



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Predicción del aislamiento acústico a ruido aéreo de  
sistemas multicapa con láminas de alta densidad

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Acústica

AUTOR/A: Balagué García, María

Tutor/a: Alba Fernández, Jesús

Cotutor/a: Rey Tormos, Romina María del

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# **Predicción del aislamiento acústico a ruido aéreo de sistemas multicapa con láminas de alta densidad**

***TESIS DE MÁSTER***

Autor:

**Maria Balagué García**

Tutores:

**D. Jesús Alba Fernández**

**D. Romina del Rey Tormos**

***GANDIA, Agosto 2022***

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
1.1 Objetivos	7
1.2 Estructura del proyecto	7
<b>2. Fundamentos teóricos i normativa</b>	<b>8</b>
2.1 Fundamentos teóricos	8
2.2 Normativa	11
<b>3. Caracterización de materiales</b>	<b>12</b>
3.1 Resistividad al flujo	12
3.2 Rigidez dinámica	16
3.3 Módulo de Young	19
3.4. Factor de pérdidas	20
<b>4. Aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión a escala</b>	<b>21</b>
4.1. Instrumentación utilizada	22
4.2 Ensayos realizados	22
4.3 Resumen	26
<b>5. Simulación</b>	<b>27</b>
5.1. INSUL	28
5.2 Simulaciones con soluciones de ChovA	31
<b>6. Interpretación de resultados</b>	<b>35</b>
<b>7. Método inverso</b>	<b>37</b>
7.1 Modelo matemático	37
7.2 Modelo inverso	39
7.3 Resultados y comparativas	39
<b>8. Conclusiones</b>	<b>44</b>
8.1 Conclusiones	44
8.2 Futuras líneas de investigación	45
<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>



- Anexos I. Fichas de resultados de rigidez dinámica
- Anexos II Ficha de resultados de resistividad al flujo
- Anexos III Fichas de resultados de TL a escala
- Anexos IV Pruebas de simulación de soluciones de CEC
- Anexos V Pruebas de simulación con configuraciones con PYL
- Anexos VI. Pruebas de simulación de soluciones de ChovA
- Anexos VII. Resultados de TL a escala con placas de pladur nuevas.
- Anexos VIII. Código del método inverso

**Resumen:** En los últimos tiempos la tendencia para mejorar los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo en edificación es la inserción de láminas de alta densidad. Se insertan láminas de polietileno (reticulados, extruidos, etc.), viscoelásticas, geotextiles, etc., de bajo espesor con el fin de mejorar el aislamiento acústico en un rango de frecuencia o en su valor global, modificando muy poco el espesor de la solución completa. En este trabajo se pretenden repasar y aplicar modelos y herramientas de predicción de aislamiento acústico que incluyan este tipo de láminas, caracterizar algunas de estas láminas (polietilenos y viscoelásticas) y realizar comparativas con ensayos controlados para ver el grado de fiabilidad de las predicciones. Esto permitirá validar o no, diferentes modelos y herramientas predictivas.

**Palabras claves:** lámina, polietileno, viscoelástico, aislamiento acústico a ruido aéreo, predicción acústica, modelos matemáticos, rigidez dinámica, módulo de young, resistencia al flujo, INSUL.

**Abstract:** In recent times, the trend to improve the results of airborne sound insulation in buildings is the insertion of high-density foils. Low thickness polyethylene sheets (cross-linked, extruded, etc.), viscoelastic, geotextiles, etc. are inserted to improve the acoustic insulation in a frequency range or in its global value, modifying very little the thickness of the complete solution. The aim of this work is to review and apply sound insulation prediction models and tools that include this type of sheeting, to characterise some of these sheets (polyethylene and viscoelastic) and to carry out comparisons with controlled tests to see the degree of reliability of the predictions. This will make it possible to validate, or not, different models and predictive tools.

**Key words:** foil, polyethylene, viscoelastic, airborne sound insulation, acoustic prediction, mathematical modelling, dynamic stiffness, young's modulus, flow resistance, INSUL.

### *Agradecimientos*

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de varias personas, instituciones y empresas.

En primer lugar, agradecer a mis tutores Jesús Alba y Romina del Rey en ofrecerme la oportunidad de trabajar con el equipo del Centro de Tecnologías Físicas de la Universitat Politècnica de València en su Campus de Gandía, para realizar proyectos acústicos innovadores. Por vuestra infinita paciencia y dedicación en ayudarme a desarrollar y finalizar este trabajo. Mencionar a mis compañeros Joan y Juan Carlos por vuestra disposición a colaborar y hacer más amena las tareas en el laboratorio.

Agradezco también a la empresa ChovA por facilitar materiales para completar el estudio y por promover proyectos de investigación con la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

Y por último a mis padres, por darme la posibilidad de realizar el Máster de Ingeniería acústica. Gracias por vuestro apoyo incondicional.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado la preocupación por tener una vida sana y saludable. Esta forma de vida va ligada a la calidad del sueño y el descanso de las personas, demostrado en muchos estudios, como la OMS. Esta falta de sueño puede provocar el deterioro de salud y la aparición de enfermedades.

Entre uno de los mayores factores que altera el sueño, es el ruido. Se trata de un sonido no deseado y percibido de forma desagradable, como por ejemplo, escuchar la televisión del vecino, el local de debajo de tu vivienda, o las voces de los vecinos, entre otras muchas situaciones.

Estos problemas de vivienda se deberían ser subsanados o disminuirlo con los requisitos mínimos de habitabilidad recogidos en el Código Técnico de la Edificación, donde aparece un apartado que pretende obtener un confort acústico en la edificación, el documento básico de protección frente al ruido (DB-HR) [1]. Con esta guía técnica acústica se definen muchas soluciones constructivas acústicas. No obstante, el cumplimiento de dichos objetivos en muchos casos no garantiza que el usuario esté satisfecho, por esta razón, surgió la norma 74201:2021 [19]. Esta novedosa norma presenta un esquema de clasificación acústica de edificios analizando con características acústicas de los recintos.

Nos encontramos en un momento importante en la investigación de la acústica para la construcción, porque, se está dando valor a nuevas soluciones acústicas mejoradas sin conformarse en llegar al mínimo fijado en la norma. Hay una necesidad de investigar nuevos sistemas acústicos que sean óptimos para sufragar los problemas de aislamiento acústico de la actualidad, como en este proyecto [11], donde se aplica una solución acústica con doble funcionamiento, permite aislar y acondicionar un recinto con una única solución acústica. Otro problema actual en el sector de la construcción es la fábrica de material contaminante. Es una realidad que el futuro de todo material es el de ser sostenible, por esta razón, a la hora de buscar materiales acústicos, se están desarrollando nuevos materiales ecológicos o sostenibles con el medio ambiente, como en esta investigación [10], en el que se elaboró y validó un material absorbente, fabricado a base de lana de oveja.

Uno de los grandes problemas que se encuentran al diseñar soluciones de aislamiento acústico a ruido aéreo, es obtener grandes mejoras con menor espesor. Por ello, en los últimos años se han incorporado láminas de alta densidad a las nuevas soluciones multicapa para incrementar el aislamiento acústico a ruido aéreo. Dichos materiales, al utilizarse para la construcción, deben cumplir unos requisitos mínimos que en España se presentan en el DB-HR [1] donde se definen las normas a seguir para determinar los parámetros acústicos de los materiales. Por ejemplo, uno de los estudios más recientes [21], se diseñó una solución multicapa compuesta por dos capas de fieltro textil y en medio una capa viscoelástico, combinándola con placas de yeso perforadas. En este proyecto se investigó la contribución de mejora en aislamiento acústico a ruido aéreo, al mismo tiempo que mejorar de acondicionamiento. Para llegar a los ítems, realizaron ensayos de predicción de aislamiento acústico y caracterizaron PYL perforadas y el material textil.

El presente trabajo trata de comprobar la validez de las normativas de caracterización de parámetros acústicos y mecánicos existentes para **materiales viscoelásticos** y, por otra parte, aplicar modelos y herramientas fiables de predicción de aislamiento acústico que incluya soluciones multicapa con las láminas de alta densidad.

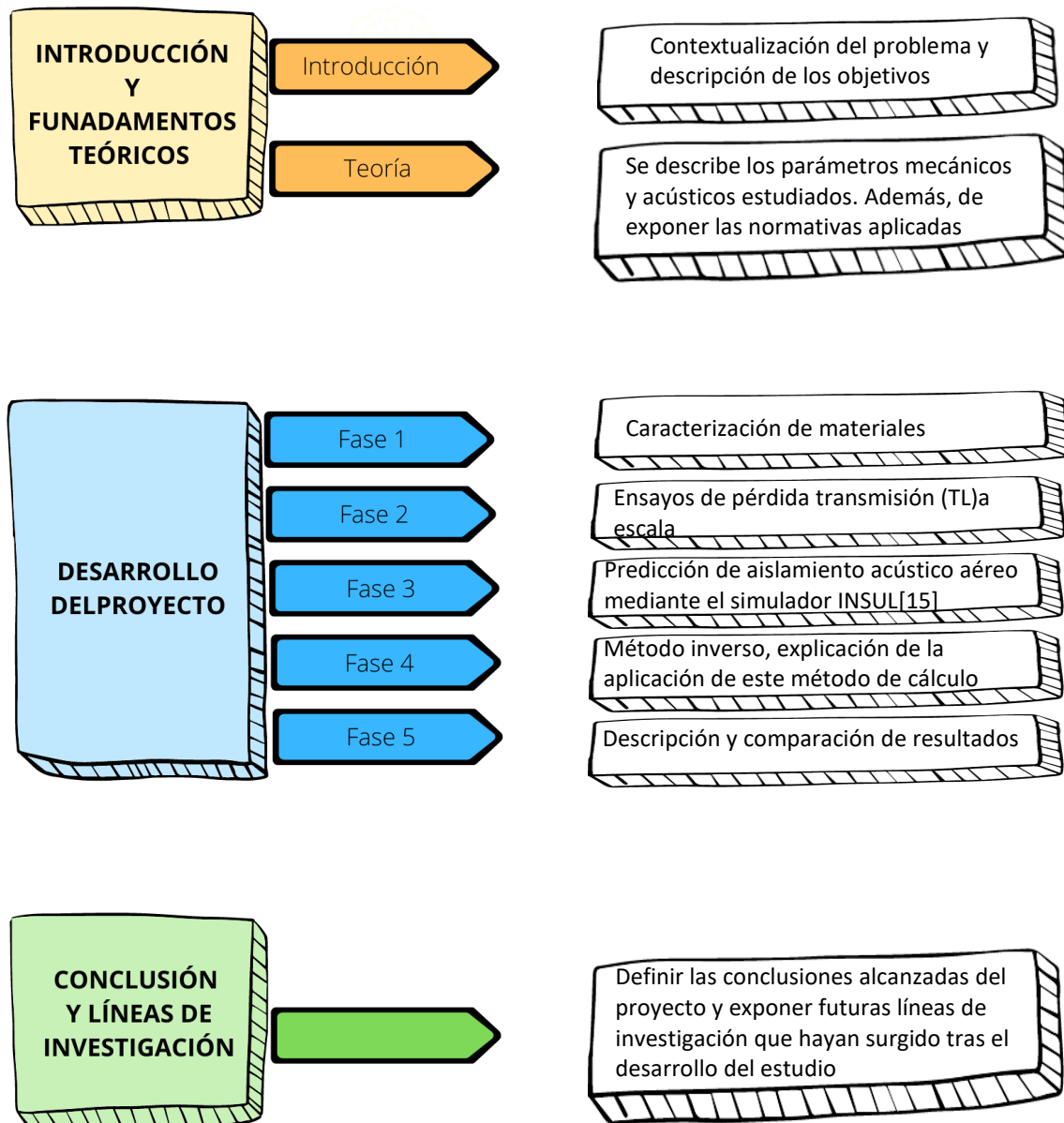
## 1.1 OBJETIVOS

En el presente trabajo estudia la viabilidad de procedimientos normativos de obtención de parámetros mecánicos y elásticos esenciales para estimar el aislamiento acústico a ruido aéreo. El estudio se centra en materiales de alta densidad, ya que son muy utilizados en los sistemas constructivos actualmente. Por ello, se han definido los siguientes objetivos:

- Verificar el procedimiento de caracterización de parámetros mecánicos y acústicos de materiales de láminas de alta densidad con las normativas vigentes.
- Comprobar la fiabilidad de medidas de TL (*Transmission Loss*) a escala con soluciones acústicas multicapa con materiales de alta densidad.
- Comprobar la fiabilidad de modelos y herramientas predictivas de aislamiento acústico a ruido aéreo con soluciones multicapa.

## 1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

La tesina presentada tiene tres partes diferenciadas mostrada en el siguiente esquema:





## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y NORMATIVA

Antes de exponer el proceso del proyecto y sus resultados, es preciso, explicar brevemente los fundamentos teóricos en los que se basa la predicción de aislamiento acústico a ruido aéreo. Además de citar las normativas aplicadas en los ensayos realizados.

### 2.1 Teoría de predicción de aislamiento acústico a ruido aéreo

El programa INSUL [15] permite predecir el nivel de aislamiento en paredes, suelos y techos. En este proyecto se centrará en el funcionamiento del cálculo del índice de reducción sonora en superficies verticales. Para poder entender el desarrollo del proyecto, se explica, a continuación, los fundamentos teóricos y físicos en los que se basa para predecir el nivel de aislamiento acústico. En el manual [15] se distingue tres sistemas: paneles simples, paneles dobles y paneles triples.

#### Paneles simples

Las paredes simples constan de una única pieza acústicamente homogénea, es decir, está formada por dos caras exteriores conectadas de manera rígida, por lo tanto, se mueven de manera simultánea. Este tipo de panel dispone de un comportamiento que se puede distinguir en 3 zonas, como se muestra en la figura 1.

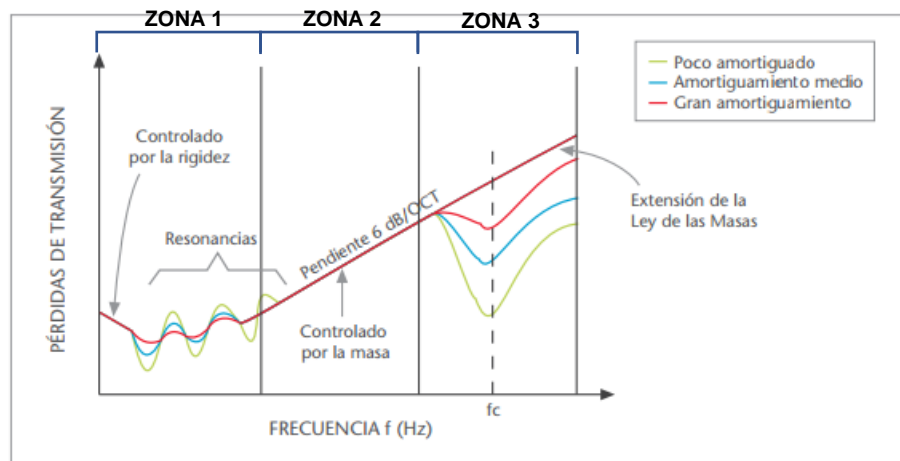


Figura 1: Índice de reducción sonora de una partición simple de una hoja [28]

La **zona 1** sucede cuando  $f < f_0$ , controlado por la **rigidez del sistema**. Este fenómeno ocurre en la banda de bajas frecuencias, cuando está por debajo de la frecuencia de resonancia ( $f_0$ )

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}} \quad [Hz] \quad (1)$$

Siendo:

- s, rigidez de la pared por unidad de superficie.
- m, masa de la partición por unidad de superficie,  $kg/m^2$

Siendo el índice de reducción sonora a ruido aéreo definido con la siguiente ecuación:

$$R = 20 \log_{10} \left( \frac{s}{f} \right) - 74,2 \quad [dB] \quad (2)$$

La **zona 2** controlado por la **ley de masa**. Un sistema cuanto mayor sea su masa, más costosos es la vibración provocada por las ondas incidentes, disminuyendo la energía transmitida.

