

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Ingeniero de Telecomunicaciones: especialidad en sonido e imagen

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# **“Caracterización acústica de un material de origen biológico: fibras de posidonia”**

Autor: Rafael Nicolau Lara

---

# Agradecimientos

---

En primer lugar empezar por mis tutores de Proyecto como son Víctor Sánchez Morcillo junto con la ayuda de Vicent Romero, sin su infinita paciencia hubiera sido imposible el desarrollo del mismo.

A mis padres Rafael Nicolau Torregrosa y María Isabel Lara Gallego junto con mi hermano Iñaki Nicola Lara, sin su persistencia, la elaboración de este proyecto ni la realización de mis estudios superiores hubieran sido posible.

A mi novia y amiga Arantxa Urchueguía Fornes por su paciencia y ayuda.

A mi familia y amigos.

En definitiva, a todas aquellas personas que han hecho realidad este proyecto con su inestimable ayuda tanto moral, como intelectual.

## Resumen

---

La idea principal de este Proyecto Final de Carrera (PFC) consiste en analizar las características acústicas de un biomaterial de origen marino como son las algas, en este caso particular las del alga mediterránea *Posidonia oceanica*. Un material presente de forma abundante que aparece en el litoral Mediterráneo con la aparición de tormentas o inclemencias desfavorables del tiempo.

Para caracterizar acústicamente el material fibroso compuesto por restos de posidonia existen varios parámetros como son la impedancia acústica, coeficiente de absorción acústica, entre otros, pero en este trabajo utilizaremos el coeficiente de absorción. La metodología utilizada es básicamente la descrita en la Normativa Española UNE-EN ISO 10534, es decir, "método del rango de onda estacionaria y método de la función de transferencia".

Para la obtención numérica de los parámetros descritos hemos utilizado principalmente el Matlab, herramienta de software matemático muy utilizado en las universidades y centros de investigación y desarrollo.

## Abstract

---

*The main idea of this Final Project is to analyze the acoustic characteristics of a marine biomaterial such as algae, in this particular case the typical alga from the Mediterranean sea Posidonia oceanica. This kind of alga appears very often in the Mediterranean coast as a result of storms and unfavourable weather.*

*There are several parameters that can be used to acoustically characterize the fibrous material Posidonia is made of. For example, acoustic impedance, sound absorption coefficient among others, but in this project we will take into account the absorption coefficient for the characterization. The methodology used is essentially the one described in the Spanish Standard UNE -EN ISO 10534, i.e. "method of standing wave range and method of the transfer function."*

*To obtain the numerical parameters set we used mainly Matlab, mathematical software tool widely used in universities and research and development centres.*

## Índice

1. Objetivos y estructura
  - 1.1 Objetivos
  - 1.2 Estructura del PFC
2. Principios y conceptos básicos
  - 2.1. Posidonia oceánica
    - 2.1.1 Introducción
    - 2.1.2 Hábitat
    - 2.1.3 Morfología
    - 2.1.4 Crecimiento
    - 2.1.5 Funciones ecológicas
  - 2.2 Teoría absorción acústica
    - 2.2.1 Introducción a la absorción acústica
    - 2.2.2 Principios de funcionamiento de materiales absorbentes
    - 2.2.3. Introducción caracterización acústica
    - 2.2.4. Coeficiente de absorción
  - 2.3 Materiales para aislamiento y acondicionamiento acústico
    - 2.3.1 Materiales porosos
    - 2.3.2 Materiales para argamasas
    - 2.3.3 Sistemas de paneles metálicos perforados
    - 2.3.4 Absorbentes suspendidos
  - 2.4. Tubos a examinar
    - 2.4.1 Tubos abiertos
    - 2.4.2 Tubos cerrados
    - 2.4.3 Tubo kundt
3. Modelos para la determinación de absorción e impedancia acústica
  - 3.1. Método de la onda estacionaria
    - 3.1.1. Normativa
    - 3.1.2 Parámetros
    - 3.1.3 Equipo instrumental
  - 3.2 Método de la función de transferencia
    - 3.2.1 Normativa
    - 3.2.2. Parámetros
    - 3.2.3 Equipo instrumental
4. Conclusiones
  - 4.1. Descripción de la muestra
  - 4.2. Resultados del método función de transferencia
  - 4.3. Conclusiones
  - 4.4 Líneas futuras de investigación
5. Bibliografía
6. Anexo I
7. Anexo II



# 1. Objetivos y estructura

---

## 1.1 Objetivos

El objetivo principal es analizar el comportamiento acústico de un biomaterial como es la posidonia utilizando parámetros acústicos. Para ello aplicaremos y distinguiremos:

- Diseño y montaje de los dos métodos de obtención del coeficiente de absorción acústica e impedancia acústica
- Clasificación y evaluación del material

## 1.2 Estructura del proyecto

- Capítulo 1, **Objetivos:** descripción de objetivos y estructura del proyecto.
- Capítulo 2, **Principios y conceptos básicos: exposición de contenidos de la caracterización acústica de materiales según parámetros.**
- Capítulo 3, **Modelos para la determinación de coeficiente de absorción** según normativas vigentes como son UNE-EN ISO 10534-1 y 10534-2, utilizando tubo de kundt la primera y mediante la función de transferencia la segunda.
- Capítulo 4, **Conclusión del trabajo desarrollado y futuras líneas de investigación.**

## 2. Principios y conceptos básicos

---

### 2.1 Posidonia oceánica

#### 2.1.1 Introducción

La posidonia oceánica (figura 1) es la fanerógama dominante entre las especies del Mar Mediterráneo, donde es endémica. Esta especie marina posee un alto valor ecológico en el ecosistema litoral por las funciones que desempeña.



Figura 1: Posidonia oceánica [15]

#### 2.1.2 Hábitat

La posidonia oceánica forma grandes extensiones y es localizable desde aguas no profundas hasta niveles de 30-40 m de profundidad. Se distribuye principalmente por el mar Mediterráneo aunque no se presenta en las desembocaduras de los ríos debido al aporte de nutrientes y sedimentos. Las condiciones óptimas para el crecimiento de la posidonia oceánica (figura 2) son:

- Aguas limpias , claras , sin contaminación y bien oxigenadas
- Pocos cambios de temperatura
- Lugares no expuestos a una hidrodinámica intensa
- Suelos con cierta cantidad de materia orgánica

La creciente contaminación del mar Mediterráneo (por el auge de la construcción de viviendas, principalmente), así como la consiguiente presencia de barcos, anclajes y arrastre de anclas, la producción intensiva de jaulas marinas y el cambio climático son las principales razones que contribuyen al deterioro del litoral al producirse una regresión en la presencia de praderas en nuestro litoral (figura 3).



Figura 2: Fibra de la posidonia [16]



Figura 3: restos de fibra en playa del mar Mediterráneo [17]

### 2.1.3. Morfología

Al igual que todas las fanerógamas marinas, la posidonia oceánica presenta raíces, tallos, hojas, flores, frutos y semillas. Los tallos están transformados en dos tipos de rizomas en función de su eje de crecimiento, los plagiotropos y los ortotropos.

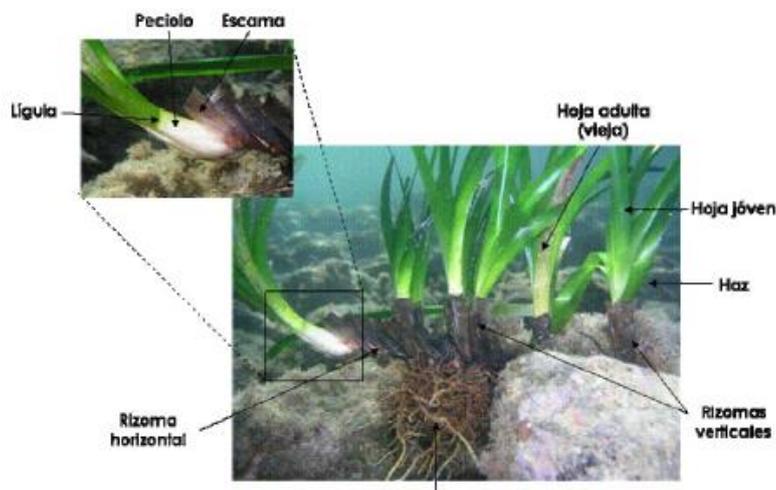


Imagen 4: Detalle de un ejemplar de posidonia [18]

Dependiendo de la antigüedad de la pradera y de las condiciones de la zona, el espesor del entramado de rizomas variará desde algunos centímetros hasta varios metros. El crecimiento vertical de los rizomas para evitar el enterramiento de las praderas provocara un elevamiento de las mismas, llegando hasta la superficie, denominados arrecifes.

#### 2.1.4. Crecimiento

La posidonia oceánica posee un ciclo vital con una clara diferencia estacional (esquema 1). Las hojas se desprenden todo el año pero dependiendo de la estación del año se hace más intensamente o menos.

