

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Máster en Ingeniería Acústica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Materiales absorbentes acústicos
basados en fibras de esparto”**

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autor/a:
Roberto Oltra Vercher

Tutor/a:
**Romina del Rey Tormos
Jesús Alba Fernández**

GANDIA, 2019

Tabla de contenido

1. Resumen.	1
2. Abstract.....	1
3. Introducción.	3
3.1. Absorción acústica.	5
3.2. Fibras naturales.	7
3.3. Esparto.....	8
4. Medidas experimentales.	11
4.1. Coeficiente de absorción acústica (UNE EN ISO 10534-2:2002).....	11
4.2. Resistencia al Flujo (Ingard & Dear).....	15
5. Modelos empíricos.....	19
6. Resultados.....	23
6.1. Materiales.....	23
6.2. Coeficiente de absorción y resistencia al flujo.....	27
6.3. Modelado empírico.....	30
6.4. Comparaciones entre los distintos tipos de esparto.....	36
6.5. Evaluación de la absorción con el paso del tiempo.....	40
7. Conclusiones.	49
8. Líneas futuras.	50
9. Bibliografía.....	51
11. Índice de figuras.	54
12. Índice de tablas.....	55

AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar mi trabajo final de máster a todas aquellas personas que, de una forma u otra, han estado presentes en mi proceso de formación, tanto en lo académico como en lo personal. Gracias a todos aquellos profesores y compañeros que me han ayudado y enseñado tantas cosas durante tantos años, con especial mención a mis tutores durante este trabajo, Romina y Jesús, por su pasión por la enseñanza y el mundo de la acústica, además de Juan Carlos y Roberto por toda su ayuda dentro del laboratorio.

A Juan Merino y ESPARTOS ALBARRACIN S.L (www.sisalyesparto.es), por haber proporcionado además de todas las muestras que han sido necesarias durante la investigación, toda la atención, ayuda y experiencia en la materia que ha sido necesaria. Algo que ha hecho posible completar el nivel de consolidación de mis competencias como ingeniero acústico por la Universitat Politècnica de València.

Por último y más importante, a todos mis familiares y amigos, por ser mi apoyo incondicional día tras día, algo que, sin duda alguna, ha hecho posible que haya alcanzado todos y cada uno de los objetivos y metas que me he propuesto durante toda mi vida.

GRACIAS.

1. Resumen.

Esta es la memoria del Trabajo Final de Máster del Máster en Ingeniería Acústica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universitat Politècnica de València.

En el presente trabajo se realiza la evaluación del comportamiento acústico como absorbente de distintos tipos de fibras vegetales, en concreto fibras de esparto. Para ello se utilizan técnicas de laboratorio que permiten conocer algunas propiedades físicas que pueden predecir el comportamiento como absorbente acústico, tales como la resistencia al flujo de aire y el coeficiente de absorción en incidencia normal.

El objetivo principal es la búsqueda de nuevas materias primas ecológicas que puedan servir para el desarrollo de materiales para la construcción que sustituyan a los actuales, tales como fibras minerales o sintéticas, que conllevan una gran carga ambiental. Con este objetivo, este trabajo sigue las líneas en el camino de la Unión Europea hacia un futuro más sostenible. Además, este trabajo englobado dentro de acústica en la edificación, ha permitido el alcance o mejora de muchas de las competencias del Máster en Ingeniería Acústica así como de competencias propias de la Universitat Politècnica de València.

Palabras clave: Absorbente acústico, Fibras vegetales, Esparto, Ecológicas, Materiales de construcción.

2. Abstract.

This is Final Master Thesis of the Master in Acoustic Engineering of the Escuela Politécnica Superior de Gandía in Universitat Politècnica de València.

In this paper, the evaluation of the acoustic behaviour as absorbent materials of different types of plant fibers, specifically esparto fibers, it is carried out. Several laboratory techniques that allow to measure some physical properties of the materials such as the air-flow resistance and the normal incidence sound absorption coefficient have been used. With these values, the behaviour of the material as an acoustic absorber can be predicted.

The main goal of this project is the search for new ecological raw materials that can be used for the development of construction materials that replace the current ones. For instance, mineral or synthetic fibers, which carry a great environmental load. With this aim, this report follows the lines on the path of the European Union towards a more sustainable future. In addition, this investigation report, included in building acoustics, has allowed the reach or improvement of many of the competences of the Master in Acoustic Engineering as well as the competences of the Universitat Politècnica de València.

Keywords: Acoustic absorber, Plant fibers, Esparto, Ecological, Construction materials.

3. Introducción.

El calentamiento global y el cambio climático se han convertido en la mayor preocupación de la sociedad a nivel mundial, sobre todo entre los jóvenes, tal y como indican los resultados del informe realizado por el centro de investigaciones Pew Research Center [1]. Y una gran prueba de todo esto son las nuevas leyes y políticas en cuanto al desarrollo ecológico y la protección ambiental.

La mayor iniciativa en cuanto a desarrollo sostenible dentro del marco europeo es claramente el llamado proyecto Horizonte 2020, un proyecto internacional dotado de cerca de 80 millones de euros en el periodo temporal desde 2014 a 2020 [2].

Uno de los muchos objetivos de este proyecto europeo trata sobre la búsqueda, investigación y desarrollo de nuevos materiales ecológicos y sostenibles que permitan substituir materiales contaminantes o no ecológicos que se están utilizando en la actualidad en diferentes ámbitos. Por ejemplo, en el caso que nos ocupa, en la construcción y rehabilitación de edificios.

El objetivo principal de este trabajo final de máster es encontrar un material ecológico y natural que cumpla con las características y las exigencias del H2020 y pueda ser utilizado en la construcción para paliar otro problema de contaminación, como es la contaminación acústica, o bien solucionar problemas de calidad acústica de obligado cumplimiento [3].

Este nuevo material pretende ser una alternativa a los absorbentes acústicos clásicos, ya que la mayoría de ellos son fabricados con fibras minerales o con fibras sintéticas, con todos los problemas no solo de contaminación durante su fabricación o al desecharlos, sino también de salubridad que estos pueden conllevar en algunos casos en el momento de la instalación o con el paso del tiempo. Se pretende con este nuevo material, solucionar problemas de aislamiento acústico en la edificación, más en concreto, caracterizando su absorción sonora, para que pueda así, formar parte de nuevas soluciones acústicas sostenibles o amigables con el medio ambiente.

Es importante destacar que la contaminación acústica conlleva grandes problemas de salud a todos los individuos expuestos a esta, al igual que cualquier otro tipo de contaminación [4]. Es por esto por lo que se debe insistir en la importancia del problema y se debe poner gran empeño, ya que no se trata de un tema solo de confort sino también de salud.

Para la búsqueda de nuevos materiales naturales y ecológicos, este estudio se centra en las fibras vegetales, más en concreto en distintas variedades de esparto. Este trabajo surge de la necesidad de seguir investigando en fibras naturales después de los resultados que se obtienen en el trabajo de final de máster de Gonzalo Eleazar Flores Ortega durante el curso pasado (2017-2018) [5]. En el trabajo titulado “Absorbentes acústicos textiles no tejidos, con fibras naturales termoconformadas” se caracterizaron acústicamente diferentes tipos de materiales de fibras naturales, presentando, unas muestras de esparto, con

muy buen comportamiento acústico. Era necesario estudiar la influencia con diferentes tipos de esparto, así como la evolución con el tiempo de la absorción con este tipo de fibras, ya que sus características físicas pueden cambiar, por ejemplo, por diferentes grados de humedad.

3.1. Absorción acústica.

Como es sabido, la mayor parte de los problemas acústicos en el ámbito del acondicionamiento, tales como ecos, focalizaciones, excesiva reverberación, etc., tienen como única solución la aplicación de materiales absorbentes. Estos materiales absorbentes, se aplican, asimismo, en el ámbito del aislamiento acústico, formando parte de particiones multicapa atenuando el efecto de las ondas estacionarias entre placas. El carácter prestacional de la gran mayoría de las normativas acústicas en la edificación ha provocado una creciente oferta de materiales acústicos [6].

Tanto en el aislamiento acústico como en el acondicionamiento de recintos, son necesarios materiales con una gran absorción acústica, o lo que es lo mismo, materiales que sean capaces de “absorber” la energía de las ondas acústicas del ruido (Figura 1).

Estos materiales suelen ser materiales con una estructura porosa o fibrosa, algo que les permite vibrar cuando son excitados por una onda mecánica. De este modo son capaces de transformar la energía de esta onda en energía cinética o en calor.

Existen diferentes estudios acerca de los mecanismos de absorción de la energía acústica en el interior de las porosidades de distintos materiales, diferenciando entre los distintos tipos de poros o los materiales por los que son compuestos. Estos poros en ocasiones son clasificados según su configuración microscópica en celulares, fibrosos o granulares.[7]

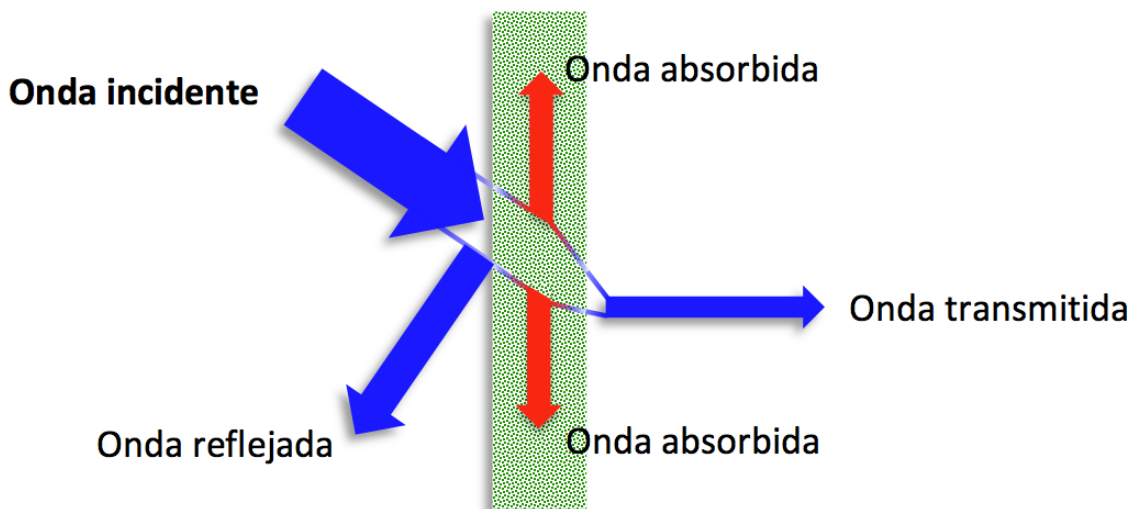


Figura 1: Absorción acústica.

Fuente: <http://www.ia2.es/un-coeficiente-de-absorcion-acustica-mayor-que-la-unidad/>.

Existen normativas [8] que nos ayudan a clasificar distintos materiales absorbentes en función de su potencial de absorción. En [8], a partir de valores que se obtienen en cámara reverberante normalizada [9], se definen cinco clases de absorbentes. Los materiales que presentan la 'Clase A' son los más absorbentes y los pertenecientes a la 'Clase E' los menos absorbentes, en esta clasificación.

Tabla 1: Clasificación de materiales según su absorción.

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

Fuente: UNE-EN ISO 11654.

Para poder obtener la clasificación que se muestra en la tabla anterior, se necesita el ensayo normalizado en cámara reverberante, y obtener la absorción sonora en incidencia aleatoria [9]. Este ensayo intenta reproducir el esquema de montaje lo más fiel posible a cómo será el montaje del material absorbente en su utilización final en la edificación. Para este tipo de ensayo, se necesitan muestras del orden de 10 a 12 m² de superficie. Estas cantidades para materiales todavía en fase de desarrollo son inviables. Existen alternativas a la cámara reverberante normalizada [10], y en la Escuela Politécnica Superior de Gandía se dispone de estas alternativas, pero también existe la posibilidad de realizar el estudio de la absorción sonora en incidencia normal, utilizando un tubo de impedancia, y de forma protocolizada por norma [11]. En el punto 4 de esta memoria de trabajo final de máster, se describe con detalle el procedimiento de medida del coeficiente de absorción en incidencia normal.

3.2. Fibras naturales.

A lo largo de la historia de la humanidad las fibras naturales han desarrollado un papel importante en el ámbito de la construcción, existen datos de la utilización de fibras de hojas y madera que se utilizaban como refuerzo de bloques compuestos con bases de arcillas para la construcción de viviendas e incluso para soportar cargas moderadas [12].

Existen numerosas clasificaciones de las fibras naturales en las que se incluyen a las fibras minerales y las provenientes de animales, aunque este trabajo se centre solamente en el estudio de fibras de origen vegetal. En (Figura 2) se muestra el siguiente diagrama donde se clasifican los distintos tipos de fibras que se conocen según su origen:[13]

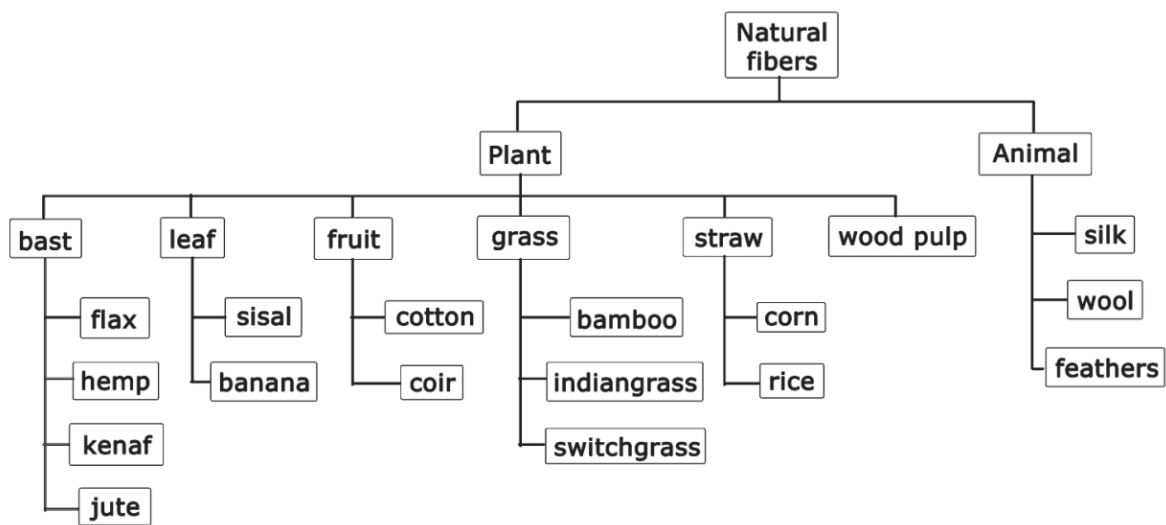


Figura 2: Clasificación de fibras naturales.

Fuente: Green Composites: An Overview [13].

Todas estas fibras a lo largo de la historia han sido de utilidad de una u otra manera para el hombre, pero con el avance en el desarrollo de los polímeros a partir de la segunda mitad del siglo XX, estas fueron desplazadas transitoriamente de la esfera industrial; pero con la inminente escasez de petróleo en un futuro cercano y la creciente preocupación ambiental por parte de los países del primer mundo se está reconsiderando la utilización de las agro-fibras como sustituto de gran parte de materiales que están siendo utilizados hasta la actualidad mucho menos ecológicos [12].