La ley de masa te permite predecir que la pérdida por transmisión aumenta en 6 dB por cada duplicación de masa de la superficie o frecuencia.

Para campo difuso, se calcula  $R_{0^{\circ}}$  y se resta de 5 A 10 dB. Además, como la impedancia acústica del medio va a través del aire, se puede simplificar la ecuación de la siguiente manera:

$$R_{0^{\circ}} = 10 \log \left( \frac{m\omega}{2\rho_0 c} \right) - (5 \text{ a } 10) \\ = 20 \log_{10}(fm) - 42,4 - (5 \text{ a } 10) \text{ [dB]} \quad (3)$$

Siendo:

- $\omega$ , frecuencia angular de la onda incidente
- $s$ , rigidez de la pared por unidad de superficie.
- $m$ , masa por unidad de superficie del elemento constructivo,  $\text{kg/m}^2$
- $\rho_0$ , densidad del aire,
- $c$ , velocidad del sonido a través en el aire,  $\text{m/s}$
- $f$ , la frecuencia de sonido incidente,  $\text{Hz}$

La **zona 3** tiene en consideración la flexión de la partición, donde aparece el **fenómeno de coincidencia**. Este fenómeno sucede en un sistema sólido, cuando la propagación de la energía acústica se transmite por ondas de flexión. La velocidad de este tipo de ondas depende de una frecuencia, dicha frecuencia se le denomina **frecuencia crítica** ( $f_c$ ). La frecuencia límite inferior en la cual comienza a producirse la coincidencia de la longitud del sonido con la longitud de la onda de flexión, viene dada con la siguiente expresión:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} = \frac{6,4 \cdot 10^4}{d} \sqrt{\frac{\rho(1-\sigma)^2}{E}} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

Siendo:

- $d$ , espesor de la pared,  $\text{m}$
- $\rho_0$ , densidad del panel,  $\text{kg/m}^3$
- $E$ , modulo de Young,  $\text{N/m}^2$
- $\sigma$ , coeficiente de Poisson

### Doble panel

Un sistema constructivo de dos hojas, está formado por dos hojas simples o de varias capas, separadas por una cavidad de aire o relleno de un material absorbente.

La transmisión de vibración de estos sistemas empieza con la excitación de la primera pared, donde incide las ondas acústicas generadas en el emisor. Esta vibración generada, la transmite por aire de la cavidad entre las dos hojas, seguidamente, el estado de vibración que queda en el entramado incide en la segunda hoja, que finalmente la transmite al recinto receptor.

Al propagarse las ondas acústicas por diversos sólidos, se debe tener en cuenta una serie de factores esenciales:

- La masa que corresponde a cada panel.
- Las frecuencias críticas de cada una.

- La frecuencia de resonancia del sistema
- La frecuencia de resonancia del entramado
- La instalación de los materiales

### **Sin material**

Un tabique doble que carece de material absorbente en el entramado tiene un comportamiento de un sistema mecánico masa-muelle-masa. De esta manera, la frecuencia de resonancia provocada por ondas incidentes en un campo difuso se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{\rho_0 c_0^2}{d} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad [Hz] \quad (5)$$

Donde

- d, la distancia entre los dos paneles, m
- $m_1$ , masa por superficie del panel 1, kg/m<sup>2</sup>
- $m_2$ , masa por superficie del panel 2, kg/m<sup>2</sup>

En la cavidad de aire, las ondas acústicas se propagan y reflejan por las caras interiores de cada una, formando ondas estacionarias. La presión sonora en la frecuencia de resonancia se incrementa, causando la disminución del índice de reducción sonora del sistema. Para evitar este hueco de aislamiento en la solución constructiva, se pueden calcular de la siguiente manera:

$$f_{rc} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c \cdot n}{2d} = 170 \frac{n}{d} \quad [Hz] \quad (6)$$

Donde

- d, la distancia entre los dos paneles, m
- n, número entero positivo

### **Con material**

El efecto de transmisión que provoca la aparición de un material absorbente o combinación de ellos es más complejo. Por ello, se ha realizado numerosos proyectos de investigación sobre cálculo y algoritmos de predicción de aislamiento acústico. Se puede encontrar, por ejemplo en Modelo de predicción de aislamiento acústico para paneles simples y multicapa[25], o en [27] o en el proyecto de desarrollo del programa AISLA `aisla2003-texto.doc` (`sea-acustica.es`) [24].

### **Triple panel**

La predicción de transmisión acústica a través de un sistema triple se basa en los mismos principios que para la transmisión a través de paneles dobles, según se puede consultar en el manual de INSUL [15] con ciertas adaptaciones.

## 2.2 NORMATIVA

A continuació, se citan les normatives i legislació que se ha aplicat en el desenvolupament del estudi:

[REAL DECRETO 1371/2007](#), de 19 de octubre, per el que se aprueba el document bàsic «DB-HR Protecció davant el soroll» del Codi Tècnic de la Edificació i se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de març, per el que se aprueba el Codi Tècnic de la Edificació

[UNE-EN ISO 717-1:2021](#). Avaluació de l'aïllament acústic en els edificis i de les elements de construcció. Part 1: Aïllament a soroll aeri. (ISO 717-1:2020).

[UNE-EN ISO 10140-1:2022](#). Acústica. Mesura en laboratori de l'aïllament acústic de les elements de construcció. Part 1: Regles d'aplicació per productes específics. (ISO 10140-1:2021)

[UNE-EN ISO 10140-2:2022](#). Mesura en laboratori de l'aïllament acústic de les elements de construcció. Part 2: Mesura de l'aïllament acústic al soroll aeri. (ISO 10140-2:2021)

[UNE-EN ISO 10534-2:2002](#). Acústica. Determinació del coeficient d'absorció acústica i de la impedància acústica en tubs d'impedància. Part 2. Mètode de la funció de transferència. (ISO 10534-2:1998).

[UNE-EN 9053-1:2020](#). Acústica. Materials per aplicacions acústiques. Determinació de la resistència al flux d'aire. (ISO 9053:2018).

[UNE EN 12354-6: 2004](#). Estimació de les característiques acústiques de les edificacions a partir de les característiques de els seus elements. Part 6: Absorció sonora en espais tancats. (EN 12354-6:2003).

[UNE-EN 29052-1:1994](#). Acústica. Determinació de la rigidesa dinàmica. Part 1: materials utilitzats sota sòls flotants en vivendes. (ISO 9052-1:1989). (Versió oficial EN 29052-1:1992).

[UNE-EN ISO 12680-1:2007](#). Mètodes d'assaig per productes refractaris. Part 1: Determinació del mòdul de Young dinàmica (MOE) per excitació de la vibració per impuls. (ISO 12680-1:2005).

### 3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

El proyecto tiene como objetivo evaluar modelos de predicción de aislamiento acústico a ruido aéreo, en este caso, se ha utilizado la herramienta INSUL[15]. Este programa necesita una serie de parámetros acústicos y mecánicos para poder calcular y aproximar el resultado de mejora de aislamiento acústico. El software permite configurar diferentes soluciones de aislamiento acústico a ruido aéreo, en estas configuraciones se distingue dos tipos de materiales: absorbentes y materiales.

Los de tipo “absorbentes”, son aquellos materiales que tienen un alto coeficiente de absorción y se colocan en la cavidad de aire entre las hojas de fábrica o masas (placas de pladur, embellecedores, etc.), y están definidos por la resistencia al flujo (Rayls/m), espesor (mm) y densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).

El segundo tipo, “materiales”, son todos aquellos que aportan masa a la solución acústica. Para saber el comportamiento de esta categoría es necesario introducir los siguientes parámetros: módulo de Young (GPa), factor de pérdidas, espesor (mm) y densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).

Por esta razón, el estudio se ha empezado con ensayos y cálculo de parámetros mecánicos y acústicos de los materiales a estudiar.

#### 3.1 RESISTIVIDAD AL FLUJO

La resistividad al flujo de aire ( $\text{kPa s/m}$ ), es uno de los parámetros exigidos por el DBHR para todos aquellos materiales que se utilicen en la construcción con aplicaciones acústicas. Además, de ser unas de las características a de materiales a indicar en el simulador INSUL [15], en el caso del tipo “absorbentes”.

La norma que emplear es la ISO UNE-EN 29053:2020 [9], donde define la metodología de determinación de la resistencia al flujo del aire de materiales porosos, mediante el método de flujo de aire estático.

Se basa en la relación entre la diferencia de presión de aire a través del material, con respecto a la presión atmosférica, y el índice volumétrico del flujo de aire. Una vez se tiene este valor, se puede obtener la resistencia al flujo específica,  $R_s$ , asimismo se puede calcular la resistividad al flujo del aire del material,  $\sigma$ .

El procedimiento que se ha empleado es el Ingard & Dear, se trata de un método indirecto usando tubos de impedancia, indicado en el anexo A de la norma citada, como medida de estimación de la resistividad al flujo. Dicho método ha sido probado y validado en numerosos estudios [16][17], para la estimación de la resistividad al flujo del aire de materiales porosos. En este proyecto, también, se ha probada en materiales de tipo espuma.

El montaje del ensayo consta de un tubo de impedancia cilíndrico con terminación rígida, una fuente sonora y dos micrófonos, calibrados previamente. La figura 1 se muestra el esquema del método en cuestión.

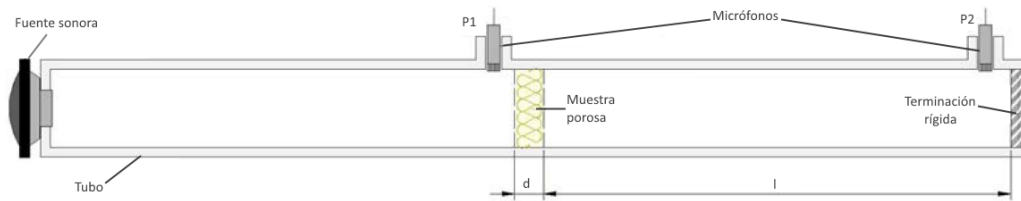


Figura 2: Esquema de método Ingard & Dear

Por una parte, se tiene el micrófono P1, mide la presión sonora justo enfrente de la muestra, con la fuente sonora al final de esta terminación. Y, por otra parte, el micrófono P2 que mide la presión sonora justo delante del de extremo del tubo con terminación rígida.

El altavoz va emitiendo tonos puros de baja frecuencia cuyas longitudes de onda ( $\lambda$ ) produzcan un número impar de cuartos de longitud de onda, entre la distancia de la muestra y la terminación rígida ( $d+l$ ). Además, con la condición de  $\lambda \gg 1,7D$ , donde  $D$  es el diámetro del tubo. Finalmente, la diferencia de presiones permite obtener la resistividad al flujo del aire de la muestra.

En los ensayos realizados se ha utilizado ruido estacionario de banda ancha y un analizador FFT de doble banda (B & K Pulse), que permite obtener la parte imaginaria de la función de transferencia a partir de las señales recibidas por los micrófonos, de esta manera, se puede calcular la resistividad al flujo de aire.

### Instrumentación utilizada

Para la realización de los ensayos descritos se ha utilizado la siguiente instrumentación y materiales:

Equipo	Marca	Tipo	Nº serie
Micrófono con preamplificador	Brüel & Kjaer	4190-L-1	2486246
Micrófono con preamplificador	Brüel & Kjaer	4190-L-1	2486247
Calibrador	Brüel & Kjaer	4231	3019977

Las señales se han recogido con *Brüel & Kjaer Data Acquisition Frontend* y procesado mediante el software PULSE. La figura 2 se detalla el montaje que se utilizó.

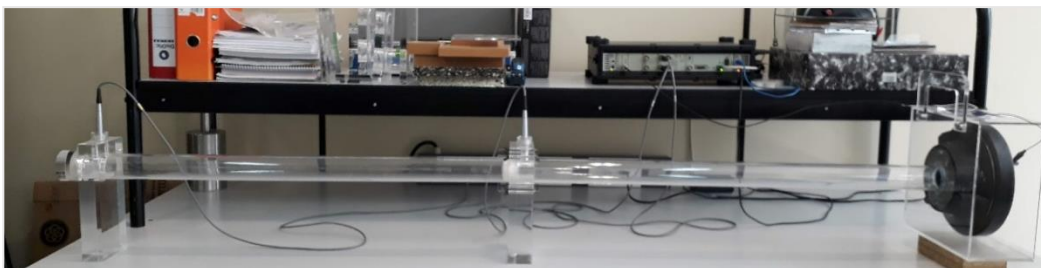


Figura 3 : Detalle del montaje de I&D con instrumentación utilizada

### Ensayos realizados

Material	Imagen	Resistividad (kRayls/m)	Espesor (cm)	Incertidumbre (kRayls/m)
Fieltex		16,42	1,5	±0,20
ChovAPREN 80/4		11,33	4,1	±0,24
ChovAPREN 80/8		5,49	8,5	±0,12
ChovAPREN 110/2		27,97	1,8	±0,59
ChovAPREN 110/3		26,95	3,1	±0,43
ChovAPREN 160/2		34,92	2	±1,65

ChovAIMPACT 5		555,66	0,5	±26,79
ChovAIMPACT 10		2889,57	1,2	±174,29
ChovAIMPACT PLUS		1431,48	0,8	±39,44
ChovAIMPACT 5RT		1269,42	0,6	±100
ChovAIMPACT 10RT		3901,69	0,9	±346,94

Tabla 1: Valores de Resistividad (kRayls/m)

En la tabla 1 está indicado los materiales ensayados y sus respectivos resultados. Se puede observar que aquellos con un gran valor de resistividad tienen una incertidumbre muy alta. Esto sucede porque los materiales no son porosos, y la normativa que se utiliza está hecha para materiales porosos, isotrópicos y heterogéneos.