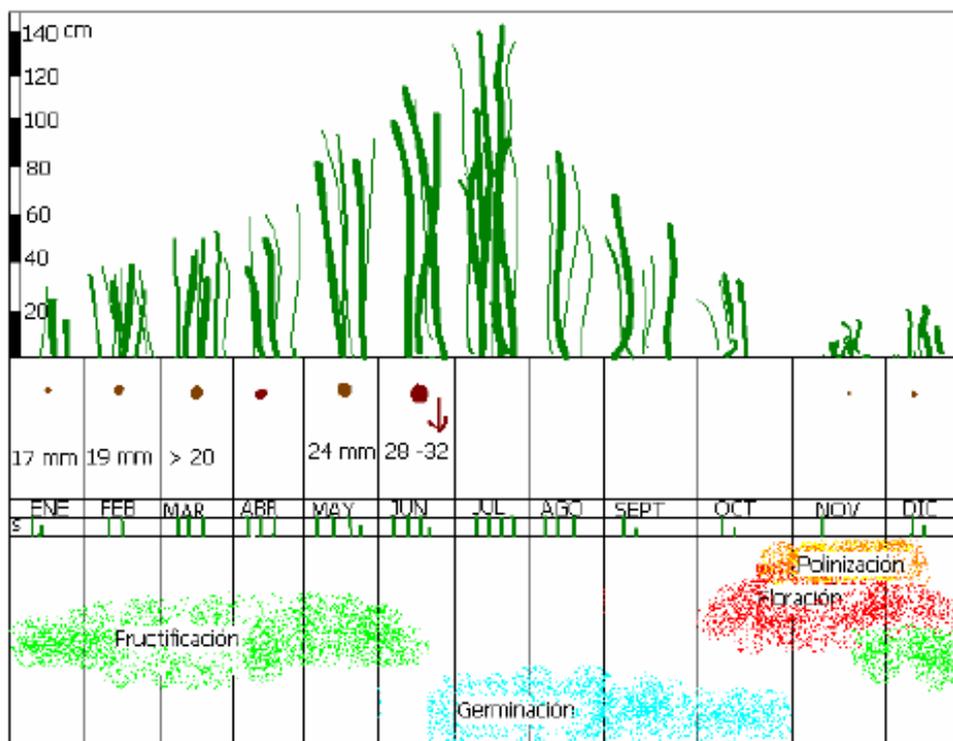


Figura 5: Crecimiento estacional posidonia [19]

- Septiembre-octubre: a causa de los primeros temporales y gota fría, el agua empieza a enfriarse, la planta pierde sus primeras hojas y empiezan a verterse en las playas esas hojas muertas tan características de nuestro litoral. Es en otoño cuando empieza el ciclo anual de floración.

- Noviembre-febrero: coincidiendo con las temperaturas más bajas del año, empieza el crecimiento de las hojas nacidas en otoño lentamente.
- Marzo – abril: con el aumento de la temperatura del agua empieza el proceso de madurez y las hojas alcanzan una gran longitud mostrando aspecto espeso.
- Entre abril y mayo: se produce la germinación de los frutos alcanzando ya los 8-10 cm.
- Julio – agosto: en la estación con mayores temperaturas los microorganismos se fijan progresivamente en las hojas hasta cubrirlas por completo.

#### 2.1.5. Funciones ecológicas

Las praderas de Posidonia existentes protegen de forma natural el litoral ya que sus rizomas fijan el sedimento y dan lugar a estructuras que amortiguan la acción de las olas. Su desarrollo favorece la existencia de otras especies marinas.

La presencia de Posidonia en los fondos también incrementa la rugosidad y produce que la erosión que ocasionan las olas disminuya de forma que las olas rompen en una zona alejada de la línea de costa. De esta forma, el porcentaje de erosión de sedimentos es inferior.

Las praderas de Posidonia por su situación en línea paralela a la costa permiten retener la arena favoreciendo el litoral arenoso de la costa.

Otros aspectos a tener en cuenta son los desechos producidos por la muerte de las mismas, que se acumulan en nuestro litoral formando una espesa capa de arena, materia orgánica y agua protegiendo la playa de temporales y reduciendo la velocidad de la ola modificada por la pradera interior debido a su

viscosidad. Esta función normalmente no se llega a producir ya que en temporadas estivales son retiradas por el ser humano.

En el aspecto biológico, la presencia de posidonia da lugar a la presencia de lugares de crías de especies de peces de interés comercial y ecológico, así como la colonización de nuevas especies marinas dando lugar a una amplia biodiversidad marina y abundancia.

## **2.2 Teoría de la absorción acústica**

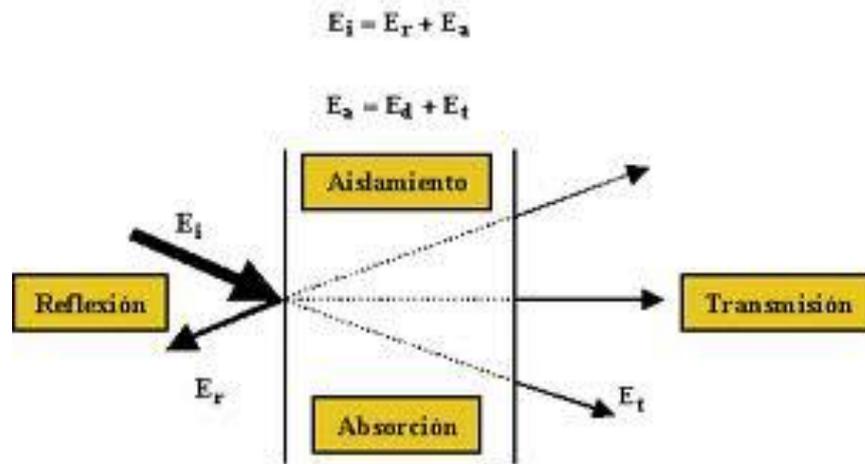
### **2.2.1 Introducción a la absorción acústica**

De forma general, en el acondicionamiento acústico desempeña un papel importante el tiempo de persistencia del sonido en una sala (tiempo de reverberación o eco). Estos fenómenos presentan una característica en común para su corrección: la absorción de energía acústica en reflexiones por parte de los elementos presentes en el recinto.

En acústica de salas, la absorción se tiene en cuenta para controlar el tiempo de reverberación, eliminar ecos y modos de resonancia indeseados y ayudar a la obtención de un balance de energías óptimo.

### **2.2.2 Principios de funcionamiento de los materiales absorbentes**

Cuando una onda progresiva alcanza un obstáculo (figura 6), parte de esa onda se refleja y parte de la misma se absorbe por el obstáculo, de tal forma que la energía incidente ( $E_i$ ) se reparte entre la energía reflejada ( $E_r$ ), la energía absorbente ( $E_a$ ) y la energía transmitida ( $E_t$ ).



Esquema 2: Representación ondas [12]

La cantidad de energía absorbida depende de las propiedades del material del obstáculo en cuestión, su forma y espesor, y en ella influye la frecuencia de la onda acústica así como el Ángulo de incidencia.

- Es importante clasificar según si la energía absorbida se transforma en energía calorífica o **mecánica**. Una forma de absorber energía acústica de un campo es introducir en él un elemento capaz de absorber energía mecánica como son placas vibrantes o resonadoras.
- De otro modo, y de forma más común, otra forma de absorber es mediante el uso de sustancias absorbentes del sonido. Estas sustancias provocan amortiguamiento de las ondas sonoras mediante la transformación de energía sonora en **calorífica**.

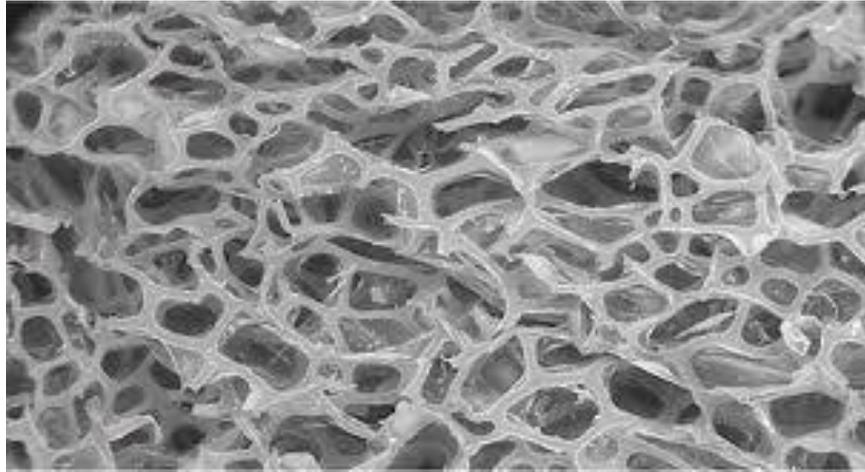
Estas sustancias pueden absorber de dos formas:

- En sustancias homogéneas y blandas la onda de presión provoca deformaciones en la superficie de separación de las mismas con el aire en la sala, dichas deformaciones se transmiten a lo largo de la sustancia absorbente, requiriendo energía para producirse y que será tomada de la onda acústica.

