

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA

MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDÍA

MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE CARPAS ACÚSTICAS

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autora:

Martínez Navarro, Sara.

Director/es:

Alba Fernández, Jesús.
Del Rey Tormos, Romina.

GANDÍA 2013

MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE CARPAS ACÚSTICAS

Autora: Martínez Navarro, Sara

Director 1: Alba Fernández, Jesús

Director 2: Del Rey Tormos, Romina

Resumen

Cada vez es más habitual el realizar eventos sonoros en carpas exteriores. En la mayoría de éstos una carpa queda como único elemento separador entre dicho evento y su entorno. Desde el año 2010, se ha visto incrementado el número de estas carpas de exteriores por el uso de las mismas en bares y restaurantes que desean dar servicio a aquellas personas que deseen fumar, cumpliendo la legislación vigente. Por tanto, el diseño de la carpa y sobre todo los materiales que la componen pueden ser el único elemento para reducir el ruido que pueda generarse en los entornos cercanos.

En este trabajo se estudia la variabilidad de distintos tipos de plásticos y tejidos como materiales para elaborar “carpas acústicas”. En él se estudiarán tres propiedades para definir al material acústicamente: coeficiente de absorción, pérdidas por transmisión y resistencia al flujo. Estas serán comparadas con modelos numéricos y analizadas posteriormente, comprobando cuales de ellas son aptas para el fin deseado, asegurando un mínimo de absorción y aislamiento.

Palabras clave: Coeficiente de absorción, Pérdidas por transmisión, Resistencia al flujo, Tubo de impedancia.

Abstract

Each time is more usual carry out sonorous events in outdoor marquees. In most of these cases, the marquee stays as a single divider element between this event and his environment. Moreover, since 2010 the numbers of outside marquees have been increased by the use to bars and restaurants to offer a service at the people that want smoking, complying the force law. Therefore, the design of the tent and especially component materials can be the only element to reduce noise which may be generated in the nearby environment.

In this paper is studied the variability of different types of plastics and tissues, as materials to produce “acoustic marquees”. Three properties are studied: absorption coefficient, transmission loss and flow resistance. These properties will be comparated with numeric models, and subsequently analyzed, testing of them are suitable for the intended purpose, ensuring a minimum absorption and isolation.

Keywords: Absorption coefficient, Transmission loss, Flow resistance, Impedance tubes.

ÍNDICE

1. OBJETO Y ANTECEDENTES	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Objetivo.....	4
1.3. Estructura	5
2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	7
2.1. Legislación vigente para eventos	7
2.1.1. Reglamento de la Ley del Ruido, legislación autonómica y ordenanzas municipales.....	7
2.2. Normas de ensayo	9
2.2.1. Coeficiente de absorción e impedancia en tubo de Kundt.....	9
2.2.2. Pérdidas por transmisión en tubo de Kundt.....	11
2.2.3. Resistencia al flujo en tubo de impedancia	13
2.2.4. Modelos de muro y cortina.....	14
3. DESARROLLO DEL ESTUDIO	16
3.1. Ensayos del coeficiente de absorción e impedancia en incidencia normal	18
3.2. Puesta en marcha y ensayos en tubo de transmisión	22
3.3. Ensayos de resistencia al flujo	27
3.4. Modelado numérico de la absorción y la transmisión acústica de los materiales para carpas	30
3.5. Comparativa entre ensayos y modelos	35
4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS	37
4.1. Conclusiones.....	37
4.2. Futuras líneas de investigación	38
5. AGRADECIMIENTOS	40
6. REFERENCIAS	41

1. OBJETO Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Cada vez es más habitual realizar eventos sonoros en carpas exteriores, como pueden ser: conciertos, cenas de gala o presentaciones, espectáculos, etc. Este hecho está generando cada día más ruido en el exterior de las viviendas, donde sólo encontramos las carpas acústicas como único elemento separador entre dichos eventos y su entorno.

Además, a raíz de la entrada en vigor de la nueva ley antitabaquismo del 2010, donde se prohibía fumar en el interior de los recintos como bares, restaurantes o cafeterías, el uso de estas carpas se ha incrementado masivamente para poder ofrecer a los usuarios la posibilidad de fumar cumpliendo con la legislación vigente.

La legislación ambiental también se ha puesto más exigente en cuanto a su cumplimiento en los últimos años, aparte de la presión ciudadana que se ha hecho más evidente, pues ha aumentado la concienciación de los problemas causados por la exposición al ruido y de lo que dicta la legislación.

El aislamiento que se pueden encontrar en las viviendas no está pensado para un nivel de ruido en el exterior generado por estos eventos, por lo que es importante intentar reducir al máximo el sonido de dichos eventos. En estos casos, sólo disponemos de la carpa acústica y los materiales que la componen.

Hasta ahora los materiales utilizados para la elaboración de carpas acústicas consideraban aspectos más térmicos y resistentes a la intemperie, sin considerar la componente acústica que podían disponer los materiales que las componían, para utilizarlas con este fin.

1.2. Objetivo

En este estudio se estudia la viabilidad de diferentes materiales para acondicionar y aislar carpas acústicas, con el fin de reducir al máximo el ruido generado en los entornos más cercanos a estas, al mismo tiempo que mejorar el sonido en el interior de las mismas.

Para ello, se realiza un estudio completo, desde el punto de vista acústico, de los materiales utilizados comúnmente para la realización de carpas: plásticos y tejidos. Éste consiste en un análisis de la absorción y transmisión de estos materiales, para posteriormente compararlos y concluir qué materiales ofrecen un mejor resultado. Así, se realizarán mediciones en tubo de Kundt, basadas en las directrices de la norma UNE EN ISO 10534-2:2002 [15], para la obtención del coeficiente de absorción, basados en las directrices de el método experimental de Ingard & Dear [4], para la obtención de la resistencia al flujo, y por último se estudiarán diferentes trabajos experimentales [1][3][8][9][14][16][17] para la obtención de las pérdidas por transmisión.

Por consiguiente, se han evaluado 33 materiales, procedentes 21 de ellos a un primer proveedor, y los 12 restantes a otro proveedor.

1.3. Estructura

Para llevar a cabo el propósito de este trabajo se ha realizado un estudio de los materiales nombrados en el laboratorio de acústica y materiales de la EPSG, siguiendo el siguiente plan de trabajo:

- Estudio de las características absorbentes de los materiales en tubo de Kundt.
- Estudio de las características de transmisión de los materiales en un tubo de impedancia diseñado por personal de la EPSG según varios estudios experimentales de otros autores.
- Estudio de la resistencia al flujo de las 33 muestras.
- Comparación de datos obtenidos con modelos numéricos.
- Valoración de los resultados y sus posibles aplicaciones.

Así, se ha estructurado de la siguiente manera:

1. Objeto y antecedentes

En este apartado se exponen las causas del problema que nos ha llevado a la realización de este trabajo y cómo se ha llevado a cabo.

2. Introducción teórica

Descripción de la legislación vigente, normas de las cuales se han seguido sus directrices para la obtención de los resultados, así como los métodos experimentales para las mediciones de pérdidas por transmisión y resistencia al flujo, finalizando con una explicación del comportamiento de modelos de muros y cortinas. Esta introducción constará de los siguientes puntos y apartados.

2.1. Legislación vigente para eventos

2.1.1. Reglamento de la Ley del Ruido, legislación autonómica y ordenanzas municipales.

2.2. Normas de ensayo

2.2.1. Coeficiente de absorción e impedancia en tubo de Kundt.

2.2.2. Pérdidas por transmisión en tubo de impedancia.

2.2.3. Resistencia al flujo

2.2.4. Modelos de muro y cortina

3. Desarrollo del estudio

Descripción del material instrumental utilizado, así como su puesta en marcha, y los posteriores resultados obtenidos para todas las muestras, indicando tablas con valores y exposiciones gráficas para un mejor estudio y comprensión a la hora de analizarlas.

3.1. Ensayos del coeficiente de absorción e impedancia en incidencia normal.

3.2. Puesta en marcha y ensayos en tubo de transmisión.

3.3. Ensayos de la resistencia al flujo.

3.4. Modelado numérico de la absorción y la transmisión acústica de los materiales para carpas.

3.5. Comparativa entre ensayos y modelos.

4. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

Conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos en todos los apartados del desarrollo del estudio, incluyendo las comparaciones con el modelado numérico.

En esta parte, se determinará la viabilidad de las muestras estudiadas, así como los posibles problemas que se hayan podido presentar o los errores encontrados.

A partir de todos los datos obtenidos y todas las conclusiones tomadas, se determinarán las posibles vías a seguir para completar, continuar o mejorar este estudio.

2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Desde hace unos años la legislación se ha vuelto menos permisiva en cuanto al ruido generado por locales, bares, eventos, etc., debido a los efectos nocivos del ruido en la salud. Esto ha declinado en la exigencia de niveles de aislamiento mayores y por consiguiente, el aumento de mediciones acústicas in situ que corroboren dichos niveles.

Aun así, siguen existiendo varias lagunas en la legislación vigente, como es el objeto de estudio de este trabajo: ruido generado en el exterior de cualquier local. No existiendo limitación alguna de aislamiento o acondicionamiento para estas actividades generadas en el interior de carpas exteriores.

Cada vez son más los materiales acústicos provenientes de textiles o plásticos, ya por su propiedad absorbente o su propiedad aislante, que se utilizan en la construcción, con el fin de mejorar las prestaciones acústicas de cualquier recinto.

2.1. LEGISLACIÓN VIGENTE PARA EVENTOS

Para la evaluación y gestión del ruido ambiental hay que regirse por el real decreto 1367/2007 [12], por el cual se desarrolla la ley 37/2003, que a misma vez sigue la directiva 2002/49/CE del parlamento europeo y del consejo.

En ellas se especifican los niveles máximos permitidos según las características de cada situación, cómo deben ser medidos estos niveles y bajo qué circunstancias, y qué medidas o acciones se deben tomar en los diferentes casos que se puedan encontrar.

Puesto que estas leyes son anteriores a la entrada de la ley 42/2010 [7], de medidas sanitarias frente al tabaquismo, no se refleja en ellas como debería, el ruido que generado en carpas exteriores, pues este se ha visto incrementado por la masificación de terrazas introducidas en los últimos años. Las zonas al aire libre o terrazas estaban vistas como un suceso temporal, y ahora, se han convertido en uso habitual durante todo el año, ya que son muchos los hosteleros que quieren dar servicio a los clientes que desean fumar.

2.1.1. Reglamento de la Ley del Ruido, legislación autonómica y ordenanzas municipales.

El real decreto 1367/2007 [12] que desarrolla parcialmente la ley 37/2003 abarca la contaminación acústica producida tanto por el ruido ambiental como por las vibraciones, teniendo en cuenta cómo afectan estos a los bienes materiales, a la salud, y al medio ambiente.

Para conseguir este propósito, en ella se desarrollan índices de evaluación, se definen diferentes áreas acústicas, ya sean emisoras de ruido o receptoras, para poder marcar unos límites de emisión e inmisión, se ofrecen parámetros de actuación para mejorar las situaciones, así como dictar los procedimientos para la obtención de todas las características acústicas.

Centrándonos en el caso de estudio de este trabajo, no se considera el ruido generado en el exterior por eventos realizados al aire libre o carpas acústicas, ni por las terrazas de áreas de actividad, bares o restaurantes.

En cuanto a niveles límites, para este caso, se podrían considerar los valores establecidos de inmisión según el área que se encuentre. Estos valores están definidos según zonas y horarios, ya que se hace una distinción clara entre día (7:00 – 22:00) y noche (22:00 – 7:00).

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		$L_{K,d}$	$L_{K,e}$	$L_{K,n}$
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera una especial protección contra la contaminación acústica	50	50	40
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.	55	55	45
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en c.	60	60	50
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	63	63	53
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	65	65	55

Tabla I: Tabla B1 del RD 1367/2007 – Anexo III. Valores límite de inmisión de ruidos aplicables a infraestructuras portuarias y a actividades.

A partir de este decreto y ley, las diferentes autonomías y municipios pueden desarrollar los suyos propios, adecuándolos a las actividades que más se realizan en ellos, es decir, adaptándolas a sus costumbres.

En este trabajo vamos a resumir la legislación autonómica y municipal de la Comunidad Valenciana y Valencia, respectivamente.

La ley de protección contra la contaminación acústica de la Generalitat Valenciana es la ley 7/2002 [6]. Esta ley es de aplicación a actividades, comportamientos, instalaciones, usos o ejercicios que produzcan ruidos o vibraciones, causantes de molestias a las personas, generando riesgos para su salud o bienestar o deteriorar la calidad del medio ambiente.

Igual que en la legislación anteriormente explicada, se incluyen diferentes tablas con valores límites, los cuales no pueden ser superados, ya sean de emisión o inmisión.

En esta legislación se incluye un apartado de locales al aire libre, donde expresa simplemente los niveles máximos de potencia sonora que pueden emitir, estando en los 90 dB(A). Reservan el derecho a la administración competente de poder suspender temporalmente una autorización dada con anterioridad, si se comprueba que los niveles de recepción son superiores a los establecidos.

En esta ley también dictan las distancias entre actividades, pues en zonas donde se exigen unos límites más restrictivos, deben guardarse las distancias para no provocar un efecto suma.

Así mismo, la ley también se encarga de exponer las infracciones con sus sanciones correspondientes, además de ofrecer posibles medidas para corregir exceso de ruidos, y situaciones que consideran especiales.

Es dentro de estas últimas, donde especifica que la autoridad competente podrá eximir, con carácter temporal, del cumplimiento de esos valores límites con motivo de actos de carácter oficial, cultural, festivo, etc., realizados muchos de ellos en el interior de carpas exteriores, por el gran volumen de aforo necesario.

Por último, en cuanto a leyes se refieren encontramos la ordenanza municipal de protección contra la contaminación acústica de Valencia [10].

En ella encontramos un apartado dedicado exclusivamente a espacios abiertos susceptibles de producir ruidos y vibraciones.