### 3.2 RIGIDEZ DINÁMICA

Otras de las características exigidas por el DBHR es la rigidez dinámica, determinada con la norma UNE EN-ISO 29052-1:1994[8], donde especifica el método de ensayo de obtención de la rigidez dinámica utilizando suelos flotantes en viviendas.

La norma evalúa el parámetro por unidad de superficie,  $s'$ , y su magnitud se expresa en meganewtons por metro cúbico ( $MN/m^3$ ).

Esta característica mecánica, estudia la capacidad de actuar como un muelle, es decir, relaciona la fuerza y el desplazamiento dinámico del material. Para el desarrollo de los ensayos, se necesita un mínimo de 3 muestras de dimensión 200mm x 200mm.

Para poder medir, se coloca primero la muestra de forma horizontal y encima la placa de carga. En la placa metálica se inserta el acelerómetro conectado al sonómetro, pudiendo registrar las medidas. La señal de excitación generada en estos ensayos ha sido impulsiva, mediante un martillo con diferentes puntas: metálica, goma y plástico. En la figura 3 muestra el esquema del montaje del ensayo y la figura 4 una respuesta teórica del ensayo.

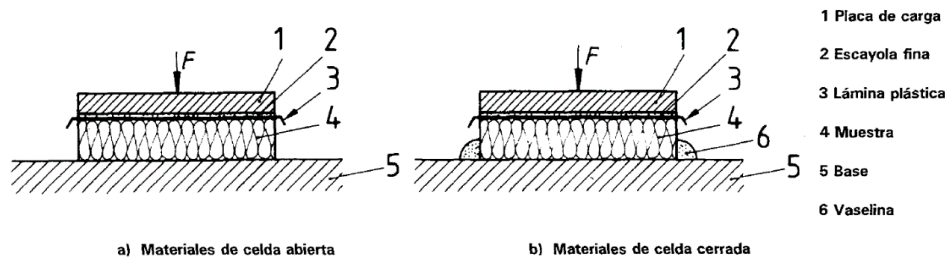


Figura 4 : Esquema de montaje del ensayo UNE-EN ISO 29052-1:1994

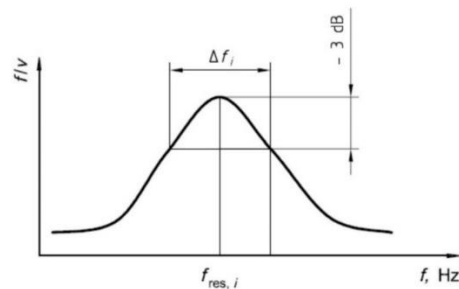


Figura 5 : Respuesta clásica del ensayo

La ecuación de la rigidez dinámica,  $s'_t$ , calculada es la siguiente:

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t f_R^2 \quad [MN/m^3] \quad (7)$$

donde  $m'_t$  es la masa total por unidad de superficie de la muestra ensayada ( $kg/m^2$ ), y  $f_R$  se trata de frecuencia de resonancia formada a partir del sistema montado (Hz). El resultado de la rigidez dinámica aparente depende de la resistividad al flujo [18], ya que este parámetro se basa en la rigidez real en función de la rigidez del aire que contiene. Por esta razón en la norma hay unas condiciones:

- Si la resistividad al flujo de aire es muy alta,  $r > 100 \text{Kpas}/m^2$ , o baja resistividad al flujo de aire,  $r < 10 \text{ kpas}/m^2$ , entonces la expresión de la rigidez dinámica es la siguiente:  $s' = s'_t$

- Si la resistividad al flujo de aire es media,  $100 \text{Kpas/m}^2 < r < 10 \text{ kpas/m}^2$ , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$s' = s'_t + \frac{P_0}{d * \epsilon} \quad [\text{MN/m}^3] \quad (8)$$

Siendo  $P_0$  la presión atmosférica,  $d$  el espesor de la muestra ensayada con la carga estática y  $\epsilon$  la porosidad del material. Cuando el valor de  $P_0 = 0,1 \text{ MPa}$  y la porosidad sea  $0,9$ , se tiene una corrección en el término de  $\frac{0,111}{d}$ .

### Instrumentación utilizada

Para la realización de los ensayos descritos se ha utilizado la siguiente instrumentación y materiales:

Equipo	Marca	Tipo	Nº serie
Acelerómetro piezoeléctrico	Brüel & Kjaer	4370	1850803
Acondicionador de señal	Brüel & Kjaer	2635	19113319
Martillo	Brüel & Kjaer	8206	-
Sonómetro	Brüel & Kjaer	2270(G4)	3011089

Tabla 2: Especificaciones del equipo utilizado

Además de los dispositivos descritos en la tabla 2, se utilizó diferentes placas de acero de acero de  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  de masa:  $7,6 \text{ kg}$ ,  $8,1 \text{ kg}$  y  $8,3 \text{ kg}$ . En la figura 5 se presenta el esquema de montaje del ensayo.

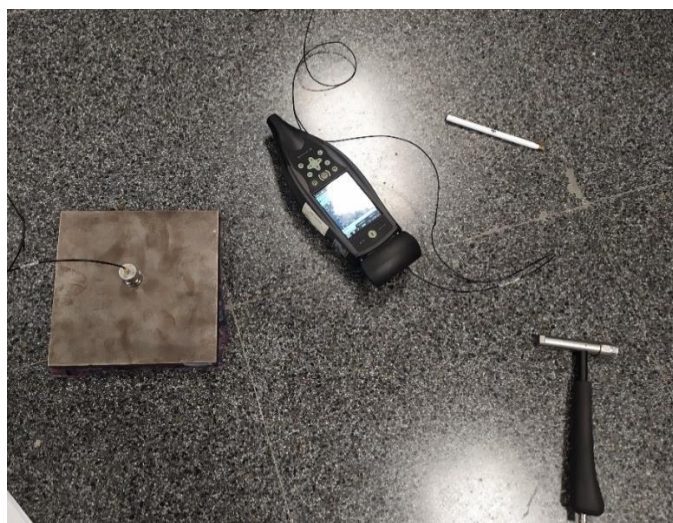
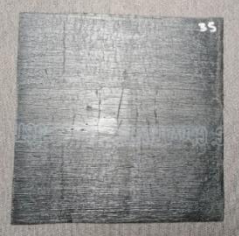







Figura 6 : Fotografía con la instrumentación utilizada

### Ensayos realizados

Material	Imagen	Rigidez dinámica S' (MN/m <sup>3</sup> )	Espesor (mm)	Incertidumbre e s' (MN/m <sup>3</sup> )
VISCOLAM 35		2024	2,0	103,9
VISCOLAM 65		2034	4,0	13,7
VISCOLAM 100		1845	6,0	105,4
ChovAIMPACT 5		54	5,0	3,1
ChovAIMPACT 10		29	11,0	1,8
ChovAIMPACT PLUS		28	8,6	1,0



ChovAIMPACT 5 RT		33	5,0	3,4
ChovAIMPACT 10 RT		25	10,0	4,4

Tabla 3: Valores Rigidez dinámica aparente

Los materiales estudiados tienen propiedades elásticas y todos tienen una alta resistividad al flujo del aire, por tanto, la rigidez dinámica se obtiene  $s' = s't$

Las muestras que presentaron muchas dificultades de ensayo fueron: Viscolam35, 65 y 100. Se trata de materiales de base bituminosa aditiva con polímeros, de alta densidad y con poco espesor. Propiedades que no favorecen la medida. Se puede observar en la tabla 3 como los resultados del tipo Viscolam con respecto a los demás son muy elevados y con una incertidumbre dudosa.

### 3.3 MÓDULO DE YOUNG

El módulo de Young es una propiedad elástica característica de cada material. El siguiente parámetro se ensaya siguiendo la norma UNE ISO 12680-1:2007 [13], pero entre las limitaciones de la norma, solo contempla a materiales en forma de barra rectangulares y varillas cilíndricas. Por esta razón se ha investigado otra manera de determinar el módulo de elasticidad. En la tesis [12] se consiguió demostrar que existe una relación entre la rigidez dinámica, el espesor y el módulo de Young.

$$E = S' * e \quad [MN/m^2] \quad (9)$$

Una vez se ha conseguido la rigidez dinámica de los materiales, resultados en la tabla 3, se ha calculado el módulo de elasticidad. La siguiente tabla muestra los valores y su incertidumbre.

Material	Módulo de Young E(MN/m <sup>2</sup> )	Incertidumbre
VISCOLAM 35	4,05	0,29
VISCOLAM 65	8,14	0,21
VISCOLAM 100	11,07	0,66
ChovAIMPACT 5	0,27	0,17
ChovAIMPACT 10	0,32	0,44
ChovAIMPACT PLUS	0,24	0,02
ChovAIMPACT 5 RT	1,65	0,02
ChovAIMPACT 10 RT	2,50	0,01

Tabla 4: Valores del módulo de Young

### 3.4. FACTOR DE PÉRDIDAS

El factor de pérdidas ( $\eta$ ) se trata de una característica que evalúa la dificultad de disipación de la energía vibratoria. Para ello, la energía llega al máximo en función de la frecuencia, que para un sistema mecánico viene dado por la frecuencia de resonancia, al igual que la rigidez dinámica, figura 5. A partir de una caída de ancho de banda de -3dB  $\Delta f$ , y la frecuencia de resonancia ( $f_{res}$ ) se tiene la siguiente relación:

$$\eta_i = \frac{\Delta f}{f_{res}} \quad (10)$$

A continuación, se muestra los cálculos obtenidos:

Material	Factor de pérdidas
VISCOLAM 35	0,40
VISCOLAM 65	0,34
VISCOLAM 100	0,42
ChovAIMPACT 5	0,46
ChovAIMPACT 10	0,32
ChovAIMPACT PLUS	0,38
ChovAIMPACT 5 RT	0,23
ChovAIMPACT10 RT	0,25

*Tabla 5: Resultados del factor de pérdidas*

## 4. AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO EN CÁMARA DE TRANSMISIÓN A ESCALA (TL)

El objetivo de este proyecto como se ha explicado en el punto 1.1, es validar y calibrar modelos matemáticos y herramientas de predicción al aislamiento acústico a ruido aéreo. Por ende, se quiere calibrar los resultados del simulador INSUL[15], explicado en el punto 5, con medidas reales de aislamiento acústico a ruido aéreo de los materiales caracterizados en este trabajo. Dado que los ensayos de cámara de transmisión normalizado requieren muestras de entre 10-12 m<sup>2</sup>, hace encarecer los costes y desperdiciar excesivamente los materiales. Se optó por realizar mediciones de pérdida de transmisión a escala (figura 7), reduciendo el tamaño de las muestras a 0,40 m<sup>2</sup>.

Dichas cámaras se encuentran en los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, el estudio de su construcción se encuentra en este trabajo [20].



*Figura 7: Cámara de transmisión acústica de dimensiones reducidas*

La norma aplicada en este ensayo es UNE-EN ISO 10140-2:2022 [4], donde se especifica los pasos a seguir. Se coloca un micrófono al recinto receptor L2, y otro al recinto L1. En este caso, se colocó un altavoz en cada recinto, para agilizar las medidas. En la sala receptora se mide el tiempo de reverberación y el ruido de residual, ambas con 6 posiciones de micro. A continuación, se mide los niveles de presión sonora simultáneamente en la sala receptora y emisora, con 5 posiciones de micrófono y 2 de fuente. Las posiciones de micrófono fueron desplazadas gracias a una cámara web, instalada en ambas cámaras, y dirigida remotamente mediante una página web.

## 4.1 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

El equipo utilizado se muestra en la siguiente tabla:

Equipo	Marca	Tipo	Nº serie
Sonómetro	Brüel & Kjaer	2270(G4)	3011089
Micrófono ½	Brüel & Kjaer	4189	3180898
Preamplificador	Brüel & Kjaer	ZC-0032	28138
Sonómetro	Brüel & Kjaer	2250	3009341
Micrófono ½	Brüel & Kjaer	4189	3181108
Preamplificador	Brüel & Kjaer	ZC-0032	4359
Calibrador	Brüel & Kjaer	4231	3019977
Altavoz	Genelec	6010A	PM6056558
Altavoz	Genelec	6010A	PM6056560

Tabla 6: Especificaciones del equipo usado

## 4.2 ENSAYOS REALIZADOS

En la segunda fase del proyecto se quiere evaluar diferentes soluciones acústicas que tiene la empresa ChovA, y realizar otras de nuevas intentando encontrar otro sándwich con mejor resultados. Para ello, se han realizado un total de 13 configuraciones, y 3 muestras de cada configuración, las fichas de cada configuración están en el anexo III:

- Sándwich PYL12+PYL12
- Sándwich PYL12+Plus Fieltex+PYL12
- Sándwich PYL12+VISCOLAM 35+PYL12
- Sándwich PYL12+VISCOLAM 100+PYL12
- Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 35+PYL12
- Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 65+PYL12
- Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 100+PYL12
- Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 35+ Plus Fieltex +PYL12
- Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 65+ Plus Fieltex +PYL12
- Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 100+ Plus Fieltex +PYL12
- Sándwich PYL12+ VISCOLAM 35+Plus Fieltex+ VISCOLAM 35+PYL12
- Sándwich PYL12+ VISCOLAM 65+Plus Fieltex+ VISCOLAM 65+PYL12

A continuación, se mostrará la gráfica del índice de reducción acústica de cada configuración. Dadas las reducidas dimensiones de la cámara de transmisión acústica, solo deben considerarse los valores a partir de 630 Hz [20]

### Sándwich PYL12+PYL12

Esta configuración se realizó para tener un punto de partida de la contribución de solo dos placas de yeso laminado de 12 mm (PYL).

f (Hz)	R (dB)
100	23,9
125	26,1
160	19,7
200	12,7
250	20,9
315	24,6
400	22,4
500	22,6
630	21,5
800	25,1
1000	24,3
1250	25,8
1600	25,6
2000	26,8
2500	26,9
3150	27,6
4000	29,4
5000	32,2

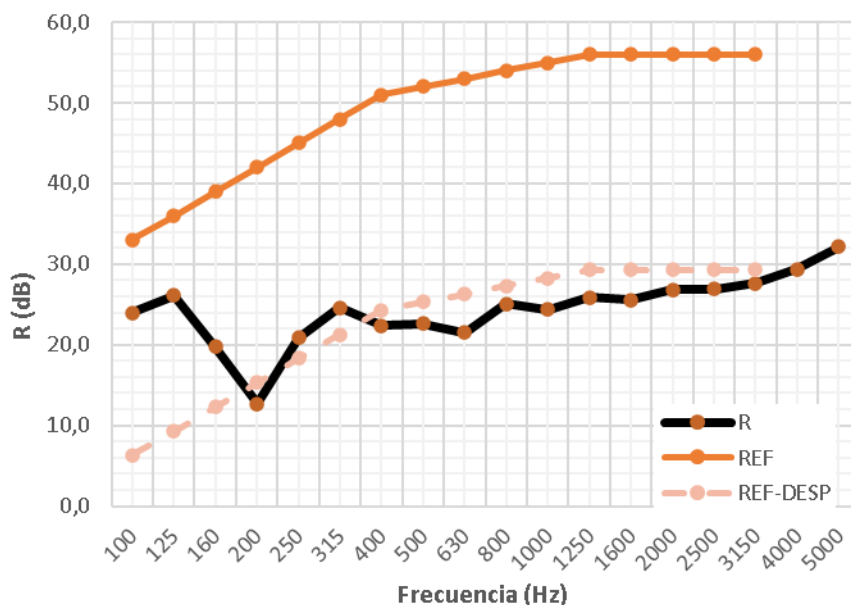


Tabla 7: PYL12+PYL12. Índice de reducción acústica por tercia de octava (dB)