El uso de fibras naturales en el ámbito de acústica civil o acústica arquitectónica, también se ha ido expandiendo en los últimos años. En el apartado 5 de esta memoria de trabajo final de máster se enumeran algunos de los autores que han participado en este incremento del uso de fibras naturales.

3.3. Esparto.

La stipa es una planta herbácea dentro de la familia de las gramíneas, perenne, que forma una mata muy densa, con aproximadamente 250 especies distribuidas por todo el globo.

Muchas especies están adaptadas a suelos áridos, semi-desiertos y estepas, a las que les dan nombre, caracterizan y se emplean para evitar la erosión de los suelos y la desertización. En zonas apropiadas forman praderas densas solas o en compañía de otros grupos. Aunque en agricultura suelen ser consideradas malezas, algunas especies se emplean por la resistencia de sus fibras para realizar cuerdas, cestos y otras urdimbres. Por su gran capacidad de regeneración y su resistencia a desaparecer son un alimento importante para muchos herbívoros y caracterizan muchas praderas salvajes en zonas secas de todo el planeta

Stipa tenacissima es el nombre científico de esta especie de planta la cual se conoce comúnmente como “esparto”. Utilizado en la fabricación de papel y cordelería. Especie del sur de Europa y norte de África, de hojas envainadas, con vaina coriácea que presenta frecuentemente margen algodonoso, liguladas, ásperas, estrechas (hasta 5 mm de ancho) y largas pudiendo llegar a alcanzar más de un metro de largo. Florece y fructifica de marzo a mayo [14] [15] [16].

Para la presente investigación se dispone de 8 variaciones de esparto. Estas son: ***Esparto Verde, Esparto Cocido, Esparto Cocido Picado, Esparto Estopa y las variedades de esparto Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3***. Ya se han mostrado algunos resultados de las 5 primeras en [5], siendo las tres últimas variedades distintas de esparto de diferentes partes del mundo. Estas tres variedades se encuentran en estado crudo, o lo que es lo mismo, han sido cortadas y secadas de manera natural por el paso del tiempo, no han sufrido ningún tipo de cocción ni ningún tratamiento especial.

Variedad Tipo 1: Variedad importada desde Pakistán, criada en estado salvaje y puede llegar a los 2 metros de longitud. En su país de origen es utilizada en trabajos de artesanía para elaborar sillas, alfombras, cestos, etc.

A partir del manojo de esparto de esta variedad proporcionado por el proveedor, se han preparado tres muestras iguales para posteriormente someterlas a estudio y poder promediar los resultados. Para preparar dichas muestras se ha cortado cada hoja en trozos de unos 4,7 cm y se han dispuesto una al lado de otra con la ayuda de un porta-muestras formando una especie de tapón plano.

En las siguientes fotografías podemos ver la muestra dentro del tubo de impedancias preparada para realizar la medida, además de, una fotografía hecha con un microscopio para poder ver la estructura interna de cada hoja y apreciar su porosidad, y por último, otra vez la muestra dentro del tubo donde podemos medir su longitud.

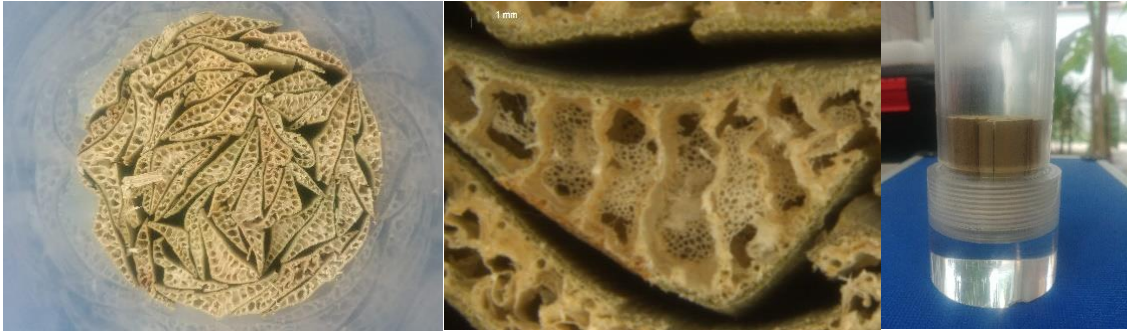


Figura 3: Fotografías de las muestras de esparto Tipo 1.

Variedad Tipo 2: Variedad importada desde Túnez, especie cultivada para su comercio. En su país de origen es utilizada en trabajos de artesanía y como especia para sazonar algunas comidas.

Para preparar las tres muestras de esta variedad se ha utilizado parte del manajo de esparto recibido y se ha hecho una maraña entrecruzando las distintas hojas y apretando el esparto dentro del porta-muestras hasta conseguir el resultado deseado.

En las siguientes fotografías podemos ver la muestra ya preparada, una fotografía de la muestra realizada con un microscopio lupa y, por último, la muestra dentro del tubo de impedancias donde podemos apreciar que su extremo no es totalmente plano y podemos medir más o menos su espesor.



Figura 4: Fotografías de las muestras de esparto Tipo 2.

Variedad Tipo 3: Variedad muy similar a la variedad Tipo 2 pero con distinta procedencia, en este caso, la muestra ha sido importada desde Egipto. En su país de origen es utilizada como especia y para realizar trabajos de artesanía.

En este caso, las muestras han sido preparadas siguiendo el mismo procedimiento que con las de la variedad de esparto Tipo 2, se ha enmarañado un pequeño manajo de hojas con la ayuda de un porta-muestras hasta conseguir una especie de tapón con la consistencia suficiente.

A continuación, en las fotografías, podemos ver una muestra ya preparada, donde se puede ver la maraña de hojas que la conforman. La segunda foto ha

sido realizada con una lupa de hasta 80 aumentos, en el servicio de microscopía electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia, donde podemos ver algunas hojas entrelazadas con las de su alrededor formando huecos entra estas. En la tercera foto vemos la muestra dentro del tubo de impedancias y podemos ver que al igual que en la variedad Tipo 2 su extremo no es totalmente plano.



Figura 5: Fotografías de las muestras de esparto Tipo 3.

4. Medidas experimentales.

Es posible conocer el comportamiento acústico de un material a partir de la resistencia al flujo y del coeficiente de absorción acústica. A continuación, se describe el método utilizado para medir dichas propiedades físicas de cada una de las muestras.

Como se ha mencionado anteriormente, es posible conocer el comportamiento acústico en incidencia normal a partir de la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 [11]. Con el procedimiento descrito en esta normativa y gracias a un tubo de impedancia es posible conocer la absorción sonora con apenas muestras de 4 cm de diámetro. Esta es la principal ventaja del método descrito en [11]. Permiten el estudio acústico de un nuevo material sin necesitar una gran producción de este antes, algo que en ocasiones puede ser muy caro.

4.1. Coeficiente de absorción acústica (UNE EN ISO 10534-2:2002).

Se definen dos métodos similares pero distintos para medir el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, los dos descritos en cada una de las partes de la norma UNE EN ISO 10534.

En el caso que nos ocupa se utiliza el método descrito en la parte 2, con el cual es posible obtener el coeficiente de absorción acústica para incidencia normal de cada una de las muestras utilizando el método de función de transferencia.

La norma UNE EN ISO 10534-2:2002 [11] define el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal (α) como el cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra de ensayo y la energía acústica incidente, para una onda plana con incidencia normal.

La instrumentación necesaria para poder realizar cada una de las medidas es la siguiente:

- Tubo de impedancias. El que se dispone en la Escuela Politécnica Superior de Gandía y utilizado para las medidas que se muestran en esta memoria de trabajo final de máster es un tubo de metacrilato con una longitud de 1.35 metros, un diámetro interior de 4cm y una pared de 5 mm el cual tiene dos agujeros preparados para poder colocar los micros.
- Altavoz. El que se dispone en la Escuela Politécnica Superior de Gandía y se ha utilizado para las medidas que se muestran en esta memoria de trabajo final de máster es un altavoz Beyma modelo CP800TI colocado en un extremo del tubo de impedancias de manera estanca.
- Sistema de análisis: El que se dispone en la Escuela Politécnica Superior de Gandía y se ha utilizado para las medidas que se muestran

en esta memoria de trabajo final de máster es el analizador Pulse modelo 3560-C de Brüel & Kjaer. (N.º serie 2433879).

- Micrófonos de presión sonora: En la Escuela Politécnica Superior de Gandía se dispone de una gran variedad de micrófonos. Los utilizados para las medidas que se muestran en esta memoria de trabajo final de máster son 2x Micrófono preamplificado de 1/2" modelo 2669 de Brüel & Kjaer (Nº serie 2490538 y 2490539), así como un calibrador acústico Tipo 1 modelo 4231 de Brüel & Kjaer.

Dicho material se distribuye y se conecta inicialmente según aparece en la siguiente imagen (Figura 6).

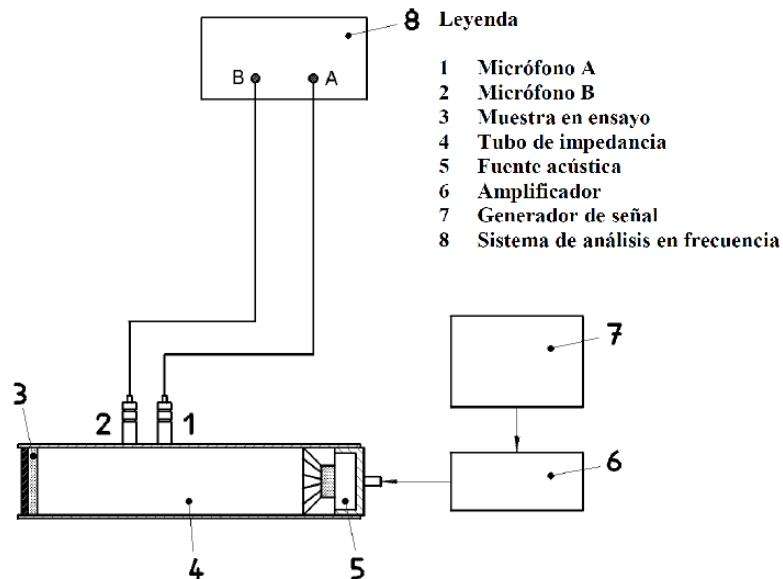


Figura 6: Diagrama de conexiones para el método descrito en UNE EN ISO 10534-2:2002.

Fuente: UNE EN ISO 10534-2:2002[11]

Este montaje viene definido en la norma [11], aunque en nuestro caso, nuestro sistema de análisis dispone tanto del amplificador como del generador de señal, todo ello controlado mediante software desde un PC (Figura 7).

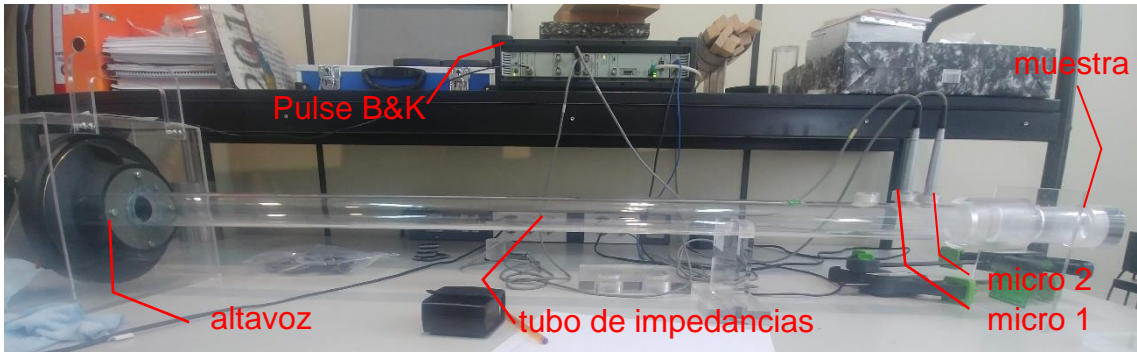


Figura 7: Montaje 1 con la instrumentación disponible en la EPSG.

Una vez todo el cableado está listo y todo el sistema está ya en funcionamiento y listo para ser utilizado, se deben de calibrar cada uno de los micrófonos. Una vez calibrados, se disponen en su posición en el tubo de impedancias, cuidando que se cierre herméticamente con la ayuda de una junta de goma y se tiene en cuenta la posición de los micros respecto a la pared del tubo como marca la norma [11] (Figura 8).

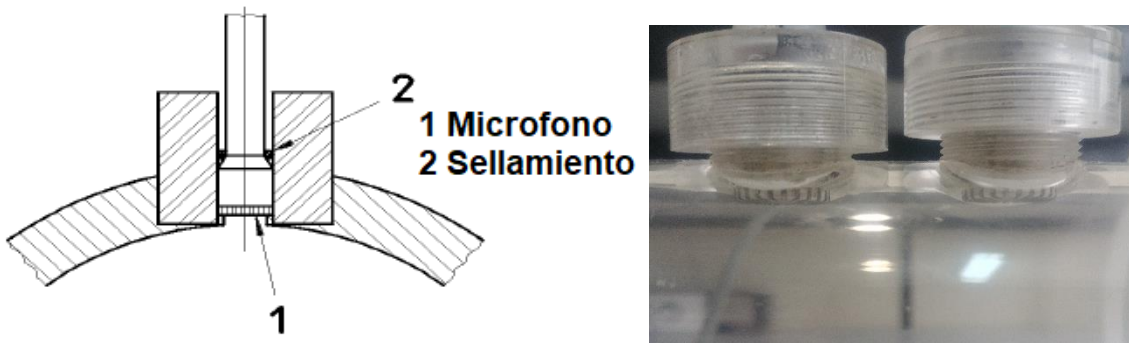


Figura 8: Colocación correcta de los micrófonos en su posición en el tubo.

Es necesario registrar la función de transferencia entre micrófono 1 y el micrófono 2 utilizando el sistema de análisis Pulse de Brüel & Kjaer, es importante registrar tanto la parte real como la fase entre los dos micros. Para poder realizar la corrección para el desajuste entre micros, se debe repetir el mismo procedimiento, pero intercambiando ambos micros de posición (Figura 9).

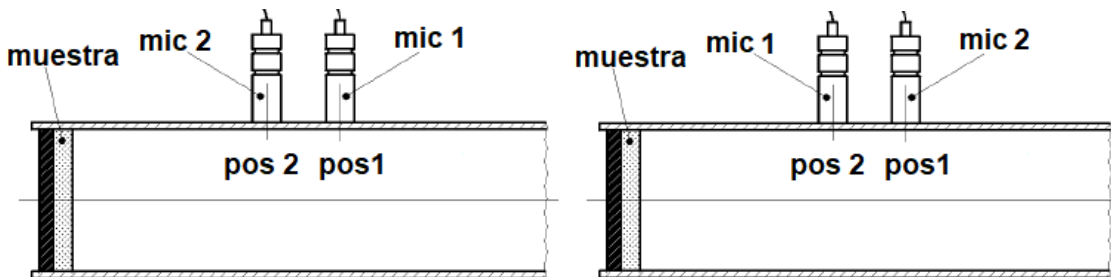


Figura 9: Posiciones de ambos micros para registrar la función de transferencia

La función de transferencia se define a partir del cociente de presiones.