En su primer punto, especifica que no se permitirá instalar, salvo autorización, reproductores de voz, amplificadores de sonidos, aparatos de radio o televisión, actuaciones vocales, etc., en el exterior de los recintos. Sólo será posible la realización de conciertos o espectáculos al aire libre en espacios expresamente reservados para ello. En este caso, será el ayuntamiento el que establecerá, en cada situación, las limitaciones de los niveles de emisión sonora.

En este punto también encontramos la celebración de verbenas al aire libre. Ésta, estará limitada en el tiempo coincidiendo con las fiestas patronales o tradicionales, como pueden ser las fallas u otros efectos de interés ciudadano. En ellas se exige un cumplimiento del horario estricto, y en la misma autorización se indicará la limitación del nivel sonoro permitido durante el periodo autorizado, siendo premisa general un nivel de 90 dB(A), medido a 5 metros del recinto emisor del ruido.

En cuanto a las normas exigidas para la colocación de terrazas de cualquier establecimiento, serán indicados, de igual manera que en los casos anteriores, las limitaciones en la autorización pertinente. En este caso sólo consideran limitaciones horarias.

A la hora de instalar una carpa hay que tener en cuenta que si ésta es colocada con el propósito de permitir fumar en el interior, la ley 42/2010 [7] de medidas frente al tabaquismo expone que deberá estar abierta al menos por dos de sus lados, o disponer de no más del 70% de superficie cerrada.

2.2 NORMAS DE ENSAYO

2.2.1. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN E IMPEDANCIA EN TUBO DE KUNDT

Para la obtención del coeficiente de absorción y la impedancia acústica de los diferentes materiales estudiados se ha seguido el método descrito en la norma UNE EN ISO 10534-2:2002 [15].

Esta norma expone un método para el cálculo del coeficiente de absorción en incidencia normal, y para la impedancia acústica superficial de materiales absorbentes, mediante un tubo de Kundt.

Los resultados que se obtienen siguiendo esta normativa son válidos para investigaciones y desarrollos de materiales y productos, ya que si se desea profundizar más en algunos de los materiales, deberán estudiarse mediante la norma UNE EN ISO 354:2004, Medición de la absorción acústica en cámara reverberante.

El fundamento seguido por esta norma es captar la presión que se encuentra en dos posiciones de micrófonos cercanas a la muestra, situada en un extremo del tubo, mientras que en el otro extremo se encuentra un altavoz generando ruido rosa, situado a una distancia suficiente para que se produzcan ondas planas.

Al medir las presiones, se calcula con un analizador de espectros la función de transferencia acústica compleja, la cual a su vez, se usa para calcular el coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia acústica de los materiales a ensayar.

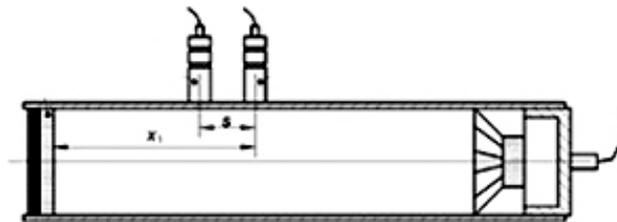


Figura 1: Dibujo representativo de un tubo de impedancia para el cálculo del coeficiente de absorción en incidencia normal.

Las mediciones tomadas serán sólo válidas para un margen de frecuencias, que estará limitado superiormente por las características del tubo utilizado, para evitar que se produzcan ondas no planas, e inferiormente por la precisión del equipo procesador de señal.

Así la frecuencia superior del margen quedará determinada por:

$$f_u < \frac{0,58 \cdot c_0}{d}$$

Donde:

d (m) es el diámetro interior del tubo de impedancia;

c_0 es la velocidad del sonido.

De la frecuencia superior del margen, también dependerán las distancias que encontremos entre los micrófonos, s , y esta a su vez, favorecerá la precisión de las medidas. De esta manera, la distancia entre micros deberá ser mayor al 5% de la longitud total del tubo, existiendo mayor precisión cuanto mayor sea, y será menor que el valor obtenido a partir de la siguiente fórmula:

$$s < \frac{0,45 c_0}{f_u}$$

Las medidas pueden realizarse de dos maneras según dicta la norma:

1. Método de los dos micrófonos (usando posiciones de micrófonos fijas)

2. Método de un micrófono (usando un micrófono en sucesivas posiciones)

Nos vamos a centrar en la explicación para el primer caso, pues ha sido elegido para realizar las mediciones en este trabajo.

Al realizar las mediciones con dos micrófonos diferentes, es necesario corregir los desajustes que aparecen entre ambos. Esta corrección se puede realizar de diferentes maneras.

El método de corrección utilizado consiste en realizar dos medidas para cada muestra. Una primera medición con los micrófonos colocados en una posición con la que obtendremos la función de transferencia H'_{12} , y una segunda medición intercambiando la posición de ambos micros en el tubo, H'_{21} . A partir de estas funciones de transferencia, se calculará la función de transferencia compleja corregida:

$$H_{12} = \left(\frac{H'_{12}}{H'_{21}} \right)^{1/2} = |H_{12}| e^{j\phi_c} = H_r + jH_i$$

Donde:

H_r es la parte real de H_{12} ;

H_i es la parte imaginaria de H_{12} .

El principio en el que se basa la norma expresa un cálculo del coeficiente de reflexión en incidencia normal a través de las presiones capturadas por los micrófonos. Así, obtendremos las funciones de transferencias para la onda incidente y reflejada, para que, junto a la función de transferencia compleja corregida, podamos calcular el coeficiente de reflexión:

$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} \cdot e^{j2x_1k_0}$$

Donde:

H_1 es la función de transferencia para la onda incidente;

H_R es la función de transferencia para la onda reflejada;

x_1 es la distancia de la muestra al último micrófono;

k_0 es el número de onda complejo.

Obtenido el coeficiente de reflexión ya podemos calcular las variables acústicas que estamos buscando: coeficiente de absorción e impedancia acústica.

Coeficiente de absorción:

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

Impedancia acústica:

$$Z = \frac{(1+r)}{(1-r)} \cdot \rho c_0$$

Donde:

ρc_0 es la impedancia característica.

2.2.2. PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN EN TUBO DE IMPEDANCIA

Para la obtención de la propiedad acústica de diferentes materiales, como son las pérdidas por transmisión a partir de un tubo de impedancia, no existe normativa

europea que la describa. Así, se han estudiado diferentes métodos experimentales expuestos en distintos congresos y revistas por muchos autores [1] [3] [8] [9] [14] [16] [17].

La diferencia entre los distintos trabajos estudiados radican principalmente en la terminación del tubo posterior a la muestra, si tiene o no una terminación anecoica, y a partir de ahí qué variables afectan en los cálculos, pues estudios difieren si se consideran todas las propiedades de las muestras o no, al igual que en qué grado afectan las propiedades del tubo.

Finalmente, debido a la configuración que poseía el tubo de impedancia utilizado para realizar las medidas, se ha seguido el método descrito en el trabajo "Measurement of Sound Transmission Loss by Using Impedance Tubes" [14].

El principio o base de este método experimental es medir las presiones encontradas a ambos lados de la muestra, situada en medio de dos tubos de impedancia, en los cuales en uno se encuentra un altavoz emitiendo ondas planas, y en el otro encontramos una terminación anecoica (figura II). Así, colocando dos micrófonos a cada lado de la muestra que midan la presión existente, se puede describir la matriz de transferencia que representan las ondas incidentes y reflejadas de ambos lados. Observamos las amplitudes de estas ondas:

$$A = \frac{j(p_1 e^{jkx_2} - p_2 e^{jkx_1})}{2 \operatorname{sen}k(x_1 - x_2)},$$

$$B = \frac{j(p_2 e^{jkx_1} - p_1 e^{jkx_2})}{2 \operatorname{sen}k(x_1 - x_2)},$$

$$C = \frac{j(p_3 e^{jkx_4} - p_4 e^{jkx_3})}{2 \operatorname{sen}k(x_3 - x_4)},$$

$$D = \frac{j(p_4 e^{jkx_3} - p_3 e^{jkx_4})}{2 \operatorname{sen}k(x_3 - x_4)},$$

Donde: A y B son las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas anteriores a la muestra, y C y D la onda transmitida y reflejada posterior a la muestra.

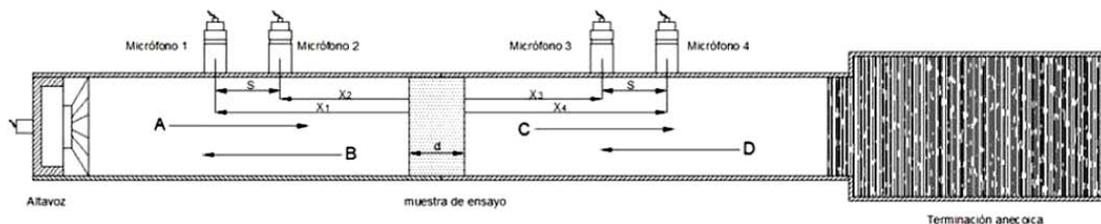


Figura II: Dibujo esquemático del tubo de impedancia utilizado para medir las pérdidas por transmisión.

Al utilizar una distancia entre micrófonos, s , igual en ambos lados podemos simplificar las ecuaciones quedando definido el coeficiente de transmisión como la onda transmitida entre la onda incidente. Y por consiguiente, las pérdidas por transmisión, TL, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$TL = 20 \log \left| \frac{e^{jks} - H_{12}}{e^{jks} - H_{34}} \right| - 20 \log |H_t|$$

Donde:

$H_{12} = p_2/p_1$, función de transferencia entre las posiciones 1 y 2.

$H_{34} = p_4/p_3$, función de transferencia entre las posiciones 3 y 4.

$H_t = \sqrt{S_d/S_u}$, relación entre auto-espectros: S_d auto-espectro en la parte anterior a la muestra, y S_u auto-espectro en la parte posterior a la muestra.

Igualmente que en las mediciones del coeficiente de absorción, las funciones de transferencia tienen que ser corregidas por el desfase existente entre micrófonos. Para ello, realizaremos dos mediciones con los micrófonos intercambiados en cada tubo, corrigiendo por un lado la función de transferencia del tubo anterior a la muestra, H_{12} , y por otro lado la del tubo posterior a la muestra, H_{34} .

2.2.3. RESISTENCIA AL FLUJO

Uno de los parámetros necesarios para caracterizar acústicamente un material es la resistencia al flujo. Para su obtención, existe una normativa europea, UNE EN 29053:1994, pero al incluir ésta un método bastante complicado de montaje, existen otros métodos muchos más utilizados en el ámbito de la investigación que ayuda a elaborar un primer comportamiento del material, como es el método de Ingard & Dear [4], utilizado en este estudio.

Al igual que en la obtención de las variables acústicas anteriores, estas medidas también se realizarán en tubo de Kundt, existiendo diferencias con los anteriores.

Del mismo modo, este método consiste en capturar las presiones que existen antes y después de la muestra con dos micrófonos. Corrigiendo también el desfase que pueda producirse, se realizan dos medidas con los micrófonos intercambiados. Así, se obtendrá una función de transferencia corregida, que será la utilizada para calcular la resistencia al flujo.

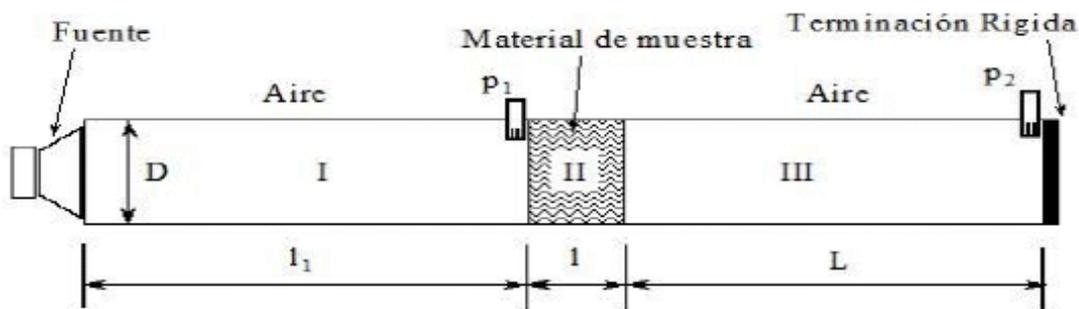


Figura III: Dibujo esquemático del tubo utilizado para medir la resistencia al flujo.

Es un método sencillo pero con limitaciones en cuanto a las mediciones, ya que el margen de frecuencias para los que las medidas son válidas estarán determinadas por las dimensiones del tubo. A parte de esto, la longitud de onda, λ , deberá ser

mucho mayor que 1.7 el diámetro del tubo, para asegurarnos que las ondas incidentes en la muestra son planas.

Cumpliendo las restricciones señaladas para generar ondas planas, obtendremos unos valores de resistencia al flujo válidos, cuando la longitud del tubo utilizado cumpla la siguiente condición: $L = \frac{(2n-1)\lambda}{4}$, para $n=1,2,..$. Pues cuando se cumple dicha condición, la parte resistiva de la impedancia es mucho mayor que la reactiva, siendo esta última despreciable, quedando la resistencia al flujo de la siguiente manera:

$$\sigma = i \left| \text{Imag} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right|$$

Donde:

H_{12} será la función de transferencia corregida.

2.2.4. Modelos de muros y cortinas

Cuando una onda acústica que viaja en un medio, se encuentra con una frontera con un segundo medio se generan ondas reflejadas y transmitidas.

