



**Manuscrito aceptado**

**Accepted manuscript**

Autor(es) Author(s):	Ruiz, L.; Delgado, E.; Neila, F.J. & Vega, S.
Título (original, ES): Title (original, ES):	Comparativa del comportamiento acústico entre fachadas multicapas ligeras y fachadas tradicionales
Título (original, EN): Title (original, EN):	Comparative Study on Acoustic Behavior between Light Multi-layered and Traditional Façades
Idioma: Language:	Español e inglés (bilingüe) Spanish and English (bilingual)
DOI:	10.3989/mc.2012.03211
Fecha de recepción: Received date:	06-06-2011
Fecha de aceptación: Accepted date:	10-10-2011
Publicación <i>online</i> : Published online:	07-02-2012

**Puede citar este artículo como:**

**You may cite this article as:**

Ruiz, L.; Delgado, E.; Neila, F.J. & Vega, S.: "Comparativa del comportamiento acústico entre fachadas multicapas ligeras y fachadas tradicionales". *Materiales de Construcción* (2012) [en línea], manuscrito aceptado. doi: 10.3989/mc.2012.03211

Ruiz, L.; Delgado, E.; Neila, F.J. & Vega, S.: "Comparative Study on Acoustic Behavior between Light Multi-layered and Traditional Façades". *Materiales de Construcción* (2012) [online], accepted manuscript. doi: 10.3989/mc.2012.03211

**NOTA:** Este documento es un artículo inédito que ha sido revisado y aceptado para su publicación. Como un servicio a sus autores y lectores, *Materiales de Construcción* proporciona esta edición preliminar *online*. El manuscrito puede sufrir alteraciones tras la edición y corrección de pruebas, antes de su publicación definitiva. Los posibles cambios no afectarán en ningún caso a la información contenida en esta hoja, ni a lo esencial del contenido del artículo.

**NOTE:** This document is a reviewed manuscript accepted for publication. As a service to our authors and readers, *Materiales de Construcción* provides this early online version. The manuscript may undergo some changes after review of the resulting proof before it is published in its final form. Any possible change will not affect to the information provided in this cover sheet, or to the essential content of the article.

**Comparativa del comportamiento acústico entre fachadas multicapas ligeras y  
fachadas tradicionales**

**Comparative Study on Acoustic Behavior between Light Multi-layered and  
Traditional Façades**

L. Ruiz \*, E. Delgado, F. J. Neila, S. Vega

Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España

(\*Autora para la correspondencia / Corresponding author: [letzai.ruiz@upm.es](mailto:letzai.ruiz@upm.es))

## RESUMEN

### **Comparativa del comportamiento acústico entre fachadas multicapas ligeras y fachadas tradicionales**

Los sistemas de fachadas multicapas ligeras acústicamente, en general han sido poco estudiados. Los primeros datos que se tienen es que no suelen alcanzar los valores de aislamiento acústico requeridos en el Código Técnico de la Edificación (CTE) en entornos especialmente ruidosos. Los objetivos principales de esta investigación son obtener fachadas multicapas ligeras con un alto grado de aislamiento acústico, que puedan ser empleados en entornos ruidosos. Al mismo tiempo que presenten excelentes características térmicas, sin descuidar aspectos tan importantes como la sostenibilidad, industrialización, costes, etc. En este artículo se explicará el proceso que se ha llevado a cabo para realizar una investigación relacionada con el comportamiento acústico de fachadas multicapas ligeras. Para ello se han empleado los métodos de medida del comportamiento acústico a ruido aéreo e intensimetría sonora. Una vez obtenidos estos resultados se realiza una comparativa entre las fachadas multicapas ligeras y las fachadas tradicionales.

*PALABRAS-CLAVE: propiedades físicas; absorción; vibración; fachadas multicapas ligeras; comportamiento acústico.*

## SUMMARY

### **Comparative Study on Acoustic Behavior Between Light Multi-layered and Traditional Façades.**

Light multi-layered facade systems in general have been acoustically little studied. The data available suggests they do not usually fulfil the sound insulation values required in the Technical Building Code (CTE) in particularly in noisy environments. Therefore the main objectives of this study, is to obtain light multi-layered façade systems with a high degree of acoustic insulation that can be used in noisy environments. While in turn showing excellent thermal characteristics, without neglecting important aspects such as the sustainability of materials, industrialization, costs, among others. This article will explain the process that has been followed to carry out an investigation on the acoustic behaviour of light multi-layered facades. For this purpose acoustic behaviour and sound intensimetry measurement methods have been used. After obtaining these results, a comparison between light multi-layered and traditional facades was made.

*KEY-WORDS: physical properties; absorption; vibration; light multi-layered facades; acoustic behavior.*

**For English text go to page 14**

## **1. INTRODUCCIÓN**

Para alcanzar las metas propuestas por el Protocolo de Kyoto y más recientemente el Acuerdo de Copenhague, al mismo tiempo los aspectos medioambientales que se propugnan a través de la Directiva Europea y el Código Técnico de la Edificación (CTE), es necesario plantear y hacer mejoras en el diseño y en la construcción de edificios, específicamente la envolvente. Para ello se deben emplear cerramientos que sean eficientes y, que generen mejores prestaciones térmicas y acústicas.

Por eso, es imprescindible el estudio de nuevos sistemas constructivos de fachadas, en particular los multicapas ligeros, que presentan características favorables para el ahorro en el consumo energético, y puedan a su vez ser industrializados. Obteniendo con todo esto beneficios, como la mejora de la calidad, el acortamiento de plazos constructivos, mayor seguridad, altas prestaciones, mayor ligereza, entre otros.

Desde el punto de vista térmico estos cerramientos multicapas ligeros se están estudiando y presentan excelente comportamiento. Sin embargo, desde el punto de vista acústico, en general han sido poco estudiados, y los primeros datos que se tienen es que no suelen alcanzar los valores de aislamiento acústico requeridos en el CTE en entornos especialmente ruidosos.

Otra de las razones para estudiar este tipo de sistema constructivo de fachadas, es tomando en consideración las conclusiones en sistemas similares (principalmente enfocado a la industrialización) que expone el Catedrático R. Marc Lawson de Sistemas de Construcción SCI (Steel Construction Institute) de la University of Surrey. UK. (1), en donde concluye:

- El peso de los materiales se reduce en un 80%.
- Los materiales nuevos necesarios se reducen en un 43%, mayor sostenibilidad.
- Los residuos generados son la décima parte que en la construcción tradicional.
- La energía embebida de los materiales se reduce en un 33%.
- La cantidad de agua empleada en la construcción es despreciable.
- La energía necesaria para la construcción se reduce en un 32%.

- El período de construcción se reduce en un 60%, con la consiguiente disminución de gastos generales, estimados en más de un 9%.
- El coste material de la obra actualmente supera entre un 10 y 15 % los costes de la construcción tradicional.
- La reciclabilidad de los materiales se incrementa nueve veces.
- El transporte de materiales se reduce en un 70%.

