

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“COMPOSITES CON RECICLADOS PARA
LA MEJORA DEL AISLAMIENTO
ACÚSTICO”

TESIS DE MASTER

Autor:

Miguel Iglesias Ortiz-Quintana

Director/es:

D. Jesús Alba Fernández

Romina M^a Del Rey Tormos

GANDIA, 2010

RESUMEN

Los materiales tipo composite, son una fuente de grandes avances en nuestros días, a su vez pueden llegar a ser una gran herramienta para mejorar el medio ambiente, debido a que gracias a ellos se pueden buscar maneras de reciclar desechos derivados de las cadenas de producción de diferentes tipos de industrias como pueden ser la industria plástica, textil o maderera, consiguiendo nuevos materiales con mejores comportamientos y características acústicas, a la vez que se disminuye el coste económico de las materias primas debido a la procedencia de las mismas. El ahorro aún es mayor si se consigue la transformación de un residuo industrial en un material útil para la sociedad y a su vez se elimina el gasto energético y económico que conlleva la destrucción de dichos residuos y los perjuicios que ello conlleva sobre el medio ambiente.

Toda la investigación se desarrolla para estudiar el comportamiento acústico de tres familias de materiales desde diferentes puntos de vista; como elementos aislantes acústicos de una sola capa, como elementos aislantes acústicos de doble sola capa y como combinación de absorbente acústico (panel perforado) - aislante acústico.

ABSTRACT

Composite materials are a source of great advances in our days, in turn they can become a great tool for improving the environment, cause with them we can find ways to recycle wastes from the production lines of different industries types such as plastic, textile and wood, obtaining new materials with improved acoustical behaviour, while decreasing the economic costs of materials due to the origin of them. The savings are even greater if you get the transformation of industrial waste into useful materials for society and in turn eliminate the economic and energy expenditure leading who involve the destruction of such wastes and the damage implied to the environment.

All research is developed to study the acoustical behavior of three materials families from different points of view; as elements of a single acoustic insulating layer, as insulating of a double layer acoustic element and as a combination of acoustic absorber (pegboard) - acoustic insulation.

Palabras clave: Aislamiento acústico, absorbente acústico, aislante acústico, fibra de vidrio, fibra de poliéster, polipropileno, composite, reciclado.

Keywords: Sound insulation, sound absorption, sound insulation, glass fiber, polyester fiber, polypropylene, composite, recycled.

AGRADECIMIENTOS

En esta memoria de Tesina final de master quiero agradecer el esfuerzo, comprensión y apoyo que he tenido por parte de todos los compañeros implicados durante las diferentes fases del proceso de investigación.

Quiero agradecer en primer lugar a Jesús Alba, mi director de Tesis, el haberme introducido en el campo de los materiales reciclados para su uso en el mundo de la Acústica, el haberme transmitidos tantos conocimientos teóricos en dicha materia y el haberme guiado en los momentos en los que no veía el final del camino.

A Romina M^a Del Rey Tormos, por su labor realizando las mediciones en laboratorio con rigurosa transparencia y buenas prácticas.

Al grupo de investigación de Girona por la fabricación de las diferentes muestras sin las cuales no habría sido posible este trabajo.

Al Departamento de Física Aplicada, por estar siempre dispuestos a resolver tanto dudas docentes como guiarte en el mundo laboral.

A mis compañeros de la Escuela Politécnica Superior de Gandia, darles las gracias por haber creado esa gran familia que somos.

Y por último y no menos importante a mi familia por todo el apoyo y confianza prestado durante este tiempo.

ÍNDICE

I.- OBJETO Y ANTECEDENTES.....	1
I.1.- INTRODUCCIÓN.....	1
I.2.- OBJETIVOS.....	3
I.3.- ESTRUCTURA DE LA TESINA.....	4
II.- INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	5
II.1.- TÉCNICAS.....	5
II.2.- MODELO DE SIMULACIÓN.....	17
II.2.1.- MODELO DE OKURA & SAITO PARA ATENUACIÓN EN PAREDES MÚLTIPLES, COINCIDENCIA ALEATORIA.....	17
III.- DESARROLLO.....	22
III.1.- FÍSICA ACÚSTICA: ABSORCIÓN, IMPEDANCIA Y RESISTENCIA [1][2]....	22
III.2.- FÍSICA MECÁNICA: MODULO DE YOUNG, POISSON.....	26
III.3.- AISLAMIENTO ACÚSTICO.....	27
III.4.- REGRESIÓN.....	37
IV.- CONCLUSIONES.....	38
V.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	40
REFERENCIAS.....	41
ANEXO I.....	43

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	5

I.- OBJETO Y ANTECEDENTES

I.1.- INTRODUCCIÓN

El aislamiento acústico es uno de los grandes problemas que en la actualidad se plantean en la edificación. Las fuentes de ruido son cada vez más numerosas y generan niveles mayores de ruido tanto en el interior como en el exterior de las edificaciones. El número de estas fuentes de ruido en el interior de los edificios se ha incrementado debido a la aparición de nuevas tecnologías como pueden ser: los electrodomésticos tipo lavavajillas, lavadoras, sistemas de extracción de humos. Algunos de los cuales directamente disponen de salidas al exterior de las viviendas, lo cual contribuye a aumentar la contaminación acústica hacia los ambientes exteriores de las edificaciones. A la par, cada vez son más utilizados los equipos de reproducción sonora tipo mini cadenas musicales y televisores, los cuales han aumentado en tamaño, calidad y en consecuencia en potencia acústica emitida, además no debemos olvidar los sistemas de aire acondicionado tan comúnmente utilizados en nuestros días, los cuales disponen de maquinaria ruidosa ubicada en el exterior de las edificaciones, etc.

Al mismo tiempo que han ido evolucionando e incrementándose las fuentes de ruido en el interior y exterior de las edificaciones, se han aumentado las exigencias de confort del ciudadano, mediante el desarrollo legislativo que se ha llevado a cabo en los últimos años, con la publicación del Reglamento de la Ley del Ruido y el Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación. Esta normativa trata de reducir el nivel máximo de inmisión en las edificaciones, para de esta manera, reducir el efecto del ruido en la salud de las personas. Dichas normativas han evolucionado y han incorporado elementos o herramientas que permiten distinguir entre diferentes tipos de recintos, para dotar de un mayor nivel de protección a aquellos utilizados como estancias de descanso o de trabajo, por dicho motivo se deben diseñar diferentes tipos de soluciones que permitan optimizar el confort según su uso.

El objetivo general de este trabajo, que se presenta para su evaluación como tesina final de master, es el estudio de la mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo de nuevos materiales tipo Composite, mediante la incorporación de tres tipos de fibras textiles; fibra de vidrio, fibra de poliéster y polipropileno, sobre un elemento base compuesto por plástico, consiguiendo un refuerzo del material y una mejora en su elasticidad.

A su vez, se realizaron estudios para determinar la mejora que se conseguía utilizando un elemento compatibilizante que optimizara la unión y la respuesta mecánica entre el elemento base y las fibras.

Dada la sensibilización de la sociedad actual, se encamina el trabajo en el estudio de la reutilización de materiales residuales, derivados de los diferentes procesos de producción industrial, de manera que los residuos se reciclen para la obtención de otros materiales que puedan retornar a los mercados, favoreciendo con ello la reutilización de estos residuos y la eliminación del gasto energético y contaminación medioambiental que conllevaría el proceso de eliminación de los mismos.

El proceso que tratará este trabajo es el derivado de la producción de plásticos y similares, el cual trata de reciclar una serie de desechos procedentes de la elaboración de fibras textiles, para la elaboración de un material tipo Placa de Yeso Laminado, el cual consiga mejorar las prestaciones aislantes acústicas de los materiales que se encuentran actualmente en el mercado. Sin olvidar la importancia que tiene el mantener una solución tipo autoportante por la optimización de las superficies útiles a la hora de llevar a cabo una construcción o reforma y el ahorro económico que este hecho conlleva.

1.2.- OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es comprobar la mejora obtenida mediante un material tipo capa impermeabilizante para la utilización como aislante acústico para la edificación, ya sea residencial, industrial o de cualquier otro tipo, de manera que, a un elemento de base plástica se le inserten en su interior una serie de fibras textiles, que doten al material base de una mayor elasticidad y con ello se obtenga, previsiblemente, una mejora de su comportamiento como aislante acústico.

El trabajo se divide en varios objetivos:

Primero, la caracterización de las tres familias de materiales. Ello conlleva la obtención de los parámetros más relevantes tanto acústicos como mecánico-elásticos.

Segundo, la determinación del uso más apropiado de estos materiales. Determinar si su comportamiento es absorbente acústico o impermeabilizante (aislante acústico).

Tercero, determinar el espesor óptimo para su utilización y la capacidad aislante acústica que tendrá el material en función de diferentes configuraciones comúnmente utilizadas por los sistemas autoportantes existentes en el mercado.

Cuarto, comparar los resultados obtenidos frente al elemento más estandarizado del mercado: el sistema autoportante formado a base de Placa de Yeso Laminado.

Quinto, búsqueda de otros posibles usos, bien sea en edificación como en otros campos o usos.

I.3.- ESTRUCTURA DE LA TESIS

Para conseguir los anteriores objetivos, se ha optado por estructurar este trabajo en los siguientes apartados:

En el **capítulo I** se relatan los objetivos y antecedentes de este trabajo.

En el **capítulo II** se exponen los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión de las aportaciones realizadas en la memoria. En la **sección II.1**, se presenta brevemente la técnica de medición utilizada para la determinación de los parámetros tanto acústicos como mecánico-elásticos de las tres familias de materiales. En la **sección II.2**, se expone el modelo de simulación seguido para la determinación del índice de absorción acústica de los elementos estudiados.

En el **capítulo III** se desarrollan los trabajos realizados sobre las familias de materiales para la determinación de su utilización como elemento aislante acústico. En la **sección III.1**, se realiza un estudio desde el punto de vista de los parámetros acústicos obtenidos y se determina la utilización más óptima de los mismos. En la **sección III.2**, se realiza el estudio desde el punto de vista de los parámetros mecánico-elásticos. En la **sección III.3**, se definen los parámetros y los modelos numéricos utilizados para la determinación del aislamiento acústico de los diferentes materiales, según el tipo de configuración utilizada y la comparativa respecto a las mismas configuraciones de sistema autoportante con el elemento Placa de Yeso Laminado. En la **sección III.4**, se presentan los datos obtenidos en forma gráfica, de manera que permitan obtener una regresión de la cual obtener una ecuación que determine el comportamiento acústico de las familias de materiales en función de los porcentajes de fibras incorporados en ellas.

En el **capítulo IV**, se resumen las conclusiones obtenidas en este trabajo.

En el **capítulo V**, se determinan posibles futuras líneas de investigación en el tema.

II.- INTRODUCCIÓN TEÓRICA

II.1.- TÉCNICAS

- Tubo de Kundt [1][2]

Este método de ensayo se aplica en la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal de absorbentes acústicos mediante un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal. Puede aplicarse también para la determinación de la impedancia acústica superficial o de la admitancia acústica superficial de los materiales. Puesto que los cocientes de impedancia de un material absorbente acústico se relacionan con sus propiedades físicas, tales como resistencia al flujo de aire, porosidad, elasticidad y densidad, las mediciones descritas en este método de ensayo son útiles en investigación básica y en el desarrollo de productos.

En este método de ensayo se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente de ruido, y la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones fijas usando micrófonos montados en la pared o mediante un micrófono interior móvil, seguido del cálculo de la función de transferencia acústica compleja, la absorción a incidencia normal y los cocientes de la impedancia del material.

El método del tubo de impedancia se limita a estudios paramétricos en incidencia normal pero necesita muestras de la muestra de estudio que tengan el mismo tamaño que la sección transversal del tubo de impedancia.

El tubo de impedancia debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Su estructura debe ser rígida, lisa y no porosa, para que el sonido no se escape por ninguna fisura o agujero.
- Las paredes deben ser pesadas y macizas, ya que no debe vibrar bajo ninguna circunstancia.
- Debe ser recto y tener una sección transversal recta y constante, asimismo tiene que ser lo suficientemente largo para que se generen ondas planas, ya que hasta una cierta distancia del altavoz no hay ondas planas.
- Tendrá el porta muestras en un extremo y el altavoz en el otro.
- Debe disponer de dos o más ventanas en su pared, en las que se colocan los micrófonos necesarios, si estos no son colocados, esas ventanas deben estar bien tapadas para que no haya fugas de sonido.

Los micrófonos deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Si se utilizan varios micrófonos para realizar las mediciones, estos deben ser del mismo tipo, exactamente iguales.
- Si los micrófonos son de pared, como lo es en nuestro caso, la normativa recomienda que sean de presión.
- Para que la medición sea adecuada, los micrófonos deben estar sellados con los orificios de montaje, y a su vez estar sellada la rejilla de éstos a su cápsula.
- El diafragma de los micros deberá coincidir justo con la superficie interior.