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} \times \frac{S_{22}}{S_{21}} \quad (1)$$

El coeficiente de reflexión viene dado por la siguiente ecuación (2), en donde 'd' es la distancia entre micrófonos, 'L' la distancia entre el extremo de la muestra y la posición de micro 2 y 'k' el número de onda

$$r = \frac{H_{12} - e^{-jkd}}{e^{jkd} - H_{12}} e^{j2k(L+d)} \quad (2)$$

Una vez realizados todos los cálculos hasta este punto, se está en disposición de calcular el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, que viene dado por la siguiente ecuación (3):

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (3)$$

4.2. Resistencia al Flujo (Ingard & Dear).

Como se ha comentado al principio de este capítulo, la resistencia al flujo de aire es otro parámetro físico de cada material que tiene una correlación con las propiedades acústicas y de estructura interna.

Se entiende como resistencia al flujo de aire de una lámina a la diferencia de presión entre dos puntos y la velocidad [17].

Existe una normativa, UNE-EN ISO 29053:1994 [18], en la cual se describe la metodología a seguir para medir la resistencia al flujo de aire en materiales porosos, pero esta supone un coste muy elevado con complejos montajes e instrumentación específica.

En cambio, en 1985, Ingard & Dear [19] propusieron un método de medida alternativo, basado en el tubo de ondas estacionarias con dos micrófonos, para la obtención de este parámetro a partir de la función de transferencia. La instrumentación es prácticamente la misma que la utilizada para medir el coeficiente de absorción acústica descrito en este mismo apartado.

Aprovechando que se dispone de los medios necesarios para seguir este segundo procedimiento, se ha utilizado este método alternativo para medir la resistencia al flujo de cada una de las muestras.

La instrumentación necesaria para poder realizar cada una de las medidas es la misma que la descrita en el apartado 4.1, a excepción de la disposición de la muestra y los micrófonos en el tubo de impedancia. Además, en esta ocasión se ha utilizado un tubo un tanto más largo, 1.7 metros.

En la figura 10 podemos ver dos fotografías de los dos tubos, donde podemos ver la diferencia entre ellos tanto en la disposición de la muestra como la disposición de los micrófonos.



Figura 10: Fotografías de los tubos utilizados para las medidas.

Dicho material se distribuye y se conecta inicialmente según aparece en la siguiente imagen (Figura 11).

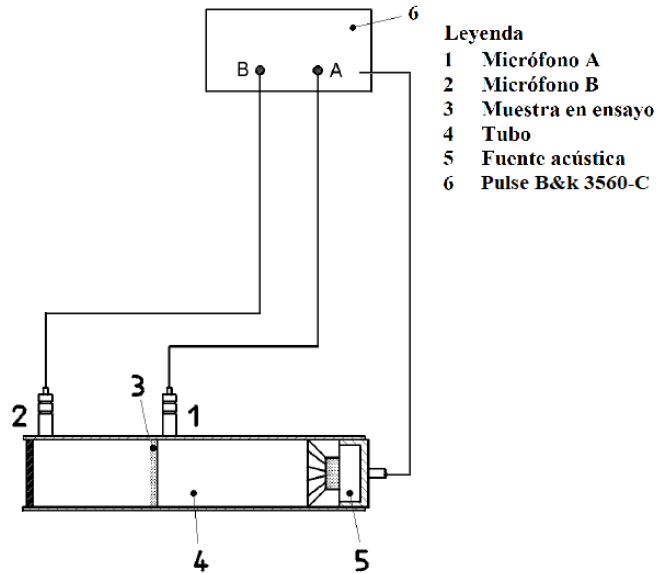


Figura 11: Diagrama de conexiones para el método descrito por Ingard & Dear.

A continuación, podemos ver una fotografía del montaje real realizado con el instrumental disponible en la EPSG.

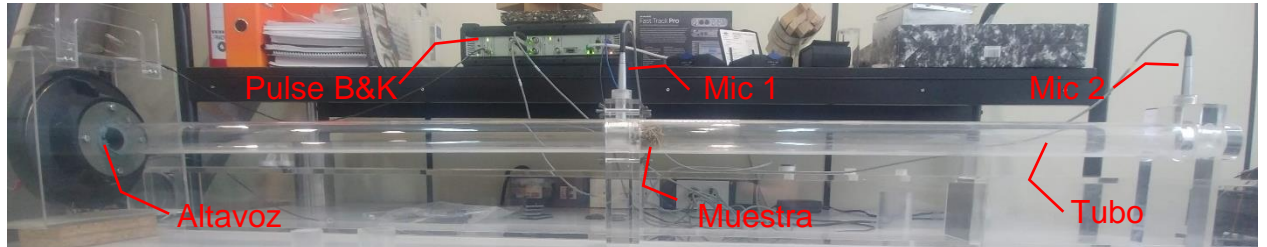


Figura 12: Montaje 2 con la instrumentación disponible en la EPSG.

A diferencia del primero, este tubo tiene una pequeña regla preparada en la posición donde se coloca la muestra (Figura 13), de este modo es mucho más fácil medir el espesor que ocupa cada una.

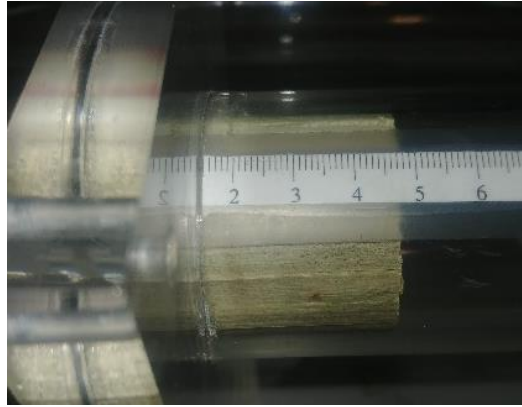


Figura 13: Muestra preparada en el tubo.

Al igual que en todas las medidas anteriores, se deben calibrar los dos micrófonos.

Es importante que al igual que en el caso anterior, cada vez que se coloca un micrófono en su posición en el tubo, se tenga muy en cuenta que el cierre sea hermético y no existan fugas de aire (Figura 8).

Para la toma de medidas, se han seguido las pautas marcadas en la norma UNE-EN ISO 10534-2 [11], que nos permite medir las diferencias de presión utilizando el método de la función de transferencia.

Para cada una de las muestras se han de realizar dos mediciones, igual que en el caso de la absorción acústica, intercambiando la posición de los dos micros. De este modo se pueden realizar las correcciones pertinentes.

Los siguientes esquemas (Figura 14) muestran las dos posiciones de micro que se deben de registrar para medir cada muestra. Es importante registrar tanto la parte real como la imaginaria de cada medida con el analizador de señal.

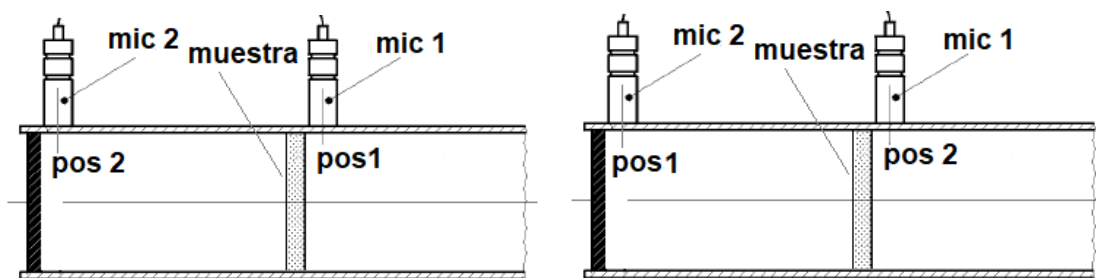


Figura 14: Posiciones de ambos micros y muestra para registrar la función de transferencia.

Una vez realizadas las dos medidas, se dispone de las funciones de transferencia compleja H_{12} del montaje 1 y H_{21} del montaje 2.

Es posible calcular la resistencia al flujo de aire utilizando la ecuación 4.

$$\sigma = \left| \text{imag} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right| \quad (4)$$

Para aquellas frecuencias que cumplen la condición siguiente:

$$L = \frac{\lambda(2n - 1)}{4} \quad (5)$$

Siendo ' L ' la distancia entre la muestra y el final del tubo, ' n ' números enteros y ' λ ' la longitud de onda.

5. Modelos empíricos.

Se han propuesto una gran cantidad de modelos empíricos para materiales absorbentes acústicos que simulan su comportamiento acústico a partir del cálculo de su impedancia característica y la su constante de propagación.

El modelo más utilizado es el propuesto por Delany & Bazley en 1970 [20] que, además, ha sido incluido en la norma UNE-EN ISO 12354-6:2004 [21].

Además de este modelo, existen otros muy conocidos también como el publicado en 1986 por Dunn & Davern [22], el cual estudia cuatro tipos de espumas de poliuretano reticulado, demostrando en esta publicación el cálculo práctico para la impedancia acústica.

Una gran cantidad de investigadores han desarrollado distintos modelos a partir de estos, algunos ejemplos son: Garai & Pompoli (2005) [23], Voronina (1994) [24], Oliva & Hongosito (2013) [25].

En cuanto al estudio con materiales orgánicos, son Berardi, Iannace, Aerenas, Rebolledo, del Rey, Alba, Ramis, Carbajo, Godinho, Sanchis y Escuder [26] [27] [28] [29] los estudios realizados más relevantes.

Para analizar y poder predecir el comportamiento de las muestras de esparto bajo estudio se implementa utilizando Matlab el modelo de Delany & Bazley y se utilizan una gran cantidad de coeficientes de los autores antes citados, para posteriormente utilizar los que menor error introducen, de este modo se consigue ajustar al máximo el modelo (Tabla 2).

Además de los coeficientes publicados por estos autores, se ha tomado la decisión de utilizar también los obtenidos por Flores [5] durante la investigación predecesora a la presente por ser coeficientes obtenidos de distintos tipos de esparto (Tabla 3).

Tabla 2: Coeficiente obtenidos por varios autores sobre fibras vegetales.

	Lana de Roca	Foam			Kenaf			Coco			Celulosa	Madera		Corcho		Paja	Caña/corteza		Cáñamo
	Arenas	Dunn&Davern	Garai&Pompoli	Delany&Bazley	Del Rey	Arenas	Berardi	Del Rey	Arenas	Berardi	Arenas	Arenas	Berardi	Arenas	Berardi	Arenas	Arenas	Berardi	Berardi
C1	0,0571	0,0114	0,0780	0,0570	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	0,7540	-0,3690	-0,6230	-0,7540	-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	0,0870	-0,0985	0,0740	0,0870	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	0,7320	-0,7580	-0,6600	-0,7320	-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	0,1890	0,1680	0,1590	0,1890	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	0,5950	-0,7150	-0,5710	-0,5950	-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	0,0978	0,1360	0,1210	0,0980	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	0,7000	-0,4910	-0,5300	-0,7000	-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 3: Coeficientes obtenidos por Flores [5] con distintos espartos.

	Flores					
	Esparto Verde	Esparto seco	Esparto cocido	Esparto cocido picado	Esparto Estopa	Esparto estopa glue
C1	0,1359	0,2355	0,1428	0,4467	1,8063	1,0655
C2	0,161	-0,7769	-1,004	-1,0452	-0,0394	1,1523
C3	0,065	0,0678	0,0974	-0,006	-0,1489	-0,5478
C4	-0,4014	-0,2371	-0,3971	2,5556	0,7933	1,4569
C5	0,1113	0,1037	0,1287	0,1414	0,3881	0,2682
C6	-0,5323	-0,5181	-0,5868	-0,359	-0,0067	0,4418
C7	0,1534	-0,0045	0,0735	0,0897	-0,688	0,159
C8	-0,6343	-2,2924	-0,3614	0,2663	1,2494	-0,031

Siguiendo el modelo de Delany & Bazley, con estos coeficientes se calcula la impedancia característica normalizada. (ecuación 6)

$$Z = Z_0(1 + C_1X^{C_2} - jC_3X^{C_4}) \quad (6)$$

La impedancia acústica del aire ' Z_0 ' viene dada por la densidad del aire y la velocidad de propagación del sonido en él.

$$Z_0 = \rho_0 \times c_0 \quad (7)$$

La constante de propagación del material se calcula con la siguiente ecuación (8):

$$G = K(C_5X^{C_6} + j(1 + C_7X^{C_8})) \quad (8)$$

En donde ' X ' depende de la densidad del aire medida en (Kg m^3), la frecuencia ' f ' en (Hz) y la resistividad al flujo del aire ' r ' medida en (Pa s m^{-2}). Se calcula con la ecuación (9)

$$X = \frac{\rho_0 \times f}{r} \quad (9)$$

En la ecuación que define la constante de propagación (8), la variable ' K ' depende de la frecuencia angular y la velocidad del sonido en el aire ' c_0 ' (343 m/s) (ecuación 10).

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (10)$$

La impedancia de cierre se calcula con la siguiente ecuación (ecuación 11), en donde ' d ' es el espesor de la muestra en metros.

$$Z_C = Z \coth(G \times d) = Z_{CR} + Z_{CI} \quad (11)$$

' Z_{CR} ' y ' Z_{CI} ' son las dos componentes de la impedancia de cierre compleja.

Utilizando esta impedancia de cierre, se calcula el coeficiente de absorción estimado (ecuación 12).

$$\hat{\alpha} = \frac{4Z_0Z_{CR}}{|Z_{CR}|^2 + 2Z_0Z_{CR} + Z_0^2} \quad (12)$$

Para encontrar los coeficientes que predicen el comportamiento, se programa una función iterativa buscando la reducción del error cuadrático (ecuación 13).

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \hat{\alpha}_i)^2 \quad (13)$$

En donde ' α_i ' es el coeficiente de absorción acústica medido en laboratorio a cada frecuencia ' i ', y ' $\hat{\alpha}$ ' es el coeficiente de absorción acústica estimado.

Para poder disminuir la función del error. Es necesario derivarla respecto a los coeficientes e igualarla a cero.

$$\frac{\delta\varepsilon}{\delta C_j} = 2 \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \hat{\alpha}_i) \frac{\delta\hat{\alpha}_i}{\delta C_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, 8 \quad (14)$$

Una vez obtenidos los coeficientes con la ayuda de Matlab, es posible calcular el error relativo de predicción, con el que se puede medir la relación entre los valores medidos y los de la predichos con el modelo empírico.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{\alpha}_i - \alpha_i}{\alpha_i} \right| \quad (15)$$

Donde ' N ' es el número de muestras de cada tipo de esparto, 3 en este caso.

Los valores de absorción acústica medida en el laboratorio y resistividad al flujo del aire son datos de entrada de la función de Matlab programada para resolver el modelo empírico y obtener los coeficientes predictores.

6. Resultados.

En este apartado, se presentan las muestras las cuales han sido sometidas a todas las mediciones expuestas hasta este punto del presente trabajo y se muestran todos los resultados de cada uno de los tipos de esparto además de las pertinentes comparaciones con los resultados obtenidos por Flores [5].

6.1. Materiales.

En la tabla 4 se enumeran las referencias de los espartos utilizados, su espesor y la densidad. De cada tipo de esparto, se han preparado un total de tres muestras, con las que se pretende promediar los resultados.

Tabla 4: Espesores y Densidades de los distintos tipos de esparto.

Especie de Esparto	Espesor de la muestra (cm)	Densidad de la muestra (g/cm ³)
Esparto Verde	6,7	0,22
Esparto Seco	6,2	0,17
Esparto Cocido	6,8	0,17
Esparto Cocido Picado	7,5	0,15
Esparto Estopa	6,8	0,10
Esparto Tipo 1	4,7	0,19
Esparto Tipo 2	4,4	0,13
Esparto Tipo 3	3,9	0,10



Figura 15: Muestra de Esparto Verde.



