

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Soluciones acústicas con nuevos  
absorbentes acústicos fabricados con  
lana de oveja”**

***TRABAJO FINAL DE MASTER***

Autor/a:

**José Manuel Palazuelos Arellano**

Tutor/a:

**Jesús Alba Fernández**

**Romina del Rey Tormos**

***GANDIA, 2018***

## Resumen

Este TFM se asocia al proyecto europeo WOOL4BUILD (ECO-INNOVATION de EASME (Executive Agency for SMEs) de la European Commission) donde se han desarrollado nuevas lanas absorbentes ecológicas. El objetivo de este proyecto es desarrollar un aislante térmico y acústico a partir de lana de oveja que pueda competir en cuanto a características técnicas y económicas con otros aislantes del mercado. En el TFM se pretende caracterizar acústicamente lanas fabricadas con diferentes condiciones (diferentes mezclas, densidades, espesores, etc.) y poder obtener las mejores muestras a fabricar, buscando mejorar la absorción sonora y el aislamiento acústico. En la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universitat Politècnica de Valencia (EPSG-UPV) se han realizado diferentes ensayos acústicos de muestras elaboradas por otros socios del proyecto: ensayos de control en tubo de Kundt, de la resistividad al flujo del aire, en cámara reverberante, en cámaras a escala, etc. Estas muestras combinan diferentes densidades, espesores y porcentajes de calidad de lana de oveja. Es un TFM de investigación que inicia al alumno en el modelado de materiales absorbentes acústicos, y concreta en un tipo de muestra.

**Palabras clave:** eco-materiales, eco-innovation, caracterización acústica, lana de oveja.

## Resum

Aquest Treball Final de Màster està associat al projecte europeu WOOL4BUILD (ECO-INNOVATION de EASME (Executive Agency for SMEs) de la European Commission) on s'han desenvolupat noves llanes absorbents ecològiques. L'objectiu d'aquest projecte és desenvolupar un aïllant tèrmic i acústic a partir de llana d'ovella que pugui competir, amb característiques tècniques i econòmiques amb altres aïllants del mercat. En el TFM es pretén caracteritzar acústicament llanes fabricades amb diferents condicions (diferents mesclades, densitats, espessors, etc.) i poder optimitzar el procés de fabricació, buscant millores de la absorció sonora i l'aïllament acústic. A l'Escola Politècnica Superior de Gandia de la Universitat Politècnica de València (EPSG-UPV) s'han realitzat els assajos acústics de mostres elaborades per altres socis del projecte: assajos de control en tub de kundt, resistivitat al flux, càmera reverberant, càmera a escala, etc. Aquestes mostres combinen diferents densitats, espessors i percentatge de qualitat de la llana d'ovella. Aquest és un TFM d'investigació que inicia a l'alumne en el modelat d'absorbents acústics, centrant-se en un tipus de mostra.

**Palabras clave:** eco-materiales, eco-innovation, caracterización acústica, lana de oveja.

## Summary

This thesis work is related to the European project WOOL4BUILD (ECO-INNOVATION of the EASME (Executive Agency for SMEs) of the European Commission) where new eco-friendly absorbent wools have been developed. The objective of this project is developing a thermal and acoustic insulator made from sheep wool that is able to compete with other insulators in the marketplace when it comes to technical and economical characteristics. This thesis work aims to acoustically characterize wools made with different conditions (different mixes, densities, thicknesses, etc.) and obtain the best samples to manufacture, seeking to improve sound absorption and acoustic insulation. In the Escuela Politécnica Superior de Gandía of the Universitat Politècnica de Valencia (EPSG-UPV) different acoustic tests have been done on samples made by other partners in the project: control tests in Kundt's tube, of air flow resistivity, in a reverberation chamber, in scaled chambers, etc. These samples mix together different densities, thicknesses and percentages of sheep's wool quality. This is a research thesis work that introduces the student to the modeling of acoustic absorbent materials and finalizes in a certain type of sample.

**Key words:** eco-materials, eco-innovation, acoustic characterization, sheep wool.

## Índice

1. Introducción .....	6
1.1 Motivación .....	6
1.2 Objetivos .....	7
1.3 Estructura de la tesina .....	8
2. Fundamentos teóricos.....	9
2.1 Materiales absorbentes acústicos. Soluciones acústicas.....	9
2.2 Acondicionamiento acústico .....	12
2.3 Aislamiento acústico.....	14
3. Desarrollo de la tesina .....	16
3.1 Nuevos materiales absorbentes a partir de lana de oveja.....	16
3.2 Caracterización acústica de lana de oveja como material absorbente acústico... ..	18
3.2.1 Coeficiente de absorción en incidencia normal .....	18
3.2.2 Coeficiente de absorción en incidencia aleatoria.....	22
3.3 Caracterización acústica de la lana de oveja como solución al aislamiento acústico .....	29
3.3.1 Transmission Loss en incidencia normal.....	29
3.3.2 Transmission Loss en incidencia aleatoria .....	34
4. Conclusiones .....	43
5. Bibliografía.....	44
Agradecimientos .....	46

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

La contaminación ambiental, junto con todas las consecuencias que conlleva, es el mayor problema de nuestros tiempos ya que de no actuar a tiempo, los daños podrían ser irreversibles. Afortunadamente, hay varios países y organizaciones tomando acciones para revertir esta tendencia.

En el año 2014, la Unión Europea inició el programa Horizonte 2020, el cual tiene como objetivo financiar la investigación y la innovación para asegurar la competitividad global de Europa (1).

Dentro de las secciones de este programa se encuentra la de "Retos Sociales" la cual presenta 7 categorías con metas a alcanzar para el año 2020. Y es precisamente el "reto 5: Acción por el clima, medioambiente, eficiencia de los recursos y materias primas" el que está relacionado con los trabajos de esta publicación.

Las actividades de construcción y demolición son una fuente importante de desechos. Estos desechos conforman entre el 13% y el 40% del total de residuos sólidos generados dependiendo del país (2). Es por esta razón que resulta importante reducir el impacto ambiental de dichos residuos. El uso de materiales reciclados o de materiales amigables con el ambiente son soluciones muy viables. Por mencionar algunos casos: el uso de polipropileno reciclado en lugar de polipropileno virgen en composites con madera tiene un menor Potencial de Calentamiento Global (2). Y la lana de oveja tiene un tiempo de degradación notablemente menor que las fibras de poliéster reciclado y con propiedades térmicas y de absorción sonora muchas veces mejores (3).

Es debido a los puntos anteriores que nace WOOL4BUILD, un proyecto europeo donde se desarrollan nuevos materiales elaborados a partir de éstas lanas de oveja que es precisamente el tema central de esta investigación.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar diferentes muestras de lana de ovejas churras y merinas para determinar su efectividad como material aislante y absorbente acústico.

Con base en los objetivos del Horizonte 2020, del cual hablaremos más adelante, se pretende obtener un material que sea ecológico, por lo que para su fabricación se utilizarán materiales que cumplan con este propósito.

Como objetivo final, se busca lanzar al mercado un nuevo material que pudiera sustituir a aquellos que son comúnmente utilizados, como pueden ser la fibra de vidrio o las lanas minerales.

Además de los objetivos principales, este trabajo busca iniciar al alumno en la investigación, específicamente en diferentes métodos que existen para caracterizar acústicamente un nuevo material.

## 1.3 Estructura de la tesina

Esta tesina está dividida en tres partes principales:

- **Fundamentos teóricos.** Donde se exponen la fundamentación y conocimientos previos necesarios para la completa comprensión de los temas tratados en esta tesina, así como la teoría aplicada a esta investigación.
- **Desarrollo de la tesina.** Donde se expone la metodología seguida en esta investigación así como el tratamiento de los datos y los resultados obtenidos en los ensayos y mediciones. Ésta sección se divide a su vez en tres partes:
  - **Nuevos materiales absorbentes a partir de lana de oveja:** Donde se habla de la procedencia de la lana de oveja utilizada, así como sus características y propiedades.
  - **Caracterización acústica de lana de oveja como material absorbente acústico:** Donde se detallan los distintos procedimientos y sus resultados para conocer los valores de absorción acústica de las diferentes muestras de lana.
  - **Caracterización acústica de la lana de oveja como solución al aislamiento acústico:** Donde se detallan los distintos procedimientos y sus resultados para conocer los valores de aislamiento acústico de las diferentes muestras de lana.
- **Conclusiones.** Donde se exponen las conclusiones obtenidas después de analizar los resultados de las mediciones



## 2. Fundamentos teóricos

Antes de empezar a hablar de las características de los materiales fabricados a partir de la lana de oveja, es necesario comprender los conceptos teóricos asociados a los mecanismos de absorción y/o aislamiento que presentan algunos materiales frente al ruido.

### 2.1 Materiales absorbentes acústicos. Soluciones acústicas

#### Absorción

Se entiende como **absorción** "el fenómeno por el cual los elementos del canal de transmisión absorben energía acústica de la total emitida por la fuente" (4).

Más a detalle, el fenómeno se explica de la siguiente manera:

Cuando una onda progresiva alcanza un elemento cualquiera situado en su recorrido, parte de la onda se refleja y parte de la misma se absorbe, de tal manera que la energía total que incide sobre el material  $E_i$ , en general, se reparte entre una cantidad  $E_r$ , que refleja la superficie del mismo en contacto con la onda y una cantidad  $E_a$ , que absorbe dicha superficie. En definitiva, esta cantidad,  $E_a$ , es la energía que no vuelve al canal de transmisión (4).

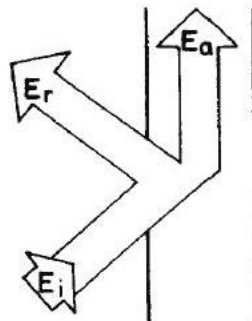


Figura 1. Esquema del reparto de energía en la reflexión (4)

## Materiales absorbentes acústicos

Una forma de absorber energía acústica es usando materiales absorbentes del sonido, los cuales amortiguan las ondas sonoras en su paso a través de ellos. De esta manera se transforma la energía sonora en energía calorífica.

Estos materiales pueden absorber de dos formas:

- 1) 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. Estas deformaciones requieren cierta energía para producirse, energía que es tomada de la onda acústica que, en definitiva, es la causa de las mismas. Aquí, la causa de las deformaciones y en último término de la absorción, es la presión sobre la superficie originada por la onda acústica.
  - 2) 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, a través de sus canales, siguen vibrando y en esta vibración se produce un rozamiento con las paredes de estos poros o canales, lo que produce una pérdida de energía cinética de las partículas, por transformación en energía calorífica desarrollada en el rozamiento. Pero para que esto ocurra, debe existir una velocidad relativa entre las partículas del aire en movimiento y las paredes de los canales. A mayor rigidez de la estructura del material mayor será la velocidad relativa y por tanto se producirá mayor rozamiento y así mayor será la absorción obtenida por este mecanismo. Si la estructura del material es flexible se produce menor rozamiento y menor pérdida por el calor, ya que las paredes de los canales entrarán también en vibración, en este caso se producirá una pérdida por transformación de la energía acústica en mecánica, al moverse las paredes de los poros.
- (4)

## Coefficiente de absorción

El coeficiente de absorción se define como el cociente entre la energía absorbida respecto a la incidente.