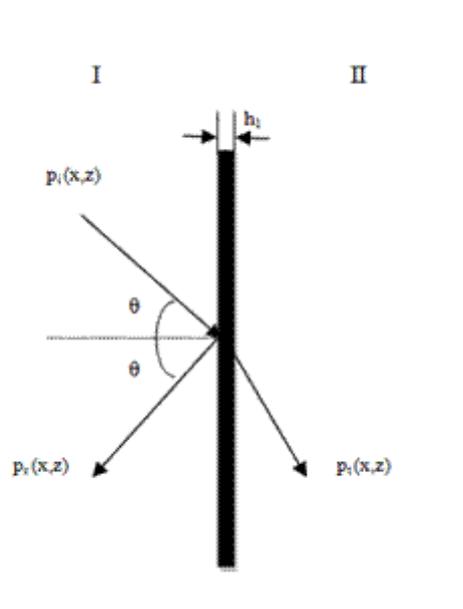


Figura IV: Placa delgada separando dos espacios.

Las razones de las amplitudes de presión e intensidad de estas ondas generadas con respecto a la incidente, dependerán de las impedancias acústicas características y velocidades del sonido en los dos medios, así como del ángulo con el que la onda incide en el plano.

En los casos de la realización de mediciones en tubo de impedancia, se está considerando una incidencia normal, por lo que las ecuaciones se simplifican bastante.

Los coeficientes de transmisión y reflexión serán:

$$\begin{aligned}\tau &= P_t/P_i \\ r &= P_r/P_i\end{aligned}$$

Donde:

P_i es la presión de la onda incidente,
 P_r es la presión de la onda reflejada,
 P_t es la presión de la onda transmitida.

Este coeficiente de transmisión, como se ha mencionado, variará según el ángulo con el cual incida la onda. Si la decimos que la incidencia es normal, estamos hablando de que la onda incide con un ángulo de 0° .

Para un campo difuso obtendremos el coeficiente de transmisión de la siguiente manera:

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \cos\theta \sin\theta \, d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} \cos\theta \sin\theta \, d\theta}$$

Donde θ_{lim} representa el ángulo límite con el cual la onda puede incidir sobre el material.

Para la obtención del índice de reducción sonora de manera general utilizamos el coeficiente de transmisión, τ , siendo este también dependiente del ángulo de incidencia:

$$R = -10 \log \tau_d$$

En el caso de muros y cortinas vemos algunas diferencias en cuanto al coeficiente de transmisión anterior, puesto que incluimos una placa delgada, de masa por unidad de área m , separando dos regiones, obteniendo unas expresiones del coeficiente de transmisión que derivan de una mejora de la Ley de masas:

$$\tau(\theta) = \frac{(2\rho_0)^2}{\left(\frac{\omega^3 \cos\theta \sin^4\theta \eta}{c_0^5} + 2\rho_0\right)^2 + \frac{\omega^2 \cos^2\theta (D\omega^2 \sin^4\theta - mc^4)^2}{c_0^{10}}}$$

En el caso de tener un campo difuso, se calcularía de la siguiente manera:

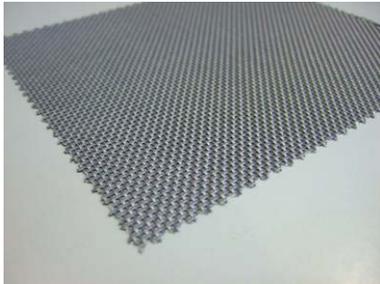
$$\tau_d = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \frac{(2\rho_0)^2 \cos\theta \sin\theta \, d\theta}{\left(\frac{\omega^3 \cos\theta D \sin^4\theta \eta}{c_0^5} + 2\rho_0\right)^2 + \frac{\omega^2 \cos^2\theta (D\omega^2 \sin^4\theta - mc^4)^2}{c_0^{10}}}}{\frac{\sin^2\theta_{lim}}{2}}$$

Donde D es la rigidez a flexión de la placa, η es el factor de pérdidas total, c_0 es la velocidad de propagación del sonido en el aire, ρ_0 es la densidad del aire y ω la frecuencia angular.

Debido a la posible aparición de ondas de flexión en el caso de cortinas, estas fórmulas sólo serán válidas cuando no se produzca este fenómeno, es decir, cuando la rigidez a flexión sea nula.

3. DESARROLLO

Para la realización de este trabajo se han estudiado 33 muestras diferentes, procedentes de dos proveedores distintos. En las siguientes tablas, 2 y 3, se observan las características de todos los materiales estudiados, del proveedor 1 (tabla 2), y del proveedor 2 (tabla 3).



Batylite – HM (proveedor 1)



Opaque (proveedor 2)



Stam-Skin (proveedor 1)



Stam-Skin-TOP (proveedor 1)

Imagen 1: Imágenes de algunas muestras estudiadas.

Muestra	Espesor (mm)	Densidad (g/m ²)	Resistencia a tracción (daN/5cm)	Resistencia al desgarro (daN)
Formule-S-Nacarado	0,90	615	-	-
8106-S	0,70	1050	420/400	55/50
Sky-300	0,30	260	300	60/60
Soltis-92	0,45	420	310/210	40/20
Soltis-B92	0,60	650	330/220	45/25
Soltis-99-BV	0,32	290	160/170	11/13
Soltis-Air	0,10	330	230/200	-
Stam-Skin	1,10	780	>400	30/20
Stam-Skin-TOP	1,10	780	>400	30/20
Batylite-HM	0,90	560	230/200	>35
Precontraint	0,50	590	250/250	25/20
PR-502-8104S	0,48	590	280/280	28/28
PR-502-8103S	0,53	670	280/280	28/28
PR-702-8104S	0,58	750	280/280	30/28
PR-702-8103S	0,64	830	280/280	30/28
Fluotop 702	0,52	750	300/280	30/28
Fluotop 1002	0,78	1050	420/400	55/50
Fluotop 1202	0,78	1050	560/560	80/65
Fluotop 1302	1,02	1350	800/700	120/110
Fluotop 1502	1,14	1500	1000/800	160/140
PR-FT-371	0,50	440	300/300	60/60

Tabla II: Listado de muestras con características del proveedor 1.

Muestra	Espesor (mm)	Densidad (g/m ²)	Resistencia a tracción (daN/5cm)	Resistencia al desgarro (daN)
Green Cover	0,40	520	240/240	18/23
PS Cover	0,50	670	250/250	20/20
Sport-Cover	0,50	720	300/300	25/25
Best-Cover	0,50	720	290/290	40/40
Big-Cover	0,60	900	400/400	40/40
Strong-Cover	1,00	1300	750/650	110/140
Extra-Cover	1,20	1450	980/830	160/180
Extra-Cover-Rotopal	0,50	650	-	-
Extra-Cover-RotofluoW	0,50	713	-	-
Laqueado Rotofluo P	0,50	776	-	-
Opaque	0,50	776	-	-
Tratamiento Coibentato	3,50	1105	-	-

Tabla III: Listado de muestras con características del proveedor 2.

Entre las propiedades importantes que se deben tener en cuenta a la hora de elegir un material para construir una carpa acústica, están el espesor y densidad, que definirán en gran mayoría su comportamiento acústico, la resistencia a tracción y al desgarro, y por supuesto su reacción al fuego.

En las tablas no se ha indicado la reacción al fuego de los materiales, ya que todos los materiales estudiados son clase M1, lo que los hace aptos para su utilización en carpas.

La resistencia al desgarro es la resistencia que ofrecen los materiales a rasgarse cuando es sometido a fuerzas. Con ello se aseguran que el material no se rompa al estar a la intemperie sometido a constantes fuerzas provocadas por el viento. Esta propiedad ha sido medida según la normativa UNE EN ISO 1421:1999.

La otra variable indicada, la resistencia a tracción, es el máximo esfuerzo de tracción, que el material puede soportar antes de romperse. La resistencia a tracción se ha medido bajo la normativa EN ISO 13937-1.

3.1. Ensayos del coeficiente de absorción e impedancia en incidencia normal

En la obtención del coeficiente de absorción e impedancia acústica en incidencia normal se ha seguido lo dictado en la normativa UNE EN ISO 10534-2:2002 [15], explicada en el apartado 2.2.1.

Para realizar las mediciones se ha utilizado un tubo de Kundt que posee un altavoz en un extremo, y en el otro la muestra a ensayar. La normativa explica un procedimiento en el cual la muestra a ensayar se coloca en un portamuestras con una terminación rígida (Imagen II). En este trabajo, no se ha considerado dicha terminación (Imagen III), para simular así las condiciones reales de aplicación de los materiales estudiados, pues es la construcción de carpas, en la que el material se encuentra como único elemento constructivo.



Imagen II: Con terminación rígida



Imagen III: Sin terminación rígida

El método utilizado para medir ha sido el de los dos micrófonos utilizando la corrección de micrófonos intercambiados, por lo que la señal será registrada con dos micrófonos de presión acoplados en la pared del tubo de Kundt (Imagen IV).

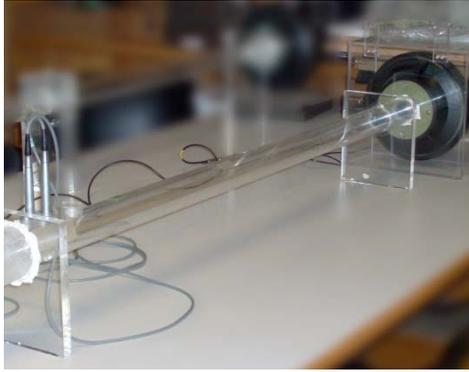
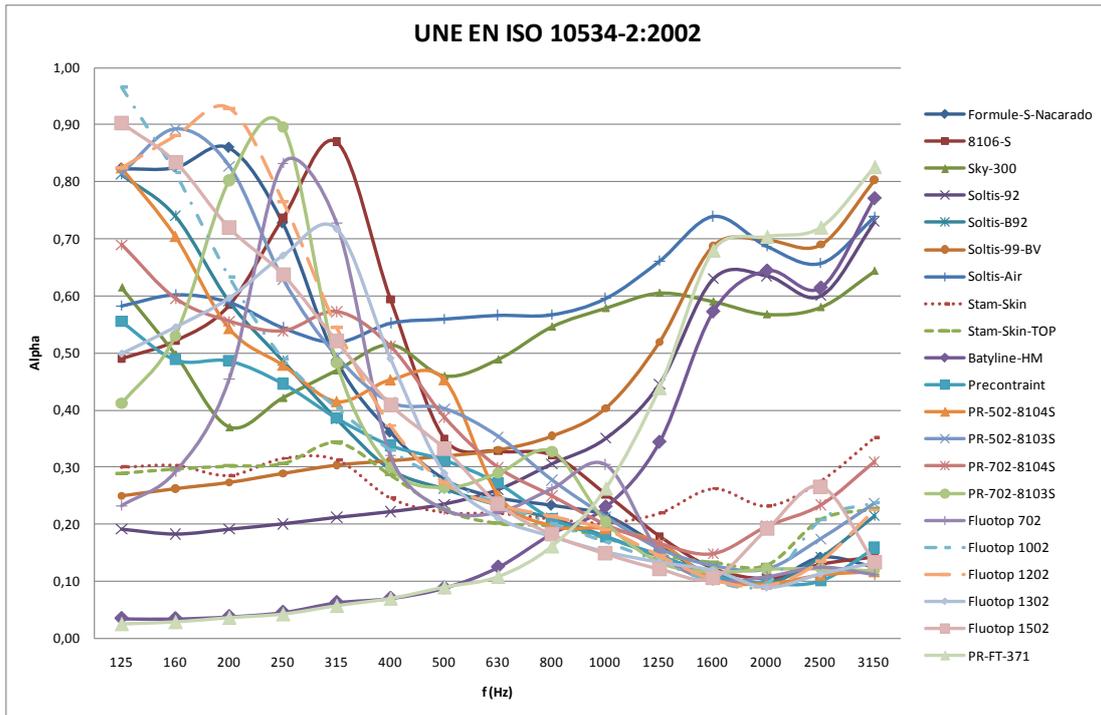


Imagen IV: Tubo de impedancia para medición del coeficiente de absorción.

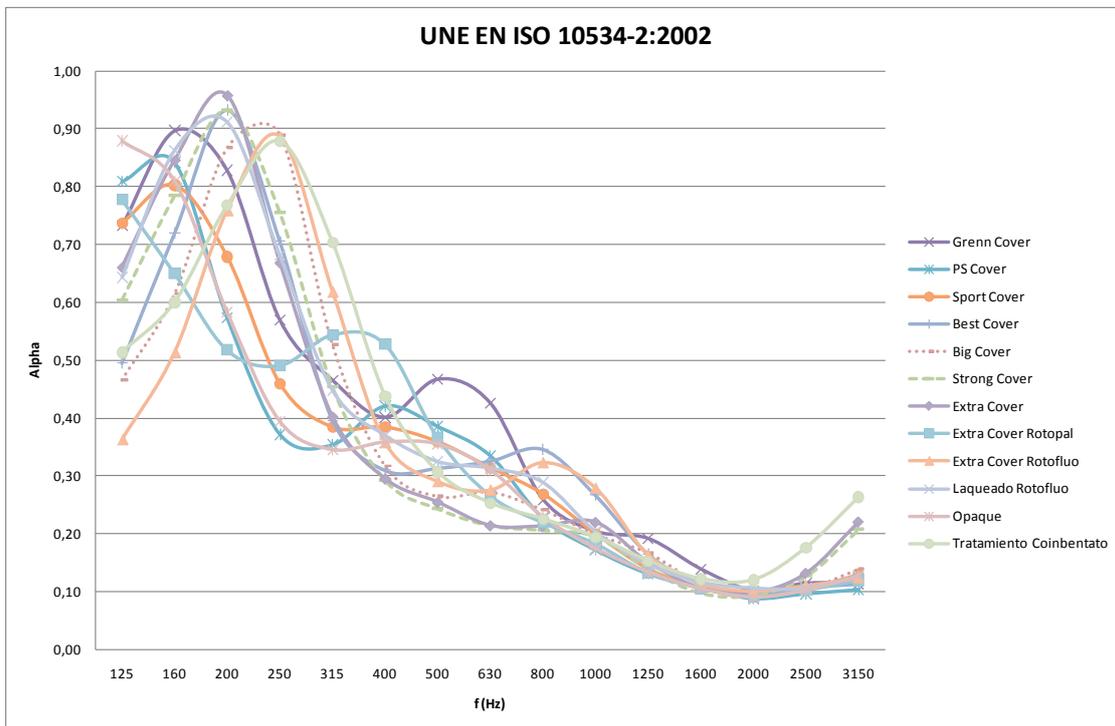
Para generar y procesar las señales se ha utilizado el Symphonie 01 dB 00282. Éste calculará las funciones de transferencia de las presiones capturadas por los micros, H'_{12} cuando el micrófono 1 esté más alejado de la muestra, y H'_{21} con los micrófonos intercambiados, estando el 2 más alejado de la muestra. A partir de estas funciones se realizarán los cálculos pertinentes, explicados anteriormente para obtener el coeficiente de reflexión (fórmula 4), y a partir de él las propiedades acústicas deseadas.