### Sándwich PYL12+Plus Fieltex+PYL12

Formado por una placa de yeso de 12 mm (PYL12), Plus Fieltex (PFX) de 15 mm y otra placa de yeso laminado de 12 mm.

f (Hz)	R (dB)
100	26,3
125	23,4
160	16,5
200	11,6
250	21,4
315	30,6
400	30,3
500	27,9
630	33,4
800	36,5
1000	37,4
1250	39,2
1600	39,1
2000	42,7
2500	44,9
3150	43,9
4000	45,4
5000	48,2

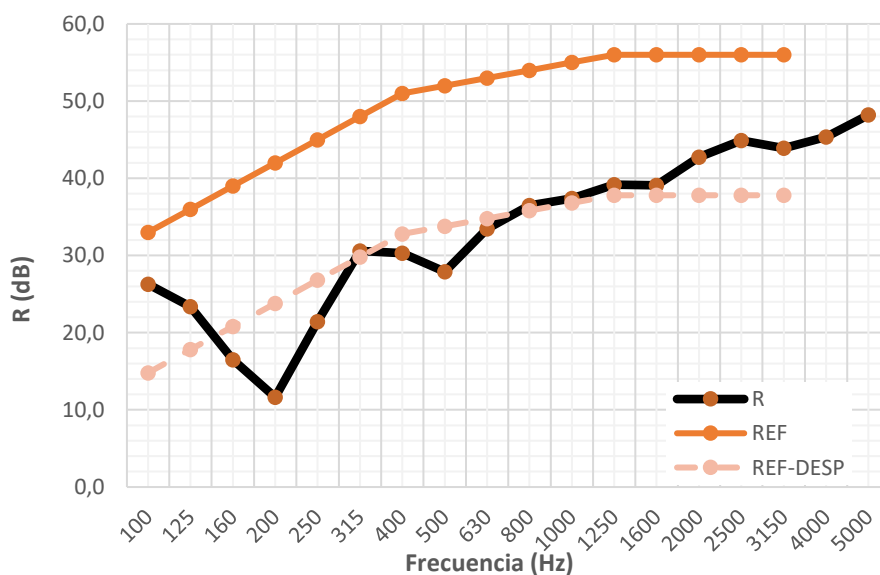


Tabla 8: PYL12+Plus Fieltex+PYL12. Índice de reducción acústica por tercia de octava (dB)



### Sándwich PYL12+ VISCOLAM 35+PYL12

Compuesto por una placa de yeso laminado 12 mm (PYL12), Viscolam 35 (V35) de 2 mm y otra placa de 12 mm.

f (Hz)	R (dB)
100	29,0
125	29,1
160	23,7
200	15,4
250	23,9
315	28,1
400	23,7
500	24,3
630	24,0
800	25,8
1000	29,0
1250	32,2
1600	32,5
2000	32,7
2500	33,7
3150	33,1
4000	33,6
5000	36,9

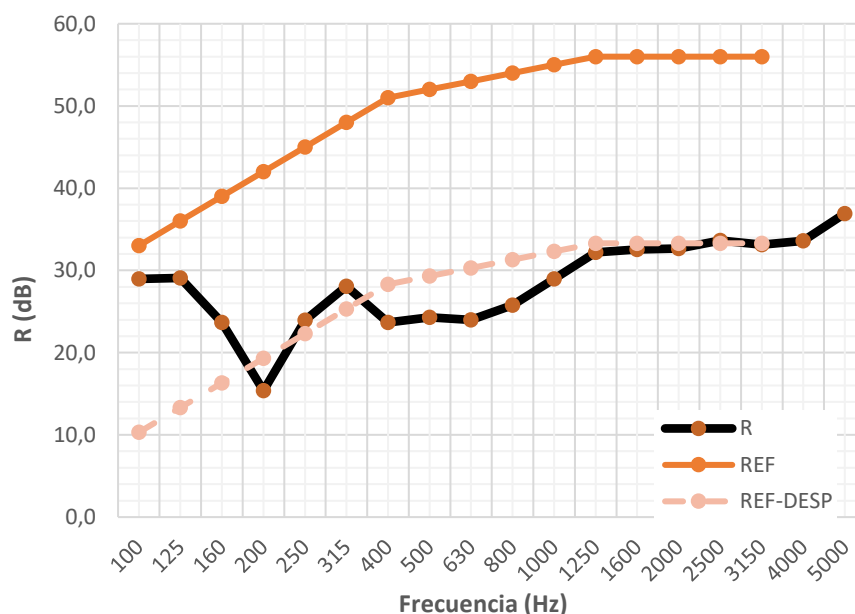


Tabla 9: PYL12+V35+PYL12. Índice de reducción acústica por tercia de octava (dB)

### Sándwich PYL12+ VISCOLAM 100 +PYL12

Compuesto por una placa de yeso laminado 12 mm (PYL12), Viscolam 100 (V100) de 2 mm y otra placa de 12 mm.

f (Hz)	R (dB)
100	29,6
125	30,4
160	24,9
200	14,2
250	24,5
315	28,9
400	26,3
500	26,4
630	26,9
800	27,8
1000	28,4
1250	30,3
1600	31,0
2000	31,6
2500	32,3
3150	33,3
4000	34,7
5000	36,9

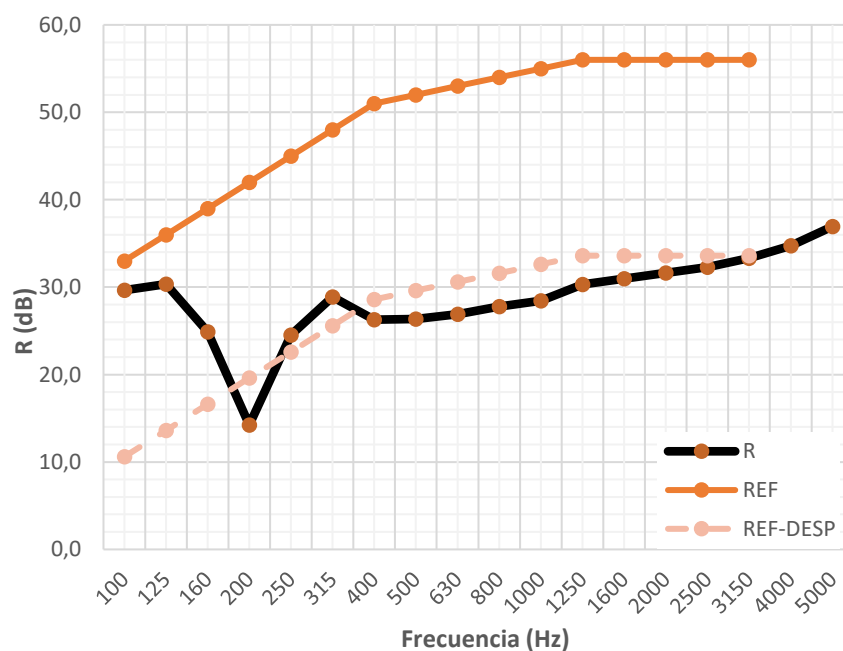


Tabla 10: PYL12+V100+PYL12. Índice de reducción acústica por tercia de octava (dB)

### Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 35 +PYL12

Compuesto por una placa de yeso laminado 12 mm (PYL12), Plus Fielte, Viscolam 35 (V35) de 2 mm y otra placa de 12 mm.

f (Hz)	R (dB)
100	24,8
125	21,7
160	16,4
200	11,6
250	20,4
315	27,4
400	26,7
500	29,3
630	31,4
800	34,9
1000	35,3
1250	35,8
1600	37,4
2000	41,4
2500	43,5
3150	43,4
4000	45,5
5000	47,1

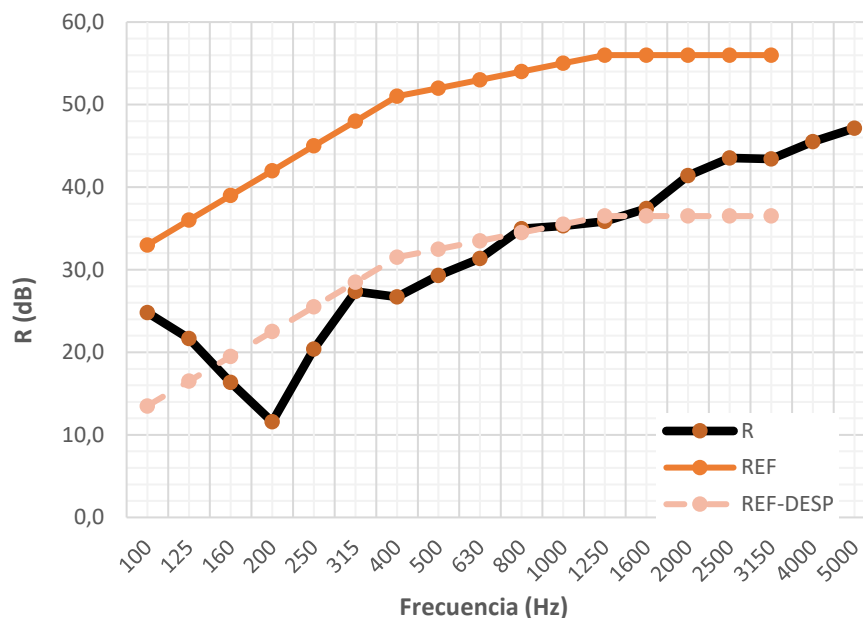


Tabla 11: PYL12+PFX+V35+PYL12. Índice de reducción acústica por tercia de octava (dB)

### Sándwich PYL12+Plus Fieltex+ VISCOLAM 100 +PYL12

Compuesto por una placa de yeso laminado 12 mm (PYL12), Plus Fieltex, Viscolam 100 (V100) de 2 mm y otra placa de 12 mm.

f (Hz)	R (dB)
100	27,3
125	25,7
160	19,9
200	17,6
250	25,7
315	32,9
400	34,2
500	34,2
630	37,7
800	40,0
1000	40,6
1250	42,3
1600	42,5
2000	46,2
2500	47,0
3150	46,4
4000	47,6
5000	51,2

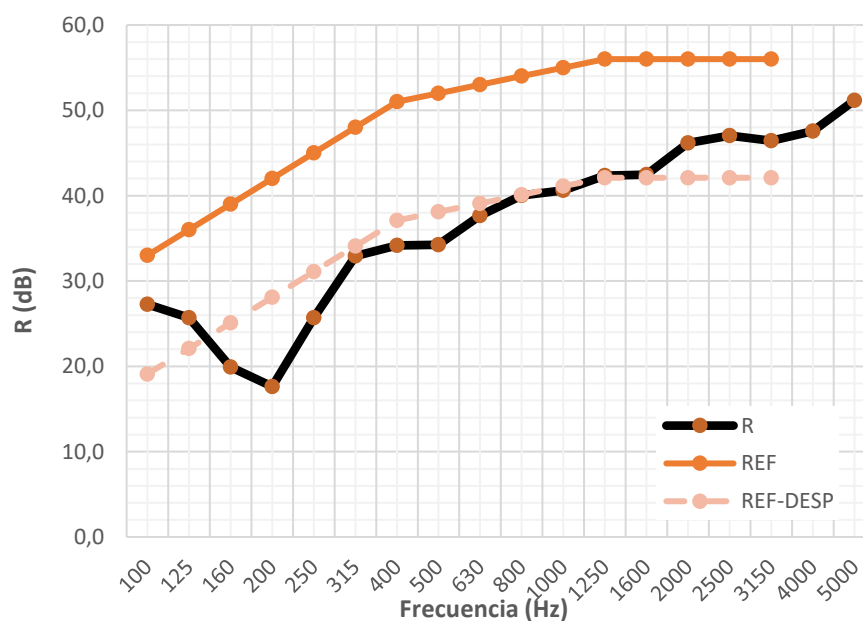


Tabla 12: PYL12+PFX+V100+PYL12. Índice de reducción acústica por tercia de octava (dB)

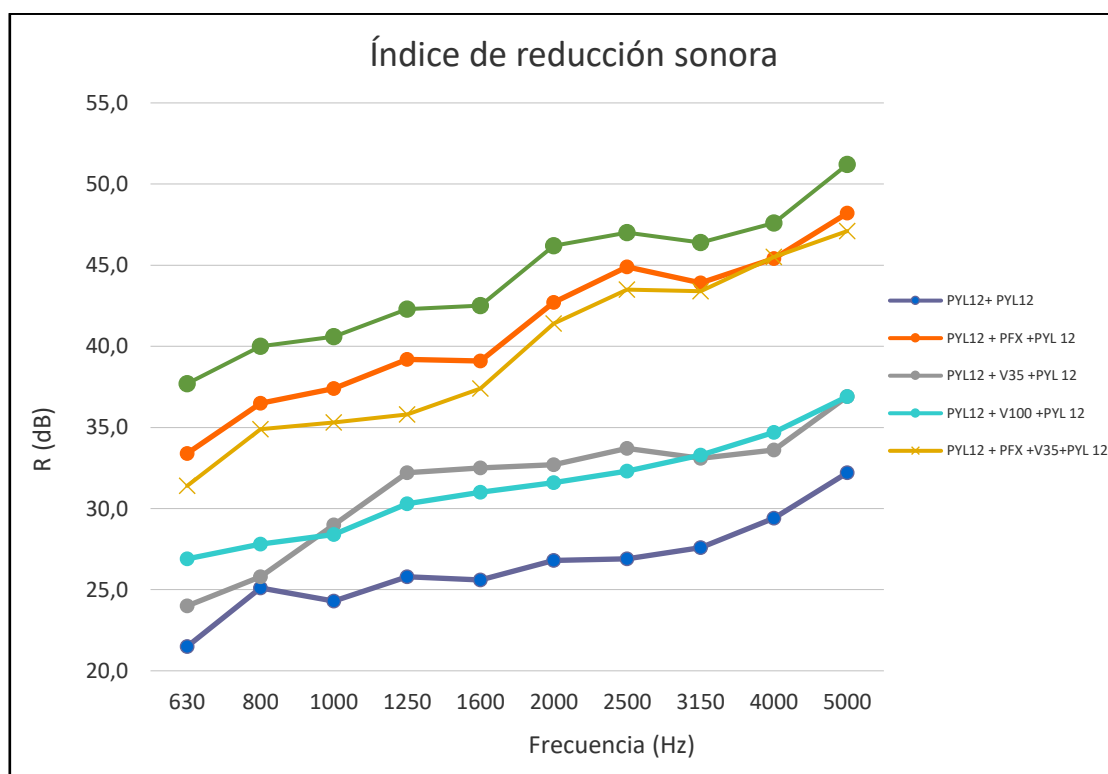
### 4.3 RESUMEN

Tras realizar todos los ensayos, se muestra los resultados de aquellos que posteriormente se introducirán en el simulador, en la tabla 13 y la gráfica 1.