En teoría, la absorción es función de la impedancia del material en que la onda acústica incide, de la impedancia del aire y del ángulo de la incidencia de la onda con la superficie de separación. Pero esto sólo se cumple para ondas direccionales y dos medios de espesor infinito separados por una superficie ficticia.

En la práctica, el cerramiento tendrá un cierto espesor finito lo que causa reflexiones sucesivas entre los diferentes medios.

El efecto de absorción también es función de la frecuencia ya que depende o de la velocidad de las partículas o de la presión acústica y ambas crecen con la frecuencia de los sonidos.

A partir del coeficiente de absorción  $\alpha$ , se obtiene la absorción de una superficie  $S$  como el producto  $\alpha \cdot S$ , que se mide en Sabines.

Tomando en cuenta todo lo anterior, se establece el coeficiente de absorción medio  $\bar{\alpha}$  de un local. Se define como el que deberían tener todas las superficies internas del mismo para que su absorción total fuera la misma.

Así, siendo  $S_1, S_2, \dots, S_n$  siendo las áreas de las distintas superficies de un local y siendo  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  sus correspondientes coeficientes de absorción, la absorción total de la sala es:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad [1]$$

y el coeficiente de absorción medio:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad [2]$$

donde

S es la superficie total de los cerramientos de la sala.

## 2.2 Acondicionamiento acústico

De acuerdo con Jaime Llinares (4) y sus colaboradores, el acondicionamiento acústico es un aspecto de la acústica arquitectónica que:

"estudia el conjunto de intervenciones dirigidas a dosificar la intensidad de los fenómenos sonoros percibidos por los oyentes y a adaptar el local o recinto al uso al que está destinado. En otras palabras, a mejorar la calidad acústica en el interior de un recinto supuestamente aislado del exterior" (4).

Su objetivo es "proporcionar la máxima calidad acústica posible al mensaje sonoro emitido en una sala" (4). La calidad depende de diferentes parámetros que, a su vez, dependen del tipo de mensaje sonoro (música, palabra hablada, etc.).

En cualquier lugar destinado a la escucha de mensajes sonoros existe una cadena de comunicación que se compone por tres elementos: emisor, canal de transmisión y receptor.

El canal de transmisión está compuesto por la sala y las vías de propagación del sonido emitido en ella. Cuando una onda llega a un cerramiento de la sala, pueden ocurrir tres casos:

- a) Absorción total
- b) Reflexión total
- c) Que parte se absorba y parte se refleje, o sea, el **caso real**.

De lo anterior se puede asegurar que la energía acústica que llega a un punto de la sala sería la suma de las ondas directas y las reflejadas.

Al sonido que llega a un receptor, directamente desde la fuente, se le conoce como **sonido directo**. Su retraso es el propio de la distancia recorrida. Su atenuación se debería a la divergencia esférica y a la absorción del aire.

También inciden sobre el receptor una serie de sonidos que primero alcanzaron un cerramiento u objeto en la sala y de ahí se reflejaron hacia el receptor. A estos se les conoce como **sonidos reflejados**. Su retraso depende del total de la distancia recorrida desde la fuente hasta el receptor. Ahora la atenuación depende, aparte de la divergencia esférica y la absorción del aire, de la energía que se absorbe en cada reflexión, que depende de la frecuencia y del material sobre el que se refleja.

Después de cierto intervalo de tiempo y de varias reflexiones, la energía sonora disminuye hasta desaparecer. Este fenómeno, que se percibe como un sonido continuo y que es causado por una "superposición de ondas retrasadas en el tiempo, procedentes de la fuente y de sucesivas reflexiones" es conocido como **reverberación**. Y, si alguna de las ondas reflejadas llega después de cierto tiempo que se aprecie como un sonido diferente al sonido directo, al fenómeno se le conoce como **eco**.

Ahora bien, para estudiar la distribución acústica de las primeras reflexiones y del sonido directo, y para evitar el eco en un recinto, se utiliza la **Acústica Geométrica**. Para estudiar la reverberación, se utiliza la **Acústica Estadística**. Y para estudiar las resonancias de una sala, se usa la **Acústica Ondulatoria**.

Todos los métodos anteriores nos permiten tomar decisiones acertadas y fundamentadas sobre el acondicionamiento acústico de un recinto y resulta fundamental para todos ellos el conocer las propiedades de los materiales.

## 2.3 Aislamiento acústico

El aislamiento acústico es otro aspecto de la acústica arquitectónica "que trata del estudio de la protección contra los ruidos y vibraciones que se deseen evitar en los recintos habitables" (4).

Su objeto es "proveer a los ocupantes de las distintas edificaciones de la adecuada protección frente a sonidos no deseados, es decir, ruidos" (4).

Como se ha discutido anteriormente, el mecanismo de transmisión del sonido está formado por tres elementos: la fuente de ruido, el canal de transmisión y el local receptor.

En cuanto a la fuente, es importante tomar en cuenta su localización, y la naturaleza y características del ruido que produce.

El canal de transmisión son todos los elementos a través de los cuales llega el ruido al receptor, como son: paredes, forjados, elementos estructurales, puertas, ventanas, etc.

El local receptor está constituido por todos los elementos constructivos que lo delimitan y es la vibración de éstos la que produce las ondas en el mismo (4).

Según la forma de producirse y propagarse, el ruido puede ser:

- Aéreo
- De impacto
- De vibración

Para poder controlar este ruido, podemos actuar sobre:

- Las fuentes del ruido
- El local o espacio donde se produce el ruido
- Las posibles vías de transmisión
- El local receptor
- Personas o elementos receptores

Por ser el tema que más interesa a este proyecto, únicamente se discutirá más a fondo la transmisión del ruido aéreo. Dicha transmisión a un local se realiza a través de los cerramientos de separación del local receptor con el medio exterior o locales contiguos. Las ondas acústicas que forman el ruido provocan vibraciones en los cerramientos que se transmiten a los elementos adyacentes y al aire que se encuentra dentro del local receptor.

Los mecanismos de aislamiento a ruido aéreo tienen como objeto reducir la energía de la onda sonora que se produce en el local receptor.

A continuación se enumeran algunos conceptos fundamentales sobre aislamiento acústico a ruido aéreo:

- **Aislamiento acústico específico de un elemento constructivo,  $\alpha$** : Es la reducción de la intensidad acústica causada por un elemento constructivo, medido en  $dB$ .
- **Aislamiento acústico bruto de un local respecto a otro,  $D$** : Es la diferencia de niveles de intensidad acústica en ambos recintos.
- **Aislamiento acústico bruto normalizado,  $D_n$** : Es el aislamiento acústico bruto referido a un valor prefijado de absorción acústica del recinto receptor, para tener en cuenta su poder absorbente.
- **Aislamiento acústico normalizado,  $R$** : Caracteriza el aislamiento acústico a ruido aéreo ofrecido por un elemento constructivo.
- **Aislamiento de elementos constructivos mixtos,  $\alpha_T$** : Debe considerarse teniendo en cuenta los aislamientos específicos de cada elemento componente así como las áreas de los distintos elementos simples.

### 3. Desarrollo de la tesina

A continuación se expondrán los temas centrales de este trabajo. Abarcando la descripción de los materiales estudiados, los métodos utilizados para medir sus propiedades y los resultados obtenidos de estas mediciones.

#### 3.1 Nuevos materiales absorbentes a partir de lana de oveja

Como se ha dicho anteriormente, este proyecto deriva del Horizonte 2020 creado por la Unión Europea, específicamente del apartado llamado "reto 5: Acción por el clima, medioambiente, eficiencia de los recursos y materias primas". Este apartado va enfocado a disminuir el impacto negativo de las actividades humanas en el medio ambiente.

El propósito es buscar materiales que sean tan útiles como los que se usan comúnmente, pero que el impacto negativo que tienen en el ambiente sea lo menor posible. En acuerdo con lo anterior, una opción muy viable es un nuevo material absorbente creado a partir de lana de ovejas churras y merinas mezclada con PET.



Figura 2. Ovejas raza churra (5)

La lana utilizada se obtiene de la industria peletera, que es la dedicada a la elaboración de cuero y piel animal. Específicamente, se obtiene de la lana desechada durante los procesos típicos de esta industria. En esta industria los desechos de lana de oveja son abundantes. Dándoles una nueva utilidad a estos desechos el impacto ambiental es menor ya que se evita que aumente el número de ovejas necesarias para la elaboración del material y, por otro lado, se espera que la lana de oveja, que es un material biodegradable, sustituya a otros materiales utilizados que suelen causar perjuicio al medio ambiente tanto al momento de su producción, como al momento de ser desechados. De igual forma, el PET utilizado proviene de artículos existentes para evitar la producción de nuevos plásticos que contaminen.

Posteriormente, se elaboran como prototipo 7 muestras diferentes, haciendo combinaciones con diferentes proporciones de diferentes calidades de lana con el PET. Después del análisis de todas éstas, se decide sacar al mercado las muestras Premium y Confort únicamente.



Las características de las muestras son las que se muestran en la siguiente tabla:

ID Muestra	Composición			DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	ESPESOR (mm)
	PET BI-CO	LANA 1a CALIDAD	LANA 2a CALIDAD		
1	20	80	0	30	50
2	20	40	40	30	50
3	20	40	40	25	50
4	20	40	40	30	40
5	20	40	40	30	60
6	20	40	40	40	50
7	20	0	80	30	50
Premium	15	40	45	30	50
Comfort	15	40	45	25	40

Tabla 1. Características de los diferentes tipos de lana de oveja

Si se compara la lana de oveja con un material utilizado comúnmente, como el poliéster, se puede observar que, aunque son similares, la lana de oveja, al ser de origen natural, presenta una uniformidad en cuanto al tamaño de sus fibras y la forma en que éstas se encuentran entrelazadas. En la imagen 2 se comparan las fibras de ambos materiales a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).