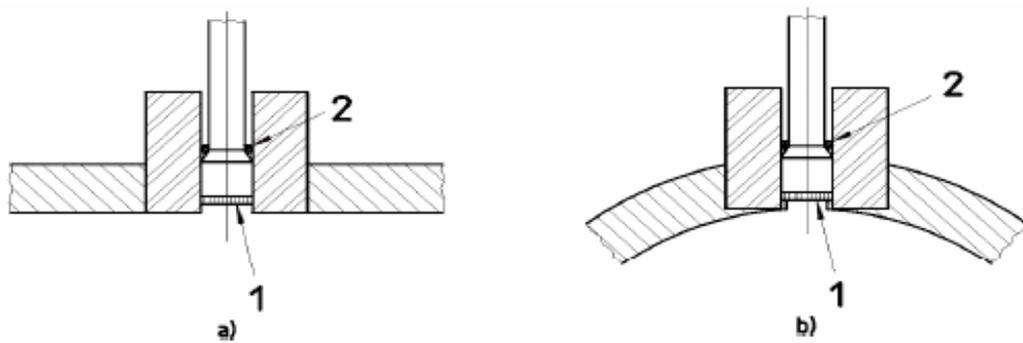


Fig. 1: Norma ISO 10534-2



Fig. 2: Montaje en laboratorio

El porta muestras debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Puede ser parte del tubo o ser un elemento separado, por lo que tiene que satisfacer características al igual que el tubo.

- Si es separado debe tener la forma y dimensiones adecuadas al tubo siendo la precisión de éste de $\pm 0,2\%$. Además tiene que estar unido herméticamente, sin inserción de juntas elásticas.
- La parte posterior deberá ser rígida y estar fijada fuertemente, para que no se produzca vibración ni haya transmisión del aire.
- Hay que tener en cuenta también su longitud, ya que se debe guardar una distancia entre los micros y la muestra, y a veces es necesario que hayan espacios de aire.
- Se recomienda, si es separado, que se pueda acceder a la muestra desde sus dos lados, para que las caras de la muestra se encuentren en la posición adecuada y muestren planitud.

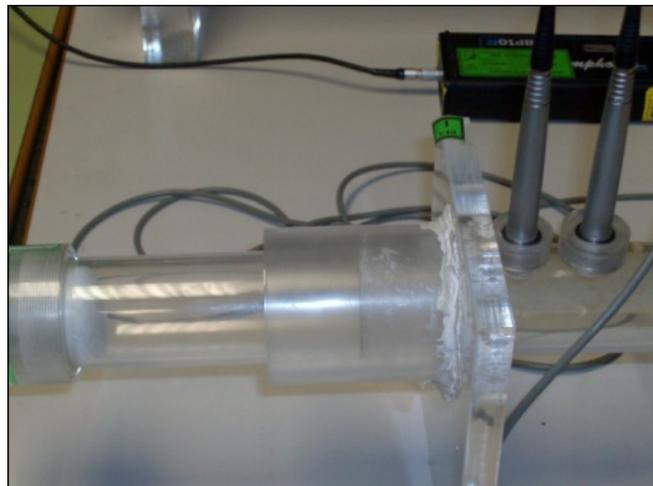


Fig. 3: porta muestras separado utilizado en laboratorio.

El altavoz debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Estará situado en uno de los extremos del tubo, aunque se encontrará en una caja aislada para evitar la vibración de éste y la transmisión del aire.
- La superficie de la membrana del altavoz debe cubrir al menos $2/3$ partes del área de la sección transversal del tubo, para que éste emita correctamente al tubo.

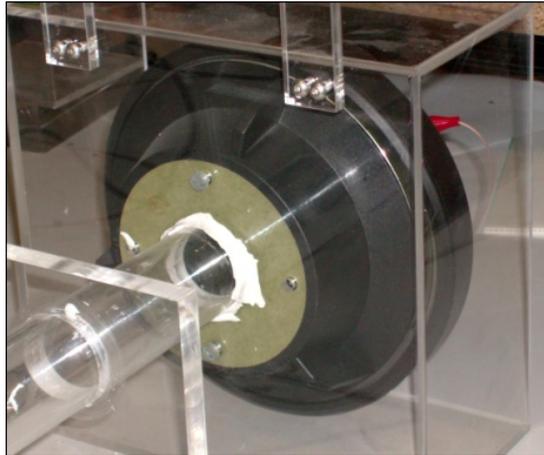


Fig. 4: Imagen altavoz y caja envolvente en laboratorio.

El generador y procesador de señales, deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Estos instrumentos son necesarios para poder producir la señal y obtener los resultados. Para la realización de este proyecto se ha utilizado el symphonie que realiza ambas funciones.
- El generador debe emitir una señal estacionaria con densidad espectral plana.
- El procesador debe medir presión acústica en dos posiciones de micro y tener la opción de calcular la función de transferencia.

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

Las magnitudes se determinan como funciones de la frecuencia, con una resolución en frecuencia condicionada por la frecuencia de muestreo y la longitud de la señal del sistema digital de análisis de frecuencia usado para las mediciones.

El rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia entre las dos posiciones microfónicas. Se puede obtener un rango de frecuencia extendido combinando las mediciones con diferentes anchos y espaciados.

Las mediciones pueden realizarse usando una de las dos técnicas:

- 1: método de los dos micrófonos (usando dos micrófonos en posiciones fijas);

2: método de un micrófono (usando un micrófono sucesivamente en dos posiciones).

Técnica 1: Necesita un procedimiento de corrección previo o simultáneo al ensayo para minimizar las diferencias en las características de amplitud y fase entre los dos micrófonos; no obstante combina rapidez, gran precisión y sencillez de implementación. Se recomienda esta técnica para fines generales.

Técnica 2: Requiere generación y procesamiento particulares y puede implicar más tiempo, no obstante elimina las diferencias de fase entre los micrófonos y permite un posicionado óptimo a cualquier frecuencia.

En este caso se han realizado las mediciones en laboratorio siguiendo la técnica 1. A continuación se detallan los cálculos previos al montaje y medición.

La normativa especifica la distancia que deben guardar entre si mismos los micrófonos. Esta dependerá de la frecuencia de trabajo más alta del tubo, que a su vez depende del diámetro interior d y de la velocidad del sonido c_0 .

A continuación se muestran las fórmulas para obtener estas distancias.

La condición para f_u es:

$$d < 0,58\lambda_u; f_u \cdot d < 0,58c_0 \quad (\text{II.1}_1)$$

Donde:

f_u (Hz): es la frecuencia de trabajo más alta del tubo, es importante su elección para que así no se produzcan modos de propagación de ondas no planas.

d (m): es el diámetro interior del tubo.

Una vez se tiene f_u , es hora de sacar la distancia entre micros (s), en metros, de la siguiente manera:

$$f_u \cdot s < 0,45c_0 \quad (\text{II.1}_2)$$

Otra de las distancias que se deben calcular será la distancia que existe entre el micro más cercano a la muestra y esta. Esta distancia dependerá básicamente del tipo de muestra a ensayar:

- si no hay elementos de estructura: 1/2diámetro o 1/2dimensión lateral máxima
- si la estructura es semilateral: 1 diámetro o 1 dimensión lateral máxima
- si es fuertemente asimétrica: 2diámetros o 2 veces la dimensión lateral máxima

La distancia entre el altavoz y los micros, como se ha nombrado antes, tiene que ser solo lo suficiente larga para que las ondas que lleguen a los micros sean planas.

Cumpliendo las distancias el montaje se verá de la siguiente manera:

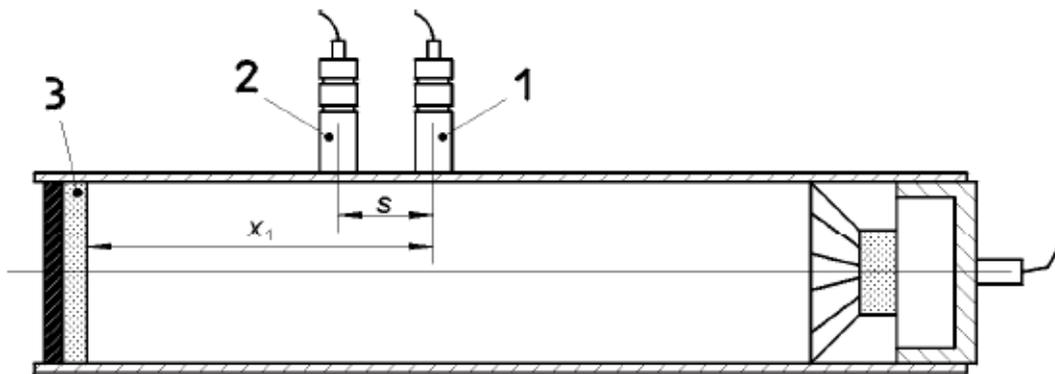


Fig. 5: Método de montaje (Técnica 1)

A continuación se muestra un diagrama explicativo de la conexión realizada con los instrumentos nombrados anteriormente:

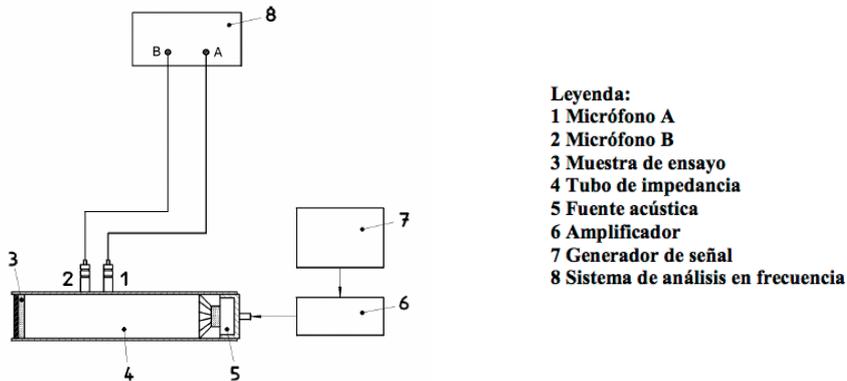


Fig. 6: diagrama de conexionado (Norma ISO 10534-2)

Comprobaciones previas según anexo A de la norma 10534-2:

Estas mediciones y ensayos preliminares se realizan para eliminar fuentes de error y poder satisfacer las exigencias mínimas.

- El altavoz debe encenderse diez minutos antes de empezar a medir para que las ondas se estabilicen.
- Los micrófonos deben calibrarse al inicio, se debe repetir varias veces su calibración si se van a realizar varias mediciones, para determinar su centro acústico y realizar las correspondientes correcciones por atenuación.
- Se debe tomar registro de la temperatura a la que está el tubo para asegurar constancia mientras se realizan las medidas.

- Durante el montaje se debe cuidar la colocación de la muestra, no debe estar abombada y su cara anterior debe estar en el plano normal al eje del tubo.
- Se deben utilizar como mínimo dos muestras diferentes de cada material que se desee ensayar o un número mayor si la muestra no es uniforme
- Todos los ensayos deben realizarse bajo las mismas condiciones.

En las mediciones llevadas a cabo para esta tesina se han realizado los ensayo con tres muestras para asegurar óptimos resultados, o en conclusión, tenga menor probabilidad de error.

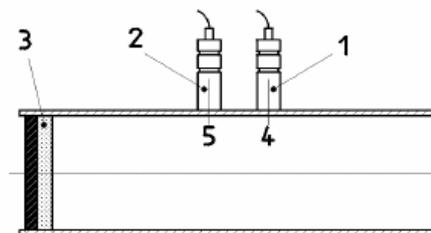
- Al comienzo de las mediciones se debe especificar el plano de referencia, que normalmente debe coincidir con la superficie de la muestra.
- Determinar la velocidad del sonido, la longitud de onda y la impedancia característica.
- Se debe especificar la amplitud de la señal de entrada, que debe elegirse por lo menos 10dB mayor que el ruido de fondo.
- Se debe elegir el número de promediados necesario, el cual dependerá del material que se este midiendo y de la precisión requerida para el cálculo de la función de transferencia.
- Uno de los puntos más importantes es la corrección por desajuste entre los micrófonos, el cual se debe tener en cuenta durante todo el ensayo.

Al utilizar el método de los dos micrófonos (técnica 1) para el ensayo, se puede usar alguno de los siguientes procedimientos:

1.- Medición repetida con los micrófonos intercambiados:

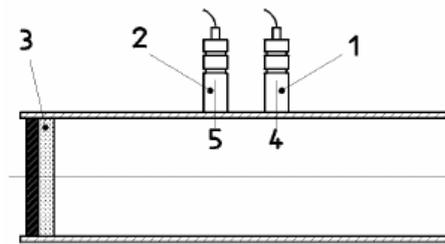
Consistente en el intercambio de los canales para cada medida, es decir, para cada muestra se realizan dos medidas, una con los micrófonos en una posición y otra intercambiándolos. Así obtendremos dos funciones de transferencia H_{12} y H_{21} .

NOTA: Al intercambiar los micrófonos, estos no deben ser desconectados ni del preamplificador ni del analizador de señal.