Como era de esperar, la solución con más masa y mayor espesor es la que ha dado mejor resultados, PYL12 + PFX+V100+ PYL 12. Sin embargo, aparece una anomalía en los resultados de la configuración PYL12 + PFX+V35+ PYL 12, debería dar mejor resultados al menos a medias frecuencias. En su lugar, se puede ver como aparece un valle entre 800 Hz y 1600 Hz.

f (Hz)	R (dB)					
	PYL12 + PYL12	PYL12 + PFX + PYL 12	PYL12 + V35 + PYL 12	PYL12 + V100 + PYL 12	PYL12 + PFX+V35 + PYL 12	PYL12 + PFX+V100 + PYL 12
630	21,5	33,4	24,0	26,9	31,4	37,7
800	25,1	36,5	25,8	27,8	34,9	40,0
1000	24,3	37,4	29,0	28,4	35,3	40,6
1250	25,8	39,2	32,2	30,3	35,8	42,3
1600	25,6	39,1	32,5	31,0	37,4	42,5
2000	26,8	42,7	32,7	31,6	41,4	46,2
2500	26,9	44,9	33,7	32,3	43,5	47,0
3150	27,6	43,9	33,1	33,3	43,4	46,4
4000	29,4	45,4	33,6	34,7	45,5	47,6
5000	32,2	48,2	36,9	36,9	47,1	51,2

Tabla 13: Resultados de los ensayos de TL



Gráfica 1: Comparativa del índice de reducción acústica por tercios de octava I (UNE-EN ISO 10140-2:2011)

## 5. SIMULACIÓN

En la tercera fase del proyecto, tiene como objetivo comprobar las configuraciones ensayadas y validar ambos procedimientos como posibles herramientas de diseño para soluciones acústicas. A la hora de crear o adecuar configuraciones de aislamiento acústico, se suele utilizar un software de predicción, entre los más comerciales están INSUL [15], dBKaisla[22] y SoundFlow [23], o para investigación AISLA [24]. En este proyecto se trabajará con INSUL [15], ya que es uno de los programas de predicción más utilizados.

En los siguientes puntos de este apartado, se detallarán y explicarán los pasos a seguir del proceso. En primer lugar, se introdujo los parámetros mecánicos de los materiales caracterizados, posteriormente, se definió el entorno de simulación. El tercer punto de esta fase, se calibró los materiales con configuraciones de soluciones del Catálogo informático de elementos constructivos (CEC) [26]. Una vez testeado el programa con soluciones ya conocidas, se procede a comprobar las configuraciones ensayadas en el laboratorio, punto 4.3. Finalmente se compara los resultados obtenidos con INSUL [15] y los datos obtenidos mediante las medidas por cámara de transmisión (TL).

### 5.1. INSUL

#### Materiales introducidos

El programa INSUL[15] te permite la creación/e importación de nuevos materiales. En el presente trabajo se han añadido materiales de tipo “*absorbentes*” y “*material*”.

Los de tipo **absorción** son aquellos materiales porosos, su finalidad es disipar las ondas acústicas incidentes. A mayor porosidad del material, corresponde a una mayor capacidad de absorción, ya que dificulta la transmisión del sonido a través del material. Para definir nuevos absorbentes es necesario lo siguientes parámetros:

- Espesor (mm)
- Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)
- Resistencia al flujo (Rayl/m)



Name: Fieltex PLUS\_1\_ECO

categoria: Eco Material

tipo:

Fabricante: ChovA

Thickness: 15,00 (mm)

Density: 55,55 (kg/m3)

R1: 16420,00 Rayl/m

[Color selection bar]

Figura 8: Ventana donde se caracteriza materiales absorbentes en INSUL[ 15]

Seguidamente, se muestra una tabla con todos los materiales ensayados en el proyecto:

Material	Espesor (mm)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia al flujo (Rayl/m)
Filtro Textil*	15,00	55,55	16420
ChovANAPA*	40,00	18,77	1200
ChovAPREN 80/4	41,00	94,04	11330
ChovAPREN 80/8	85,00	83,29	5490
ChovAPREN 110/2	18,00	142,62	27970
ChovAPREN 110/3	31,00	139,18	26950
ChovAPREN 160/2	20,00	148,45	34920

Tabla 14: Especificaciones de cada material absorbente para INSUL [15]

\*El material Filtro Textil ha sido estudiado en el Trabajo de investigación en el Informe de 22/12/2020 de ensayos para ChovA y ChovANAPA en el Informe de 27/05/2022 de ensayos para ChovA

Respecto a los materiales tipo **material**, son aquellos que proporcionan la masa al sistema, es decir, los paneles o hojas de las particiones. Para poder moldearlos necesitas saber introducir:

- Espesor (mm)
- Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)
- Módulo de Young (GPa)
- Damping (Factor de pérdidas)

Name

categoría

tipo

Fabricante

Thickness  (mm)

Density  (kg/m<sup>3</sup>)

Youngs Modulus  (GPa)

Damping

Anisotropic Ratio

Figura 9: Ventana donde se caracteriza tipo materiales en INSUL [15]

En la tabla siguiente se muestra los resultados obtenidos y medidos de los materiales ensayos en este trabajo. También se añadido otros acabados utilizados usualmente en los trasdosados, para ello se han utilizado valores aproximados.

Material	Espesor (mm)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Damping
LH7 + Filtro +VISCOLAM	95,00	957,00	2,00	0,34
Placa Yeso	12,70	768,00	2,00	0,01
Enlucido de yeso	15,00	1150,00	0,01	0,01
Ladrillo de cerámica doble (LH7)	70,00	800,00	2,00	0,02
Ladrillo perforado	115,00	800,00	2,00	0,02
VISCOLAM 35	2,00	1525,50	0,01	0,40
VISCOLAM 65	4,00	1523,48	0,01	0,34
VISCOLAM 100	6,00	1489,23	0,011	0,42
ChovAIMPACT 5	5,00	15,55	0,01	0,46
ChovAIMPACT 10	10,97	24,29	0,01	0,32
ChovAIMPACT PLUS	8,56	22,54	0,01	0,38
ChovAIMPACT 5 RT	50,00	37,70	0,01	0,23
ChovAIMPACT 10 RT	100,00	52,89	0,01	0,25

Tabla 15: Especificaciones de cada material para INSUL [15]

## Configuración de cálculo

Una vez se ha definido todos los materiales, se procede a configurar el tipo de partición. El programa te permite especificar información sobre el tipo de conexión de la divisoria y correcciones dependiendo del tipo de masas que coloques en el sistema y que influye en el cálculo.

En la figura 10 se ha seleccionado el tipo de flanco que interviene en la pared. A pesar, de que INSUL [15] no predice en sus ecuaciones la influencia de los flancos en el resultado del índice de reducción sonora (R), facilita un indicador visual del nivel de transmisión por flancos que podría experimentar en un edificio típico. Aunque no influya en el cálculo, la opción que se ha escogido para realizar las simulaciones es la conexión con banda elástica en la estructura. Ya que en las soluciones que quieren comparar llevan este tipo de montaje.

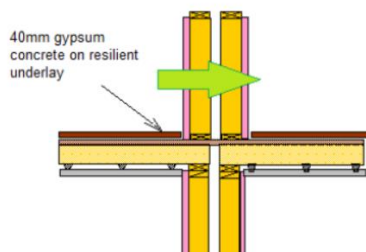


Figura 10: Esquema del tipo de flanco seleccionado [16]

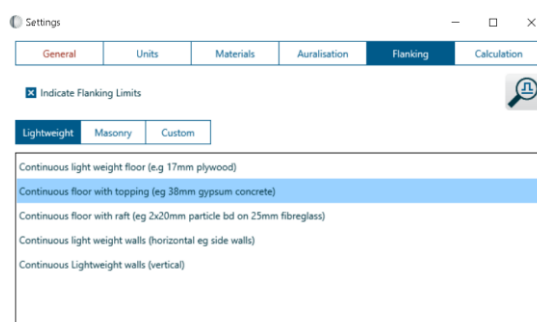


Figura 11: Ajustes del programa para el tipo de flancos

La última configuración que falta por definir son los ajustes de la sala receptora, las dimensiones de la partición y las correcciones que se quieren tener en cuenta en el cálculo. Para este estudio, solo se tendrá en cuenta las referentes a la partición de pared (*Wall/Ceiling*)

- **Corrección de Sewell's:** Los paneles pequeños tienen una baja eficiencia de radiación a bajas frecuencias, por tanto, parecen tener un TL más alto que los paneles más grandes del mismo material. INSUL [15] predice este efecto utilizando una expresión desarrollada por Sewell.
- **Factor de amortiguación:** modela la pérdida de energía que se produce en el borde de un tabique normal donde las ondas sonoras de sonido se transmiten a la estructura circundante. Esto es importante para las particiones muy pesadas en las construcciones normales. Al querer comparar con resultados ensayados en laboratorio, esta opción se ha desactivado.
- **Use Lam Windle:** ajuste de cálculo para perfilera.



Figura 12: Dimensiones y correcciones de una divisoria vertical

Otro ajuste que te permite modular el software es la conexión del **entramado**. Este elemento estructural se instala en la cavidad del tabique o trasdosado, sirve para sujetar el material absorbente colocado entre las dos hojas. La biblioteca del programa contempla una gran variedad de montajes que satisface los más utilizados en la construcción. Contiene cuatro tipos: de fábrica, madera y metal. Para cada tipo se puede modificar los parámetros de instalación:

- **Anchura de la cavidad de aire (mm)**
- **Espaciado entre los montantes (mm)**
- **Anchura del montante (mm)**
- **Profundidad del montante (mm)**

De esta manera se puede moldear una solución acústica lo más ajustada a la realidad, y así, comprobar que tipo de montante es más adecuado para el problema planteado.

## 5.2 SIMULACIONES CON SOLUCIONES DE CHOVA

Antes de simular las configuraciones ensayadas en la cámara de transmisión a escala. Se ha testeado el programa con soluciones del catálogo de elementos constructivos del CTE (CEC) [26]. Con la razón de calibrar los valores de caracterización de ladrillos, y enlucidos de yeso. Ambos materiales pertenecen al tipo “material” ya que incorporan masa al sistema. Se decidió simular las configuraciones más comunes utilizadas en la construcción, detallado en el anexo IV.

Una vez se tiene modelos de soluciones constructivas de referencia, se procede a realizar simulaciones de calibración de las configuraciones realizadas en el presente proyecto, y las propuestas de soluciones para aislamiento acústico a ruido aéreo, todas ellas detalladas en el anexo IV. En el siguiente punto se explicará las configuraciones que dieron más problemas para conseguir los resultados esperados mediante el programa INSUL [15].

Como uno de los objetivos del presente proyecto es comprobar que las normativas existentes sirven para caracterizar materiales de alta densidad, y con los ensayos de TL no podemos comparar los resultados del programa. Se hizo un estudio comparando los resultados del software con los resultados ensayados de la empresa ChovA. Se pudo calibrar todas las configuraciones, detalladas en el anexo VI, excepto una. A continuación, se explica la solución tipo D01 y tipo D04:

### D01: Tabique doble con relleno de compuesto multicapa

El sistema en cuestión consta de dos hojas de fábrica de ladrillo hueco doble de 70 mm de espesor, enlucido de yeso 15 mm. Entre los tabiques hay instalado un compuesto multicapa formada por doble capa de fieltro textil con un espesor de 16mm, y una lámina viscoelástica de alta densidad de 4mm.

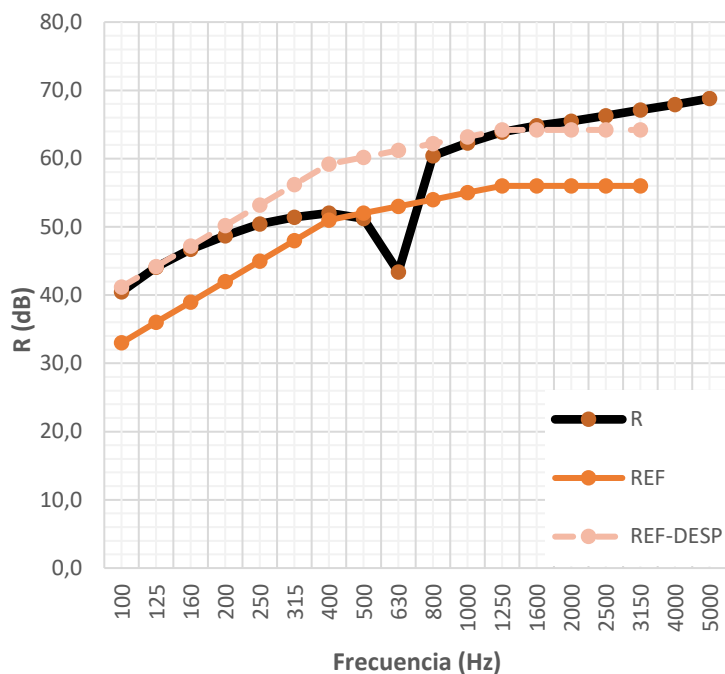
En un principio, se moduló esta solución como triple panel, porque el programa no te permite colocar en el entramado materiales que no sean del tipo “absorbente” ni distintos materiales absorbentes. Como el sistema a evaluar tiene un viscoelástico de alta densidad permitiendo aumentar la masa del sistema con poco espesor, se quiso definir otro panel que corresponde a este material, de esta manera se tenía tres paneles, dos de ladrillo con enlucido y el tercer panel que corresponde a Viscolam 65, con las características ensayadas en el estudio, la tabla 16 muestra las características de los materiales utilizados:

Material	Espesor (mm)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia al flujo (Rayl/m)	Módulo de Young (GPa)	Damping
<b>Ladrillo de cerámica doble (LHGF7)</b>	70,00	800	-	2,00	0,020
<b>Viscolam 65</b>	4,00	1523,00	-	0,01	0,340
<b>Filtro Textil*</b>	15,00	55,55	16420	-	-
<b>Enlucido de Yeso</b>	15,00	1150	-	0,01	0,010

Tabla 16: Parámetros mecánicos de los materiales utilizados para D01



f (Hz)	R (dB) INSUL	R (dB) ensayado [X]
100	40,5	49,0
125	44,1	52,6
160	46,7	58,0
200	48,7	53,8
250	50,4	54,2
315	51,4	50,7
400	52,0	53,1
500	51,2	53,6
630	43,4	57,1
800	60,4	60,5
1000	62,3	61,6
1250	63,9	60,5
1600	64,8	63,0
2000	65,5	63,3
2500	66,3	63,8
3150	67,1	65,5
4000	67,9	67,0
5000	68,8	68,8