En este caso interesa que la resistencia que ofrece el material a la propagación de la onda sea grande a su través, produciéndose la deformación necesitando que el material no sea rígido.

- En materiales porosos o fibrosos de poro abierto, al incidir la onda acústica sobre ellos, se refleja una porción muy pequeña. Las partículas del aire que penetran en el material siguen vibrando y en esta vibración se produce un rozamiento con las paredes de estos poros lo que produce una pérdida energética de las partículas por transformación de energía calorífica en el rozamiento. A mayor rigidez de la estructura mayor será la velocidad relativa entre las partículas y por tanto se producirá mayor rozamiento y así mayor absorción. Si la estructura del material es más flexible se produce menor rozamiento y menor pérdida de calor por lo tanto se producirá una pérdida por transformación de energía acústica en mecánica.

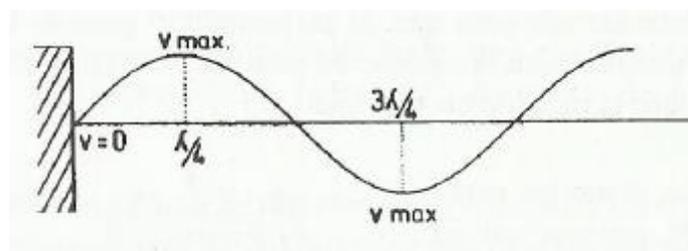
En este caso, como las partículas han de penetrar del aire en su interior, para que se produzca fricción contra las paredes de los poros, la impedancia ha de ser muy baja para permitir que una gran parte de la onda se transmita a su interior, ya que allí donde se produce la pérdida de energía y por lo tanto la absorción.



**Figura 7:** Material poroso ampliado [12]

En profundidad, en los materiales porosos (figura 7) la distancia de la capa de material poroso a una pared rígida debe ser aproximadamente  $\lambda/4$ , lo cual conlleva a que este mecanismo de absorción será factible para frecuencias medias y altas pero no bajas, donde se tendrá que recurrir a otros métodos (membranas y resonadores). Es evidente que el máximo efecto de absorción se dará cuando el material de estructura de poro abierto se sitúe en las zonas o regiones donde la velocidad de las partículas sea mayor, ya que la energía disipada por rozamiento es energía cinética, por tanto proporcional a la velocidad relativa de las partículas en el aire y de las paredes de los poros.

Para obtener los puntos de mayor velocidad se debe recurrir a la onda de velocidades del campo acústico y buscar los máximos (figura 8).



**Figura 8:** Máximos de velocidad [12]

En el caso de una onda de en las proximidades de un cerramiento rígido (foto antes), se produciría un máximo de velocidad a  $\lambda/4$  de la pared rígida por lo tanto la capa absorbente de poro abierto se debe colocar de tal forma que cubra un máximo de velocidad para conseguir una absorción notoria. Para obtener en este caso una absorción máxima, la distancia a la pared del material absorbente debe ser:

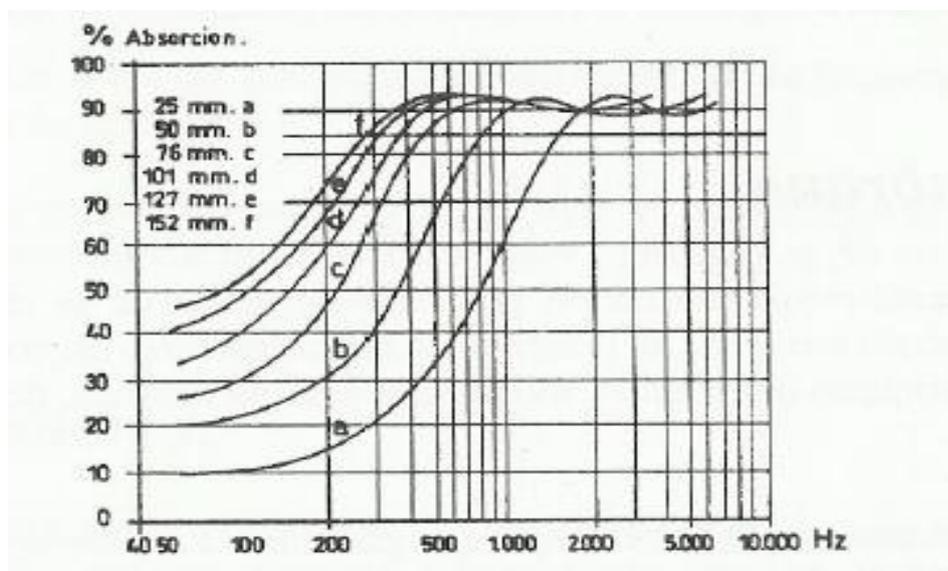
$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}$$

En el caso del aire  $c=340\text{m/s}$

#### Ecuación 1

Concluyendo, podemos afirmar que este tipo de materiales necesitan una correcta colocación por cada frecuencia a absorber.

Para utilizar adecuadamente un material poroso hay que encontrar una relación óptima entre espesor y porosidad. Si es más poroso, mayor espesor debe haber pues de otra forma la onda no pierde energía al atravesarlo. Por regla general, el coeficiente de absorción de un material poroso aumenta con la frecuencia como podemos ver en la siguiente gráfica (gráfica 1): a frecuencias bajas es donde se mejora con el aumento del espesor.



Gráfica 1: Representación coeficiente absorción según espesores [12]

### 2.2.3 Introducción a la caracterización acústica de materiales

Existen varias características acústicas importantes de materiales porosos:

- Coeficiente de absorción acústica
- Porosidad
- Viscosidad
- Caracterización térmica
- Tortuosidad
- Impedancia característica compleja
- Constante propagación compleja

Las dos últimas sirven para determinar y caracterizar materiales fibrosos y porosos mientras que de las tres primeras podemos decir que se pueden determinar de forma experimental. Casi todos los materiales porosos son físicamente anisótropos, es decir, tienen diferentes valores para sus propiedades físicas dependiendo de su dirección.

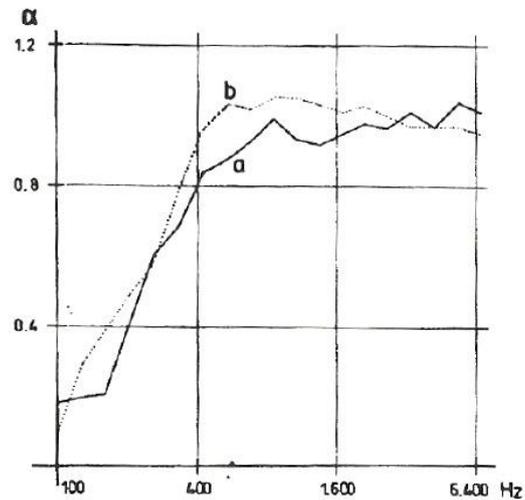
### 2.2.4 Coeficiente de absorción

Se define el coeficiente de absorción como el cociente entre la energía absorbida respecto al incidente, dependiendo de este material existente así como de su montaje.

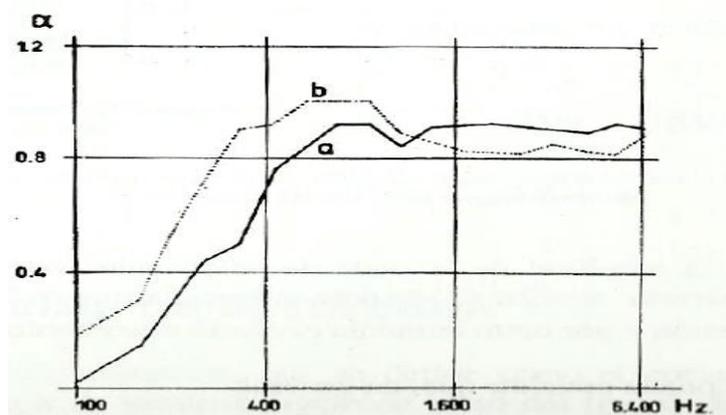
Afirmaremos por lo tanto que:

- La absorción aumenta con la frecuencia
- Para altas frecuencias la absorción no depende del espesor del material
- Para bajas frecuencias la absorción aumenta con el espesor

A continuación, en las siguientes graficas (2 y 3) se apreciará la influencia del espesor, densidad y distancias a la pared en la absorción acústica.



**Gráfica 2:** Absorción acústica según espesor [12]. Coeficiente de absorción de un recubrimiento de un cerramiento de hormigón con lana mineral de 50 mm de espesor. (a) Densidad 40 kg/mm<sup>3</sup>, (b) Densidad 100 kg/mm<sup>3</sup>.



