

TESIS DOCTORAL

**COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE LA FACHADA
VENTILADA CON REVESTIMIENTO LIGERO**

Análisis de la variación según las características de la ventilación

**ACOUSTIC PERFORMANCE IN LIGHTWEIGHT
VENTILATED FAÇADE**

Analyzing the variations in the characteristics of the ventilation

Doctoranda

ANDREA NIAMPIRA DAZA

Director

JOAN LLUIS ZAMORA i MESTRE, Dr. Arquitecto

Programa de Doctorado

ARQUITECTURA, ENERGIA I MEDI AMBIENT

Septiembre de 2014

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

A mis padres

Quienes me han dado todo y gracias a ellos estoy aquí

A mi familia

Hermanos, sobrinos, tíos y tías, primos y primas

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de la realización de ésta tesis he contado con la colaboración casi incondicional de varias personas e instituciones a las cuales quiero agradecer en éste espacio, algunas de ellas han influido en mi proceso de aprendizaje, han sido inspiradoras o siempre me han brindado una voz de aliento y apoyo.

Agradezco a Joan Lluís Zamora I Mestre mentor y director de la tesis, su optimismo y siempre oportuna colaboración han sido parte importante de éste proceso.

Al profesor Rafael Serra Florensa de quien aprendí la importancia de observar y de ver la belleza en cada proceso de creación sin olvidar la técnica y la lógica de percibir y habitar un lugar para concebir espacios. Así mismo a los demás profesores del programa de doctorado Helena Coch, Ramón San Martín, Albert Cuchi, Jaume Avellaneda, Jaume Roset y otros.

A la empresa Knauf de España y Bélgica y algunos de sus colaboradores, Joanna Cárdenas, Javier Blas, Jordi Rafòls, Dasil Fernández, Arnaud Cariola y Danny Decaluwaert.

Al profesor Joan Puigdomènech y demás colaboradores de la ETSAV en 2011 por permitir la disponibilidad del edificio.

A Jordi Romeu y a Julen por el aporte en conocimientos y equipo en mediciones acústicas.

Al profesor André De Herde director del departamento Architecture et Climat de la Université Catholique de Louvain- La Neuve por brindarme su apoyo, al profesor Marcelo Blasco por su colaboración constante y su aporte en nuevos conocimientos.

Al Centro Tecnológico ASCAMM por la oportunidad de colaboración y su equipo humano, Ferran Bermejo, Marcel Janer por sus aportes técnicos de conocimientos en acústica, a Gloria, Laia, Carlos y Eva por su compañía apoyo y voz de aliento durante mi estancia.

A mi familia, a mis amigos, compañeros de vida, de estudios de los cuales siempre tendré gratos recuerdos por sus risas, ánimos, enseñanzas, apoyo y aguante, Pablo Baquero, Xavier Páramo, Femi, mis muchos y queridos compañeros de casa Ania, Aude, Kornel, Julien, Sara Bxl, Ana Bxl, Sarita Bcn, Paula, Elena, Isa, Miquel, Emilio, Javi, Rafa, Aitor, Kristiana, Simon, Somaya, otros amigos Kris, Marisol, Arjuna, mis compañeros de la UPC, Adriana, Enrica, Javier, Leandra, Pilar, Camila, Vladimir, Eloisa. Y a los muchos otros compañeros de experiencias a quienes siempre tendré presente, les agradezco haberlos encontrado y hacen parte de mi vivir.

*El amor al conocimiento nos ayuda a
estar en constante búsqueda y ha descubrir con emoción
el ser capaces de hacer posible lo que a veces creemos imposible.*

Andrea Niampira Daza.

RESUMEN

En esta tesis se aborda el estudio de la mejora del comportamiento acústico de la fachada de los edificios como barrera de protección al ruido exterior, centrándose concretamente en el estudio del comportamiento del sistema de Fachada Ventilada con Revestimiento Ligerero (FVL). Este sistema constructivo se viene utilizando los últimos años como solución constructiva tanto para obra nueva como para la rehabilitación de edificios. Este segundo ámbito de aplicación está cobrando singular importancia como objeto de estudio, teniendo en cuenta que tanto en España como en otros países, dentro y fuera de Europa, existe un amplio número de edificios, tanto de uso residencial como no residencial construidos en el siglo xx especialmente antes de la década de los 70, que en próximos años tendrán que renovar su fachada, no solo por causa de mantenimiento o cambio estético, sino particularmente como solución a los déficits manifestados en aspectos de aislamiento y estanqueidad, así mismo adecuarse a las nuevas regulaciones de bajo consumo.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) vigente en el Estado Español no reconoce éste tipo de Revestimiento Ligerero con interposición de una cámara de aire ventilada intermedia, como una solución adecuada para el incremento del nivel de aislamiento acústico de la fachada existente, porque el carácter ventilado de la cámara de aire intermedia lo anula. Sin embargo hay diversos indicios de que la aplicación de un Revestimiento Ligerero con interposición de una cámara de aire ventilada intermedia puede aportar cierta mejora del nivel de aislamiento acústico del conjunto respecto del nivel de aislamiento acústico de la fachada preexistente, habitualmente pesada y gruesa, pero dependiendo de las características de la ventilación adoptada para la cámara de aire intermedia.

Así mismo se aborda el estudio de la mejora que supone en el nivel de aislamiento acústico del conjunto de la (FVL) en función de la variación de las características de la ventilación de la cámara de aire intermedia (principalmente la posición de las aberturas, orientación de las aberturas y extensión de las aberturas). Para ello se han aplicado métodos de simulación analítica, medios de experimentación en laboratorio y mediciones realizadas a pie de obra de un edificio real y de otros cerramientos dobles. Su resultado espera contribuir al futuro desarrollo normativo a partir de la reconsideración del aporte positivo del uso de la (FVL) al nivel de aislamiento acústico de una fachada rehabilitada.

SUMMARY

This thesis examines the sound insulation qualities of façade buildings with barrier protection against exterior airborne noise. This research is focused specifically on the acoustic performance of Lightweight Ventilated Façades (LVFs) with exterior claddings. The properties (LVFs) are an important line of research because they are now commonly used in new buildings, and because many buildings from twentieth century, especially those built before the 70s, in Spain and other Euro Zone countries require renovation to the exterior walls for aesthetic reasons, for better insulation and to meet new low energy consumption requirements.

In Spain, the current “Código Técnico de la Edificación” (CTE) regulation does not allow for the consideration of exterior cladding with an air cavity to a pre-existing façade when meeting airborne sound reduction requirements. However there is evidence that applying an exterior cladding with an air cavity can improve the overall airborne sound insulation in a façade, with respect to the pre-existence wide and heavy wall. The level of reduction is dependent on the opening ventilated surface of the air cavity in the (LVF). To establish these results, analytic computer simulation modelling methods have been used, along with laboratory and on-site acoustic testing using a real pre-existence façade wall and another enclosing walls to measure the sound reduction behavior in double walls after augmentation of the ventilation slits: Varying its opening surface, the position in a LVF and its direction.

This work hopes to contribute to the development of future regulation regarding airborne sound insulation façade improvement using (LVFs) for building renovation.

LISTADO DE ACRÓNIMOS MÁS UTILIZADOS

(En orden alfabético)

CB	<i>Cement Board</i>
CLF	<i>Coupling loss factor</i>
CTE	Código Técnico de Edificación (España)
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>
FE o FEM	Finite elements methode
FI	Fachada inicial
FVL	Fachada Ventilada con Revestimiento Ligero
LARGE	<i>Laboratory for Acoustic Research on Glass and large Envelopes</i>
LVF	<i>Lightweight Ventilated Facade</i>
NCT	<i>Noise Control Treatment</i>
PYL	Placa de yeso laminado
SATE	Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior
SEA	<i>Statistical Energy Analysis</i>
SRI	<i>Sound Reduction Index</i>
TL	<i>Transmission Loss</i>

SIMBOLOGÍA ACÚSTICA UTILIZADA

(En orden alfabético)

ΔR	Mejora del índice de reducción acústica de un revestimiento.
$\Delta R_{\text{Resonant}}$	Mejora del índice de reducción acústica a través de la transmisión resonante.
C	Término de adaptación espectral del aislamiento para medias y altas frecuencias.
C_{Tr}	Término de adaptación espectral de aislamiento a bajas frecuencias para el ruido de tráfico (automóviles y aeronaves).
d	Distancia de separación entre dos paredes en milímetros. (mm)
$D_{nT,w}$	Diferencia global de niveles estandarizada. (dB)
$D_{2m,nT}$	Diferencia de niveles estandarizada en fachadas. (dB)
E	Módulo de elasticidad. N/m ²
f	Frecuencia. (Hz)
f_{msm}	Frecuencia de resonancia masa-muelle-masa. (Hz)
f_c	Frecuencia de coincidencia. (Hz)
L_{eq}	Nivel sonoro equivalente. (dB)
L_p	Nivel de presión sonora. (dB)
L_1	Nivel de presión sonora emisor. (dB)
L_2	Nivel de presión sonora receptor. (dB)
m'	Masa por unidad de superficie. (kg/m ²)
η	Factor de pérdidas – Loss factor
ρ	Densidad. (Kg/m ³)
R	Índice de reducción acústica de un elemento constructivo. (dB)
R_A	Índice de reducción acústica ponderado A (valor calculado en normativas anteriores). (dB)
R_w	Índice global de reducción acústica. (dB)
R'_w	Índice global de reducción acústica aparente. (dB)
S	Área. (m ²)
T	Tiempo de reverberación de un recinto. (s)
TL	<i>Transmission Loss</i> . (dB)
T_0	Tiempo de reverberación de referencia; su valor es (0,5 s)
V	Volumen del recinto receptor. (m ³)
V	Coeficiente de poisson

GLOSARIO POR ORDEN ALFABÉTICO

Aquapanel: Placa de 12.5mm de espesor utilizada como revestimiento exterior para fachadas está compuesta por cemento portland con aditivos y material aligerante y recubierta con una malla de fibra de vidrio. Es del tipo de los *Cement Board*.

Cámara ventilada: Espacio intermedio entre dos hojas de cerramientos de edificios, cumple las funciones de refrigeración y protección de excesos de humedad.

Diferencia de niveles: Es la diferencia en decibelios, entre el nivel de presión sonora exterior a 2m de distancia de una fachada, $L_{1,2m}$ y el valor medio espacio-temporal del nivel de presión sonora en el interior de un local receptor L_2 .

Diferencia de niveles estandarizada: Es la diferencia de niveles en decibelios correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el local receptor.

Double Skin Facade: Tipo de fachada de doble hoja de cristal que implementa el uso de la ventilación natural al interior del edificio a través de las hojas y de la cámara intermedia, se denominada fachada de doble piel.

Entramado autoportante: elemento constructivo formado por dos placas de yeso laminado, sujetas a una perfilera autoportante y una cámara normalmente rellena con un material elástico absorbente.

Exterior Cladding: Hoja ligera de revestimiento exterior para fachada.

Fachada ligera: Fachada continua y anclada a una estructura auxiliar, cuya masa por unidad de superficie es menor que 200 kg/m² (DB-HR CTE).

Fachada Ventilada con revestimiento Ligero: Cerramiento de doble hoja para fachada que se compone de una hoja interior que puede ser un muro existente o de obra nueva, una hoja exterior ligera de diversos materiales y una cámara intermedia normalmente abierta para la ventilación. La cámara aloja una capa de material aislante que va adosado a la cara exterior de la hoja interior y una subestructura de soporte de la hoja exterior.

Frecuencia crítica: Es la frecuencia en donde se produce una caída en la curva de aislamiento de un elemento, está relacionada con la rigidez y espesor de una placa o pared.

Frecuencia de resonancia: Es la frecuencia del sistema masa-muelle-masa que se produce en paredes dobles por la vibración que cada una de las paredes, depende de la masa, el espesor de y la distancia de separación de las paredes y la rigidez del medio que las separa.

Elementos finitos: Modelo matemático de cálculo utilizado en la predicción acústica a bajas frecuencias.

Impedancia mecánica: Mide la presión sonora que atraviesa un elemento teniendo en cuenta el flujo de aire y su velocidad de transmisión.

Índice Global de Reducción Acústica: Valor de aislamiento global de un elemento, obtenido mediante el cálculo de aislamiento acústico en relación a una curva de referencia, medido a 500Hz. Siguiendo la normativa ISO 717.

Índice de Reducción Acústica: Valor del aislamiento acústico de un elemento que se mide mediante la potencia sonora incidente y la transmitida a través de una muestra de ensayo.

Lightweight Ventilated Facade: Fachada ventilada ligera

Mejora del índice de reducción acústica de un revestimiento: Aumento del índice de reducción acústica de un elemento constructivo por adición de un tratamiento o revestimiento al elemento constructivo base.

Muro base y fachada inicial: Muro existente de un edificio al que se le añade una hoja exterior ligera.

Nivel de presión sonora: unidad que define la medición logarítmica de presión sonora respecto a un nivel de referencia del sonido más débil audible (20 micropascales) que define la incidencia del sonido en relación espacio temporal de un elemento.

Rainscreen: Es un tipo de fachada ventilada con revestimiento ligero denominada de esta forma en algunos países por la acción de protección frente a la lluvia.

Resistencia de flujo: Define la cantidad y velocidad de aire que atraviesa un material poroso.

Ruido rosa: Ruido utilizado para las mediciones acústicas normalizadas, expresado como niveles de presión sonora en bandas de tercio de octavas, consiste en una recta de pendiente 0dB/octava.

Sistemas de aislamiento térmico exterior: denominados en castellano SATE y en inglés ETICS. Consiste en adicionar una capa extra de aislamiento por el exterior de un edificio para mejorar sus condiciones térmicas.

Statistical Energy Analysis: Método matemático estadístico para la predicción acústica y de la vibración acústica, funciona mediante promedios de transmisión de energía a través de subsistemas creados. El método SEA es utilizado como base de cálculo en algunas herramientas de software de predicción acústica.

Sound Transmission Class: Valor de aislamiento acústico que determina el índice de reducción acústica en Norte-América, siguiendo la norma ASTM E-413

Vía de transmisión sonora aérea: es la propagación del sonido de forma transversal a un elemento (pared, fachada, forjado) sin existir una propagación longitudinal. El sonido pone en vibración el elemento que atraviesa y éste a su vez emite energía acústica, se produce a través de grietas, poros, conductos de ventilación o por medio de vibraciones elásticas del elemento que atraviesa entre los recintos emisor y receptor.

Vía de transmisión sonora por flancos: son las vibraciones longitudinales elásticas de paredes no adyacentes y radiadas al recinto receptor por las paredes laterales.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
SUMMARY	11
LISTADO DE ACRÓNIMOS MÁS UTILIZADOS	13
SIMBOLOGÍA ACÚSTICA UTILIZADA	15
GLOSARIO POR ORDEN ALFABÉTICO	17
TABLA DE CONTENIDO	19
1. INTRODUCCIÓN	23
1.1 Delimitación del alcance de la investigación: La fachada ventilada con revestimiento ligero (FVL)	23
1.2 Utilidad de la (FVL): Renovación de la fachada	27
1.2.1 Casos estudiados por diversos autores	28
1.2.1.1 Edificio de oficinas en Hasselt, (Belgica) (5)	28
1.2.1.2 Housing renovation, Helsinki (Finlandia) (6)	29
1.2.2 comentarios de los casos estudiados	33
1.3 objetivos de la tesis	34
1.4 Fuentes y referencias capítulo 1	35
2. ANTECEDENTES LA FACHADA DE DOBLE HOJA Y LA (FVL)	39
2.1 Clasificación de la doble fachada (DSF)	39
2.1.2 Desempeño de la Double Skin Facade (DSF)	42
2.2 Clasificación de la (FVL)	42
2.2.1 Tipologías de la (FVL)	43
2.2.2 Clasificación por tipo de hoja exterior de la (FVL)	44
2.2.3 Subestructura de la (FVL)	58
2.2.4 Clasificación y análisis de los productos usados para el aislamiento en la (FVL)	64
2.3 Fuentes y referencias capítulo 2	71
3. DESARROLLO DE LA TESIS Fase I	77
3.1 Planificación de desarrollo	77
3.2 Estado del arte Acústica en paredes dobles y la ventilación en la fachada	79
3.2.1 Aproximación al comportamiento acústico de la doble fachada (DSF)	79
3.2.2 Aspecto acústico de La Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL)	89
3.2.3 Comportamiento a bajas frecuencias	102
3.2.4 Manejo de la ventilación	104
3.2.5 Predicción acústica: Metodologías y herramientas	110
3.2.6 Análisis de las condiciones generales para el aislamiento acústico de un elemento	119
3.2.7 Comentarios sobre el estado del arte	127
3.3 Fuentes y referencias capítulo 3	129
4. DESARROLLO DE LA TESIS Fase II	135
4.1 Formulación de hipótesis	135
4.2 Propuesta de variación de los componentes de una Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL)	135

4.2.1 Configuración de prototipos de (FVL).....	138
4.3 Desarrollo de la Campaña 1. In-situ: Variación de configuración de la hoja exterior y variaciones del grado de apertura de la cámara de aire intermedia para la ventilación de la (FVL).....	138
4.3.1 Análisis y resultados de la campaña 1. In-situ	141
4.4 Desarrollo de la Campaña 2. de Laboratorio: Variación de espesores de la cámara de aire intermedia y variaciones del grado de apertura de la cámara de aire intermedia para la ventilación de la (FVL).....	149
4.4.1 Análisis y resultados de la campaña 2. de Laboratorio	152
4.5 Desarrollo de la Campaña 3. de simulación: Variación de espesores de la cámara de aire intermedia y variaciones del grado de apertura de la cámara de aire intermedia para la ventilación de la (FVL) mediante el uso comparativo de las herramientas de software INSUL, dBK Aisla y VA-one en (SEA) y (FEM).....	158
4.5.1 Análisis y conclusiones de los resultados obtenidos en la campaña 3. de simulación	179
4.6 Análisis práctico del comportamiento acústico de un cerramiento doble con cámara de aire intermedia de espesor y apertura variable	185
4.6.1 Comparación de diferentes casos de cerramientos dobles de placas de yeso laminado (PYL) a partir de ensayos de laboratorio	186
4.6.2 Utilización de las herramientas dBK Aisla 3.01 y VA-one 2012 en la simulación de cerramientos dobles	193
4.6.3 Simulación de la apertura de la cámara intermedia de un cerramiento doble con la herramienta VA-one 2012 (método creación de cámara intermedia)	201
4.6.4 Interpretación de los resultados del Análisis práctico del comportamiento acústico de un cerramiento doble con cámara de aire intermedia de espesor y apertura variable	209
4.7 Comentarios de la fase II	211
4.8 Fuentes y referencias capítulo 4.....	213
5. ANÁLISIS DE NORMATIVA Y REGLAMENTACIÓN ACÚSTICA.....	219
5.1 Normativa en España de la protección acústica de la fachada respecto al ruido exterior	221
5.2 Reglamentación en otros países	234
5.3 Comentarios	247
5.4 Fuentes y referencias capítulo 5.....	248
6. CONCLUSIONES FINALES.....	253
FINAL CONCLUSIONS	261
6.1 Further work	267
Currículo formativo	269
BIBLIOGRAFÍA	273
ANEXO A ANTECEDENTES DE LA DOBLE FACHADA.....	283
ANEXO B INFORME DE ENSAYO ACÚSTICO IN-SITU (FVL)	297
ANEXO C ACOUSTIC REPORT (LVF)	355
ANEXO D FÓRMULAS Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	385

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Delimitación del alcance de la investigación: La fachada ventilada con revestimiento ligero (FVL)

Este trabajo de investigación se centra en el estudio del comportamiento acústico de un sistema constructivo reciente de fachadas ventiladas con revestimiento ligero, denominada en esta tesis con el acrónimo (FVL), al variar su configuración con respecto a la ventilación de la cámara de aire intermedia, para evaluar su influencia positiva en el incremento del nivel de aislamiento acústico final.

Esta influencia se refiere a la mejora del nivel de aislamiento acústico respecto al ruido aéreo exterior que pueda obtenerse en la parte opaca de la fachada, sin tener en cuenta la existencia de aberturas de puertas o ventanas.