	INSUL	Ensayo
Rw (dB)	60,2	60
RA (dBa)	54,8	60

Tabla 17: Resultados comparativos de la versión 1 de D01

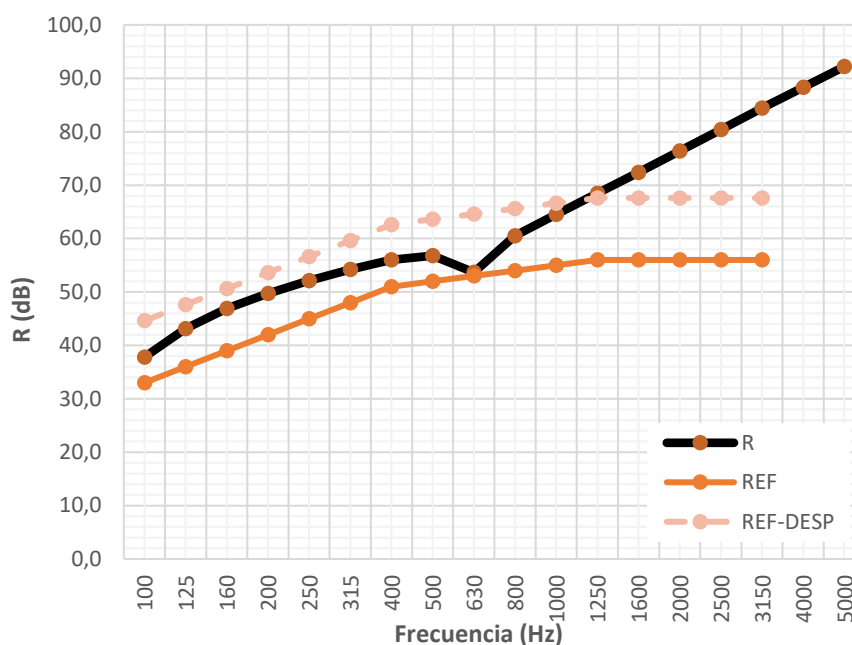
Al comparar los resultados del simulador con los ensayados, en baja frecuencia hay mucha diferencia siendo los resultados de Insul [15] inferiores que los ensayados, en cambio, a altas frecuencias pasa lo contrario el programa da mejores resultados que los medidos. Además, observando la gráfica se puede ver un pico invertido en 630 Hz. Colocar un material viscoelástico como tercer panel provoca que la frecuencia crítica del sistema aumente.

Se buscó otra configuración, como el programa te impide añadir distintos tipos de entramado, se creó un nuevo material: LH7 + Fieltro +VISCOLAM. Esta invención, tiene los parámetros mecánicos del ladrillo hueco cerámico, fieltro textil (absorbente) y viscoelástico de alta densidad. La densidad total viene dada por la densidad proporcional al espesor de cada material. El módulo de Young tiene el valor predominante, el del ladrillo, ya que este parámetro en el Viscolam es menor, en consecuencia, no influye en el comportamiento total. Y, por último, el factor de pérdidas sigue el mismo comportamiento que la proporcionalidad que la elasticidad, se ha dado el mismo valor que el material viscoelástico por ser el predominante. Consiguiendo los valores mostrados en la siguiente tabla:

Material	Espesor (mm)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Damping
LH7 + Fieltro +VISCOLAM	95,00	957,00	2,00	0,34

Tabla 18: Características mecánicas del material conjunto

f (Hz)	R (dB) INSUL
100	37,8
125	43,1
160	46,9
200	49,7
250	52,1
315	54,2
400	56,0
500	56,8
630	53,7
800	60,5
1000	64,5
1250	68,5
1600	72,4
2000	76,4
2500	80,4
3150	84,4
4000	88,3
5000	92,2



	INSUL	Ensayo
Rw (dB)	63,6	60
RA (dBa)	61,5	60

Tabla 19: Comparación de resultados de la versión 2 D01 con el nuevo material

Analizando la gráfica de la tabla 19, se puede afirmar que ha mejorado mucho los resultados respecto a la primera versión de D01, el valle inverso tan pronunciado producido por la frecuencia de resonancia ha disminuido. En consecuencia, el valor global ha aumentado.

#### D04: Trasdosado placa simple ChovACUSTIC 65 FIELTEX

La siguiente configuración consta de un tabique de ladrillo hueco doble, con enlucido de yeso y un compuesto multicapa formado por una lámina viscoelástica por una cara, y por la otra, un filtro textil (ChovACUSTIC 65 FIELTEX) de 20 mm, dicho material fijado al tabique. Seguidamente, se instala una perfilera de chapa de acero galvanizado con paneles de ChovANAPA de 15 mm y acabado con placas de yeso laminado.

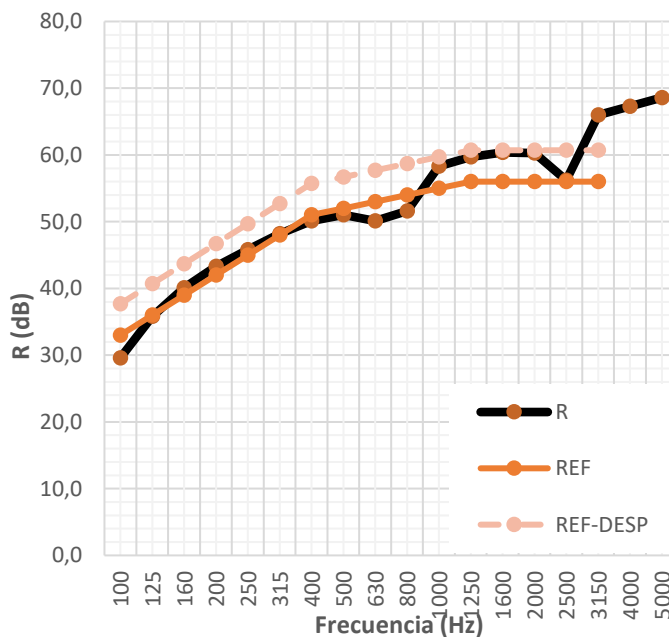
Como la configuración a estudiar contiene un material de dos características distintas en el entramado, se ha definido el D04 como solución triple, ya que el programa no te permite definir una cavidad con un material distinto a un tipo "absorbente". Además, la cavidad 1 tiene

conexión de fábrica de tipo puntual con una anchura de 15 mm, en cambio, la cavidad 2, se ha configurado un montante de acero galvanizado con una anchura de 48 mm.

Material	Espesor (mm)	Densidad (Kg/m3)	Resistencia al flujo (Rayl/m)	Módulo de Young (GPa)	Damping
Ladrillo de cerámica doble	67,00	800,00	-	2,00	0,020
Viscolam 65	4,00	1523,00	-	0,01	0,340
Placa de yeso laminado	15,00	768,00	-	2,00	0,010
Enlucido de Yeso	15,00	1150,00	-	0,01	0,010
Filtro Textil*	15,00	55,55	16420	-	-
ChonANAPA	40,00	18,77	1200	-	-

Tabla 20 : Parámetros de los materiales empleados

f (Hz)	R (dB) INSUL	R (dB) ensayo
100	29,9	38,5
125	36,2	37,1
160	40,7	39,8
200	44,1	45,3
250	46,7	47,7
315	49,2	52,7
400	51,2	54,0
500	52,2	53,5
630	51,3	56,3
800	52,8	60,1
1000	59,6	62,2
1250	60,9	65,4
1600	61,6	65,5
2000	61,5	63,3
2500	57,4	63,5
3150	67,2	68,2
4000	68,5	69,6
5000	69,8	71,4



	INSUL	Ensayo
Rw (dB)	57,8	58
RA (dBa)	55,7	56,9

Tabla 21: Resultados comparativos de D04

Las soluciones acústicas de tipo trasdosado se pueden implementar fácilmente en el simulador, consiguiendo valores muy similares a los ensayos "in situ". La problemática del material multicapa en el entramado, se ha solventado configurando la solución como triple, es decir, con dos cavidades. Como se puede ver en la tabla 21, se obtiene valores muy similares a los ensayados, pudiendo obtener una calibración muy próxima a los valores objetivos.

## 6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado, se interpreta los resultados obtenidos de las simulaciones respecto a dos factores. Por una parte, se compara los resultados de los ensayos de TL y las simulaciones, para comprobar que ambos procedimientos son válidos en configuraciones multicapa de aislamiento acústico a ruido aéreo. Y, por otra parte, revisar que la norma actual [6] para ensayos de parámetros mecánicos son aptas para materiales de alta densidad.

Como se ha descrito en el anterior punto, antes de empezar a simular modelos acústicos con material de alta densidad, se contrastó los resultados de dos placas de pladur lisas (PYL) de 12 mm sin cavidad de aire entre ellas ni material absorbente.

f (Hz)	INSUL (dB)	TL Escala (dB)
630	32,6	21,5
800	34,1	25,1
1000	35,6	24,3
1250	36,8	25,8
1600	37,7	25,6
2000	37,8	26,8
2500	35,9	26,9
3150	31,0	27,6
4000	34,1	29,4
5000	37,1	32,2

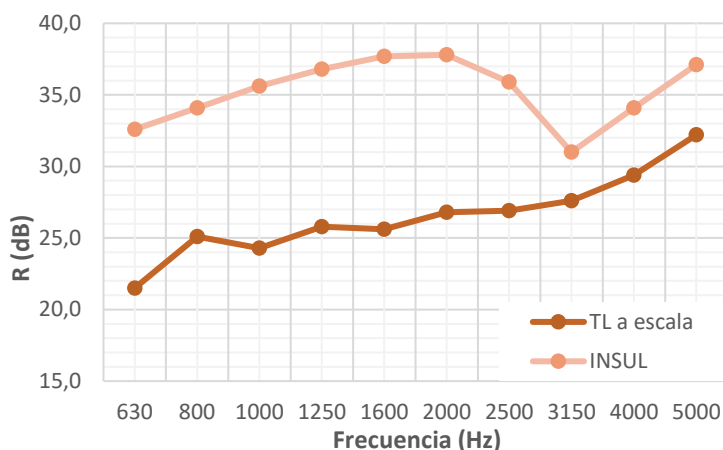
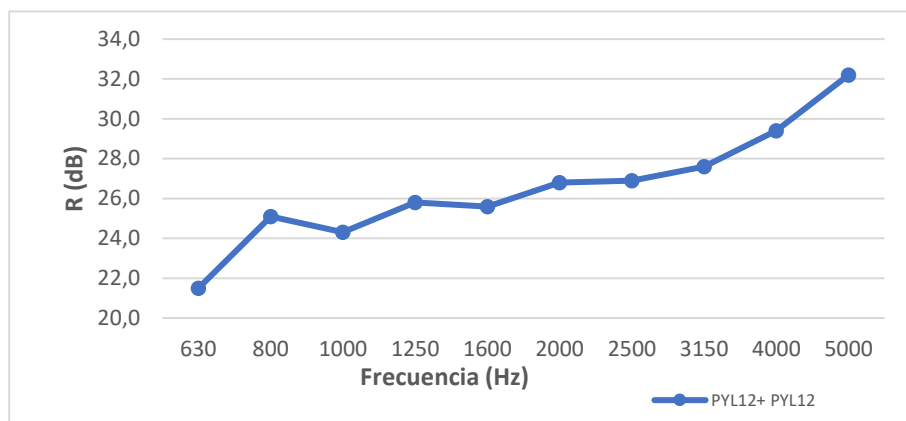


Tabla 22: Comparación de resultados de dos placas pyl

En la tabla 22 se muestra los resultados obtenidos con la cámara de pérdida de transmisión a escala y la del simulador. Se puede comprobar que en el procedimiento de TL a escala da valores de 10 dB por debajo del simulador. Los datos introducidos en el programa se aseguraron con resultados del paper [25], ya que dicha investigación validó su modelo acústico con paneles simples laminados. Por tanto, las placas de pladur utilizadas en los ensayos contienen pérdidas acústicas. En consecuencia, los ensayos realizados con dichas placas no se pueden comprobar mediante INSUL [15].

Posteriormente, se volvió a ensayar dos placas de pladur nuevas con las mismas dimensiones.

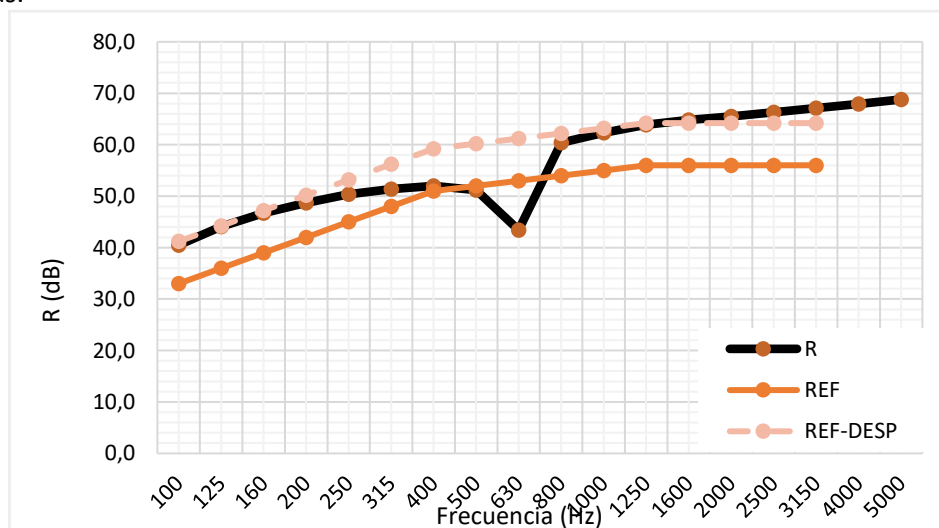


Gráfica 2: pyl+pyl (placas nuevas)

Respecto a los resultados de predicción de aislamiento acústico a ruido aéreo mediante el programa INSUL [15]. Se comprueba que para paneles simples, dobles y triples utiliza la ley de masas, para calcular el índice de reducción sonora.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}} \quad [Hz] \quad (11)$$

Recordemos que este sistema contiene dos tabiques de ladrillo hueco enlucidos con yeso, y en el entramado, un componente multicapa de dos caras de fieltro textil (material absorbente), y una lámina de alta densidad entre las dos caras. Es decir, teniendo calibrado los parámetros del ladrillo, y del enlucido de yeso. El único material que se tiene que revisar las características elásticas.



Gráfica 3: Resultado del índice de reducción de D01 con INSUL [15]

El factor de pérdida y el módulo de Young, se ha conseguido mediante la rigidez dinámica del material, ensayado con la norma ISO UNE-EN 29053:1994 [8]. Se propone una estimación de la rigidez a la flexión y el factor de pérdidas de materiales de alta densidad, a partir, de resultados iniciales de la pérdida de transmisión acústica, realizados en una cámara de transmisión a escala reducida.