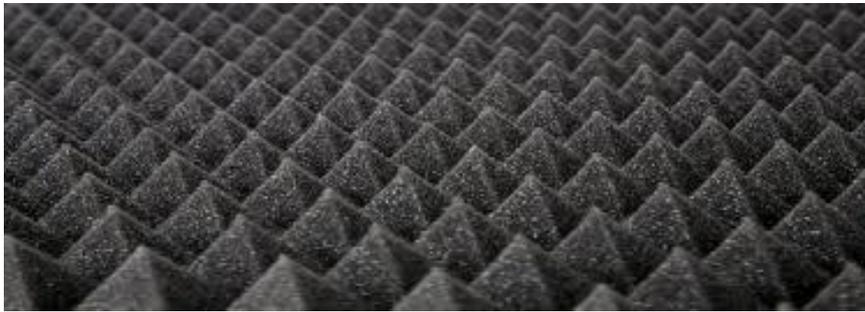
**Gráfica 3:** Coeficiente absorción según espesor [12]. coeficiente de absorción de un recubrimiento de lana mineral de 30mm de espesor y densidad 45,6. (a) Montaje sobre el hormigón, (b) Montado a 50mm de distancia.

En las imágenes se dan los diagramas de absorción de un material tipo lana mineral en diferentes espesores. Se observa el efecto beneficioso de separarse de la pared rígida en bajas frecuencias, así como el aumento de la densidad influye en las altas frecuencias.

## **2.3 Materiales para aislamiento y acondicionamiento acústico**

### **2.3.1. Materiales porosos**

Son de estructura fibrosa (figura 9) y como factor a tener principalmente en cuenta es el espesor de la capa principal en relación con la distancia de esta a la pared. El espesor del material dependerá del coeficiente de absorción del material ya que si es demasiado grueso, el coeficiente se reducirá a bajas frecuencias.



**Figura 9:** Material poroso [12]

### **2.3.2. Materiales para argamasa**

Son materiales que se aplican en estado húmedo para obtener espesores a medida. Están compuestos por materiales secos a los cuales el añadido de líquidos hará que se modifiquen a conveniencia. Se utilizan principalmente en casos en los que la reducción de sonido no sea elevada.

### **2.3.3. Sistemas de paneles metálicos perforados**

Son paneles perforados con relleno de fibras. En comparación a los materiales porosos, tienen más resistencia a los golpes, más duración y son mucho más manipulables. La absorción de cada elemento del sistema se determina mediante datos de construcción, tales como dimensiones del sistema, distancia a la pared, espesor siendo elevadas en la mayoría de los casos.

### 2.3.4. Absorbentes suspendidos

Se utiliza en recintos con pocas superficies susceptibles de colocar otros materiales absorbentes. Tomar forma de láminas y deben estar colgadas verticalmente en filas continuas. La absorción se puede calcular en función de cada una por número de unidades y de la distancia y frecuencia a la que se encuentran de la fuente sonora.

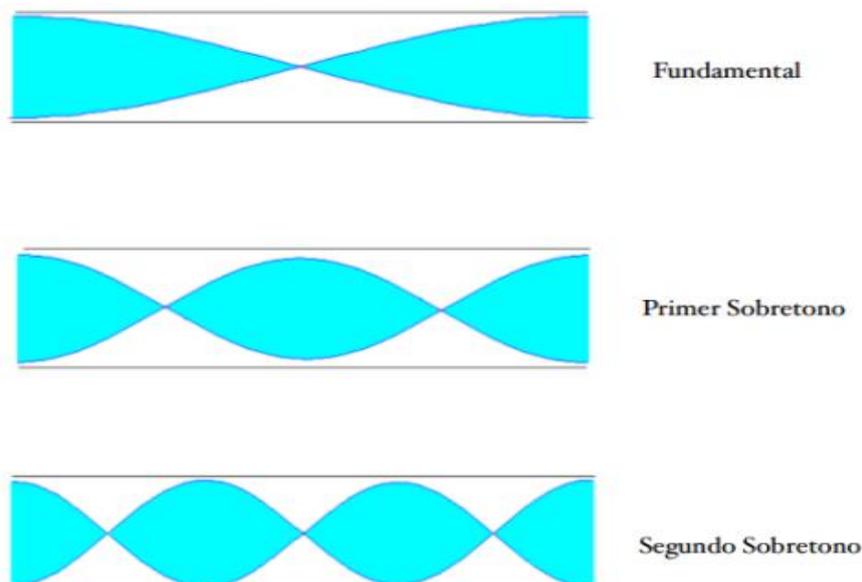
## 2.4 Tipos de tubos

### 2.4.1. Tubos abiertos

Un tubo abierto es el cual al extremo del mismo no está cubierto. Si disponemos de un tubo abierto el aire provocara que en los extremos se obtengan la máxima amplitud de onda. Como podemos ver en la figura, la distancia entre dos nodos en este caso es  $L = \frac{n\lambda}{2}$  con  $n=1, 2,3,\dots$  (Gráfica 4).

Partiendo de la ecuación tal y junto con  $\lambda = \frac{c}{f}$  obtendremos las frecuencias  $f = \frac{n \cdot c}{2L}$

En el caso del aire  $c=340\text{m/s}$



Gráfica 4: Representación tonos tubos abiertos [3]

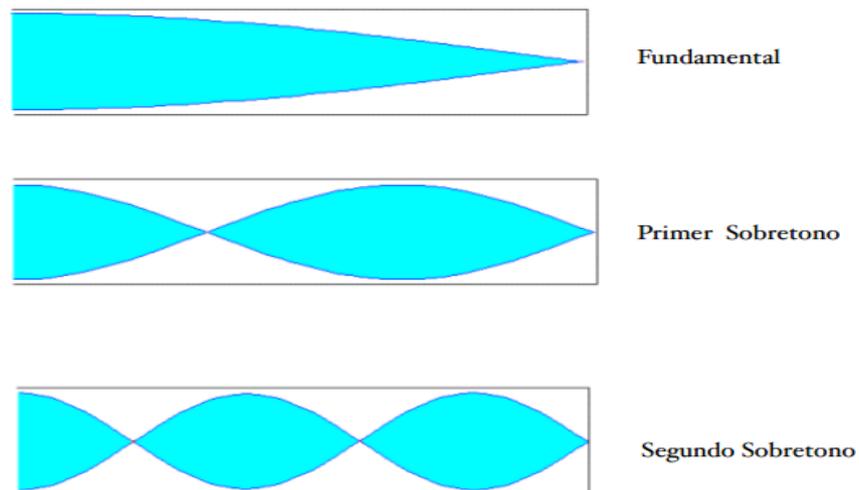
### 2.4.2 Tubos cerrados

Al utilizar este tipo de tubos, se originaran vientres en el extremo por el cual entra el aire y no por la parte cerrada. Al tener la distancia entre un nodo y el vientre, la longitud del tubo  $L$  será  $L = \frac{n\lambda}{4}$  con valores  $n=1,2,3$  y la frecuencia consiguiente será:

$$f = \frac{(2n+1)c}{2L}$$

En el caso del aire  $c=340\text{m/s}$

En la gráfica 5 podemos ver representados nodos y vientres.



**Gráfica 5:** tubos cerrados [3]

### 2.4.3 Tubo de kundt

#### 2.4.3.1 Descripción y funcionamiento

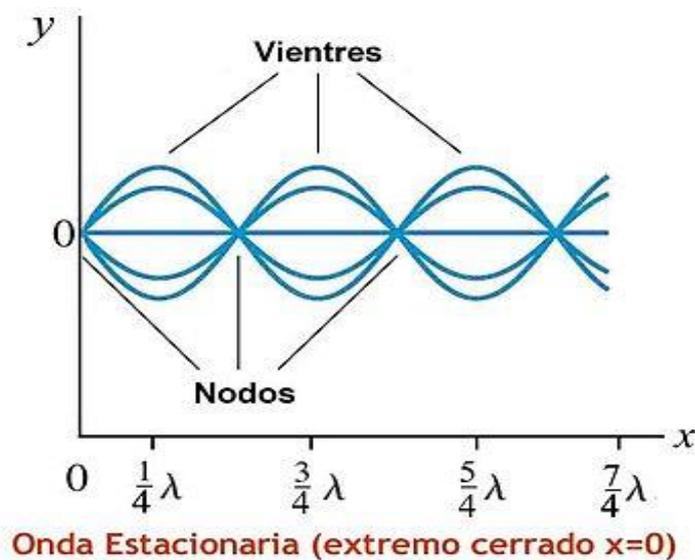
Un tubo de kundt consta de un tubo con el que se podrá analizar las ondas estacionarias que se crean en él. Por el extremo abierto introduciremos un micrófono con una sonda y por el extremo contrario colocaremos el altavoz y este a su vez ira conectada a un generador de funciones que emitirá a las frecuencias deseadas

Las ondas emitidas por el altavoz serán refractadas y se reflejarán a lo largo del tubo por lo cual se superpondrán unas con otras intensidades dando lugar a las mencionadas ondas estacionarias. Los nodos los determinaremos según la ecuación

$$f = \frac{n \cdot \text{Velocidadsonido}}{2L}$$

Con velocidad sonido=340m/s, n=1,2,3..... y L, longitud del tubo.