Esta influencia positiva se evaluará de acuerdo con el incremento de los valores del índice de reducción acústica (R) y de la diferencia de niveles estandarizada ($D_{2m,nT}$) respecto a una fachada convencional de una sola hoja pesada y gruesa.

La Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL) forma parte del conjunto de los sistemas constructivos de fachada denominadas de doble hoja. Se compone de:

- Una hoja interior (ya sea el cerramiento de fachada de un edificio existente a renovar o el cerramiento de fachada de un edificio de nueva planta), formada por un muro pesado y grueso, habitualmente de albañilería.
- Una capa de material aislante adherida a la cara exterior de dicha hoja interior.
- Una cámara de aire interpuesta, de espesor diverso, normalmente ventilada mediante aberturas de paso al exterior.
- Una hoja exterior formada por revestimiento ligero, de diversas formas y materiales; dicha hoja está formada habitualmente con placas prefabricadas que se fijan mecánicamente a la hoja interior mediante una subestructura de perfiles auxiliares.

Esta solución constructiva puede ser concebida para un edificio de nueva planta o como propuesta de rehabilitación para la fachada de un edificio antiguo que solo disponía de una hoja interior realizada con muro de albañilería. La disposición adicional de una capa de material aislante, una cámara de aire interpuesta y una hoja exterior ligera, que da lugar a un conjunto constructivo con mayores

prestaciones de impermeabilidad y protección térmica y acústica al tiempo que se renueva el aspecto estético. En el siguiente esquema (Fig. 1.1) se muestran a demás de las funciones de protección térmica también el comportamiento acústico de la (FVL) frente al ruido exterior.

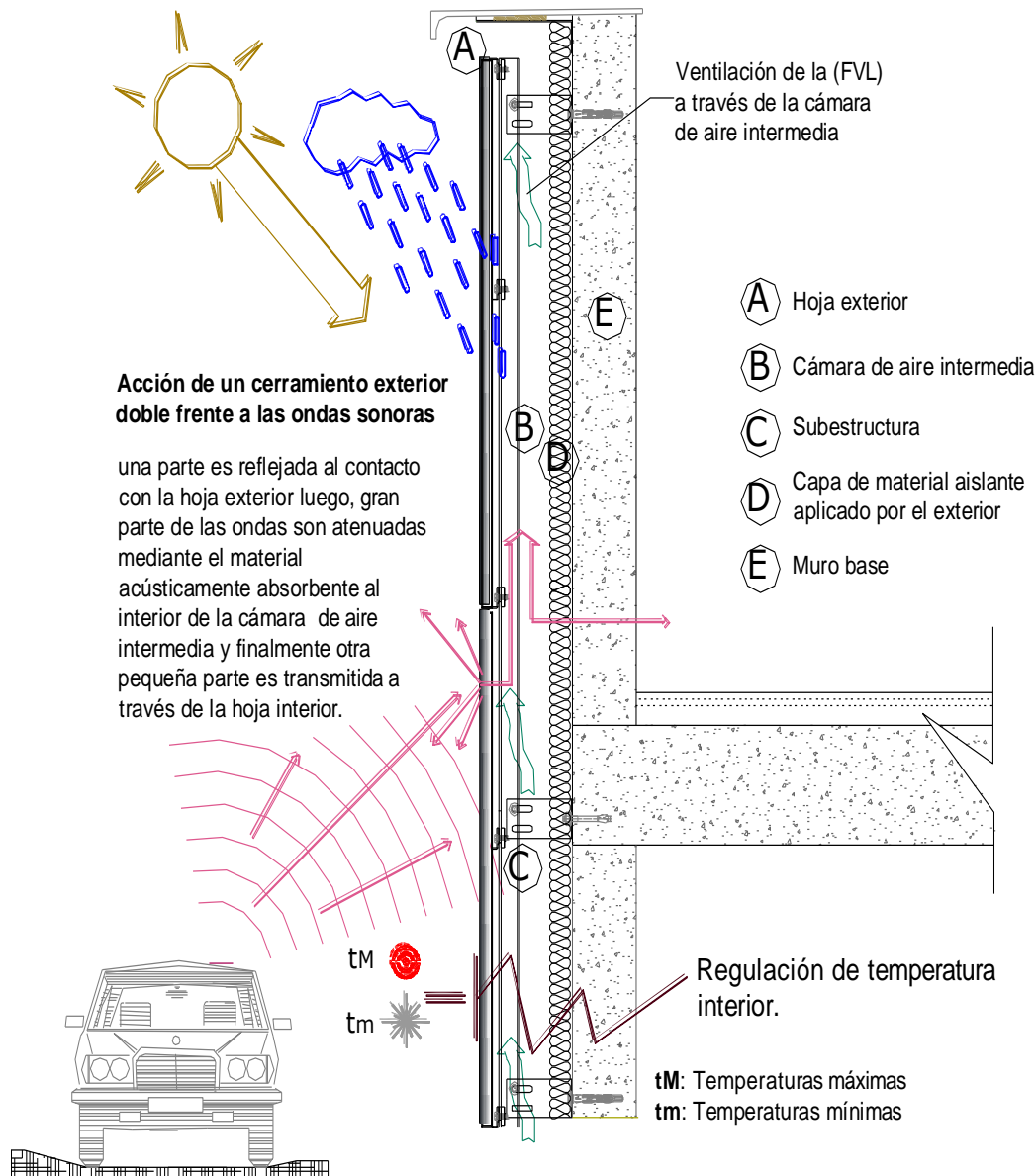


Fig.1. 1 La Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL) Esquema en sección del funcionamiento en el aspecto acústico y de los componentes de la (FVL) (D)

El uso de ésta solución constructiva para fachada tiene mayor aplicación en las zonas climáticas caracterizadas por una intensa radiación solar o bien intensas precipitaciones aisladas o acumuladas en el tiempo. Las temperaturas del aire exterior en estas zonas tienen poca amplitud térmica (alrededor de unos 15°C, al año), aunque con algunas variaciones notables dependiendo de las condiciones topográficas.

La evolución de la (FVL) se ha consolidado como una solución idónea para la protección del muro sólido con la aplicación de aislamiento exterior y una hoja exterior (Fig. 1.2).

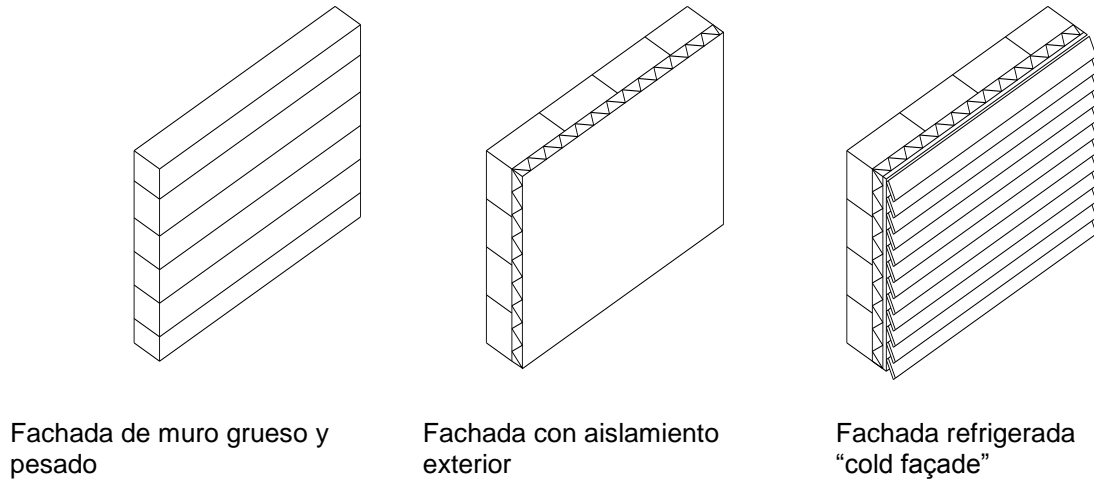


Fig.1. 2 Evolución de la (FVL) surge de forma evolutiva como protección al muro simple para fachada. (A1)

La (FVL) es una alternativa idónea en la rehabilitación de fachadas porque proporciona niveles prestacionales más eficientes respecto al muro simple. Algunas de sus características de actuación más relevantes son:

- 1- Al tener una hoja exterior ligera extra que limita una cámara de aire intermedia se reduce el impacto de la radiación solar directa incidente en la fachada del edificio.
- 2- Se evita la transmisión de humedad al interior del edificio por la incidencia de lluvias sobre el plano de la fachada. Cuando el ancho de las juntas entre las placas que forman la hoja exterior es igual o inferior a 5mm, el agua de lluvia incidente no alcanza a afectar a la hoja interior y si este espesor es mayor, la intrusión será proporcional a la abertura de las juntas (1); el agua que consigue abrirse paso se mantendrá en la cara interior de la hoja exterior siendo una parte de ella evacuada por gravedad y la otra evaporada mediante el aire circulante en el interior de la cámara de aire ventilada.
- 3- Permite una mayor estabilidad térmica del conjunto de la fachada, evitando el sobre-calentamiento en verano y el sobre-enfriamiento en invierno.
- 4- Se reduce el impacto de los puentes térmicos hacia el muro base, minimizando así también el riesgo de condensaciones (2). La adecuada ventilación de la cámara de aire intermedia tiene un papel muy importante. Diferentes normativas (ver tabla 1.1) determinan la definición de la cámara de aire intermedia ventilada de un cerramiento así como las cantidades y cualidades adecuadas de esta ventilación.

(1) y (2) Avellaneda, Jaume *Façanes Lleugueres amb Cambra Ventilada. Critesis per al disseny constructiu.* (pg 8 y Pg.10)

NORMATIVAS RELACIONADAS CON EL USO DE CÁMARA DE AIRE INTEREDIAS	FUNCIONALIDAD DE LA CÁMARA DE AIRE INTERMEDIA VENTILADA	CARACTERÍSTICAS Y ESPESORES RECOMENDADOS
Documento Básico de Salubridad DB-HS1 Código Técnico de la Edificación CTE España.	Permite la difusión del vapor de agua a través de las aperturas al exterior de la cámara de aire, especialmente dispuestas para fomentar la ventilación cruzada.	Espesor de 3 a 10cm y área efectiva mínima de 120cm ² por cada 10m ² de paño de fachada entre forjados. Área repartida al 50% entre la parte inferior y superior.
DITE 034 kits for external Wall claddings. EOTA European Organisation for Technical Approvals.	La cámara es una capa de aire que hay entre el aislamiento térmico y el elemento de revestimiento que está en contacto con el ambiente exterior y permite la difusión del vapor de agua desde el lado interior de la pared.	Espesor mínimo de 20mm. El área de las aberturas de ventilación desde 5.000 mm ² por cada metro lineal de fachada, y situadas en el arranque y la coronación de la fachada.
CP 121 de 1973 Code of practice for walling: Part 1 Brick and block masonry. British Standards Institution, London.	Proporciona una barrera más eficaz, frente a la penetración del agua en todas las condiciones de exposición, que un muro simple.	Fachada con cámara de aire de 50mm de espesor como mínimo.
DTU 20-11 Document Technique Unifié Normes et règles de calcul del CSTB (Francia).	Considera espesores mínimos para las hojas de fachada entre 20 y 45 cm, mejorando su estanqueidad mediante la disposición de una cámara de aire ventilada entre hojas y el rejuntado posterior de la albañilería de la hoja exterior.	Cámara de aire situada detrás de la obra de fábrica de la hoja exterior con un espesor mínimo de 2cm.
Norma SIA 233 de 2000 Revêtement de Façades-bardages. Société Suisse des Ingénieurs et architects.	Cámara intermedia en el uso de revestimientos ligeros para fachada.	Dimensiones mínimas de espesor de la cámara de aire para garantizar la ventilación de la cámara: 20mm y de 40mm cuando la hoja exterior tiene juntas abiertas.

Tabla 1. 1 Síntesis de normativas en el uso de cámaras en muros dobles. Relación de algunas normativas acerca del uso de cámaras de aire intermedias ventiladas en cerramientos dobles. (D^o)

Por lo que respecta a la protección acústica, una fachada compuesta por dos hojas con una cámara de aire intermedia puede ofrecer una capacidad de mejora en aislamiento acústico a nivel global con respecto a una fachada de hoja simple. Sin embargo el hecho de que la cámara de aire intermedia esté ventilada puede afectar desfavorablemente su comportamiento, por lo que en la normativa no se contempla como un sistema de mejoramiento acústico. Sin embargo, algunas referencias (3) indican que al agregar una hoja exterior con una cámara intermedia ventilada se podría incrementar el aislamiento acústico al ruido aéreo del conjunto hasta 7dB. También hay quien afirma que la mejora real del nivel de aislamiento acústico a ruido aéreo de un sistema (FVL) oscila probablemente entre tres 3 y 4 dB, en las frecuencias medias-altas (1000Hz).

(3.) *Le mur manteau: synthèse des règles et codes. Etudes et recherches, Cahiers du (CSTB) (Livraison 349, Mai 1994, Cahier 2719).*

1.2 Utilidad de la (FVL): Renovación de la fachada

El ahorro energético en los edificios es uno de los temas de mayor importancia y actualidad cobra en la arquitectura a nivel global. Este objetivo está creando una dinámica de aplicación de nuevas técnicas y soluciones constructivas para obtener un mejor comportamiento ambiental (térmico y acústico) sin por ello implicar un mayor uso de energía no renovable.

En los países de Europa (EU) los edificios existentes representan cerca del 40% del consumo de energía final, de la cual el 63% pertenece a edificios de vivienda. Así mismo el 48% de la demanda de energía de EU se satisface mediante el importe de recursos energéticos de otras áreas geográficas. El número de viviendas en los países miembros de la EU es cerca de 196 millones y más del 50% de los edificios residenciales han sido construidos antes de 1970 y 1/3 de ellos entre 1970-1990⁽⁴⁾. La implementación de las normativas referentes al ahorro energético y el uso de materiales aislantes surgieron después de 1970 cuando se desarrolló una primera crisis energética que encareció de forma rápida e imprevista los costos energéticos de dichos recursos importados. Más recientemente se han incorporado los mecanismos de certificación energética (especialmente térmica) para “etiquetar” la eficiencia energética de los edificios, tanto nuevos como existentes, en el marco de una calificación de la calidad técnica de las edificaciones.

La rehabilitación de edificios posibilita una opción económica y de menor impacto ambiental para el mejoramiento de su comportamiento con respecto al uso eficiente de la energía. En este punto, la intervención de la fachada es un condicionante importante en la mejora global. Algunas de las soluciones más comunes en la rehabilitación para la mejora del comportamiento energético de los muros exteriores del edificio son:

- Substitución de carpinterías: uso de ventanas dobles, ventanas con doble vidrio, ventanas con vidrio de baja emisividad.
- Adición de un producto de aislamiento adherido por el exterior: sistemas SATE.
- Fachadas de doble hoja: *Double Skin Facade* (DSF).
- Revestimiento con hojas exteriores ligeras con interposición de una cámara de aire ventilada en la que se incluye un producto aislante.

(4) *Energy and Buildings* 39 (2007) Bart Poel, Gerelle Van Cruchten, Constantinos A. Balaras. *Energy performance Assessment of existing dwellings*.

En general la selección por parte del arquitecto de una solución constructiva u otra para el tratamiento de rehabilitación de una fachada se realiza en función de las necesidades requeridas en cada caso, del factor económico, de la adaptabilidad del sistema elegido y también del valor añadido por cada técnica. Uno de estos valores añadidos puede ser el comportamiento acústico.

Las diversas soluciones planteadas para la mejora de la eficiencia energética también tienen un impacto beneficioso diverso en el comportamiento acústico respecto al ruido aéreo exterior de la fachada, parte ciega y parte de ventanas, y por ende del edificio a nivel global.

La fachada ventilada con revestimiento ligero (FVL) presenta un elevado potencial de utilidad porque la cámara de aire intermedia que se crea permite disminuir las transmisiones por flancos y también algunas transmisiones vibro-acústicas que se puedan producir al interior de la cámara. Su aportación acústica beneficiosa en cada caso parece depender a priori del espesor de dicha cámara y de la disposición y extensión de las aberturas de ventilación.

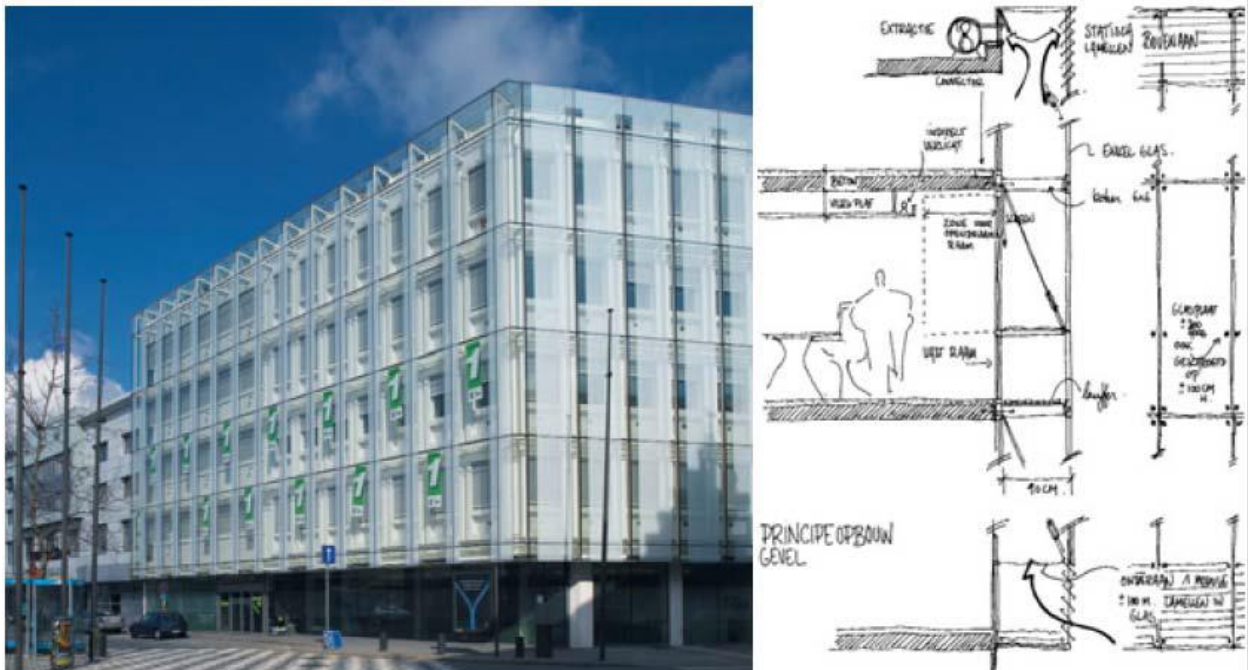
Algunos casos de actuaciones de renovación de edificios ineficientes que han considerado intervenciones en su fachada:

1.2.1 Casos estudiados por diversos autores

1.2.1.1 Edificio de oficinas en Hasselt, (Belgica) (5)

La fachada original era un muro simple de hormigón prefabricado que presentaba un aspecto estético antiguo y un pobre aislamiento. La renovación se llevó a cabo tanto por motivos estéticos como energéticos. Se planteó una *Double Skin Facade (DSF)* conduciendo el aire de renovación del exterior del edificio hacia la cámara de aire de la fachada y el aire viciado también se evacuaba a través de aberturas practicadas en la hoja exterior. Las dos hojas de fachada estaban herméticamente selladas por lo que movimiento del aire en la cámara de aire intermedia se regulaba mediante un ventilador. Se consideró que el conjunto también mejoraba su comportamiento acústico aunque finalmente, por motivos estructurales para la sustentación de la hoja exterior de vidrio se planteó agregar una subestructura ligera de acero que permitía que la cámara de aire intermedia fuese transitable.