Uno de los estudios relacionados con materiales ligeros y que merece la pena mencionar es el de Propiedades Acústicas de los Paneles de Carrizo (2), en donde, han caracterizado acústicamente sistemas constructivos ecológicamente sostenibles basados en paneles de carrizo. Los cuales se podrían implementar en sistemas de fachadas multicapas ligeras como trasdosados, ya que tienen una buena absorción a medias y altas frecuencias.

Los cerramientos multicapas ligeros están formados por distintas capas y/o materiales, en donde cada una de ellas tiene una función específica, para garantizar un excelente comportamiento. Dependiendo de las condiciones y necesidades del usuario, la diversidad de materiales que se pueden utilizar y las distintas configuraciones de estas capas, dan como resultado altas prestaciones térmicas de este sistema constructivo. Para prestaciones acústicas, al ser un sistema de soluciones ligeras y de poca masa específica, tiene especial interés una adecuada disposición de las diferentes capas para obtener altas prestaciones acústicas. Al ser un sistema poco estudiado desde el punto de vista acústico, genera una oportunidad para innovar en esta materia y centrar esfuerzos en investigar y proponer nuevas mejoras a este sistema constructivo.

La estructura principal de este sistema constructivo es el *steel framing*, cuya característica es una estructura constituida por perfiles conformados en frío de acero galvanizado, que son utilizados para la composición de paneles estructurales y no estructurales, vigas secundarias, vigas de forjado y cubierta, y otros componentes. Por ser un sistema que se puede industrializar, posibilita una construcción en seco de gran rapidez de ejecución.

En este artículo se explicará el proceso que se ha llevado a cabo para realizar una investigación relacionada con el comportamiento acústico de fachadas multicapas ligeras. Para ello se han empleado los métodos de análisis del comportamiento acústico a ruido aéreo e intensimetría sonora.

Los objetivos principales de esta investigación son obtener sistemas de fachadas multicapas ligeras con un alto grado de aislamiento acústico que puedan ser empleados en cualquier entorno ruidoso. Al mismo tiempo que presenten excelentes características térmicas, sin descuidar aspectos tan importantes como la sostenibilidad de los materiales, la industrialización, los costes, entre otros.

## 2. METODOLOGÍA

### Fase I: Selección de la muestra

Se han seleccionado tres tipologías de fachadas multicapas ligeras, que previamente han sido diseñadas tomando en consideración distintos criterios, entre los que se encuentran el valor de la transmitancia térmica, el espesor, el peso, el coste económico. Así como también la composición de cada una de las capas como el acabado exterior, el aislante térmico exterior, las placas al interior, entre otros. Las tres opciones de fachadas multicapas ligeras son:

Muestra A: fachada multicapa ligera con aislamiento térmico confinado por el exterior con placa de OSB y con cámara de aire ventilada.

Muestra B: fachada multicapa ligera con aislamiento térmico sin confinar por el exterior y con cámara de aire ventilada.

Muestra C: fachada multicapa ligera sin cámara de aire ventilada, con sistema ETICS (Aislamiento térmico por el exterior).

La descripción de cada una de las capas que componen los distintos cerramientos multicapas ligeros se muestran en la Tabla 1.

En la Figura 1 se puede observar gráficamente los detalles de las distintas variantes planteadas de cerramientos multicapas ligeros.

Como se puede observar en la composición de las fachadas multicapas ligeras, la muestra A y B poseen cámara ventilada. No obstante, es importante mencionar que en los ensayos de laboratorio no se han reproducido las condiciones de la cámara ventilada.

Por otro lado, se han escogido tres composiciones de cerramientos tradicionales para que sirvan de referencia y se puedan comparar con las fachadas multicapas ligeras. Estos cerramientos tradicionales se han seleccionado del Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación (CTE) (3) y de la memoria justificativa del Proyecto BALI “Building Acoustic for Living” (4).

Muestra 1, Fachada hoja principal de ladrillo con revestimiento discontinuo y con cámara de aire ventilada. Código F.7.3.

Muestra 2, Fachada hoja principal de fábrica de ladrillo cara vista, sin cámara de aire no ventilada. Código F.1.1.

Muestra 3, Fachada hoja principal de fábrica de ladrillo con revestimiento continuo, sin cámara de aire no ventilada con aislamiento por el exterior. Sistema ETICS.

En la siguiente Tabla 2 se especifican cada una de las capas que componen estas fachadas tradicionales.

En la Figura 2, se pueden observar gráficamente los detalles de las muestras seleccionadas de cerramientos tradicionales.

## **Fase II: Métodos de Análisis**

Esta fase se ha dividido en dos partes, dependiendo del tipo de ensayo que se ha realizado, es decir, aislamiento a ruido aéreo e intensimetría sonora. Para llevar a cabo ambos ensayos de las fachadas multicapas ligeras, se ha construido una muestra de cada tipología.

El montaje de las fachadas se realizó sobre el portamuestras del Laboratorio del Centro de Acústica Aplicada y Evaluación no Destructiva (CAEND). Se simuló el encuentro de dos paneles de cerramiento multicapa ligero, existiendo una junta central, sobre la cual se planteó el montaje de los demás materiales, contrapeandolos para evitar el paso directo del ruido.

En la Figura 3 se muestra el montaje de algunas de las capas que componen las muestras.



### **Aislamiento a ruido aéreo:**

Los ensayos de aislamiento a ruido aéreo se han realizado bajo normativa vigente, siguiendo la UNE-EN ISO 140-3:1995. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio de aislamiento acústico al ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas. (5).

Al realizar las medidas de aislamiento las características del entorno de medida son las siguientes:

Tipo de cámaras: semirreverberantes.

Superficie de ensayo: 13 m<sup>2</sup>.

El volumen de la sala emisora es variante puesto que se van añadiendo materiales.

Además de las características mencionadas, se tienen características específicas del entorno de medida, las cuales se muestran en la tabla 3.

### **Intensimetría Sonora:**

La medición en mapas de intensidad en cámara de ensayo, se ha realizado bajo normativa vigente, basados en las normas IEC 1043 (1993) (6) e ISO 9614-1 (1993) (7). Las características del entorno de medida son las mismas que en el punto anterior.

## **3. RESULTADOS**

En esta parte se presentan los resultados obtenidos en cada método de análisis que se ha utilizado:

### **Aislamiento a ruido aéreo:**

Se ha medido el aislamiento a ruido aéreo de cada una de las tipologías de fachadas multicapas ligeras, obteniendo el índice global de reducción acústica en dB (RW), el índice global de reducción acústica de un elemento ponderado A en dBA (RA) y el índice global de reducción acústica, ponderado A, para ruido exterior dominante de automóviles (RA,tr).

En la Tabla 4, se muestran los distintos resultados numéricos de las tres tipologías de fachadas multicapas ligeras.

El CTE DB-HR Protección frente al ruido (8) establece los requisitos exigidos a los cerramientos de fachada en función del ruido procedente del exterior (índice de ruido día  $L_d$ ) y del uso del edificio.