Leyenda:

- 1 Micrófono A**
- 2 Micrófono B**
- 3 Muestra en ensayo**
- 4 Posición 1**
- 5 Posición 2**



Leyenda:

1 Micrófono B

2 Micrófono A

3 Muestra en ensayo

4 Posición 1

5 Posición 2

Fig. 7 y 8: Montaje micrófonos normal e intercambiados (Norma ISO 10534-2)

Factor de calibración predeterminado:

Este procedimiento emplea una muestra de calibración especial y su corrección es válida para todas las mediciones que se realicen posteriormente.

Este factor de calibración H_c se calculará una vez se hayan medido las funciones de transferencia H_{12} y H_{21} con la siguiente ecuación:

$$H_c = (H_{12} / H_{21})^{1/2} = |H_c| e^{j\phi_c} \quad (\text{II.1}_3)$$

Una vez realizada la medición de H_c se colocan los micrófonos en la primera posición y se medirá la función de transferencia para las muestras de ensayo:

$$\hat{H}_{12} = \left| \hat{H}_{12} \right| e^{j\hat{\phi}} \quad (\text{II.1}_4)$$

Donde

\hat{H}_{12} es la función de transferencia sin corregir;

$\hat{\phi}$ es el ángulo de fase sin corregir

Finalmente para corregir el desajuste entre los micrófonos:

$$H_{12} = \left| H_{12} \right| e^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} \quad (\text{II.1}_5)$$

A partir de las funciones de transferencias medidas, se obtienen todas las variables necesarias a partir de las siguientes fórmulas.

Para determinar el coeficiente de reflexión a incidencia normal se utilizará:

$$r = (|r| e^{j\phi_r}) r_r + j r_i = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (\text{II.1}_6)$$

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;

Φ_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;

H_R es la función de transferencia para la onda reflejada sola;

k_0 es el número de onda de campo libre.

El equipo de medición dará como resultado los valores de H'_{12} y H'_{21} y partir de ellos se calcula H_{12} siguiendo los cálculos explicados, y las demás incógnitas a través de las fórmulas ofrecidas en el anexo D de esta norma. Las cuales se detallan a continuación:

Función de transferencia para la onda incidente, H_1 :

$$H_1 = e^{-jk_0S} \quad (\text{II.1}_7)$$

Función de transferencia para la onda incidente reflejada, H_R :

$$H_R = e^{jk_0S} \quad (\text{II.1}_8)$$

En ambos casos S es la separación que existe entre los dos micrófonos, nombrada anteriormente.

Con el coeficiente de reflexión ya se puede conseguir el coeficiente de absorción acústica, y a partir de este la impedancia o admitancia acústica específica. Para ello se utilizarán las siguientes fórmulas:

Coefficiente de absorción acústica:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (\text{II.1}_9)$$

Impedancia acústica específica:

$$Z/\rho c_0 = R/\rho c_0 + jX/\rho c_0 = (1+r)/(1-r) \quad (\text{II.1}_{10})$$

Donde

R es la componente real;

X es la componente imaginaria;

ρc_0 es la impedancia característica.

Admitancia acústica específica:

$$G/\rho c_0 = g/\rho c_0 - jb/\rho c_0 = \rho c_0/Z \quad (\text{II.1}_{11})$$

Donde

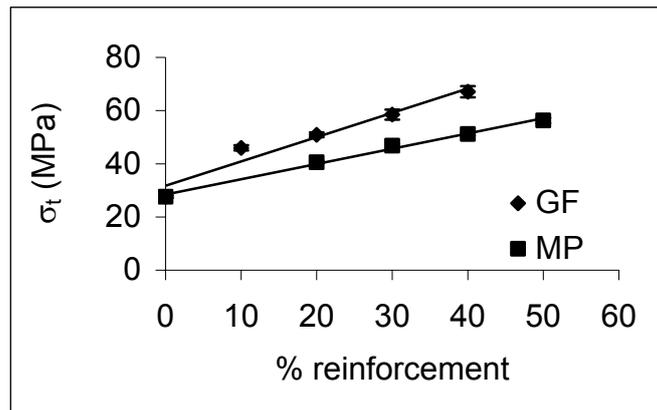
g es la componente real;

b es la componente imaginaria.

- Mecánico-elásticos

Se prepararon materiales compuestos de origen plástico reforzados al 20, 30, 40 y 50% en peso del refuerzo, sin y con agente de acoplamiento. Para evaluar estas alternativas se han medido las propiedades a tracción, flexión e impacto y se ha podido constatar que, mientras que la resistencia a tracción presenta valores similares para ambos tipos de refuerzo, los módulos de Young de los materiales reforzados con fibras recicladas textiles son un 10-30% superiores a los del material sin refuerzo.

Como material de refuerzo, en este trabajo se utilizaron fibras de vidrio, fibras de poliéster y polipropileno.

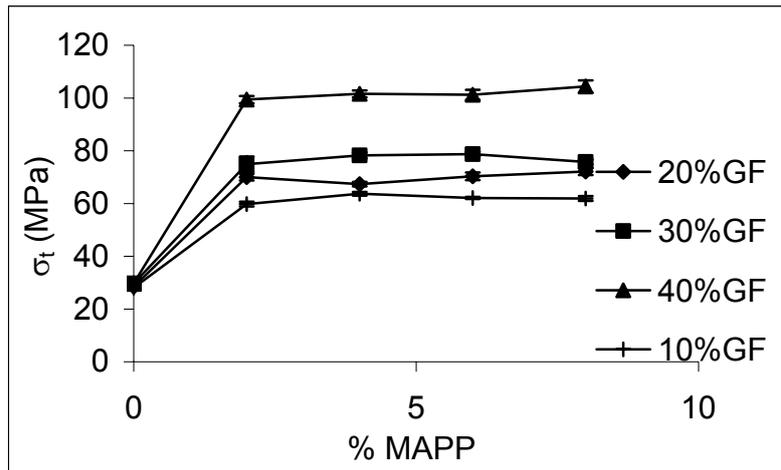


Gráfica 1: Comparativa de resistencia máxima a la tracción entre el elemento reforzado con fibra de vidrio (GF) y reforzado por fibra de poliéster (MP)

Como agente de acoplamiento y promotor de la adhesión entre la matriz polimérica y el refuerzo celulósico se utilizó un polipropileno modificado con anhídrido maleico (MAPP).

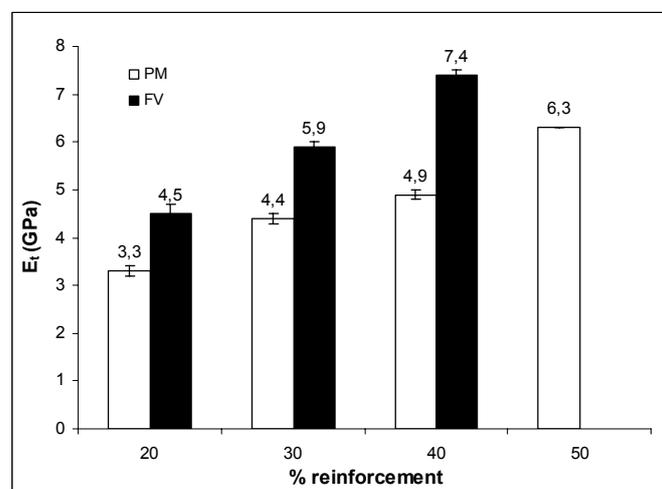
Se prepararon materiales compuestos reforzados con 20, 30, 40 y 50% en peso. Para cada cantidad de refuerzo se prepararon materiales sin acoplar y acoplados con un 2, 4, 6 y 8% en peso de MAPP respecto al contenido de fibras. La mezcla de los componentes de los materiales compuestos se realizó en una mezcladora Brabender. El proceso de mezcla tuvo lugar a 180°C, 80 rpm de velocidad de giro de las paletas, durante un tiempo total de 10 minutos. Seguidamente, los materiales compuestos obtenidos se pelletizaron en un molino de cuchillas suministrado por AGRIMSA, equipado con una rejilla de 10 mm de paso de luz. Finalmente, la granza se secó a 80°C durante 2 horas en una estufa antes de alimentar una máquina de moldeo por inyección de termoplásticos Mateu & Solé de 35 toneladas. El proceso de inyección se llevó

a cabo con un perfil de temperaturas desde la zona de carga hasta la boquilla de 175°C/175°C/190°C respectivamente. La presión de inyección utilizada fue de 120 kg/cm² mientras que la presión de mantenimiento fue de 25 kg/cm². De este modo, se obtuvieron probetas estandarizadas según la norma ASTM D3641 [3] para los ensayos mecánicos de tracción, flexión e impacto. Antes de los ensayos, las muestras se acondicionaron de acuerdo con la norma ASTM D618 [4].



Gráfica 2: resistencia máxima a la tracción de la familia de materiales reforzados con fibras de vidrio con agente compatibilizante

Los ensayos a tracción y flexión se realizaron con una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON 1122. Las mediciones se tomaron siguiendo las normas ISO 527 [5] para el ensayo de tracción e ISO 178 para el correspondiente ensayo de flexión. Se determinaron también las propiedades a impacto en probetas sin entalla utilizando un péndulo Charpy equipado con un martillo de 2.074 kg de peso y una longitud de 382 mm; para este último ensayo se siguió la norma ISO 178 [6].



Gráfica 3: Modulo de Young según % de refuerzo y tipo de familia

El tamaño promedio de las fibras en el material compuesto, se midió a partir de fibras recuperadas del material compuesto. La extracción se efectuó mediante un soxhlet en xileno. La determinación de los diámetros promedio de las fibras y filamentos fue llevada a cabo a través de microscopía óptica y las imágenes obtenidas fueron tratadas mediante el programa Sigma Scan Pro 5. La longitud de las mismas determinó en un analizador Kajaani FS-100 (Kajaani Electronics Ltd, Finlandia). El peso específico de los materiales compuestos se determinó mediante picnometría.

II.2.- MODELO DE SIMULACIÓN

II.2.1.- MODELO DE OKURA & SAITO PARA ATENUACIÓN EN PAREDES MÚLTIPLES, COINCIDENCIA ALEATORIA [7].

En este modelo se desarrolla un método de transferencia de impedancias. Se obtienen las expresiones del índice de debilitamiento para paredes múltiples construidas con varias combinaciones de capas impermeables, cámaras de aire y materiales absorbentes acústicos.

El modelo considera una estructura general de paredes múltiples infinitas, tal y como se observa en la figura 11. Dicha estructura está construida con N elementos y cada uno de estos elementos puede ser una capa impermeable, una cámara de aire o un material absorbente acústico. Se denomina p_i a la onda de presión incidente y p_r a la onda de presión reflejada. Se supone que una onda plana incide sobre la cara izquierda del elemento N-ésimo con un ángulo de incidencia θ . La onda que incide por la parte izquierda continuará propagándose a través de la estructura y radiará por la cara derecha del primer elemento como una onda plana de presión p_t hacia un campo libre con un ángulo de transmisión θ_t .

En el análisis se numera con el subíndice $i=1, 2, \dots, n$ cada uno de los parámetros físicos del i -ésimo elemento, y se utiliza un segundo subíndice para indicar un parámetro de la cara izquierda del elemento (un 2) y la cara derecha (un 1), tal y como se aprecia en la figura 11.

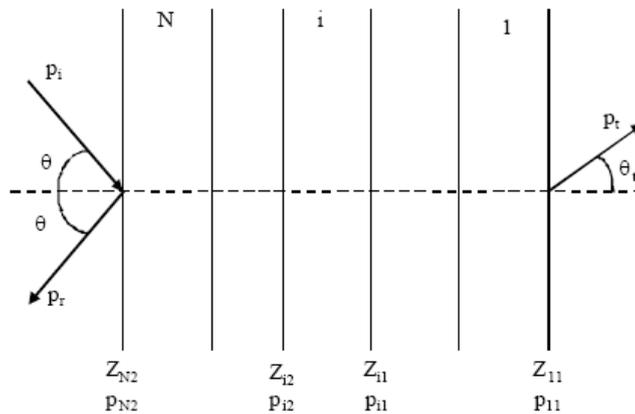


Fig. 11: Modelo multicapa

El cociente entre la presión en la superficie de incidencia p_{N2} y la presión incidente p_i es la siguiente:

$$\frac{p_{N2}}{p_i} = \frac{p_i + p_r}{p_i} = \frac{2Z_{N2}}{Z_{N2} + \frac{\rho c}{\cos \theta}} \quad (\text{II.2.1}_1)$$

Donde Z_{N2} es la impedancia acústica normal vista desde la cara izquierda de la superficie del n -ésimo elemento y $\frac{\rho c}{\cos \theta}$ es la impedancia acústica normal en campo libre de una superficie con incidencia oblicua, la cual es igual a la relación de impedancias del primer elemento Z_{11} como se puede ver en la figura 11. Usando las condiciones de presión en cada superficie, podemos escribir la expresión del coeficiente de transmisión para incidencia oblicua, de la cual obtener, mediante la integración adecuada, el índice de debilitamiento en incidencia aleatoria:

$$\tau(\theta) = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{11}}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{N2}}{p_i} \right|^2 \left| \frac{p_{N1}}{p_{N2}} \dots \frac{p_{i1}}{p_{i2}} \dots \frac{p_{11}}{p_{12}} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_2)$$

Donde:

$$\left| \frac{p_{11}}{p_{12}} \right|^2 = \left| \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_m} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_3)$$

$$Z_{12} = Z_{11} + Z_m \quad (\text{II.2.1}_4)$$

$$Z_{11} = \frac{\rho c}{\cos \theta} \quad (\text{II.2.1}_5)$$

$$Z_m = \eta \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \cdot \text{sen}^4 \theta + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot \left(1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \cdot \text{sen}^4 \theta \right) \quad (\text{II.2.1}_6)$$

Las relaciones de presiones se pueden obtener a partir de las características de impedancia de cada elemento los cuales se clasifican en capa impermeable, material absorbente acústico y cámara de aire.