Observamos los resultados obtenidos diferenciando las muestras por proveedores. Las mediciones se hicieron tanto para terminación rígida como sin ella. Con la terminación rígida obtenemos el coeficiente de absorción como indica la norma, y sin terminación rígida comprobamos la sensación de absorción sonora de las muestras.

En la gráfica se muestran los resultados obtenidos sin terminación rígida, ya que de igual forma se pueden comparar los valores de las muestras y se expone una situación más real del montaje del material.



Gráfica I. Coeficientes de absorción en incidencia normal de las 21 muestras aportadas por el proveedor 1.



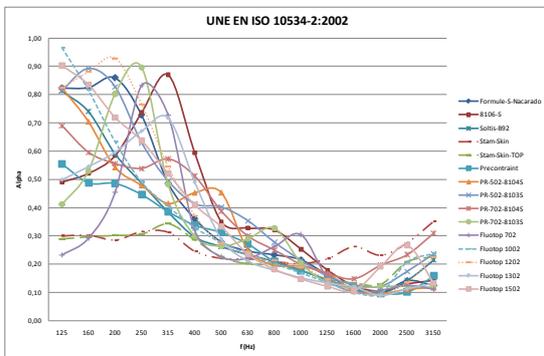
Gráfica II. Coeficientes de absorción en incidencia normal de las 12 muestras aportadas por el proveedor 2.

Puesto que se ha medido para simular una situación más similar a la del montaje real, con estos resultados podemos observar que buena parte del sonido se transmite, es decir, sale al exterior, por lo que se hacen necesarias las mediciones de las pérdidas por transmisión, y otra parte se absorbe (máximos en las gráficas I y II).

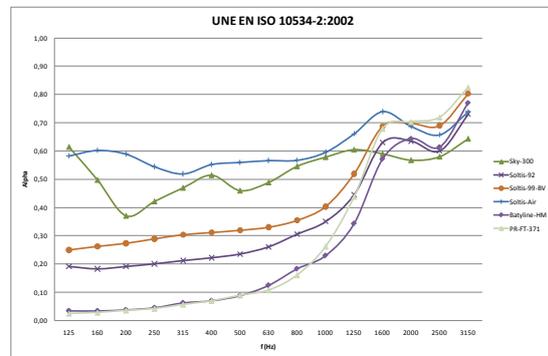
En la gráfica I, muestras del proveedor 1, se observan dos comportamientos claramente diferenciados del coeficiente de absorción en incidencia normal. Para un cierto número de muestras existe una tendencia de un máximo a baja frecuencia, consiguiendo valores máximos de más de 0,90 del coeficiente de absorción, disminuyendo conforme aumenta la frecuencia para un cierto número de muestras (Gráfica III). La disminución de estos valores a altas frecuencias, es debida a que todo el sonido es transmitido a frecuencias bajas.

Para el resto de muestras, se observa una tendencia a aumentar el coeficiente de absorción conforme aumenta la frecuencia, llegando a valores máximos de más de 0,80 del coeficiente de absorción (Gráfica IV). En este último caso se observan algunas muestras con un comportamiento bastante uniforme, como es la muestra Soltis-Air, la cual posee valores del coeficiente de absorción entre 0,53 y 0,75 para todo el margen de frecuencias estudiado.

Las muestras del proveedor 2 siguen todas el mismo comportamiento que se muestra en la gráfica III de las muestras del proveedor 1.

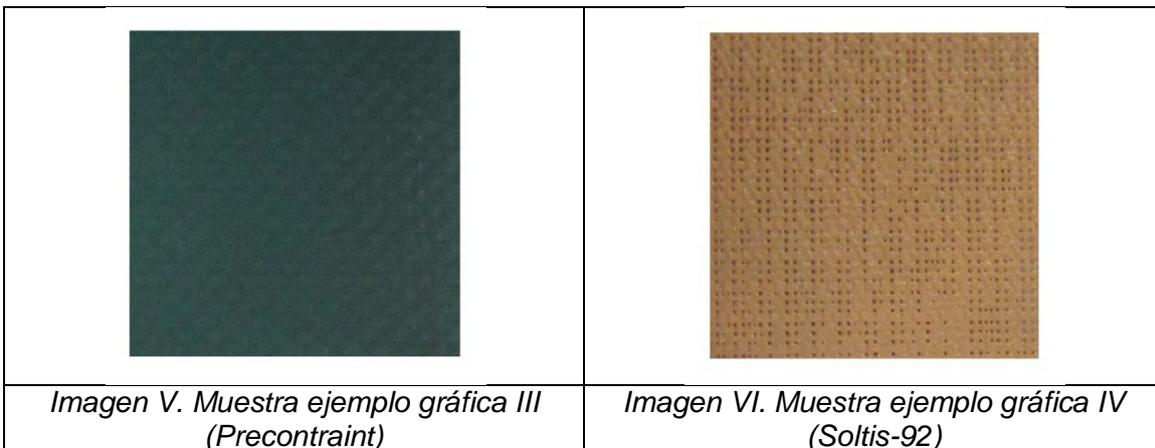


Gráfica III. Tendencia a disminuir.



Gráfica IV. Tendencia a aumentar.

Los materiales cuyo comportamiento se representa en la figura 2, se diferencian de las demás en que poseen una serie de orificios o poros. Se puede ver un ejemplo de ello en la imagen VI.



3.2. Puesta en marcha y ensayos en tubo de transmisión

Para la obtención de las pérdidas por transmisión de las muestras no se ha seguido ningún procedimiento descrito en ninguna normativa, ya que no existe ninguna estandarizada en la comunidad europea para calcular esta propiedad acústica mediante tubos de impedancia. Así, se han seguido varios trabajos escritos por la comunidad científica, en especial el escrito por Sung Soo Jung, Yong Tae Kim y Yong Bong Lee [14].

Para la realización de las medidas se ha diseñado y elaborado en la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia, un prototipo de tubo de impedancia, el cual se puede observar en la siguiente imagen.



Imagen VII. Montaje realizado para las medidas de pérdidas por transmisión.

Como se ve, este montaje se compone de dos tubos, encontrándose en medio de ambos la muestra a estudiar. El primer tubo posee una longitud de 1315 mm, y el segundo, posterior a la muestra, tiene una longitud de 1233 mm. Ambos tubos presentan un diámetro interior de 40 mm. Cada tubo presenta tres posiciones diferentes de micrófonos, para poder variar el espectro frecuencial óptimo de las mediciones que se tomen. Estas distancias son de 32 mm y 16 mm. En las mediciones realizadas para este trabajo se ha considerado la distancia de 32 mm.

En el extremo anterior a la muestra se encuentra el altavoz capaz de emitir ondas planas, y en el extremo del tubo posterior a la muestra encontramos la terminación anecoica.

Esta terminación ha sido estudiada para varias configuraciones en otros estudios, eligiendo finalmente la configuración observada en la imagen VII. Ésta consiste en introducir un absorbente en el final del tubo, al mismo tiempo que se introduce éste en una cavidad rellena por dicho absorbente (Imagen VIII). Además se han evitado cualquier tipo de transmisión directa del sonido entre el dispositivo y la mesa de ensayo, por lo que se han colocado materiales con gran rigidez dinámica en los lugares donde el tubo se apoyaba en la mesa.



Imagen VIII. Terminación anecoica utilizada en el estudio.

La configuración para realizar las medidas es similar al caso anterior. Se han utilizado cuatro micrófonos con los que se han capturado las presiones existentes antes y después de la muestra. Para ello encontramos dos micros a cada lado de la muestra.

Para cada muestra se han hecho cuatro medidas, dos mediciones en cada tubo, intercambiando los micrófonos para corregir la diferencia de fase entre ambos. Mediante el procesador de señal obtenemos las funciones de transferencia de cada medición y sus auto-espectros, pudiendo a partir de estos datos calcular las funciones de transferencia corregidas y las pérdidas por transmisión. Para este fin se ha utilizado el mismo procesador que para el coeficiente de absorción, Symphonie 01 dB 00282.

$$TL = 20 \log \left| \frac{e^{jks} - H_{12}}{e^{jks} - H_{34}} \right| - 20 \log |H_t|$$

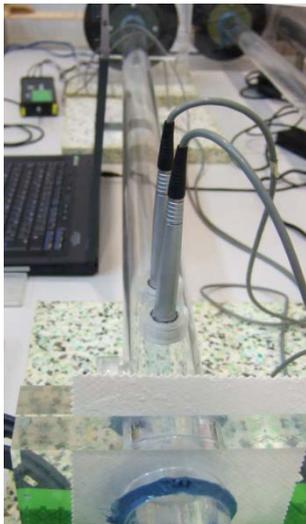


Imagen IX. Micrófonos anteriores a la muestra.

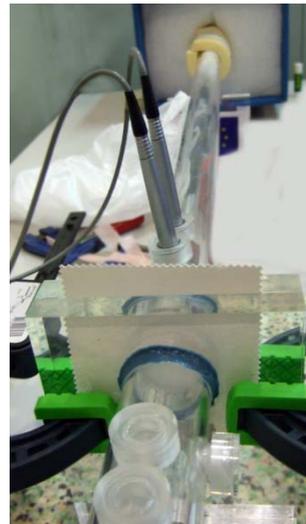
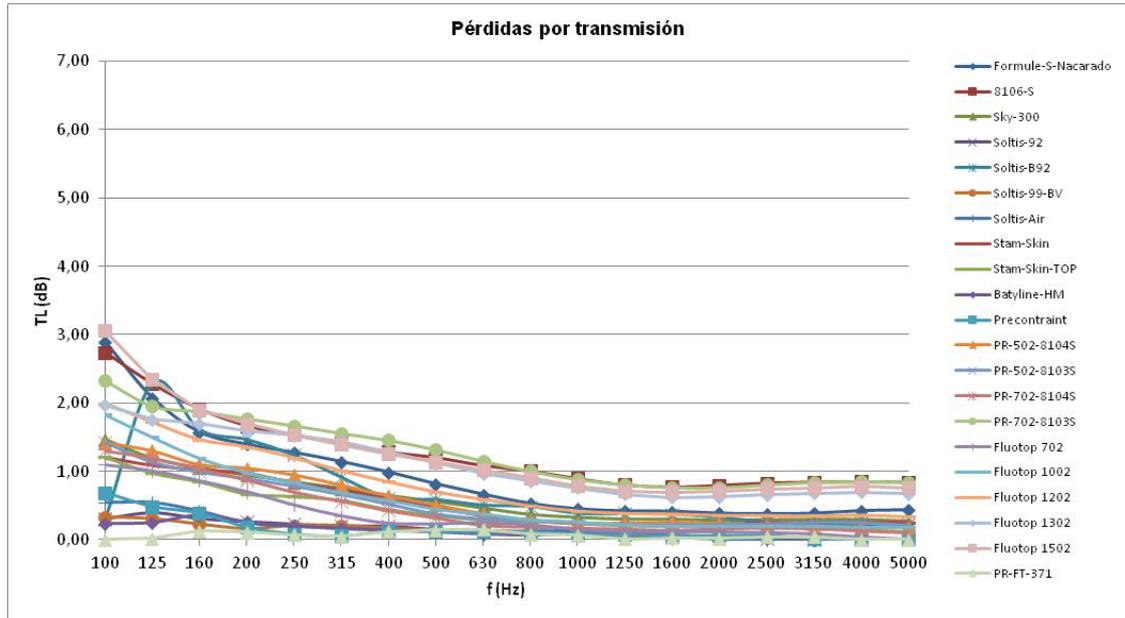
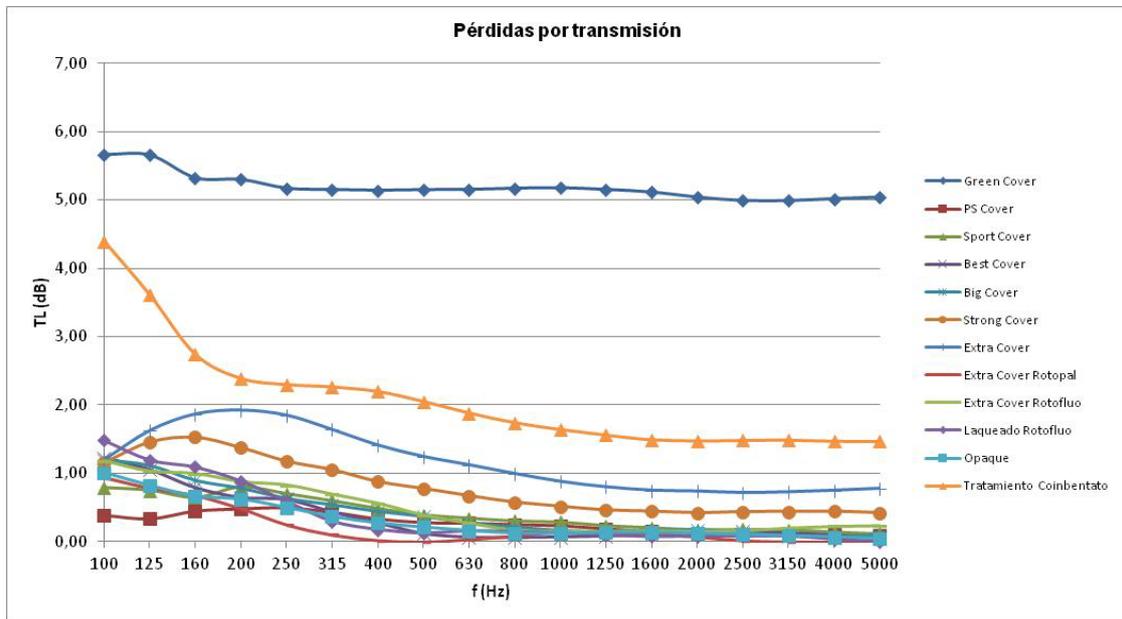


Imagen X. Micrófonos posteriores a la muestra.