De acuerdo con la opción simplificada del CTE DB-HR, para evaluar si un cerramiento cumple las exigencias de aislamiento a ruido aéreo, se toman los datos de aislamiento tanto de la parte opaca como de la acristalada (hueco). En función del porcentaje de hueco se obtiene un valor de diferencia de niveles, ponderada A, en fachadas en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles  $D_{2m,nT,Atr}$  (dBA). Con este valor se estima en que zonas con un determinado nivel de ruido día se podría implementar la fachada concreta cumpliendo las exigencias del CTE DB-HR.

Por tanto, de acuerdo con la opción simplificada de diseño del CTE DB-HR, tomando en cuenta la tablas 2.1 Valores de aislamiento acústico a ruido aéreo  $D_{2m,nT,Atr}$ , en dBA entre un recinto protegido y el exterior, en función del índice de ruido día  $L_d$  y 3.4 Parámetros acústicos de fachada en contacto con el aire exterior de recintos protegidos, se puede calcular para los tres tipos de fachadas multicapas ligeras para que rangos de aislamientos serían válidos en las condiciones más desfavorables como dormitorios y estancias residencial y hospitalario.

A continuación se muestran ejemplos del valor de aislamiento que se obtendría al implementar las fachadas multicapas ligeras estudiadas con un hueco del 30% que posea al menos un  $R_{Atr} = 40$  dBA.

En el caso de la Muestra A, el aislamiento acústico a ruido de tráfico es  $R_{Atr} = 47,3$  dBA, para las características de hueco expuestas se obtendría un valor de aislamiento de  $D_{2m,nT,Atr} = 41$  dBA. Con este valor, se puede decir que esta fachada con el hueco descrito cumple para dormitorios cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice  $L_d$  sea  $65 < L_d < 70$ , también cumple para estancias cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice  $L_d$  sea  $70 < L_d < 75$ .

En la Muestra C, el aislamiento acústico a ruido de tráfico es  $R_{Atr} = 49,5$  dBA, para las características de hueco expuestas se obtendría un valor de aislamiento de  $D_{2m,nT,Atr} = 42$  dBA. Con este valor, se puede decir que esta fachada con el hueco descrito cumple para

dormitorios cuya exigencia sea de 42 dBA y cuyo índice Ld sea  $70 < Ld < 75$ , también cumple para estancias cuya exigencia sea de 42 dBA y cuyo índice Ld sea  $Ld > 75$ .

En la Muestra B, el aislamiento acústico a ruido de tráfico es  $R_{Atr} = 41,5$  dBA, si por ejemplo se implementara con un hueco del 30% y que posea al menos un aislamiento acústico de  $R_{Atr} = 37$  dBA, se obtendría un valor de aislamiento de  $D_{2m,nT,Atr} = 37$  dBA. Con este valor, se puede decir que esta fachada con el hueco descrito cumple para dormitorios cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice Ld sea  $65 < Ld < 70$ , también cumple para estancias cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice Ld sea  $70 < Ld < 75$ .

En relación a las fachadas tradicionales al estar estudiadas y caracterizadas, se toman como referencia los valores presentados en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE (3) y las gráficas del software de modelización del comportamiento acústico Acoubad-dbMat (9) y de la memoria justificativa del Proyecto BALI “Building Acoustic for Living” (4).

En la Tabla 5, se muestran los resultados de las fachadas tradicionales.

Al igual que las fachadas multicapas ligeras, a continuación se muestran ejemplos del valor de aislamiento que se obtendría al implementar estas fachadas tradicionales con un hueco del 30% que posea al menos un  $R_{Atr} = 40$  dBA, en las condiciones más desfavorables que serían dormitorios y estancias de residencial y hospitalario.

En el caso de la Muestra 1, el aislamiento acústico a ruido de tráfico es  $R_{Atr} = 45$  dBA, para las características de hueco expuestas se obtendría un valor de aislamiento de  $D_{2m,nT,Atr} = 41$  dBA. Con este valor, se puede decir que esta fachada con el hueco descrito cumple para dormitorios cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice Ld sea  $65 < Ld < 70$ , también cumple para estancias cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice Ld sea  $70 < Ld < 75$ .

En la Muestra 2, el aislamiento acústico a ruido de tráfico es  $R_{Atr} = 46$  dBA, para las características de hueco expuestas se obtendría un valor de aislamiento de  $D_{2m,nT,Atr} = 41$  dBA. Con este valor, se puede decir que esta fachada con el hueco descrito cumple para dormitorios cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice Ld sea  $65 < Ld < 70$ , también cumple para estancias cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice Ld sea  $70 < Ld < 75$ .

En la Muestra 3, el aislamiento acústico a ruido de tráfico es de  $R_{Atr} = 47,8$  dBA, para las características de hueco expuestas se obtendría un valor de aislamiento de  $D_{2m,nT,Atr} = 41$  dBA. Con este valor, se puede decir que esta fachada con el hueco descrito cumple para dormitorios cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice  $L_d$  sea  $65 < L_d < 70$ , también cumple para estancias cuya exigencia sea de 37 dBA y cuyo índice  $L_d$  sea  $70 < L_d < 75$ .

#### **Intensimetría Sonora:**

A través de la intensimetría sonora se localizan áreas de máxima transmisión de sonido, representándose en mapas. Los resultados obtenidos en los mapas de intensidad se muestran en tercios de octava desde 100 Hz hasta 5 kHz.

Es importante mencionar que durante la construcción de cada una de las muestras de ensayo se cuidó mucho la ejecución de cada capa. Por ello, se puede concretar que la transmisión debida a puentes es despreciable, ya que todas las juntas se han sellado.

La Figura 4 es un ejemplo de la representación de los mapas de intensidad a la frecuencia de 500 Hz de cada una de las tres tipologías de fachadas multicapas ligeras. En ellas se puede observar que la mayor transmisión se produce en la zona vertical central que corresponde con los perfiles metálicos. Al mismo tiempo se puede apreciar que en la Muestra C se obtiene un gran aislamiento en todo el panel, de ahí los valores de intensidad negativos.

Lo más característico de los mapas de intensidad a 500 Hz es una mayor transmisión del sonido en las zonas donde predomina la estructura de steel frame, sobre todo a bajas frecuencias. Esta transmisión es más visible en la zona de la junta central entre perfiles. En los mapas de intensidad a penas se nota claramente el resto de la perfilera, salvo pequeños puntos singulares en los que se perforó el panel de OSB que está en contacto con la cámara del steel frame.

A través de estos resultados, se puede decir que este tipo de sistema constructivo tiene gran sensibilidad ante las distintas variaciones de algunas de sus capas.

Por no tener disponibilidad de datos y resultados de intensidad sonora de fachadas tradicionales, se realiza la comparativa sólo de las fachadas multicapas ligeras.

#### 4. DISCUSIÓN

Tomando en cuenta los resultados de aislamiento a ruido aéreo obtenidos, se ha generado la siguiente Tabla 6 resumen, en la que se puede observar que tanto los cerramientos multicapas ligeros como los cerramientos tradicionales con un hueco del 30% y  $R_{Atr} = 40$  dBA, se podrían implementar en la mayoría de los casos en zonas donde el índice de ruido día sea de  $65 < L_d < 70$  para dormitorios y de  $70 < L_d < 75$  para estancias (Residencial y Hospitalario).