Figura 16: Muestra de Esparto Seco

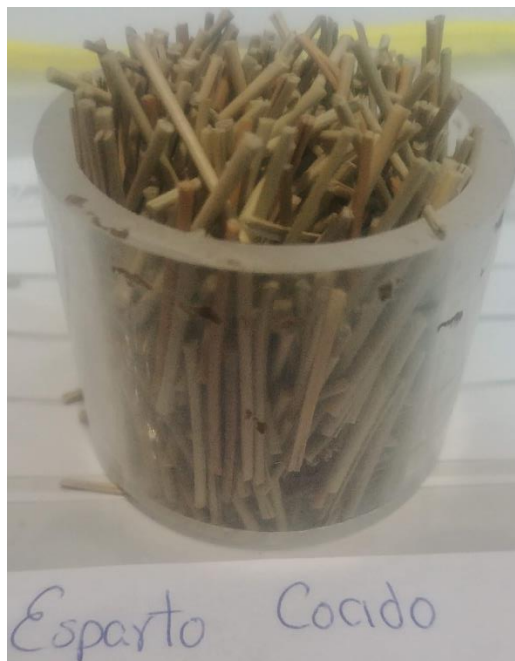


Figura 17: Muestra de Esparto Cocido



Figura 18: Muestra de Esparto Cocido Picado



Figura 19: Muestra de Esparto Estopa.



Figura 20: Muestras de esparto Tipo 1.



Figura 21: Muestras de esparto Tipo 2.



Figura 22: Muestras de esparto Tipo 3.

6.2. Coeficiente de absorción y resistencia al flujo.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del ensayo del coeficiente de absorción en incidencia normal [11]. Para cada tipo de esparto, se han realizado las mediciones de 3 muestras, y se toma como valor del coeficiente de absorción en incidencia normal, el valor promedio de las 3 mediciones.

Debido a las limitaciones por el diámetro del tubo de ondas estacionarias, solamente son válidos los resultados entre 100Hz y 3150Hz. Por lo tanto, solamente se muestran los resultados obtenidos dentro de este intervalo.

Tabla 5: Coeficientes de absorción acústica de los espartos Tipo1, Tipo2 y Tipo3.

F (Hz)	Coeficiente de absorción acústica (α)					
	Tipo 1	Desviación típica (σ)	Tipo 2	Desviación típica (σ)	Tipo 3	Desviación típica (σ)
100	0,08	0,01	0,07	0,01	0,04	0,02
125	0,12	0,01	0,09	0,01	0,06	0,02
160	0,16	0,01	0,13	0,01	0,09	0,02
200	0,19	0,01	0,13	0,00	0,10	0,02
250	0,21	0,01	0,14	0,00	0,12	0,01
315	0,25	0,01	0,14	0,01	0,13	0,01
400	0,30	0,01	0,15	0,01	0,15	0,00
500	0,40	0,01	0,18	0,02	0,19	0,00
630	0,55	0,01	0,25	0,03	0,26	0,00
800	0,75	0,01	0,39	0,05	0,37	0,01
1000	0,91	0,01	0,56	0,07	0,51	0,01
1250	0,98	0,00	0,71	0,06	0,67	0,01
1600	0,94	0,01	0,77	0,02	0,80	0,03
2000	0,87	0,01	0,73	0,04	0,80	0,05
2500	0,81	0,00	0,65	0,02	0,70	0,06
3150	0,81	0,00	0,65	0,08	0,63	0,07

Como se puede ver en las columnas de la desviación típica de la tabla 5 de las tres muestras de cada tipo de espartos se obtienen resultados casi idénticos. Un ejemplo de ello se ilustra en la figura 23.

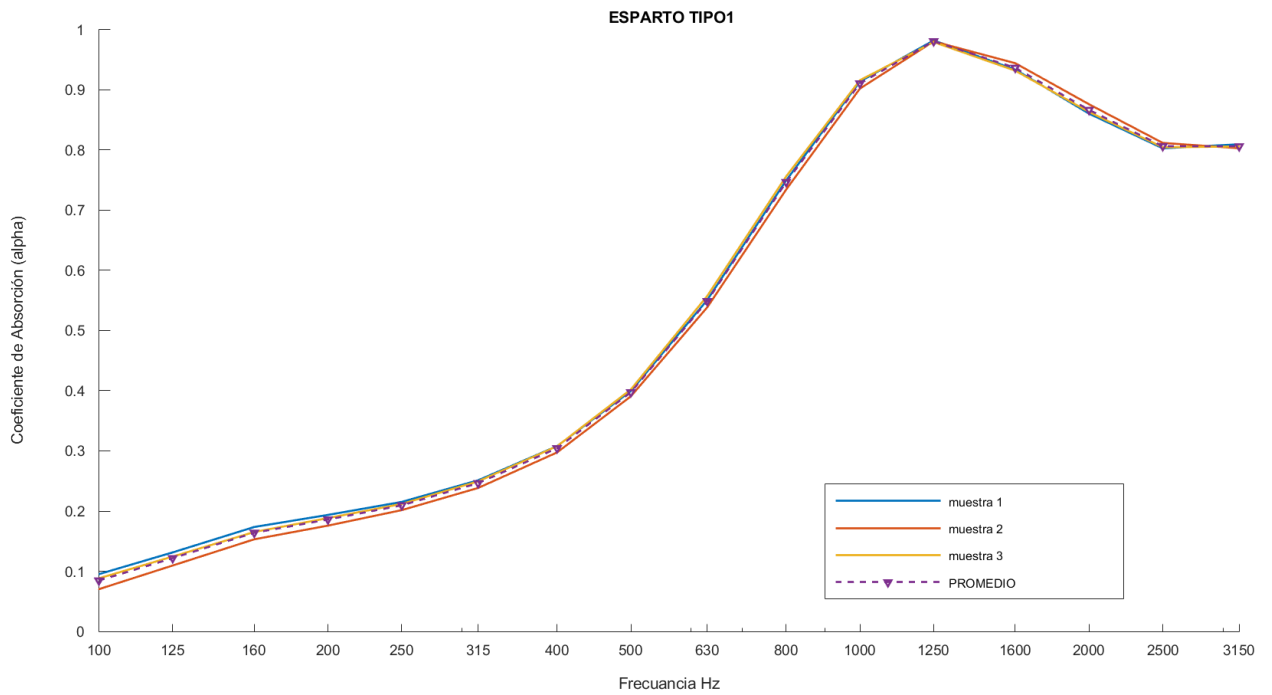


Figura 23: Coeficiente de absorción de las tres muestras del esparto Tipo 1 y su promedio.

En la figura 24 se muestran los valores promedio de la tabla 5 para las distintas variedades de esparto Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3.

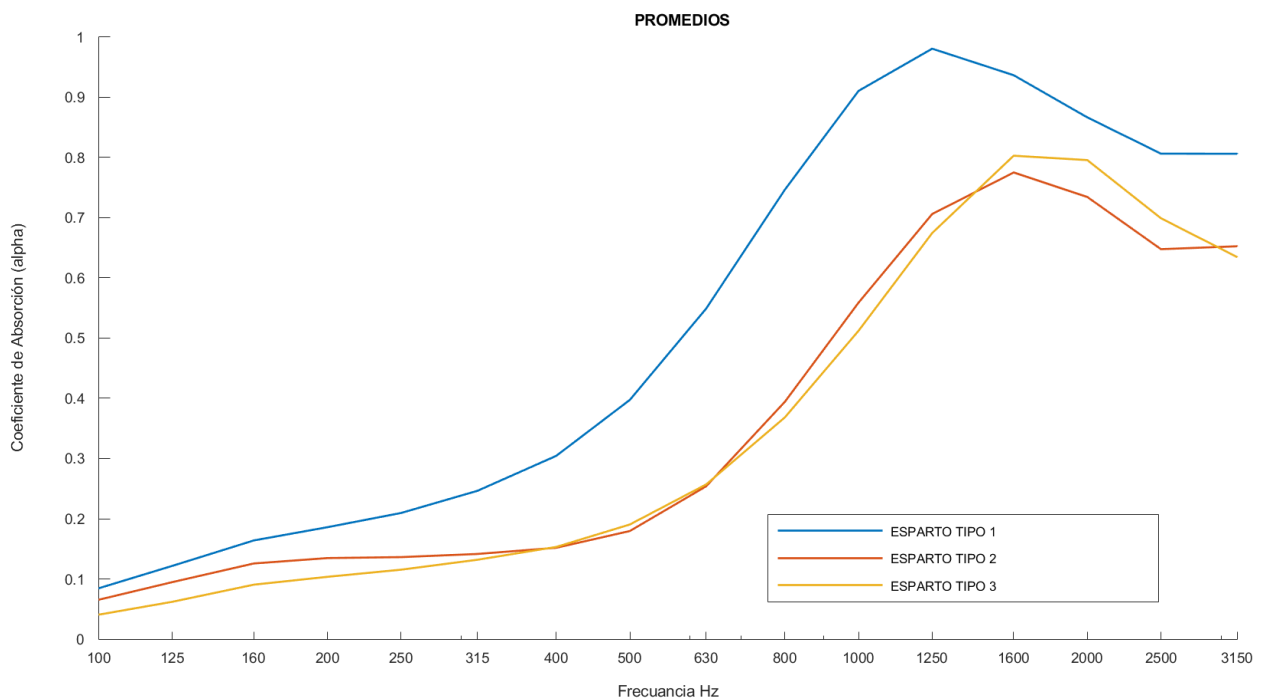


Figura 24: Coeficiente de absorción de los espartos Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3.

En cuanto a la resistencia al flujo los resultados promediados de las tres muestras de cada uno de los tipos de esparto es el que se muestra en la siguiente tabla. Se muestran también los valores de la resistividad al flujo, definida como la resistencia al flujo por unidad de espesor de la muestra.

Tabla 6: Resistencia y resistividad al flujo de aire de todas las muestras.

	Resistencia al Flujo [Pa s/m]	Desviación Típica [Pa s/m]	Resistividad al Flujo [kPa s/m²]	Desviación típica [kPa s/m²]
Esparto Tipo 1	409	5	8,7	0,1
Esparto Tipo 2	409	9	9,3	0,2
Esparto Tipo 3	410	4	10,5	0,1

6.3. Modelado empírico.

Después de programar en código Matlab el cálculo para el modelo empírico descrito con detalle en el apartado 5 de esta memoria para cada tipo de esparto, se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los casos.

- Esparto Tipo 1.

Coefficientes estimados (Tabla 7):

Tabla 7: Coeficientes del modelo empírico para el esparto Tipo 1.

Coeficientes Esparto Tipo 1	
C1	0,27221039
C2	-1,01300708
C3	0,61204463
C4	1,10003201
C5	0,01911056
C6	1,23566634
C7	0,48409888
C8	-0,07721447

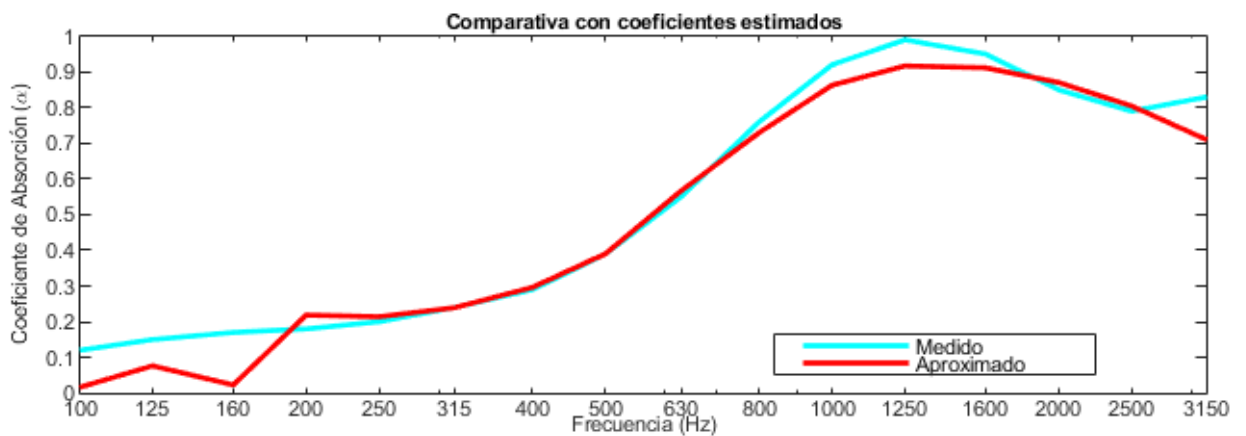


Figura 25: Coeficiente de absorción medido y predicho con el modelo empírico para el esparto Tipo 1.

El error absoluto (expresado en $\pm \alpha$) y el error relativo (expresado en %) miden como se acerca la simulación a los datos medidos, a continuación, se muestran estos para el esparto Tipo 1

Tabla 8: Error Absoluto y Relativo para el modelo empírico del esparto Tipo 1.

F (Hz)	Error Absoluto (abs ($\alpha_{\text{medido}} - \alpha_{\text{predicho}}$))	Error Relativo (%)
100	0,07	81
125	0,05	37
160	0,14	86
200	0,03	18
250	0,00	2
315	0,01	3
400	0,01	3
500	0,01	2
630	0,02	3
800	0,02	2
1000	0,05	5
1250	0,06	6
1600	0,02	3
2000	0,00	0
2500	0,00	0
3150	0,10	12

- **Esparto Tipo 2.**

Coefficientes estimados (Tabla 11):

Tabla 9: Coeficientes del modelo empírico para el esparto Tipo 2.

Coeficientes Esparto Tipo 2	
C1	0,93055681
C2	1,47508992
C3	-1,52464317
C4	-0,74462855
C5	4,05896385
C6	-0,31953279
C7	8,9038925
C8	-0,07910427

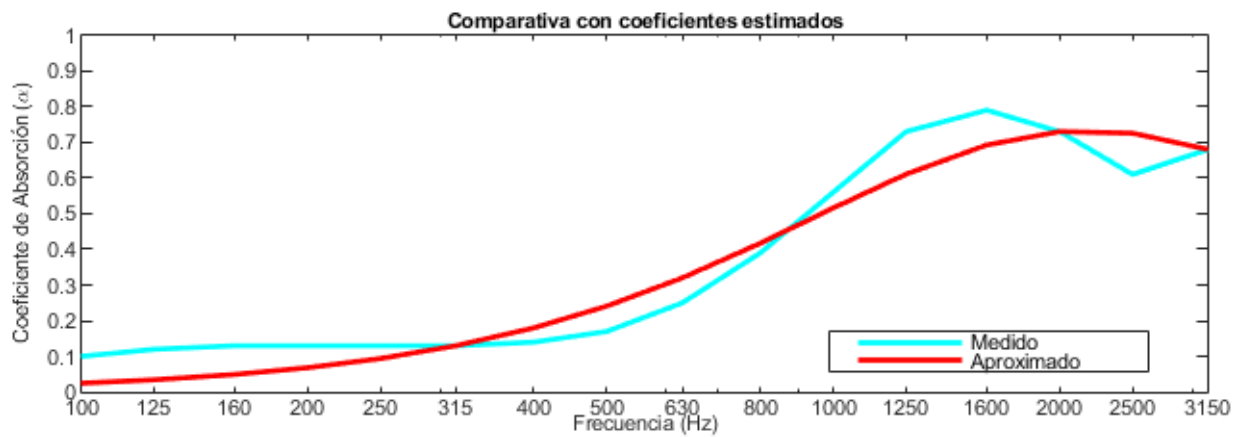


Figura 26: Coeficiente de absorción medido y predicho con el modelo empírico para el esparto Tipo 2.