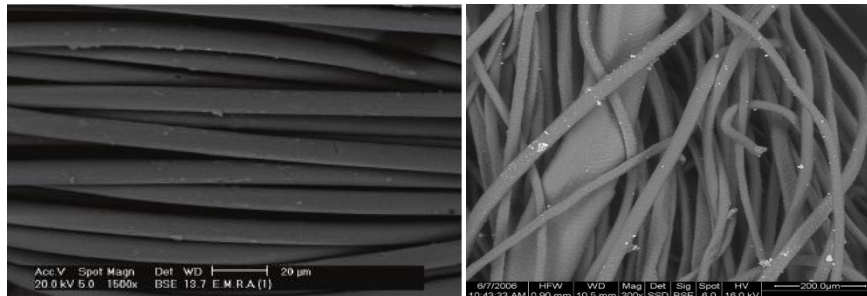


Figura 3. Fibras de poliéster (izq.) (6) y lana de oveja (der.) bajo microscopio (7)

## 3.2 Caracterización acústica de lana de oveja como material absorbente acústico

### 3.2.1 Coeficiente de absorción en incidencia normal

El coeficiente de absorción acústica a incidencia normal,  $\alpha$  está definido en la norma española UNE-EN ISO 10534-2:2002 (6) como el "cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra de ensayo (sin retorno) y la energía acústica incidente, para una onda plana con incidencia normal" (6).

#### Tubo de impedancia

De acuerdo con la norma española UNE-EN ISO 10534-2:2002 (6), los estudios de este tipo deben realizarse en un tubo de impedancia, el cual nos puede permitir conocer propiedades importantes del elemento a evaluar utilizando muestras de 4 cm de diámetro, el mismo diámetro que el tubo. Esto presenta una ventaja en investigación y desarrollo frente a pruebas como la medición del coeficiente de absorción a incidencia aleatoria, el cual se mide en cámara reverberante y necesita de muestras mucho más grandes (10 a 12 m<sup>2</sup>) para poder realizarlas.

#### Construcción / Disposición

El ensayo consta de las siguientes partes:

- Un tubo de impedancia
- Dos micrófonos
- Un altavoz
- Un sistema digital de análisis de señal

La muestra se coloca en un extremo del tubo. Los micrófonos se colocan en un par de aberturas adaptadas al tubo. En el extremo opuesto a la muestra, se coloca el altavoz, el cual "debe colocarse en una caja aislada que evite toda transmisión por vía aérea por los flancos al micrófono" (6).

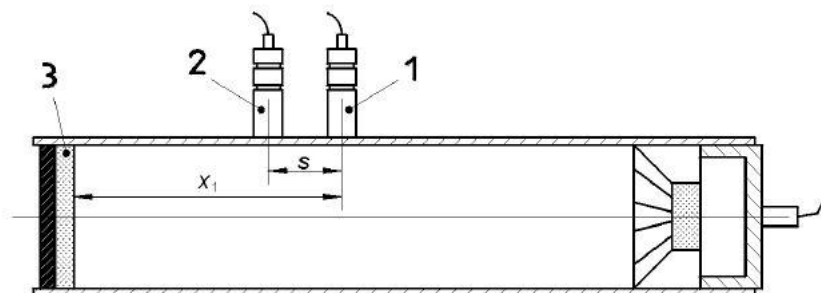


Figura 4. Disposición del ensayo. Se observan ambos micrófonos [1, 2], la muestra [3] y el altavoz (6).

## Muestras

Las muestras utilizadas son las mismas que se indicaron en el capítulo 3.1.

El diámetro de las muestras es de 40 mm aproximadamente, lo que coincide con el diámetro del tubo.

## Equipo necesario

Se utilizó el sistema Symphonie de 01dB-Stell para generar las ondas planas necesarias y para analizar la señal captada por los micrófonos.

También se usaron dos micrófonos B&K idénticos para captar la señal emitida por el altavoz.

## Medición de la presión acústica

Para comenzar, colocamos la muestra en el extremo correspondiente. Después, se genera una onda plana transmitida por el altavoz. Luego, se colocan los micrófonos en sus posiciones fijas y se mide la presión acústica.

Para corregir por el desajuste de los micrófonos, y de acuerdo con la norma española UNE-EN ISO 10534-2:2002 (6), se intercambian las posiciones de los micrófonos y se repite el procedimiento.

## Tratamiento de los datos

Una vez que se hizo la medición, se calcula el **espectro cruzado**,  $S_{12}$ , que es el "producto  $p_2 \cdot p_1^*$ , determinado a partir de las presiones acústicas  $p_1$  y  $p_2$  en dos posiciones de micrófono.

NOTA - \* significa complejo conjugado" (6)

También calculamos el **autoespectro**,  $S_{11}$ , que es el "producto  $p_1 \cdot p_2^*$ , determinado a partir de la presión acústica compleja  $p_1$  en la posición de micrófono 1." (6)

Posteriormente, debemos calcular la función de transferencia, la cual, debido a que usamos la configuración de los micrófonos intercambiados, se calcula usando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = (H_{12}^I / H_{21}^{II})^{1/2} = |H_{12}| e^{j\phi} \quad [3]$$

donde

$H_{12}$  es la función de transferencia corregida por el desajuste entre micrófonos;

$H_{12}^I$  es la función de transferencia desde la posición del micrófono 1 a la 2, definido por el cociente complejo  $p_2 / p_1 = S_{12} / S_{11}$ ;

$H_{21}^{II}$  es la función de transferencia desde la posición del micrófono 2 a la 1, con los micrófonos intercambiados.

El siguiente paso es determinar el coeficiente de reflexión, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$r = |r|e^{j\Phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad [4]$$

donde

$r_r$  es la componente real;

$r_i$  es la componente imaginaria;

$x_1$  es la distancia entre la muestra y la posición última del micrófono;

$\Phi_r$  es el ángulo de fase del coeficiente de reflexión a incidencia normal

$H_1$  es la función de transferencia para la onda incidente sola, definida por la ecuación:

$$H_1 = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0S} \quad [5]$$

donde

$k_0$  es el número de onda complejo;

$S$  es la separación entre los dos micrófonos ( $x_1 - x_2$ ).

$H_R$  es la función de transferencia para la onda reflejada sola, definida por la ecuación:

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0S} \quad [6]$$

donde

$k_0$  es el número de onda complejo;

$S$  es la separación entre los dos micrófonos ( $x_1 - x_2$ ).

Por último, se calcula el **coeficiente de absorción acústica,  $\alpha$** :

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad [7]$$

Este valor es el que se utilizará para mostrar la absorción de las muestras.

## Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las primeras 7 muestras y, posteriormente, los resultados de las muestras "Premium" y "Confort".

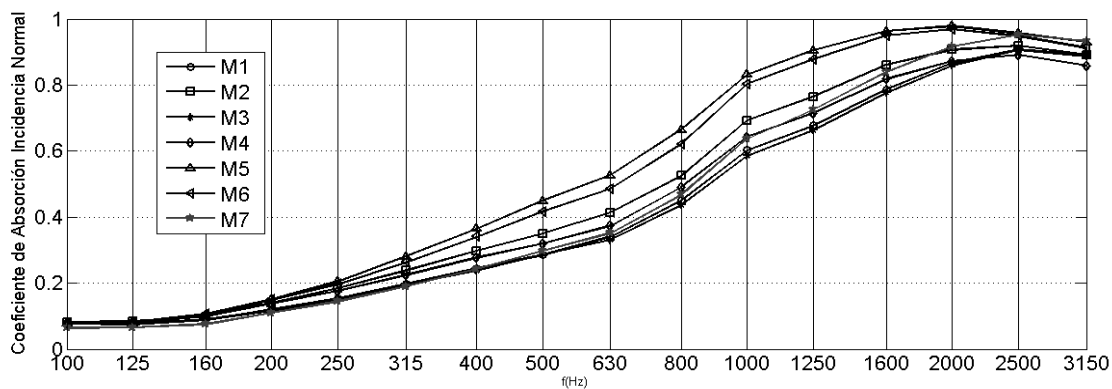


Figura 5. Coeficientes de absorción. Muestras 1 a 7 (7)

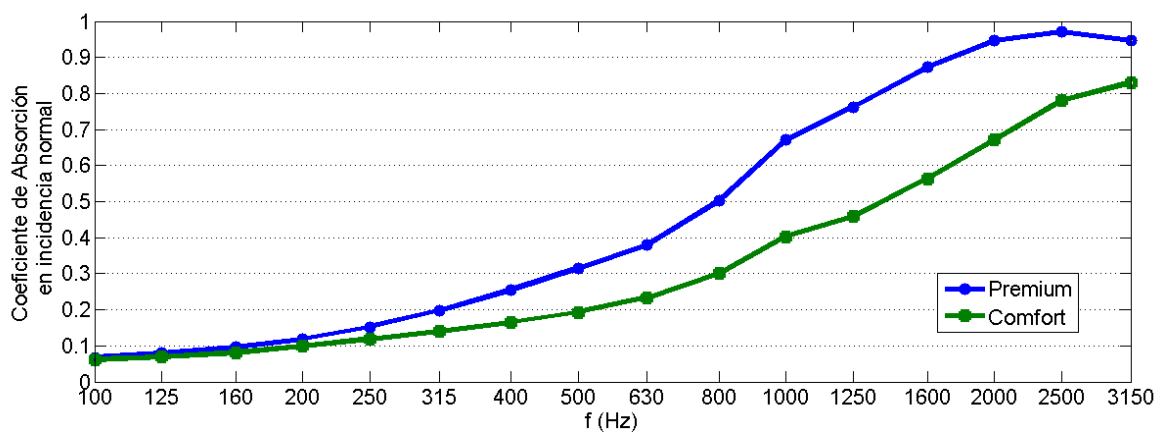


Figura 6. Coeficiente de absorción. Muestras Premium y Confort (8)

### 3.2.2 Coeficiente de absorción en incidencia aleatoria

El nivel que alcanza un sonido reverberante dentro de un recinto, y su posterior caída, están condicionados, entre otras cosas, por las características de absorción sonora de las superficies frontera. Y ya que el nivel de potencia sonora absorbido por una superficie depende del ángulo de incidencia, es necesario hacer un promedio de todos los ángulos de incidencia para poder conocer las características de absorción sonora de dichas superficies. Para lograrlo, se necesita de un recinto con una distribución uniforme de los ángulos de incidencia y donde, además, la intensidad sonora sea independiente de la posición dentro del mismo. De esta forma logramos un campo acústico difuso y una incidencia aleatoria del sonido en las superficies.