En el caso que se abarca en esta tesina, el estudio se realiza tanto para capas impermeables simples como dobles, con la cámara de aire rellena de material absorbente acústico. A continuación se detalla la formulación bajo la cual se justifican las diferentes partes de forma individual para las soluciones estudiadas en el trabajo:

1.- Capa impermeable simple:

Según la teoría de Ookura & Saito [7], el coeficiente de transmisión para una estructura simple (fig. 12), viene dada por cociente anteriormente citado (ecuación. II.2.1_2) con la diferencia en el número de términos que influyen debido a se una capa simple (ecuación. II.2.1_7):

$$\tau(\theta) = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{11}}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{12}}{p_i} \right|^2 \cdot \left| \frac{p_{11}}{p_{12}} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_7)$$

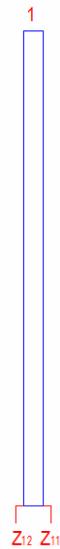


Fig. 12: Capa impermeable

2.- Capa impermeable doble con absorbente acústico en el interior:

La segunda configuración corresponde a la cámara de aire rellena de material absorbente acústico, es decir, Placa – Absorbente acústico – Placa.

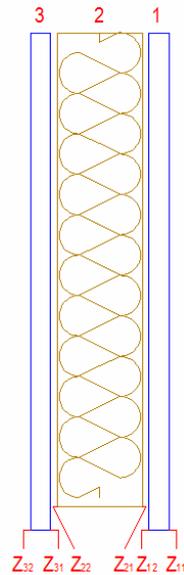


Fig. 13: Capa impermeable doble con absorbente en el interior

En este caso el coeficiente de transmisión para estructuras dobles con la cámara de aire rellena de material absorbente queda como:

$$\tau(\theta) = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{11}}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{32}}{p_i} \right|^2 \cdot \left| \frac{p_{31} \cdot p_{21} \cdot p_{11}}{p_{32} \cdot p_{22} \cdot p_{12}} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_7)$$

En este cálculo aparece Lower London Frequency, que es la frecuencia de resonancia de esta estructura y la frecuencia límite cuando se introduce el material absorbente acústico en la cámara de aire, y vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$LLf = 43 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2 \cdot d_{abs}}} \quad (\text{II.2.1}_8)$$

$$ULf = \frac{43}{\cos \theta_1} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2 \cdot d_{abs}}} \quad (\text{II.2.1}_9)$$

$$f_L = \frac{c_0}{2 \cdot d_{cam}} \quad (\text{II.2.1}_{10})$$

donde m_1 y m_2 son las densidades superficiales de cada una de las placas impermeables, ρ_0 la densidad del aire, c_0 la velocidad del sonido y d_{abs} la anchura de la cámara de aire más el absorbente acústico.

De manera que si se introduce un material absorbente acústico a medida definido por el usuario, se deberá caracterizar el material absorbente acústico mediante su coeficiente de absorción o su resistencia al flujo por bandas, quedando las ecuaciones anteriores como:

$$\tau(\theta) = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{11}}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{p_{32}}{p_i} \right|^2 \cdot \left| \frac{p_{31} \cdot p_{21} \cdot p_{11}}{p_{32} \cdot p_{22} \cdot p_{12}} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_{11})$$

con:

$$\left| \frac{p_{32}}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{2 \cdot Z_{32}}{Z_{32} + \frac{\rho \cdot c}{\cos \theta}} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_{12})$$

$$\left| \frac{p_{31}}{p_{32}} \right|^2 = \left| \frac{Z_{31}}{Z_{32}} \right|^2 = \left| \frac{Z_{31}}{Z_{31} + Z_{m2}} \right|^2 = \left| \frac{Z_{22}}{Z_{22} + Z_{m2}} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_{13})$$

$$\left| \frac{p_{21}}{p_{22}} \right|^2 = \left| \frac{\cosh \varphi_1}{\cosh(q_1 \cdot d_{abs} + \varphi_1)} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_{14})$$

$$\left| \frac{p_{11}}{p_{12}} \right|^2 = \left| \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{m1}} \right|^2 \quad (\text{II.2.1}_{15})$$

donde:

$$\varphi_1 = \text{arc coth} \left(\frac{Z_{12} \cdot q_1}{\gamma_1 \cdot Z_0} \right) \quad (\text{II.2.1}_{-16})$$

$$Z_{32} = Z_{22} + Z_{m2} \quad (\text{II.2.1}_{-17})$$

$$Z_{22} = \frac{\gamma_1 \cdot Z_0}{q_1} \text{coth}(q_1 d_{\text{abs}} + \varphi_1) \quad (\text{II.2.1}_{-18})$$

$$\gamma_1 = \alpha + j\beta \quad (\text{II.2.1}_{-19})$$

$$q_1 = \gamma_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{k}{\gamma_1} \right)^2 \cdot \text{sen}^2 \theta} \quad (\text{II.2.1}_{-20})$$

$$k_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c_0} \quad (\text{II.2.1}_{-21})$$

$$Z_0 = R + jX \quad (\text{II.2.1}_{-22})$$

$$Z_{12} = Z_{11} + Z_{m1} \quad (\text{II.2.1}_{-23})$$

$$Z_{11} = \frac{\rho \cdot c}{\cos \theta} \quad (\text{II.2.1}_{-24})$$

$$Z_{m1} = \eta_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_1 \cdot \left(\frac{f}{f_{c1}} \right)^2 \cdot \text{sen}^4 \theta + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{f}{f_{c1}} \right)^2 \cdot \text{sen}^4 \theta \right) \quad (\text{II.2.1}_{-25})$$

$$Z_{m2} = \eta_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_2 \cdot \left(\frac{f}{f_{c2}} \right)^2 \cdot \text{sen}^4 \theta + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m_2 \cdot \left(1 - \left(\frac{f}{f_{c2}} \right)^2 \cdot \text{sen}^4 \theta \right) \quad (\text{II.2.1}_{-26})$$

donde γ_1 y Z_0 se obtienen de las ecuaciones de una de las tres teorías de caracterización de los materiales absorbentes acústicos, es decir, Delany & Bazley, Miki o Allard & Champoux [8][9][10].

III.- DESARROLLO

III.1.- FÍSICA ACÚSTICA: ABSORCIÓN, IMPEDANCIA Y RESISTENCIA [1][2]

Se realizan una serie de ensayos en laboratorio para determinar el coeficiente de absorción acústica para los materiales insertándolos en el tubo de Kundt como ya se explicó en el apartado II.1 bajo la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 y teniendo en cuenta todas las restricciones y obligaciones que se han de cumplir en el montaje y corrección de los micrófonos y mediciones, para el cálculo de la resistencia específica al flujo, con ello se obtuvieron los valores de la función de transferencia para cada material y estos se transformaron en valores de absorción acústica “ α ” y de impedancia acústica “ Z ”:

Mediante la siguiente expresión se calcula el coeficiente de reflexión en incidencia normal a partir de los datos obtenidos de la función de transferencia:

$$r = (|r| e^{j\phi_r})_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (\text{III.1}_1)$$

Tras ello se determina el coeficiente de absorción acústica con la siguiente ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (\text{III.1}_2)$$

Una vez obtenido, se extrae el valor de la impedancia acústica específica como:

$$Z/\rho c_0 = R/\rho c_0 + jX/\rho c_0 = (1+r)/(1-r) \quad (\text{III.1}_3)$$

En la figura 14, se puede observar una muestra de material de las utilizadas para la caracterización en laboratorio.



Fig. 14: Muestra de familia 30% Fibra de Vidrio

En la figura 15 y 16, se puede observar el montaje utilizado para la determinación en laboratorio del coeficiente de absorción acústica de los diferentes materiales con plenun vacío y plenun relleno de material absorbente acústico.

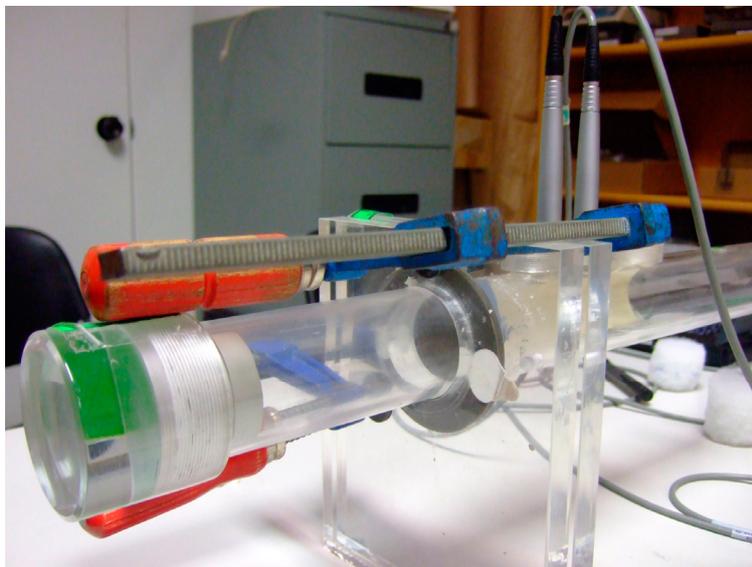
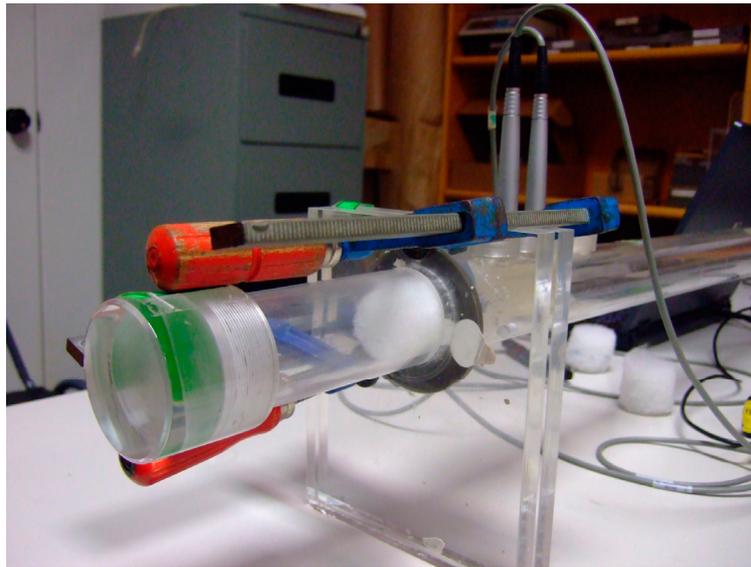


Fig. 15 y 16: Muestra de familia 30% Fibra de Vidrio con plenum relleno de material y con plenum vacío.

En la tabla 1, se muestran algunos de los resultados obtenidos del coeficiente “ α ” para las tres familias de materiales composite objeto de este trabajo, que permiten afirmar que los composite estudiados presentan una absorción acústica prácticamente nula, con lo que se engloban dentro de los materiales impermeables, pudiendo ser su uso similar al de las placas de yeso laminado.