El error absoluto y el relativo predicho en este modelo empírico es el siguiente:

Tabla 10: Error Absoluto y Relativo para el modelo empírico del esparto Tipo 2.

F (Hz)	Error Absoluto (abs ($\alpha_{\text{medido}} - \alpha_{\text{predicho}}$))	Error Relativo (%)
100	0,04	62
125	0,06	64
160	0,08	61
200	0,07	49
250	0,04	31
315	0,01	8
400	0,03	19
500	0,06	34
630	0,07	26
800	0,02	6
1000	0,04	8
1250	0,10	13
1600	0,08	11
2000	0,00	1
2500	0,08	12
3150	0,03	4

- **Esparto Tipo 3.**

Coefficientes estimados (Tabla 13):

Tabla 11: Coeficientes del modelo empírico para el esparto Tipo 3.

Coeficientes Esparto Tipo 3	
C1	1,36847135
C2	-1,49400951
C3	0,9635993
C4	1,73985072
C5	0,24701003
C6	-5,72311524
C7	0,04554095
C8	-9,94819936

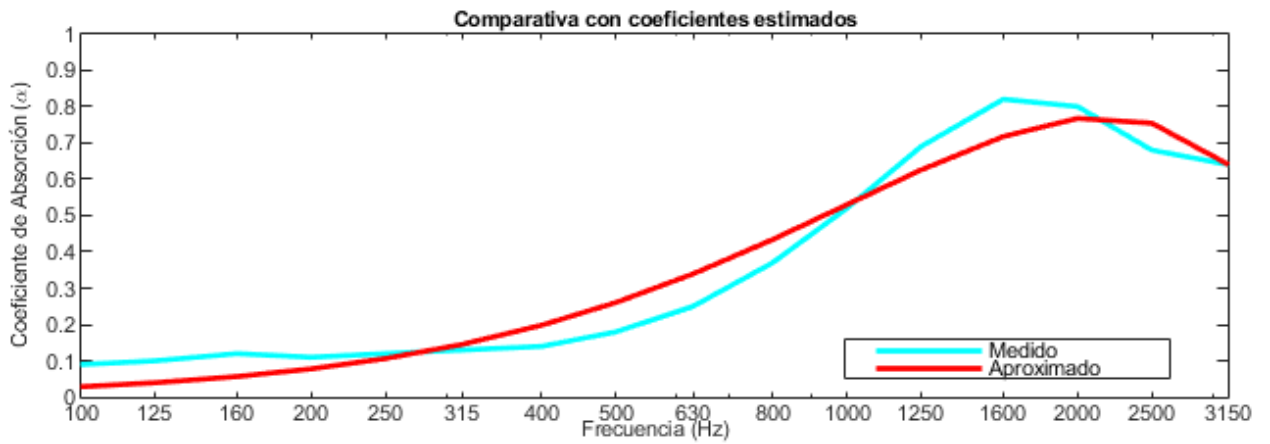


Figura 27: Coeficiente de absorción medido y predicho con el modelo empírico para el esparto Tipo 3.

El error relativo y absoluto predicho en este modelo empírico es el siguiente:

Tabla 12: Error Absoluto y Relativo para el modelo empírico del esparto Tipo 3.

F (Hz)	Error Absoluto (abs ($\alpha_{\text{medido}} - \alpha_{\text{predicho}}$))	Error Relativo (%)
100	0,01	29
125	0,02	36
160	0,03	37
200	0,03	25
250	0,01	8
315	0,01	10
400	0,05	30
500	0,07	37
630	0,08	32
800	0,07	18
1000	0,02	3
1250	0,05	7
1600	0,09	11
2000	0,03	4
2500	0,06	8
3150	0,01	1

En cuanto a los modelos empíricos que predicen el comportamiento como absorbente acústico de las variedades de esparto analizadas por Flores, se pueden consultar sus resultados en su tesis [5].

6.4. Comparaciones entre los distintos tipos de esparto.

En este apartado se van a comparar los resultados obtenidos tras el análisis de los tres tipos de esparto con los resultados obtenidos por Flores [5] en su investigación.

Para ello, antes se van a exponer, en formato de tabla (Tabla 13), y en formato de gráfico (Figura 28) los resultados obtenidos por Flores [5] de los cinco tipos de esparto distintos.

Tabla 13: Coeficiente de absorción acústica obtenido por Flores para distintos tipos de esparto.

F (Hz)	Coeficiente de absorción acústica (α)				
	Esparto Verde	Esparto Seco	Esparto Cocido	Esparto Cocido Picado	Esparto Estopa
100	0,03	0,06	0,10	0,02	0,04
125	0,03	0,05	0,02	0,04	0,07
160	0,06	0,05	0,04	0,07	0,11
200	0,07	0,06	0,06	0,10	0,14
250	0,08	0,07	0,07	0,12	0,17
315	0,09	0,10	0,09	0,17	0,21
400	0,11	0,11	0,10	0,22	0,27
500	0,13	0,10	0,11	0,31	0,35
630	0,17	0,12	0,14	0,44	0,45
800	0,23	0,16	0,19	0,58	0,56
1000	0,31	0,22	0,26	0,66	0,65
1250	0,38	0,29	0,35	0,65	0,70
1600	0,41	0,37	0,42	0,6	0,69
2000	0,39	0,41	0,43	0,63	0,68
2500	0,37	0,39	0,39	0,77	0,74
3150	0,43	0,37	0,39	0,81	0,78

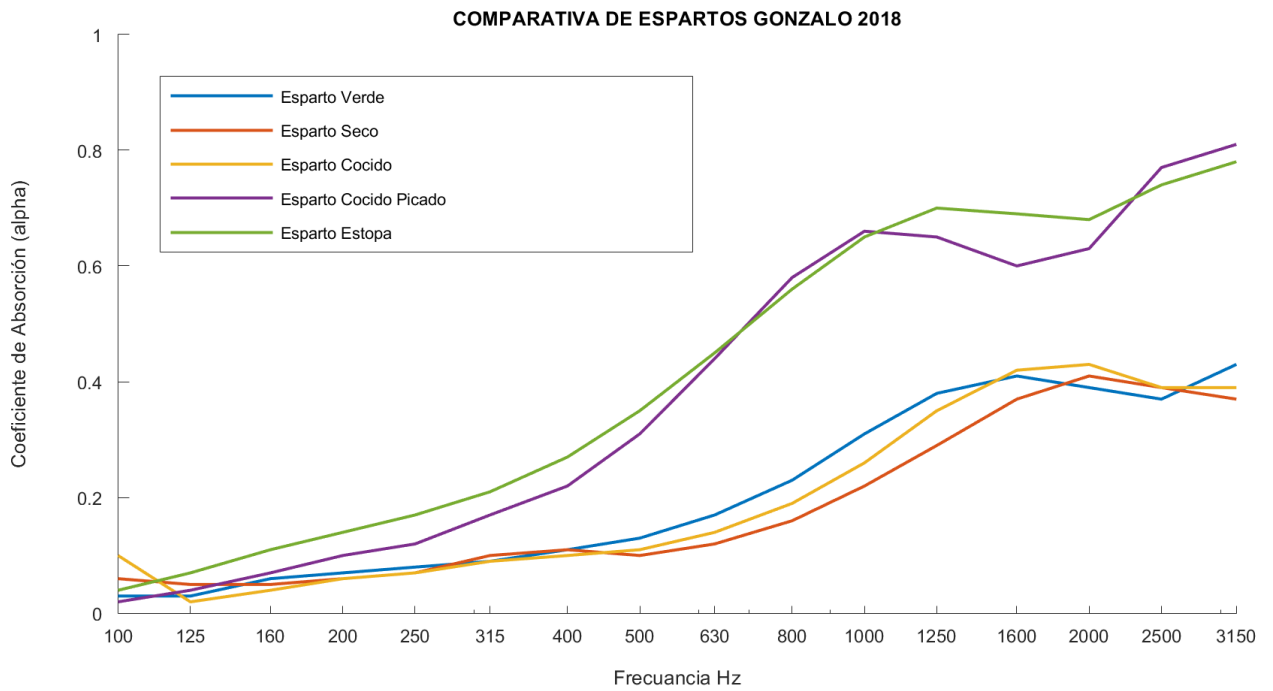


Figura 28: Comparativa de los diferentes tipos de esparto estudiados por Flores.

Una vez se han presentado los resultados obtenidos por Flores en su trabajo [5], se pueden comparar con los resultados de absorción acústica con los tres tipos de esparto analizados. De este modo se puede ver muy fácilmente que variedad tiene un coeficiente de absorción acústica más elevado.

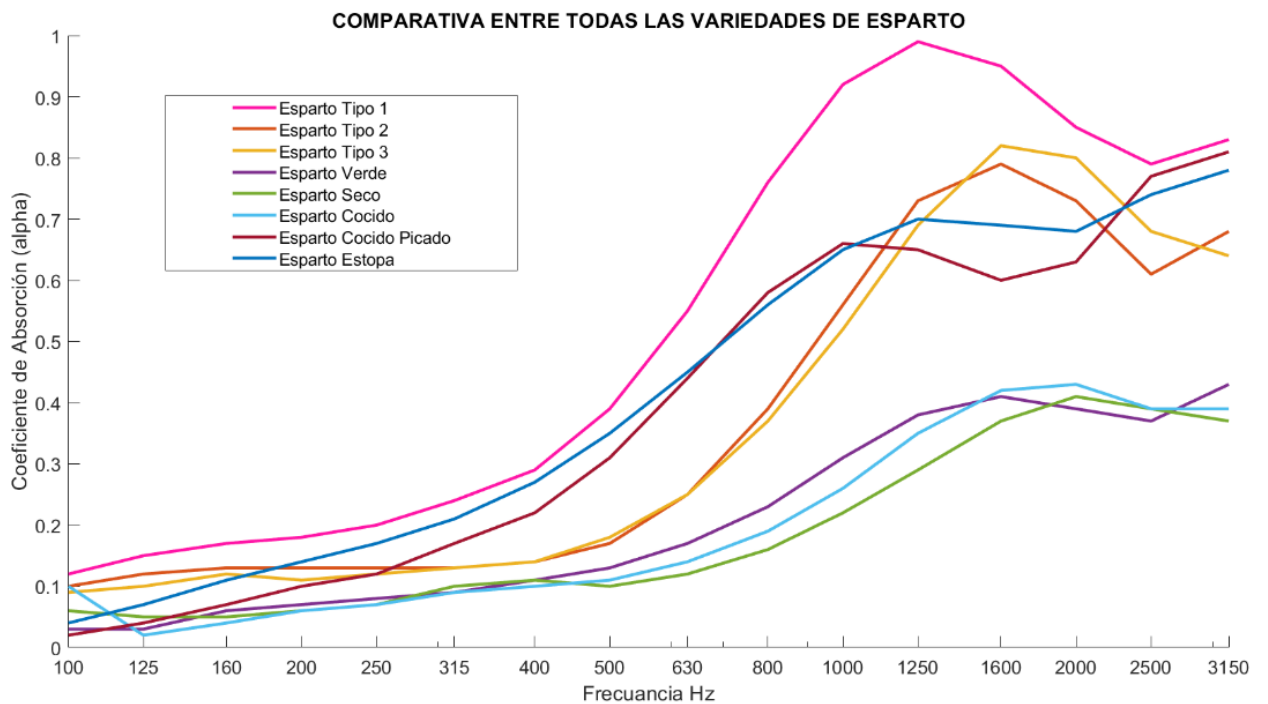


Figura 29: Comparativa entre el coeficiente de absorción acústica de todos los tipos de esparto analizados.

En la Figura 29 podemos ver el comportamiento como absorbente acústico de cada uno de los tipos de esparto a distintas frecuencias. Es fácil reconocer que la variedad de esparto Tipo 1 es la que tiene un mayor comportamiento como absorbente acústico en todas las frecuencias.

En cuanto a los espartos analizados por Flores [5], el que tiene mejor comportamiento como absorbente acústico es la variedad de esparto estopa.

Como podemos ver en la Tabla 4, estas muestras de esparto estopa son de 6,8 cm de espesor, que comparado con la variedad de esparto Tipo 1, es casi el doble. Sin embargo, sigue teniendo mayor absorción acústica la segunda.

Para poder comparar las distintas variedades con igualdad de condiciones, se han recortado las distintas muestras generadas durante el trabajo de Flores [5] para obtener muestras con un espesor de 5cm. Se han realizado las medidas del coeficiente de absorción acústica para estas nuevas muestras y estos son los resultados (Tabla 14).

Tabla 14: Coeficiente de absorción acústica esparto estopa de 5cm.

F (Hz)	Esparto Estopa 5cm
100	0,09
125	0,12
160	0,15
200	0,16
250	0,17
315	0,18
400	0,19
500	0,23
630	0,32
800	0,43
1000	0,54
1250	0,64
1600	0,72
2000	0,74
2500	0,72
3150	0,74

Comparando con igualdad de condiciones con los espartos Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3 (Figura 30), se observa más aún que las variedades analizadas en la presente investigación tienen un mejor comportamiento acústico que las expuestas en la memoria de Flores [5].

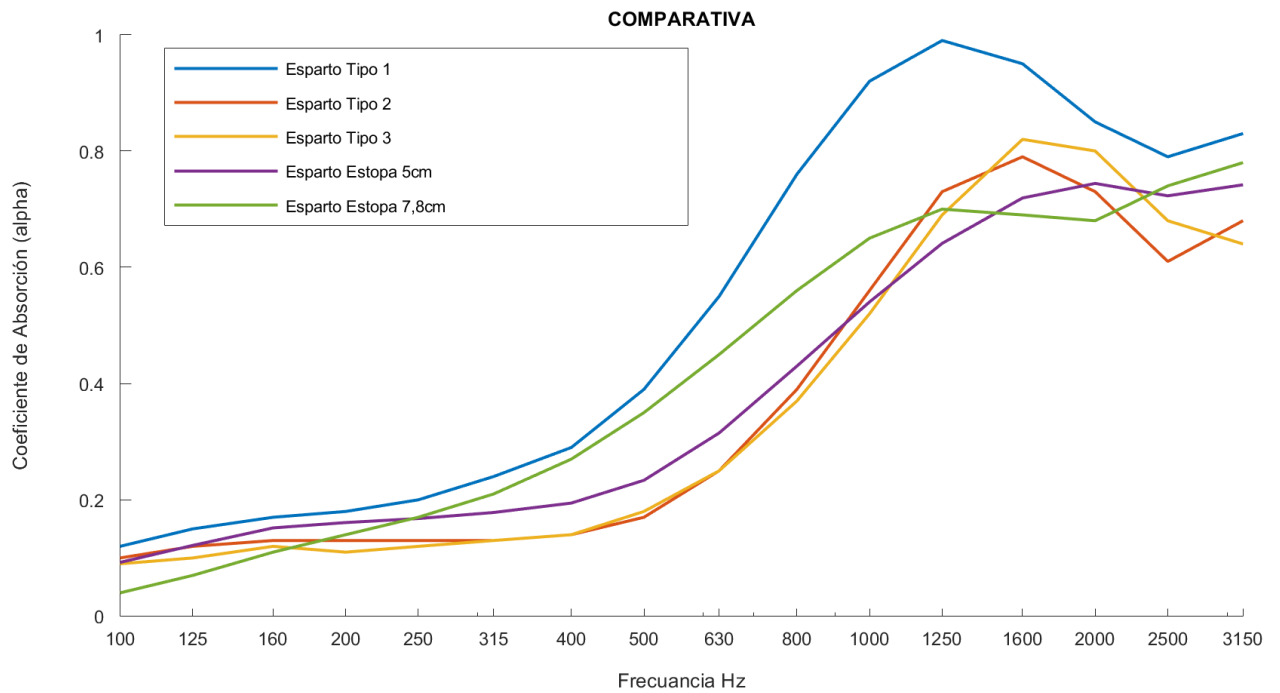


Figura 30: Comparativa entre espartos Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 y Esparto Estopa de distintos espesores.