El campo sonoro dentro de una cámara reverberante se aproxima bastante a las condiciones mencionadas, por lo que las mediciones de absorción sonora realizadas dentro de una, se aproximan en gran medida a las condiciones básicas de normalización. (9)

Las medidas dentro de la cámara reverberante nos servirán para determinar el **coeficiente de absorción sonora  $\alpha_s$** , el cual, según la norma **UNE-EN ISO 354 :2004** (9), está definido de la siguiente manera:

"Cociente entre el área de absorción sonora equivalente de una muestra de ensayo y el área de la muestra de ensayo". (9)

#### **Cámara reverberante**

Una cámara reverberante se puede definir como "un recinto aislado del ruido exterior, con superficies internas muy reflectantes de tal manera que se consiga un tiempo de reverberación elevado en un amplio margen de frecuencias y está especialmente diseñado para conseguir en su interior un campo acústico suficientemente difuso." (10)

La cámara reverberante de la EPSG, la cual fue utilizada para realizar las mediciones de este trabajo, cumple con los requisitos establecidos en la norma **UNE-EN ISO 354:2004** (9), la cual establece que el volumen de la cámara reverberante debe ser de por lo menos 150 m<sup>3</sup>, y recomienda que sea de por lo menos 200 m<sup>3</sup> y no mayor a 500 m<sup>3</sup>. Así mismo, la forma de la cámara reverberante cumple con la norma ya que ésta pide que se cumpla la siguiente condición (9):

$$l_{m\acute{a}x} < 1.9 V^{1/3} \quad [8]$$

donde

$l_{m\acute{a}x}$  es la longitud del mayor segmento de recta inscrito en la cámara (por ejemplo, en una cámara rectangular, es la diagonal mayor), en metros;

$V$  es el volumen de la cámara en metros cúbicos.

Además, añade lo siguiente:

"Con objeto de obtener una distribución uniforme de frecuencias propias, especialmente en las bandas de baja frecuencia, no puede haber dos dimensiones de la cámara cuya relación coincida con los primeros números enteros". (9)

Es importante mencionar que al ser una cámara normalizada, también cumple con lo establecido en la norma **UNE-EN ISO 354:2004** (9) en sus puntos **6.1.3 Difusión del campo sonoro**, ya que la cámara cuenta con difusores que le ayudan a cumplir con lo requerido, y **6.1.4 Área de absorción sonora**, ya que el área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía no supera los valores establecidos (el procedimiento para calcular este parámetro se discute más adelante).

### **Muestras**

El área de las muestras utilizadas es de 12 m<sup>2</sup>, lo cual cumple con los requisitos de la norma **UNE-EN ISO 354:2004** (9) la cual requiere que el área de las muestras a evaluar sea de entre 10 m<sup>2</sup> y 12 m<sup>2</sup>.

### **Equipo necesario**

En acuerdo con la normativa, se utilizó una fuente omnidireccional de espectro plano (B&K). Esta fuente emitió a través de un amplificador y un sonómetro B&K 2270 con micrófono, que a la vez, también registró la señal. Todo este equipamiento se dispone bien en los laboratorios de acústica de la Escola Politècnica Superior de Gandia, bien en la cámara reverberante normalizada de la que dispone.

### **Temperatura y humedad relativa**

La norma **UNE-EN ISO 354:2004** (9) establece que las variaciones de temperatura y humedad relativa pueden afectar el tiempo de reverberación por lo que deben medirse con la cámara vacía y con la cámara conteniendo la muestra de ensayo. La humedad relativa debe ser como mínimo 30% y como máximo 90%, y la temperatura debe ser por lo menos 15 °C.

Para realizar estas medidas, se utilizó un anemómetro y no se registraron variaciones considerables de temperatura ni humedad relativa.

### **Medición del tiempo de reverberación**

Para obtener el coeficiente de absorción, el primer paso es obtener el **área de absorción equivalente** de la cámara tanto vacía como con la muestra a evaluar. Para esto, es necesario medir el tiempo de reverberación en ambos casos.

Los lineamientos de cómo realizar la medición se encuentran en la norma **UNE-EN ISO 354:2004** (9). Y ésta establece dos métodos posibles:

- Método de la señal de ruido interrumpida
- Método de la respuesta impulsiva integrada

Nuestras mediciones se realizaron utilizando el método de la señal de ruido interrumpida, el cual se describe a continuación.

Un ruido de banda ancha generada por el sonómetro es emitido a través del altavoz. Esta señal de ruido debe cumplir algunos requisitos establecidos en la norma:

- Su espectro debe ser tal que las diferencias en los niveles de presión sonora resultantes en la cámara sean menores de 6 dB en bandas de tercio de octava adyacentes.
- Debe ser lo suficientemente larga como para producir un nivel de presión sonora estacionario en todas las bandas de frecuencia de interés antes de ser interrumpido. Con el fin de obtener condiciones de campo estacionario, el tiempo de excitación debe ser al menos la mitad del tiempo de reverberación esperado.
- El nivel antes de la caída deber ser lo suficientemente alto como para que el nivel, en decibelios, más bajo del rango de evaluación esté como mínimo 10 dB por encima del nivel de ruido de fondo.

Esta señal es emitida por el altavoz y captada por el micrófono del sonómetro. La normativa exige que se debe medir por lo menos 12 curvas de caída de nivel, que el número mínimo de posiciones de micrófono debe ser 3 y que el número mínimo de posiciones del altavoz debe ser 2 (9).

De igual manera, la Norma **UNE-EN ISO 354:2004** (9) establece las distancias mínimas entre posiciones de todos los elementos involucrados en el ensayo. Dichas distancias deben ser escaladas, quedando de la siguiente manera:

Separación entre	Distancia (m) de acuerdo con Norma UNE-en ISO 354:2004
Micrófono - micrófono	1.5
Micrófono - límites del recinto	1.0
Micrófono - panel difusor	1.0
Micrófono - elemento a ensayo	1.0
Micrófono- fuente sonora	2.0
Fuente sonora - fuente sonora	3.0
Elemento a ensayo - límites del recinto	0.75 (1.0)

**Tabla 2. Distancias entre posiciones de acuerdo a norma 354:2004 (9)**



Tal y como se especifica en la norma, las mediciones se realizan en bandas de tercios de octava desde los 100 Hz y hasta los 5 kHz.

De manera que podamos reducir la incertidumbre de las mediciones por cada posición micrófono / altavoz, es necesario repetir por lo menos 3 veces cada medida para luego hacer un promediado. Esta operación la realiza automáticamente el sistema de adquisición que en este caso es el sonómetro B&K modelo 2270.

Este procedimiento se realiza primero con la cámara vacía y posteriormente colocando la muestra a evaluar dentro de la cámara.



Imagen 1. Disposición del ensayo con muestra (7)

### Tratamiento de los datos

Una vez medidos los tiempos de reverberación, se procede a calcular el **área de absorción sonora equivalente** ( $A$ ) (en  $m^2$ ) de la cámara vacía y con la muestra a evaluar utilizando la siguientes ecuaciones:

$$A_1 = \frac{55,3 V}{c T_1} \quad [9]$$

donde

$V$  es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara reverberante vacía;

$c$  es la velocidad de propagación del sonido en el aire, en metros por segundo;

$T_1$  es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante vacía.

Y, después

$$A_2 = \frac{55,3 V}{c T_2} \quad [10]$$

donde

$c$  y  $V$  tienen el mismo significado que en la ecuación anterior;

$T_2$  es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante con la muestra de ensayo.

Una vez obtenidos estos valores, se calcula el área de absorción sonora equivalente de la muestra ( $A_T$ ):

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3 V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) \quad [11]$$

donde

$c_1$  es la velocidad de propagación de sonido en el aire a la temperatura  $t_1$ ;

$c_2$  es la velocidad de propagación de sonido en el aire a la temperatura  $t_2$ ;

$A_1$ ,  $V$  y  $T_1$  tienen el mismo significado que en la ecuación [9]

$A_2$  y  $T_2$  tienen el mismo significado que en la ecuación [10]

### **Cálculo de coeficiente de absorción sonora**

Una vez que se tiene el área de absorción sonora equivalente, se procede a calcular el coeficiente de absorción sonora  $\alpha_s$ , utilizando la siguiente ecuación:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad [12]$$

donde

$A_T$  es el área de absorción sonora equivalente, en metros cuadrados, calculada de acuerdo a la ecuación [11];

$S$  es el área, en metros cuadrados, de la muestra de ensayo.

**Coefficiente de absorción sonora ponderado**

Con la finalidad de dar un valor único del coeficiente de absorción sonora de los materiales, la norma internacional **UNE-EN ISO 11654:1998** (11) establece el coeficiente de absorción sonora ponderado,  $\alpha_w$ , el cual es "un valor único independiente de la frecuencia, igual al valor de la curva de referencia a 500 Hz después de desplazarla, tal y como se especifica en dicha Norma Internacional." Dicho valor nos permite clasificar el material absorbente de acuerdo con la información en la siguiente tabla (7):

Clase de Absorción Acústica	$\alpha_w$
A	0'90 o mayor
B	entre 0'8 y 0'85
C	entre 0'6 y 0'75
D	entre 0'3 y 0'55
E	entre 0'15 y 0'25
sin clasificar	0'10 o menor

Tabla 3. Clase de absorción acústica según UNE – EN ISO 11654: 1998 (11)

Los resultados obtenidos tanto para el coeficiente de absorción sonora como para el coeficiente de absorción sonora ponderado se muestran en el siguiente apartado.

**Resultados**

A continuación se muestran los resultados obtenidos del coeficiente de absorción sonora de todas las muestras.

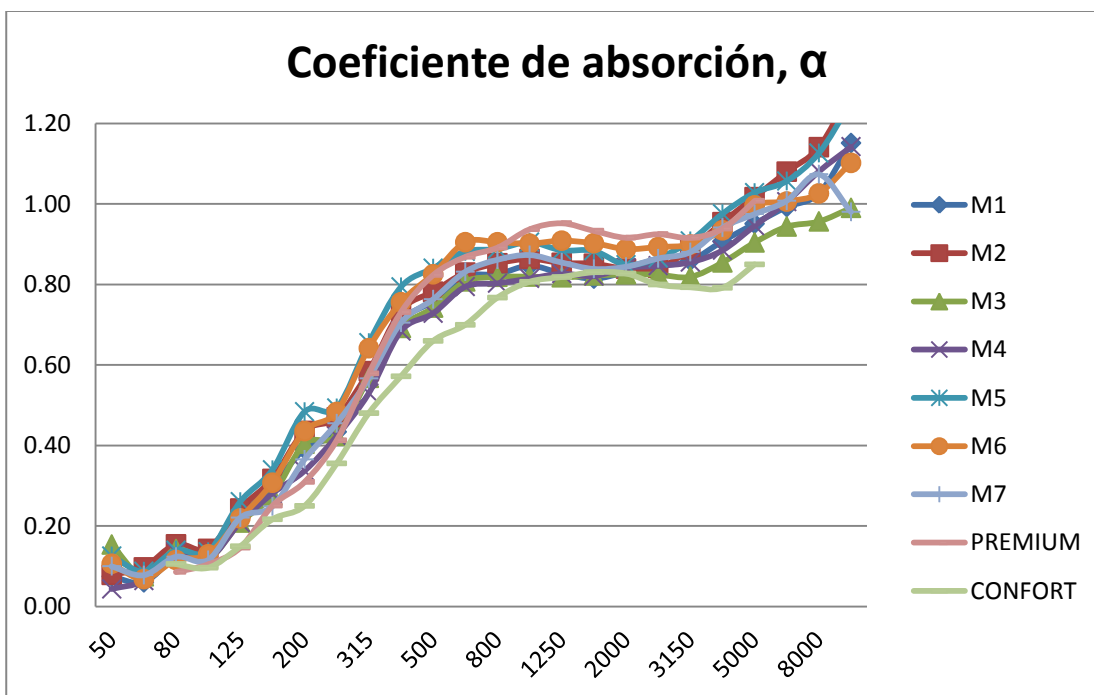


Figura 7. Coeficiente de absorción sonora de las diferentes muestras

La siguiente tabla muestra el coeficiente de absorción sonora medio y el coeficiente de absorción sonora ponderado junto con la clasificación correspondiente para cada muestra. Se añaden los valores para lana mineral y para PET a modo de comparación.

