(x(1)*(W16.^x(2)))) -
((1i)*(x(3)*(W16.^x(4)))))).*coth((K16.*((x(5)*(W16.^x(6))) + ...
    ((1i)*(1+(x(7)*(W16.^x(8)))))).*d))))).^2) +
(2*Z0.*(real((Z0*((1+(x(1)*(W16.^x(2)))) - ...
    ((1i)*(x(3)*(W16.^x(4)))))).*coth((K16.*((x(5)*(W16.^x(6))) +
((1i)*(1+(x(7)*(W16.^x(8)))))).*d)))))) + (Z0^2)))));

FT =
@(x) f1(x)+f2(x)+f3(x)+f4(x)+f5(x)+f6(x)+f7(x)+f8(x)+f9(x)+f10(x)+f11(x)+f12(x)+f13(x)+
f14(x)+f15(x)+f16(x);

options = optimset('Display','iter','PlotFcns',@optimplotfval,'TolFun',1e-10);
CF = fminsearch(FT,C,options);

end

```

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Clasificación general de las fibras [1]	5
Figura 1. 2 Kenaf.....	6
Figura 1. 3 Planta de Agave	6
Figura 1. 4 Coco	7
Figura 1. 5 Esparto.....	7
Figura 2. 1 Configuración del equipo de medición y el tubo de ondas estacionarias para la medición del coeficiente de absorción acústica	11
Figura 2. 2 Calibración del instrumental de medición	12
Figura 2. 3 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición I, para la medición del coeficiente de absorción acústica	12
Figura 2. 4 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición II, para la medición del coeficiente de absorción acústica	12
Figura 2. 5 Sistema Pulse.....	13
Figura 2. 6 Separación entre la posición de micrófonos "d" y la distancia "L" entre el micrófono 2 y el inicio de la muestra	14
Figura 2. 7 Coco, espesor de 1.2 cm.....	14
Figura 2. 8 Kenaf, espesor de 0.8 cm	14
Figura 2. 9 Sisal Café, espesor de 0.8 cm.....	14
Figura 2. 10 Sisal Blanco, espesor de 0.8 cm	14
Figura 2. 11 Coeficiente de absorción acústica coco	15
Figura 2. 12 Coeficiente de absorción acústica kenaf	15
Figura 2. 13 Coeficiente de absorción acústica sisal café.....	15
Figura 2. 14 Atado de esparto.....	16
Figura 2. 15 Corte del material.....	16
Figura 2. 16 Anillo de sujeción.....	16
Figura 2. 17 Muestra debidamente en posición	16
Figura 2. 18 Colocación de la muestra en el tubo de ondas estacionarias	17
Figura 2. 19 Coeficiente de absorción acústica esparto verde.....	17
Figura 2. 20 Coeficiente de absorción acústica esparto seco	18
Figura 2. 21 Coeficiente de absorción acústica esparto cocido	18
Figura 2. 22 Coeficiente de absorción acústica esparto cocido picado	18
Figura 2. 23 Coeficiente de absorción acústica esparto estopa	19
Figura 2. 24 Mezcla de esparto estopa y el pegamento orgánico.....	20
Figura 2. 25 Molde con la muestra preparada	20
Figura 2. 26 Muestra elaborada con esparto estopa y pegamento orgánico.....	20
Figura 2. 27 Muestra final colocada para la medición	20

Figura 3. 1 Configuración del equipo de medición y el tubo de ondas estacionarias para la medición de la resistencia al flujo de aire	21
Figura 3. 2 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición I, para la medición de la resistencia al flujo de aire.....	22
Figura 3. 3 Parte real (arriba) y parte imaginaria (abajo) de la función de transferencia en la posición II, para la medición de la resistencia al flujo de aire.....	22
Figura 3. 4 Distancia entre la muestra y la terminación rígida del tubo de ondas estacionarias	23
Figura 3. 5 Adecuación del esparto para realizar la medición de resistencia al flujo de aire	24
Figura 3. 6 Colocación de la muestra en el tubo de ondas estacionarias para la medición por el método de Ingard-Dear.....	25
Figura 3. 7 Colocación de la muestra con pegamento en el tubo de ondas estacionarias para la medición por el método de Ingard-Dear.....	25
Figura 4. 1 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el coco y su error relativo ...	30
Figura 4. 2 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el kenaf y su error relativo ..	31
Figura 4. 3 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el sisal blanco y su error relativo	31
Figura 4. 4 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el sisal café y su error relativo	32
Figura 4. 5 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto verde y su error relativo	33
Figura 4. 6 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto seco y su error relativo	33
Figura 4. 7 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto cocido y su error relativo	34
Figura 4. 8 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto cocido picado y su error relativo	34
Figura 4. 9 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto estopa y su error relativo	35
Figura 4. 10 Comparación de coeficientes de absorción acústica para el esparto estopa glue y su error relativo	35
Figura 5. 1 Comparativa del coeficiente de absorción acústica de los distintos tipos de esparto ...	37
Figura 5. 2 Comparativa del coeficiente de absorción acústica entre el esparto estopa con pegamento orgánico y el esparto estopa en modo silvestre	37
Figura 5. 3 Coeficientes de absorción acústica para muestras con 0.8 cm de espesor	38
Figura 5. 4 Coeficientes de absorción acústica para muestras con 1.2 cm de espesor	38
Figura 5. 5 Coeficientes de absorción acústica para muestras con 5 cm de espesor	39

Índice de Tablas

Tabla 1. 1 Coeficientes predictivos de materiales inorgánicos	9
Tabla 1. 2 Coeficientes predictivos de materiales orgánicos	10
Tabla 2. 1 Equipo de medición.	11
Tabla 2. 2 Detalle del peso en gramos, para cada una de las muestras elaboradas de esparto estopa Glue	19
Tabla 3. 1 Resistencia y Resistividad al flujo de aire para las muestras con fibras termoconformadas	23
Tabla 3. 2 Resistencia y Resistividad al flujo de aire para las muestras de esparto.....	26
Tabla 4. 1 Valores de los coeficientes del modelo predictivo para las muestras termoconformadas	30
Tabla 4. 2 Valores de los coeficientes del modelo predictivo para las muestras de esparto	32
Tabla 4. 3 Error relativo de predicción para fibras orgánicas termoconformadas	36
Tabla 4. 4 Error relativo de predicción para las variantes de esparto	36