(5) *Renovation of Buildings using Steel Technologies (ROBUST) RFCS Project RFSR-CT 2007-0043 WP 1.1 European case studies on over-cladding commercial and residential buildings 2008.*



Img.1. 1 Renovación de fachada de un edificio de oficinas en Bélgica. A la derecha un esquema del nuevo funcionamiento de la cámara intermedia. (B1)

1.2.1.2 Housing renovation, Helsinki (Finlandia) (6)

La fachada a renovar correspondía a un edificio de viviendas, de 6 plantas de altura, construido a principios de la década de los 70 del S XX. La fachada original estaba realizada con paneles de hormigón prefabricado revestida con piezas de obra de fábrica de 130mm de espesor. La renovación consistió en la aplicación como hoja exterior de un revestimiento ligero metálico de paneles tipo cassette interponiendo una cámara de aire ventilada en la que se insería parcialmente una lana mineral de 50mm.

En este caso, las ganancias se obtuvieron a nivel térmico disminuyendo los valores de transmitancia.

(6) Lawson Marc. *Renovation of Buildings using Steel Technologies (ROBUST)* RFCS Project RFSR-CT 2007-0043 WP 1.1 *European case studies on over-cladding commercial and residential buildings 2008.*



Img.1. 2 Renovación de fachada de un edificio de vivienda en Helsinki (B1)

1.2.1.3 Technical improvement of Housing Envelopes in Portugal (7)

La mayor problemática técnica de las fachadas en edificios multifamiliares en Portugal viene del bajo nivel de aislamiento térmico y acústico respecto al exterior, problemas presentados significativamente en los edificios construidos antes de la publicación del primer código de aislamiento (1990). La mayoría de estos edificios presentan fachadas no estructurales realizadas con dos hojas de muro de albañilería que delimitan una cámara de aire intermedia no ventilada, la cual no contiene ningún material aislante o absorbente en su interior. Este tipo de muros están realizados con albañilería de bloque hueco cerámico independientes del resto de la estructura y se generalizaron en Portugal después de la década de los 60 (fig.1.3). El uso de un producto aislante situado en la cámara intermedia surgió a partir de la década de los 80.

(7) COST C16 *Improving the Quality of Existing Urban Building Envelopes: Facades and Roofs. Research in Architectural Engineering*, Volume 5. L. Bragança; C. Wetzel; V. Buhagiar; L.G.W. Verhoef. (pg.115)

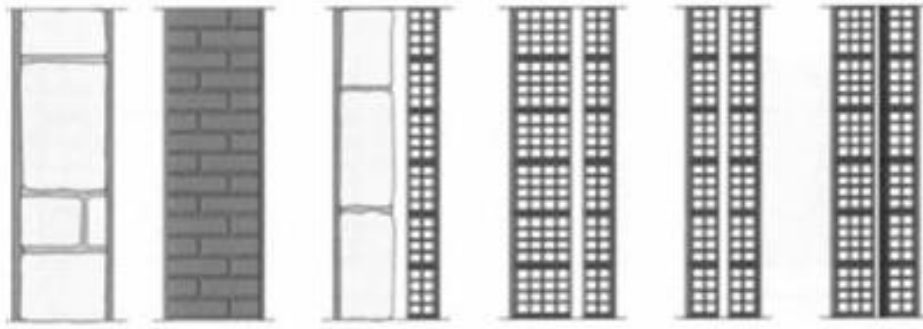


Fig.1. 3 Evolución de muros para fachada en Portugal (B2)

En este momento la fachada ventilada con revestimiento ligero (FVL) es una de las técnicas más utilizadas en la rehabilitación de este tipo de edificios en Portugal. Los autores de este ejemplo analizan en el texto citado el impacto positivo de la solución aplicada y evalúan el uso de la (FVL) a nivel funcional, social, económico y ambiental. Consideran que para la mejora de protección al ruido aéreo exterior, la (FVL) es una solución adecuada teniendo en cuenta que en renovación de fachadas se obtienen mejores resultados con este sistema que con otro de igual masa. Aunque recalcan que puede presentar algunos problemas de transmisiones por vibraciones en la hoja exterior cuando es demasiado rígida o muy esbelta (ejemplo de los muros vidriados); recomiendan que esta problemática puede disminuir al incluir un material elástico dispuesto entre las fijaciones de la subestructura y la hoja exterior.

Caso de estudio de edificio de vivienda en Portugal

Edificio residencial de varias plantas de típica construcción realizado antes de la década de los 90, la fachada está compuesta por un muro de doble hoja de albañilería, con cada hoja de 11cm de muro de bloque hueco cerámico y una cámara de aire intermedia vacía de 4cm de espesor vacía, éste edificio no estaba regido por las normativa térmicas vigentes en Portugal (la última regularización es del año 2006). A ésta fachada se le agregó una (FVL) compuesta por una hoja exterior ligera de 1cm de espesor formada por un revestimiento de placas cerámicas con juntas selladas entre placas (Fig. 1.4). Dicha nueva hoja está fijada a la fachada existente mediante una subestructura metálica y delimita una nueva cámara de aire intermedia ventilada de 4cm de espesor, medidos entre la nueva capa de aislamiento de corcho y la hoja de revestimiento exterior.

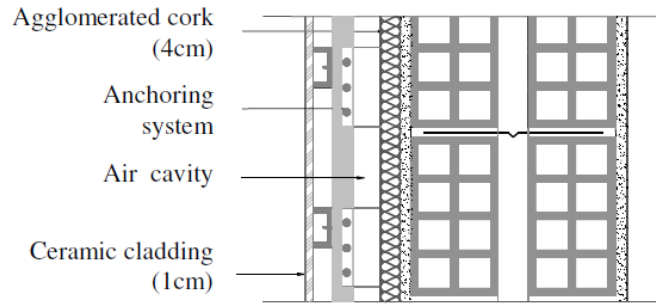


Fig.1. 4 (FVL) sobre un muro doble. Vista en sección de la solución (B3)

En el estudio realizado por estos autores se comparó el comportamiento acústico de la fachada frente al ruido aéreo, antes y después de la rehabilitación. Los resultados obtenidos se expresan en diferencia de niveles y muestran una apreciable mejora a partir de los 500Hz, a nivel global se obtuvo una mejora de 4 dB con la aplicación del revestimiento ligero para la fachada ventilada. Los autores realizaron el cálculo del aislamiento en diferencia de niveles normalizada de ponderación global, como se observa en las siguientes gráficas (Fig.1.5) y (Graph).

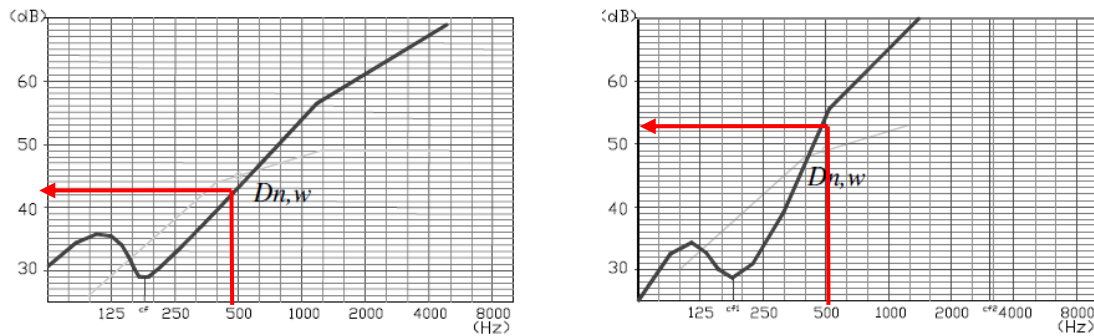
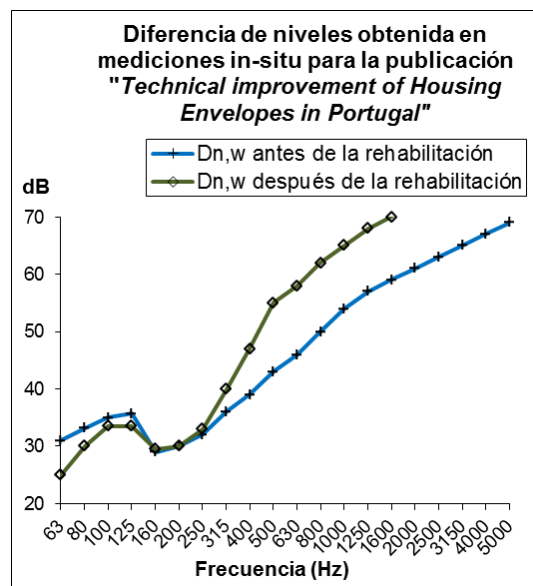


Fig.1. 5 Gráficas de diferencia de niveles obtenidos en la intervención de la fachada. Izq. Valores de la fachada antes de la rehabilitación. Der. Valores de la fachada al aplicar el sistema de (FVL) (B3)



Graph 1. 1 Gráfica comparativa de rendimiento acústico. Valores obtenidos en mediciones de la publicación B3. (D')

En esta publicación citada se hace un análisis de los diferentes sistemas constructivos utilizados para la rehabilitación de fachadas en algunos países de Europa, en el siguiente extracto (Fig. 1.6) se indica la utilización del sistema de (FVL).

	GR	I	F	S	P	DE	DK	MT	NL	MK	HU	SI	CY	PL
Rehabilitación (sobre la fachada)														
Fachada ventilada	S	C	N	N	S	C	C	N	S		S	S	N	N

Fig.1. 6 Extracto de tabla del documento COST C16. Dónde: C= es de uso común, más del 20%. S = más del 1% y menos del 20%. N = no existe o menos del 1% Table 8: Description of the commonly applied refurbishment action for opaque parts of the façade. (B4)

1.2.2 comentarios de los casos estudiados

Los casos descritos anteriormente son ejemplos de intervenciones en edificios existentes que se rehabilitaron para obtener mejoras en su comportamiento en los diversos aspectos (estético, térmico y acústico), algunos de estos edificios no cumplían con la regulación normativa vigente de los distintos países, debido a la época en que fueron construidos. En cada caso se realizó un tipo de intervención diferente a nivel constructivo por su singularidad y objetivo de intervención.

Estos ejemplos evidencian que la rehabilitación de edificios es una alternativa viable en la mejora de su comportamiento, especialmente cuando estos no se ajustan a las exigencias de cumplimiento de aislamiento térmico y acústico, así mismo, según la particularidad que puede presentar cada intervención, las soluciones constructivas utilizadas deben ajustarse a las condiciones requeridas, esto hace que el uso de los sistemas de revestimiento exterior puedan aportar a la mejora de los edificios por la diversidad de soluciones y la flexibilidad de montaje y tiempos de intervención.

La (FVL) como se describe anteriormente es una solución muy utilizada para intervenciones de rehabilitación. Hasta ahora muchos de los estudios y análisis encontrados se centran en los aspectos de seguridad constructiva y su relación de mejora de calidad en el aislamiento térmico que por ende se derivan también en el aislamiento acústico, en este último aspecto se presenta una complejidad mayor por la suma de los elementos constructivos y sus características mecánicas, así mismo por la inclusión de la ventilación a través de la cámara de aire intermedia ya que el manejo de esta ventilación (localización de las aberturas y cantidad de apertura) puede afectar el comportamiento acústico general de la fachada.

1.3 objetivos de la tesis

En la realización de esta tesis doctoral se plantea como objetivo general la profundización y análisis de la utilización de la (FVL) como solución constructiva tanto de nueva implantación como en la rehabilitación de edificios y su relación con el aspecto acústico partiendo desde:

- Su origen en la doble hoja y los sistemas de fachada ventilada de doble hoja.
- Estudio de la normativa acústica en diferentes países, análisis de las exigencias al ruido aéreo exterior en fachadas y estancias de recintos entre viviendas. Así mismo la situación de la (FVL) en este tipo de regularización.
- Identificación y clasificación de diversas tipologías de (FVL) utilizadas en cuanto a materiales y la variación de sus componentes (tipo de muro base, cámara de aire intermedia que aloja la subestructura y capa de material aislante y la hoja exterior) teniendo en cuenta el aspecto de la ventilación.
- Estudio de diversas herramientas de medición del aislamiento acústico aplicadas a la (FVL).

A nivel particular se plantean en la tesis los siguientes objetivos específicos, teniendo como referencia la influencia de la ventilación de la cámara de aire intermedia en el comportamiento acústico de la (FVL).

- 1- Conocer mejor el comportamiento acústico al ruido aéreo de los sistemas de Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL). A través de una serie de mediciones del aislamiento acústico mediante diferentes campañas de ensayos in-situ, de laboratorio y el uso de herramientas informáticas de simulación y predicción que utilizan métodos analíticos como (SEA) *Statistical Energy Analysis* y (FEM) Método de elementos finitos.
- 2- Evaluación de los diferentes métodos de medición del aislamiento acústico aplicados a la (FVL) y contraste de los resultados obtenidos en cada etapa.
- 3- Conocer de forma puntual la influencia de diferentes variables de la ventilación en un cerramiento doble teniendo en cuenta: el espesor de la cámara, superficie de ventilación y disposición de las aberturas de la cámara de aire intermedia.
- 4- Evidenciar la influencia beneficiosa de una ventilación bien regulada para el aislamiento acústico de la (FVL) como aporte a que sea reconocida por el código normativo.

1.4 Fuentes y referencias capítulo 1

Codificación de fuentes y referencias

Fuente A: Libro

Fuente B : Artículo (publicación, paper, congreso, etc)

A1: Knaack, Ulrich; Klein, Tillmann; Auer Thomas. *Façades principles of Constructions* Ed. Birkhauser 2007

B1: Mark Lawson. *European case studies on over-cladding comercial and residencial buildings*. UK 2008

B2: APICER 1 Manual de Alvenaria de Tijolo, Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica, Coimbra, Portugal 2000

B3: L. Bragança; M. Almeida; R. Mateus. *Technical improvement of Housing Envelopes in Portugal* . University of Minho, Guimaraes, Portugal 2007

B4: L. Bragança; C. Wetzel; V. Buhagiar; L.G.W. Verhoef. *COST C16 Improving the Quality of Existing Urban Building Envelopes: Facades and Roofs. Research in Architectural Engineering, Volume 5.*

Listado de figuras, tablas e imágenes capítulo 1

Fig.1. 1 La Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL). (D)	24
Fig.1. 2 Evolución de la (FVL). (A1)	25
Fig.1. 3 Evolución de muros para fachada en Portugal. (B2)	31
Fig.1. 4 (FVL) sobre un muro doble. (B3)	32
Fig.1. 5 Gráficas de diferencia de niveles obtenidos en la intervención de la fachada. (B3)	32
Fig.1. 6 Extracto de tabla del documento COST C16. (B4)	33
Tabla 1. 1 Síntesis de normativas en el uso de cámaras en muros dobles. (D')	26
Graph 1. 1 Gráfica comparativa de rendimiento acústico. (D')	32
Img.1. 1 Renovación de fachada de un edificio de oficinas en Bélgica. (B1)	29
Img.1. 2 Renovación de fachada de un edificio de vivienda en Helsinki (B1)	30

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

LA FACHADA DE DOBLE HOJA Y LA (FVL)

2. ANTECEDENTES LA FACHADA DE DOBLE HOJA Y LA (FVL)

2.1 Clasificación de la doble fachada (DSF)

La investigación para la tesis se inicia con los orígenes más recientes de la fachada de doble hoja y de la (FVL) con la clasificación de varios de los sistemas existentes y comúnmente utilizados, los cuales son relevantes como antecedentes al planteamiento de la tesis.

Según varios autores existen en general cuatro tipologías de la fachada de doble hoja: *Double skin facade: Box window, Shaft-box facade, corredor facade y multistorey facade.*

1- Box Window es quizás la primera versión de la doble fachada, como se menciona anteriormente se constituyó varias décadas atrás.

Este sistema consiste en tener una hoja de cristal con marco abierto frente a una ventana practicable formando una cámara, la cual se divide y se ventila a través de las juntas periféricas o de habitación a habitación, puede ser instalada en una fachada tradicional y ofrece buen comportamiento en diferentes niveles de protección. Como ventaja, este sistema permite el control independiente por el propio ocupante de la apertura del sistema para la ventilación.

La fachada tipo *Box Window* es comúnmente utilizada para la protección del ruido exterior y donde el aislamiento acústico entre los espacios adyacentes es importante, este es el único sistema que puede ofrecer esta ventaja en fachadas tradicionales con ventanas rectangulares.

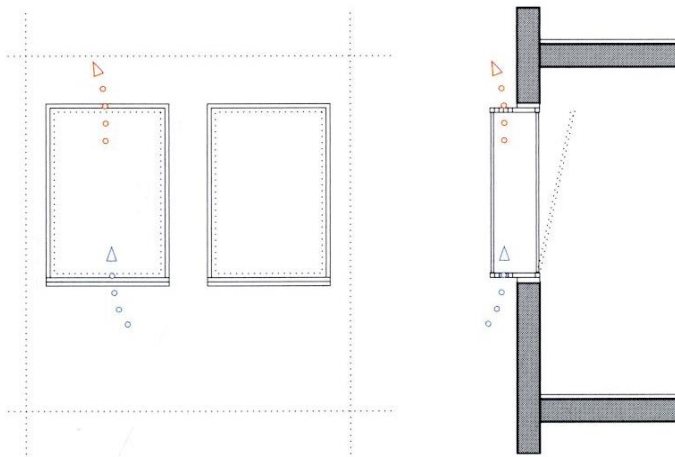


Fig.2. 1 Vista frontal y sección Box Window (A1)

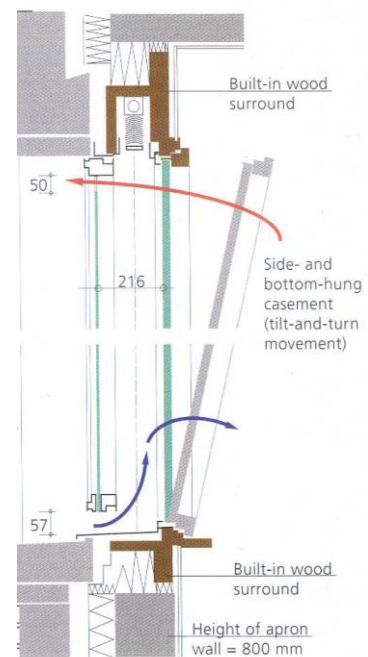


Fig.2. 2 Sección box window Edificio Potsdamer Platz 1 Berlín (A4)

2- Shaft-Box Facade es un tipo de *Box Window* que abarca varias plantas, la ventilación funciona de forma vertical por el edificio conectando las diferentes *Box Windows* creando efecto chimenea, resulta también una ventaja de protección acústica al ruido exterior. En la práctica la altura del sistema se delimita según una función específica, normalmente se utiliza más en edificios de baja altura.

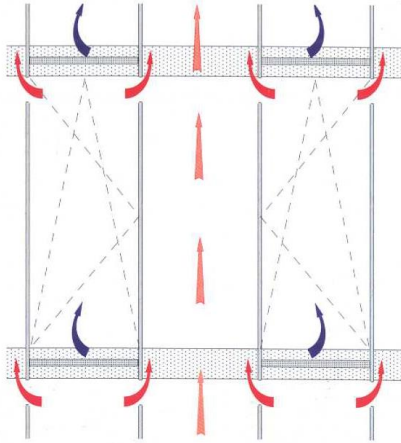


Fig.2.3 vista frontal Shaft-Box. Funcionamiento del sistema, la ventilación funciona con efecto chimenea a través de secciones verticales (A4)

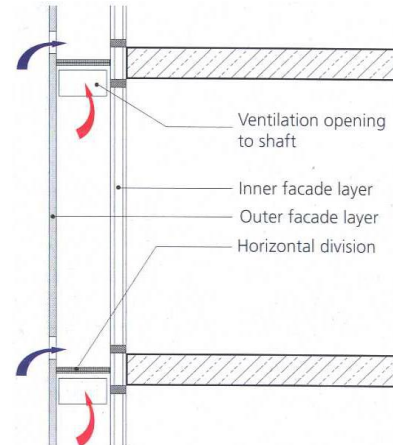


Fig.2.4 Sección Shaft-Box. Las flechas rojas indican las aberturas de ventilación entre forjados como ejes verticales (A4)

3- Corridor Facade, en este sistema la cámara entre las dos hojas está cerrada entre pisos y tiene aberturas en el corredor horizontal solo donde es necesario por acústica, protección contra incendios o ventilación. En cuanto a la ventilación, el paso de aire está ubicado en las esquinas. La salida de aire se ubica cerca de techos y suelos de forma escalonada para evitar que el aire extraído entre a la planta siguiente. En la construcción de la fachada se establecen segmentos individuales entre hojas que agrupan un número de espacios, donde se debe tener cuidado con la transmisión sonora entre locales.