Sin embargo, la fachada multicapa ligera muestra C en combinación con el mismo hueco, se puede implementar en zonas donde el índice de ruido día sea de  $70 < L_d < 75$  para dormitorios y de  $L_d > 75$  para estancias, lo que significa que este cerramiento cumpliría en zonas de entornos ruidosos.

La Figura 5, muestra la comparativa de los resultados de aislamiento a ruido aéreo obtenidos tanto en las fachadas multicapas ligeras como en las fachadas tradicionales.

En la comparativa, se puede observar en bajas frecuencias que la fachada multicapa ligera B presenta un menor aislamiento que el resto de fachadas. Mientras que, las demás fachadas tanto ligeras como tradicionales estudiadas en este artículo presentan comportamientos similares. Además de la cámara con aislamiento común (capas 4 y 5) de las tres fachadas multicapas ligeras estudiadas, la fachada A tiene una lana confinada entre placas de OSB y la fachada C entre dos morteros, esta pequeña cámara proporciona a las muestras una notable mejora del aislamiento a bajas frecuencias. En medias frecuencias las fachadas multicapas ligeras A, B y C tienen un aislamiento superior que el de las fachadas tradicionales 1 y 2, tendiendo las ligeras a disminuir por encima de 1250 Hz.

Por lo tanto, se puede decir que las fachadas multicapas ligeras estudiadas, presentan un aislamiento acústico global comparable con los sistemas tradicionales, con grandes niveles de aislamiento a medias frecuencias.

Es importante destacar, que al incorporar en una fachada multicapa ligera (muestra C) una capa homogénea continua en todo el cerramiento, la intensimetría muestra como se hace más homogénea la transmisión de sonido en la superficie de fachada estudiada. Por tanto, se suaviza

el efecto de las múltiples perforaciones de los tornillos de fijación de las placas. En esta muestra C, el aislamiento es tan elevado que sólo se observan valores positivos de intensidad en puntos escasos y muy concretos, las intensidades registradas son negativas en casi todo el rango de frecuencias, predominando en más de un 90% en todos los mapas de intensidad obtenidos. Debido a que la energía registrada se debe en mayor medida al ruido de fondo que al ruido procedente de la cámara emisora a través de la muestra.

Al realizar los ensayos de intensimetría sonora sobre las fachadas multicapas ligeras, se puede decir que, este tipo de sistema es vulnerable ante deficiencias de ejecución. De aquí la necesidad de crear productos de paneles de fachada multicapa ligera industrializados que garanticen la correcta ejecución en su construcción.

Sin embargo, los resultados de las muestras A y C demuestran que los cerramientos multicapas ligeros tienen buenas prestaciones acústicas. Superando los valores de las fachadas ligeras del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE (3) (punto 4.2.10 y 4.2.11) de espesores y masa similares e incluso mayores.

Para cumplir los requisitos en edificios ubicados en zonas tranquilas las tres fachadas multicapas ligeras podrían implementarse. En el caso de zonas de altos niveles de ruido próximas a autopistas la Muestra C se podría considerar adecuada (por ejemplo con un hueco del 30% y  $R_{Atr} = 40$  dBA) para cumplir las exigencias de aislamiento en estas zonas.

## **AGRADECIMIENTOS**

La Información/Resultados que se exponen en el presente artículo son fruto de los trabajos de investigación realizados por las entidades Grupo de Investigación TISE-UPM, FCC y Saint-Gobain en el marco del Proyecto BALI “Building Acoustic for Living”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) dentro del programa Proyectos Singulares Estratégicos. Dichos resultados son, pues, propiedad exclusiva de las entidades que generaron dicha Información/Resultados en el ámbito del Proyecto BALI.

**Para el texto en español ir a la página 4**

## **1. INTRODUCTION**

To achieve the goals set by the Kyoto Protocol and more recently the Copenhagen agreement, while in turn fulfilling the environmental aspects that are advocated by the European Directive and the Technical Building Code (CTE), it is necessary to consider and make improvements in the design and construction of buildings, specifically the envelope. For this purpose efficient enclosures should be used which generate better thermal and acoustic characteristics.

It is therefore essential to study new facade building systems, including light multilayered with favourable characteristics for savings in energy consumption, and which can in turn be industrialized. Also achieving benefits such as quality improvement, shortening construction time, major safety, high performance and increased lightness, among others.

From the thermal point of view these multilayer enclosures have been studied and proved to be lightweight and with excellent performance. However, from an acoustic point of view, in general they have been little studied, and the data is available suggests they do not usually fulfill the sound insulation values required in the Technical Building Code (CTE) in particularly in noisy environments.

Another reason to study this type of façade construction system is to take into account the findings on similar systems (mainly focused on industrialization) by Professor R. Marc Lawson from the Steel Construction Institute at the University of Surrey, UK where he concludes:

- The weight of the materials is reduced by 80%.
- New materials required are reduced by 43%, greater sustainability.
- The waste generated is one tenth that of traditional construction.
- The embedded energy of materials is reduced by 33%.
- The amount of water used in construction is negligible.
- The energy needed for construction is reduced by 32%.

- The construction period is reduced by 60%, resulting in reduced overhead costs, estimated at more than 9%.
- The material cost of the work currently exceeds 10 to 15% the cost of traditional construction.
- The recyclability of the materials increases nine fold.
- The transport of materials is reduced by 70%.

One of the studies related to lightweight materials most worth mentioning is the Acoustic Properties of Reed Panels (2), where environmentally sustainable building systems have been characterized acoustically based on reed panels. These may be implemented in light multi-layered façade systems such as cladding panels, as they have good absorption performance to medium and high frequencies.

The multi-layered enclosures are made up of different layers and/or materials, in which each has a specific function to ensure excellent performance. Depending on the conditions and user needs, the diversity of materials that can be used and the different configurations of these layers, result in high thermal performance of this construction system. For acoustic performance, being a lightweight solution with low specific mass, proper layout of the different layers is of particular interest for high acoustic performance. Being a little studied system from an acoustic point of view creates an opportunity to innovate in this area and focus efforts on research and propose further improvements to this building system.

The main structure of this construction system is the steel framing, which is characterized by a structure consisting of cold-formed galvanized steel sections, which are used for the composition of structural and non-structural panels, secondary beams, floor beams and deck, and other components. Being an industrializable system, dry construction allows for high speed of execution.

This article will explain the process that has been carried out for an investigation related to the acoustic behaviour of light multi-layered facades. For this purpose acoustic behaviour and sound intensimetry measurement methods have been used.



The main objective of this research is to obtain light multi-layered façade systems with a high degree of acoustic insulation that can be used in any noisy environment. While showing excellent thermal characteristics, without neglecting important aspects such as the sustainability of materials, industrialization, costs, among others.

## 2. METHODOLOGY

### Phase I: Sample Selection

Three types of light multi-layered facades were selected, which had previously been designed taking into account various criteria, such as the thermal transmittance value, thickness, weight, cost. As well as the composition of each layer, the exterior finish, exterior thermal insulation, the interior panels, among others. The three light multi facades options were:

Sample A: light multi-layered façade with exterior OSB board thermal insulation and ventilated air chamber.