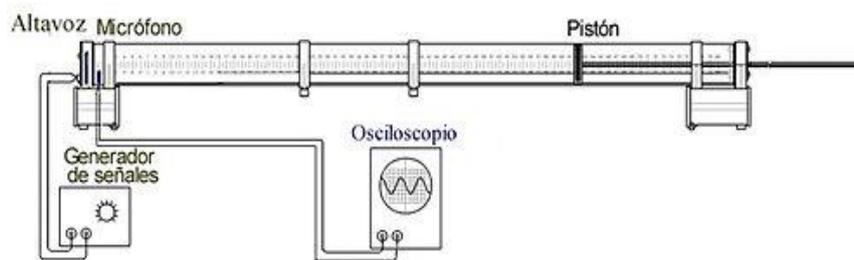
Al fijar una determinada frecuencia de sonido y modificar la distancia de la sonda con el altavoz se observará que en algunas posiciones existe una resonancia con la cual aparecerá un máximo de intensidad generado por el tubo. El máximo aparecerá en los vientres representados a continuación .



**Gráfica 6:** Representación de las ondas estacionarias en un tubo extremo cerrado [3]

### 2.4.3.2. Aplicación tubo kundt

La aplicación principal del tubo de kundt (figura 10) es la de medir y determinar la velocidad del sonido aproximada. Para ello se variara la posición de nuestro micrófono moviendo la sonda buscando los vientres o máximos y los nodos del tubo. Con esas distancias obtendremos nuestra longitud de onda  $\lambda$  y con las frecuencias que determinaremos obtendremos un rango de la velocidad de sonido.



**Figura 10:** Funcionamiento tubo kundt [1]

## 3. Modelos para la determinación de coeficiente de absorción e impedancia acústica

---

### 3.1. Método función de transferencia

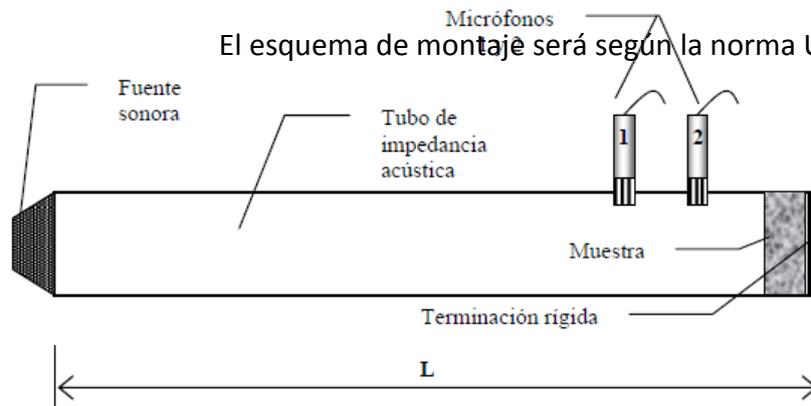
#### 3.1.1. Diseño experimental

Para la obtención del coeficiente de absorción e impedancia acústica seguiremos las recomendaciones de la normativa UNE-EN ISO 10534-2 **“Determinación del coeficiente de absorción e impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”**.

El campo de ensayo se aplicara por incidencia normal de absorción acústica mediante un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de analizador de señales. El método de ensayo consiste en la generación de ondas planas en el tubo mediante una fuente de ruido y de la descomposición del campo interferencial. Se realiza mediante la medida de la presión acústica en las dos posiciones fijas usando los dos micrófonos, seguido del cálculo de la función de transferencia compleja, la absorción a incidencia normal y los cocientes de la impedancia del material.

El cálculo del coeficiente de absorción acústica no es más que el cálculo del cociente entre la energía acústica y la energía acústica incidente para el caso de una onda plana incidencia normal.

### 3.1.2 Equipo instrumentación



**Figura 11:** Equipo instrumentación función transferencia [2]

La muestra de ensayo se monta en uno de los extremos de un tubo de impedancia, recto, rígido, liso y estanco (figura 11). Se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente sonora y se miden las presiones acústicas de dos posiciones cercanas a la muestra. Se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usa para calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal y la impedancia normalizada del material de ensayo.

Las magnitudes se determinan como funciones de la frecuencia, con una resolución en frecuencia condicionada por la frecuencia de muestreo y la longitud de la señal del sistema digital de análisis de frecuencia usado para las mediciones. El rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia de las posiciones microfónicas.

Las mediciones pueden realizarse usando dos técnicas: 1) método de los dos micrófonos (usando dos micrófonos en posiciones fijas) y 2) método de un micrófono (usando un micrófono sucesivamente en dos posiciones).

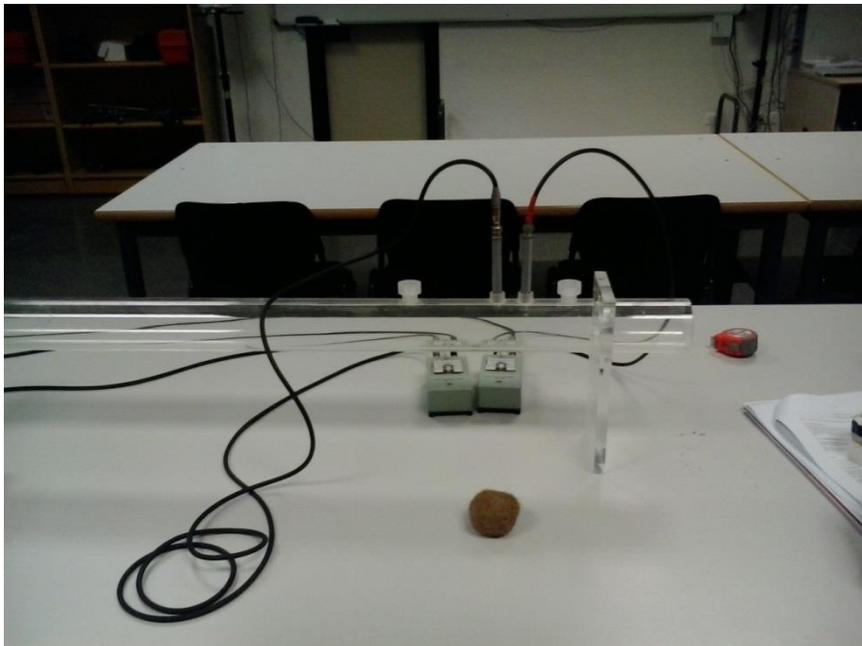
Para nuestra determinación utilizaremos el método de las dos posiciones fijas: necesita un procedimiento de corrección previo o simultáneo al ensayo para minimizar las diferencias en las características de amplitud y fase entre los micrófonos; no obstante combina rapidez, gran precisión y sencillez de implementación.

Las especificaciones técnicas del equipo de instrumentación serán las siguientes:

- **Tubo de impedancia:** el tubo de impedancia tiene que ser rectilíneo, de sección recta constante y con paredes rígidas, lisas y no porosas sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo. Las paredes deben ser lo suficientemente pesadas para que no entren en vibración por acción de las señales acústicas y no presenten resonancias de vibración.
- **Micrófonos:** Se deben usar micrófonos idénticos en cada posición. Cuando se usen micrófonos montados en paredes el diámetro de la pared debe ser pequeño. En los micrófonos montados en la pared cada micrófono debe montarse con el diafragma coincidiendo con la superficie interior del tubo. Debe sellarse correctamente el agujero donde introducimos el micrófono para la no distorsión de la señal percibida.
- **Instrumentación procesado de señales:** la instrumentación de procesamiento de las señales debe estar constituida por un amplificador y un procesador bicanal de transformada rápida de Fourier (FFT). Se requiere que el sistema mida la presión acústica en dos posiciones de micrófono y calcule la función de transferencia entre ellas. Se necesita también un generador capaz de producir la señal fuente necesaria compatible con el sistema procesador

- **Altavoz:** un altavoz de membrana debería montarse en la terminación del tubo de impedancia del lado opuesto al portamuestras. El altavoz debe colocarse en una caja aislada que evite toda transmisión por vía aérea por los flancos al micrófono. Para evitar la excitación acústica del tubo de impedancia por vía sólida debe aplicarse aislamiento vibracional elástico entre el tubo de impedancia y el montaje del altavoz así como la caja del altavoz.