FAMILIA	COMPOSICIÓN	COEF. ABSORCIÓN
FV 30	30 % de Fibra de Vidrio	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 FV30 Sin Plenum</p>

	30 % de Fibra de Vidrio con cámara de aire de 11,5 cm.	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 FV30 Sin Plenum</p>
	30 % de Fibra de Vidrio con cámara de aire de 15,5 cm.	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 FV30 Plenum 15,5cm</p>
	30 % de Fibra de Vidrio con cámara de aire de 15,5 cm. y material absorbente acústico en el interior	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 FV30 Plenum con Absorbente15,5cm</p>
	30 % de Fibra de Vidrio mezclada mediante agente acoplador	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 FV+Ag.Acop30 Sin Plenum</p>
	30 % de Fibra de Vidrio mezclada mediante agente acoplador con cámara de aire de 15,5 cm. y material absorbente acústico en el interior	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 FV+Ag.Acop30 Plenum con Absorbente 15,5cm</p>
PM 30	30 % de Fibra de Poliéster	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 PM+AgAcop30 Sin Plenum</p>
	30 % de Fibra de Poliéster con agente acoplador	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 PM30 Plenum con Absorbente 15,5cm</p>
	30 % de Fibra de Poliéster con cámara de aire de 15,5 cm. y absorbente acústico en el interior	<p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 PM+Ag.Acop30 Plenum con Absorbente 15,5cm</p>

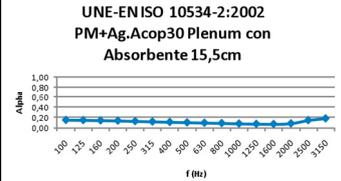
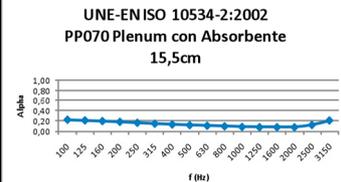
	<p>30 % de Fibra de Poliéster con agente acoplador, cámara de aire de 15,5 cm. y absorbente acústico en el interior</p>	 <p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 PM+Ag.Acop30 Plenum con Absorbente 15,5cm</p>
<p>PP070</p>	<p>70 % de Polipropileno con cámara de aire de 15,5 cm. y absorbente en el interior</p>	 <p>UNE-EN ISO 10534-2:2002 PP070 Plenum con Absorbente 15,5cm</p>

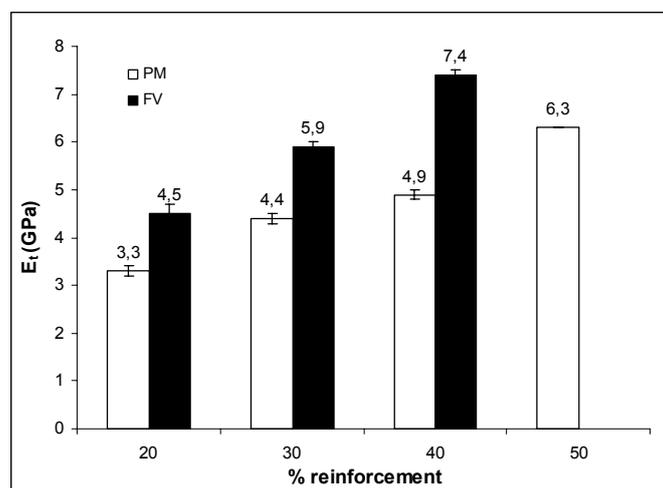
Tabla 1: Comparativa del coeficiente de absorción acústico entre familias.

Con ello queda evidenciado que se trata de un material acústicamente impermeable, el cual dispone de un alto grado de resistencia al flujo de aire y un grado mínimo de absorción acústica para cualquiera de las configuraciones ensayadas.

Por lo tanto, a partir de este punto, se estudiará su comportamiento acústico desde el concepto de elemento constructivo, para de esta manera, evaluar el grado de aislamiento acústico de las diferentes configuraciones y la posibilidad de su uso como material perforado con absorbente acústico en su interior, bajo la configuración de Resonador de Helmholtz, para su posible uso como divisorio entre estancias virtuales dentro de una misma estancia (p.ej: oficinas y despachos).

III.2.- FÍSICA MECÁNICA: MODULO DE YOUNG, POISSON

Se determinaron mediante ensayos en laboratorio el módulo de Young para cada familia de materiales. En la gráfica 4 podemos ver los resultados obtenidos en los ensayos llevados a cabo en laboratorio.



Gráfica 4: Módulo de Young según % de refuerzo y tipo de familia

Con este dato y el espesor del material ensayado se obtuvo el módulo de Poisson para cada familia.

Tras ello se realizó el estudio de optimización de la solución, en función de la frecuencia crítica deseada y el espesor necesario u óptimo para la utilización de estas soluciones como elemento aislante acústico para edificación.

En la tabla 2, se listan los resultados obtenidos:

FAMILIA	COMPOSICIÓN	MODULO DE YOUNG (E)	MÓDULO DE POISSON (B)	e (mm)	MASA (Kg./m^2)	FRECUENCIA CRÍTICA (Hz)
FV 20	20 % Fibra de Vidrio	4,5 GPa	1278,4	15	20,5	2371
FV 30	30 % Fibra de Vidrio	5,9 GPa	1676,1	15	20,5	2071
FV 40	40 % Fibra de Vidrio	7,4 GPa	2102,3	15	20,5	1845
PM 20	20 % Fibra de Poliéster	3,3 GPa	937,5	15	18	2595
PM 30	30 % Fibra de Poliéster	4,4 GPa	1250	15	18	2247
PM 40	40 % Fibra de Poliéster	4,9 GPa	1392,1	15	18	2141
PM 50	50 % Fibra de Poliéster	6,3 GPa	1789,8	15	18	1883
PP070	70 % Polipropileno	2,7 GPa	767,1	15	16	2704

Tabla 2: Comparativa de variables según familias.

III.3.- AISLAMIENTO ACÚSTICO

Mediante el software de la EPSG-UPV Aisla 3.0 (una aplicación informática realizada para la predicción del aislamiento acústico tomando como punto de partida el modelo de Ookura & Saito [7]). Con esta teoría se puede programar cualquier tipo de estructura, del número de capas que se desee, ya que trabaja tanto con placas o materiales impermeables, así como con cámaras de aire y absorbentes acústicos. Además, tiene en cuenta la incidencia aleatoria. También debe tenerse en cuenta que el método está muy estructurado, de manera que es relativamente fácil escribir un algoritmo sin demasiados bucles anidados. En lo referido a modelos de caracterización de materiales absorbentes acústicos, el programa da la opción de elegir entre 3 métodos de caracterización de estos materiales: el de Delany & Bazley, el de Miki o el de Allard & Champoux [8][9][10]. Si se selecciona el método de Delany & Bazley o el de Miki [8][9][10], en la pantalla y en el informe de resultados, aparecerá el ancho de banda que es válido para esa determinada estructura, ya que, como se indicó en el capítulo 2, el rango de validez de estos modelos está limitado.

Se incorporaron los datos obtenidos en laboratorio sobre las diferentes muestras de materiales y con ello se determinó el aislamiento acústico de cada muestra ensayada para la obtención de unos datos estadísticos de las muestras con los que se procedió a la determinación de la regresión de dichos resultados.

La configuración utilizada para la realización de los cálculos de aislamiento acústico mediante el software y los parámetros de integración utilizados, fueron:

Temperatura = 18 °C

Presión = 101300 Pa

Densidad del aire = 1.21 (Kg./m³)

Velocidad de propagación del aire = 342.4 (m/s)

Ángulo límite de incidencia = 78°

Paso de integración = 1000 (bajo método de los Rectángulos)

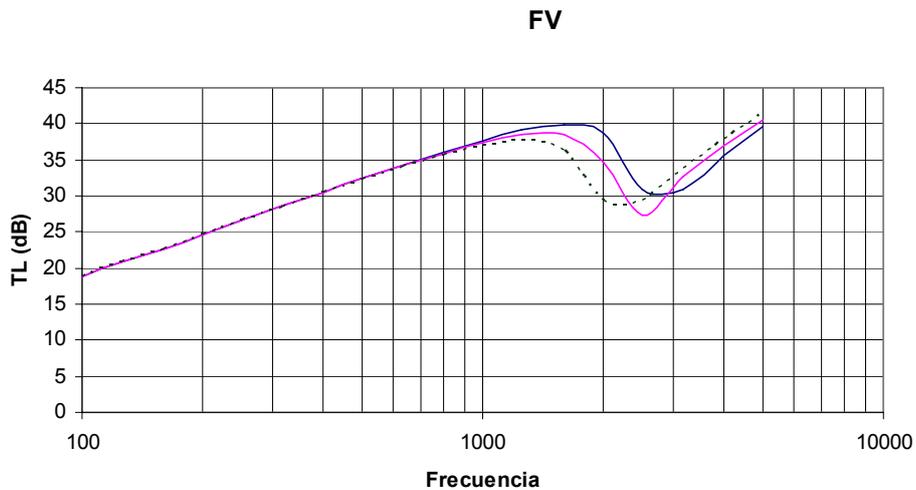
Factor de pérdidas = 0,02 (según norma)

DIVISORIO SIMPLE A BASE DE PLACA SIMPLE:

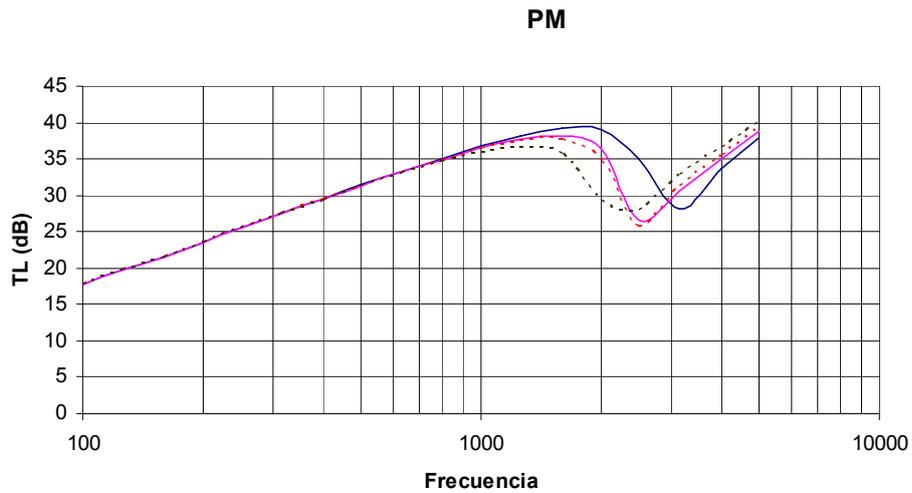
Frecuencia	R (dB)								
	FV 20 %	FV 30 %	FV 40 %	PM 20 %	PM 30 %	PM 40 %	PM 50 %	PP 70 %	PYL (15mm)
50	13,1	13,1	13,1	12,1	12,1	12,1	12,1	11,2	9,7
63	15	15	15	13,9	13,9	13,9	13,9	13	11,4
80	16,9	16,9	16,9	15,8	15,8	15,8	15,8	14,8	13,2
100	18,8	18,8	18,8	17,7	17,7	17,7	17,7	16,7	15
125	20,8	20,8	20,8	19,7	19,7	19,7	19,7	18,7	16,9
160	22,7	22,7	22,7	21,6	21,6	21,6	21,6	20,6	18,9
200	24,6	24,6	24,6	23,5	23,5	23,5	23,5	22,5	20,7
250	26,6	26,6	26,6	25,5	25,5	25,5	25,5	24,5	22,7
315	28,6	28,6	28,5	27,5	27,4	27,4	27,4	26,5	24,6
400	30,5	30,5	30,4	29,4	29,4	29,4	29,3	28,4	26,6
500	32,5	32,4	32,3	31,4	31,3	31,3	31,2	30,4	28,5
630	34,3	34,2	34,1	33,3	33,2	33,1	33	32,3	30,3
800	36,1	35,9	35,7	35,1	34,9	34,9	34,6	34,1	32,1
1000	37,7	37,4	37	36,8	36,5	36,4	35,9	35,8	33,6
1250	39,1	38,4	37,6	38,2	37,7	37,5	36,6	37,3	34,8
1600	39,8	38,4	36,3	39,3	38,2	37,6	35,6	38,5	35,2
2000	38,7	34,6	29,4	39,1	36,3	34,8	29,2	38,5	33,1
2500	31	27,3	29,3	35,1	26,5	25,7	28	35,8	23,5
3150	30,8	32,7	33,9	28,2	30,6	31,2	32,7	26,5	28,2
4000	35,6	36,9	37,8	33,6	35,1	35,5	36,6	32,1	32,6
5000	39,6	40,6	41,4	37,8	38,9	39,3	40,2	36,4	36,4
Rw(C:Ctr)	35(-2;-4;-2;-6)	34(-2;-3;-2;-5)	34(-2;-4;-2;-5)	34(-2;-4;-2;-6)	33(-2;-3;-1;-5)	33(-2;-3;-2;-5)	33(-2;-4;-2;-5)	33(-2;-4;-2;-6)	30(-2;-3;-1;-5)
Rg (dBA)	32,9	31,8	31,7	32,1	30,9	30,6	30,8	31	28

Tabla 3: Resultados de aislamiento acústico obtenidos ordenados por familia y porcentaje de fibras incorporadas al elemento base.

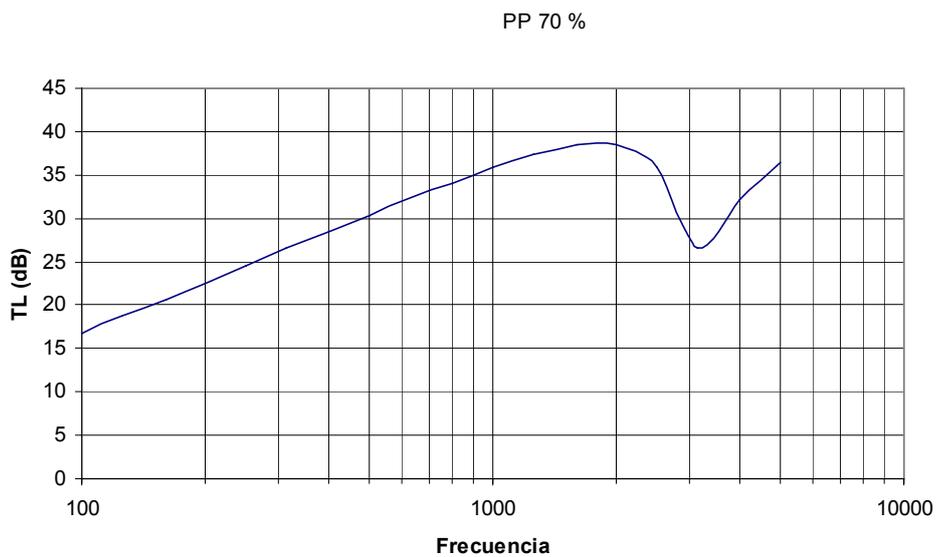
A continuación se grafican las soluciones de aislamiento acústico como placa única impermeable en función del índice de porcentaje de fibras incorporadas al elemento base:



Gráfica 5: Comparativa para familia Fibra de Vidrio. En Azul refuerzo del 20%, en Rosa refuerzo del 30% y en punteado Negro 40%.