Sample B: light multi-layered facade without exterior thermal insulation and ventilated air chamber.

Sample C: light multi-layered façade without ventilated air chamber with ETICS (External Thermal Insulation Composite System).

The descriptions of each of the layers that make up the various light multi-layered enclosures are shown in Table 1.

Figure 1 shows the details of the different variations considered for light multi-layered enclosures.

As can be seen in the composition of the light multi-layered facades, sample A and B have a ventilated chamber. However, it is important to mention that laboratory tests did not reproduce the conditions of the ventilated chamber.

On the other hand, three compositions of traditional enclosures were chosen to serve as a reference and can be compared with the light multi-layered facades. These traditional enclosures

were selected from the constructive elements catalogue of the Technical Building Code (CTE) (3) and the BALI Project explanatory report "Building Acoustic for Living" (4).

Sample 1, brick outer skin facade with discontinuous render and ventilated air chamber. Código F.7.3. F.7.3 Code.

Sample 2, Brick facing outer skin facade without non-ventilated air chamber. Código F.1.1. F.1.1 Code.

Sample 3, externally rendered brick outer skin façade, non-ventilated air chamber and external insulation. ETICS system.

Below Table 2 specifies each of the layers that make up these traditional facades.

Figure 2 show the details of the selected samples of traditional enclosures.

## **Phase II: Methods of Analysis**

This phase is divided into two parts, depending on the type of test carried out, ie airborne noise insulation and sound intensimetry. To carry out both tests on the light multi-layered facades, a sample of each type was built.

The assembly of the facades was performed on the sample holder at the Laboratory of Applied Acoustics and Non-Destructive Evaluation Center (CAEND). It simulated the joining of two light multi-layered enclosures, there being a central board, on which the other materials were assembled, fusing them together to avoid the direct path of noise.

Figure 3 shows the assembly of some of the layers that make up the samples:

### **Airborne sound insulation:**

Trials of airborne sound insulation were performed under current regulations, following the UNE-EN ISO 140-3:1995. Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 3: Laboratory measurement of airborne sound insulation on facade elements and facades. (5).

On performing the insulation measurements the environment measurement characteristics are as follows:

Chamber Type: semi-reverberant.

Test surface area: 13 m<sup>2</sup>.

The volume of the sound room is variable as materials are added.

Besides the features mentioned, there are specific characteristics of the measurement environment, which are shown in Table 3.

#### **Sound Intensity:**

The measurements on intensity maps in the test chamber were performed under current legislation, based on IEC 1043 (1993) (6) and ISO 9614-1 (1993) (7). The characteristics of the measurement environment are the same as in the previous section.

### **3. RESULTS**

This section presents the results of each method of analysis used:

#### **Airborne sound insulation:**

The airborne sound insulation of each type of light multi-layered facades was measured, obtaining an overall sound reduction index of dB ( $R_w$ ), an overall sound reduction index for weighted element A of dBA ( $R_A$ ), and an overall sound reduction index, weighted A, for dominant external car noise of ( $R_{A, tr}$ ).

Table 4 shows the different numerical results for the three types of light multi-layered facades.

The CTE DB-HR Protection against noise (8) establishes the requirements for the facade enclosure according to external noise (noise index L d days) and the use of the building.

According to the simplified option of CTE DB-HR, to assess whether an enclosure meets the requirements of airborne sound insulation, insulation data is taken from both the opaque and glass parts (window). Depending on the percentage of window area, a difference value in levels is obtained, weighted A, in facades in contact with outside air for car noise  $D_{2m, nT, Atr}$  (dBA).

With this value, areas with a certain level of daytime noise where the specific facade could be implemented to meet the requirements of the CTE DB-HR can be estimated.

Therefore, according to the simplified design option CTE DB-HR, taking into account Table 2.1 Values of Airborne Sound Insulation  $D_{2m, nT, Atr}$ , in dBA between a protected building and the exterior, depending on the daytime noise index  $L_d$  and 3.4 Acoustic parameters for facades in contact with the outside air in protected enclosures, the range of insulation can then be calculated for the three types of light multi-layer facades that would be valid in the most unfavorable conditions such as bedrooms and residential and hospital stays.

Below are examples of the insulation values that would be obtained by implementing the light multi-layered facades studied with a 30% window area which has at least a  $R_{Atr} = 40$  dBA.

In the case of Sample A, the traffic sound insulation is  $R_{Atr} = 47.3$  dBA, for the window characteristics shown, an insulation value of  $D_{2m, nT, Atr} = 41$  dBA would be achieved. With this value, the facade above complies with the window described for bedrooms with a requirement of 37 dBA and index of  $65 < L_d < 70$ , which also complies for stays with a requirement of 37 dBA and an index  $L_d$  be  $70 < L_d < 75$ .

In Sample C, the traffic noise sound insulation is  $R_{Atr} = 49.5$  dBA, for the window characteristics shown, an insulation value of  $D_{2m, nT, Atr} = 42$  dBA would be achieved. With this value, the facade above complies with the window described for bedrooms with a requirement of 42 dBA and index of  $70 < L_d < 75$ , which also complies for stays with a requirement of 42 dBA and an index of  $L_d$  is  $L_d > 75$ .

In Sample B, the traffic noise sound insulation is  $R_{Atr} = 41.5$  dBA, if for example it were implemented with a window area of 30% and at least a sound insulation of  $R_{Atr} = 37$  dBA, this would provide an insulation value of  $D_{2m, nT, Atr} = 37$  dBA. With this value, the facade above complies with the window described for bedrooms with a requirement of 37 dBA and index of  $65 < L_d < 70$ , which also complies for stays of 37 dBA and an index of  $L_d$  be  $70 < L_d < 75$ .

In relation to the traditional facades studied and characterized, the values presented in the Catalogue of constructive elements of the CTE (3), graphical modeling software Acoubad-

DBMAT on acoustic behavior (9) and the explanatory report of the BALI project "Building Acoustic for Living" (4) are taken as a reference.

Table 5 shows the results for the traditional facades.

As with the light multi-layered facades, shown below are examples of the insulation value that would be obtained by implementing these traditional facades with a 30% window area and at least a  $R_{Atr} = 40$  dBA, in the most unfavorable conditions that would be bedrooms and residential and hospital stays.

For Sample 1, the traffic noise sound insulation of is  $R_{Atr} = 45$  dBA, for the window characteristics shown, an insulation value of  $D_{2m, nT, Atr} = 41$  dBA would be achieved. With this value, the facade above with the window described complies for bedrooms with a requirement of 37 dBA and index  $65 < L_d < 70$ , which also complies for stays with a requirement of 37 dBA and an index of  $L_d$  be  $70 < L_d < 75$ .

In Sample 2, the traffic noise sound insulation is  $R_{Atr} = 46$  dBA, for the window characteristics shown, an insulation value of  $D_{2m, nT, Atr} = 41$  dBA would be achieved. With this value, the facade above with window described complies for bedrooms with a requirement of 37 dBA and index of  $65 < L_d < 70$ , which also complies for stays with a requirement of 37 dBA and an index of  $L_d$  be  $70 < L_d < 75$ .