	$\alpha_{\text{medio}}$	$\alpha_w$	Clase
<b>M1</b>	0.82	0.75	C
<b>M2</b>	0.83	0.80	B
<b>M3</b>	0.78	0.75	C
<b>M4</b>	0.80	0.75	C
<b>M5</b>	0.87	0.85	B
<b>M6</b>	0.88	0.80	B
<b>M7</b>	0.82	0.75	C
<b>PREMIUM</b>	0.88	0.75	C
<b>CONFORT</b>	0.75	0.65	C
<b>Lana Mineral</b>	0.88	0.65	C
<b>PET</b>	0.68	0.65	C

Tabla 4. Comparación de valores obtenidos

### 3.3 Caracterización acústica de la lana de oveja como solución al aislamiento acústico

#### 3.3.1 Transmission Loss en incidencia normal

Las pérdidas por transmisión del sonido (Sound Transmission Loss) es un parámetro esencial para diseñar y solucionar problemas de ruido tanto en acústica de la edificación como en acústica medioambiental (12). Por lo tanto, es un parámetro de mucha importancia para los fines de este trabajo.

A continuación se describe el método utilizado para obtener el TL (Transmission Loss), así como los resultados obtenidos en las mediciones.

#### Tubo de impedancia

Aunque el método internacionalmente estandarizado de tubos de impedancia (6) mide el coeficiente de absorción sonora, se han realizado varios estudios que modifican un poco la disposición del método mencionado para calcular la pérdida de transmisión. (13)

Las mediciones realizadas en este trabajo, se basan en el método propuesto por Romina del Rey y sus colaboradores (12) y se realizaron en un sistema de tubos de impedancia construido en la UPV.

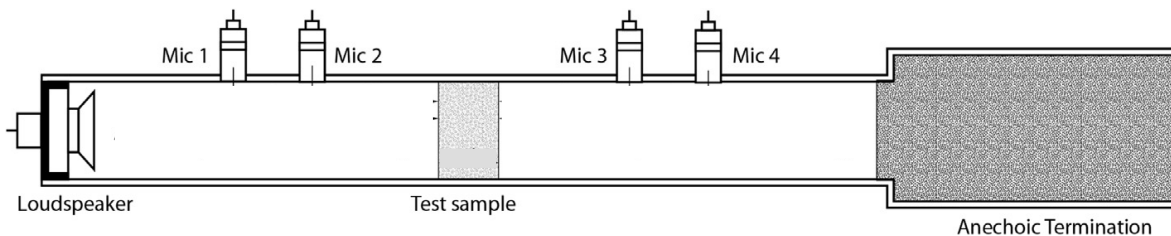


Figura 8. Disposición del ensayo (14)

#### Disposición / Construcción

El mecanismo utilizado consta, a grandes rasgos, de tres partes:

- Un tubo anterior a la muestra de 1315 mm
- Una sección porta-muestras
- Un tubo posterior a la muestra de 1233 mm

En la terminación del tubo ascendente se coloca un altavoz, asegurando que no existan fugas. En el extremo opuesto, en el tubo descendente, se coloca una caja con material absorbente, creando una terminación aproximadamente anecoica. La sección porta-muestras es el punto en donde ambos tubos se unen. Esta sección queda sellada utilizando plastilina y haciendo presión con un par de gatos.

Ambos tubos poseen dos pequeñas aperturas para colocar los micrófonos separadas a 80 mm y 120 mm en ambos lados de la muestra. Estas aberturas se pueden sellar enroscando una tapa para cuando no se necesiten.

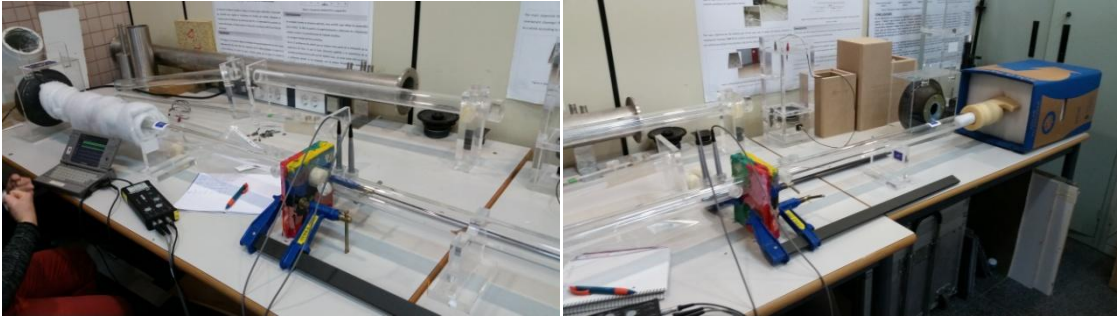


Figura 9. Ensayo en tubo de impedancia

### **Muestras**

Se utilizaron tres muestras de cada tipo de lana con 5 cm de grosor y un diámetro de aproximadamente 4 cm para poderlas colocar dentro del sistema de tubos de impedancia.

### **Equipo necesario**

Se utilizó el sistema Symphonie de 01dB-Stell tanto para generar el ruido usado como para procesar la señal captada.

El ruido fue emitido por un altavoz capaz de generar ondas planas.

La señal fue captada utilizando dos micrófonos marca B&K.

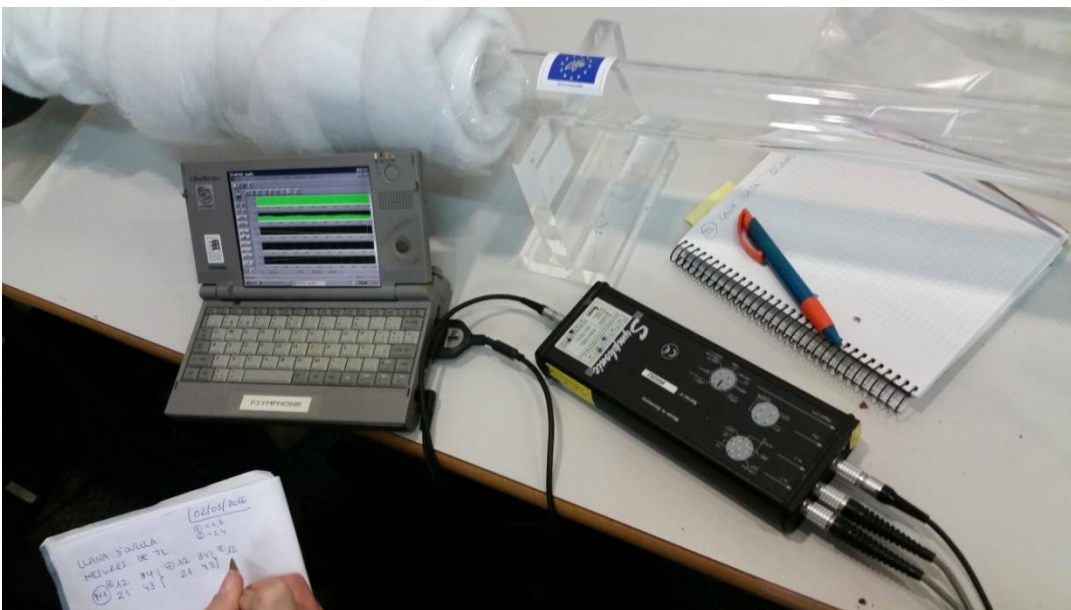


Figura 10. Equipo utilizado

## Medición de presión acústica

Para comenzar la medición, se coloca la muestra y se sella el punto entre ambos tubos. Después, se genera una onda plana que se transmite a través del altavoz. Se colocan los 2 micrófonos en las aberturas del tubo que precede a la muestra y se mide la presión compleja. Se intercambian los micrófonos de lugar y se vuelve a medir la presión. Posteriormente, se colocan los micrófonos en las aberturas del tubo que sucede a la muestra y se repite el procedimiento.

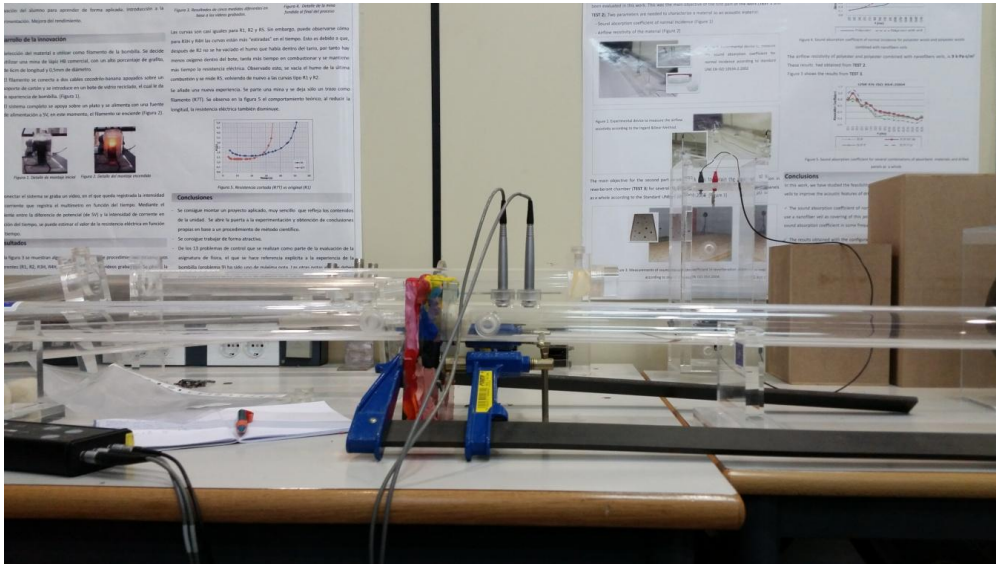


Figura 11. Toma lateral de ensayo en tubo de impedancia

## Tratamiento de los datos.

Para calcular las pérdidas por transmisión usaremos la siguiente ecuación utilizada en trabajos anteriores (14):

$$TL = 20\log_{10} \left| \frac{e^{jkS} - H_{12}}{e^{jkS} - H_{34}} \right| - 20\log_{10}|H_t| \quad [13]$$

donde

$k$  el número de onda definido por la ecuación:

$$k_0 = \omega/c_0 = 2\pi f/c_0 \quad [14]$$

siendo

$\omega$  la pulsación;

$f$  la frecuencia;

$c_0$  la velocidad del sonido.