Como era de esperar, al cortar la muestra para poder comparar su respuesta a igual espesor que las demás, su coeficiente de absorción ha disminuido en todas las frecuencias, excepto en un pequeño rango de frecuencias medias que tiene un comportamiento extraño que puede ser debido a la resonancia en espesor de la muestra por su tamaño.

6.5. Evaluación de la absorción con el paso del tiempo.

Por último, se han repetido todos los análisis de esta investigación, para las muestras que generó Flores [5], de este modo se pretende estudiar la evolución en el tiempo de estas muestras, pudiendo concluir si el secado por el paso del tiempo de estas fibras vegetales afecta al comportamiento acústico del material.

Las muestras fueron medidas por primera vez en julio de 2018, estas medidas fueron repetidas a las mismas muestras y con los mismos procedimientos en mayo de 2019.

Cabe destacar que estas muestras han sido almacenadas durante todo el periodo entre una prueba y la siguiente dentro de bolsas herméticas de plástico y en una caja dentro del laboratorio, donde no han sufrido las inclemencias del sol ni grandes cambios de humedad ni temperatura.

Para realiza de nuevo el análisis se han repetido todos los mismos procesos que se han expuesto y realizado durante el transcurso del presente trabajo.

Para su fácil visualización, se van a exponer los resultados de cada tipo de esparto individualmente.

- Esparto Verde

Tabla 15: Esparto Verde 2018/2019

F (Hz)	Esparto Verde 2018	Esparto Verde 2019	Diferencia
100	0,03	0,15	-0,12
125	0,03	0,16	-0,13
160	0,06	0,17	-0,11
200	0,07	0,16	-0,09
250	0,08	0,15	-0,07
315	0,09	0,15	-0,06
400	0,11	0,13	-0,02
500	0,13	0,12	0,01
630	0,17	0,15	0,02
800	0,23	0,23	0,00
1000	0,31	0,35	-0,04
1250	0,38	0,37	0,01
1600	0,41	0,38	0,03
2000	0,39	0,36	0,03
2500	0,37	0,36	0,01
3150	0,43	0,45	-0,02

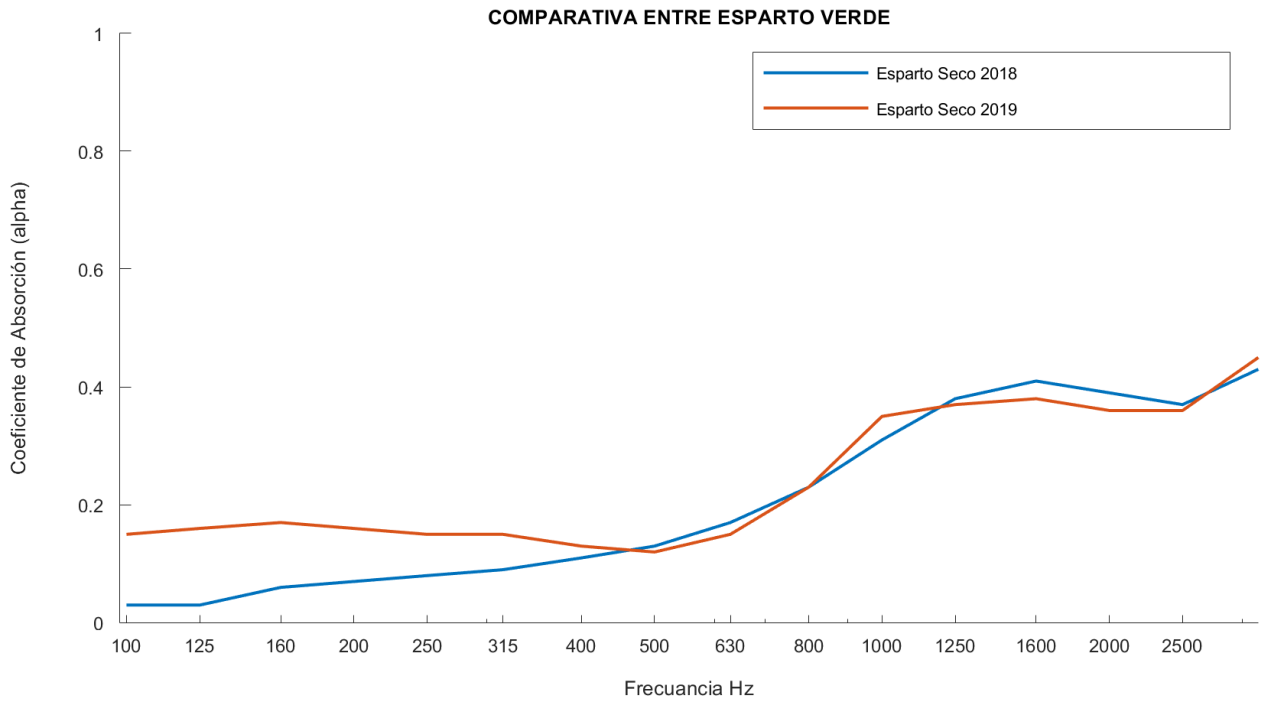


Figura 31: Comparativa entre Esparto Verde 2018 y 2019.

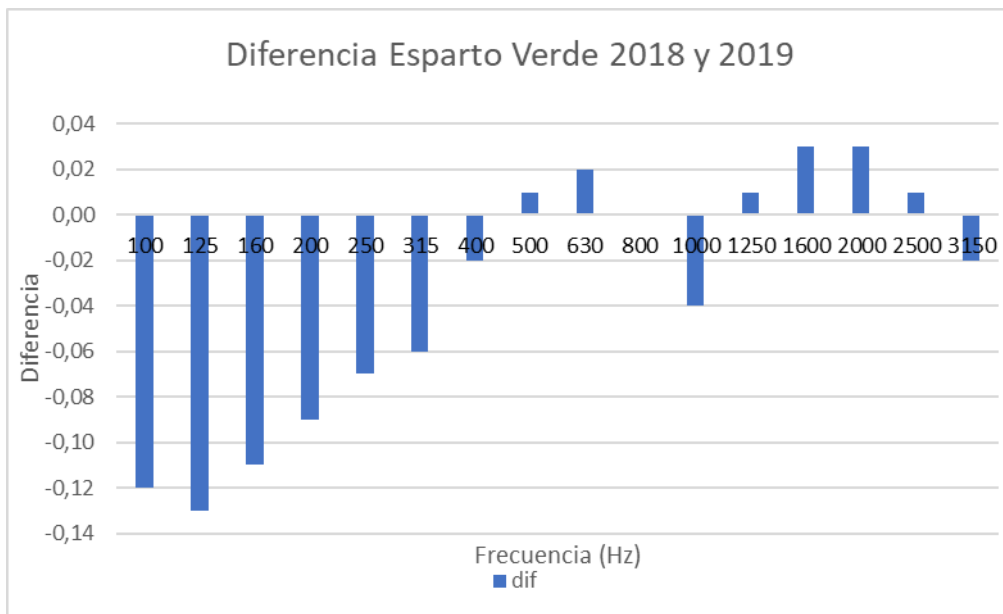


Figura 32: Diferencia entre Esparto Verde 2018 y 2019.

- Esparto Seco

Tabla 16: Esparto Seco 2018/2019.

F (Hz)	Esparto Seco 2018	Esparto Seco 2019	Diferencia
100	0,06	0,20	-0,17
125	0,05	0,19	-0,16
160	0,05	0,19	-0,13
200	0,06	0,18	-0,11
250	0,07	0,16	-0,08
315	0,10	0,14	-0,05
400	0,11	0,12	-0,01
500	0,10	0,10	0,00
630	0,12	0,12	0,05
800	0,16	0,18	0,05
1000	0,22	0,28	0,03
1250	0,29	0,32	0,06
1600	0,37	0,37	0,04
2000	0,41	0,40	-0,01
2500	0,39	0,38	-0,01
3150	0,37	0,41	0,02

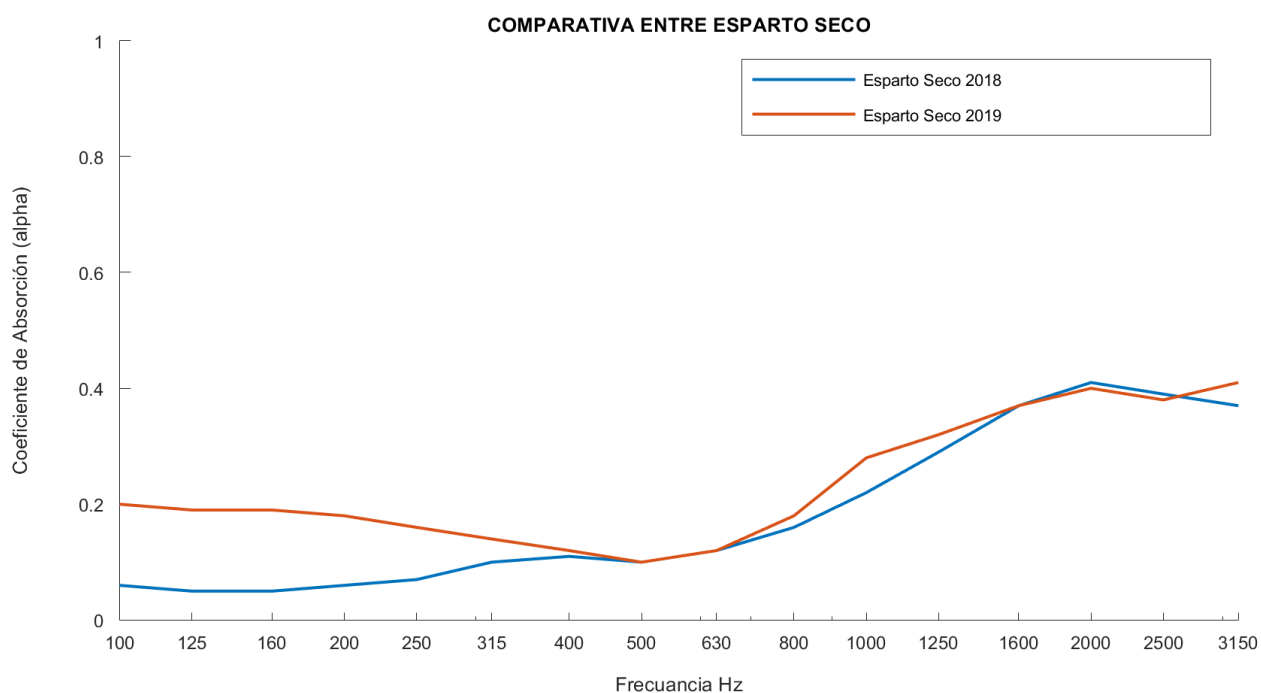


Figura 33: Comparativa entre Esparto Seco 2018 y 2019.

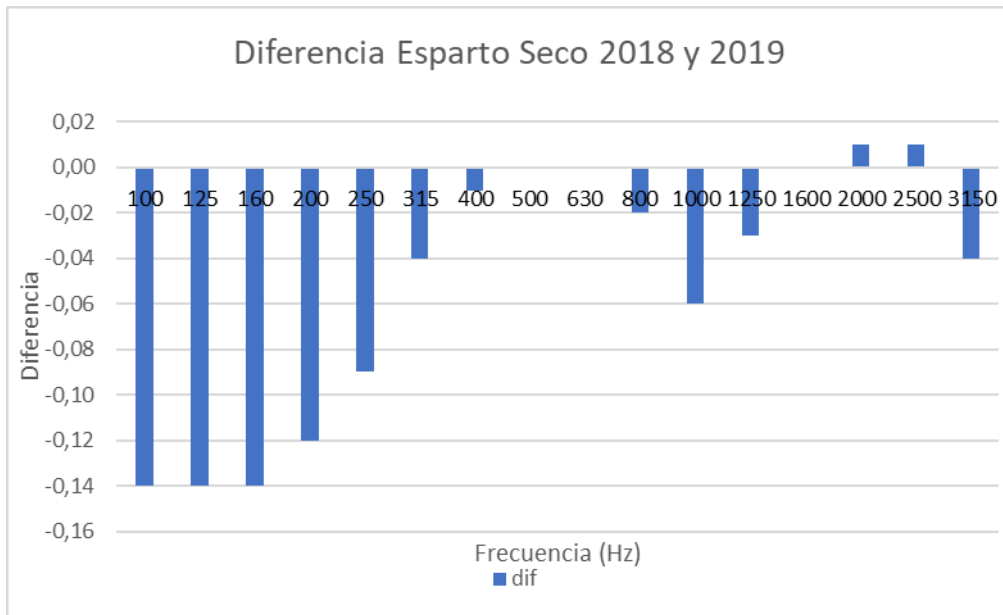


Figura 34: Diferencia entre Esparto Seco 2018 y 2019.

- Esparto Cocido

Tabla 17: Esparto Cocido 2018/2019

F (Hz)	Esparto Cocido 2018	Esparto Cocido 2019	Diferencia
100	0,10	0,14	-0,04
125	0,02	0,14	-0,12
160	0,04	0,15	-0,11
200	0,06	0,15	-0,09
250	0,07	0,14	-0,07
315	0,09	0,13	-0,04
400	0,10	0,13	-0,03
500	0,11	0,12	-0,01
630	0,14	0,14	0,00
800	0,19	0,22	-0,03
1000	0,26	0,34	-0,08
1250	0,35	0,38	-0,03
1600	0,42	0,41	0,01
2000	0,43	0,37	0,06
2500	0,39	0,36	0,03
3150	0,39	0,44	-0,05

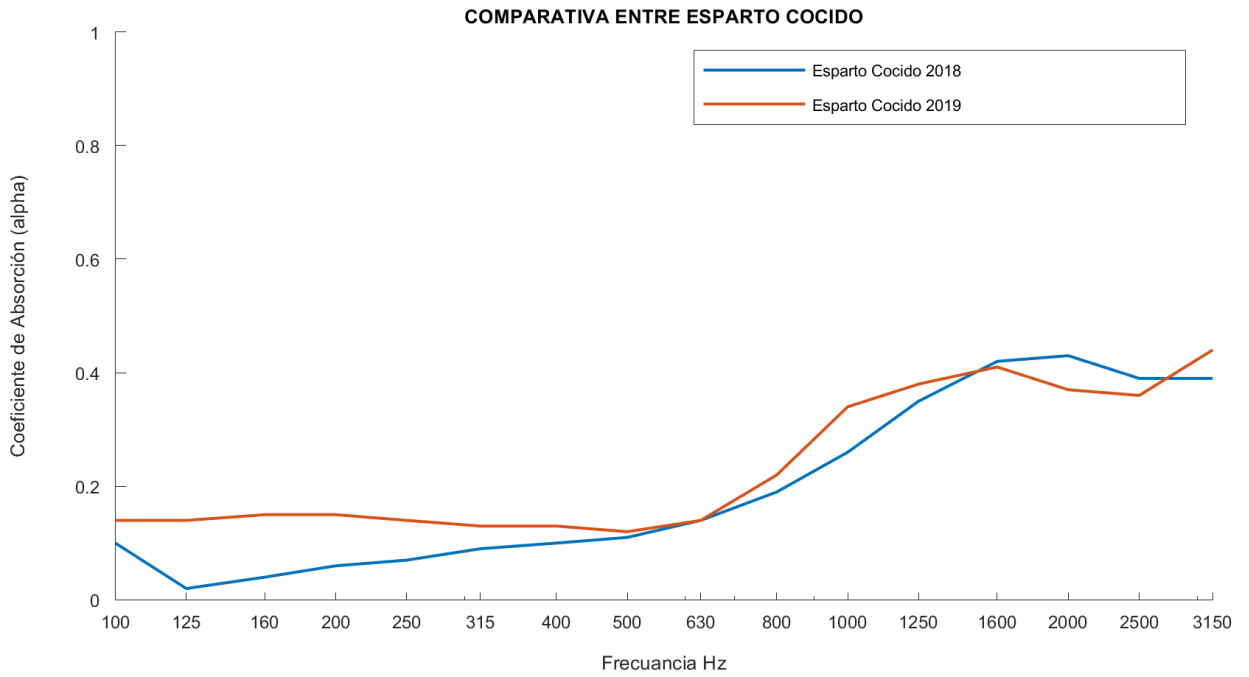


Figura 35: Comparativa entre Esparto Cocido 2018 y 2019.