## 7: MÉTODO INVERSO

En el apartado anterior, se demuestra que mediante la rigidez dinámica obtenida a partir de la norma ISO UNE-EN 29053:1994 [8] para materiales elásticos no es válido. Dado que, se ha podido comprobar que todos aquellos sistemas que contienen materiales de alta densidad configurados en INSUL [15], no dan resultados óptimos. Además, observando la frecuencia crítica de estos sistemas es muy pronunciada, provocada por las características elásticas erróneas de los materiales viscoelásticos. En consecuencia, disminuye el índice de reducción sonora.

El procedimiento propuesto se basa en la estimación del factor de pérdidas y la rigidez a la flexión de materiales de alta densidad. El método inverso consiste en partir mediciones iniciales de la pérdida de transmisión acústica mediante una cámara de transmisión de tamaño reducido y con estos resultados calibrar un modelo similar, mediante una función de error que calcula la diferencia entre la medición y la simulación, basado en un modelo simple conocido.

Al basarse en mediciones “in situ” de TL a escala, los resultados de los ensayos realizados no sirven, dado que, las placas de pladur utilizadas presentan fugas. Por esta razón, se volvió a medir las siguientes configuraciones, detallado en el anexo VII, para comprobar la validez del método inverso propuesto:

- Sándwich PYL13+PYL13
- Sándwich PYL13+VISCOLAM 35+PYL13
- Sándwich PYL13+VISCOLAM 65+PYL13
- Sándwich PYL13+VISCOLAM 100+PYL13

### 7.1 MODELO MATEMÁTICO

La definición de la impedancia mecánica de la capa impermeable al sonido, cuando una onda sonora plana llega a una superficie reflectante, es la siguiente:

$$Z = j(\omega m - \frac{B'\omega^3}{c^4} \sin^4 \theta) \quad (12)$$

Siendo  $\omega$  la frecuencia angular,  $c$  la velocidad al sonido y  $B'$  la rigidez compleja a la flexión, la cual depende del factor de pérdida  $\eta$ :

$$B' = B(1 + j\eta) \quad (13)$$

En el caso que se tenga distintas capas de materiales no absorbente, la impedancia total se calcula mediante un sumatorio de la impedancia de cada capa. En la configuración a evaluar constatare un sándwich de 3 capas:

$$Z_T = Z_1 + Z_v + Z_2 \quad (14)$$

Aplicando la definición de impedancia mecánica, se tiene:

$$Z_T = j(\omega(m_1 + m_v + m_2) - \frac{\omega^3(B'_1 + B'_v + B'_2)}{c^4} \sin^4 \theta) \quad (15)$$

Por tanto, añadiendo la expresión de la rigidez dinámica compleja:

$$\begin{aligned}
 Z_T &= j \left( \omega(m_1 + m_v + m_2) - \frac{\omega^3(B_1(1+j\eta_1) + B_v(1+j\eta_v) + B_2(1+j\eta_2))}{c^4} \sin^4 \theta \right) \\
 &= j(\omega(m_1 + m_v + m_3) - \frac{\omega^3(B'_1 + B'_2 + B'_3)}{c^4} \sin^4 \theta + \frac{\omega^3(B_1\eta_1 + B_v\eta_v + B_2\eta_2)}{c^4} \sin^4 \theta) \quad (16)
 \end{aligned}$$

Con la ecuación anterior, se puede definir las siguientes igualdades:

$$m_T = m_1 + m_v + m_2 \quad [kg/m^2] \quad (17)$$

$$B_T = B_1 + B_v + B_2 \quad [MN] \quad (18)$$

$$B_T \eta_T = B_1 \eta_1 + B_v \eta_v + B_2 \eta_2 \quad [MN] \quad (19)$$

$$\eta_T = \frac{B_1 \eta_1 + B_v \eta_v + B_2 \eta_2}{B_T} \quad (20)$$

Por otra parte, la pérdida de transmisión de un panel es la siguiente:

$$TL = 10 \log \left( \frac{1}{\tau_d} \right) \quad [dB] \quad (21)$$

Donde  $\tau_d$  es el coeficiente de pérdida de transmisión:

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \cos(\theta) \operatorname{sen}(\theta) d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} \cos(\theta) \operatorname{sen}(\theta) d\theta} \quad (22)$$

Siendo el coeficiente de transmisión en función del ángulo  $\tau(\theta)$  obtenido con esta actuación:

$$\tau(\theta) = \left\{ \left[ 1 + \eta_T \left( \frac{\omega m_T}{2\rho_0 c} \cos(\theta) \right) \left( \frac{\omega^2 B_T}{c^4 m_T} \operatorname{sen}(\theta) \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\omega m_T}{2\rho_0 c} \cos(\theta) \right) \left( 1 - \frac{\omega^2 B_T}{c^4 m_T} \operatorname{sen}^4(\theta) \right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (23)$$

Finalmente, añadiendo la expresión del coeficiente de transmisión en función del ángulo, a la ecuación del coeficiente de pérdida de transmisión:

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \frac{(2\rho_0 c)^2 \cos(\theta) \operatorname{sen}(\theta) d\theta}{\left(\frac{\omega^3 \cos(\theta) B_T \operatorname{sen}^4(\theta) \eta_T + 2\rho_0}{c^5}\right)^2 + \frac{\omega^2 \cos^2(\theta) (\omega^2 B_T \operatorname{sen}^4(\theta) - m_T c^4)^2}{c^{10}}}}{\frac{\operatorname{sen}^2 \theta_{lim}}{2}} \quad (24)$$

## 7.2 MÉTODO INVERSO

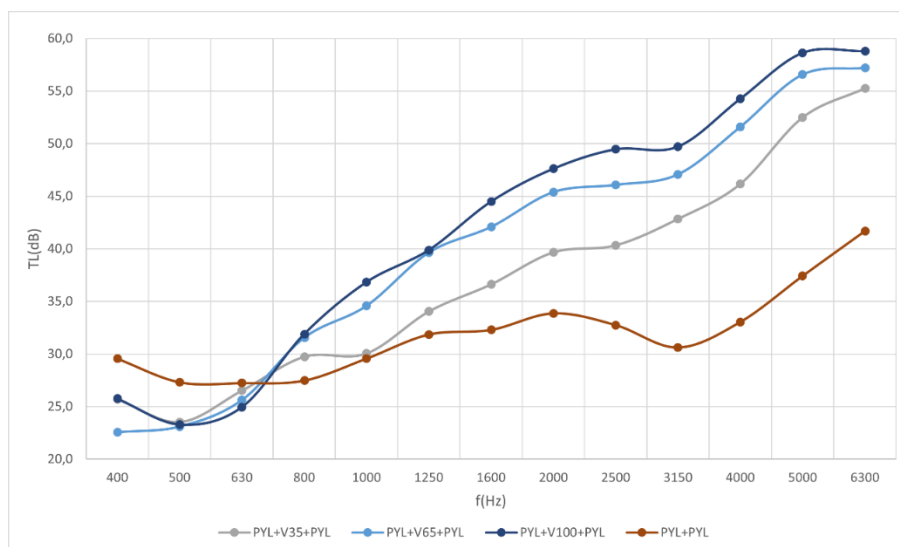
Los valores de TL ensayados en la cámara de transmisión a escala para cada configuración, se asignará en la variable  $TL_{mrs}$ . Para poder ajustar los parámetros de los materiales, se estima utilizando una función de error cuadrática,  $\varepsilon$ , donde  $TL_{est}$  es el TL estimado a partir del modelo.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TL_{mrs} - TL_{est})^2}{n}} \quad (25)$$

Teniendo un parámetro conocido, en este caso la masa, se realizan unas iteraciones iniciales para obtener la rigidez a la flexión, B, y el factor de pérdidas,  $\eta$  como variables de entrada, para poder estimar el TL. El código utilizado en Matlab se encuentra en el anexo VIII.

## 7.3 RESULTADOS

Los resultados de los **ensayos de pérdida de transmisión acústica** utilizando la norma ISO 10140-2:2011[4] en una cámara de transmisión a escala, de cada configuración citada al principio de este apartado, se muestra a continuación:

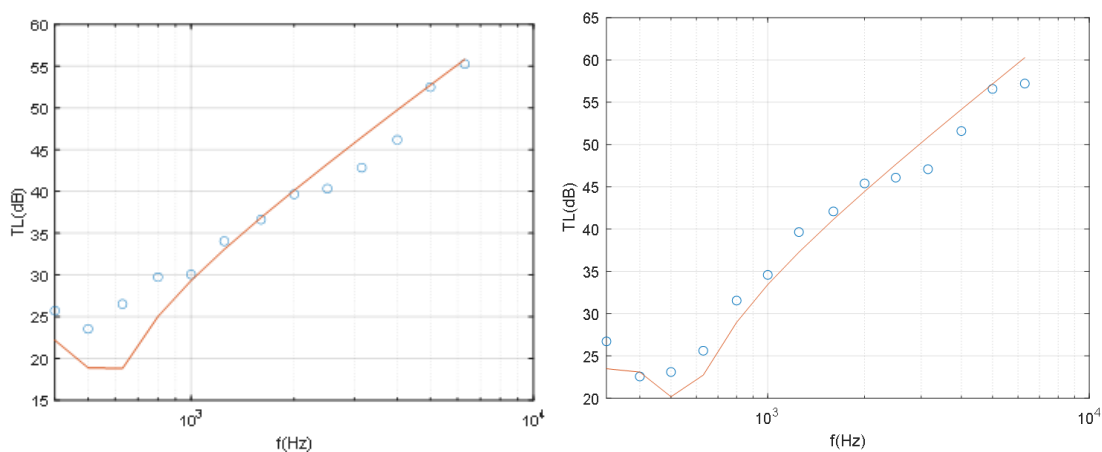


Gráfica 4: Resultados de cada configuración de TL a escala

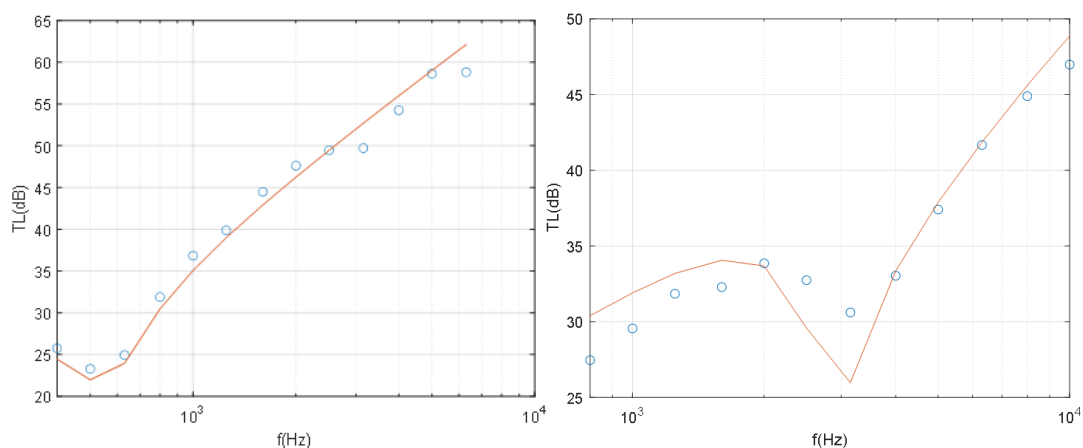


El comportamiento de cada configuración tiene sentido, ya que, al añadir la lámina de alta densidad a las placas de yeso, aumenta los niveles de aislamiento acústico, a la vez que, aumenta el grosor de dicho material.

El siguiente paso, es aplicar el **método inverso** explicado anteriormente, de cada configuración descrita se realizó la estimación de TL, con las siguientes gráficas correspondientes:



Gráfica 6: Resultado de la izquierda, estimación de *pyl+v35+pyl*. En la izquierda, estimación de *pyl+v65+pyl*



Gráfica 5: Resultado de la izquierda, estimación de *pyl+v100+pyl*. En la izquierda, estimación de *pyl+pyl*

De las gráficas 5 y 6, fueron calculadas por los parámetros de entrada, mostrados en la siguiente tabla:

Propiedad	<i>pyl+v35+pyl</i>	<i>pyl+v65+pyl</i>	<i>pyl+v100+pyl</i>	<i>pyl +pyl</i>
$m_T(\text{kg/m}^2)$	19,7	23,1	26,6	16,6
$d_T(\text{mm})$	28,0	30,0	32,0	26,0
$B_T(\text{Nm})$	25600	29154	32118	743
$\eta_T$	0,0635	0,125	0,148	0,0029

Tabla 23: Soluciones de los parámetros totales de cada configuración

Una vez se tiene los resultados de los parámetros del sistema en conjunto de cada configuración, se puede estimar las propiedades mecánicas de cada lámina viscoelástica. Teniendo en cuenta que las placas de yeso son idénticas, se tiene la siguiente simplificación:

$$\eta_v = \frac{(2B_1 + B_v)\eta_T - 2B_1\eta_1}{B_v} = \frac{B_T\eta_T - 2B_1\eta_1}{B_v} \quad (26)$$

Aplicando las anteriores ecuaciones, se ha obtenido los parámetros mecánicos elásticos de cada material de alta densidad, se presenta en la tabla 24:

Propiedad	v35	v65	v100
$m_v(\text{kg/m}^2)$	3,1	6,5	10,0
$B_v(\text{Nm})$	2310,45	28411,00	31375,00
$\eta_v$	0,0065	0,127	0,151

Tabla 24: Resultados de los parámetros de cada material viscoelástico

Finalmente, para comprobar que dichos parámetros son mecánicos elásticos caracterizan adecuadamente el material de alta densidad, se procede a mostrar los resultados de índice de reducción acústica predichos por INSUL [15]. Se ha modelado como un panel simple con tres capas.

f (Hz)	INSUL (dB)	TL Escala (dB)
100	20	31,9
125	22	33,5
160	23	22,1
200	24	21,1
250	25	27,1
315	25	30,5
400	25	25,7
500	19	23,5
630	21	26,5
800	24	29,7
1000	27	30,1
1250	30	34,0
1600	33	36,6
2000	36	39,7
2500	39	40,3
3150	42	42,8
4000	45	46,2
5000	48	52,5