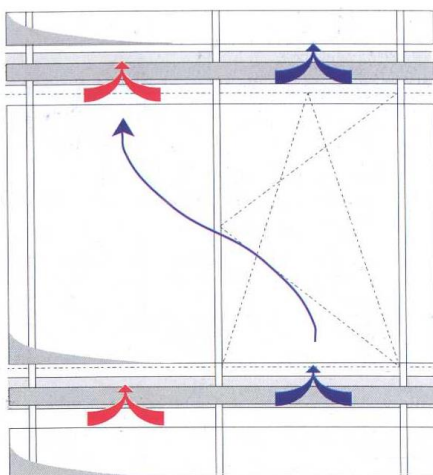


Fig.2.5 Vista frontal Corridor Facade. Funcionamiento de la ventilación cruzada (A4)

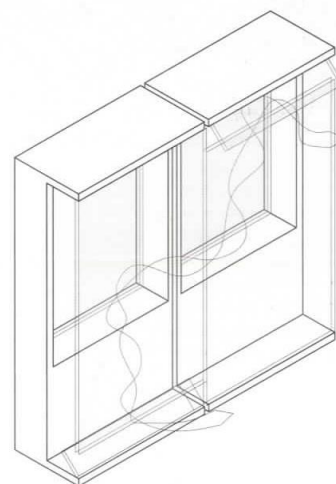


Fig.2.6 Isométrico Corridor Facade. El recorrido de aire permite una ventilación escalonada entre las dos hojas (A1)

4- Multistorey Facade o Unsegmented Double Skin Facade en este sistema el espacio entre las dos hojas está abierto sin divisiones verticales ni horizontales agrupado por plantas o en algunos casos en toda la fachada del edificio, estructuralmente las hojas pueden ser independientes, la ventilación se produce solamente a través de grandes aberturas en la parte inferior y en la parte superior del edificio. La fachada tipo *Multistorey Facade* es mayormente utilizada para el aislamiento acústico de muy altos niveles de ruido exterior ya que minimiza las aberturas en la hoja exterior. Los espacios al interior requieren ventilación mecánica donde el flujo de aire entre hoja y hoja puede unirse al mecanismo de ventilación, normalmente el espacio entre hojas es menor que un metro. En cuanto a la acústica, pueden aparecer problemas de transmisión sonora entre espacios a través de la cámara intermedia.

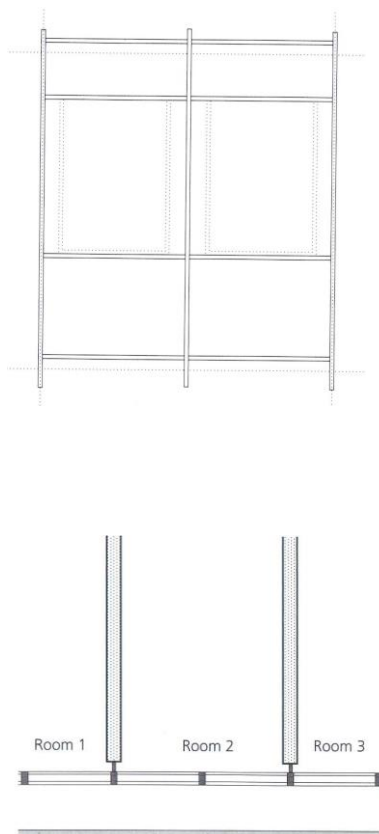


Fig.2. 7 Alzado frontal y planta sistema Multistorey Facade (A2)

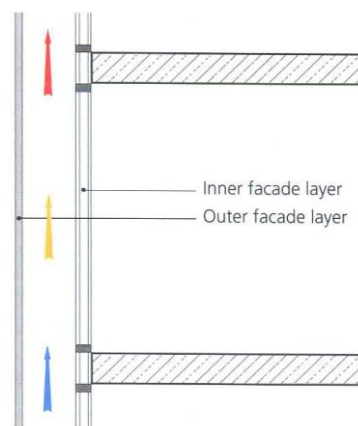


Fig.2.8 Sección Multistorey Facade. El espacio entre hojas esta ventilado en todas las direcciones (A4)

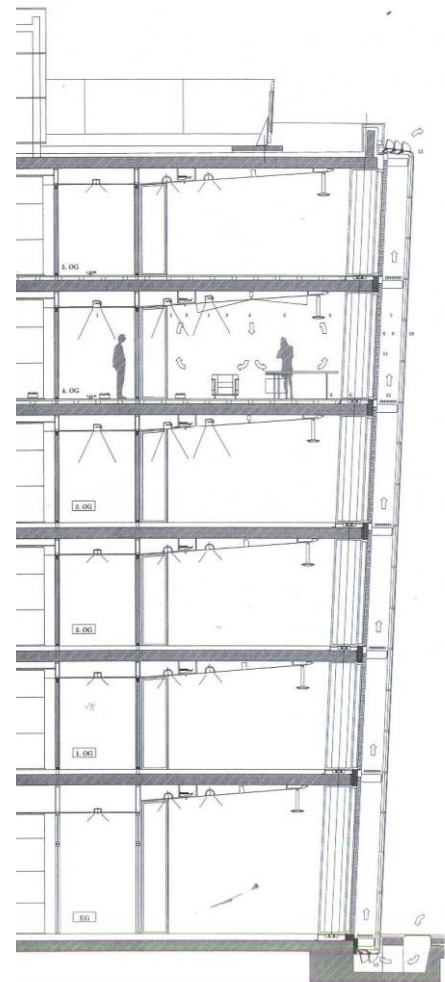


Fig.2.9 Sección Ed. "Victoria Ensemble" Colonia Alemana. La hoja exterior es continua y es independiente de la hoja interior, la ventilación se produce solamente en la parte inferior y superior del edificio (A4)

2.1.2 Desempeño de la Double Skin Facade (DSF)

La regulación adecuada de la ventilación de la cámara de aire intermedia, principal característica de la fachada de doble hoja, depende en gran medida del diseño de cada una de las hojas y de la orientación de la fachada.

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS CITADOS DE DOBLE SKIN FACADE			
Sistemas Analizados	Box Window Shaft Box	Corridor Façade	Multistorey Façade o Unsegmented
Aspectos			
Características de construcción	<ul style="list-style-type: none"> - Uso en fachadas convencionales; puede ser integrado con el sistema *<i>Elemental Façade</i>. - Hoja interior de doble vidrio aislante. - Hoja exterior de vidrio simple. - La distancia entre hojas varía según requerimientos. - Tiene opciones de prefabricación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede ser integrado con el sistema *<i>Elemental Façade</i>. - La hoja interior es comúnmente hecha en madera. - La distancia entre hojas varía según requerimientos. - Buen comportamiento con ventilación natural. 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso como hoja exterior del sistema *<i>Elemental Façade</i>. - La hoja exterior puede estar estructuralmente independiente de la hoja interior. - La distancia entre hojas varía según parámetros requeridos - Buen comportamiento con ventilación natural.
Aislamiento acústico	<ul style="list-style-type: none"> - Resulta adecuada para la renovación y mejora de fachadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posible transmisión de sonido aéreo hacia el interior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posible transmisión de aéreo hacia el interior.
<p>(*) <i>Elemental Façade</i> (descrita por los autores Hausladen, Gerhard; de Saldanha, Michael; Liedl, Petra <i>Climate Skin</i>) Fachada de doble hoja realizada con elementos prefabricados que pueden presentar tanto elementos vidriados como ciegos; incorpora elementos funcionales de ventilación, manejo de iluminación natural o generadores de energía.</p>			

Tabla 2. 1 Análisis de los sistemas estudiados de la doble fachada (D').

2.2 Clasificación de la (FVL)

En el capítulo 1 se define La Fachada Ventilada con revestimiento Ligero a la que denominamos (FVL), mencionando sus características y niveles de protección. En este apartado se realiza una clasificación tipológica y un análisis de sus componentes.

2.2.1 Tipologías de la (FVL)

La clasificación que se realiza en este apartado se basa en los sistemas más comunes utilizados para la (FVL), en particular tiene antecedentes en la doble hoja. A nivel acústico, el diseño y colocación del sistema ligero puede influir en el aislamiento del conjunto.

Los autores Pardal y Paricio (A5) dividen principalmente los sistemas ligeros de fachada en dos grandes grupos, los sistemas apoyados y los sistemas colgados.

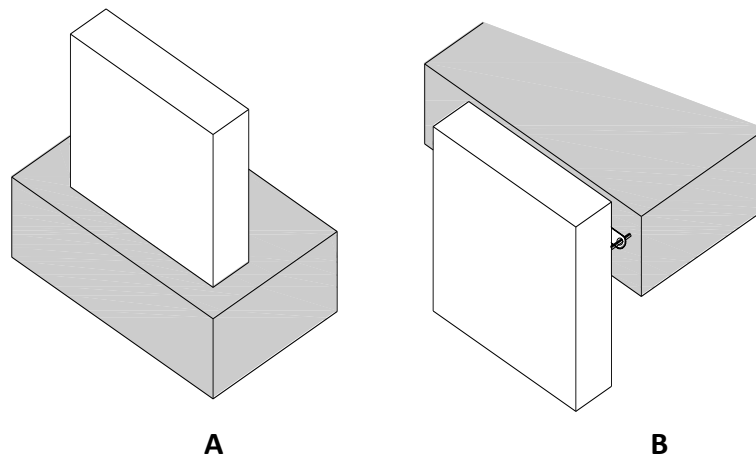


Fig.2. 10 Clasificación de la fachada ligera ventilada: A= sistemas apoyados y B= sistemas colgados (A5)

Los sistemas apoyados se caracterizan por ser cerramientos pesados principalmente de albañilería o de paneles de hormigón, en algunos casos son “estancos” (los paneles están sellados en el exterior). La fachada cumple las funciones de drenaje con la inclusión de una cámara.

Los sistemas colgados son más comunes en la actualidad, de estos se derivan otros tipos de Fachadas Ligeras y Fachadas con Revestimientos Ligeros Ventilados. La fachada colgada sustituye la hoja exterior pesada por piezas ligeras fijadas a una hoja interior mediante apoyos metálicos, la cual proporciona mayor flexibilidad, a nivel constructivo se adapta a cualquier sistema y forma del edificio siendo recambiable con el tiempo por mantenimiento o renovación de un edificio.

Los autores señalados describen que la fachada colgada tiene origen en los aplacados de piedra colgada, la tecnología del muro cortina y la evolución de los premarcos.

Históricamente otro de los referentes de la utilización de sistemas dobles ligeros ventilados es el caso de la patente comercial de *Raoul Decourt* “*la Maison Isotherme*” publicada en “*L’Esprit nouveau*” que consiste en un muro seco doble y ligero para el cerramiento exterior propuesto anteriormente por *Le Corbusier*, *Decourt* complementa este muro ligero de doble hoja permitiendo la entrada de aire en la cámara para la ventilación interior(8).

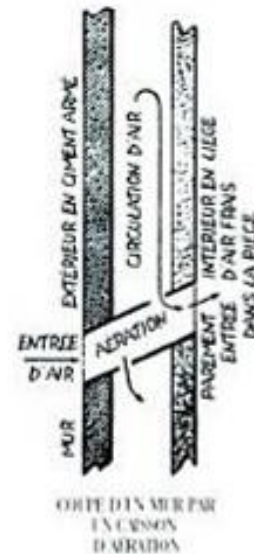


Fig.2. 11 Esquema de funcionamiento del muro doble ligero ventilado. Para el cerramiento exterior (A6)

Los tipos de fachada ligera ventilada desde el punto de vista acústico, se establecen también de acuerdo a la configuración de la hoja exterior, suponiendo que la interior continua siendo pesada, como sucede en la mayor parte de edificios existentes. Por esto, en este documento clasificamos las fachadas por: Tipo de hoja exterior o revestimiento ligero, tipos de materiales usados, tipos de anclaje y un breve análisis de los aislamientos más usados.

2.2.2 Clasificación por tipo de hoja exterior de la (FVL)

-1. Hoja exterior continua

Garantiza de entrada mayor estanqueidad y los ensamblajes entre placas no son visibles. Existen diferentes materiales y acabados adaptables a este tipo de cerramiento.

Continuo acristalado. Se divide en dos tipos: Cámaras continuas y cámaras compartimentadas. En los dos casos pueden estar abiertas, esto influye principalmente en la acción que ejerce la presión del viento sobre cada una de las hojas(9).

(8) Técnica y Arquitectura en la Ciudad Contemporánea 1950-2000. Ábalos Iñaki, Herreros Juan (pg.97) y “*L’Esprit nouveau*” Revista francesa de arte y representación del movimiento purista publicada entre 1920 y 1925 por Le Corbusier y Amédee Ozenfant.

(9) Libro: “Façanes Lleugueres amb Cambra Ventilada. Críticis per al disseny constructiu”. Avellaneda I Diazgrande Jaume (pg.7)

Acústicamente la configuración de la cámara puede facilitar transmisiones sonoras entre los espacios comunicados por la cámara.

- **Trasdosados con acabado exterior de capa continua.** Consiste en un tabique doble de estructura paralela, lleva dos placas de yeso laminado y una placa trasdosada en el exterior con juntas mínimo cada 15m de la hoja continua con acabado de una capa fina de mortero, el acabado final puede ser en diferentes materiales.

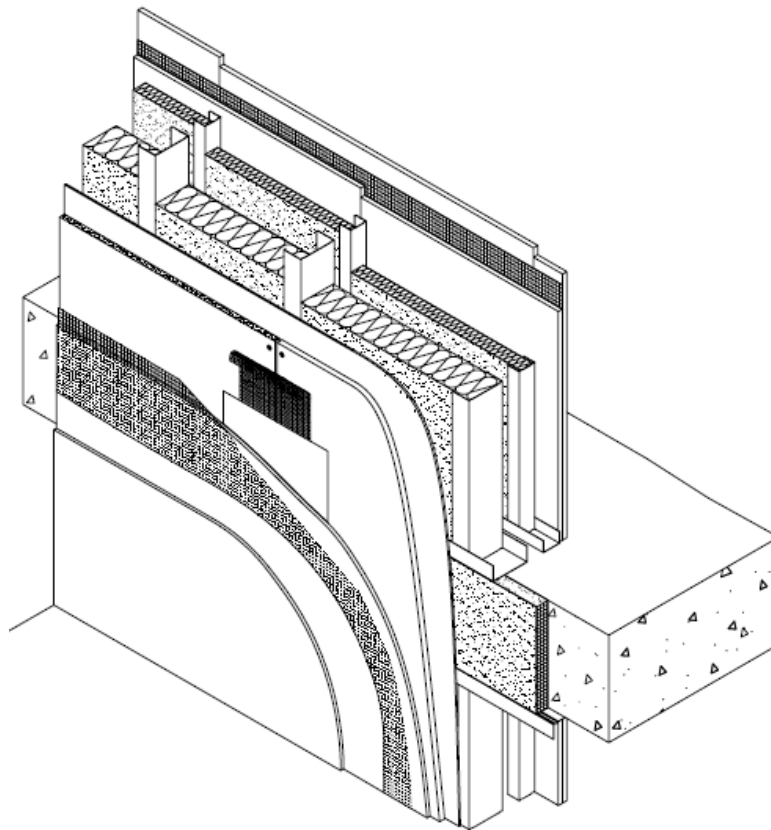


Fig.2. 12 Sistema Aquapanel. Ejemplo de éste tipo de fachada de la empresa Knauf, conformado por placas de (CB) (B5)

Mineral (mortero acabado en dispersión con textura granulada)

Pintura (elástica impermeable)

Piedras y mármol (fijaciones con cemento o cola)

Monocapa (elásticos, adecuados para capas de cemento)

Ejemplo de proyectos de fachadas ligeras ventiladas con hoja exterior continua:



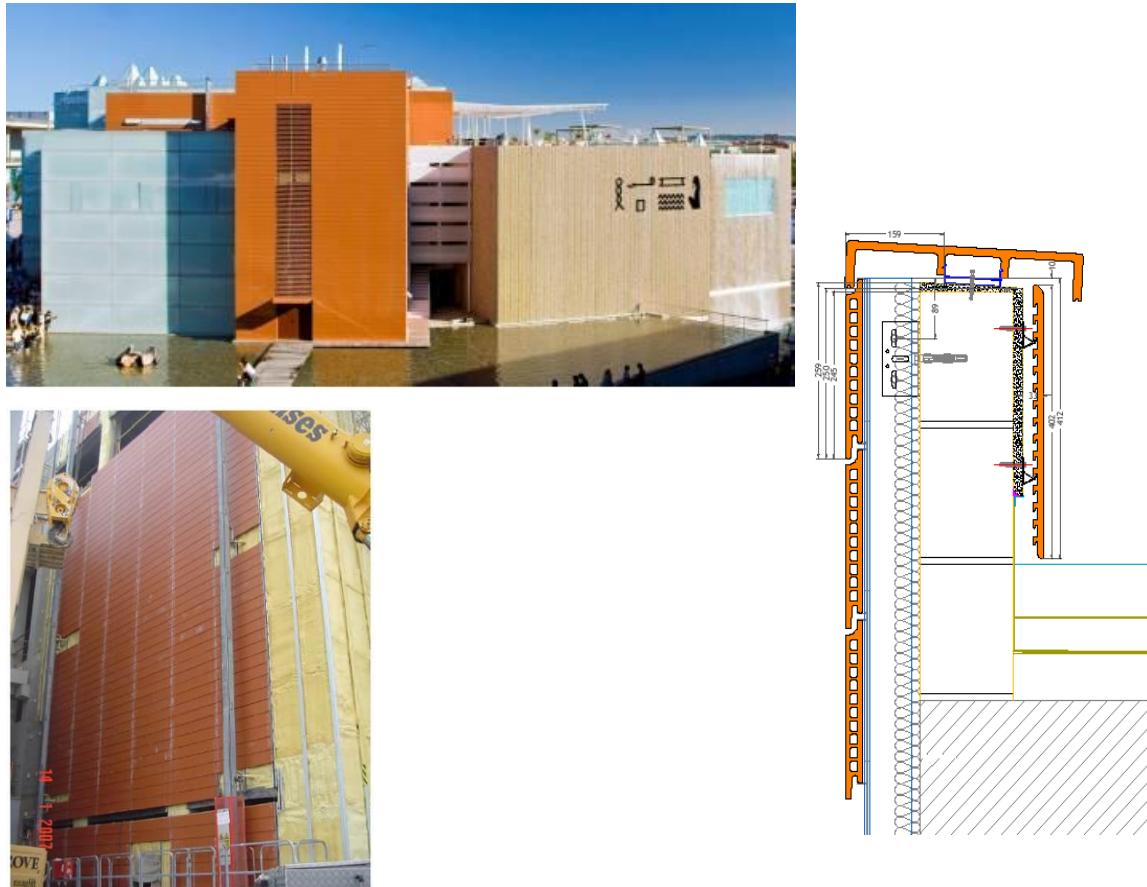
Img.2. 1 Iglesia Barrio Miribilla Bilbao España. IMB Arquitectos 2008-2009 utilización del sistema “Aquapanel” hoja exterior continua con placas de (CB) (C1)

-2. Hoja exterior discontinua con juntas abiertas.

Permite aparentemente una mayor circulación de aire entre el interior y el exterior de la cámara. Los ensamblajes pueden estar ocultos o visibles sin influencia acústica relevante. El diseño y tamaño de la junta entre placas depende también del ancho de la cámara, cuanto más ancha es, se garantiza que el agua no llegue hasta la hoja interior, pero también depende del coeficiente de dilatación térmica del material de los aplacados. El diseño de las juntas puede ser de acabado recto para la protección frente a la lluvia, pero si se dispone de poco espacio en la cámara, debe procurarse un diseño de junta laberíntico o bien el uso de perfiles auxiliares. Normalmente se usa un ancho de junta de entre 6 y 8mm.

Esta tipología es la más usada para (FVL), al igual que el sistema de hoja exterior continua, se basa en la fijación previa de anclajes a un muro interior y su conexión con la estructura quubestructura que soporta los paneles.