In Sample 3, the traffic noise sound insulation is  $R_{Atr} = 47.8$  dBA, for the window characteristics shown an insulation value of  $D_{2m, nT, Atr} = 41$  dBA would be achieved. With this value, the facade above complies with window described for bedrooms with a requirement of 37 dBA and an index  $65 < L_d < 70$ , which complies for stays with a requirement of 37 dBA and an index of  $L_d$  be  $70 < L_d < 75$ .

### **Sound Intensimetry:**

Through sound intensimetry, areas of maximum sound transmission are located and represented by maps. The results obtained on the intensity maps are shown in third octaves from 100 Hz to 5 kHz.

It is noteworthy that during the construction of each of the test samples great care was taken in the implementation of each layer. Therefore, it can be specified that transmission due to bridges is negligible, as all joints are sealed.

Figure 4 is an example intensity maps representation of each of the three types of multi-layered facades at a frequency of 500 Hz. It can be observed that most transmission occurs in the central vertical area corresponding to the metal profiles. At the same it can be seen that sample C yields high insulation throughout the panel, hence the negative intensity values.

Most characteristic of the intensity maps at 500 Hz is increased sound transmission in areas dominated by steel frame structure, especially at low frequencies. This transmission is most visible in the central joint area between profiles. The rest of the profile can barely be seen, except for small specific points in which the OSB is perforated and in contact with the steel frame camera.

Through these results, it can be stated that this type of construction system has great sensitivity to the different variations of some of its layers.

Due to the lack of availability of data and results of sound intensity for traditional facades, a comparison is made only for light multi-layered facades.

#### 4. DISCUSSION

Taking into account the results of airborne sound insulation obtained, the following summary Table 6 has been drawn up, which shows that both light multi-layered and traditional enclosures with a 30% window area and  $RA_{tr} = 40$  dBA, could be implemented in most cases in areas where the daytime noise index is  $65 < L_d < 70$  for dorms and  $70 < L_d < 75$  for stays (Residential and Hospital).

However, the light multi-layered façade sample C in combination with the same window, can be implemented in areas where the daytime noise index is  $70 < L_d < 75$  for bedrooms and  $L_d > 75$  for stays, which means that this enclosure meets the requirements in noisy areas.

Figure 5 shows the comparative results obtained for airborne sound insulation in both light multi-layered and traditional facades.

In the comparison, it can be seen that at low frequencies the light multi-layered façade B shows lower levels of insulation than the other facades. Whereas the other facades studied in this article both light and traditional, show similar behavior. Besides the common insulation chamber (layers 4 and 5) of the three light multi-layered facades studied, façade A has wool confined between OSB panels and façade C between two mortars, this small chamber provides the samples with a marked improvement in insulation at low frequencies. At mid-frequencies the light multi-layered facades A, B and C have higher insulation than traditional facades 1 and 2, with the light facades tending to decrease above 1250 Hz.

Therefore, it has been shown that the light multi-layered facades studied have an overall sound insulation comparable to traditional systems, with high levels of insulation at medium frequencies.

It is important to emphasize that by incorporating on a light multi-layered façade (sample C) a continuous homogeneous layer around the entire enclosure, the intensimetry shows how the sound transmission on the façade surface studied is made more homogeneous. Therefore, it softens the effect of multiple perforations of the fixing screws of the plaques. In this sample C, the insulation is so high that only positive insensitivity values are observed in scarce and very specific points, the intensity registered is negative in almost the entire range of frequencies, predominating at over 90% on all intensity the maps obtained. This is due to the fact that the energy registered is due more to the background noise than the noise from the sound chamber through the sample.

When performing sound intensimetry tests on light multi-layered facades, one can say that such a system is vulnerable to deficiencies in assembly. Hence the need to create industrial light multi-layered facade products, to ensure proper assembly during construction.

However, the results of samples A and C show that light multi-layered enclosures have good acoustic performance. Surpassing the light façade values in the Catalogue of constructive

elements of the CTE (3) (point 4.2.10 and 4.2.11), with similar thickness and mass or even greater.

To meet the requirements for buildings in quiet areas, all three light multi-layered facades could be implemented. For areas with high noise levels near motorways, Sample C could be considered appropriate (e.g. with window of 30% and  $R_{Atr} = 40$  dBA) to meet insulation requirements in these areas.

#### **ACKNOWLEDGEMENTS**

This research study has been concluded by the TISE Research Group - UPM, FCC and Saint-Gobain entities in the Framework of the BALI Project “Building Acoustic for Living”, funded by the Ministry of Science and Innovation (MICINN) and European Regional Development Fund (FEDER) within the PSE program. These results are, consequently, exclusive property of the entities that have generated the Information/Results in the BALI Project.



## REFERENCIAS/REFERENCES

- (1) Lawson, R. M. "Industrialization in Construction- Housing and Residential Buildings". En la Jornada Innovación en el Sector de la Construcción. Gobierno Vasco. Departamento de Vivienda y Asuntos Sociales. (Bilbao 7 de Febrero de 2008). Pag. 79-82.
- (2) Díaz, C.; Jiménez, M.; Navacerrada, M.A. & Pedrero, A.: "Propiedades acústicas de los paneles de carrizo". *Materiales de Construcción* [online], manuscrito aceptado (2010), doi: 10.3989/mc.2010.60510
- (3) Ministerio de Vivienda. "Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación" (CTE). (2010).
- (4) Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN). "Memoria Justificativa del Proyecto BALI "Building Acoustic for Living". (2011).
- (5) Norma UNE-EN ISO 140-3:1995. "Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio de aislamiento acústico al ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas". (1995)
- (6) Norma IEC 1043: "Instruments for the measurement of sound intensity". (1993).
- (7) Norma ISO 9614-1. "Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity -- Part 1: Measurement at discrete points". (1993).
- (8) Ministerio de Vivienda. "Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HR Protección frente al ruido". (2009).
- (9) Consejería de Vivienda y Asuntos Sociales del Gobierno Vasco. Acoubad-dbMat V.3.3.0 (Herramienta de modelización del comportamiento acústico del edificio).

## TABLAS / TABLES

Tabla 1/Table 1

Composición de las fachadas multicapas ligeras / Composition of the light multi-layered facades.