Pasamos a mostrar los resultados obtenidos para las muestras de ambos proveedores.



Gráfica V. Pérdidas por transmisión en incidencia normal de las 21 muestras aportadas por el proveedor 1.



Gráfica VI. Pérdidas por transmisión en incidencia normal de las 12 muestras aportadas por el proveedor 2.

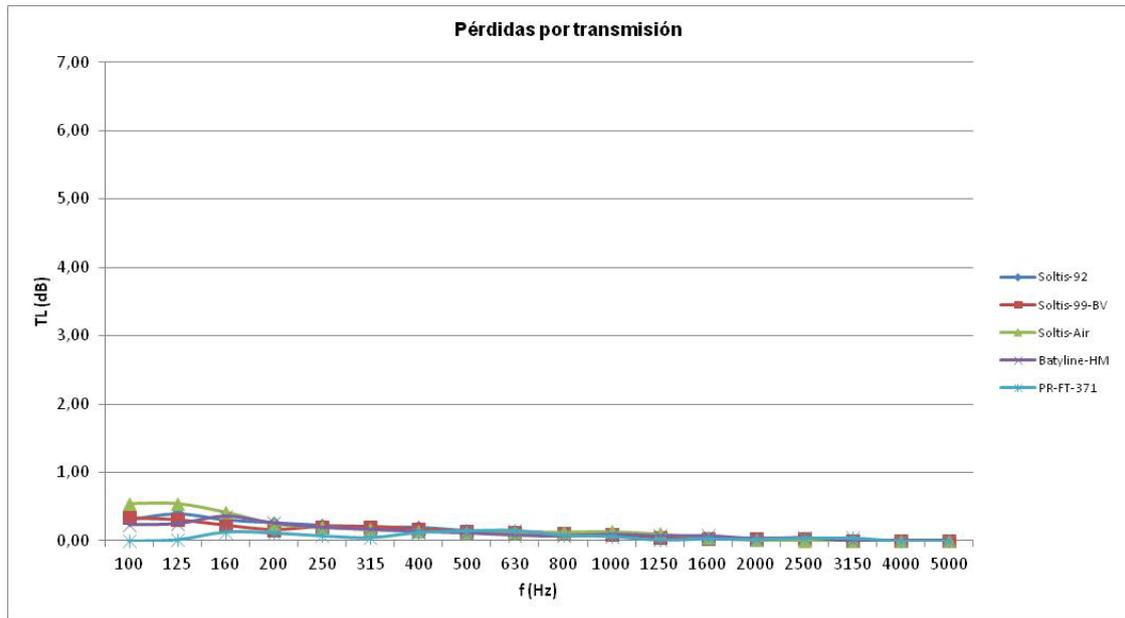
En las muestras ofrecidas por el proveedor 1 (gráfica V) no se obtienen valores de pérdidas por transmisión mayores de 3dB, siendo la tendencia de ellas a disminuir su valor conforme aumenta la frecuencia. En algunas de ellas encontramos un valor de 0dB para todo el margen de frecuencias (gráfica VII).

El comportamiento a estudiar será sobretodo en las frecuencias donde obtenemos un alto valor del coeficiente de absorción, ya que indica que el sonido no es reflejado sino que se está transmitiendo, por lo tanto habrá que ver si todo ese sonido que se absorbe se transmite al exterior. Con mediciones realizadas para una terminación rígida se esperaba unos valores bajos de pérdidas por transmisión para un valor máximo del coeficiente de absorción.

En este caso, al comparar con valores del coeficiente de absorción sin terminación rígida, no se sigue esa regla. Si encontramos máximos del coeficiente de absorción y máximos de pérdidas por transmisión en algunos materiales, al estar comparando, vemos que ese material será mejor que otros.

Las muestras que presentan un valor de 0dB, coinciden precisamente con las muestras del proveedor 1 que mostraban una tendencia diferente a la mayoría en el coeficiente de absorción (Gráfica IV), las cuales se caracterizan por poseer una serie de poros, como se podía ver un ejemplo en la imagen V. Existe la excepción de una de ellas, Sky-300, debido a que presentaba un comportamiento más lineal en el coeficiente de absorción en incidencia normal. En este caso, sólo obtiene valores de pérdidas por transmisión de alrededor de 1dB para frecuencias bajas (100 Hz – 200 Hz).

Igual que encontramos muestras diferenciadas por sus valores nulos de pérdidas por transmisión, vemos cuatro muestras con unos valores un poco más altos de la media. Estas son: Fluotop 1502, 8106-S, PR-702-8103-S y Fluotop 1302.



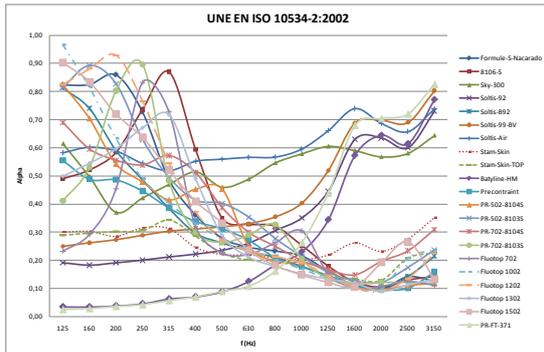
Gráfica VII. Muestras con valor 0 de TL.

En la gráfica de representación de los valores de pérdidas por transmisión de las muestras del proveedor 2, llama la atención la muestra Green Cover, la cual está 4dB por encima de la mayoría. Al poseer la muestra un alto valor de pérdidas por absorción estamos asegurando un valor mínimo de aislamiento.

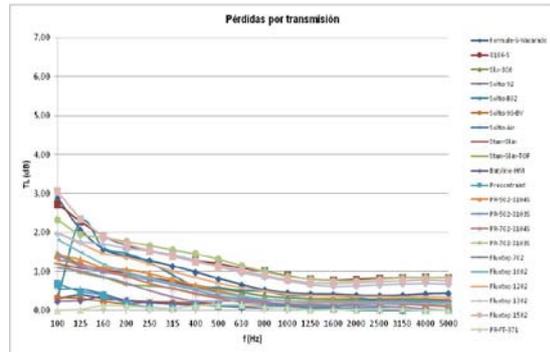
Estas muestras siguen la misma tendencia, un pequeño pico a frecuencias bajas, y disminución de las pérdidas conforme aumenta la frecuencia.

Después de la muestra Green Cover, que es la que sobresalía por encima de todas, encontramos tres muestras un poco por encima de la media, son: Tratamiento Coibentato, Extra Cover y Strong Cover, las cuales presentan valores más altos a frecuencias bajas.

Si analizamos los datos obtenidos en este método experimental con los obtenidos en el coeficiente de absorción siguiendo la norma UNE EN ISO 10534-2:2002, podemos observar el comportamiento que van a tener los materiales estudiados.



Gráfica VIII. Coeficiente de absorción de las muestras del proveedor 1.

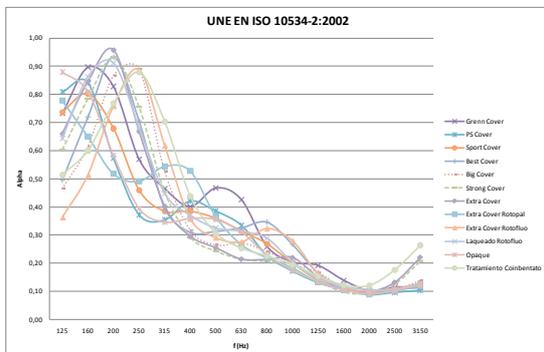


Gráfica IX. Pérdidas por transmisión de las muestras del proveedor 1.

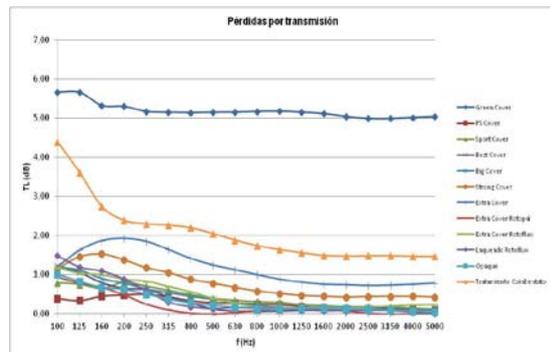
En los coeficientes de absorción observamos que hay dos grupos de muestras que presentan comportamientos diferentes. Era de esperar que esos picos que nos encontrábamos en los coeficientes de absorción se tradujeran en máximos en las pérdidas por transmisión, ya que al no reflejarse la onda, se transmite todo al exterior.

Igualmente podríamos no encontrar máximos en las pérdidas por transmisión debidas a que el material no pusiera ninguna oposición al sonido.

Las muestras que poseían una tendencia de material absorbente poroso, aumentando su coeficiente de absorción conforme aumenta la frecuencia, sí tienen un comportamiento de pérdidas por transmisión esperado, ya que al poseer los materiales que componen estas muestras una serie de poros, no oponen oposición al sonido, siendo sus pérdidas por transmisión cero en todo el margen de frecuencias, aunque posean valores altos del coeficiente de absorción.



Gráfica X. Coeficiente de absorción de las muestras del proveedor 1.



Gráfica XI. Pérdidas por transmisión de las muestras del proveedor 1.

En las muestras aportadas por el proveedor 2 nos encontramos la misma situación. Encontramos los máximos de TL para valores altos del coeficiente de absorción sin terminación rígida.

También es de destacar el comportamiento de dos muestras por encima del resto, Green Cover y Tratamiento Coibentado, las cuales no tenían un aspecto destacado en el coeficiente de absorción siguiendo la misma tendencia que el resto de muestras, en cambio sobresalen en los valores de pérdidas por transmisión.

3.3. Ensayos de la resistencia al flujo.

En la obtención de las medidas de resistencia al flujo también se ha utilizado un tubo de impedancia siguiendo el método experimental descrito por Ingard & Dear [8].

El tubo utilizado en este caso es distinto a los dos anteriores, teniendo similitudes con ambos. Éste se compone de dos tubos de impedancia, al igual que el de las mediciones de pérdidas por transmisión, separados por la muestra a medir. En uno de los tubos se encuentra el altavoz que emite ruido rosa, creando ondas planas en todo el espectro de frecuencias a medir, y el tubo posterior a la muestra acaba con una terminación rígida. En la imagen X se puede observar dicho tubo, y el montaje de la instrumentación utilizada.

En las paredes de dichos tubos encontramos los orificios donde se colocan los micrófonos para capturar la presión en ese punto. Éstos estarán situados delante y detrás de la muestra, situándose al final de ambos tubos en los dos casos.

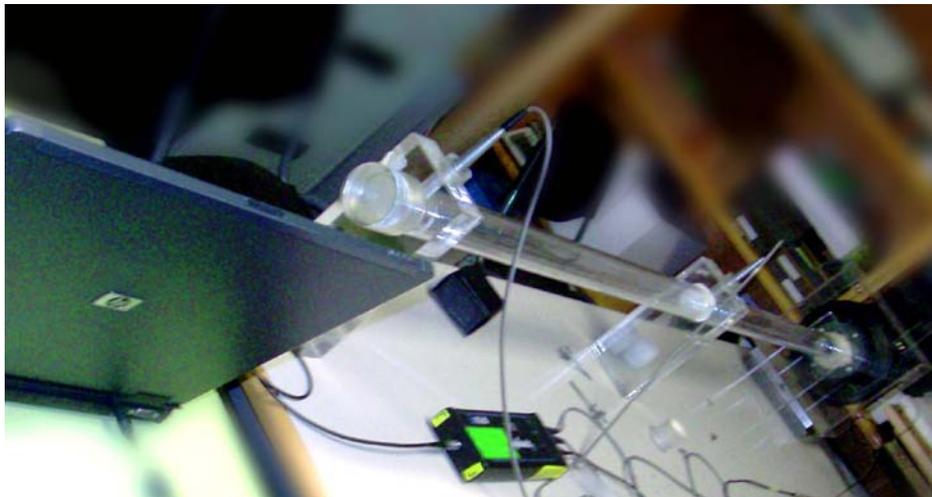


Imagen X. Montaje realizado para la obtención de la resistencia al flujo.

El método utilizado para la obtención de la resistencia al flujo de las muestras consiste en medir, una vez más, las presiones que encontramos en cada micrófono, pudiendo calcular a través del procesador de señal la función de transferencia correspondiente. Como se están utilizando dos micrófonos, corregiremos el posible desfase que pueda aparecer entre ellos, realizando dos mediciones para cada muestra una con los micrófonos en una posición, y otra intercambiándolos de posición.

A partir de la función de transferencia corregida calcularemos la resistencia al flujo de cada muestra (9). Como ya se menciona en el apartado 2.2.3, los valores no

son válidos en todo el margen de frecuencias, por lo que sólo cogeremos los resultados en determinadas frecuencias, concretamente en las que cumplan la condición $L = \frac{(2n-1)\lambda}{4}$ para $n=1, 2, \dots$

Puesto que buscamos un único valor que defina la resistencia al flujo del material, a partir de esos valores obtenidos en las frecuencias válidas, realizaremos una regresión lineal para su obtención. Estos valores son los mostrados en las tablas IV y V.