Ejemplo de proyectos de fachadas ligeras ventiladas de hoja exterior con juntas abiertas:



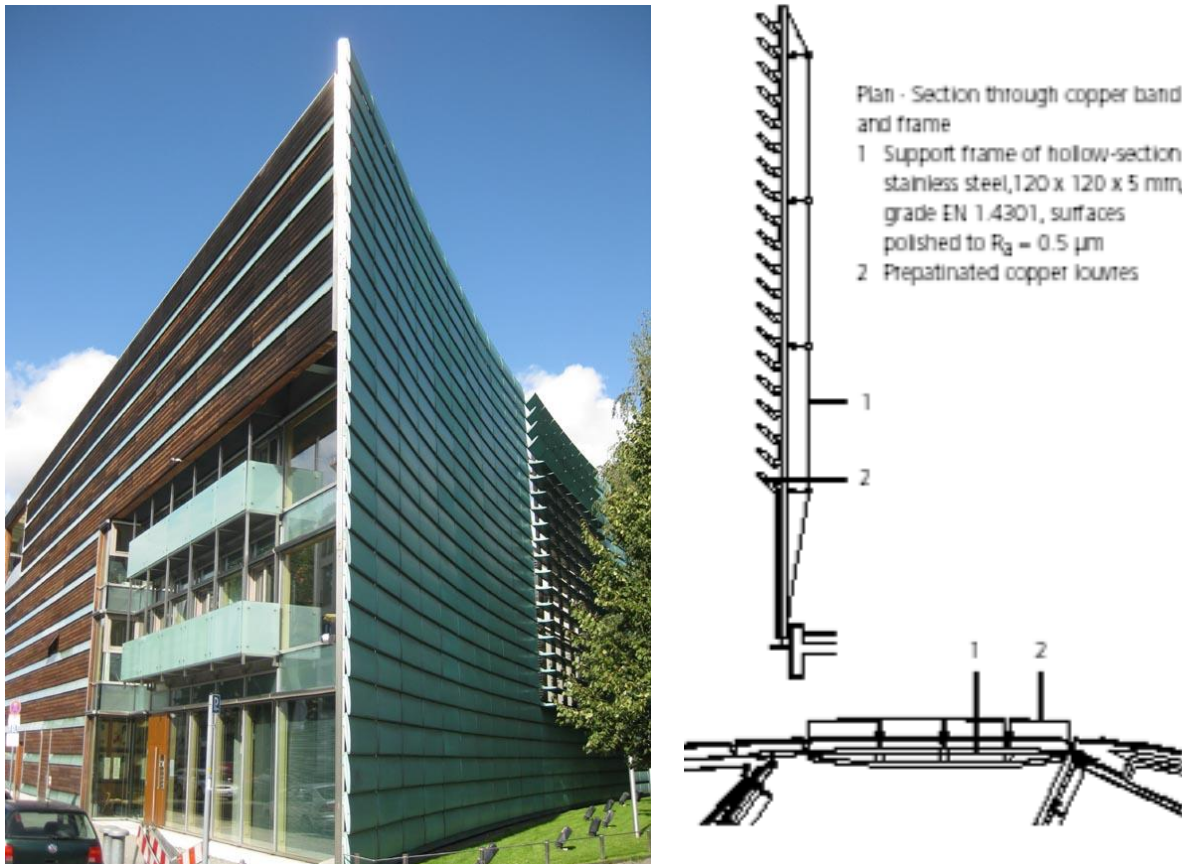
Img.2. 2 Edificio Fluvial Expo Zaragoza 2008. Arquitecto Alvaro Planchuelo. Fachada ventilada con hoja exterior de aplacado de piezas cerámicas y de piedra con juntas abiertas. Izaje de la fachada (abajo izq.) Sección de la fachada ventilada. (abajo derecha). Sistema de fachada Faveton (C2)

Este edificio tiene una fachada con una cámara ventilada de 30mm y un espesor total de 120mm. La perfilera de la subestructura es de tipo T, dispuesta verticalmente, y realizada en aluminio extrusionado. Los clips de sujeción de las placas están hechos en acero inoxidable.

-3. Hoja exterior con lamas.

La hoja se presenta como un conjunto de divisiones a nivel horizontal y vertical que pueden ser móviles o fijas. Ésta disposición en forma de lamas superpuestas es apropiada como barrera a la radiación solar, regulan el paso de la luz y el viento y puede actuar como protección frente a la lluvia y la nieve.

Ejemplo de obra realizada con (FVL) con la hoja exterior de lamas:



Img.2. 3 Complejo The Nordic Embassies. Berlín 2002 Masterplan design 1999 Berger + Parkkinen. En la hoja exterior se utilizaron lamas orientables de diferentes materiales (C3)

Los materiales mas utilizados para la hoja exterior son: piedra natural, cerámica, madera, metal, vidrio (en grandes formatos), fibrocementos y composites sintéticos como tableros fenólicos y laminados de alta presión (HPL).

2.2.2.1 Hoja exterior de piedra de la (FVL)

El espesor de las placas utilizadas como hoja exterior varía según el tipo de piedra, sin embargo el espesor mínimo recomendado por m² de superficie de material es de 30mm, para placas dispuestas verticalmente y si hay una inclinación > 60°(10), la razón de estos espesores se debe a la incorporación en su espesor de los sistemas de fijación ocultos ya que por este motivo la piedra estará expuesta a perforaciones, cortes, rebajes y ranuras por mecanizado. Si las piedras son poco compactas y con poca uniformidad en su masa se debe pensar en un espesor de mínimo 40mm.

(10) "Manual Básico Fachadas Ventiladas y Aplacados". Requisitos constructivos y Estanqueidad. Montero Fernández de Bobadilla Eduardo. R (pg.30)

Material pétreo	Espesores usados	Densidad	Peso de placa según dimensiones comerciales	Resistencia a compresión	Resistencia a flexión
Granito	≥ 15mm	2500 a 2700 kg/m ³	Para los aplacados de piedra se manejan pesos ≤ 70kg/m ²	Variable 543 a 1997 kg/cm ²	100 a 150 kg/cm ²
Mármol	≥ 20mm	2600 a 2800 kg/m ³		600 a 1000 kg/cm ²	100 a 200 kg/cm ²
Areniscas	-	2200 a 2600 kg/m ³		232 a 364 kg/cm ²	51 a 62 kg/cm ²
Calizas	-	Varía según tipo 1590 a 2590 kg/m ³		Muy variable 80,9 a 1349 kg/cm ²	Muy variable 35 a 162 kg/cm ²
Pizarras	≥ 20mm	2000 a 2800 kg/m ³		750 kg/cm ²	400 a 800 kg/cm ²

Tabla 2. 2 Características físicas de los materiales pétreos usados en las fachadas ligeras ventiladas.
(D')(36)

El sistema de fachada con revestimiento ligero ventilado de piedra natural es de gran complejidad debido a la fragilidad propia de algunas piedras cortadas en tabla y a la falta de homogeneidad tanto en su superficie como en su masa, lo que supone un estudio específico de los sistemas de anclaje y especial atención en la selección de materiales. La dimensión de las juntas que se manejan entre placas es entre 4mm y <10mm. Los materiales pétreos tienen un comportamiento específico dependiendo de la naturaleza de la hoja interior de fachada a la que irán soportados. En el artículo *Criterios de control de aplacados pétreos en fachada ventilada*.(11) se describe la aptitud al funcionamiento de los muros soporte, se resume en la siguiente (Tabla 2.3):

NATURALEZA DEL SOPORTE	APTITUD
Hormigón	Excelente
Ladrillo macizo	Muy buena
Ladrillo perforado	Buena
Bloque de hormigón con separación entre tabicas 30mm y grueso de las mismas 30mm	Buena
Ladrillo termoarcilla de células huecas pequeñas	Buena
Ladrillo hueco	Inaceptable
Bloque de hormigón de doble tabica	Inaceptable
Nota: En el dimensionado del anclaje se tendrá en cuenta la resistencia del material y la situación de éste respecto a juntas y bordes de las fábricas.	

Tabla 2. 3 Soportes más usuales y su idoneidad con la utilización de aplacados pétreos (C4)

(11) (fuentes: “La evolución de las fachadas ventiladas, nuevos materiales y sistemas constructivos”. Proyecto final de carrera Adjemian Oriá Anouch Universidad Politécnica de Valencia 2011 (pg. 117 a 120), “Catálogo de elementos constructivos del CTE. Materiales y productos” 2,<http://www.fgulem.es/pizarra/normativa.htm>, “II Jornadas de Investigación en Construcción.

Tema G: Calidad y Seguridad. Sección 1”. Control de calidad. Instituto de Ciencias de Construcción Eduardo Torroja (IETcc) 2008)

(12) “Criterios de control de aplacados pétreos en fachadas ventiladas”. Vera Soriano Roberto. Escuela de Arquitectura Técnica de Alicante, España 2002.

Ejemplo de fachadas ventiladas realizadas con aplacados pétreos:



Img.2. 4 Imagen y detalle de fachada ventilada con aplacados pétreos. Utilización de piedra caliza veteada, formato: piedra serrada, medidas: 60 x 30, 60 x 40 cm, espesor: 2 y 3 cm. Escuela infantil en Ciudad Lineal Madrid (C5)

2.2.2.2 Hoja exterior de cerámica de la (FVL)

Los aplacados cerámicos son también comunes en el sistema de fachada ligera ventilada. Por su composición (mezcla de arcillas, caolines, sílice, montmorillonita, illita y otros) con el uso de tecnologías de cocción a elevadas temperaturas se obtienen materiales durables, con poca absorción de agua, buen comportamiento químico y resistencia a flexión. Las clases de cerámicas se dividen según su porosidad, la porosidad depende de la temperatura de cocción, la presión de moldeo y la granulometría de la mezcla base(13).

Algunas de las especificaciones de los aplacados cerámicos más habitualmente empleados en fachadas ligeras ventiladas:(Tabla 2.4).

Especificaciones de interés			
Tipo de cerámica	*Medidas usuales	Espesor	Carga de rotura
Baldosa de gres hueco	De 10 x 10 hasta 60 x 60 cm	> 8mm	1000 – 2300N
Gres porcelánico	De 15 x 15 hasta 60 x 60	> 8mm	2200 – 5200N
* Las medidas varían según las empresas fabricantes			

Tabla 2. 4 Tabla de las características de los elementos cerámicos. Para la conformación de la hoja exterior de la fachada ligera ventilada realizada en base a algunas especificaciones. (A7)

Los factores influyentes en la utilización de piezas cerámicas como aplacados de fachadas ligeras ventiladas se muestran a continuación (Fig.2.13).

13) Universidad de Alcalá. España
<http://ebookbrowse.net/gdoc.php?id=212374546&url=b3084f56cdfb7afd01d640abdfea824> (consultado en Abril de 2014)

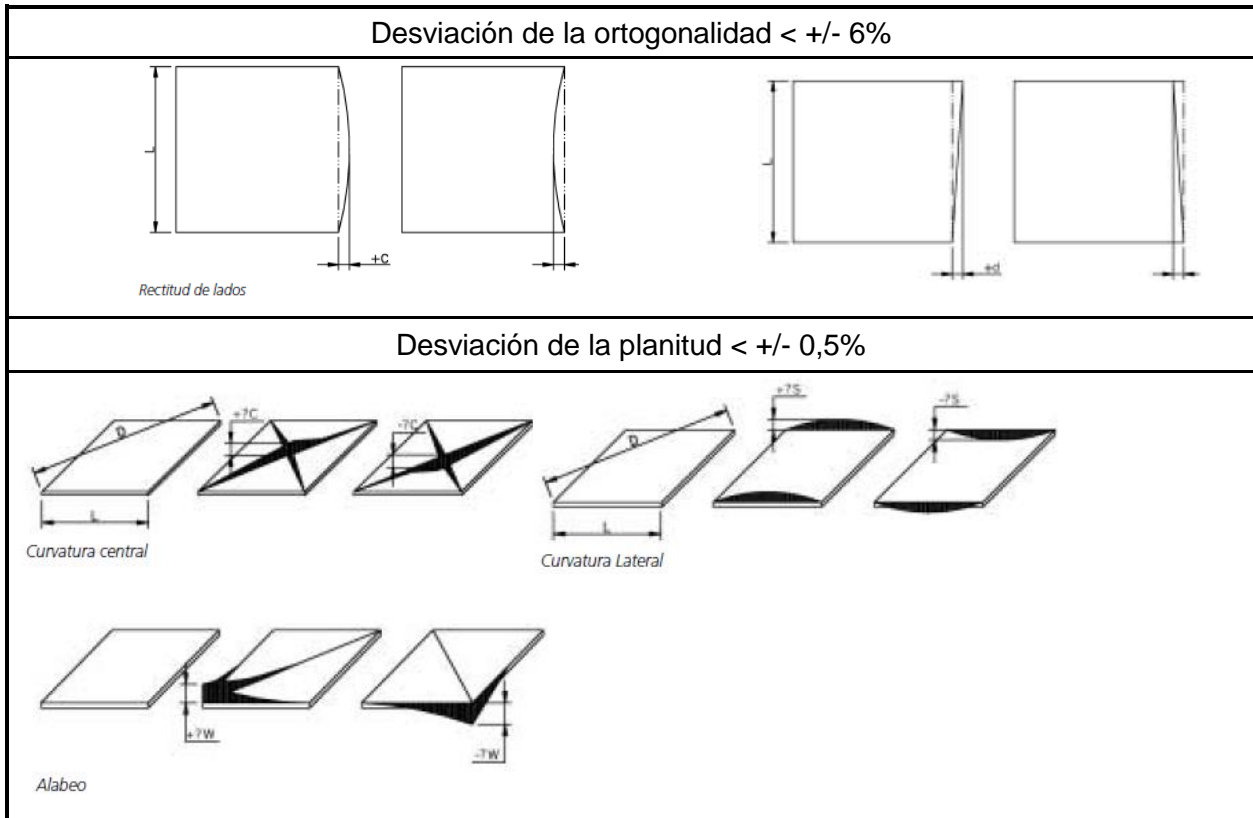
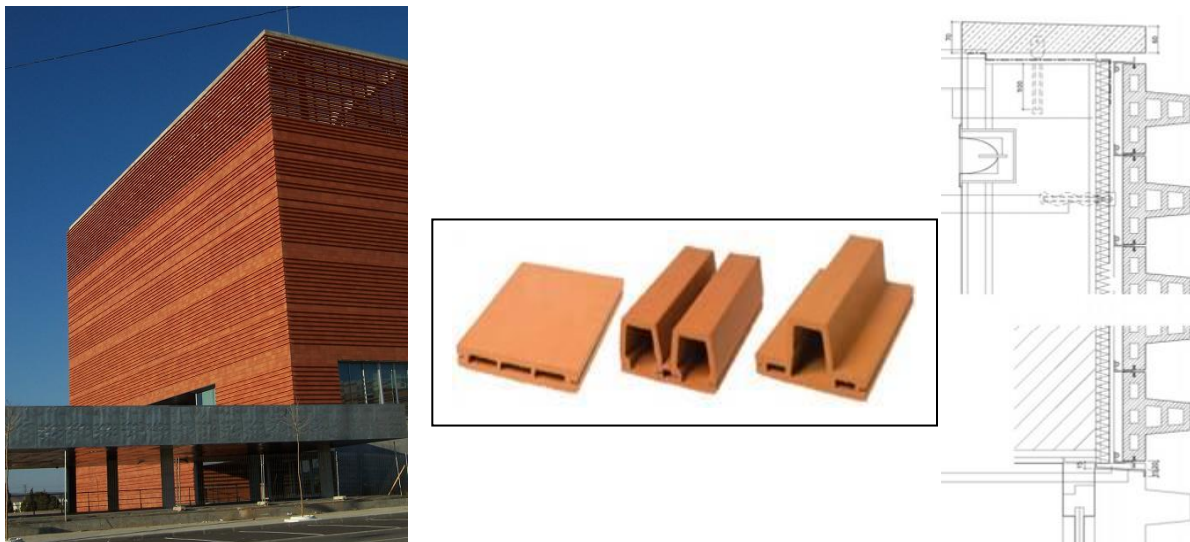


Fig.2.13 Especificaciones dimensionales a tener en cuenta de las piezas cerámicas para su implementación (A7)

Ejemplo de fachadas ventiladas realizadas con aplacados cerámicos:



Img.2. 5 Edificio Archivo Castilla de la Mancha. Toledo España. Imagen, sección de fachada y detalle de piezas cerámicas utilizadas. Arquitecto Vázquez Consuegra (C6)

2.2.2.3 Hoja exterior de madera de la (FVL)

El uso de materiales derivados de la madera en la (FVL) tiene mayor aplicación en el centro y norte de Europa, por tradición cultural y mayor especialización en el tratamiento de la madera y sus derivados.

Al ser utilizada en cerramientos exteriores, la madera requiere especial cuidado frente a varios factores como: la protección contra la lluvia, seguridad contra el fuego, etc. Por otro lado puede sufrir de cambios dimensionales por la intensa exposición climática y ser susceptible a la degradación por agentes orgánicos como hongos o insectos. Sin embargo la madera es un material de gran versatilidad, renovable y de fácil manipulación que puede ser empleado tanto para revestimientos como para soporte estructural de la hoja ligera. Con el uso de tecnologías preventivas y paliativas, varios de los factores mencionados anteriormente son fácilmente evitables y controlables.

En este sistema constructivo, las formas mas usadas para la hoja exterior son los entablados que se disponen de manera horizontal, vertical o diagonal como lamas formando cerramientos continuos y con solapes inclinados. El ancho del tablón debe ser menor o igual a 7,5 veces el espesor(14).

Como ejemplo de uso, la normativa francesa NF EN 335-1 (encargada de la durabilidad de la madera y sus materiales derivados), establece 5 clases de usos de la madera en la construcción de acuerdo a su comportamiento y riesgos de afectación en cada etapa del edificio. El uso de la madera para revestimientos de fachada es de “clase 3” (madera exterior con exposición al sol: 3A baja exposición y 3B fuerte exposición) con riesgo biológico por insectos, termitas y a la pudrición. Los tipos de madera mas usados son el pino silvestre y algunas variedades como: el Abeto, la Pícea, el Douglas y el Alerce. Estas son maderas comúnmente usadas en Francia por sus calidades de alta durabilidad, impermeabilidad y fácilmente hendibles.

En la Tabla 2.5, se describen algunas de las especificaciones de las maderas utilizadas en Europa como cerramiento en la fachada ventilada:

Tipo de madera	Densidad (con un 12% de humedad)	Resistencia a compresión	Resistencia a tracción	Resistencia a flexión
Roble	610 a 750 kg/m ³	55/30 N/mm ²	90 N/mm ²	103/66 N/mm ²
Alerce siberiano	620 a 720 kg/m ³	60/24 N/mm ²	123/94 N/mm ²	108/60 N/mm ²
Pino (Abeto) Douglas	500 a 540 kg/m ³	45/20 N/mm ²	101/77 N/mm ²	83/48 N/mm ²

Tabla 2. 5 Comparación de algunas especificaciones de maderas usadas como revestimiento para fachadas ventiladas (C7)

(14) DTU 41-2 *Document technique unifié Normes et règles de calcul Revêtements extérieurs en bois* (CSTB) Francia.
<http://www.pointp.fr/documentation/extrait-du-dtu-41-2-revetements-exterieurs-en-bois-XA1822>

En el uso de la madera como hoja exterior para fachada ligera ventilada, los tabloncillos deben estar bien ventilados y con cierta holgura para permitir el libre movimiento y cambios de dimensión de los tabloncillos, por lo que se recomienda que los cerramientos se hagan con juntas abiertas.