A continuación, se adjunta la imagen del montaje del mismo:



**Figura 12:** Esquema montaje para la medida de la función transferencia

### 3.1.3 Definición y parámetros

- **ko, numero de onda de campo adyacente,**  $ko = \frac{w}{co} = \frac{2\pi f}{co}$  (w: pulsación, f: frecuencia, co: velocidad sonido)
- **$\alpha$ , coeficiente de absorción acústica:**  $\alpha = 1 - |r|^2$
- **$r = \left(\frac{H_{12}-H_1}{Hr-H_{12}}\right) * e^{2jkox1}$ , coeficiente de reflexión a incidencia normal,** con x1 posición entre la muestra y posición ultima del micrófono

- $H1=e^{-jks}$ ; **función transferencia para la onda incidente sola**, con  $s$ = separación entre micrófonos
- $Hr=e^{jks}$ ; **función de transferencia para la onda reflejada**, con  $s$ = separación entre micrófonos
- $Zo = co \times po$  **Zo, impedancia acústica** ( $po$ = densidad aire,  $co$ = velocidad sonido en el medio), impedancia característica
- $S12 = p2 \times (p1^*)$ , **espectro cruzado**, determinado a partir de las presiones acústicas complejas  $p1$  y  $p2$  en dos posiciones de micrófono.
- $S11 = p1 \times (p2^*)$ , **autoespectro**, determinado a partir de la presión acústica compleja  $p1$  en la posición de micrófono 1
- **ko, numero de onda de campo adyacente**,  $ko = \frac{w}{co} = \frac{2\pi f}{co}$  ( $w$ : pulsación,  $f$ : frecuencia,  $co$ : velocidad sonido)
- $H12 = \left(\frac{s12.s22}{s11.s21}\right)^{1/2} = Hr + jHi$ ,  $H12$  función de transferencia, con  $Hr$  parte real y  $Hi$  parte imaginaria

## 3.2. Método del rango de onda estacionaria

### 3.2.1. Diseño experimental

La presente Norma ISO 10354 prescribe un método de determinación del coeficiente de absorción y de la impedancia en superficie o de la admitancia en superficie de los materiales y de los objetos. Los valores se determinan bajo incidencia normal por evaluación de campo de ondas estacionarias de una onda plana sinodal incidente y de la onda reflejada por la muestra de ensayo.

El método puede utilizarse para la determinación del coeficiente de absorción acústica de absorbentes acústicos bajo incidencia normal. Puede utilizarse además para la determinación de la impedancia o admitancias acústicas en superficie, de materiales absorbentes. Es conveniente para estudios de los parámetros y diseños absorbentes acústicos.

El método del tubo de impedancia puede utilizarse para la determinación del coeficiente de reflexión así como de la impedancia o admitancia. El ruido incidente es normal a la superficie de la muestra. Este método está basado en la existencia de una onda acústica incidente plana y da valores exactos en esas condiciones. Otro aspecto a tener en cuenta es que el método necesita muestras de ensayo del tamaño equivalente al área de la sección recta del tubo de impedancia. Puede aplicarse igualmente a objetos importantes bien definidos tanto en sentido lateral como perpendicular.

La muestra de ensayo se monta en uno de los extremos de un tubo de impedancia rectilíneo, rígido, liso y estanco. La superposición de la onda incidente y la onda reflejada producto un sistema de ondas estacionarias en el tubo. La evaluación se basa en las medidas de los mínimos de presión y los máximos.

A continuación veremos un esquema de montaje y funcionamiento de este método:

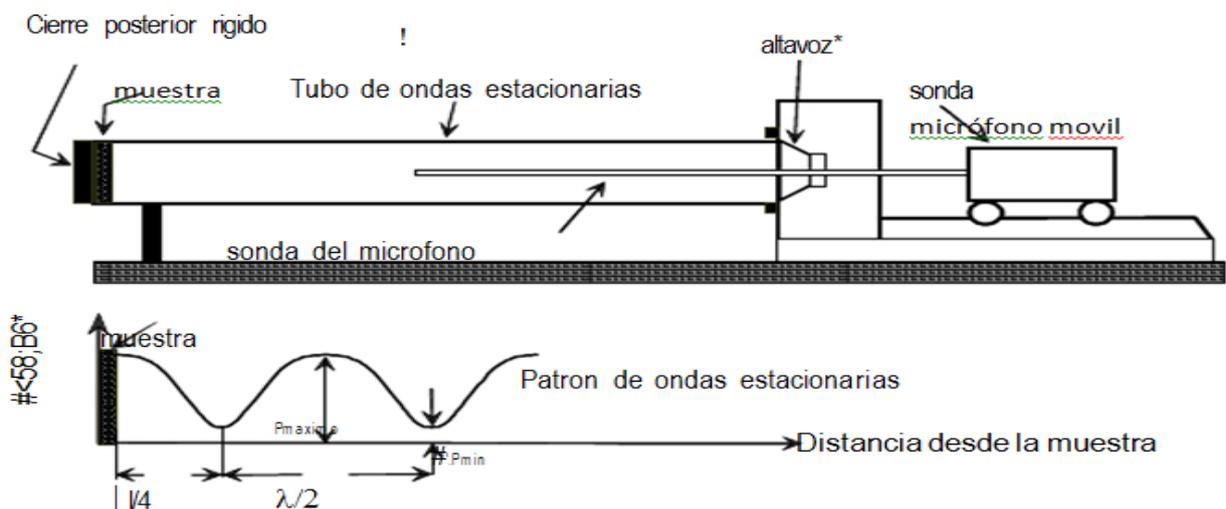


Figura 13: Montaje tubo kundt [1]

### 3.2.2 Equipo instrumental

La instrumentación de ensayo está formada por un tubo de impedancia, un porta muestras, una sonda microfónica con un dispositivo que permita desplazarla y posicionarla, una unidad de tratamiento de señales para las señales del micrófono, un altavoz, un generador de señales sinodales.

Las especificaciones técnicas del equipo de instrumentación serán las siguientes:

- **Tubo de impedancia:** el tubo de impedancia tiene que ser rectilíneo, de sección recta constante y con paredes rígidas, lisas y no porosas sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo. Las paredes deben ser lo suficientemente pesadas para que no entren en vibración por acción de las señales acústicas y no presenten resonancias de vibración.
- **Porta muestras:** el porta muestras debe ser suficientemente grande como para instalar las muestras de ensayo asegurando un volumen de aire del tamaño prescrito. El porta muestras puede formar parte integrante del tubo o ser un elemento separado, en cuyo caso debe conseguirse, durante las mediciones, un cierre hermético del tubo.
- **Micrófono:** un micrófono móvil registra el sistema de ondas estacionarias en el tubo de impedancia para la localización de los mínimos de presión y para localizar los valores de las amplitudes de presión acústica en los mínimos y los máximos de las ondas estacionarias. El micrófono puede moverse en el exterior del tubo de impedancia o siendo móvil, estar directamente en el interior del tubo de impedancia.
- **Sonda microfónica:** la sonda microfónica debe ser de metal con un espesor de pared suficiente para impedir la diafonía del campo acústico en la sonda a través de las paredes. El diámetro de conducción de la sonda debe estar en relación con su longitud: una sonda de diámetro reducido puede tener una atenuación interna demasiado elevada. Debe impedirse contactos mecánicos entre la sonda y el tubo de impedancias que puedan transmitir vibraciones a

la sonda, especialmente en la abertura donde la sonda se introduce en el tubo de impedancia

- **Instrumentación procesada de señales:** La instrumentación de análisis de señales está constituida por un amplificador, un filtro, un aparato de medición de la presión acústica o del nivel de presión acústica.
- **Dispositivo de desplazamiento y de medida de la posición del micrófono:** el dispositivo de desplazamiento de la sonda microfónica y de medida de la posición de su centro acústico debe permitir medidas de precisión  $\pm 5$  mm. Esta precisión puede aumentar de tamaño lineal para frecuencias menores que 300 Hz.
- **Altavoz:** un altavoz de membrana debería montarse en la terminación del tubo de impedancia del lado opuesto al portamuestras. El altavoz debe colocarse en una caja aislada que evite toda transmisión por vía aérea por los flancos al micrófono. Para evitar la excitación acústica del tubo de impedancia por vía sólida debe aplicarse aislamiento vibracional elástico entre el tubo de impedancia y el montaje del altavoz así como la caja del altavoz.
- **Generador de señales:** el generador de señales está constituido por un generador de señales sinusoidales.

### 3.2.3 Definiciones y parámetros

- **$\alpha$ , coeficiente absorción acústica:** coeficiente entre energía acústica absorbida por la superficie de la muestra del ensayo y energía acústica incidente
- **$r$ , coeficiente reflexión de presión acústica para incidencia normal:** cociente complejo entre la amplitud de la presión acústica de la onda reflejada y la incidente
- **$z_0 = \rho_0 \cdot c_0$  ( $\rho_0$ = densidad aire,  $c_0$  velocidad sonido en el medio), impedancia característica**
- **$s$ , rango onda estacionaria**  $s = \frac{p_{max}}{p_{min}}$ , cociente entre el nivel de presión acústica en un máximo de presión y del mínimo
- **$k_0$ , numero de onda de campo adyacente,**  $k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0}$  ( $\omega$ : pulsación,  $f$ : frecuencia,  $c_0$ : velocidad sonido)

## 4. Resultados

---

### 4.1. Descripción de la muestra

Se trata de muestras de fibra de posidonia oceánica. Estas han sido obtenidas en las costas de Denia (norte de Alicante), en las playas de Les Roques, lugar donde los aficionados a la pesca submarina desempeñan su afición por sus aguas cristalinas, hábitat de la posidonia. Como podemos observar es un material fibroso y poroso (figura 14). Las particularidades para la medición de las fibras de posidonia que se han presentado han sido las siguientes:

- Debido a que el material se forma de forma totalmente natural, su compactación deja mucho que desear, por lo tanto su segmentación o división resulta del todo complicada
- Para la medición de la muestra se requiere que la parte de la muestra que recibe las ondas debe ser plana, por lo tanto ahí presentaría el experimento el primer gran inconveniente. Para solucionarlo sin que las muestras se descompusieran se eligieron las muestras de la playa con la mayor linealidad en una de las mismas así como el someter a presión a la muestra para conseguir una cara plana.
- Para que la muestra entrara por nuestro tubo, y empezar con su posterior análisis, se recortaron las fibras salientes para conseguir una correcta entrada al tubo y se seleccionaron las muestras de un adecuado diámetro para medir en el tubo (figura14).