$S$  la distancia entre los micrófonos;

$H_{12}$  la función de transferencia entre los micrófonos 1 y 2;

$H_{34}$  la función de transferencia entre los micrófonos 3 y 4;

Ya que hemos usado la configuración de micrófonos intercambiados, se hace una corrección por el desajuste entre los mismos tal como lo indica la norma UNE en ISO 105324-2 : 2002 (6) usando la siguiente ecuación:

$$H_c = (H_{12}^I \cdot H_{12}^{II})^{1/2} \quad [15]$$

siendo

$H_{12}^I$  la función de transferencia de la configuración original de los micrófonos;

$H_{12}^{II}$  la función de transferencia de los micrófonos intercambiados.

NOTA - Se repite esta operación para la función de transferencia  $H_{34}$ .

$H_t$  la relación entre los autoespectros definida por la siguiente ecuación:

$$H_t = \sqrt{|S_d/S_u|} \quad [16]$$

siendo

$S_d$  el autoespectro subsecuente a la muestra;

$S_u$  el autoespectro precedente a la muestra.



## Resultados

A continuación se presentan los resultados de todas las muestras.

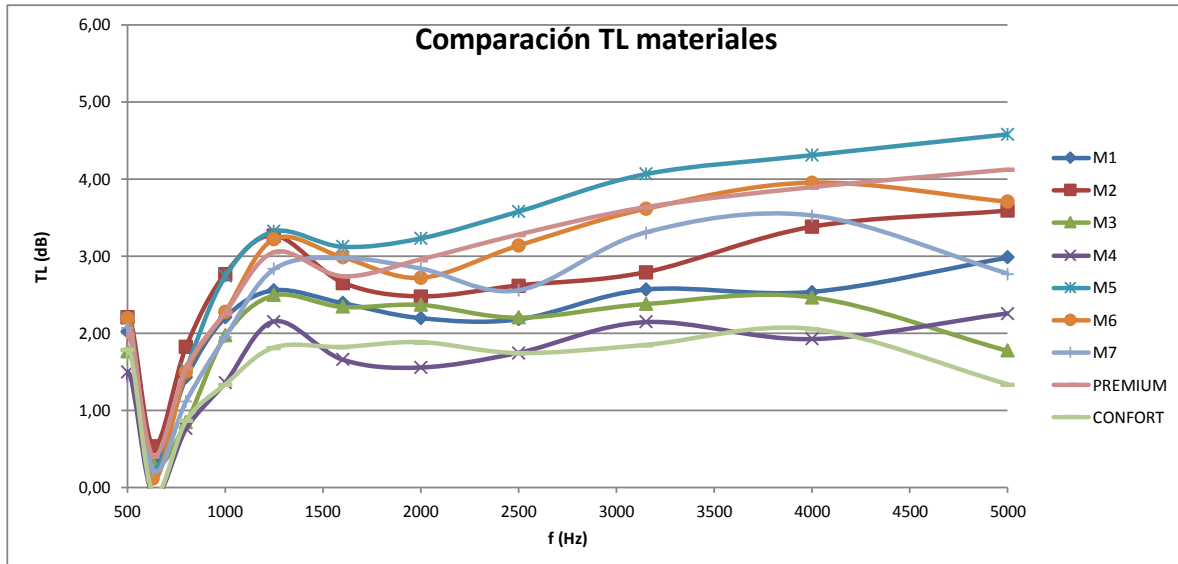


Figura 12. TL para todas las muestras

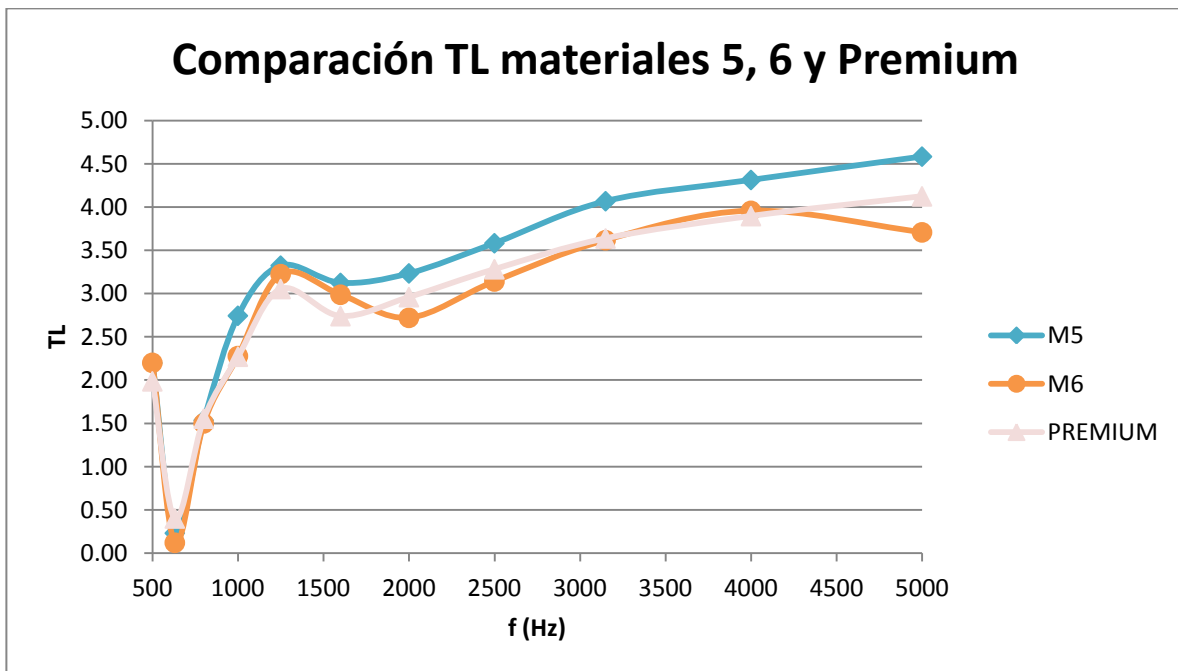


Figura 13. TL para muestra 5, muestra 6 y Premium

### 3.3.2 Transmission Loss en incidencia aleatoria

Aunque son usados como sinónimos, en el caso de incidencia aleatoria, en lugar del mencionado transmission loss, se usa el término **índice de reducción acústica,  $R$** , el cual se define como "Diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica,  $W_1$ , que incide sobre el elemento de ensayo y la potencia acústica,  $W_2$ , radiada por el elemento de ensayo hacia el otro lado." (15)

Este índice es utilizado "para comparar las propiedades del aislamiento acústico de los elementos de construcción, para clasificar los elementos según sus capacidades de aislamiento acústico, para ayudar a diseñar productos de construcción que requieren determinadas propiedades acústicas y para estimar el rendimiento "in situ" en edificios completos." (10)

#### **Cámara de transmisión**

La norma UNE-EN ISO 10140, en sus 5 partes, establece los requisitos y procedimientos para obtener el índice de reducción sonora. Y establece que las mediciones deben realizarse en una cámara de transmisión.

Una cámara de transmisión es "un laboratorio específico compuesto por dos recintos acoplados en el que se evalúa el aislamiento acústico a ruido aéreo de determinados materiales o soluciones constructivas (recintos acoplados horizontalmente) o la mejora a ruido de impacto que producen dichos materiales (recintos acoplados verticalmente). Una de sus principales características es la garantía de que las transmisiones laterales son despreciables, evaluando así, únicamente, la transmisión de sonido a través de la muestra a ensayo." (10)

Ahora, al igual que con la cámara reverberante, para las mediciones en una cámara de transmisión, según la norma, se necesitan muestras grandes. Muchas veces, a nivel investigación, es complicado encontrar la cantidad de material necesaria y por lo tanto, se opta por hacer las pruebas en una cámara de transmisión de tamaño reducido, construida en la UPV como parte de trabajos anteriores (10).

El diseño de esta cámara se pensó para poder utilizar muestras de aproximadamente  $0.5\text{m}^2$  y para ello, se utilizan los valores dados por la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011 y se reducen en un factor 1:5 (10). En cuanto a la geometría, se definió basándose en la teoría de modos y el criterio de Bolt (10). Una vez construida, la cámara de transmisión de tamaño reducido tiene la siguiente forma y dimensiones:

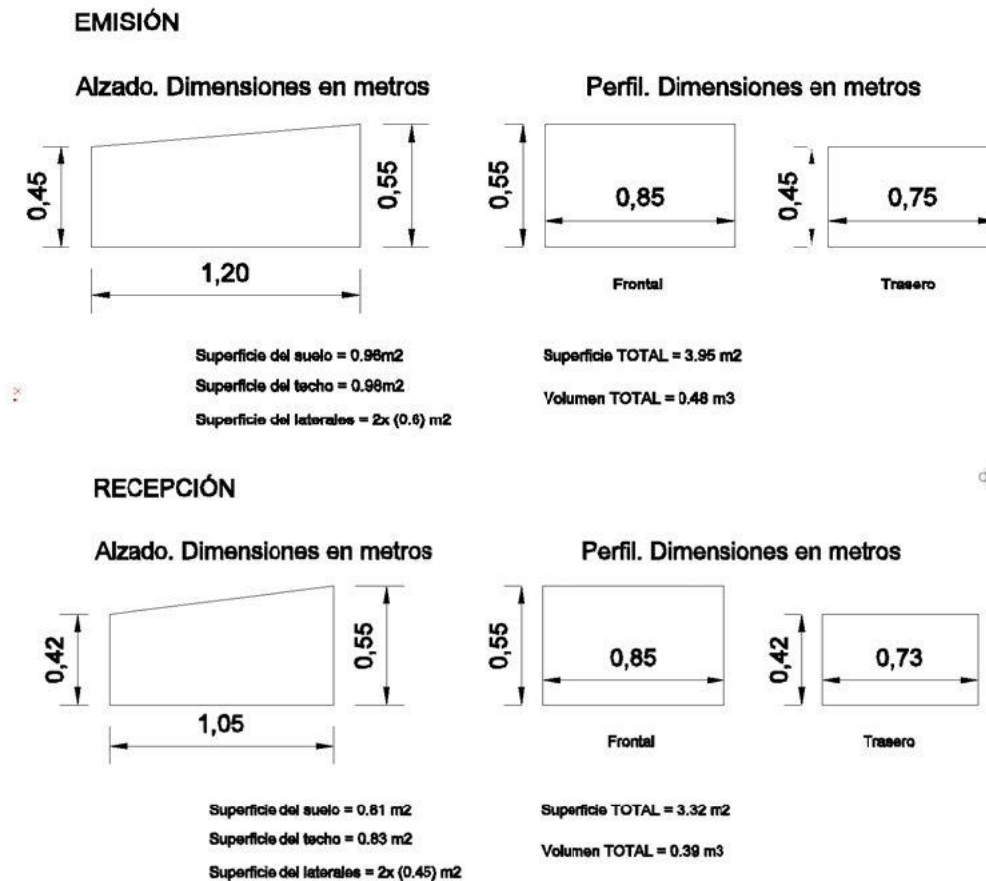


Figura 14. Dimensiones cámara de transmisión a escala (10)

La cámara cuenta con un porta-muestras montado sobre un carro para facilitar el montaje. El carro consta de dos soportes sustentado por ruedas con freno. Cada soporte cuenta con material anti-vibratorio entre el carril y la rueda para evitar transmisiones de ruido estructural. También, la cámara cuenta con un elemento elástico entre el porta-muestras y ambos recintos para desrigidizarlo de la estructura de estos. (10)

Se hicieron pruebas para comprobar la difusividad y la influencia de las transmisiones laterales y al comparar los resultados en la cámara de transmisión de tamaño reducido con aquellos obtenidos en el software Aisla o en una cámara de transmisión normalizada, queda validada con algunas limitaciones.