Ejemplos de la colocación de tabloncillos:

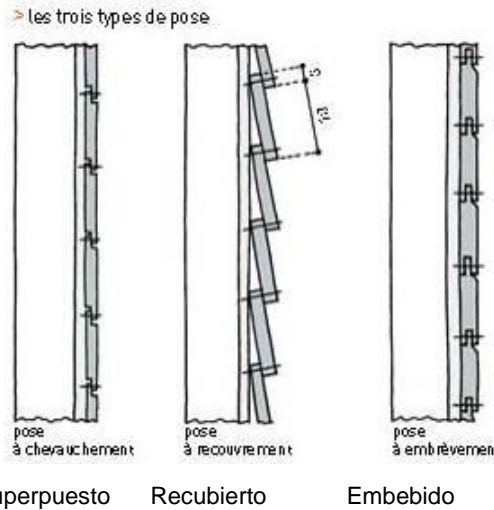
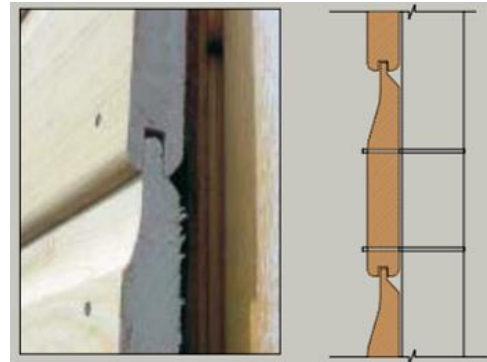
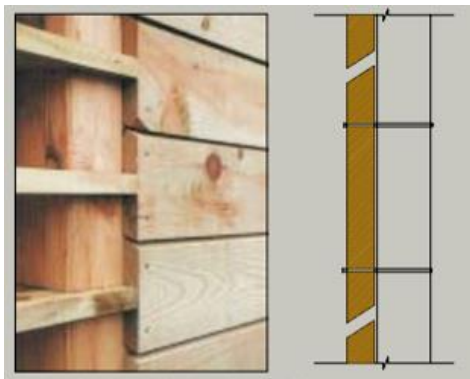


Fig.2.14 Sección vertical colocación de lamas horizontales (C8)



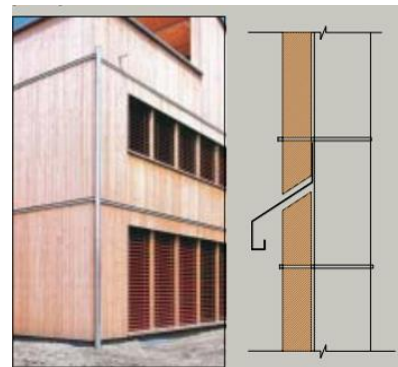
Evitando las aristas puntudas para mejor evacuación de agua y uniformidad del cerramiento.

Fig.2.15 Sistema machihembrado de tabloncillos horizontales (B6)



Realización mediante un corte oblicuo de los tabloncillos para facilitar la evacuación de agua.

Fig.2.16 Colocación de lamas con juntas abiertas (B6)



Solución de lamas verticales con una pieza metálica oblicua horizontal entre paños para evitar escorrentía.

Fig.2.17 Lamias verticales (B6)

También contribuye a la adecuada ventilación la disposición y orientación de la subestructura y se procura que presente discontinuidades para facilitar el recorrido del aire por el interior de la cámara intermedia(Fig.2.18C).

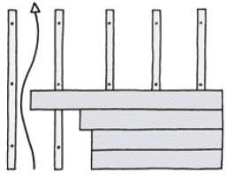
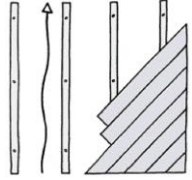
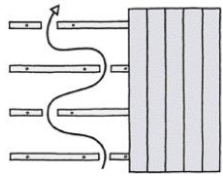
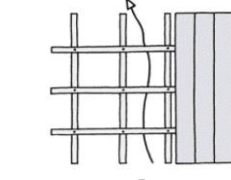
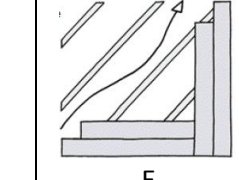
Ejemplos opcionales de la subestructura y las lamas de revestimiento				
				
A	B	C	D	E
Posición tabloneros horizontales.	Posición tabloneros diagonales.	Posición tabloneros verticales.	Posición con doble entramado de subestructura.	Posición técnica canadiense.

Fig.2. 18 Ejemplos de la subestructura y colocación de lamas de madera (C8)

Los espesores mínimos recomendados para la cámara son de 20mm y el arranque de la fachada con uso de madera se realiza a 20cm mínimo obligatorio respecto al suelo.

Ejemplo de fachadas de edificios realizadas con el uso de revestimientos de madera:



La fachada es ventilada y está constituida con lamas de madera que también regulan el paso de la radiación solar hacia el interior al superponerse a las ventanas.

Img.2. 6 Renovación del edificio de la Escuela de Educación Media Sidwell friends Washington (USA). Arquitectos Kieran Timberlake 2007. (C9)

2.2.2.4 Hoja exterior de metal de la (FVL)

El metal en la fachada ligera ventilada se utiliza en elementos de protección solar, fijos o móviles, como en cerramientos exteriores de fachada mediante chapas continuas, bien con juntas abiertas, semiabiertas o totalmente cerradas.

Por la esbeltez y diversidad de formas que se pueden obtener del metal, así como la rapidez de montaje y opciones para el diseño, resulta un material interesante tanto en obra nueva y como en en rehabilitación de fachadas. Otro aspecto que ofrece el metal es su presentación manufacturada en

forma de placas microperforadas que pueden ser utilizadas en paneles de absorción acústica. En general, las placas metálicas utilizadas como cerramiento de fachada son fácilmente reemplazables y reciclables.

Los materiales metálicos más empleados para placas de (FVL) son: zinc, titanio, acero inoxidable, galvanizados, aluminio, laminados en cobre y paneles con aleaciones de diferentes metales. Dentro del uso del metal en la fachada ventilada cabe destacar los paneles tipo sándwich, que son más rígidos y ligeros.

La junta entre placas se respeta mínimo de 10mm para permitir libre comportamiento térmico o mecánico del material. Las placas más usadas suelen estar realizadas con chapas lisas, onduladas y grecadas. Los espesores y características dimensionales dependen de cada fabricante.



Tipo de perfil	TPF 650	TPF 835	
Espesor de la chapa metálica (mm)	Fe 0,6	Fe 0,6	
Peso (kg/m ²)	8,06	6,27	
Longitudes de panel (m)	1 a 8,5	1 a 8,5	

Fig.2. 19 Ejemplos de placas de chapa grecada de acero galvanizado (C10)

El Aluminio es una de las opciones metálicas más utilizadas, se caracteriza por ser ligero de peso (aproximadamente la tercera parte del peso del cobre o el acero) resistente a la corrosión, no tóxico, maleable y reciclable.

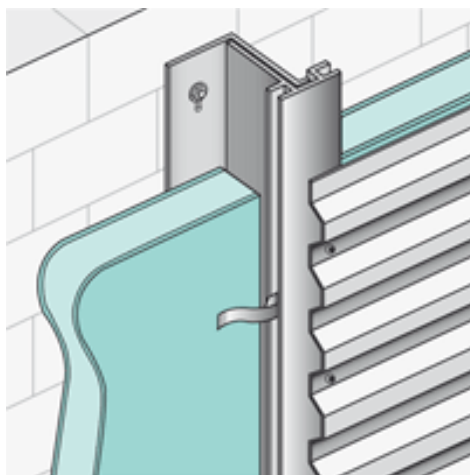


Fig.2. 20 (FVL) Hoja exterior grecada de aluminio (C11)

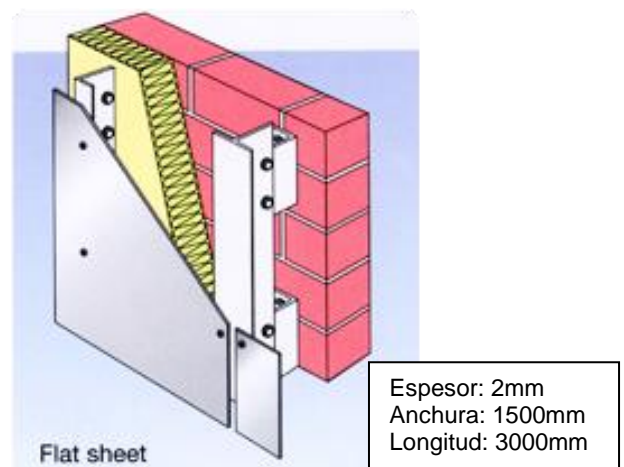
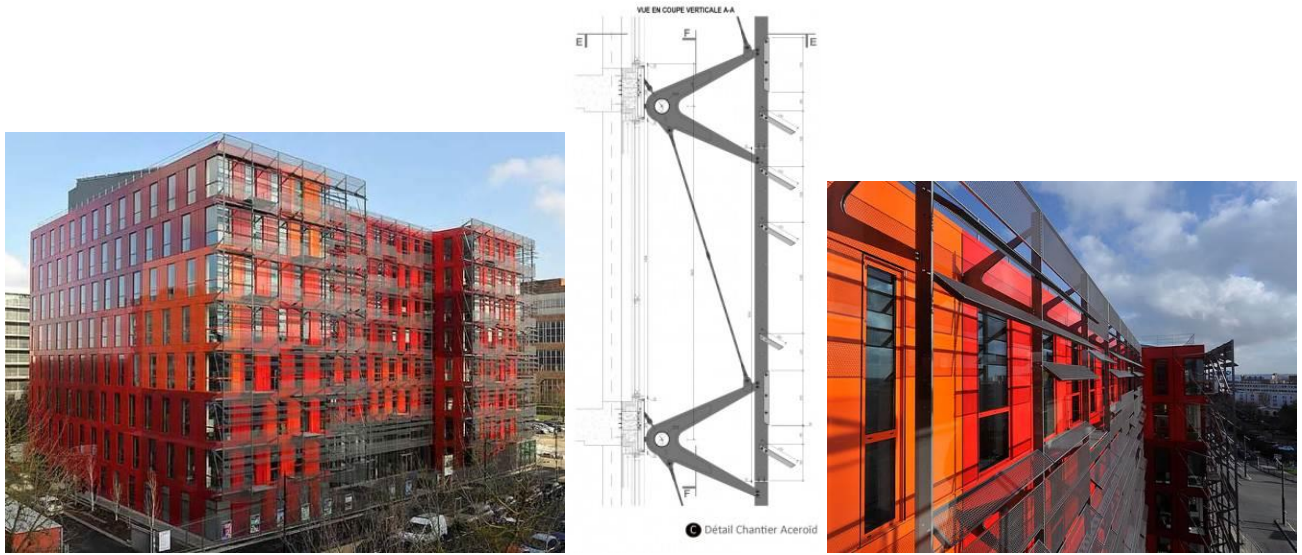


Fig.2. 21 (FVL) Hoja exterior plana de aluminio (C12)

Ejemplo de obras de edificios realizadas con (FVL) con placas metálicas:



Img.2.7 Edificio de oficinas “ETDE” Francia. Arqs. Hubert Godet, Courbevoie. Hoja interior de placas sándwich de aluminio con aislante mediante paneles semirígidos de lana de roca de 160mm, la hoja exterior está formada por chapas de aluminio de 3mm de espesor perforada al 65% para protección solar (C13 y C14)

2.2.2.5 Hoja exterior de fibrocemento y sintéticos de la (FVL)

Los fibrocementos son materiales compuestos, constituidos por una mezcla de cemento y fibras de refuerzo. A partir de este principio han surgido materiales como el GFRC (*Glass Fiber Reinforced Concrete*), el GRC (*Glass Reinforced Concrete*), los (CB) y el hormigón polímero, todos elaborados de fibrocemento, éstos materiales han sido desarrollados para aligerar los cerramientos y reducir espesores sin perder rigidez ni estabilidad, son impermeables y de fácil manipulación para cortar y perforar. Son empleados como placas en acabados exteriores y recubrimientos de cubiertas y fachadas. Están constituidos a partir de una masa dosificada de:

Cemento portland	40%
Agua	20%
Arena	40%
Fibra de vidrio de	3 a 5%

Algunos composites elaborados de fibrocemento incluyen otros aditivos como polímeros acrílicos y vinílicos.

Otro material elaborado utilizado en la (FVL) son los tableros baquelizados y fenólicos creados a base de fibras de celulosa (madera, cartón o papel) impregnadas con resinas y sometidos a procesos de compresión a altas temperaturas, las dimensiones de las placas varían según el fabricante. Los

espesores de la cámara intermedia ventilada se manejan de 20 a 50mm y las juntas entre paneles abiertas o cerradas son de mínimo 10mm(Fig. 2.22).

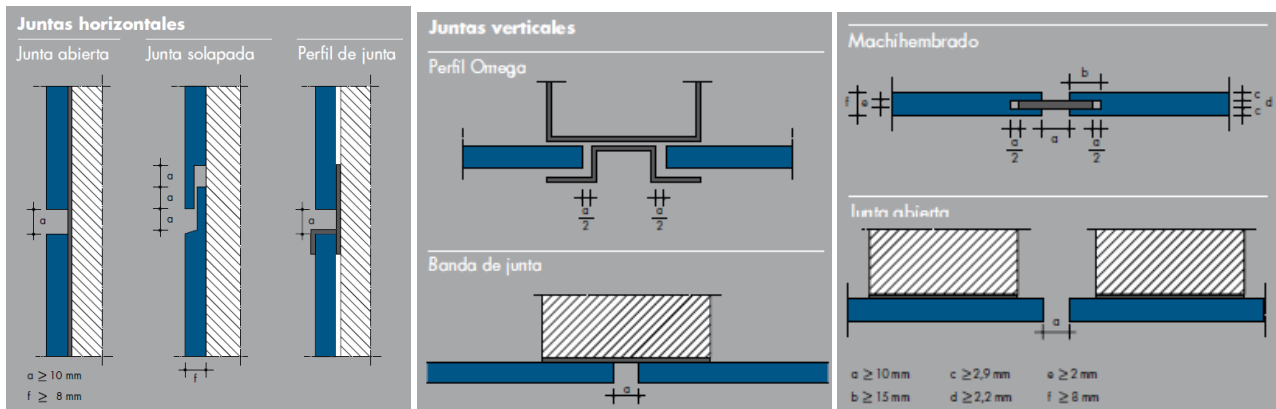


Fig.2. 22 Tipos de juntas utilizados en la unión de paneles fenólicos y baquelizados (C15)

En la Tabla 2.6 se comparan algunos diversos elaborados de fibrocementos y sintéticos:

Material	Espesor de panel	Peso de placa según dimensiones comerciales	Densidad	Resistencia a tracción	Resistencia a flexión	Resistencia a compresión
GRC	6 a 18mm	16 a 24 kg/m ²	1700 a 2100 kg/m ³	8 a 11 N/mm ²	20 a 30 N/mm ²	50 a 80 N/mm ²
(CB)	normalmente 12,5mm	15k g/m ²	1050 a 1260 kg/m ³	>0,5 N/mm ²	>4,0 N/mm ²	-
Hormigón Polímero	11 y 14mm	21 a 53 kg/m ²	2200 y 2400 kg/m ³	15 N/mm ²	16 a 36,22 N/mm ²	100 N/mm ²
Tableros fenólicos y baquelizados	6, 8, 10 mm	-	1350 kg/m ³	70 N/mm ²	120 N/mm ²	-

Tabla 2. 6 Características físico-mecánicas de diversos elaborados utilizados en la (FVL) (D') (15)

(15) DIT sistema DRACE fachadas en paneles GRC, El GRC Material Compuesto de Matriz Cementicia reforzado Con fibra de Vidrio AR. Saint Gobain Vetrotex, DAU Aquapanel cement board, Hormigón polímero <http://www.allstudies.com>, Paneles fenólicos para fachadas ventiladas Prodex <http://www.prodema.com>

Ejemplo de fachadas ventiladas realizadas con placas de elaborados de (CB) y sintéticos:



Img.2.8 (FVL) (CB) y sintéticos -1 Viviendas de protección pública en Parla (Madrid), Arquitectos : Arquitécnica. Utilización de paneles GRC, -2 Parque tecnológico Audi (Frankfurt), Arquitectos: Schmidhuber+Partner. Utilización de paneles Cement Board, - 3 Rehabilitación de viviendas (Cornellá de Llobregat), Empresa de Promoción social del ayuntamiento de Cornellá. Utilización de paneles de hormigón polímero. -4 Quai Branly Museum (París), Arquitecto: Jean Nouvel. Utilización de paneles fenólicos (C16, C17, C18 y D)

2.2.3 Subestructura de la (FVL)

Son los elementos resistentes que permiten la fijación de la hoja exterior de la (FVL) que además de soportar las piezas que componen el revestimiento, también funcionan como transmisor de cargas a la hoja interior. Los sistemas de anclajes deben cumplir con requisitos como:

- Seguridad estructural de diferente índole: Cargas eólicas, movimientos reológicos propios y sismos, seguridad anti desprendimiento y en general los requisitos legales estructurales para fachadas.
- Distancia adecuada entre elementos de soporte, tanto vertical como horizontal, para la fijación de los aplacados procurando el libre movimiento controlado de las placas que componen el cerramiento.
- Ventilación de la fachada determinando el espesor de la cámara y los recorridos del flujo de aire.

Los materiales empleados para los anclajes son el acero inoxidable, el acero galvanizado, y el aluminio con algunas aleaciones en perfiles para subestructuras reticuladas. Deben ser elementos durables anticorrosivos y de gran resistencia estructural.

Dependiendo del material y forma del cerramiento de la hoja exterior, los elementos de soporte varían en sistemas y dimensiones.

2.2.3.1 Tipología de anclajes de la (FVL)

Los sistemas de anclajes se diferencian claramente en procedimientos vistos y ocultos con una gran diversidad de piezas de unión entre el revestimiento y la hoja interior de soporte. En el *Manual Básico. Fachadas Ventiladas y Aplacados. Requisitos constructivos y Estanqueidad*[1], define los tipos de anclaje así:

Tipo de anclaje a la hoja interior de soporte.

- Puntual (mecánico o químico) (Fig. 2.23).
- Mediante interposición de una subestructura (Montantes o montantes y travesaños) (Fig. 2.24).

Tipo de unión a la subestructura.

- Fijación con grapa vista ú oculta (Img. 2.9)
- Fijación mediante perfiles a la baldosa ranurada (Img. 2.10)
- Fijación mediante tornillo y taladro destalonado
- Sistemas compactos. Se utilizan para placas metálicas y Elaborados sintéticos, se caracterizan por tener menos elementos de fijación de las placas. (Img. 2.11)

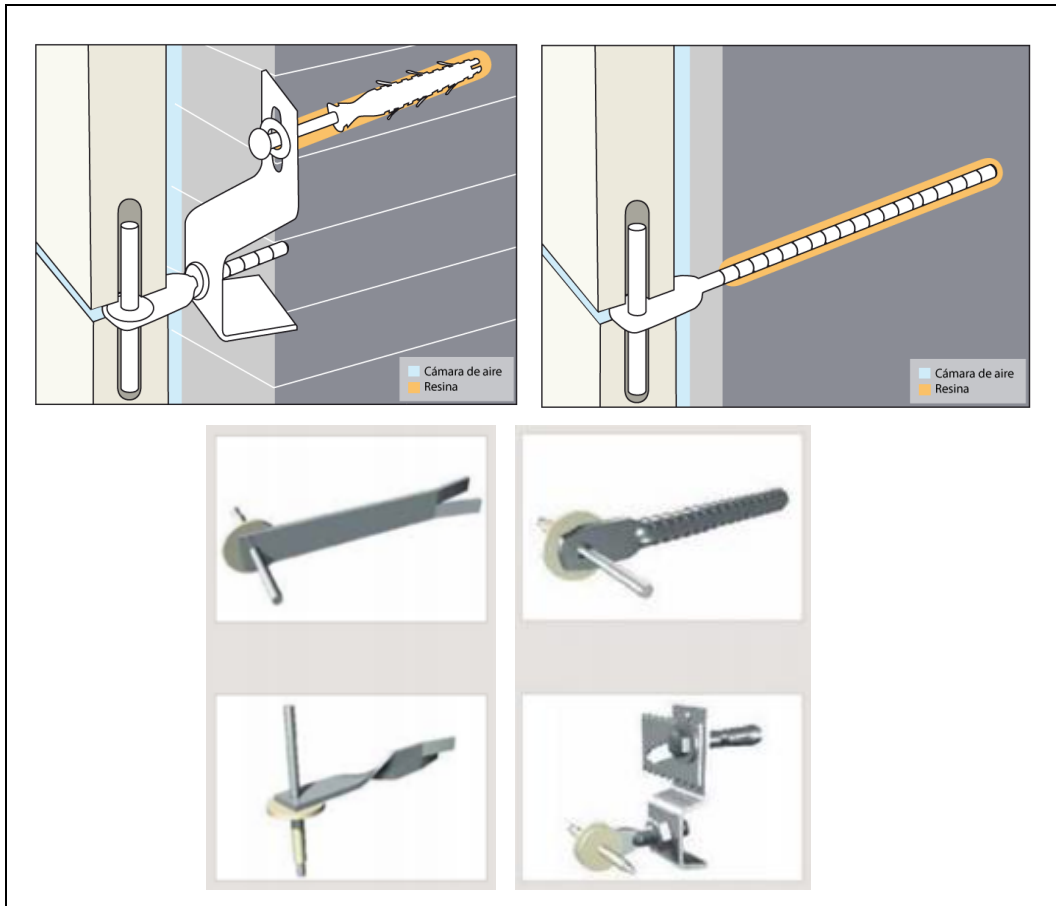


Fig.2. 23 Detalle de anclajes puntuales en acero inoxidable. Algunos de estos elementos también se pueden atornillar mecánicamente a una subestructura de perfilera (C19 y C20)

La subestructura está compuesta por el conjunto de los perfiles verticales, ménsulas o escuadras de fijación y el anclaje para la fijación de ménsulas. En algunos casos también se incluyen perfiles horizontales.