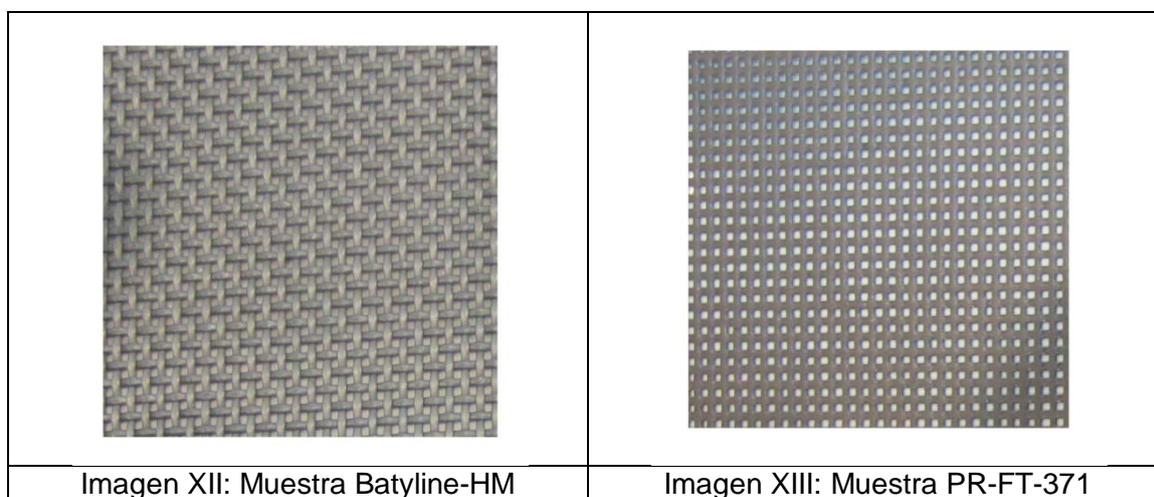
Muestra	Resistencia al flujo σ (KPa/m ²)
Formule-S-Nacarado	3068
8106-S	3704
Sky-300	1045
Soltis-92	98
Soltis-B92	2278
Soltis-99-BV	192
Soltis-Air	1249
Stam-Skin	1674
Stam-Skin-TOP	1488
Batylite-HM	21
Preconstraint	1867
PR-502-8104S	1752
PR-502-8103S	1822
PR-702-8104S	2300
PR-702-8103S	2200
Fluotop 702	3208
Fluotop 1002	3148
Fluotop 1202	3324
Fluotop 1302	3088
Fluotop 1502	3691
PR-FT-371	48

Tabla IV. Resistencia al flujo de las muestras del proveedor 1.

Muestra	Resistencia al flujo σ (kPas/m ²)
Green Cover	1127
PS Cover	1223
Sport-Cover	1405
Best-Cover	561
Big-Cover	1100
Strong-Cover	1224
Extra-Cover	2000
Extra-Cover-Rotopal	971
Extra-Cover-RotofluoW	791
Laqueado Rotofluo P	867
Opaque	1228
Tratamiento Coibentato	920

Tabla V. Resistencia al flujo de las muestras del proveedor 2.

Observamos gran disparidad en los resultados obtenidos para las muestras estudiadas, estando la gran mayoría de ellas por encima de 1000 kPas/m². Si nos fijamos en las muestras con los valores más pequeños, podemos comprobar que corresponden al grupo que seguía la tendencia de aumentar conforme aumentaba la frecuencia en el estudio del coeficiente de absorción. Un ejemplo de ello son las muestras Batyline-HM y PR-FT-371.



Si analizamos la muestra con mayores valores de pérdidas por transmisión, Green Cover, que obtiene valores de más de 5 dB, vemos que no destaca ni por su coeficiente de absorción, ni por su resistencia al flujo, pues en estas dos variables acústicas tiene valores similares a la mayoría de muestras.

Cuando la resistencia al flujo es baja, demuestra que el material es muy permeable, lo que permite pasar el sonido sin ningún problema. Si por el contrario, la resistencia al flujo es demasiado elevada, la muestra se comportará como una “pared” impermeable, no dejando pasar el aire en su interior. Cuando ocurre esto aumentará la absorción del material.

Como se ha visto en los resultados la mayoría de las resistencias al flujo de las muestras son similares, por lo que su comportamiento en cuanto a absorción y aislamiento variará según el tratamiento superficial de las mismas y de sus masas.

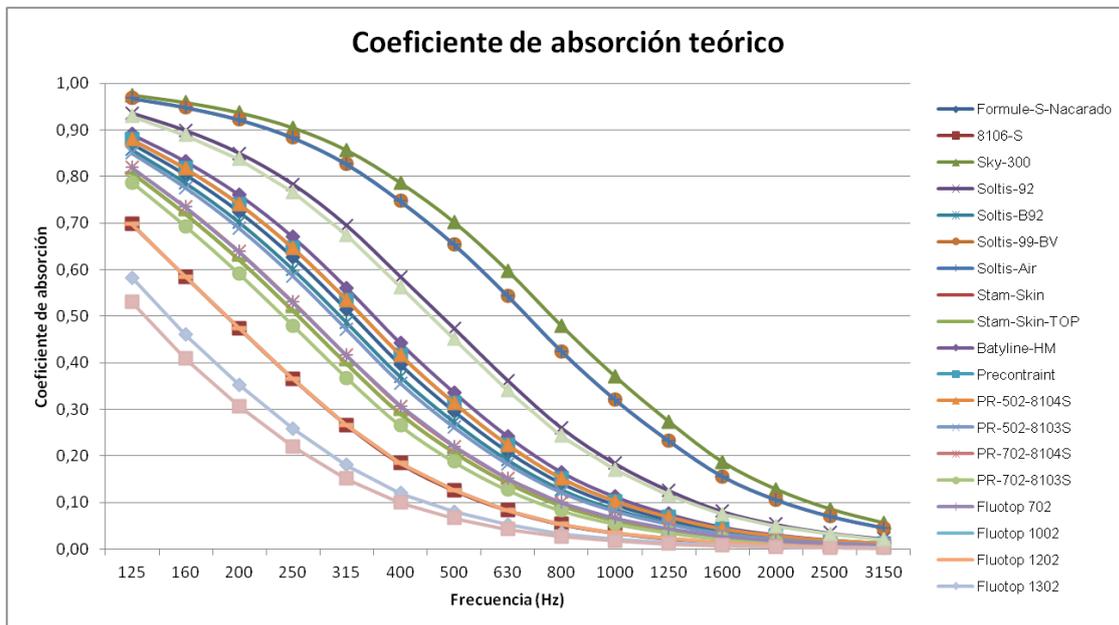
3.4. Modelado numérico de la absorción y la transmisión acústica de los materiales para carpas.

Una vez obtenidas todas las propiedades acústicas deseadas de las 33 muestras estudiadas, vamos a pasar a calcular dos de esas propiedades mediante fórmulas matemáticas.

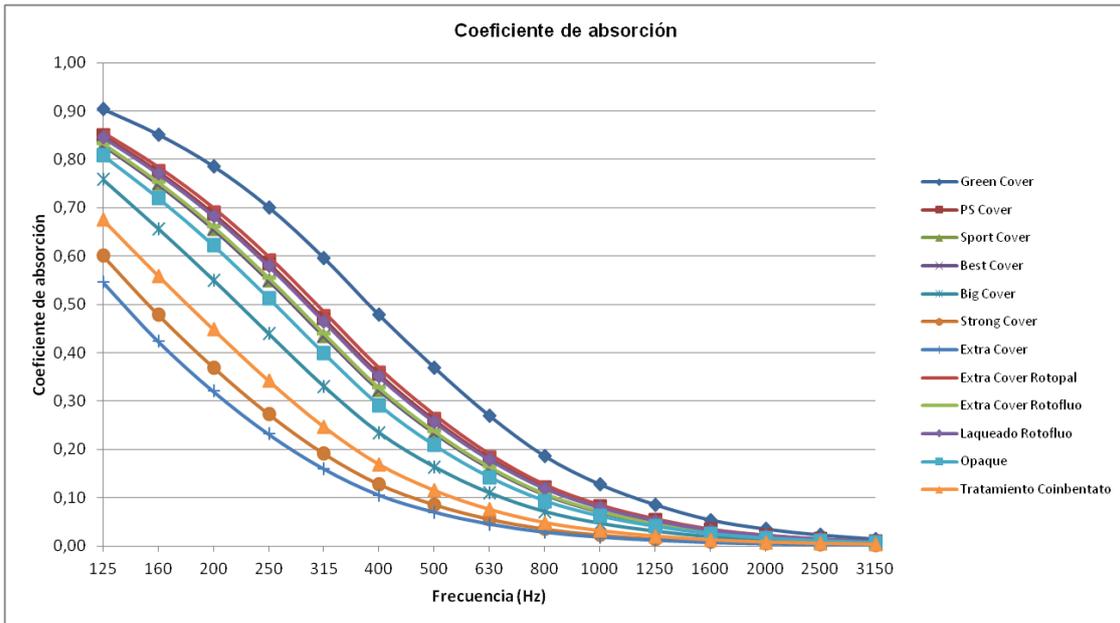
Estas fórmulas suelen ser aproximaciones muy burdas de lo que en realidad nos encontramos, ya que sólo tienen en cuenta propiedades técnicas del material, como espesor, densidad, etc, no tienen nunca en cuenta la forma de estos ni por supuesto su colocación o instalación.

Por ejemplo, en las muestras que vemos en las imágenes XI y XII, en las cuales se aprecian una serie de poros u orificios, nunca podremos incluir en unas fórmulas matemáticas este aspecto, así que dos materiales que posean la misma densidad tendrán el mismo comportamiento en un modelado numérico.

Comprobamos los resultados obtenidos del coeficiente de absorción.



Gráfica XII: Coeficiente de absorción de las muestras del proveedor 1, utilizando un modelado numérico.



Gráfica XIII: Coeficiente de absorción de las muestras del proveedor 2, utilizando un modelado numérico.

Como se puede observar en ambas gráficas las muestras siguen siempre la misma tendencia, ya que el valor más representativo para calcular su absorción es la densidad de estas. El coeficiente de absorción en todos los materiales posee un máximo de absorción a la frecuencia de 125 disminuye conforme aumenta la frecuencia, siendo prácticamente 0 en todas las muestras a partir de 2000Hz.

Con la representación de estos valores vemos que las muestras con menor densidad alcanzan valores más altos del coeficiente a bajas frecuencias, reduciéndose este poco a poco. Mientras que las muestras con los valores más altos de densidad volumétrica, alcanza valores más pequeños del coeficiente de absorción a bajas frecuencias, obteniendo un valor de cero mucho antes que las otras muestras. Esto es porque cuanto mayor es la densidad del material, más resistencia opone al paso del sonido.

La fórmula utilizada para la obtención del coeficiente de absorción depende de la frecuencia angular y por tanto de la frecuencia, de la densidad o masa superficial del material y de la impedancia del aire.

$$\alpha = \frac{1}{1 + 0.125 \cdot \left(\frac{\omega M}{Z}\right)^2}$$

Donde:

ω es la frecuencia angular;

M es la masa superficial, kg/m²;

Z es la impedancia característica del aire.

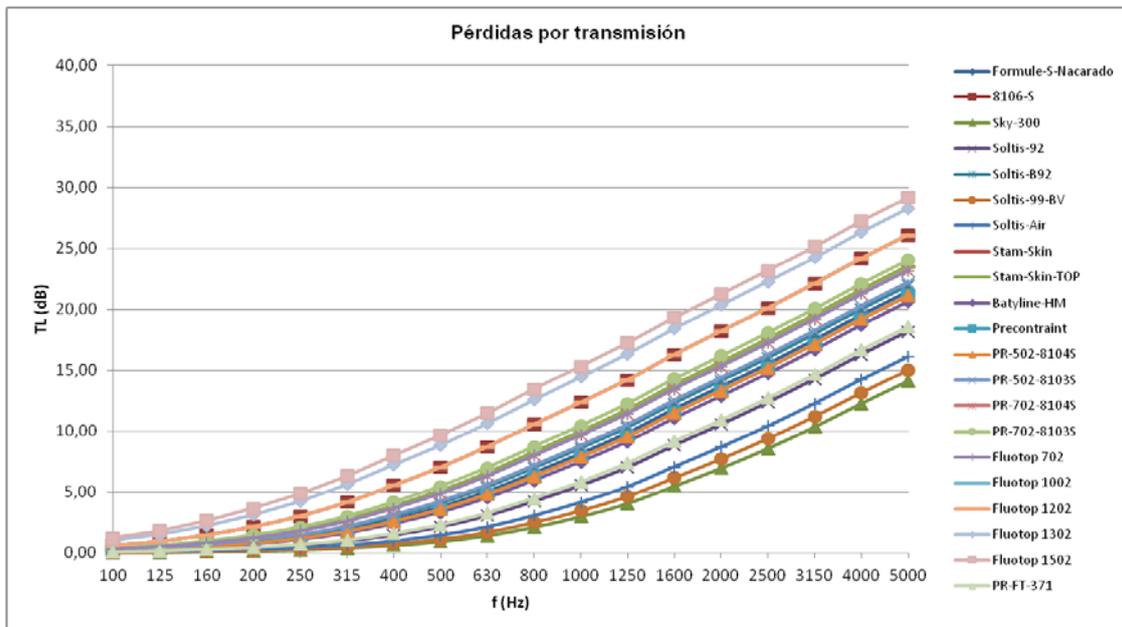
De la fórmula 16 ya se puede deducir, que conforme mayor sean la masa superficial del material, M, o la frecuencia angular, w, menores valores del coeficiente de absorción tendremos, al encontrarse ambos términos en el denominador.

Esta fórmula es una aproximación del coeficiente de absorción de una superficie vibrante, la cual sólo es válida si el numerador es mucho más pequeño que el denominador.