Muestra / Sample A	Muestra / Sample B	Muestra / Sample C
· 1. Placa Yeso Laminado / Laminated Plaster Board e:13mm	· 1. Placa Yeso Laminado / Laminated Plaster Board e:13mm	· 1. Placa Yeso Laminado / Laminated Plaster Board e:13 mm
· 2. Placa Yeso Laminado / Laminated Plaster Board e:15mm	· 2. Placa Yeso Laminado / Laminated Plaster Board e:15mm	· 2. Placa Yeso Laminado / Laminated Plaster Board e:15 mm
· 3. Barrera de vapor / Vapor Barrier	· 3. Barrera de vapor / Vapor Barrier	· 3. Barrera de vapor / Vapor Barrier
· 4. Steel frame (SF) e:90mm	· 4. Steel frame (SF) e:90mm	· 4. Steel frame (SF) e:90mm
· 5. Lana de vidrio ECO90 ubicada dentro de SF. / Glass wool located inside SF e: 90 mm	· 5. Lana de vidrio ECO90 ubicada dentro de SF. / Glass wool located inside SF e: 90 mm	· 5. Lana de vidrio ECO90 ubicada dentro de SF. / Glass wool located inside SF e: 90 mm
· 6. Panel OSB e:12 mm	· 6. Panel OSB e:12 mm	· 6. Panel OSB e:12 mm
· 7. Lana de vidrio ECO40D / Glass wool e:40mm	· 7. Lámina Tyvek	· 7. Mortero base / Morter base e:2-3 mm
· 8. Panel OSB e:12 mm	· 8. Lana de vidrio ECO40D / Glass wool e:40mm	· 8. Lana de Roca / Rock wool e:60 mm
· 9. Lámina impermeabilizante y reflectiva / Reflective waterproof membrane.	· 9. Polymun ONE e : 4 mm	· 9. Mortero base + malla fibra de vidrio / Morter base + glass fiber mesh e:3-4mm
· 10. Cámara de aire + montantes / Air chamber + studs e:50mm	· 10. Cámara de aire + montantes / Air chamber + studs e:50mm	· 10. Regulador de fondo CS / CS Regulator paint layer.
· 11. Acabado exterior: en la muestra de laboratorio no se ha implementado / Exterior finish: not implemented in the lab sample.	· 11. Acabado exterior: en la muestra de laboratorio no se ha implementado / Exterior finish: not implemented in the lab sample.	· 11. Revestimiento continuo acrílico (stilo) / Continuous cast acrylic cladding (stilo) e: 2 – 3 mm

**Tabla 2/ Table 2**

Composición de las fachadas tradicionales / Composition of traditional facades

Muestra / Sample 1	Muestra / Sample 2	Muestra / Sample 3
· 1. Enlucido de yeso / Gypsum plaster e:15mm	· 1. Enlucido de yeso / Gypsum plaster e:15mm	· 1. Enlucido de yeso / Gypsum plaster e:10mm
· 2. Tabique hueco sencillo / Hollow ceramic block e:40mm	· 2. Tabique hueco sencillo/ Hollow ceramic block e:40mm	· 2. Ladrillo cara vista / Open face brick e:115mm
· 3. Lana de vidrio / Glass wool e:40mm	· 3. Lana de vidrio / Glass wool e:40mm	· 3. Mortero base / Morter base e: 2-3 mm
· 4. Enfoscado / Plaster e:15mm	· 4. Enfoscado / Plastering e:15mm	· 4. Lana de Roca / Rock wool e : 60 mm
· 5. Ladrillo cara vista / Open face brick e:115mm	· 5. Ladrillo cara vista / Open face brick e:115mm	· 5. Mortero base + malla fibra de vidrio / Morter base + glass fiber mesh e : 3-4mm
· 6. Cámara aire ventilada / Ventilated air chamber e:50 mm		· 6. Regulador de fondo CS / CS Regulator paint layer
· 7. Acabado exterior / Exterior finish		· 7. Revestimiento continuo acrílico (stilo) / Continuous cast acrylic cladding

**Tabla 3/ Table 3**

Características específicas del entorno de medida / Specific features of the measurement environment

Características Específicas / Specific Characteristics	Muestra / Sample A	Muestra / Sample B	Muestra / Sample C
Densidad Superficial / Superficial Density kg/m <sup>2</sup>	40.4	33.2	48.8
Volumen / Volume m <sup>3</sup>	98	98	98
Cámara Receptora / Receptor Area	Temperatura / Temperature °C	18	18
	Humedad / Humidity %	44	45
Volumen / Volume m <sup>3</sup>	84.6	84.9	84.5
Cámara Emisora / Emitting Area	Temperatura / Temperature °C	17	18
	Humedad / Humidity %	43	45

**Tabla 4/Table 4**

Resultados de las fachadas multicapas ligeras / Results for light multi-layered facades.

Muestra / Sample	R'w (C,Ctr) (dB)	RA (dBA)	RA,tr (dBA)	m (kg/m <sup>2</sup> )	e (mm)
Muestra / Sample A	57 (-3;-10)	54,2	47,3	40.4	184
Muestra / Sample B	52 (-3;-10)	49	41,5	33.2	176
Muestra / Sample C	60 (-3;-10)	56,7	49,5	48.8	200

**Tabla 5/ Table 5**

Resultados de las fachadas tradicionales / Results for traditional facades.

Muestra / Sample	Rw (C,Ctr) (dB)	RA (dBA)	RA,tr (dBA)
Muestra / Sample 1	48 (0;-3)	48	45
Muestra / Sample 2	52 (-1;-5)	52	46
Muestra / Sample 3	57 (-3;-9)	55.5	47.8

**Tabla 6/ Table 6**

Resultados de las fachadas siguiendo la opción simplificada del CTE / Results for facades following the CTE simplified option.

	RAtr (dBA)		Residencial y Hospitalario / Residential and Hospital Building				
	RAtr (dBA)	30 % Hueco	D <sub>2m,nT,Atr</sub> (dBA)	Building			
				Dormitorios/ Bedroom	L <sub>d</sub> (dBA)	Estancias/ Rooms	L <sub>d</sub> (dBA)
A	47.3	40	41	37	65<L <sub>d</sub> <70	37	70<L <sub>d</sub> <75
B	41.5	37	37	37	65<L <sub>d</sub> <70	37	70<L <sub>d</sub> <75
C	49.5	40	42	42	70<L <sub>d</sub> <75	42	L <sub>d</sub> >75
1	45	40	41	37	65<L <sub>d</sub> <70	37	70<L <sub>d</sub> <75
2	46	40	41	37	65<L <sub>d</sub> <70	37	70<L <sub>d</sub> <75
3	47.8	40	41	37	65<L <sub>d</sub> <70	37	70<L <sub>d</sub> <75

## PIES DE LAS FIGURAS/ FIGURE CAPTIONS

**Figura 1/ Figure 1.** Detalles de la composición de las fachadas multicapas ligeras./ Details of the composition of the light multi-layered facades.

**Figura 2/ Figure 2.** Detalles de la composición de las fachadas tradicionales. / Details of the composition of the traditional facades.

**Figura 3/ Figure 3.** Fotografías del montaje de las fachadas multicapas ligeras en el portamuestras./ Photos of assembly of light multi-layered facades on the simple holder.