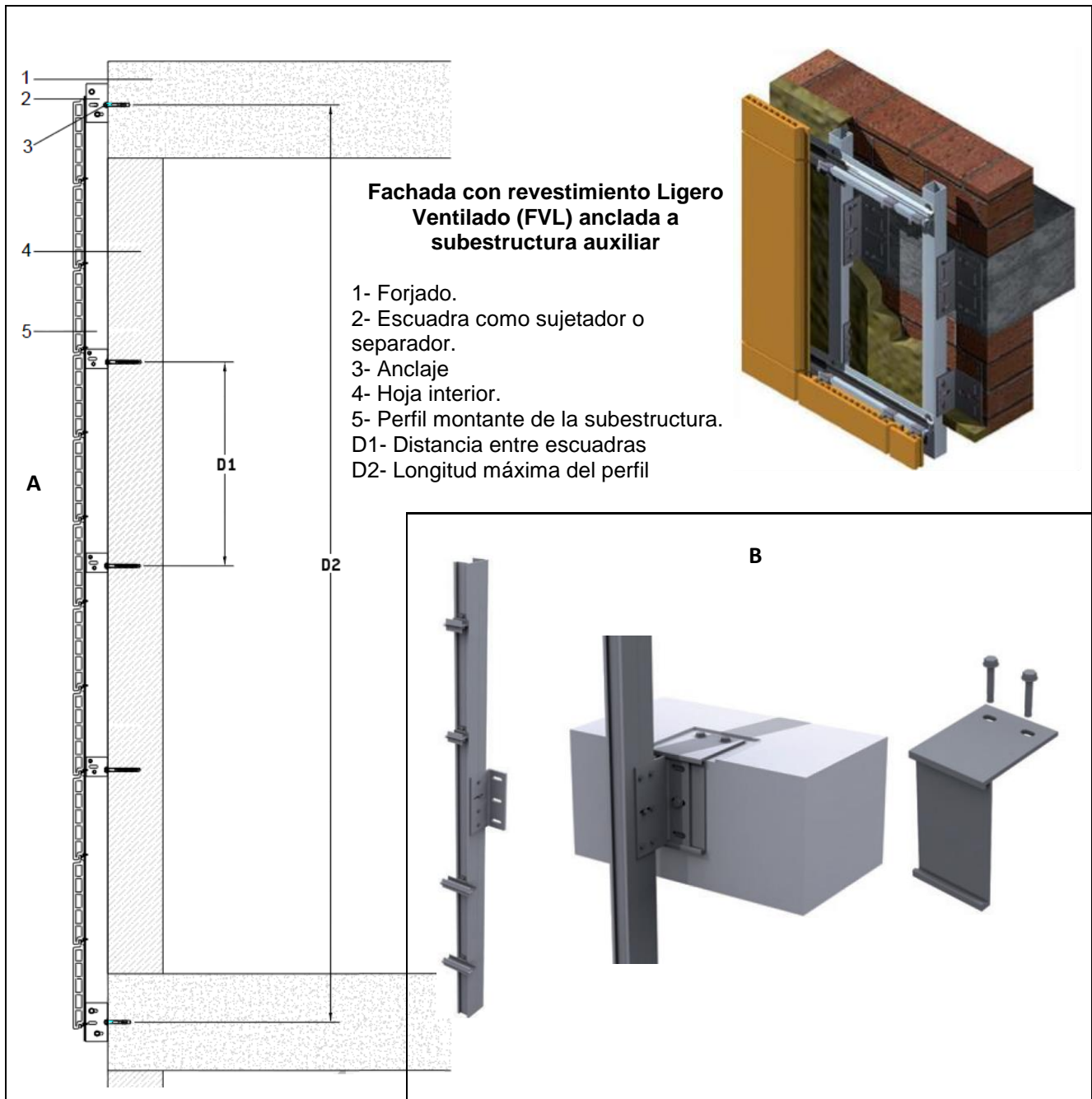
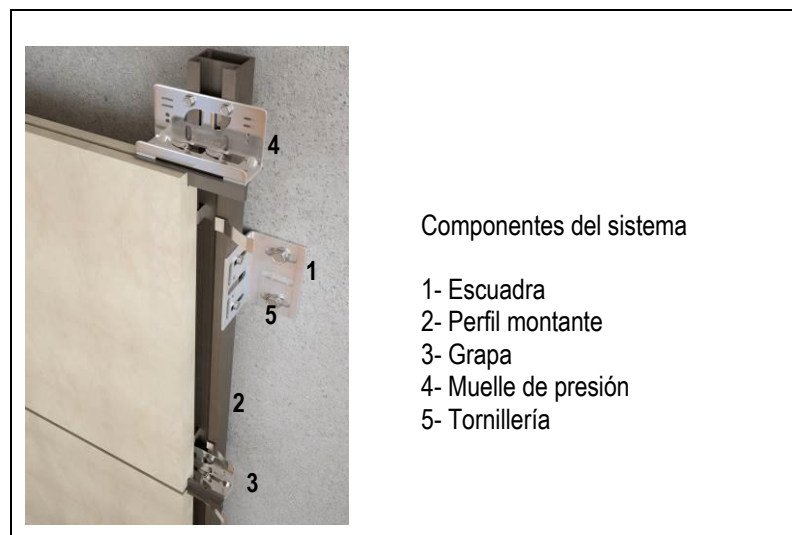


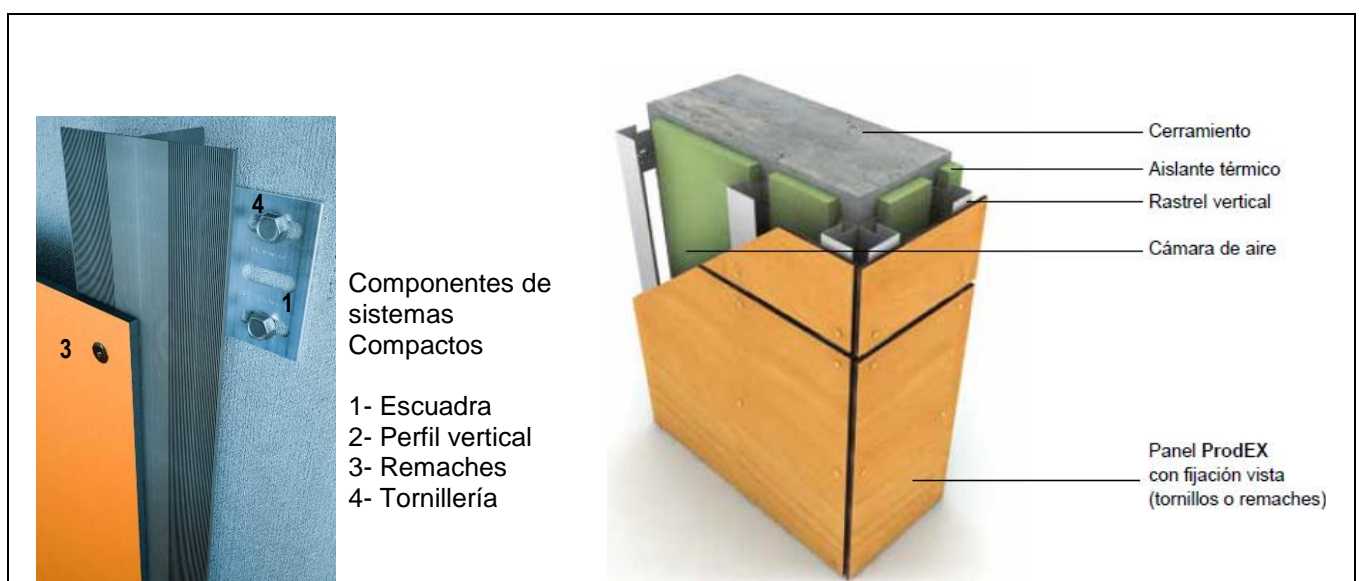
Fig.2. 24 Detalles de la subestructura de la (FVL) -A Detalle en sección de los elementos que componen la subestructura, esquema de funcionamiento, **-B** Detalle de perfil y elementos de fijación (C21 y C22)



Img.2. 9 Detalle fijación con grapa vista. Sistema de fijación 300 90 grados SB Fijaciones (C23)



Img.2. 10 Detalle fijación con grapa oculta. Mediante ranuras en las placas. Sistema de fijación 300 25 90 grados (C23)





Img.2. 11 Sistema de fijación compacto (C23 y C24)

Dependiendo del tipo de placa de revestimiento adoptada y las especificaciones de la (FVL) se utiliza el tipo de anclaje más adecuado con sus elementos específicos de fijación. En la Tabla 6.6 se resumen las características de los procedimientos de anclaje más usados en las (FVL).

Material de revestimiento	Tipo de anclaje	Material de anclaje	Puntos de apoyo mínimos por panel
Pétreos	-Puntual -Subestructura con perfilera Vista Oculto - Rastres horizontales.	-Acero inoxidable -Acero galvanizado principalmente.	Mínimo 4 puntuales por cada placa o 2 de regleta.
Cerámicas	-Subestructura con perfiles verticales, horizontales y combinados - Rastres horizontales Vista Oculto	-Aluminio -Acero galvanizado principalmente.	Mínimo 4 puntuales por cada placa o 2 de regleta.
Maderas	- Atornillado sobre rastres - Subestructura con perfiles Oculto mediante clips plásticos	-Acero inoxidable -Madera	La profundidad de penetración del tablero debe ser mínimo de 22mm
Metales	- Subestructura con perfiles, anclaje mecánico o químico -Sistemas compactos	-Aluminio -Acero galvanizado -Acero inoxidable -Chapas metálicas	Mínimo 3 por lado horizontal y vertical
Otros materiales Hormigón polímero GRC Cement Board Fenólicos y baquelizados	- Subestructura con perfiles anclaje mecánico o químico Vista: perfilera vertical Oculto: perfilera de cuelgue o encolado	-Perfiles de madera -Acero inoxidable -Acero galvanizado -Aluminio	Mínimo 3 por lado horizontal y vertical

Tabla 2. 7 Tabla resumen de anclajes según el tipo de revestimiento utilizado (D')

2.2.4 Clasificación y análisis de los productos usados para el aislamiento en la (FVL)

Los productos para el aislamiento que conforman la Fachada con revestimiento Ligeramente Ventilado. Se aplican formando una capa de material adosado a la cara exterior de la hoja interior del sistema de fachada, ocupando parte de la cámara intermedia. Su función principal es colaborar a la función de protección térmica del conjunto, reduciendo las transmisiones directas de temperatura.

La capa de aislamiento debe asegurar un alto rendimiento de ahorro de energía en climatización. Está comprobado que la calefacción y uso de aire acondicionado suponen hasta el 50% del consumo de energía del edificio(16).

Cuando la configuración de estos productos aislantes se basa en materiales de fibras minerales de los que se obtienen fieltros de estructura física porosa y flexible con celdas abiertas, aportan por su estructura de configuración, la cualidad de absorción de las ondas sonoras que atraviesan una capa aislante, disipando parte de la energía sonora en energía calórica. El uso de lanas minerales puede reducir la transmisión de ruido a través de ellas hasta 15dBA(17).

Los materiales de aislamiento más comunes para la (FVL) son: la fibra de vidrio elaborada a partir de arena silíceo y la lana de roca elaborada a partir de roca basáltica. Otros materiales de uso potencial son las fibras de madera y de lana de oveja pero su comportamiento frente a la humedad y los agentes bióticos, restringen la extensión de su uso.





Estos aislamientos se utilizan en formatos de manto o rollo y en paneles rígidos o semi-rígidos, varían según las necesidades de instalación y de protección de la fachada. A continuación en la Tabla 9 se describen algunas características de productos aislantes más usados en fachadas y en la (FVL).

Entre los sistemas de mejora de aislamiento para fachadas se encuentran los sistemas SATE, tratamiento de aislamiento al edificio que se realiza en la cara exterior de la fachada, pero no incluye una subestructura con cámara ni hoja exterior. No hace parte de la (FVL).

La tipología de aislamientos utilizados en fachadas y algunas de sus características se indican en la siguiente tabla (Tabla 2.8).

(16) Guía Técnica para la rehabilitación de Envoltura Térmica en los Edificios. Guía No.3 Soluciones de Aislamiento con Lana Mineral. Publicación IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) Madrid Septiembre de 2008

(17) "El uso de materiales adecuados en la rehabilitación térmica convierte en gratuita la rehabilitación acústica" Noticias CEPCO (Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción) 31/01/2011

Tipo de aislamiento	Dimensiones (m)	Espesores (mm)	Densidad aprox. (kg/m ³)	Fijación	Absorción acústica	*Aislamiento acústico
Panel compacto de lana mineral para ETICS 	1,2 x 0,60 1,0 x 0,6	40 50 60 80	100-161	Mortero adhesivo y anclajes de fijación mecánica	0,70 0,70 0,80 0,90	Rw=48dB solo del panel
Panel en rollo lana de vidrio 	1,35 x 0,60	40 50 60 80	14-60	Mecánica mediante tacos de polipropileno	- 0,70 0,80 -	Rw=40dB a 47 dependiendo de un muro base. Mejora entre 7 y 10dB
Panel semirígido de lana mineral 	1,25 x 0,60	50 60 100	28-50	Mecánica mediante tacos de polipropileno	- 0,70 0,80 -	-
Poliestireno extruido XPS 	1,25 x 0,60 2,60 x 0,60	30 40 50 60	10-14	Adhesiva y mecánica, revestimiento de capa protectora	-	-

* En cuanto al aislamiento acústico, los valores encontrados de los diferentes productos son dispares y se consideran solo orientativos

Tabla 2.8 Tabla comparativa de algunos valores característicos de los aislamientos utilizados en fachadas y en la (FVL) (D') (18)

2.2.5 Rehabilitación de edificios. Aportación de los (SATE)-(ETICS)

En la rehabilitación y protección exterior de edificios se ha utilizado el concepto (ETICS) *External Thermal Insulation Composite System* sistema de aislamiento térmico por el exterior usando paneles aislantes de poliestireno expandido EPS, poliestireno extruido XPS y de fibras naturales con espesores habituales de 40, 50, 60 y 80mm, este concepto apareció en 1940 en Suecia difundándose a los países del centro de Europa, actualmente es bastante utilizado para la renovación de edificios en países de diferentes latitudes. El uso de materiales de protección en el exterior del edificio (ETICS) se clasifica de acuerdo a:

(18) Catálogos fabricantes panel ETICS FKD-S knauf insulation é ISOFOX isover, ursa glasswool P4652 y ecovent Isover, Ultravent Hidro (TP-KD 430) knauf insulation, polyfoam Knauf insulation y Fuente (A3)

- Tipo de anclaje
- Material aislante utilizado
- Tipo de acabado

-Tipo de anclaje: La fijación de los paneles se efectúa con adhesivos, espigados y fijaciones mecánicas.



Img.2. 12 Fijación de paneles para ETICS (C25)

- Tipo de aislante utilizado: lanas minerales, poliestireno expandido EPS, poliestireno extruido XPS.

-Tipo de acabado: Revoques minerales, siliconas y acrílicos.

Revoques minerales con base en cemento mas imprimación.

Mortero de juntas. Aplacados de ladrillo acrílicos, cerámicos de arcilla y de piedra.

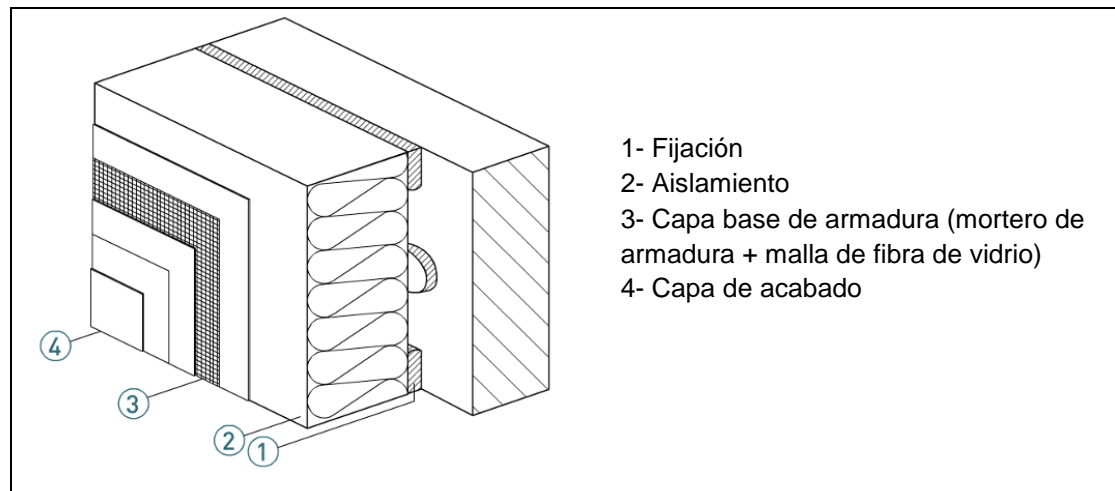


Fig.2. 25 Configuración general del sistema (ETICS) (B7)

Los aislamientos en el exterior de la fachada se utilizan principalmente para la protección térmica, sin embargo, la adición de otra capa al cerramiento exterior resulta beneficioso en la protección acústica especialmente en entornos con mayor exposición al sonido.

Estudios realizados por varios autores muestran la ganancia de protección acústica obtenida con el uso de materiales aislantes al exterior de la fachada como ejemplo está la ponencia *“The effect of additional thermal lining on the acoustic performance of a wall”* J. Nurzynski[2] Donde se exponen los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio de muros adicionando una capa de aislamiento con lana mineral y con poliestireno expandido.

En esta publicación el autor describe el uso común de los ETICS para el aislamiento térmico en edificios nuevos y rehabilitados en Polonia y el posible incremento en el aislamiento acústico que si bien no es tan elevado por las aperturas de ventilación y la ventanería, si representa una mejora de protección acústica en edificios con mas de una fachada, es el caso de los que está ubicados en esquinas.

En el gráfico(Fig. 2.26) se observa el comportamiento de un muro en bloques de silicato de calcio con un espesor de 240mm adicionando una capa de lana mineral y una capa de paneles de poliestireno expandido.