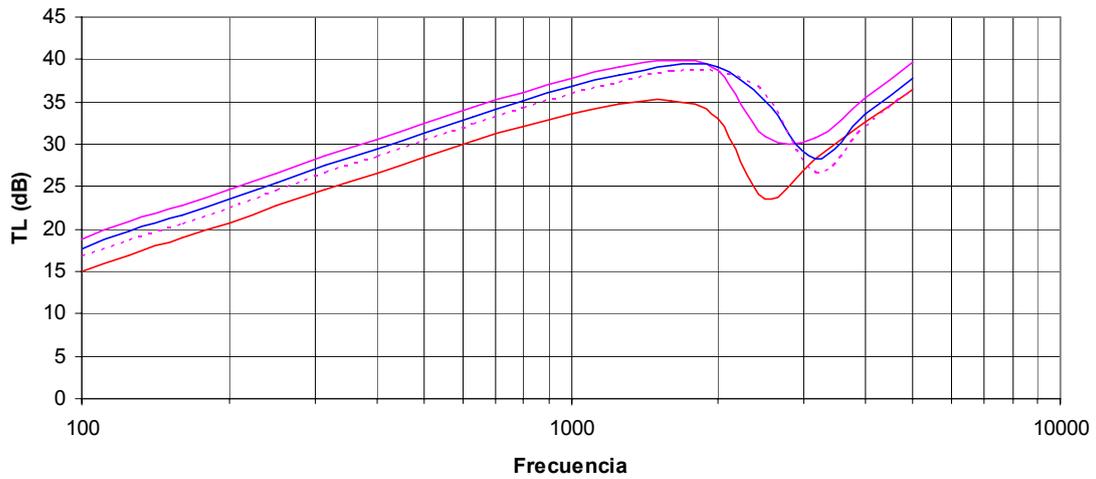
Gráfica 6: Comparativa para familia Fibra de Poliéster. En Azul refuerzo del 20%, en Rosa refuerzo del 30%, en punteado Rojo 40% y en punteado Negro 50%.



Gráfica 7: Comparativa para familia Polipropileno. En Azul refuerzo del 70%.

Comparando los resultados de las diferentes familias, solo para los casos de 20 % de refuerzo (debido a ser las más eficientes), con el de una placa de yeso laminado de igual espesor con una frecuencia crítica de 2211,9 Hz, se puede observar como mejora el aislamiento acústico de dichas soluciones tipo composite:

COMPOSITE vs PYL



Gráfica 8: Comparativa de placa simple para las diferentes familias de Composites frente a Placa de Yeso Laminado. En Rosa refuerzo de Fibra de Vidrio del 20%, en Azul Fibra de Poliéster del 20%, en línea punteada Rosa Polipropileno 70% y en Rojo Placa de Yeso Laminada.

Se puede observar como cualquiera de las soluciones consistentes en tipos composites, consiguen un aumento de entre 3 y 5 dBA, en función de la familia de composite utilizada.

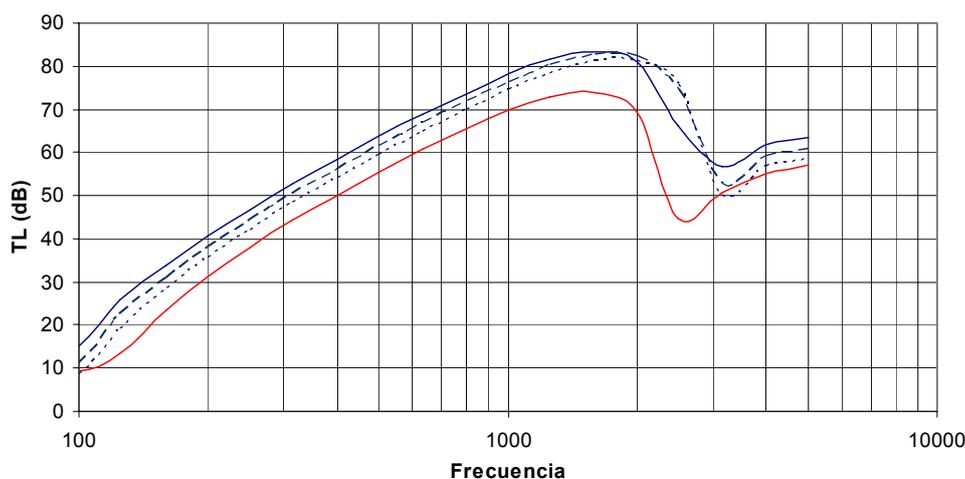
DIVISORIO DOBLE A BASE DE PLACA SIMPLE Y DIVISORIO DOBLE A BASE DE PLACA DOBLE:

Ahora tratemos de ver como se comportan estas soluciones cuando las incorporamos a una solución de tabiquería doble con material absorbente acústico en su interior. Tomando las diferentes soluciones utilizadas anteriormente con configuraciones tipo: 1 x placa impermeable de 15 mm + lana de poliéster (RC) de 40 mm y 24,6 Kg/m³ + 1 x placa impermeable de 15 mm y otra consistente en: 2 x placa impermeable de 15 mm + lana de poliéster (RC) de 40 mm y 24,6 Kg/m³ + 2 x placa impermeable de 15 mm, se obtienen los siguientes resultados:

Frecuencia	R (dB)							
	FV 20 % + RC + FV 20 %	2 x FV 20 % + RC + 2 x FV 20 %	PM 20 % + RC + PM 20 %	2 x PM 20 % + RC + 2 x PM 20 %	PP 70 % + RC + PP 70 %	2 x PP 70 % + RC + 2 x PP 70 %	PYL + RC + PYL	2 x PYL + RC + 2 x PYL
50	15,5	15,8	14,9	16,4	14,3	16,5	13,1	16,3
63	14,9	11	14,8	10,1	14,5	11,8	13,7	14,3
80	10,5	24,6	12,1	20,6	13	16,7	13,3	9,9
100	15,2	33,9	11,2	30,8	8,7	27,9	9,5	22,3
125	25,8	41,3	22,4	38,6	19,3	36,1	13,5	31,5
160	33,9	47,9	31	45,4	28,4	43,1	23,4	38,9
200	40,6	53,8	38	51,4	35,5	49,2	31,1	45,2
250	46,8	59,7	44,4	57,4	42,1	55,2	38	51,3
315	52,8	65,4	50,4	63,1	48,2	61	44,2	57,2
400	58,4	70,9	56,1	68,6	54	66,6	50	62,8
500	63,8	76,3	61,6	74,1	59,5	72	55,5	68,2
630	68,9	81,6	66,8	79,3	64,8	77,3	60,7	73,5
800	73,7	86,6	71,7	84,5	69,8	82,5	65,5	78,5
1000	78,1	91,5	76,2	89,4	74,4	87,4	69,7	83,3
1250	81,6	95,9	80,1	94	78,3	92	72,8	87,6
1600	83,3	99,7	82,6	98	81,2	96,2	73,8	91,2
2000	81	101,9	82,2	100,7	81,4	99,1	69,3	93
2500	66,3	102,3	74,7	102,3	75,8	101	44,7	92,1
3150	56,7	95,7	52,8	99,1	49,9	99	50,7	81,5
4000	61,8	77,3	59	81,4	56,8	85,7	55	71,1
5000	63,5	81,6	60,7	79	58,6	76,7	57,2	74
Rw(C;Ctr)	51 (-8;-16;-10;-22)	66(-5;-13;-19;-33)	48(-9;-17;-9;-20)	64(-6;-14;-18;-32)	45(-8;-17;-8;-18)	61(-6;-14;-15;-29)	41(-6;-13;-5;-15)	56(-6;-14;-14;-27)
Rg (dBA)	43,4	61	39,5	58,1	37	55,3	35,6	50,1

Tabla 4: Resultados de aislamiento acústico de tabiquería doble obtenidos ordenados por familia y porcentaje de fibras incorporadas al elemento base.

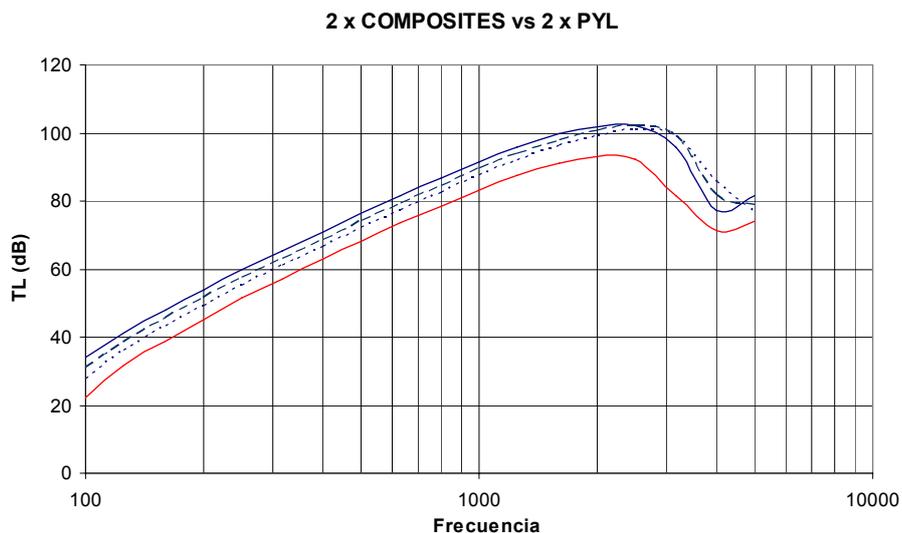
1 x COMPOSITE vs 1 x PYL



Gráfica 9: Comparativa para familia Composites frente a Placa de Yeso Laminado mediante 1 x placa simple + material absorbente acústico + 1 x placa simple. En Azul refuerzo de Fibra de Vidrio del 20%, en línea discontinua Negra Fibra de Poliéster del 20%, en línea punteada Negra Polipropileno 70% y en Rojo Placa de Yeso Laminada.

En este caso, se aprecia como la tendencia sigue siendo la misma, la solución tipo composite presenta un comportamiento aislante acústico mejor que la placa de yeso laminado, siendo las diferencia en este caso de entre 2 y 8 dBA de mejora.

Para el caso de realizar la misma comparativa mediante la utilización de doble placa impermeable, se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 10: Comparativa para familia Composites frente a Placa de Yeso Laminado mediante 1 x placa simple + material absorbente acústico + 1 x placa simple. En Azul refuerzo de Fibra de Vidrio del 20%, en línea discontinua Negra Fibra de Poliéster del 20%, en línea punteada Negra Polipropileno 70% y en Rojo Placa de Yeso Laminada.

Donde se observa una mejora considerable del aislamiento acústico para ambos tipos de soluciones de tabiquería doble implementando los composites como capa impermeable frente a los mismos realizados mediante placa de yeso laminado, entre 5 y 10 dBA de mejora.

DIVISORIO DOBLE DESINTONIZANDO LAS FRECUENCIAS CRÍTICAS:

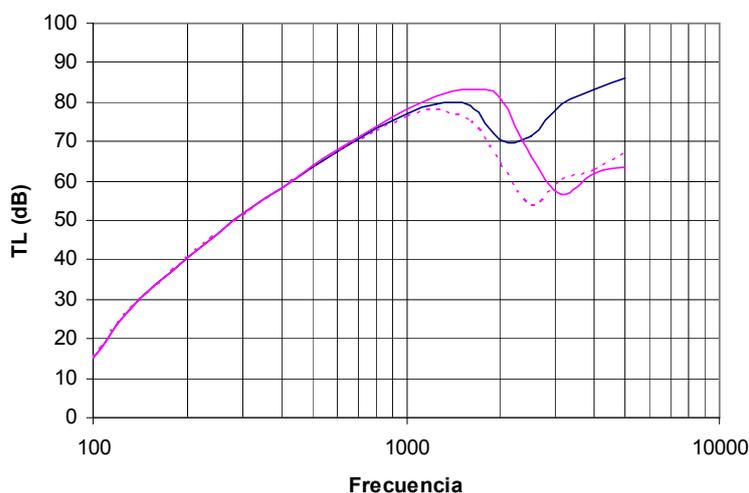
Para tratar de conseguir mejores resultados, se ensayaron diferentes soluciones con variaciones en el porcentaje de refuerzo de fibras, de manera que las frecuencias críticas de los materiales no quedaran sintonizadas a la misma frecuencia.