### Limitaciones

#### *Frecuencia de corte*

Como se explicó anteriormente, los resultados obtenidos en frecuencias inferiores a la frecuencia de corte deben ser tratados con cautela y no es posible validarlos.

En el caso de nuestra cámara, la frecuencia de corte se encuentra entre 500 Hz y 630 Hz.

### *Tipo de elementos*

Debido al diseño y materiales utilizados para la construcción de la cámara, que tienen que ver tanto con la necesidad de practicidad como con buscar soluciones a las exigencias de aislamiento y otros parámetros, la cámara sólo permite la evaluación de elementos ligeros.

### **Muestras**

Las muestras que se necesitan evaluar están limitadas por las medidas del porta-muestras que, por ejemplo, cuenta con un espesor de 80 mm. (10)

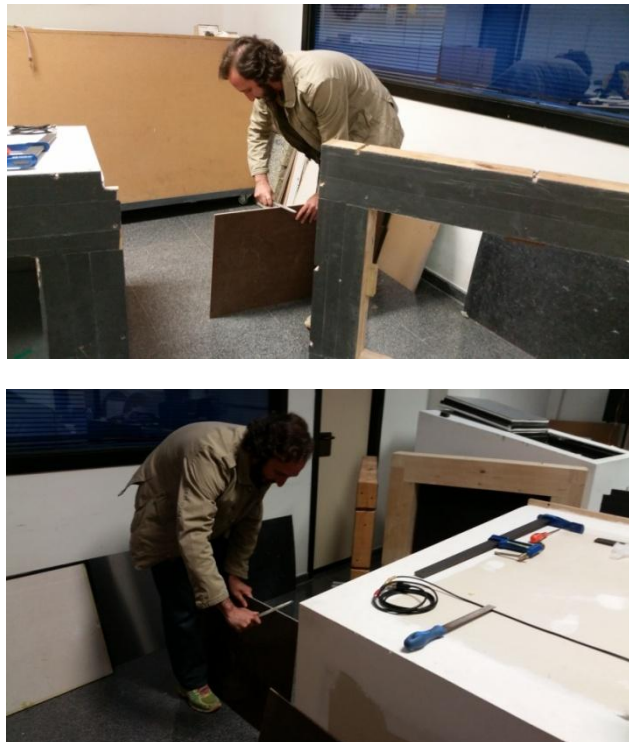


Figura 15. Modificación de muestras para colocación en porta muestras

### **Equipo necesario**

Para realizar los ensayos, se utilizaron 2 sonómetros B&K modelo 2250 con sus respectivos micrófonos omnidireccionales modelo 4189 como sistemas de adquisición. De igual forma, se utilizó uno de los sonómetros para generar el ruido necesario en el procedimiento. Más adelante se discuten los detalles.

Dado que la única forma de acceder al interior de la cámara es separando los recintos y el porta-muestras, lo que sería impráctico y ,además, podría causar alteraciones en las condiciones del ensayo, se decide utilizar dos webcams controladas por IP para sostener y mover los micrófonos, como se detalla en trabajos anteriores (10).

La marca y modelo de las webcams es Aqprox IP01WV4, con motor rotatorio incluido. Ambas van atornilladas al piso de cada recinto y se les acopla un tubo de PVC que sostendrá al

micrófono. Al conectarnos mediante IP, se logra ver el interior de los recintos de la cámara de transmisión y ,también, rotar las webcams a la posición de micrófono deseada.

Por último, se utilizan un par de altavoces Genelec en posiciones fijas en el recinto emisor. La justificación de las posiciones y número de altavoces se discutirá más adelante.

### **Difusión**

Para evitar grandes variaciones de nivel de presión sonora causados por la presencia de ondas estacionarias, la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011 recomienda la instalación de elementos de difusión. La cámara de transmisión de tamaño reducido cuenta con dichos elementos, incorporados siguiendo las recomendaciones del Anexo A de la norma UNE-EN ISO 354 (10).

### **Tiempo de reverberación**

La norma UNE-EN ISO 10140-5:2011 establece que los tiempos de reverberación de los recintos deben estar entre 1 y 2 segundos, siguiendo la siguiente fórmula:

$$1 \leq T \leq 2 (V/50)^{2/3} \quad [17]$$

donde

$T$  es el tiempo de reverberación en segundos;

$V$  es el volumen del recinto en metros cúbicos.

Adaptando lo anterior a nuestra cámara de tamaño reducido, los tiempos de reverberación requeridos deben ser entre 0.20 y 0.39 segundos para el recinto receptor y entre 0.20 y 0.45 segundos para el recinto emisor.

### **Medición de presión sonora**

Para comenzar la medición, se coloca el material a evaluar en el porta-muestras, el cual se coloca en medio de los dos recintos. Dada la naturaleza frágil de nuestros materiales a evaluar (lana de oveja), se colocan entre dos placas las cuales se evalúan individualmente para después poder conocer el valor agregado de aislamiento que aporta la lana. Se sellan los recintos y el porta muestras usando un par de gatos.



Figura 16. Disposición del ensayo

Primero, se mide el tiempo de reverberación en el recinto receptor. Esto se hace mediante el método del ruido interrumpido, siguiendo los lineamientos descritos en la norma UNE-EN ISO 3382-2:2008 la cual indica que debe haber por lo menos 2 medidas de micrófono por cada posición de altavoz. Se realizan en total 3 medidas por cada posición de altavoz (2).

Posteriormente, se mide el nivel de ruido de fondo en el recinto receptor conforme a lo que dice la norma UNE-EN ISO 10140-4 para comprobar que esté por lo menos 6 dB debajo del nivel del ruido que se emitirá durante el ensayo y preferiblemente 15 dB por debajo. De lo contrario, se deberán hacer las siguientes correcciones:

- Si la diferencia de niveles es menor a 15 dB, pero mayor a 6 dB, se calculan las correcciones al nivel de señal de acuerdo con la ecuación:

$$L = 10 \lg(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad [18]$$

donde

$L$  es el nivel de señal ajustado, en decibelios;

$L_{sb}$  es el nivel de señal y de ruido de fondo combinados, en decibelios;

$L_b$  es el nivel del ruido de fondo, en decibelios.

- Si la diferencia de niveles es inferior o igual a 6 dB en cualquier banda de frecuencias, se utiliza la corrección de 1.3 dB. Para cada banda de frecuencias donde este sea el caso, se debe indicar claramente en el informe que se ha hecho la corrección de 1.3 dB y que estos valores son el límite de medición.

Ya que se cuenta con los datos anteriores, se procede a medir el nivel de presión en ambos recintos. Para hacerlo, a través de los altavoces colocados en el recinto emisor, se emite una señal de ruido con una duración de 6 segundos que es captada tanto en el recinto emisor como en el receptor por los micrófonos de los sonómetros los cuales miden el nivel de presión sonora en decibelios. Las frecuencias a medir van de 100 Hz a 5 000 Hz, en bandas de tercios de octava. Se utilizan las posiciones de micrófono establecidas en estudios anteriores (10), quedando de la siguiente forma:

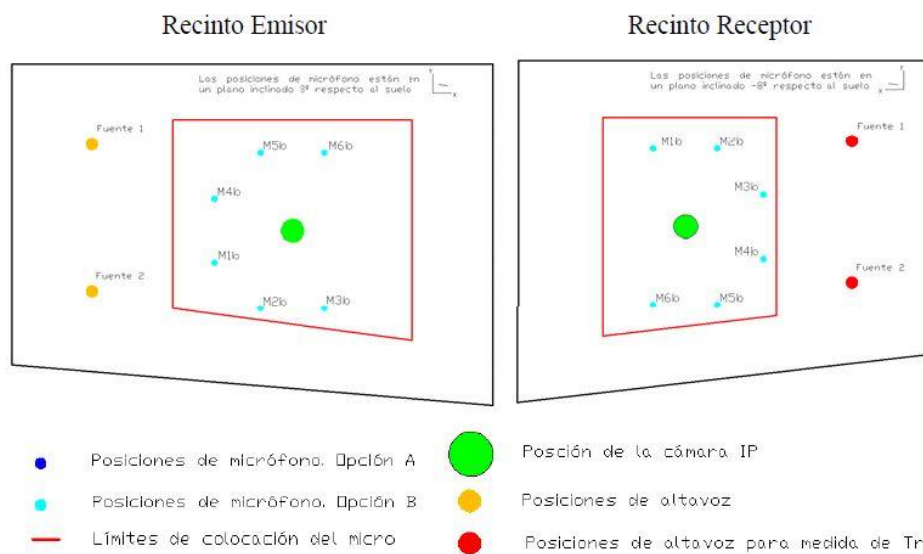


Figura 17. Posiciones de los elementos del ensayo (13)

Cabe resaltar que, siguiendo los lineamientos de la norma UNE-EN ISO 10140-4 (15), que establece que dos posiciones de micrófono no pueden estar en el mismo plano con respecto a los límites del recinto, ambos micrófonos se han inclinado  $+8^\circ$ , en el recinto emisor, y  $-8^\circ$  en el receptor.

### Tratamiento de los datos

Para calcular el promedio energético del nivel de presión sonora, utilizamos la siguiente ecuación:

$$L = 10 \log \frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{np_0^2} \quad [19]$$

donde

$p_1, p_2, \dots, p_n$  son presiones acústicas cuadráticas medias(r.m.s.) en  $n$  posiciones diferentes en el recinto.

Se realiza el cálculo tanto para el recinto emisor como para el receptor y se procede a calcular el **índice de reducción acústica,  $R$** :

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [20]$$

donde

$L_1$  es el nivel de presión sonora promedio en el recinto emisor, en decibelios;

$L_2$  es el nivel de presión sonora promedio en el recinto receptor, en decibelios;

$S$  es el área de la abertura del ensayo libre en la que se instala el elemento de ensayo, en metros cuadrados;

$A$  es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en metros cuadrados.