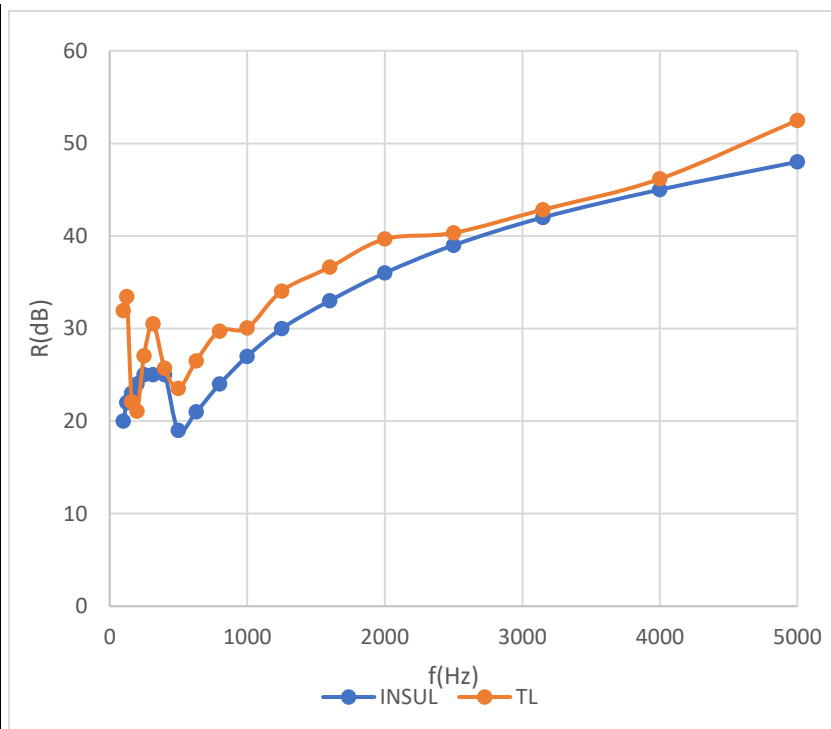


Tabla 25: Resultados comparativos de PYL+V35+PYL

f (Hz)	INSUL (dB)	TL Escala (dB)
100	22	30,8
125	23	30,6
160	24	21,2
200	25	22,7
250	26	26,1
315	27	26,7
400	27	22,6
500	24	23,1
630	26	25,6
800	29	31,5
1000	32	34,6
1250	35	39,6
1600	38	42,1
2000	41	45,4
2500	44	46,1
3150	47	47,1
4000	50	51,6
5000	53	56,6

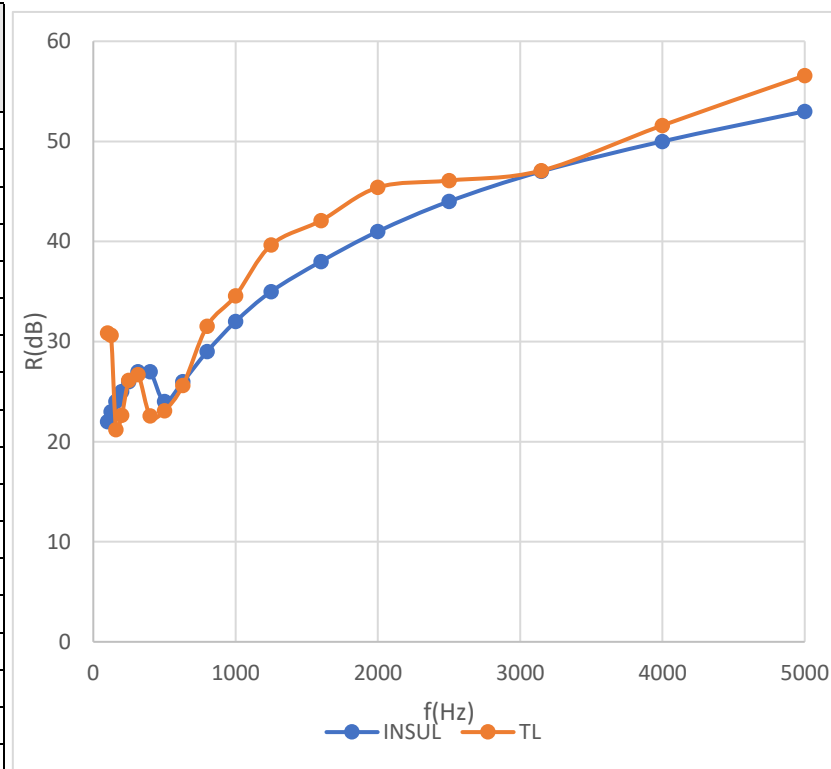


Tabla 26: Resultados comparativos de PYL+V65+PYL

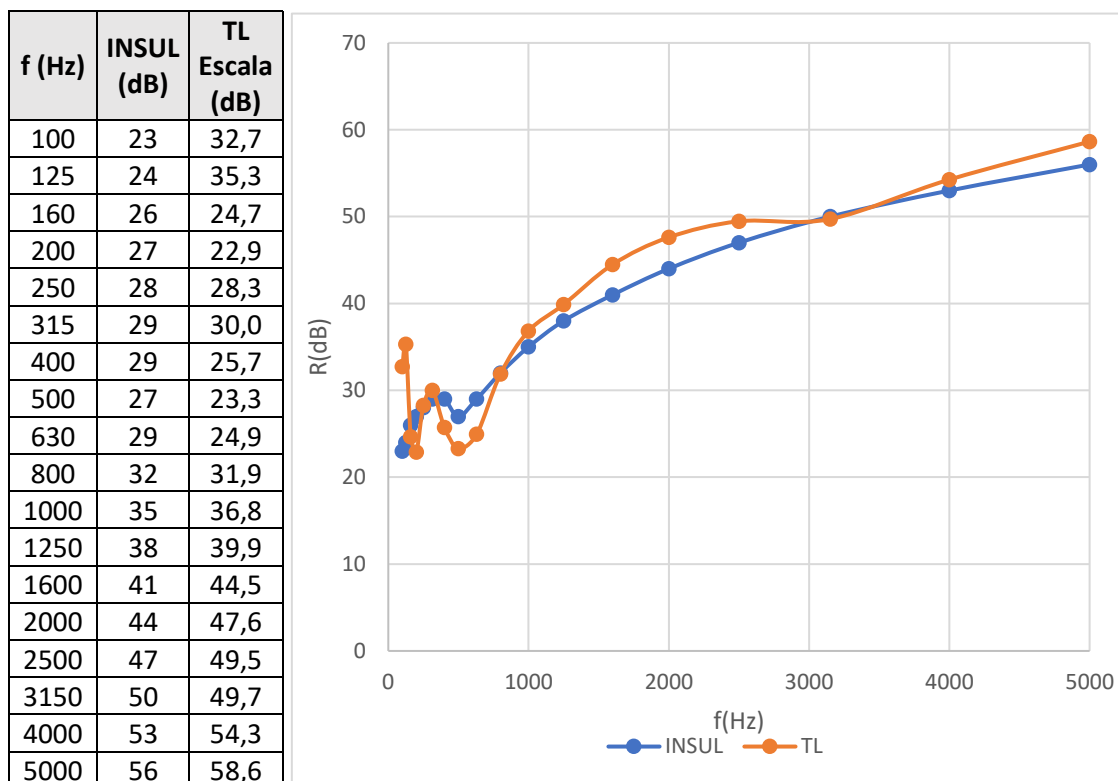


Tabla 27: Resultados comparativos de *PYL+V100+PYL*

Analizando las gráficas de las tablas 25,26 y 27, se puede ver tanto la TL procedente de INSUL [15] como la de TL a escala son muy similares, incluso no se aprecia una frecuencia de resonancia marcada. Por tanto, se puede adelantar que el método inverso cumple como procedimiento de estimación para los parámetros mecánicos de materiales viscoelásticos.

## 8. Conclusiones

Tras el desarrollo y análisis de los resultados obtenidos, se finaliza el proyecto presentando las conclusiones llegadas y las líneas de investigación abiertas que ha dejado el trabajo.

### 8.1 CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha estudiado y aplicado procedimientos normativos para la obtención de diferentes propiedades acústicas de diversos materiales: resistencia al flujo, rigidez dinámica, módulo de Young y factor de pérdidas. Estas mediciones han ayudado a entender el comportamiento mecánico y elástico de cada material.

Hoy en día no hay normas que especifiquen como obtener las características acústicas de un material de alta densidad, por esta razón, se ha querido comprobar la eficacia de métodos normativos aplicados a estos materiales. Para ello, se ha calculado el índice de reducción sonora utilizando una cámara de transmisión a escala, con diferentes configuraciones acústicas que contengan viscoelásticos. Posteriormente, se configura y calibra los sistemas evaluados introduciendo los parámetros acústicos de los materiales ensayados en el simulador INSUL [15]. Y, en caso de ser desfavorable, estudiar un método de cálculo adecuado para este tipo de material. Una vez realizado el proceso descrito, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Durante los ensayos de rigidez dinámica con la norma UNE-EN 29052-1:1994 [8], se obtuvo resultados óptimos para los materiales de tipo ChovAIMPAC, ya que el nivel de error es reducido. En cambio, los de tipo Viscolam la frecuencia de resonancia no era fácil de conseguir, tras muchos intentos se obtuvo aparentemente la frecuencia de resonancia, pero, con un valor de incertidumbre elevado. Como de esta métrica se calcula el factor de pérdidas ( $\eta$ ) y el módulo de Young ( $E$ ) del material elástico, estos dos parámetros quedan condicionados. Gracias a la predicción acústica de INSUL [15], se pudo comprobar que no correspondían los parámetros obtenidos de los materiales viscoelásticos. El método de UNE-EN 29052-1:1994 [8] ejerce demasiada fuerza de peso al material, provocando un error a su comportamiento respecto a un golpe, por tanto, desplazando la frecuencia de resonancia del material.

Respecto a la resistencia al flujo, el método ISO UNE-EN 29053:2020 [9] se obtiene resultados con incertidumbres bajas en materiales porosos, pero, aquellos que tengan alguna capa impermeable en el material su resultado se obtendrá, pero con un margen de error elevado. Teniendo sentido, ya que se trata de un parámetro que mide la resistencia que ejerce el material al paso de ondas acústicas.

El estudio de distintas configuraciones basadas en sistemas verificados en mediciones "in situ", ha ayudado a entender y calibrar el simulador INSUL [15]. Se ha comprobado que para paneles simples y dobles los resultados predichos son muy similares a los de referencia. Pero a los paneles triple, se aleja en gran medida. Este error de precisión, lo advierte el manual [15] llegando a haber una diferencia aproximada de 4dB.

En cuanto al método inverso de cálculo propuesto, se ha experimentado y ensayado que, con los resultados estimados, se alcanza con soluciones muy similares a las ensayas "in situ" logrando a caracterizar el material perfectamente.



En resumen, para caracterizar los parámetros mecánicos de una configuración multicapa donde contiene material viscoelástico, el método inverso te permite a partir de unos datos conocidos estimar las características de cada capa.

## 8.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A pesar de haber cumplido con los objetivos planteados para este presente Trabajo Final de Máster, se detectado nuevas líneas y continuación a esta investigación:

- Es necesario actualizar y plantear una normativa que te permita obtener la rigidez dinámica de materiales viscoelásticos utilizados para fines acústicos, exigido por el DBHR.
- Evaluar y analizar el cálculo de parámetros mecánicos mediante el método inverso para diferentes materiales de alta densidad, con el objetivo de estandarizarlo.
- Estudio de la variabilidad de aplicar el método inverso, con el objetivo de obtener la resistencia al flujo de materiales isotrópicos a partir del coeficiente de absorción.
- Elaborar un algoritmo que mejore el cálculo de paneles triples.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación
- [2] UNE-EN ISO 717-1:2021. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. (ISO 717-1:2020).
- [3] UNE-EN ISO 10140-1:2022. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos. (ISO 10140-1:2021)
- [4] UNE-EN ISO 10140-2:2022. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. (ISO 10140-2:2021)
- [5] UNE-EN ISO 10534-2:2002. Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2. Método de la función de transferencia. (ISO 10534-2:1998).
- [6] UNE-EN 9053-1:2020. Acústica. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo de aire. (ISO 9053:2018).
- [7] UNE EN 12354-6: 2004. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 6: Absorción sonora en espacios cerrados. (EN 12354-6:2003).
- [8] UNE-EN 29052-1:1994. Acústica. Determinación de la rigidez dinámica. Parte 1: materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas. (ISO 9052-1:1989). (Versión oficial EN 29052-1:1992).
- [9] ISO 9053-1:2018. Acoustics. Determination of airflow resistance. Part 1: Static airflow method.
- [10] R. del Rey., J. Alba., A. Uris., P. Candelas. "WOOL4BUILD: Improved isolation material for eco-building based on natural wool"
- [11] J. Alba., J.C. Rodríguez, G.González, M.Balague, M.C. Grau., I.Ramón "Acoustic treatment for a radio studio at the Escola Politècnica Superior de Gandia (Polytechnic School of Gandia)" Euronoise 2021.
- [12] R.del Rey "Modelización del ruido transmitido por flancos en la edificación en nuevas soluciones constructivas".
- [13] UNE-EN ISO 12680-1:2007. Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso. (ISO 12680-1:2005)

- [14] J. Alba Fernández; R. Del Rey Tormos, J. Ramis Soriano; L. Bertó Carbó “Caracterización de vidrios para la evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo”
- [15] INSUL - predicting sound insulation. <https://www.insul.co.nz/>, última visita 8 de septiembre de 2022
- [16] J. Alba Fernández; R. Del Rey Tormos, J.C. Rodríguez, J.P. Arenas “Comparativa de métodos indirectos para la medida de la resistividad del flujo del aire en textiles”. Tecniacústica 2020.
- [17] E.J Sanchis “Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica” Univesitat Politècnica de Valencia 2008.
- [18] A. Schiavi, C.Guglielmono, P.Miglietta. “Effect and importance of static-load on airflow resistivity determination and its consequences on dynamic stiffness” Applied Acoustics 72 (2011) 705–710
- [19] UNE ISO 74201:2021. Acústica. Esquema de clasificación acústica de edificios.
- [20] J.V Torres “Diseño y construcción de una cámara de transmisión acústica a escala” Escuela Politécnica Superior de Gandía. 2011
- [21] Rodríguez, J.C.; Alba, J.; del Rey, R. A Multifunctional Solution for Simultaneous Sound Insulation and Acoustic Conditioning—An Example of Application in a Radio Studio. Buildings 2022, 12, 123.
- [22] Sitio web de dBKaila. Ingeniería para el control del ruido. <http://dbkaila.com/>, última visita 8 de septiembre
- [23] Sitio web de SoundFlow. Ahnert Feistel Media Group (AFMG) <https://www.afmg.eu/en/afmg-soundflow>, última visita 8 de septiembre
- [24] J. Alba Fernández, J. Ramis Soriano, F. Hernández García. “AISLA 3.0.: herramienta informática para el cálculo del aislamiento acústico a ruido aéreo de configuraciones multicapa con paneles perforados” Tecniacústica 2005
- [25] J. Mansilla, L. Pepino y Bender L., “Comparison between a hybrid sound insulation prediction model for single laminated panels and the INSUL program with respect to real measured materials AdAA2018-020 XVI Congreso Argentino de Acústica, Buenos Aires, 2018.
- [26] Ministerio de Fomento, Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, marzo 2010.
- [27] K O Ballagh , Adapting Simple Prediction Methods to Sound Transmission of Lightweight Foam Cored Panels, Volume: 17 issue: 4, page(s): 269-275 (2010)
- [28] Manual Aislamiento acústico, Composan.