Para ello se llegó a la conclusión de realizar el estudio solo para la familia de composite de mayor poder aislante acústico y con las soluciones de diferencia de porcentaje de fibras más alta posible para resintonizar la frecuencia crítica lo máximo posible. El estudio se realizó tanto para divisorio simple mediante placa simple como para divisorio doble mediante placa doble, siempre frente a la misma solución con placa de yeso laminado.

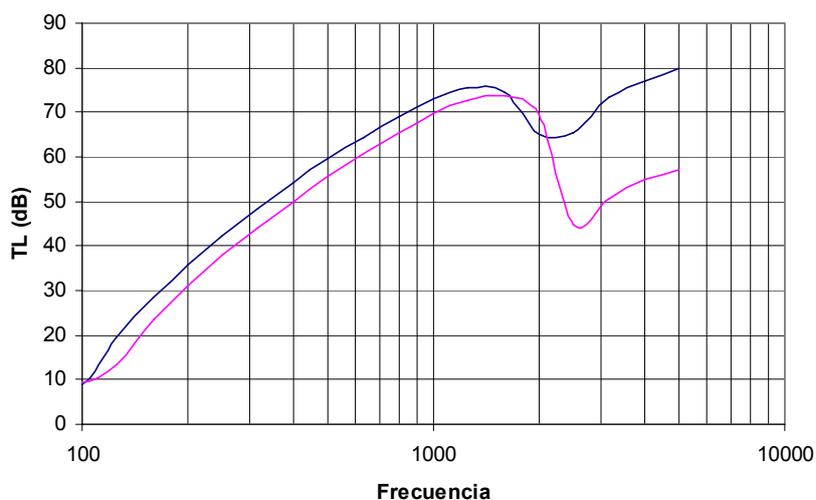
COMPOSITES CON RECICLADOS PARA LA MEJORA DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO

Frecuencia	R(dB)							
	FV 40 + RC + FV 40	FV 20 % + RC + FV 40 %	FV 20 % + RC + FV 20 %	FV 40 % + RC + PYL	PYL + RC + PYL	2 x FV 20 % + RC + 2 x PYL	2 x FV 20 % + RC + 2 x FV 40 %	2 x FV 20 % + RC + 2 x FV 20 %
50	15,5	15,5	15,5	14,6	13,1	17	15,8	15,8
63	14,9	14,9	14,9	14,9	13,7	12,4	11	11
80	10,5	10,5	10,5	13,5	13,3	17	24,6	24,6
100	15,2	15,2	15,2	9,2	9,5	28,2	33,9	33,9
125	25,7	25,7	25,8	19,6	13,5	36,4	41,3	41,3
160	33,8	33,9	33,9	28,6	23,4	43,4	47,9	47,9
200	40,5	40,5	40,6	35,8	31,1	49,5	53,8	53,8
250	46,8	46,8	46,8	42,4	38	55,5	59,7	59,7
315	52,6	52,7	52,8	48,4	44,2	61,3	65,3	65,4
400	58,2	58,3	58,4	54,1	50	66,8	70,9	70,9
500	63,4	63,6	63,8	59,5	55,5	72,3	76,2	76,3
630	68,3	68,6	68,9	64,5	60,7	77,5	81,4	81,6
800	72,7	73,2	73,7	69,1	65,5	82,6	86,4	86,6
1000	76,2	77,1	78,1	72,9	69,7	87,4	91,1	91,5
1250	77,9	79,7	81,6	75,4	72,8	91,8	95,2	95,9
1600	75	79,1	83,3	74,3	73,8	95,4	98,4	99,7
2000	64,3	70,4	81	65,1	69,3	97,4	99,3	101,9
2500	53,5	71,5	66,3	65,4	44,7	97,2	95,4	102,3
3150	60,2	79,6	56,7	73,5	50,7	88,5	89,4	95,7
4000	62,9	83,3	61,8	77	55	80	95,1	77,3
5000	66,6	86	63,5	79,9	57,2	83,5	97,5	81,6
Rw(C:Ctr)	50(-7;-15;-9;-21)	51(-8;-16;-10;-22)	51(-8;-16;-10;-22)	45(-8;-16;-7;-18)	41(-6;-13;-5;-15)	61(-6;-14;-15;-28)	66(-5;-13;-19;-33)	66(-5;-13;-19;-33)
Rg(dBA)	43,3	43,4	43,4	37,4	35,6	55,6	61	61

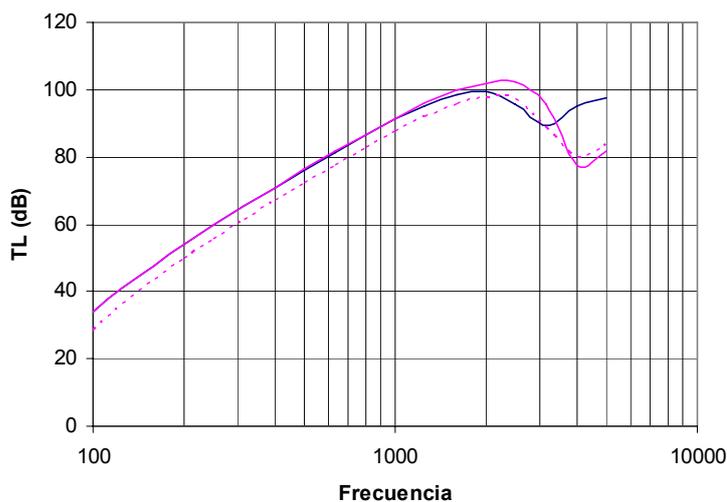
Tabla 5: Comparativa de resultados de aislamiento acústico de tabiquería doble obtenidos ordenados para la familia de refuerzo mediante fibra de vidrio, intercalando placas de diferente porcentaje de refuerzo de fibras.



Gráfica 11: Comparativa para familia Composites de Fibra de Vidrio mediante 1 x placa simple + material absorbente acústico + 1 x placa simple. En Azul, placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% combinada con placa reforzada de Fibra de Vidrio del 40%, en Rosa, placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% combinada con placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% y en línea punteada Rosa, placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% combinada con placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20%.



Gráfica 12: Comparativa para familia Composites de Fibra de Vidrio mediante 1 x placa simple + material absorbente acústico + 1 x PYL. En Azul, placa reforzada de Fibra de Vidrio del 40% combinada con Placa de Yeso Laminado, en Rosa, Placa de Yeso Laminado combinada con Placa de Yeso Laminado.



Gráfica 13: Comparativa para familia Composites de Fibra de Vidrio mediante 2 x placa simple + material absorbente acústico + 2 x placa simple. En Azul, 2 x placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% combinada con 2 x placa reforzada de Fibra de Vidrio del 40%, en Rosa, 2 x placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% combinada con 2 x placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% y en línea punteada Rosa, 2 x placa reforzada de Fibra de Vidrio del 20% y 2 x Placa de Yeso Laminado.

Como se observa no se consigue mejora apreciable para las familias de composites, para las soluciones con Placa de Yeso Laminado, si que se observan diferencias apreciables, pero cualquier solución a base de placas tipo composite es más eficiente que las formadas por Placas de Yeso Laminado.

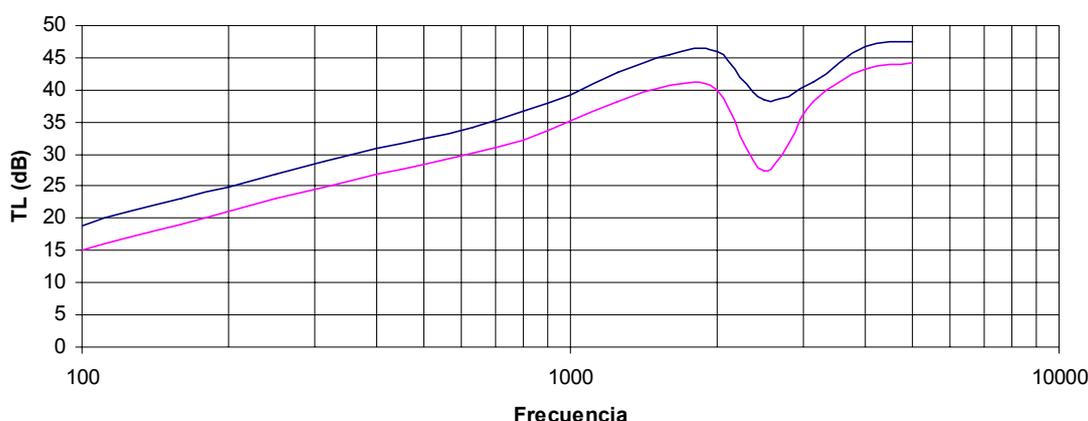
DIVISORIO DOBLE A BASE DE PLACAS PERFORADAS:

Ahora veamos lo que sucede si estudiamos el comportamiento acústico de estos materiales si se realiza un porcentaje del 30 % de perforaciones de 1 cm. de diámetro. Este hecho cambia el concepto de utilización, ya que abre la posibilidad a su uso como material absorbente acústico o a una mezcla de ambos conceptos, mediante la suma de una cara absorbente acústico y otra impermeable, que consentirá su uso en situaciones en las que se deseen dividir dos estancias mediante una solución que aisle del ruido entre las estancias pero que a su vez provea a una de ellas de un mecanismo que permita disminuir el tiempo de reverberación en la misma.

Frecuencia	R(dB)			
	FV 20 % (Perforado 30%) + RC + FV 20 %	FV 20 % (Perforado 30%) + RC + 2 x FV 20 %	PYL 20 % (Perforado 30%) + RC + PYL 20 %	PYL 20 % (Perforado 30%) + RC + 2 x PYL 20 %
50	13,1	18,8	9,7	15
63	15	20,8	11,4	17
80	16,9	22,9	13,2	18,9
100	18,9	24,9	15,1	21
125	21	27	17,1	23
160	23	29	19,1	25,1
200	25	31	21,1	27
250	27	33	23,1	29
315	29	35	25	31
400	30,8	36,8	26,8	32,8
500	32,5	38,5	28,5	34,5
630	34,1	40,2	30,1	36,2
800	36,6	42,3	32,2	38,3
1000	39,3	45,3	35,2	41,2
1250	42,6	48,7	38,3	44,4
1600	45,5	51,5	40,8	46,8
2000	46,1	52,1	40	46
2500	38,4	44,4	27,5	33,2
3150	41,1	46,9	38,2	43,9
4000	46,8	52,6	43,1	48,6
5000	47,6	53,3	44,2	49,8
Rw(C;Ctr)	37(-2;-5;-1;-8)	43(-2;-5;-1;-8)	32(-2;-4;-1;-6)	38(-2;-4;-1;-7)
Rg(dBA)	35,4	41,4	30,4	36,4

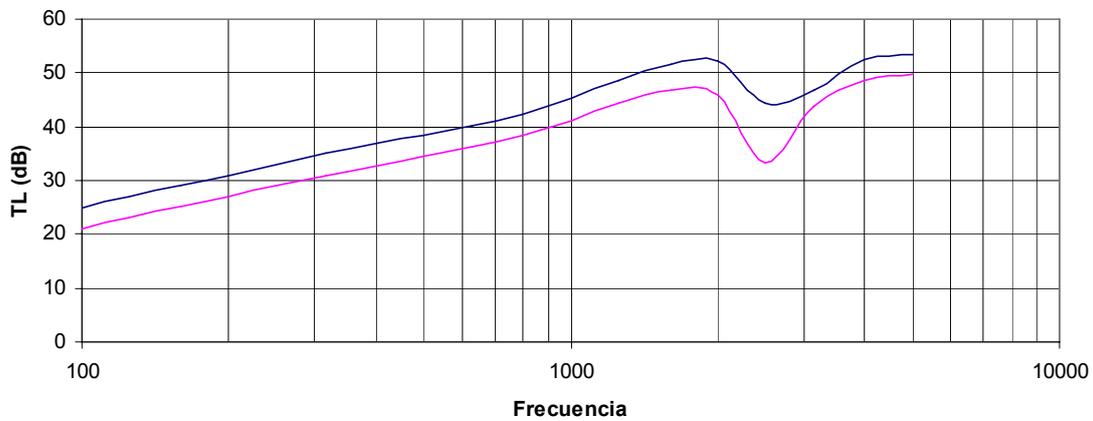
Tabla 6: Comparativa de resultados de aislamiento acústico de tabiquería doble obtenidos ordenados para placas perforadas con índice de perforación del 30 %.

Aislamiento Placa Perforada + RC + Placa Impermeable



Gráfica 14: Comparativa para familia Composites de Fibra de Vidrio mediante 1 x placa simple perforada al 30% + material absorbente acústico + 1 x placa simple. En Azul, placa de Fibra de Vidrio del 20% con un índice de perforación del 30% y en Rosa, Placa de Yeso Laminado con un índice de perforación del 30%.