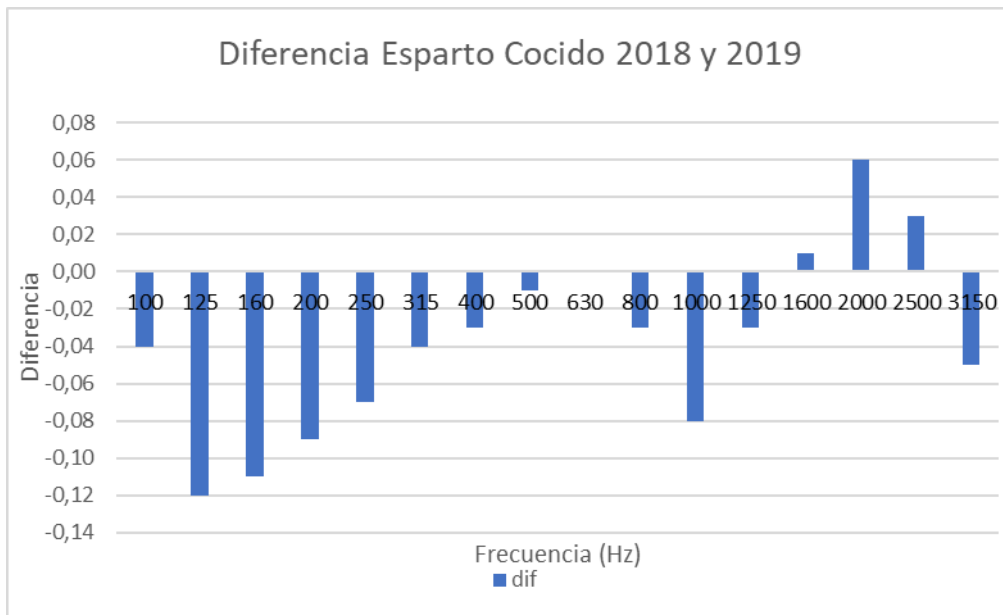


Figura 36: Diferencia entre Esparto Cocido 2018 y 2019.

- **Esparto Cocido Picado**

Tabla 18: *Esparto Cocido Picado 2018/2019.*

F (Hz)	Esparto Cocido Picado 2018	Esparto Cocido Picado 2019	Diferencia
100	0,02	0,17	-0,15
125	0,04	0,18	-0,14
160	0,07	0,19	-0,12
200	0,10	0,19	-0,09
250	0,12	0,20	-0,08
315	0,17	0,21	-0,04
400	0,22	0,24	-0,02
500	0,31	0,29	0,02
630	0,44	0,39	0,05
800	0,58	0,57	0,01
1000	0,66	0,70	-0,04
1250	0,65	0,63	0,02
1600	0,60	0,62	-0,02
2000	0,63	0,59	0,04
2500	0,77	0,73	0,04
3150	0,81	0,79	0,02

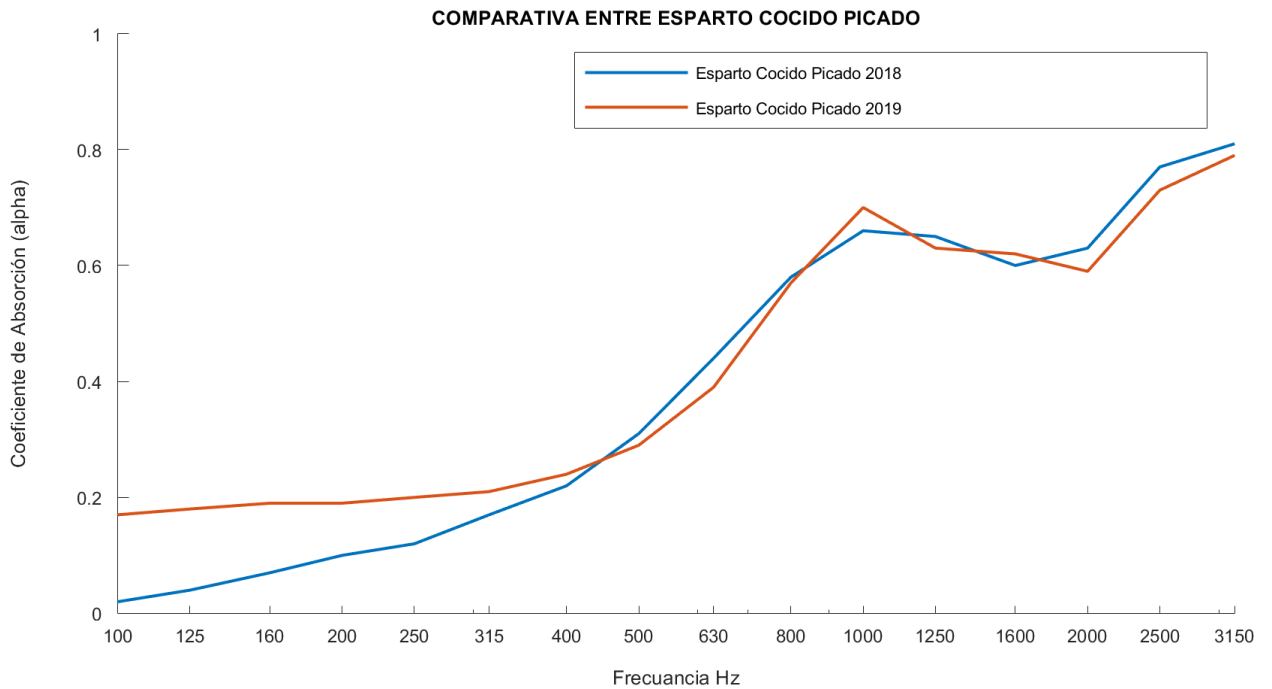


Figura 37: *Comparativa entre Esparto Cocido Picado 2018 y 2019.*

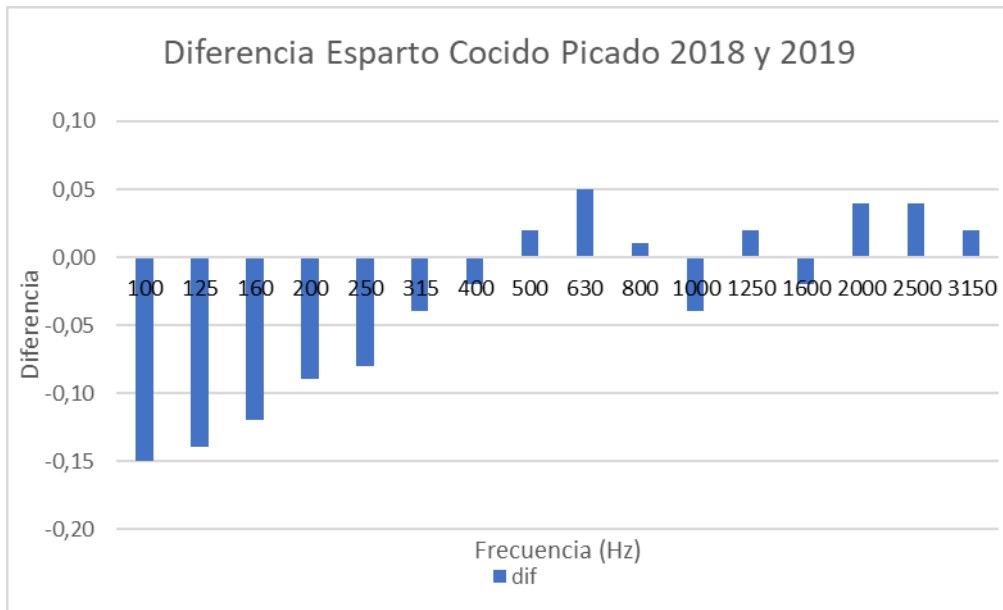


Figura 38: Diferencia entre Esparto Cocido Picado 2018 y 2019.

- **Esparto Estopa**

Tabla 19: Esparto Estopa 2018/2019.

F (Hz)	Esparto Estopa 2018	Esparto Estopa 2019	Diferencia
100	0,04	0,20	-0,16
125	0,07	0,21	-0,14
160	0,11	0,22	-0,11
200	0,14	0,22	-0,08
250	0,17	0,23	-0,06
315	0,21	0,25	-0,04
400	0,27	0,27	0,00
500	0,35	0,30	0,05
630	0,45	0,37	0,08
800	0,56	0,51	0,05
1000	0,65	0,69	-0,04
1250	0,70	0,75	-0,05
1600	0,69	0,81	-0,12
2000	0,68	0,75	-0,07
2500	0,74	0,75	-0,01
3150	0,78	0,83	-0,05

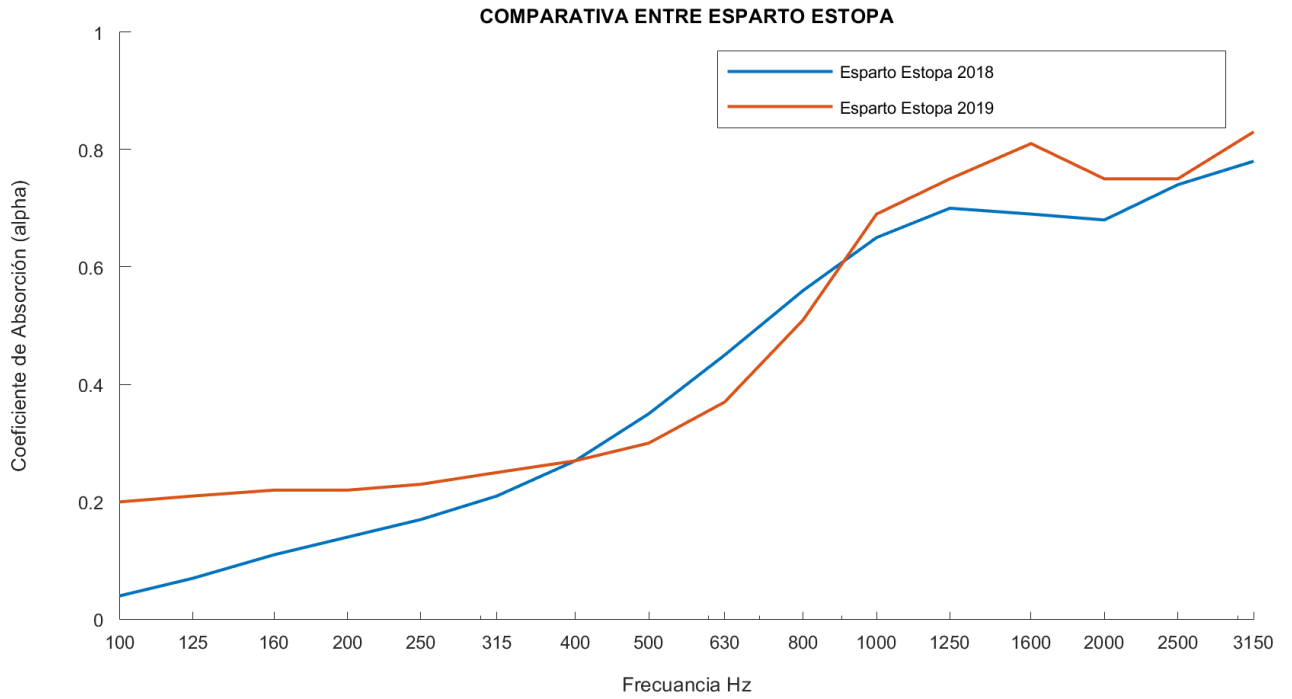


Figura 39: Comparativa entre Esparto Estopa 2018 y 2019.

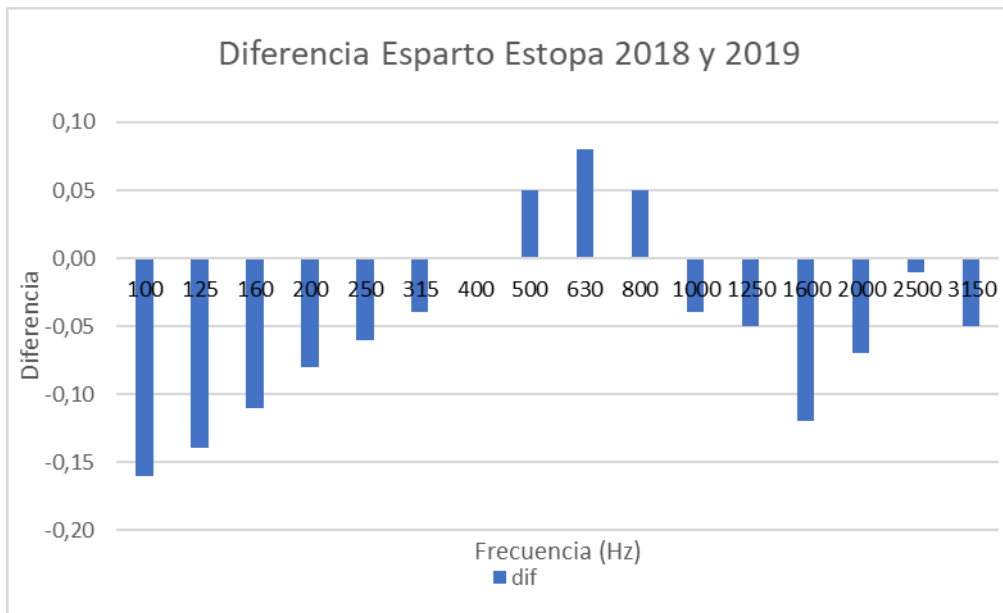


Figura 40: Diferencia entre Esparto Estopa 2018 y 2019.

Como se puede observar en los gráficos de diferencias y en la Figura 41, parece haber en todos los casos un ligero aumento del coeficiente de absorción tras el paso del tiempo en todas las variedades de esparto, estando las mayores diferencias en las frecuencias más bajas.