**Figura 4 / Figure 4:** Resultados de intensidad a 500 Hz. / Results of intensity at 500 Hz.

**Figura 5 / Figure 5:** Comparativa de las distintas fachadas. / Comparison of different facades.



Figura 1 / Figure 1

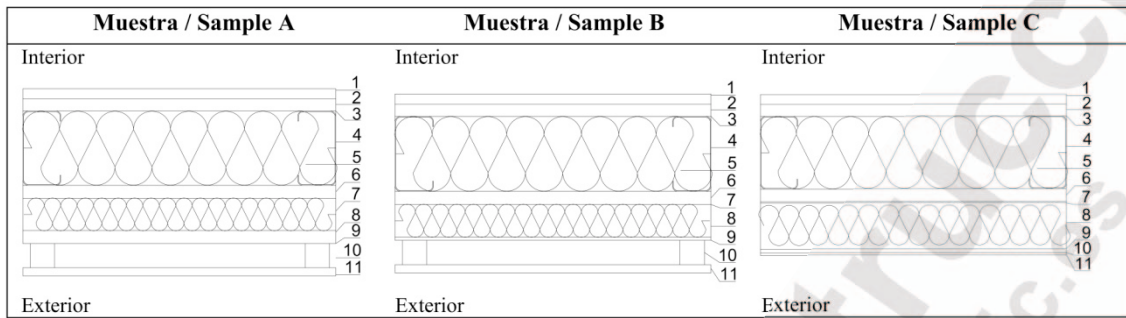
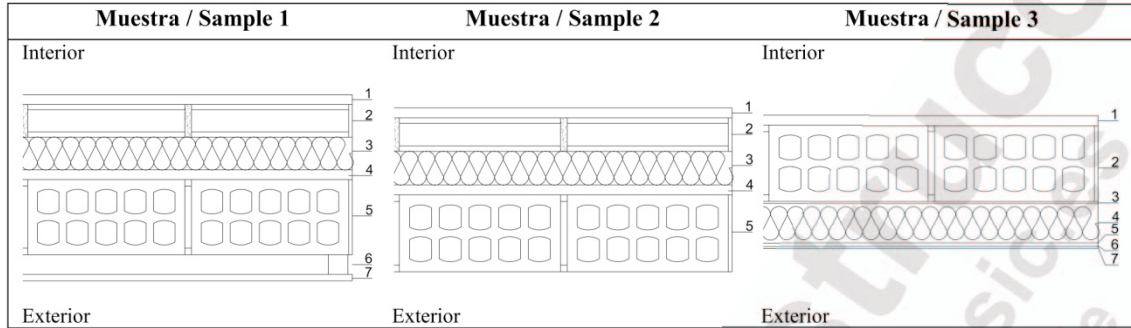


Figura 2 /Figure 2



**Figura 3 /Figure 3**

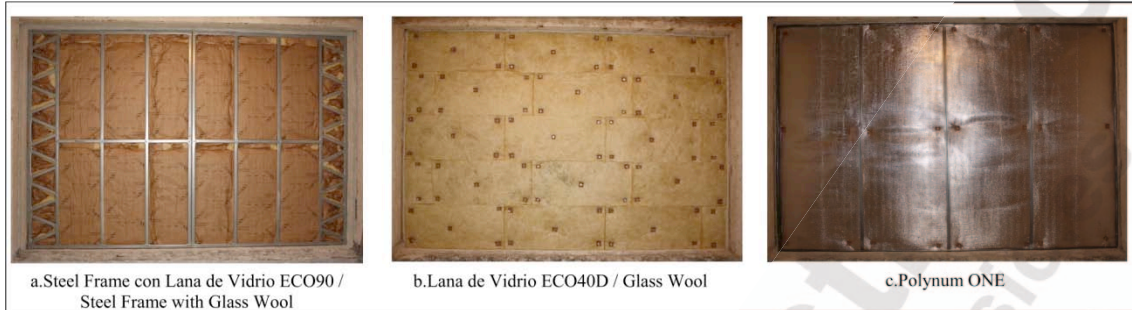


Figura 4 /Figure 4

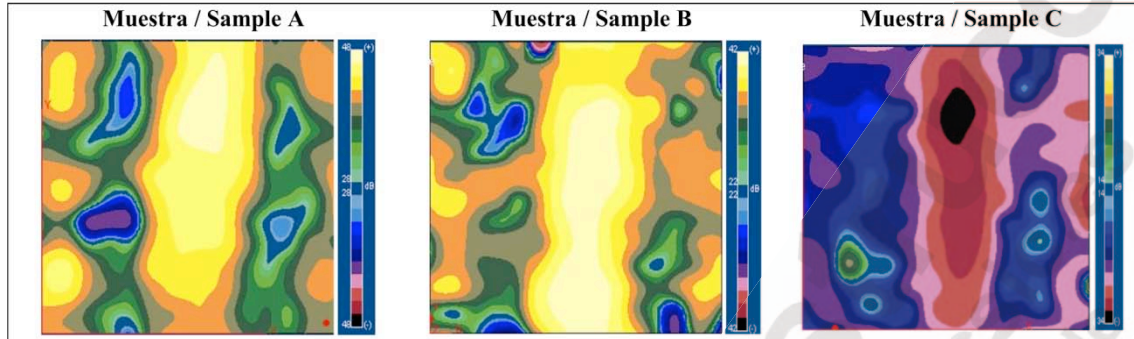
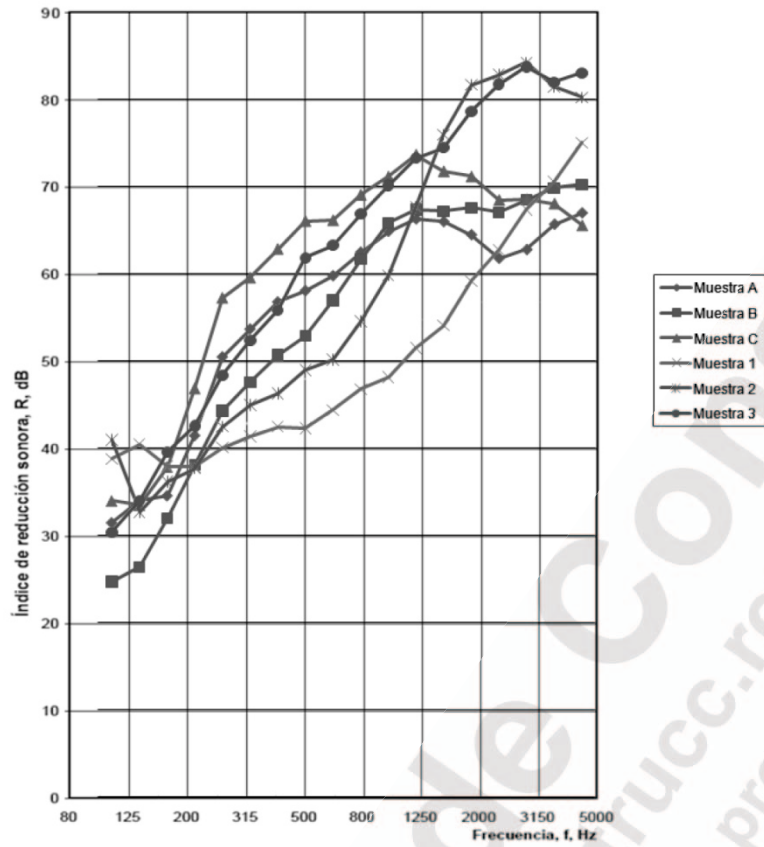


Figura 5 /Figure 5



2