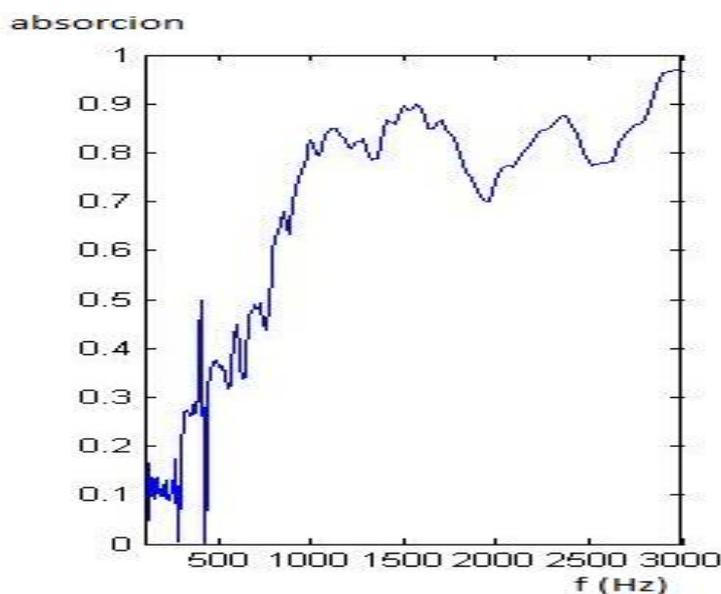


**Figura 14:** Fibra posidonia

## 4.2 Resultados con el método de función de transferencia

Para la obtención de valores más fiables hemos realizado el análisis de tres muestras de fibras de posidonia con diferentes tamaños. El rango de frecuencias utilizadas es de 20 Hz a 3000 Hz así como las gráficas obtenidas muestran en primer lugar el coeficiente de absorción y en segundo lugar la impedancia característica (gráfica 7). La separación entre micrófonos utilizada por nosotros será de 4 cm y la separación utilizada entre el ultimo micrófono y la muestra de 20 cm.

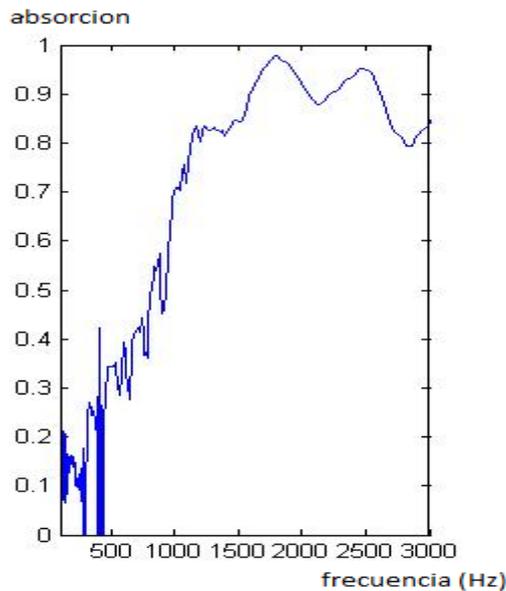
Para la obtención de dichas graficas hemos procesado los datos obtenidos en el laboratorio, en las diferentes muestras. Para el procesado se ha requerido del software de programación y lenguaje matemático Matlab, con la consiguiente creación de archivos .m para la posterior obtención de las gráficas (Anexo I).



**Gráfica 7:** Coeficiente absorción posidonia 4 cm espesor

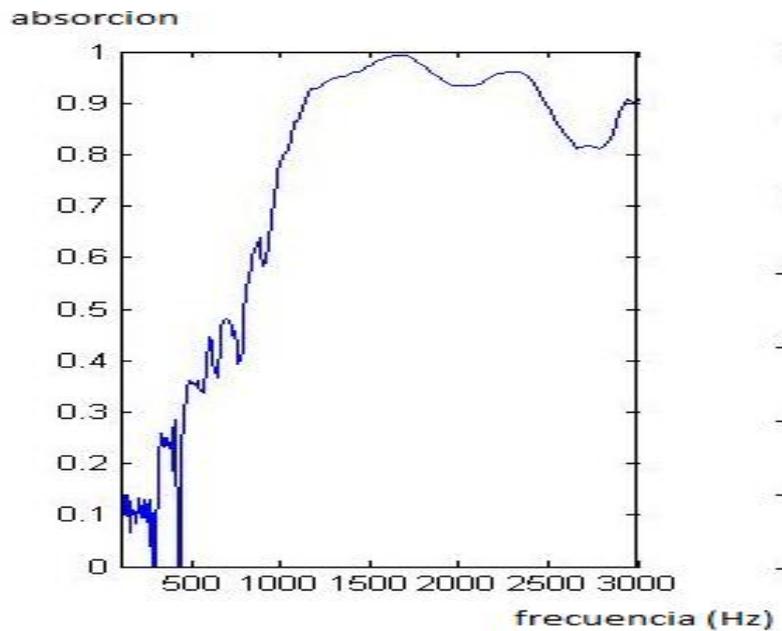
Con la muestra de espesor de 4 cm de posidonia, se puede observar que a frecuencias bajas (entre 0 y 800 Hz) existen unas fluctuaciones en el coeficiente de absorción que pueden venir derivadas de reflexiones. A pesar de esto, se puede ver a

estas frecuencias como el coeficiente de absorción crece de forma rápida hasta llegar a 1250 Hz que se mantiene estable hasta los 3000 Hz en valores comprendidos entre 0.85 y 0.75



**Gráfica 8:** Coeficiente absorción posidonia con espesor 3,3 cm

La grafica anterior (gráfica 8) representa el coeficiente de absorción de una muestra de fibra de posidonia de 3,3cm de espesor. Presenta un comportamiento similar, como era de esperar, a la muestra de 4 cm pero con unas particularidades: a frecuencias bajas el coeficiente de absorción es ligeramente inferior, en cambio para frecuencias altas se consiguen mayores valores ya que hay picos de casi 1 y valores medios de 0.9.

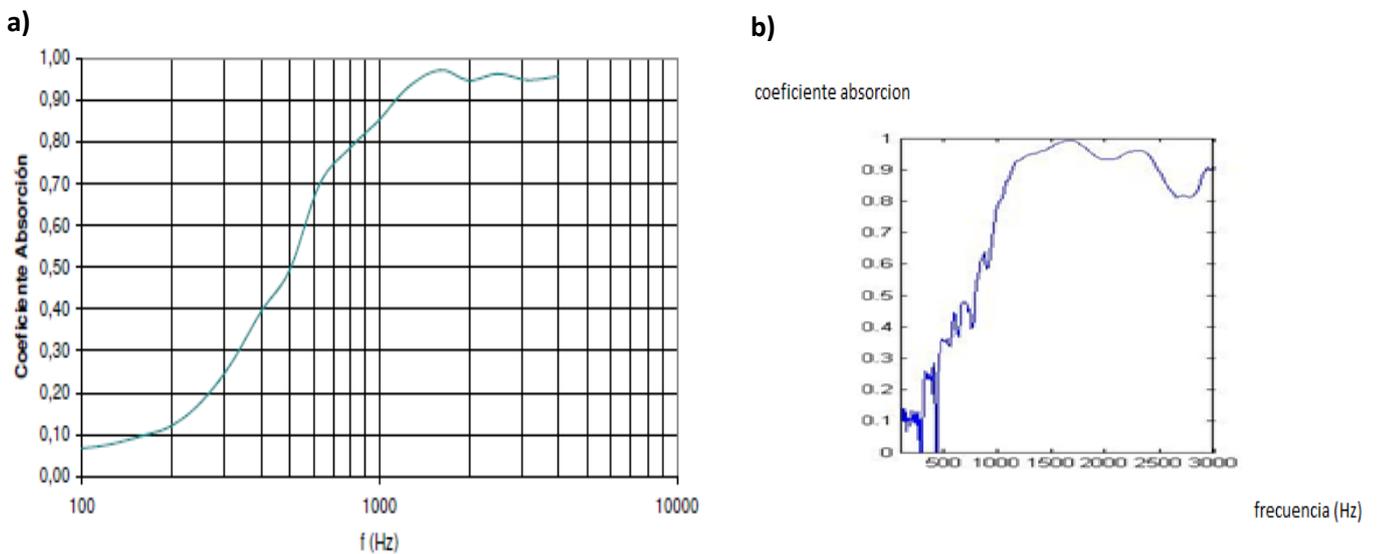


**Gráfica 9:** Coeficiente absorción posidonia con espesor 2,7 cm

En la gráfica (gráfica 9), nuestra muestra es de 2,7 cm de espesor y tampoco presenta grandes variaciones de las anteriores. A las anteriores reflexiones a frecuencias bajas, se aprecia que en las mismas el coeficiente de absorción es ligeramente inferior a las de superiores espesores, pero en cambio, a partir de los 1000 Hz sufre un incremento sustancial hasta valores elevados de coeficiente de absorción