Aislamiento Placa Perforada + RC + 2 x Placa Impermeable



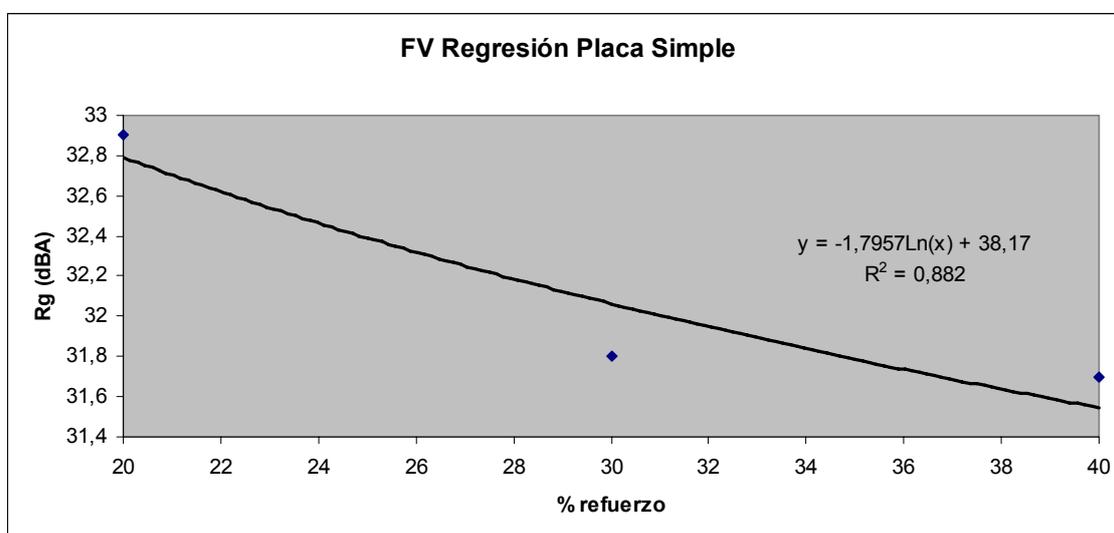
Gráfica 15: Comparativa para familia Composites de Fibra de Vidrio mediante 2 x placa simple perforada al 30% + material absorbente acústico + 2 x placa simple. En Azul, placa de Fibra de Vidrio del 20% con un índice de perforación del 30% y en Rosa, Placa de Yeso Laminado con un índice de perforación del 30%.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que el sistema mejora el aislamiento acústico conseguido con el mismo sistema de placa de yeso laminado en unos 5 o 6 dBA.

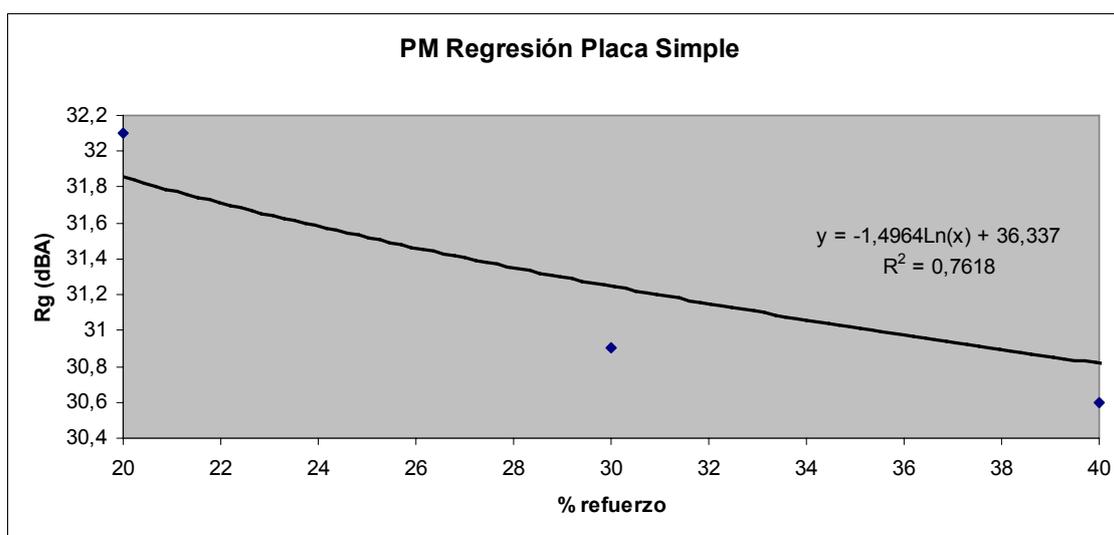
A su vez se puede extraer la mejora en la frecuencia crítica del sistema frente a la de la placa de yeso laminado, ya que para este último sistema su frecuencia es más acusada que para el sistema composite, presentando de esta manera una merma menor del aislamiento acústico a dicha frecuencia.

III.4.- REGRESIÓN

De los datos de las mediciones obtenidas por la empresa de Girona en conjunción con los datos obtenidos de las mediciones llevadas a cabo por la EPSG-UPV, se extraerán gráficas de comportamiento en aislamiento acústico en función del porcentaje de fibras incorporadas al elemento base, con ello se obtendrán datos estadísticos los cuales permitirán la determinación de una curva de regresión, esta curva describirá la tendencia del aislamiento acústico de dicho material en función del porcentaje de fibras incorporadas y de ello se extraerá una fórmula matemática que caracterice el comportamiento acústico del material en función del porcentaje de fibras incorporadas al mismo.



Gráfica 16: Curva de regresión para placa simple y familia Fibra de Vidrio.



Gráfica 17: Curva de regresión para placa simple y familia Fibra de Poliéster.

IV.- CONCLUSIONES

Del estudio de los materiales de las 3 familias, se obtiene la conclusión de ser materiales sin poder absorbente acústico, por lo que no se podrán usar como revestimientos interiores de recintos, si no todo lo contrario ya que presentan una elevada resistencia al flujo, por lo tanto se trata de materiales acústicamente impermeables. Debido a la frecuencia crítica que presentan, para optimizar los materiales se determinaron como espesores óptimos para las placas un rango de espesores entre 13 y 15 mm, similares a las placas utilizadas comercialmente en los sistemas autoportantes, por lo que se podrían implementar mediante los mismos sistemas comerciales, sin tener que recurrir a la fabricación de perfiles específica para su uso comercial.

Como se ve en los resultados, para las diferentes familias estudiadas, la regresión tiende a disminuir el aislamiento acústico cuando se aumenta el porcentaje de fibra incorporada a la solución base (este fenómeno es contrario a lo esperado, ya que a mayor porcentaje de fibra mayor elasticidad presentará el material, pero ello también viene influenciado por la frecuencia crítica obtenida según el porcentaje de concentración, lo cual nos indica que la frecuencia crítica disminuye cuando aumenta el porcentaje de refuerzo de fibras y con ello empeora el índice de aislamiento acústico, debido a que la frecuencia crítica está más próxima a los 500 Hz conforme aumenta el porcentaje de refuerzo por fibras).

Al distinguir entre familias, vemos que existe una mejora en el índice de aislamiento, cuando hablamos del compuesto por fibras de vidrio, este hecho se debe a que dicho material tiene una masa mayor que el resto, lo cual por la ley de masas le incrementa de partida unos puntos el índice de aislamiento acústico.

Desde el punto de estudio de utilizar variaciones de placas dentro del mismo divisorio, se observa que la desintonización de las frecuencias críticas no aporta apenas mejora al índice de aislamiento acústico tanto en combinación de placas de diferentes familias como en el caso de combinación de placas de igual familia y diferente porcentaje de refuerzo.

De las soluciones analizadas para particiones dobles que incorporan paneles perforados por una de sus caras, se extrae la conclusión de ser sistemas bastante óptimos si los comparamos con los existentes en el mercado a base de Placas de Yeso Laminado. Este punto es bastante interesante ya que permite la apertura de nuevas aplicaciones como puede ser la separación de unidades de diferentes usos dentro de la misma vivienda, donde las exigencias de aislamiento acústico no sean excesivamente elevadas y exista la necesidad de diseñar dos espacios acústicamente diferentes, como podría ser el caso de separar una estancia en la que se necesiten tiempos de reverberación bajos con otra que no disponga de esta necesidad.

A su vez queda abierta la posibilidad de su uso como pantallas acústicas tanto para el interior de edificaciones como para su uso en ambiente exterior.

V.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se deja abierta la última parte de la investigación mediante la cual se evalúa la posibilidad de utilización de los elementos como placas perforadas, de manera que pudieran ser utilizadas como pantallas acústicas tanto en interior de industrias u oficinas, como en ambientes exteriores.

A su vez se deja abierta la posibilidad de estudio para el uso como baffles acústicos para el acondicionamiento acústico de recintos especiales.

REFERENCIAS

- [1]- UNE-EN ISO 10534-1:2002: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 1: Método del rango de onda estacionaria.
- [2]- UNE-EN ISO 10534-2:2002: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.
- [3]- ASTM D3641 - 10 Standard Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastic Molding and Extrusion Materials.
- [4]- ASTM D618 - 08 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing.
- [5]- ISO 527-5:1997; Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites.
- [6]- ISO 178:2001 Plastics; Determination of flexural properties.
- [7]- OOKURA K., SAITO Y. (1978). "Transmission loss of multiple panels containing sound absorbing materials in a random incidence field", *Internoise* 78, 637-642.
- [8]- Delany M. E., Bazley E. N. (1970), Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics*, 3, 2, 105 -116.
- [9]- Miki Y. (1990a), Acoustical properties of porous materials – modifications of Delany-Bazley models-, *Journal of the Acoustical Society Jpn (E)*, 11, 1, 19-24.
- [10]- Allard J. F., Champoux Y. (1992). New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, *Journal of the Acoustical Society of America* 91, 6, 3346-3353.
- [11]- Alba Fernández, J. Ramis Soriano, J. Comparativa de distintos algoritmos de simulación de particiones multicapa para aislamiento acústico a ruido aéreo. Departamento de Física Aplicada; Escuela Politécnica Superior de Gandia; Universidad Politécnica de Valencia. PACS: 44.55.Rg.
- [12]- Blanes, M., Marco, B., Alba, J., del Rey, M., Escuder, E. Combinación de estructuras sándwich con materiales poliméricos para la mejora de la absorción acústica. V Congreso Ibérico de Acústica, XXXIX Congreso Español de Acústica TECNIACÚSTICA 2008, Simposio Europeo de Acústica, Coimbra (Portugal), 20-22 Octubre 2008.
- [13]- Alba Fernández, J.; Ramis Soriano, J.; Sanchís Rico, V. Coeficiente de absorción en incidencia normal de materiales multicapa basados en lanas de poliéster. *TecniAcústica*, Gandia, 2006.

[14]- Recuero López, M. Sistemas para aislamiento acústico, Brüel & Kjaer.

[15]- Alba Fernández, J.; Ramis Soriano, J., Llinares Galiana, J. Departamento de Física Aplicada. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Politécnica Superior de Gandia. Caracterización de capas impermeables a partir de medidas de aislamiento acústico. PACS: 43.55.n. Tecniacústica Madrid 2000.

[16]- Recuero Lopez, M. (1992) “Acústica arquitectónica –soluciones prácticas”, Editorial Paraninfo.

ANEXO I

```

function TL=capao(m,D,mu,frec,anglim,N)

% TL=capao(m,D,mu,frec,anglim,N)
% m=masa (Kg)
% D=Densidad (Kg/m3)
% mu=, coeficiente de Poisson ó Perdidas?
% frec=[50,]
% anglim=89° (ángulo límite de incidencia)
% N=pasos
% General: Realiza cálculos generales y ajusta la integración
c0=343;
r0=1.21;
paso=anglim/N;
Angulo=[0:paso:anglim]*pi/180;
w = 2.*pi.*frec;
anglim*pi/180;
Deno = sin(anglim*pi/180)^2 / 2;

fc=c0^2*sqrt(m/D)/(2*pi) % Frecuencia critica
% calculo: Barrido frecuencial
for con1=1:length(frec)
    % barrido angular
    FrTL(con1) = 0; % acumulador
    for con2=1:length(Angulo)
        Zm=mu*w(con1)*m*(frec(con1)/fc).^2*(sin(Angulo(con2))^4)+j*w(con1)*m*(1-
(frec(con1)/fc)^2*(sin(Angulo(con2))^4));
        Z11=r0*c0/cos(Angulo(con2));
        Z12=Z11+Zm;
        C01112=abs(Z11/Z12)^2;
        CO12I=4*abs(Z12/(Z12+Z11))^2;
        EcuacionImp = C01112*CO12I*cos(Angulo(con2))*sin(Angulo(con2));
        FrTL(con1)= FrTL(con1) + EcuacionImp;
    end
    FrTL(con1) = (FrTL(con1)/Deno)*paso*pi/180;
    TL(con1) = -10*log10(FrTL(con1));
end
figure(2)
semilogx(frec,TL)
texto=['TL segun Ookura & Saito. Capa impermeable. fc = ' num2str(fc) ' Hz'];

title(texto)
xlabel('f (Hz)')
ylabel('TL (dB)')
grid

```