Se utiliza la ecuación de Sabine para calcular el área de absorción equivalente,  $A$ :

$$A = \frac{0.16V}{T} \quad [21]$$

donde

$V$  es el volumen del recinto receptor, en metros cúbicos.

$T$  es el tiempo de reverberación, en segundos.

### **Resultados**

A continuación se muestran los resultados del índice de reducción acústica,  $R$  para un sándwich formado por la muestra de lana de oveja "Premium" colocada entre dos placas de yeso laminado. Primeramente, se muestran los resultados entre 50 Hz y 5kHz.

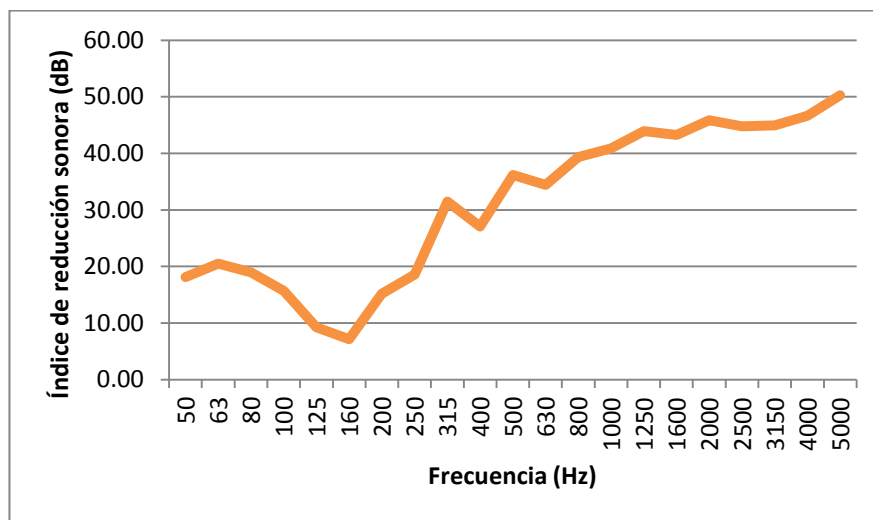


Figura 18. Índice de reducción acústica,  $R$

Pero, como debemos recordar, debido a las dimensiones de la cámara de transmisión a escala, existe una frecuencia de corte a partir de la cual nuestros resultados son confiables. Dicha frecuencia se encuentra entre 500 Hz y 630 Hz. La siguiente gráfica muestra los resultados a partir de 500 Hz.

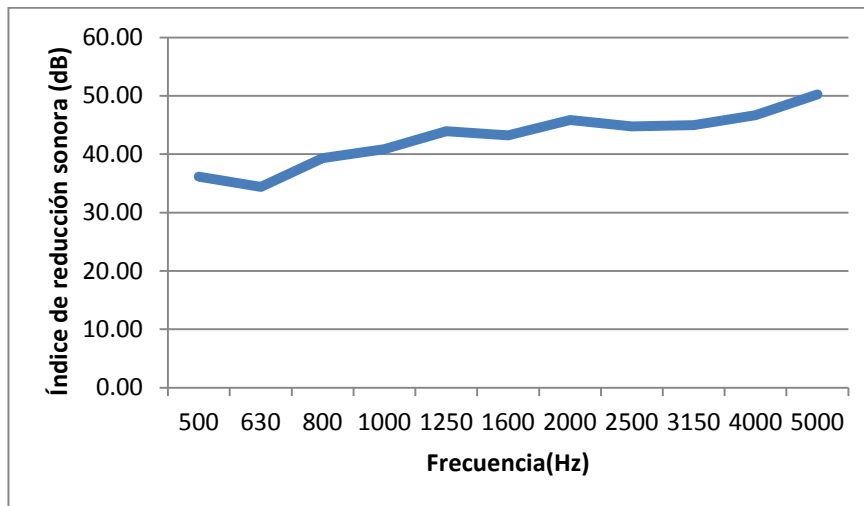


Figura 19. Índice de reducción acústica a partir de 500 Hz

## 4. Conclusiones

### Absorción sonora

Al analizar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para conocer la absorción sonora, podemos observar que las diferentes muestras de lana en efecto se comportan como un material absorbente acústico ya que los cambios de espesor y densidad producen en los resultados un cambio esperado para este tipo de materiales.

También podemos ver que, al igual que se espera en materiales absorbentes acústicos, el nivel de absorción crece con la frecuencia y que los valores del coeficiente de absorción están por encima de 0.2.

Al comparar los resultados con valores obtenidos en materiales comúnmente usados como el PET o la lana mineral, podemos ver que aquellos valores que corresponden a las muestras de lana estudiadas, son similares y en algunos casos superiores.

### Aislamiento Acústico

Cuando observamos los resultados obtenidos en las pruebas de pérdidas de transmisión en incidencia normal, donde las muestras se colocaban solas, vemos que los valores obtenidos no son muy altos. Sin embargo, esto corresponde con el comportamiento esperado para materiales absorbentes, los cuales tienen un rendimiento menor que materiales más rígidos como pueden ser placas de metal. Se observa que los resultados de TL son similares a otros materiales absorbentes de espesor y densidad semejante (16).

Además, cuando se utiliza el material estudiado como parte de una solución aislante, como se estudió en las pruebas de aislamiento en incidencia aleatoria, observamos que éste ayuda a mejorar el aislamiento considerablemente logrando un índice de reducción sonora de entre 40 y 50 dB.

### General

Tomando todo lo anterior en cuenta, se puede concluir que este nuevo material absorbente acústico creado a partir de lana de oveja cumple con lo necesario para poder competir en el mercado actual, ofreciendo además un valor agregado ya que el impacto al ambiente que causa en el transcurso de su ciclo de vida es mucho menor que aquel causado por los materiales que se usan comúnmente.

## 5. Bibliografía

1. **Comisión Europea.** Comisión Europea. [En línea] 8 de Febrero de 2013. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/what-horizon-2020>.
2. **Väntsi, Olli y Timo, Kärki.** *Environmental assessment of recycled mineral wool and polypropylene utilized in wood polymer composites.* Resources, Conservation and Recycling, Vol. 104. 0921-3449, 2015. Laapppeenranta.
3. **Patnaik, Asis, y otros.** *Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies.* Energy and Buildings. Vol. 92. 0378-7788, 2015. Puerto Elizabeth.
4. **Llinares, Jaime, Sancho, Fco. Javier y Llopis, Ana.** *Acústica Arquitectónica y Urbanística.* LIMUSA, 2008. 978-968-18-7034-8. México D.F.
5. **Churroteo.** Wikipedia. [En línea] 27 de Agosto de 2007. [Citado el: 17 de Agosto de 2018.] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sementales\\_raza\\_churra.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sementales_raza_churra.jpg).
6. **AENOR.** Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. *UNE-EN ISO 10534-2.* Madrid : AENOR, 2002.
7. **Alba, Jesús; Del Rey, Romina; Uris, Antonio; Candelas, Pilar.** *Lana de oveja: Una alternativa natural para la absorción sonora.* 46 Congreso Español de Acústica. TecniAcústica, 2015. Valencia.
8. **Del Rey, Romina; Alba, Jesús; Uris, Antonio; Candelas, Pilar.** *WOOL4BUILD: Improved isolation material for eco-building based on natural wool.* 46 Congreso Español de Acústica. TecniAcústica, 2015. Valencia.
9. **AENOR.** Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. *UNE-EN ISO 354:2003.* Madrid : AENOR, 2004.
10. **Bertó, Laura.** Tesis Doctoral. *Nuevos materiales, modelos y técnicas de caracterización en acústica de la edificación y acústica medioambiental.* UPV, 2015. Gandía.
11. **AENOR.** Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. *UNE-EN ISO 11654:1998.* Madrid : AENOR, 1998.
12. **Del Rey, Romina; Alba, Jesús; Bertó, Laura; Hervás, Carlos; Sanchís, Vicente.** *CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO DE IMPEDANCIA PARA LA MEDIDA DE LAS PERDIDAS POR TRANSMISIÓN.* VIII Congreso Ibero-americano de acústica, 2012. Grao de Gandía.
13. **Song, Bryan H. y Bolton, J. Stuart.** *A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials.* Acoustical Society of America, 1999. West Lafayette.
14. **Alba, J; Del Rey, R; Reixach, R; Arbat, G; Espinach, F.X; Mutjé, P.** *Acoustic properties of agroforestry waste orange pruning fibers reinforced polypropylene composites as an alternative to laminated gypsum boards.* ELSEVIER, 2014. Gandía / Girona.

15. **AENOR.** UNE-EN ISO 10140-2:2011. *Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo.* Madrid : AENOR, 2011.
16. **Jung, Sung Soo, y otros.** *Measurement of Sound Transmission Loss by Using Impedance Tubes.* Journal of the Korean Physical Society, 2008, Vol. 53. Daejeon / Busan.
17. **Abou Elmaaty, Tarek, Elnagar, Khaled y Raouf, Sali.** *Dyeing of Polyester and Polyamide Synthetic Fabrics with Natural Dyes Using Eco-Friendly Technique.* Journal of textiles, 2014. 10.1155/2014/363079. Cairo.
18. **Alba, Jesús; Del Rey, Romina; Blanes, María; Marco, Bruno.** *Estudio preliminar de la absorción sonora de lana de oveja de desechos de peletería.* 45 Congreso Español de Acústica. TecniAcústica, 2014. Gandía.
19. **Del Rey, Romina; Alba, Jesús; Uris, Antonio; Candelas, Pilar.** *WOOL4BUILD: ECO MATERIAL PARA LA MEJORA DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO Y TÉRMICO DE EDIFICIOS. UNA REALIDAD YA EN EL MERCADO.* 48 Congreso Español de Acústica. TecniAcústica, 2017. Gandía.

## Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional y sin quienes mis metas serían inalcanzables. Su aliento diario me empuja a ser mejor y a lograr todo lo que me proponga.

A mis tutores, Romina y Jesús, por su enorme paciencia y ayuda. Todo lo que aprendí en este proceso me ha vuelto una persona con más experiencia en mi campo de trabajo, un atributo invaluable.

A la Escuela Politécnica Superior de Gandía - UPV, y por consecuencia, a mis demás profesores y compañeros del Máster. Las experiencias vividas ahí son irrepetibles. No sólo me han hecho un mejor profesional, sino una mejor persona.

A Jorge, Parada, Hugo y Mau, su ayuda a lo largo de este trayecto no se puede medir. Indiscutiblemente han dejado su huella en este gran logro personal.

En fin, a todas las personas e instituciones involucradas en este proyecto y a todos los que de una forma u otra me han mostrado su apoyo.