### 4.3 Comparativa de coeficientes de absorción de posidonia con otras fibras porosas

Con el objetivo de comparar con otros materiales fibrosos como la posidonia de 2,7 cm de espesor, compararemos medidas de coeficiente de absorción de lana de roca de 2,7 cm de espesor y otro biomaterial, fibra de coco.



**Grafica 10.** a) Coeficiente de absorción acústica lana roca 1.5cm [8] b) Coeficiente de absorción acústica de posidonia de 2,7 cm

**Tabla 1:** Coeficientes absorción fibra de coco [13]

Freq. (Hz)	espaç. 0,0cm	espaç. 3,0cm	espaç. 6,0cm
	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$
125	0,11	0,20	0,20
250	0,13	0,20	0,26
500	0,12	0,34	0,65
1000	0,22	0,85	0,60

#### **4.4. Conclusiones**

Después de observar el comportamiento general después de las mediciones del coeficiente de absorción de la fibra de posidonia se puede concluir que:

- Los valores de los coeficientes de absorción de la posidonia en relación a los de otra fibra natural como la fibra de coco son similares
- Los gráficos representativos de la posidonia en comparación con la lana de roca (material así mismo fibroso) vemos que tienen un comportamiento parecido: **bajos coeficientes de absorción a frecuencias bajas, y no así en altas. En las frecuencias bajas el coeficiente se incrementa rápidamente para después en frecuencias medias y altas estabilizarse**
- El uso del tubo de kundt para caracterizar acústicamente materiales nos permite trabajar en laboratorios reducidos, lo que en ocasiones no representa fielmente la vida real, pero sí de forma orientativa
- Debido al origen biológico del material analizado, se puede afirmar también que la posidonia podría ser un material a investigar con mucha más profundidad ya que su presencia en nuestro litoral es abundante y a coste reducido.

#### **4.5. Líneas futuras investigación**

Como bien se ha descrito en el objeto y campo de estudio inicial, la utilización de biomateriales será siempre bien recibida, por la cual se ha estudiado la fibra de posidonia en este proyecto. En nuestro caso el estudio acústico de fibras naturales la podríamos expandir a más fibras naturales restos de juncos como, las cuales pueden proporcionar buenos resultados acústicos, así como el estudio de otro material como el yute que a la par se extrae de la misma planta para la fabricación de fibras textiles.

Otras posibilidades de estudio pueden ser el análisis de otros parámetros físicos como son:

- Influencia del grado de porosidad del material
- Tortuosidad
- Resistividad

## 5. Bibliografía

---

1. Normativa Española UNE-EN ISO 10534-1 Parte 1 Método del rango de onda estacionaria “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”
2. Normativa Española UNE-EN ISO 10534-2 Parte 2 Método de la función de transferencia “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”
3. PFC Luis Hernando Quintero , Escuela Superior Mecánica y Eléctrica Culhuacán, México “Análisis y diseño del tubo de impedancias bajo la función de transferencia”
4. Trevor J.Cox (University of Salford) and Peter D’Antonio (RPG Diffusor Systems, Inc.) “Acoustic Absorbers and Diffusers” , Taylor & Francis, London and New York 2004 first edition
5. Michel Bruneau and Catherine Potel “Materials and Acoustics Handbook”, Translator Thomas Scelo of “Manuel d’Acoustique fondamentale” by Editions Hermes in France 1998 first edition
6. Manuel Recuero López “Ingeniería Acústica” Editorial Parainfo, Madrid 2000
7. Michel Bruneau “Fundamentals of Acoustics” Hermes Science , first edition “Materiaux et acoustique” 2006 France
8. Tesis doctoral Ernesto Julia Sanchis “Modelación, simulación y caracterización acústica de materiales para uso arquitectónico” UPV Alcoy 2008
9. Tesis Maysa Daniela Moreno Mordones. Instituto de Acústica Universidad austral de Chile “Determinación analítica y experimental de la atenuación sonora de un protector auditivo de inserción considerando la absorción acústica de un material” Valdivia, Chile 2006

10. Artículo de D. Pedro Muñoz Díaz “Determinación de la impedancia y absorción acústica del corcho mediante tubo de impedancia” Revista Boletín de información técnica- AITIM , 1985, (119): 8-13, 0 Ref., Núm. registro: 26430
11. “Introducción al sonido y la acústica” Claudio Cortes Polanco, 1ª edición, Registro Propiedad Intelectual número 189336.
12. “Acústica: arquitectura y urbanística” J.Llinares, A. Llopis, J. Sancho, SPUPV 96.640
13. “Fibras vegetais em materiais acústicos: A fibra de coco”, Antonio M.P. Silva and Jules G. Slama, Programa de Pos Graduação em Arquitetura, Rio de Janeiro
14. “Caracterización de fanerógamas marinas” [www.regmurcia.com](http://www.regmurcia.com). Red de control praderas oceánicas Región de Murcia
15. [www.parquenatural.com](http://www.parquenatural.com)
16. En.wikipedia.org/wiki/posidonia\_oceanica
17. [www.irresiduo.com](http://www.irresiduo.com)
18. Red de Control de Praderas de Posidonia en la Comunidad Valenciana. Institut ecología litoral
19. Sánchez Lizaso, J.I. 1993 “Estudio Pradera Oceánica Tabarca” Tesis doctoral

## 6. Anexo I

---

### Programación de Matlab para obtener coeficiente de absorción e impedancia característica con dB y deg.

```
freq=data(:,1);
A_A_dB=data(:,2);%Ojo que está en dB
Theta_A=data(:,3);%Ojo que está en deg.
A_B_dB=data(:,4);%Ojo que está en dB
Theta_B=data(:,5);%Ojo que está en deg.

s=0.04;
x_1=0.2;

% Cambio de unidades
A_A=2e-5*10.^(A_A_dB/20);
A_B=2e-5*10.^(A_B_dB/20);

Phase_A=Theta_A*pi/180;
Phase_B=Theta_B*pi/180;

P1=A_A.*exp(1i*Phase_A);
P2=A_B.*exp(1i*Phase_B);

H_12=P2./P1;

H_1=exp(-1i*2*pi*freq*s/340);
H_R=exp(1i*2*pi*freq*s/340);

r=((H_12-H_1)./(H_R-H_12)).*exp(2*1i*2*pi*freq*x_1/340);

alpha=1-abs(r).^2;
z=(1+r)./(1-r);

figure;
subplot(1,2,1)
plot(freq,alpha)
xlim([100 3000]);
ylim([0 1])

subplot(1,2,2)
plot(freq,real(z),freq,imag(z))
xlim([100 3000]);
```

## 7. Anexo II:

---

### Programación de Matlab para obtener coeficiente de absorción e impedancia característica con Pa.

```
freq=data(:,1);
A_A_Pa=data(:,2);%Ojo que está en dB
Theta_A=data(:,3);%Ojo que está en deg.
A_B_Pa=data(:,4);%Ojo que está en dB
Theta_B=data(:,5);%Ojo que está en deg.

s=0.10;
x_1=0.33;

% Cambio de unidades
A_A=sqrt(A_A_Pa.^2+Theta_A.^2);
A_B=sqrt(A_B_Pa.^2+Theta_B.^2);

faseA=atan(Theta_A./A_A_Pa);
faseB=atan(Theta_B./A_B_Pa);

P1=A_A.*exp(1i*faseA);
P2=A_B.*exp(1i*faseB);

H_12=P2./P1;

H_1=exp(-1i*2*pi*freq*s/340);
H_R=exp(1i*2*pi*freq*s/340);

r=((H_12-H_1)./(H_R-H_12)).*exp(2*1i*2*pi*freq*x_1/340);

alpha=1-abs(r).^2;
z=(1+r)./(1-r);

figure;
subplot(1,2,1)
plot(freq,alpha)
xlim([100 3000]);
ylim([0 1])

subplot(1,2,2)
plot(freq,real(z),freq,imag(z))
xlim([100 3000]);
```