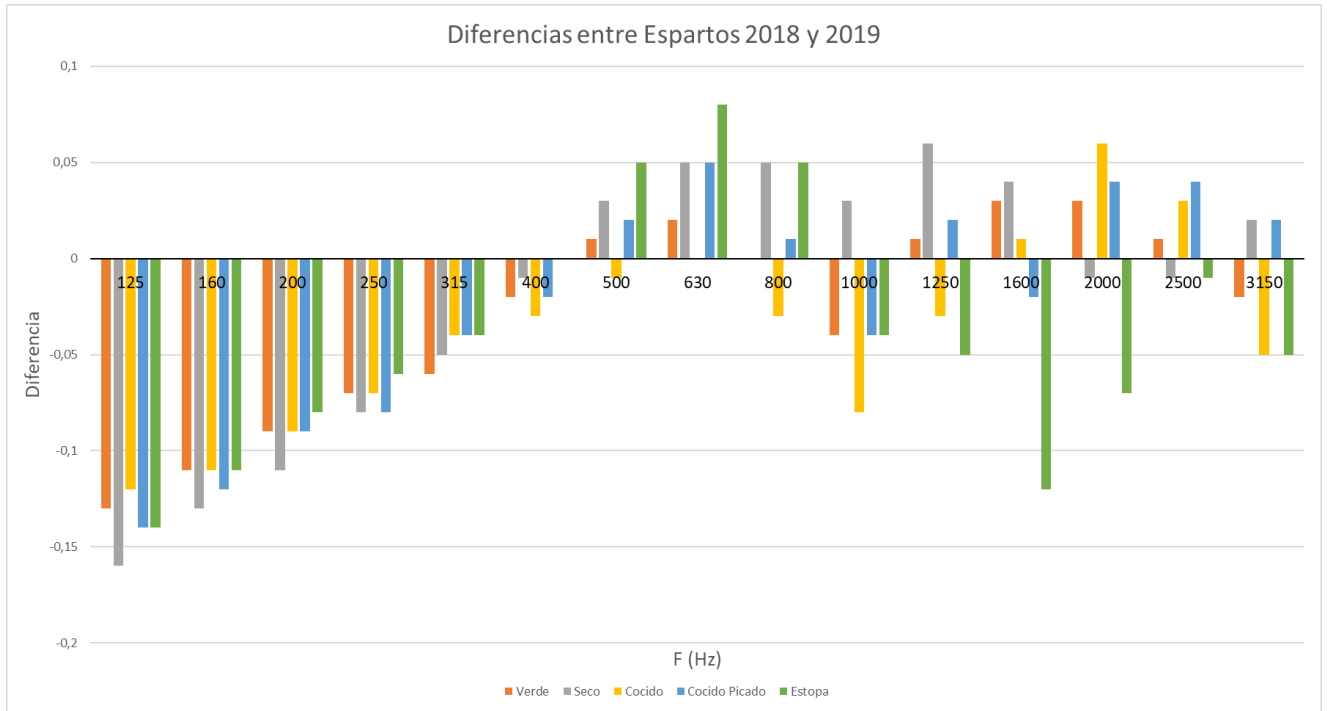


Figura 41: Diferencias entre los distintos espartos en 2018 y 2019.

7. Conclusiones.

En este trabajo final del Máster en Ingeniería Acústica se ha pretendido modelar como materiales absorbentes acústicos, materiales basados en fibras de distintos tipos de esparto. Se han realizado mediciones de dos parámetros fundamentales para caracterizar un material como absorbente acústico: la resistencia al flujo y el coeficiente de absorción en incidencia normal. Además, utilizando estos valores medidos de forma experimental, y gracias a modelos frecuenciales ya existentes y ampliamente conocidos, ha sido posible obtener un modelo de predicción del comportamiento acústico de estos eco-materiales.

Los valores del coeficiente de absorción en incidencia normal que presentan los diferentes tipos de esparto son valores típicos de un material absorbente acústico: el valor del coeficiente de absorción aumenta en aumentar la frecuencia. Después de observar los resultados obtenidos, se puede afirmar, que el esparto posee características para continuar investigando, y que pueda formar parte de la base de materiales ecológicos candidatos a elaborar un panel absorbente acústico a partir de sus fibras, con grandes prestaciones acústicas.

El esparto Tipo 1 ha sido el que presenta mayores prestaciones como absorbente acústico, por sus valores del coeficiente de absorción en incidencia normal. Los valores de este coeficiente son mayores que el resto, no solamente a altas frecuencias, también a partir de frecuencias medias (alrededor del tercio de octava de los 630 Hz).

En cuanto a las variedades Tipo 2 y Tipo 3 analizadas, pese a no haber obtenido los mejores resultados, se ha demostrado que se pueden elaborar muestras a partir de éstas con un coeficiente de absorción acústica elevado.

Además, algo que puede ser notoriamente importante a favor de estas dos últimas variedades, puede ser la mayor facilidad para realizar las muestras. Algo que puede ser de vital importancia si se pretende producir y comercializar como material de construcción.

En cuanto a las comparaciones con los espartos analizados por Flores en su trabajo final de máster [5], cabe comentar que después de los estudios llevados a término hasta la fecha, se han encontrado variedades con mejores prestaciones, algo que sigue animando a continuar investigando con distintas especies de fibras vegetales.

Por último, después de volver a analizar las muestras del trabajo de Flores [5] después de varios meses, se ha observado que el paso del tiempo si ha tenido un efecto en cuanto al comportamiento como absorbente acústico, aunque muy poco notable y sobre todo en frecuencias bajas.

8. Líneas futuras.

Como continuación de este Trabajo Final de Máster, se proponen diversas líneas de investigación relacionadas con este que pueden ser los pasos a seguir para conseguir lograr el objetivo de la creación de un nuevo panel absorbente acústico ecológico para la edificación.

Pensando en la producción de paneles, y la creación de muestras de gran tamaño, se propone realizar diversos estudios a los que a las muestras se les hayan añadido diversos pegamentos o aglutinantes orgánicos, algo que le puede dar consistencia a la muestra o al panel, pero puede tener efectos en su comportamiento acústico. Por ello es importante la caracterización acústica de estos añadidos.

Otro camino a recorrer antes de la comercialización o producción de paneles es el estudio exhaustivo del impacto energético por la fabricación de estos mediante el análisis del ciclo de vida. Algo que determinará de manera muy precisa cuanto de ecológicos pueden llegar a ser dichos paneles.

Por último, pensando en la seguridad y la salubridad en la edificación, al instalar en un edificio paneles producidos con materia orgánica, es lógico pensar en aplicarles tanto un tratamiento ignifugo como un tratamiento insecticida o fungicida. Estos tratamientos también es posible que puedan modificar las propiedades como absorbente acústico, por ello otra investigación a realizar puede ser la caracterización acústica después de dichos tratamientos o la búsqueda de uno que no produzca efectos sobre las muestras.

Obviamente, la presente investigación también puede ser completada o enriquecida con la búsqueda y el análisis de muchas especies de fibras vegetales más.

9. Bibliografía.

- [1] Poushter, J., & Huang, C. (2019). Climate Change Still Seen as the Top Global Threat, but Cyberattacks a Rising Concern. Pew Research Center. Retrieved from https://www.pewglobal.org/wp-content/uploads/sites/2/2019/02/Pew-Research-Center_Global-Threats-2018-Report_2019-02-10.pdf
- [2] Gobierno de España. Ministerio de Ciencia, Investigación y Universidades. (2019). HORIZONTE 2020. Retrieved from <https://eshorizonte2020.es>
- [3] Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Documento Basico HR. Protección frente al ruido (2009).
- [4] Quintero, J. (2013). EL RUIDO DEL TRÁFICO VEHICULAR Y SUS EFECTOS EN EL ENTORNO URBANO Y LA SALUD HUMANA (Ingeniero en Transporte y Vías). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Retrieved from <https://revistas.upb.edu.co/index.php/puente/article/view/7192/6566>
- [5] Flores Ortega, G. (2018). Absorbentes acústicos textiles no tejidos, con fibras naturales termoconformadas. EPSG, UPV. <http://hdl.handle.net/10251/111860>
- [6] Soriano, J. R., Fernández, J. A., Tormos, R. d., Silla, E. E., & Rico, V. J. (2010). Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf. *Materiales De Construccion*, 60(299), 133-143. <https://riunet.upv.es/handle/10251/36161>
- [7] Arenas, J. P., & Asdrubali, F. (2017). Eco-Materials with Noise Reduction Properties. *Handbook of Ecomaterials*, 1-26.
- [8] AENOR. UNE-EN ISO 11654. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (1998).
- [9] AENOR. UNE-EN ISO 354. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (2004).
- [10] del Rey, R., Alba, J., Rodríguez, J., & Bertó, L. (2019). Characterization of New Sustainable Acoustic Solutions in a Reduced Sized Transmission Chamber. *Buildings*, 9(3), 60. doi: 10.3390/buildings9030060
- [11] AENOR. UNE-EN ISO 10534-2. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. (2002).
- [12] Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., & Bermúdez, J. (2006). Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa. *Revista Tecnológica ESPOL*, 19(1), 113-120. Retrieved from <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/210/153>

- [13] Zini, E., & Scandola, M. (2011). Green composites: An overview. *Polymer Composites*, 32(12), 1905-1915. doi: 10.1002/pc.21224
- [14] Stipa. (2019). Retrieved from <https://es.wikipedia.org/wiki/Stipa>
- [15] CANO RUIZ, Judith "Stipa tenacissima L.". *Asturnatura.com* [en línea]. Num. 392, 30/09/2012 [consultado el: 4/09/2019]. Disponible en <<https://www.asturnatura.com/especie/stipa-tenacissima.html>>. ISSN 1887-5068
- [16] Maestre, F., Ramirez, D., & Cortina, J. (2007). Ecología del esparto (*Stipa tenacissima* L.) y los espartales de la Península Ibérica. *Ecosistemas*, 16(2), 111-130. ISBN: 1697-2473.
- [17] Fernandez, Jesús & Soriano, Jaime. (2019). INCERTIDUMBRE EN LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA AL FLUJO CON EL MÉTODO DE INGARD & DEAR.
- [18] AENOR. UNE-EN ISO 29053. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo de aire. (1994).
- [19] Ingard K.U., Dear T.A. (1985), "Measurement of acoustic flow resistance", *Journal of Sound and Vibration*, 103, 4, pp567–572.
- [20] Delany M.E., Bazley E.N. (1970), "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Applied Acoustics*, 3, pp 105–116.
- [21] AENOR. UNE-EN 12354-6. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 6: Absorción sonora en espacio cerrados (2004).
- [22] Dunn I.P., Davern W.A. (1986), "Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers", *Applied Acoustics*, 19, pp 321-334.
- [23] Garai M., Pompoli F. (2005): "A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications", *Applied Acoustics*, 66, pp 1383-1398.
- [24] Voronina N. (1994), "Acoustic Properties of Fibrous Materials", *Applied Acoustics*, 42, pp 165-174.
- [25] Oliva D., Hongisto V. (2013), "Sound absorption of porous materials – Accuracy of predictions methods", *Applied Acoustics*, 74, pp 1473–1479.
- [26] 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.
- [27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

10. Índice de figuras.

Figura 1: Absorción acústica.	5
Figura 2: Clasificación de fibras naturales.....	7
Figura 3: Fotografías de las muestras de esparto Tipo 1.	9
Figura 4: Fotografías de las muestras de esparto Tipo 2.	9
Figura 5: Fotografías de las muestras de esparto Tipo 3.	10
Figura 6: Diagrama de conexiones para el método descrito en UNE EN ISO 10534-2:2002.	12
Figura 7: Montaje 1 con la instrumentación disponible en la EPSG.	13
Figura 8: Colocación correcta de los micrófonos en su posición en el tubo.	13
Figura 9: Posiciones de ambos micros para registrar la función de transferencia	13
Figura 10: Fotografías de los tubos utilizados para las medidas.....	15
Figura 11: Diagrama de conexiones para el método descrito por Ingard & Dear.	16
Figura 12: Montaje 2 con la instrumentación disponible en la EPSG.	16
Figura 13: Muestra preparada en el tubo.	17
Figura 14: Posiciones de ambos micros y muestra para registrar la función de transferencia.....	17
Figura 15: Muestra de Esparto Verde.	23
Figura 16: Muestra de Esparto Seco.....	24
Figura 17: Muestra de Esparto Cocido.....	24
Figura 18: Muestra de Esparto Cocido Picado.....	25
Figura 19: Muestra de Esparto Estopa.....	25
Figura 20: Muestras de esparto Tipo 1.....	26
Figura 21: Muestras de esparto Tipo 2.....	26
Figura 22: Muestras de esparto Tipo 3.....	26
Figura 23: Coeficiente de absorción de las tres muestras del esparto Tipo 1 y su promedio.....	28
Figura 24: Coeficiente de absorción de los espartos Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3. ...	28
Figura 25: Coeficiente de absorción medido y predicho con el modelo empírico para el esparto Tipo 1.	30
Figura 26: Coeficiente de absorción medido y predicho con el modelo empírico para el esparto Tipo 2.	32
Figura 27: Coeficiente de absorción medido y predicho con el modelo empírico para el esparto Tipo 3.	34
Figura 28: Comparativa de los diferentes tipos de esparto estudiados por Flores.	37
Figura 29: Comparativa entre el coeficiente de absorción acústica de todos los tipos de esparto analizados.....	37
Figura 30: Comparativa entre espartos Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 y Esparto Estopa de distintos espesores.....	39
Figura 31:Comparativa entre Esparto Verde 2018 y 2019.	41
Figura 32: Diferencia entre Esparto Verde 2018 y 2019.	41
Figura 33: Comparativa entre Esparto Seco 2018 y 2019.....	42
Figura 34: Diferencia entre Esparto Seco 2018 y 2019.....	43

Figura 35: Comparativa entre Esparto Cocido 2018 y 2019.....	44
Figura 36: Diferencia entre Esparto Cocido 2018 y 2019.....	44
Figura 37: Comparativa entre Esparto Cocido Picado 2018 y 2019.....	45
Figura 38: Diferencia entre Esparto Cocido Picado 2018 y 2019.....	46
Figura 39: Comparativa entre Esparto Estopa 2018 y 2019.....	47
Figura 40: Diferencia entre Esparto Estopa 2018 y 2019.....	47
Figura 41: Diferencias entre los distintos espartos en 2018 y 2019.	48

11. Índice de tablas.

Tabla 1: Clasificación de materiales según su absorción.....	6
Tabla 2: Coeficiente obtenidos por varios autores sobre fibras vegetales.	20
Tabla 3: Coeficientes obtenidos por Flores [5] con distintos espartos.....	20
Tabla 4: Espesores y Densidades de los distintos tipos de esparto.....	23
Tabla 5: Coeficientes de absorción acústica de los espartos Tipo1, Tipo2 y Tipo3.	27
Tabla 6: Resistencia y resistividad al flujo de aire de todas las muestras.	29
Tabla 7: Coeficientes del modelo empírico para el esparto Tipo 1.....	30
Tabla 8: Error Absoluto y Relativo para el modelo empírico del esparto Tipo 1.	31
Tabla 9: Coeficientes del modelo empírico para el esparto Tipo 2.....	32
Tabla 10: Error Absoluto y Relativo para el modelo empírico del esparto Tipo 2.	33
Tabla 11: Coeficientes del modelo empírico para el esparto Tipo 3.....	34
Tabla 12: Error Absoluto y Relativo para el modelo empírico del esparto Tipo 3.	35
Tabla 13: Coeficiente de absorción acústica obtenido por Flores para distintos tipos de esparto.....	36
Tabla 14: Coeficiente de absorción acústica esparto estopa de 5cm.....	38
Tabla 15: Esparto Verde 2018/2019.....	40
Tabla 16: Esparto Seco 2018/2019.....	42
Tabla 17: Esparto Cocido 2018/2019.....	43
Tabla 18: Esparto Cocido Picado 2018/2019.....	45
Tabla 19: Esparto Estopa 2018/2019.....	46