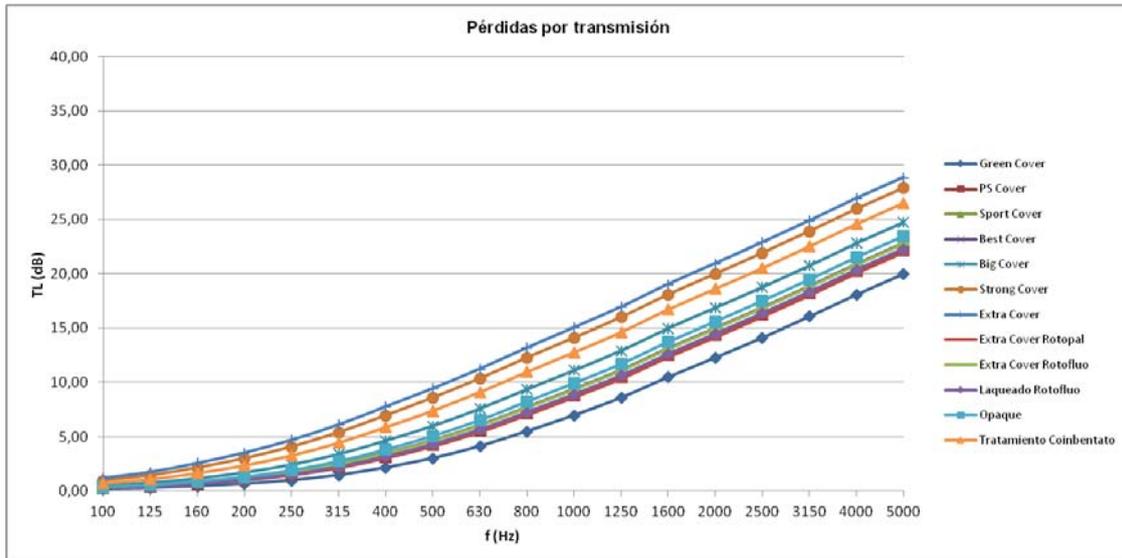
En los cálculos teóricos de las pérdidas por transmisión nos encontramos con la misma problemática, pues los resultados variantes de las muestras dependerán de la masa superficial de estas.

En este caso encontramos dos fórmulas (13 y 14) con las que poder calcular las pérdidas, ya que dependerá de si el campo es difuso o no. Estas fórmulas derivan de una mejora de la Ley de Masas.

Siguiendo la fórmula 13 para una placa delgada e impermeable que separa dos espacios, obtenemos los siguientes resultados. Con esta fórmula solo se tiene en cuenta la masa, pero no el efecto rugoso de su superficie, la posible heterogeneidad de distribución del material, etc. por lo que se esperan resultados dispares a los medidos, puesto que aquí se tienen en cuenta todas estas características del material.



Gráfica XIV: Pérdidas por transmisión calculadas teóricamente para las muestras del proveedor 1.



Gráfica XV: Pérdidas por transmisión calculadas teóricamente para las muestras del proveedor 2.

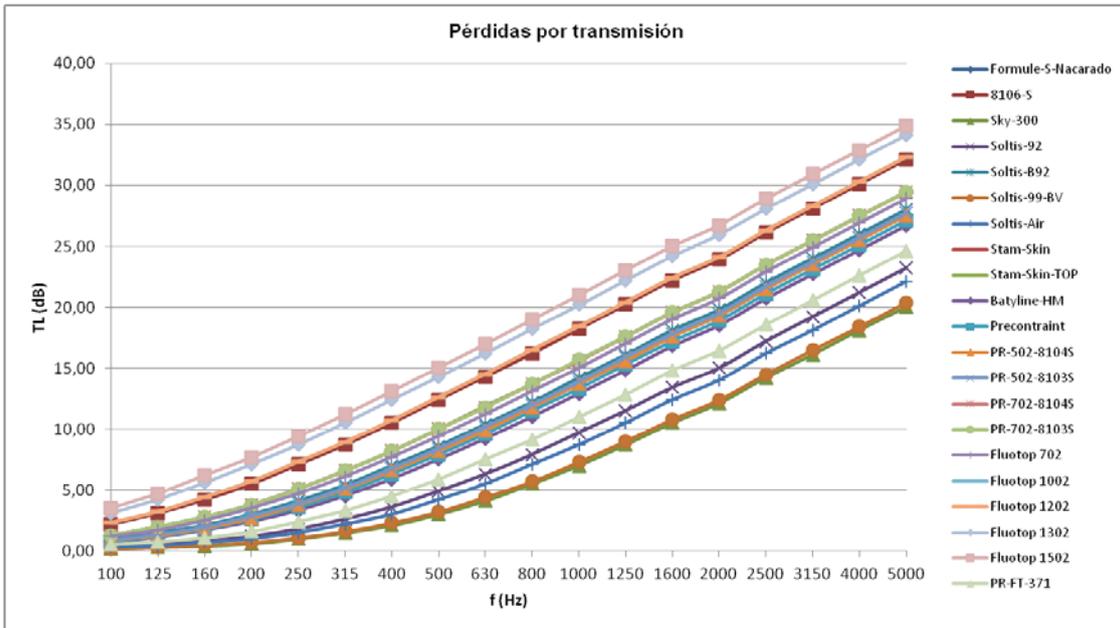
La tendencia seguida por todas las muestras es la misma, obteniendo valores más altos conforme aumenta la frecuencia. También se puede observar, que a mayor densidad de la muestra, mayores son los valores de las pérdidas por transmisión a altas frecuencias.

A frecuencias bajas, hasta 200 Hz, encontramos valores insignificantes de aislamiento en comparación a los valores que se llegan a alcanzar a altas frecuencias, consiguiendo valores de 20 a 30 dB.

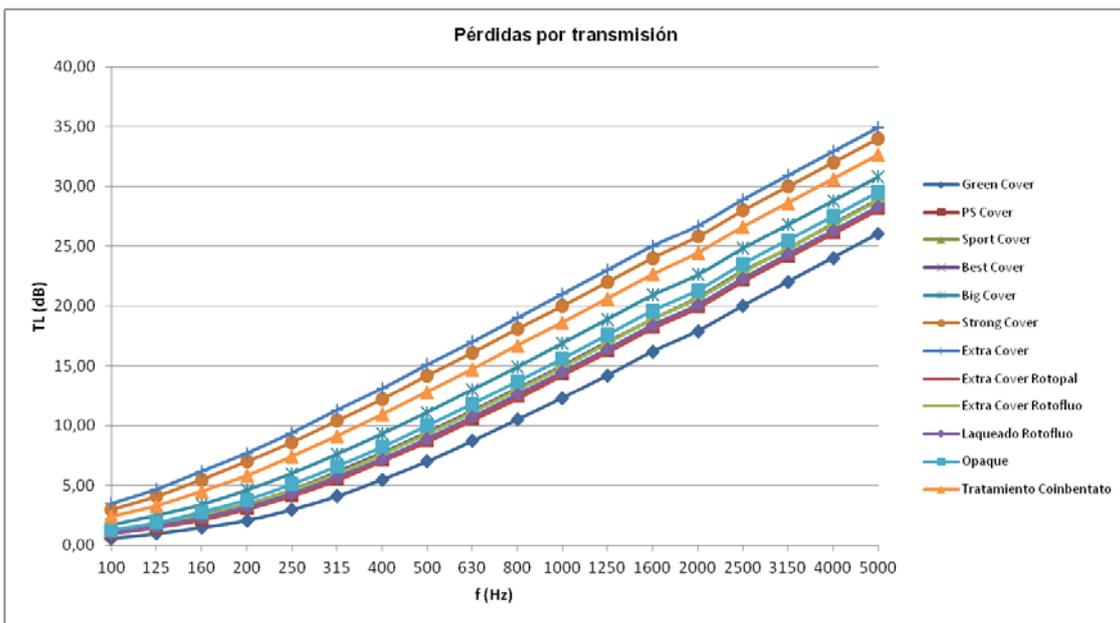
En la obtención de esta variable se ha considerado aparte de la densidad o masa superficial, otras características de las muestras de relevada importancia: la rigidez a la flexión de las muestras y el factor de pérdidas total.

Los proveedores han entregado las muestras con una serie de propiedades técnicas de las mismas, en las que no se incluía la rigidez por flexión, ni el módulo de Young o de Poisson, por lo que no se ha podido calcular el valor exacto para cada una de ellas. Puesto que la rigidez por flexión es más alta cuanto más duro y rígido es el material, y en este caso, las muestras seleccionadas no se mantendrían en pie, rondará valores nulos. Así pues, para el cálculo de las pérdidas por transmisión utilizaremos un valor muy próximo a cero.

Por otro lado, el factor de pérdidas total es un valor difícil de obtener, ya que depende del montaje que se vaya a utilizar. En este caso, se ha utilizado un factor de 0.02.



Gráfica XVI: Pérdidas por transmisión calculadas teóricamente para las muestras del proveedor 1.



Gráfica XVII: Pérdidas por transmisión calculadas teóricamente para las muestras del proveedor 2.

Estos valores no tienen en cuenta las grandes pérdidas que se pueden producir en las mediciones realizadas con el tubo de impedancia, debido a las posibles aberturas que pueden producirse al juntar la muestra con éste. En el tubo se encuentran muchas dificultades para sellar perfectamente la muestra, por lo que se pueden producir muchas fugas.

Hay que tener en cuenta, que tanto el modelo numérico, como el utilizado en las mediciones son estimaciones para comparar las muestras y ordenarlas de mejor a peor o de valores máximos a mínimos. Para dar datos válidos para empezar a comercializar por ejemplo un material, las muestras deberán ser medidas en cámara

reverberante, para el coeficiente de absorción, o en cámara de transmisión, para las pérdidas por transmisión.

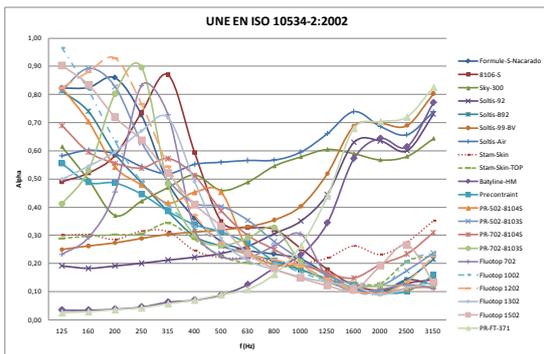
Las gráficas XVI y XVII se han obtenido considerando un campo difuso en el cual el ángulo de incidencia va desde 1 grado, incidencia normal, a 90° considerados como ángulo límite. Para ello se ha aplicado la fórmula 14, vista en el apartado 2.3. Modelos de muros y cortinas.

En este caso se aprecia la misma tendencia que en el anterior, obteniendo valores mayores de las pérdidas por transmisión en todo el margen de frecuencias, especialmente a altas.

3.5. Comparativa entre ensayos y modelos

Dispuestos todos los resultados, tanto los obtenidos experimentalmente como teóricos, pasamos a hacer una comparativa entre ambos, con el fin de mejorar tanto las mediciones como los cálculos realizados.

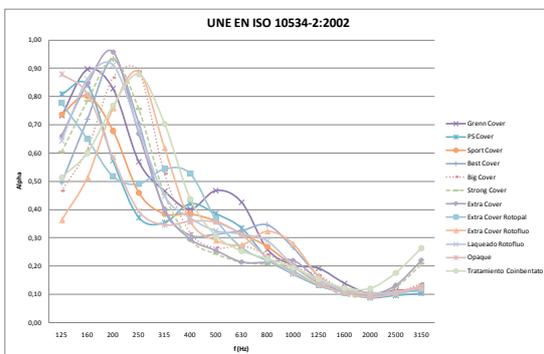
En primer lugar, se van a comparar los resultados obtenidos para el coeficiente de absorción.



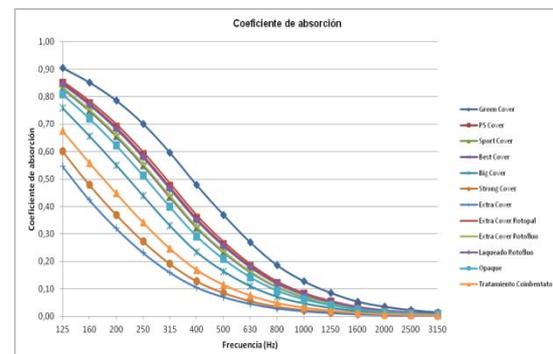
Gráfica XVIII: Coeficiente de absorción medido. Muestras del proveedor 1.



Gráfica XIX: Coeficiente de absorción calculado. Muestras del proveedor 1.



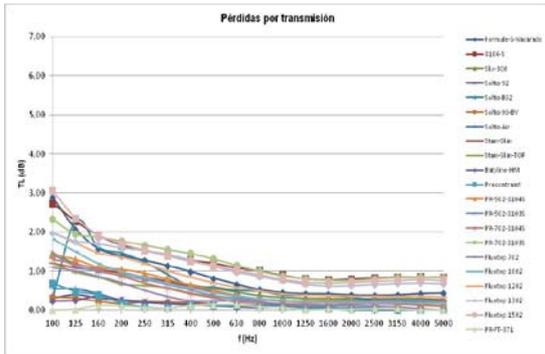
Gráfica XX: Coeficiente de absorción medido. Muestras del proveedor 2.



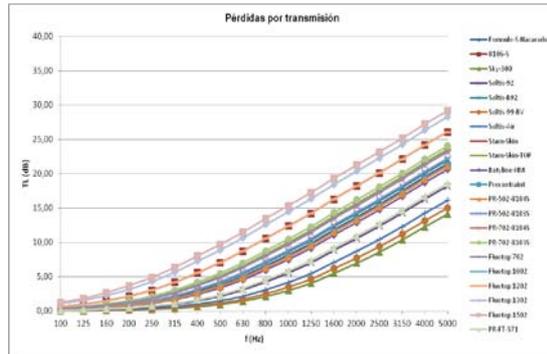
Gráfica XXI: Coeficiente de absorción calculado. Muestras del proveedor 2.

Como se había visto anteriormente, todas las muestras medidas presentaban la misma tendencia, máximo de absorción a bajas frecuencias y disminución del mismo con esta, excepto un grupo de muestras que presentaban comportamiento de material absorbente poroso, encontrándose su máximo de absorción a frecuencias altas.

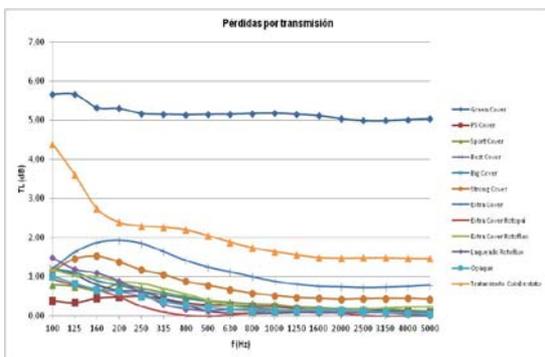
En los valores calculados teóricamente, puesto que son para una superficie vibrante, todos poseen el máximo de absorción a bajas frecuencias, mostrando además el mismo comportamiento para todas las muestras. Los valores del coeficiente de absorción para los distintos materiales variarán, en este caso teórico, según la densidad que éstos tengan. A menor densidad encontraremos valores más altos del coeficiente de absorción.



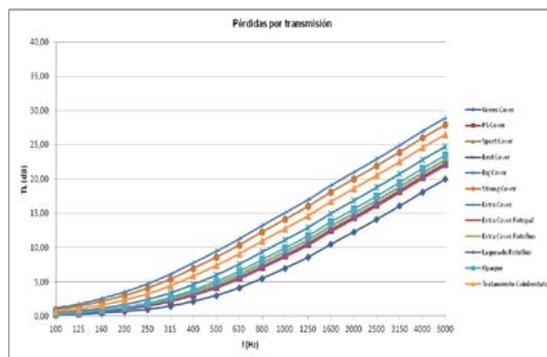
Gráfica XXII: TL medido. Muestras del proveedor 1.



Gráfica XXIII: TL calculado teóricamente. Muestras del proveedor 1.



Gráfica XXIV: TL medido. Muestras del proveedor 2.



Gráfica XXV: TL calculado teóricamente. Muestras del proveedor 2.

En las gráficas desde la XXII a la XXV, podemos ver los valores de las pérdidas por transmisiones calculadas y medidas. En éstas, observamos grandes diferencias empezando por la tendencia diferente que poseen los materiales según su obtención.

En el caso de los valores calculados teóricamente las muestras tienen un comportamiento a aumentar el valor de TL con la frecuencia. En cambio, en los valores obtenidos en el método experimental se aprecian dos tendencias, máximos a bajas frecuencias y disminución del valor con esta, y comportamiento bastante lineal en el margen de frecuencias estudiado. Ninguna de estas tendencias es coincidente con la que se obtiene en los valores calculados.

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

4.1. Conclusiones

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de diversas propiedades acústicas, coeficiente de absorción, pérdidas por transmisión y resistencia al flujo, medidas en tubos de impedancia, es decir, en incidencia normal, de 33 muestras diferentes aportadas por dos proveedores distintos para la elaboración de carpas como elementos separadores entre distintos ambientes o como solución al cumplimiento de la legislación vigente en exteriores.

Los tubos de impedancia utilizados en las mediciones han sido diseñados por personal de investigación de la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

En cuanto a la validez de las mediciones, para las medidas de pérdidas por transmisión, de momento, sólo podemos analizarlo con comparaciones entre las muestras estudiadas, ya que se debe disponer de una serie de elementos con un TL conocido para mejorar la precisión de las medidas, sobre todo a bajas y altas frecuencias.

Con respecto al coeficiente de absorción de los materiales, han mostrado dos tendencias claras. Por una parte la tendencia a aumentar el valor del coeficiente de absorción con la frecuencia (Gráfica IV).

Estas muestras se caracterizan por poseer una serie de poros, como se ha podido observar en las imágenes IV y V, por lo que podemos considerar que se comportan como un material absorbente poroso. Además dos de las muestras que siguen esta tendencia, Soltis-Air y Sky-300, también poseen valores del coeficiente de absorción a bajas frecuencias, por lo que a priori, sólo con este dato podrían ser una elección buena para aplicaciones de acondicionamiento y aislamiento acústico, teniendo menos de 0,50 mm de espesor.

Por otra parte, encontramos que el resto de materiales estudiados sigue una tendencia diferente en cuanto al coeficiente de absorción, encontrando un máximo de este a baja frecuencia, y disminuyendo conforme aumenta ésta. Este comportamiento es conocido como efecto capa. Ese máximo de absorción que aparece corresponde a un mínimo en reflexión, por lo que se puede considerar un efecto de transmisión total asociado al material o capa. Esto provocaría que la transmisión fuera total para esa frecuencia donde encontramos el máximo, es decir, que toda la energía fuera transmitida al exterior de la carpa. El efecto disminuye conforme aumenta la frecuencia. La mayoría de estos materiales presentan su máximo en torno a los 200 Hz.

Con los datos obtenidos con el coeficiente de absorción ya se puede apreciar el comportamiento que puede tener el material en cuanto a las pérdidas por transmisión, pues para un valor alto del coeficiente de absorción nos indica que la onda no se refleja, se está transmitiendo. Como se ha visto, resulta importante la medición de pérdidas por transmisión. Una muestra que tenga valores altos de coeficiente de absorción y de pérdidas por transmisión será buena para su utilización en carpas.

Si analizamos ahora los valores de pérdidas por transmisión obtenidos, observamos una tendencia clara en la mayoría de las muestras, las cuales obtienen

valores mayores de pérdidas por transmisión a bajas frecuencias que a altas, donde la mayoría tienen valores nulos.

Destacan los comportamientos de dos grupos de muestras. El primer grupo pertenecerían a las muestras que se comportaban como un material absorbente poroso, las cuales poseen valores nulos de pérdidas por transmisión en todo el margen de frecuencias (Gráfica VII). Existe una excepción, Sky-300, la cual presentaba un comportamiento más lineal en el coeficiente de absorción, obteniendo en este caso valores algo más altos que el resto de este grupo, sobre todo a bajas frecuencias.

En el segundo grupo destacado, lo hacen por su tendencia a valores más elevados que el resto, sin diferenciarse en el comportamiento que presentaban en su coeficiente de absorción. La muestra más destacada de este grupo es Green Cover, la cual posee valores de pérdidas por transmisión mayores a 5 dB para todo el espectro frecuencial estudiado.

Con los resultados obtenidos de la resistencia al flujo de los materiales, vemos que concuerdan en comparación a los resultados del coeficiente de absorción, pues los materiales porosos son los que presentan valores más pequeños de la resistencia al flujo. Las demás muestras poseen valores próximos o superiores a 1000 kPas/m². Según esta propiedad del material, todos serían aptos para su utilización en construcción, ya que el DB-HR marca que los materiales válidos deben tener una resistencia al flujo mayor a 5 kPas/m².

En las comparaciones de los datos medidos con los datos teóricos, no se obtienen confirmaciones de los comportamientos de los materiales, pues son muy dispares los resultados de ambos. Esto puede ser debido a que los modelos matemáticos son una aproximación muy burda de la realidad, pues con los datos de los cuales disponíamos, vemos que sólo cambia de una muestra a otra su densidad y espesor. Y no se debe olvidar que los datos expuestos en las gráficas son para incidencia normal y simulando las situaciones reales de montaje.

En líneas generales, y cumpliendo el objetivo que nos habíamos puesto al principio de este estudio, comparando las diferentes muestras podemos observar cuales de ellas poseen mejores características para el uso de construcción de carpas acústicas.

Puesto que las muestras ofrecen valores más altos para una característica acústica que para otra, habrá que ver la necesidad que se tiene en cada caso a la hora de la elección de las mismas. Como en la actualidad se construyen diferentes tipos de carpas, completamente cerradas donde se organizan diferentes eventos, o las carpas típicas de los bares y restaurantes, las cuales suelen tener un lateral abierto, podremos elegir un material con mejor coeficiente de absorción, para las abiertas, y uno con alto aislamiento para las cerradas.

4.2. Futuras líneas

Después de la realización del trabajo y de haber tomado unas conclusiones, nos centramos en las posibles mejoras a tener en cuenta a la hora de la realización de las medidas, y posibles medidas extras mediante otros métodos o normativas para corroborar los datos ensayados y hacerlos más exactos.

Puesto que el procedimiento para la obtención de los valores del coeficiente de absorción en incidencia normal está estandarizado y han sido muchos los estudios

realizados en la EPSG para comprobar el funcionamiento del tubo de impedancia utilizado para ello, se deberán hacer más análisis en cuanto al tubo utilizado para las medidas de pérdidas por transmisión, ya que existen ciertas no concordancias en los comportamientos de las muestras entre los resultados de ambas mediciones. Esto puede ser debido a la terminación anecoica del tubo de ensayo, o las transmisiones indirectas que podamos encontrar, así como en el sellado al introducir la muestra.

Para comprobar los resultados obtenidos en el tubo de impedancia en las medidas de transmisión, se deberían realizar posteriormente medidas en una cámara de transmisión, o medir materiales que ya hayan sido medidos en estas, pudiendo comparar así los datos. Siempre encontraremos diferencias entre estos, ya que unas mediciones son en incidencia normal, y en la cámara de transmisión estamos hablando de campo difuso. A parte de esto, el coeficiente de absorción también debe ser medido en cámara reverberante, para obtener su medición en campo difuso.

Si nos centramos en la elaboración de carpas, se podrían hacer mediciones de carpas enteras en cámara reverberante cuando utilicemos materiales absorbentes de los estudiados, realizando diferentes configuraciones en ellas. Añadiendo además otros materiales como puede ser césped absorbente que ayude a mejorar el acondicionamiento de las mismas, o probar con soluciones compuestas en el techo.

En cuanto a los materiales estudiados, se podría ampliar la línea de investigación, a partir de los datos obtenidos en este trabajo, centrándonos en las muestras que mejores resultados presentaban, incluso crear soluciones compuestas con materiales que presentaban buenas respuestas en todas las características acústicas, intentando completar así el comportamiento de la carpa y obtener una carpa que asegure tanto un buen acondicionamiento como el aislamiento mayor posible. Un ejemplo de ello, pueden ser la medición de dobles carpas o similares, que simulen el comportamiento de paredes dobles, así se podrá aumentar el aislamiento y la absorción del conjunto.

5. AGRADECIMIENTOS

Después de mucho trabajo y de un gran esfuerzo para realizar este estudio al mismo tiempo que desempeñando mi trabajo diario, me gustaría agradecer a todas las personas que han hecho más fácil la elaboración del mismo.

Primeramente agradecer a mis directores del trabajo final de Máster, Jesús Alba Fernández y Romina Del Rey Tormos, la gran comprensión que han tenido conmigo y toda la ayuda blindada incluso en sus vacaciones. Agradecer también a Laura Bertó, con la cual he compartido muchas horas de laboratorio, todo lo que me ha enseñado y la paciencia que ha demostrado tener conmigo.

En cuanto a personas ajenas a este proyecto, he de agradecer a mis compañeros del trabajo, todos sus ánimos y su disponibilidad a ayudarme en cualquier cosa que necesitara. En este punto me gustaría agradecer especialmente a Paco Arrebola, con el cual comencé mi etapa laboral, el haber compartido tantos buenos momentos y su insistencia en que acabara mi tesina.

Y por supuesto, a mi familia y amigos, a quienes aburro contando lo que hago, explicándoles cada problema que me surge, y aunque no se enteran mucho de lo que digo, me escuchan sin quejarse.

6. REFERENCIAS

- [1] Bryan H. Song, Stuart Bolton. A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 107(3), 2000, 1131-1152.
- [2] Directiva 2002/49/CEE, de 25 de Junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.
- [3] Giulio Pispola, Kirill V. Horoshenkov, Francesco Asdrubali. Transmission loss measurement of consolidated granular media. *J. Acoust. Soc. Am.* 117(5), 2005, 2716-2719.
- [4] Ingard K. U., Dear T. A. (1985). Measurement of acoustic flow resistance, *J. Sound and Vibration*. 103(1985), pág. 567-572.
- [5] Jesús Alba Fernández, Romina Del Rey Tormos, Jaime Ramis Soriano y Eva Escuder Silla. Influencia del ángulo límite en la predicción del índice de reducción sonora. *Revista de Acústica*. Vol. 39. N^{os} 3 y 4, pág. 21-27.
- [6] Ley 7/2002, de 3 de diciembre, de la Generalitat Valenciana.
- [7] Ley 42/2010, por la que se modifica la Ley 28/2005 de medidas sanitarias frente al tabaquismo y reguladora de la venta, el suministro, el consumo y la publicidad de los productos del tabaco.
- [8] Naoki kino, Takayasu Ueno. Investigation of simple size effects in impedance tube measurements. *Applied Acoustics* 68 (2007) 1485-1493.
- [9] Olivero Oliveri, J. Stuart Bolton. Measurement of transmisión loss of materials using a standing wave tube. *Inter-Noise 2006*. Honolulu, Hawai, 3-6 Diciembre 2006.
- [10] Ordenanza municipal de protección contra la contaminación acústica de Valencia.
- [11] RD 1513/2005, desarrollo Ley 37/2003, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.
- [12] RD 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.
- [13] Romina Del Rey Tormos, Jesús Alba Fernández, Sara Martínez Navarro y Vicente Sanchís Rico. *Materiales para la elaboración de carpas acústicas*. Tecniacústica 2011.
- [14] Sung Soo Jung, Yong Tae Kim and Yong Bong Lee. Measurement of Sound Transmission Loss by using Impedance Tubes. *Journal of Korean Physical Society*, 53 (2), 2008, 596-600.
- [15] UNE EN ISO 10534-2:2002. Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.
- [16] Yacoubou Salissoua and Raymond Panneton. Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers. *J. Acoust. Soc. Am.* 128_5_November 2010.
- [17] Y. Chen and N. Jiang. Carbonized and Activated Non-woven as High Performance Acoustic Materials: Part II: Noise insulation. *Textile research Journal*, 79(3), 2009, 213-218.