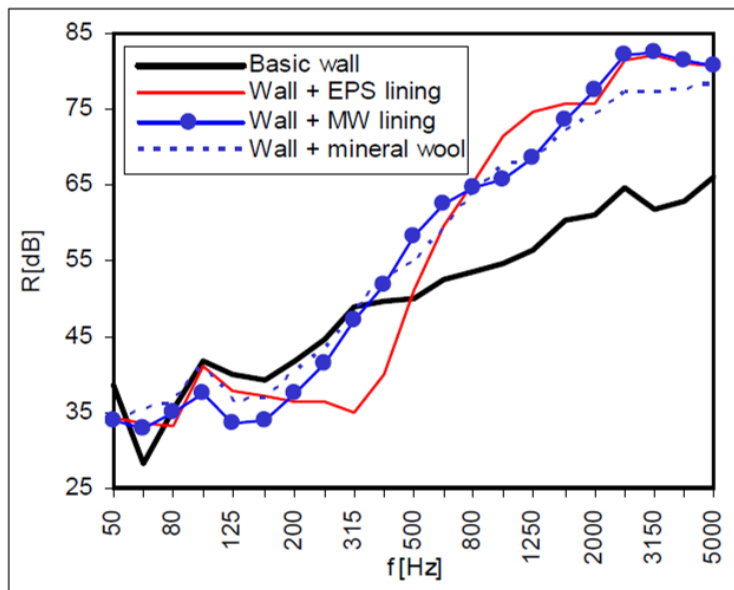


Fig.2. 26 Comportamiento de un muro de fachada al agregar aislamiento por el exterior. Donde: **EPS lining** es poliestireno expandido con tratamiento final de acrílico plástico, **MW lining** es lana mineral con tratamiento final de acrílico plástico y **mineral wool** es lana mineral simplemente adosada (B8)

Lining	d mm	m_2 kg/m ²	m'_2 kg/m ²	s' MN/m ³	f_0 Hz
EPS	150	2,1	8	25	283
MW	150	12,2	8	46	384

Tabla de resultados obtenidos donde: **d** corresponde al espesor del aislamiento, **m_2 kg/m²** masa por unidad de área del aislamiento, **m'_2 kg/m²** masa por unidad de área del tratamiento final de acrílico plástico el cual es de 6mm de espesor, **s' MN/m³** rigidez dinámica y **f_c** la frecuencia crítica del material.

Fig.2. 27 Resultados obtenidos de ensayos de laboratorio de un muro con capa de aislamiento (B8)

La publicación concluye demostrando el comportamiento del uso de aislamientos en el exterior con mejores resultados a altas frecuencias disminuyendo el aislamiento a bajas frecuencias por influencia de la frecuencia crítica de los materiales.

Otros autores muestran los rendimientos obtenidos en rehabilitación de fachadas con el uso de lanas minerales. (AFELMA) Asociación de Fabricantes Españoles de Lana Mineral, en el documento *Rehabilitación de edificios con lanas minerales aislantes*(19) expone el incremento de protección en fachadas con la adición de materiales aislantes.

(19) Nueva Guía de Rehabilitación Térmica de Edificios con Lanas Minerales aislantes AFELMA
<http://www.aislar.com/Templates/publicaciones.htm>

Rehabilitación de fachadas con aislamiento por el exterior $\frac{1}{2}$ pie de ladrillo de hormigón ($U_{\text{inicial}} = 2,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)		
Aislamiento por el exterior con Lana Mineral de 50 mm	Transmisión térmica U $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo dBA
Fachada ventilada	0,54	+6
ETICS (o SATE)	0,54	+6

Fig.2. 28 Valores obtenidos con diferentes tipologías de aislamientos en fachadas (B9)

En el artículo “*Effect of the rockwool bulk density on the airborne sound insulation of lightweight double walls*” (A. Uris, A. Llopis, J. Llinares 1999)[3] se muestran los resultados obtenidos en la medición del aislamiento acústico de diferentes densidades de lana de roca en dos particiones interiores: una compuesta de una lámina de yeso de 13mm de espesor + capa de lana de roca de 50mm de espesor con tres tipos de densidad 40, 70 y 120 kg/m^3 + lámina de yeso de 13mm y la otra partición de una estructura doble compuesta de una lámina de yeso de 13mm + capa de lana de roca de 50mm + una estructura doble de perfiles metálicos de 50mm de espesor (100mm de cámara de aire en total) + capa de lana mineral de 50mm con densidades de 40 y 70 kg/m^3 . Los investigadores comprobaron que en el comportamiento de las particiones a frecuencias por debajo de 1250Hz el índice de reducción sonora puede incrementarse reduciendo la densidad de la lana de roca. Arriba de estas frecuencias no hay mucha diferencia de reducción acústica entre las diferentes densidades de lana de roca.

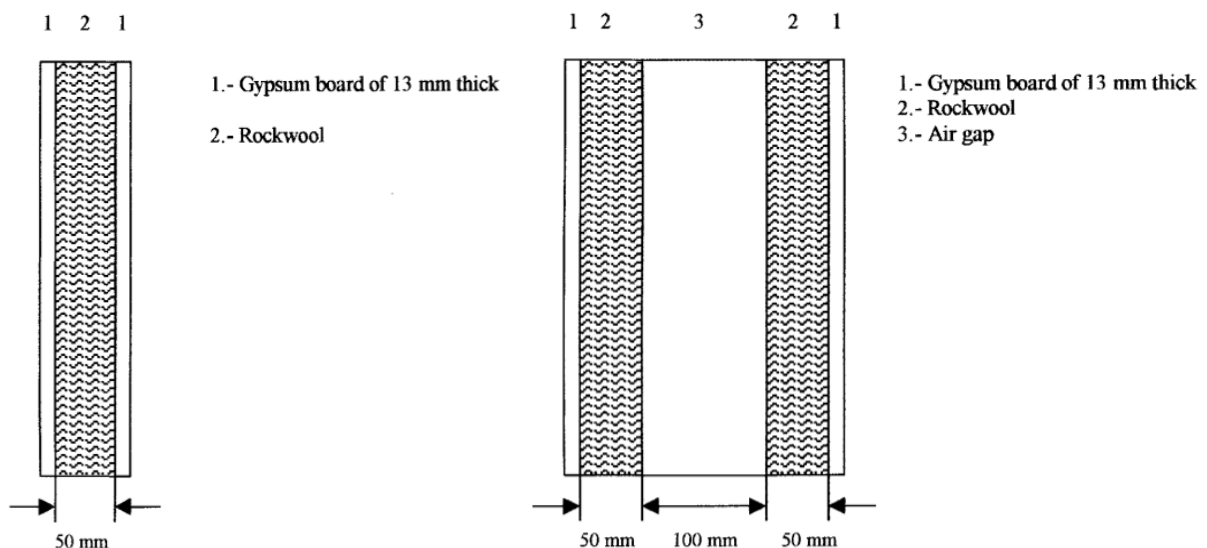


Fig.2. 29 Particiones ensayadas (B10)

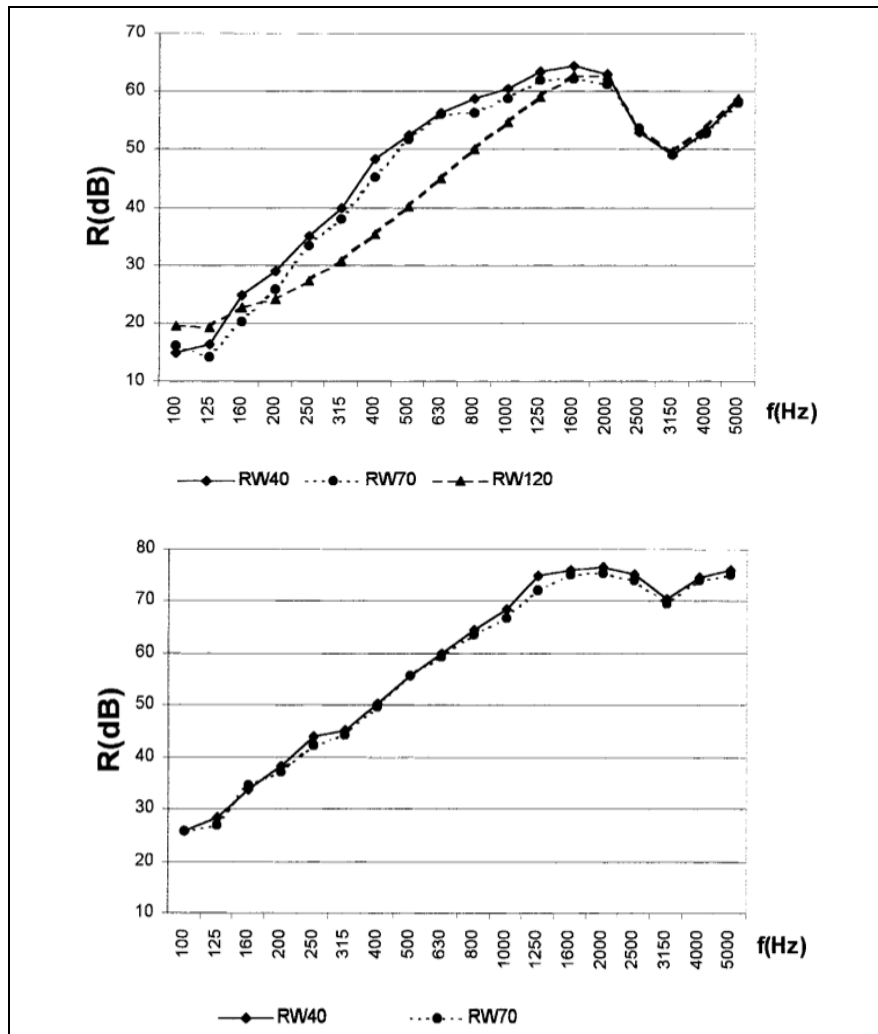


Fig.2. 30 Resultados obtenidos en los diferentes ensayos. Gráfica izq. Partición simple, se observa un peor comportamiento de la capa de lana mineral de 120 kg/m3 de densidad. Gráfica de la der. Corresponde a la partición doble donde no se observa mayor diferencia entre las diferentes densidades de la lana de roca (B10)

2.3 Fuentes y referencias capítulo 2

Codificación de fuentes y referencias

Fuente A: Libro
Fuente B : Artículo (publicación, paper, congreso, etc)
Fuente C: Internet
Fuente D: Elaboración propia de Andrea Niampira Daza
Fuente D': Elaboración propia en base a resultados o varias consultas
Fuente E: Tesis
Fuente F: Ensayos acústicos

A1: Knaack, Ulrich; Klein, Tillmann; Auer Thomas. *Façades principles of Constructions* Ed. Birkhauser 2007

A2: Hausladen, Gerhard; de Saldanha, Michael; Liedl, Petra, with contributions from Kaufmann, Hermann
“*Climate Skin: Building-skin concepts that can do more with less energy*” (Basel : Birkhäuser, cop. 2006).

A3: Hopkins, Carl. “*Sound Insulation*” Elsevier (Oxford UK 2007)

A4: Oesterle, Lieb; Heusler, Lutz “*Double-Skin Facades: Integrated Planning*” (Munich Prestel, cop. 2001)

A5: Pardal, Cristina; Paricio, Ignacio “La fachada ventilada y ligera” (Barcelona. Bisagra, 2006)

A6: Abalos, Iñaki; Herreros, Juan “Técnica y Arquitectura en la Ciudad Contemporánea 1950-2000” 3º ed.
Nerea (Madrid. 2000)

A7: [1] Pérez Navarro, Julián; Álvarez Sandoval, Antonio; Montero Fernández de Bobadilla, Eduardo.
“*Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad: Manual Básico*” Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Consejería de Obras Públicas, vivienda y Transportes. Murcia, España 2007.

B5: Aquapanel Outdoor “Hoja técnica w38” Edición 02/05 *Knauf Company*

B6: Mosqueira vidal, A. “Revestimiento de Fachadas en Madera”. Revista CIS-Madera nº 11 año 2003

B7: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) Guía No.7 “Sistemas de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) para la Rehabilitación de la Envoltura Térmica de los Edificios” (Madrid España Abril 2012)

B8: [2] J. Nurzynski. “The effect of additional thermal lining on the acoustic performance of a wall” Congreso *Acoustics* (Paris 2008)

B9: Asociación de Fabricantes Españoles de Lanasy Minerales Aislantes (AFELMA) Documento: Nueva Guía de Rehabilitación Térmica de Edificios con Lanasy Minerales aislantes.

B10:[3] A. Uris, A. Llopis, J. Llinares “*Effect of the rockwool bulk density on the airborne sound insulation of lightweight double walls*” Grupo de Acústica Arquitectónica y del Medio Ambiente, Departamento de Física Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia España. Publicación *Applied Acoustics* 58 (pp. 327-331) 1999.

C1: <http://bilbaoenconstruccion.com/2009/01/28/iglesia-de-miribilla-imb-arquitectos/>

C2: <http://www.fachadasventiladas.com/vista/index.php/ES/referencias/ficha/57>

C3: <http://www.e-architect.co.uk/berlin/scandinavian-embassies>

C4: Criterios de control de aplacados pétreos en fachadas ventiladas. 2002

<http://www.hospitecna.com/Edificacion-Mantenimiento-del-edificio/Articulos/Criterios-control-aplacados-petres/id-Lbfaihjbfeecffd.xsql>

C5: <http://www.piedranatural.es/proyectos/fachadas-ventiladas/>

C6: http://www.caravistahdr.com/detalle_guia_obras.php?id=2

C7: <http://www.bardagelemeze.eu/pages/technique.php>

C8: Folleto informativo Bon Bricoleur. Réaliser un Bardage en bois <http://www.ducotedechevous.com>

C9: <http://www.realcedar.org/cedar-gallery/institutional/project.aspx?id=10>

C10: <http://www.trimo.es>

C11: www.aluteksistemi.it

C12: www.amari-arquitectura.es

C13: <http://www.acieroid.com/servicios/3--rehabilitacion&>

C14: <http://www.lemoniteur.fr/195-batiment/article/etudes-de-cas/768472-siege-social-etde-un-concentre-d-innovations-dans-une-logique-de-cout-global>

C15: http://www.trespa.info/meteon/ventilated_facades_general_details/default.aspx

C16: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2012/01/31/120-viviendas-de-proteccion-publica-en-parla-arquitectica/06-parla-120/>

C17: <http://www.schmidhuber.de/en/project/audi-iaa-frankfurt-2011>

C18: <http://begira.ulma.com/es/actualidad/14.000-metros-rehabilitados-con-fachada-ventilada-ulma>

C19: www.dolcestone.com

C20: www.bateig.com

C21: <http://www.lineapreencion.com/ProjectMiniSites/IS32/html/cap-2/db-prl-re/seccion-prl-re2/seccion-prl-re2.htm>

C22: www.sistemamasa.com

C23: <http://www.sbfijaciones.com>

C24: www.prodema.com

C25: Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales (ANFAPA) Documento técnico Monografías ETICS www.anfapa.com

Listado de figuras capítulo 2

Fig.2. 1 Vista frontal y sección Box Window. (A1)	39
Fig.2. 2 Sección box window Edificio Potsdamer Platz 1 Berlín. (A4)	39
Fig.2.3 vista frontal Shaft-Box. (A4)	40
Fig.2. 4 Sección Shaft-Box. (A4)	40
Fig.2. 5 Vista frontal Corridor Facade. (A4)	40
Fig.2. 6 Isométrico Corridor Facade. (A1)	40
Fig.2. 7 Alzado frontal y planta sistema Multistorey Facade. (A2)	41

Fig.2.8 Sección Multistorey Facade. (A4).....	41
Fig.2.9 Sección Ed. “Victoria Ensemble” Colonia Alemania. (A4).....	41
Fig.2. 10 Clasificación de la fachada ligera ventilada (A5).....	43
Fig.2. 11 Esquema de funcionamiento del muro doble ligero ventilado. (A6).....	44
Fig.2. 12 Sistema Aquapanel. (B5).....	45
Fig.2.13 Especificaciones dimensionales a tener en cuenta de las piezas cerámicas para su implementación (A7).....	51
Fig.2.14 Sección vertical colocación de lamas horizontales (C8).....	53
Fig.2. 15 Sistema machihembrado de tablonces horizontales (B6).....	53
Fig.2.16 Colocación de lamas con juntas abiertas (B6).....	53
Fig.2.17 Lamas verticales (B6).....	53
Fig.2. 18 Ejemplos de la subestructura y colocación de lamas de madera (C8).....	54
Fig.2. 19 Ejemplos de placas de chapa grecada de acero galvanizado (C10).....	55
Fig.2. 20 (FVL) Hoja exterior grecada de aluminio (C11).....	55
Fig.2. 21 (FVL) Hoja exterior plana de aluminio (C12).....	55
Fig.2. 22 Tipos de juntas utilizados en la unión de paneles fenólicos y baquelizados (C15).....	57
Fig.2. 23 Detalle de anclajes puntuales en acero inoxidable. (C19 y C20).....	60
Fig.2. 24 Detalles de la subestructura de la (FVL). (C21 y C22).....	61
Fig.2. 25 Configuración general del sistema (ETICS). (B7).....	67
Fig.2. 26 Comportamiento de un muro de fachada al agregar aislamiento por el exterior. (B8).....	68
Fig.2. 27 Resultados obtenidos de ensayos de laboratorio de un muro con capa de aislamiento. (B8).....	68
Fig.2. 28 Valores obtenidos con diferentes tipologías de aislamientos en fachadas. (B9).....	69
Fig.2. 29 Particiones ensayadas. (B10).....	69
Fig.2. 30 Resultados obtenidos en los diferentes ensayos. (B10).....	70

Listado de imágenes capítulo 2

Img.2. 1 Iglesia Barrio Miribilla Bilbao España. (C1).....	46
Img.2. 2 Edificio Fluvial Expo Zaragoza 2008. (C2).....	47
Img.2. 3 Complejo The Nordic Embassies. (C3).....	48
Img.2. 4 Imagen y detalle de fachada ventilada con aplacados pétreos. (C5).....	50
Img.2. 5 Edificio Archivo Castilla de la Mancha. Toledo España. (C6).....	51
Img.2. 6 Renovación del edificio de la Escuela de Educación Media Sidwell friends Washington (USA) (C9).....	54
Img.2. 7 Edificio de oficinas “ETDE” Francia. (C13 y C14).....	56
Img.2.8 (FVL) (CB) y sintéticos (C16, C17, C18 y D).....	58
Img.2. 9 Detalle fijación con grapa vista. (C23).....	62
Img.2. 10 Detalle fijación con grapa oculta. (C23).....	62
Img.2. 11 Sistema de fijación compacto. (C23 y C24).....	63
Img.2. 12 Fijación de paneles para ETICS. (C25).....	66

Listado de tablas capítulo 2

Tabla 2. 1 Características físicas de los materiales pétreos usados en las fachadas ligeras ventiladas. (D').....	49
Tabla 2. 2 Soportes más usuales y su idoneidad con la utilización de aplacados pétreos (C15).....	49
Tabla 2. 3 Tabla de las características de los elementos cerámicos. (A11).....	50
Tabla 2. 4 Comparación de algunas especificaciones de maderas usadas como revestimiento para fachadas ventiladas. (C18).....	52
Tabla 2. 5 Características físico-mecánicas de diversos elaborados utilizados en la (FVL). (D').....	57
Tabla 2. 6 Tabla resumen de anclajes según el tipo de revestimiento utilizado. (D').....	63
Tabla 2.7 Tabla comparativa de algunos valores característicos de los aislamientos utilizados en fachadas y en la (FVL). (D').....	65

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA TESIS

Planteamiento de Fases I y II

3. DESARROLLO DE LA TESIS Fase I

La mejora acústica obtenible con la aplicación de la (FVL) como rehabilitación de un muro simple pesado ha sido poco estudiada por ser una solución de uso reciente pensada más para la mejora térmica y cambio de aspecto del edificio. A nivel técnico, acústicamente hablando, debido a que tiene una cámara de aire intermedia ventilada, la (FVL) no se considera su actuación exactamente como un cerramiento doble (solución muy indicada para la mejora del nivel de atenuación acústica).

En la literatura de consulta sobre este tema hay aún pocos estudios concluyentes realizados sobre ensayos acústicos realizados que muestren la efectividad de la (FVL); en parte esto es así porque uno de los elementos que la componen, el muro base en los casos de rehabilitación se trata de un muro pre-existente del que muchas veces se desconoce su textura y homogeneidad de materiales y realización. Esta tesis se quiere centrar en estimar cual puede ser el rango de esta mejora en el aislamiento acústico y cuan condicionada está por el grado de ventilación de la cámara de aire intermedia.

3.1 Planificación de desarrollo

A partir de la documentación técnica específica encontrada sobre la solución constructiva (FVL), el desarrollo de la tesis se plantea principalmente en dos fases:

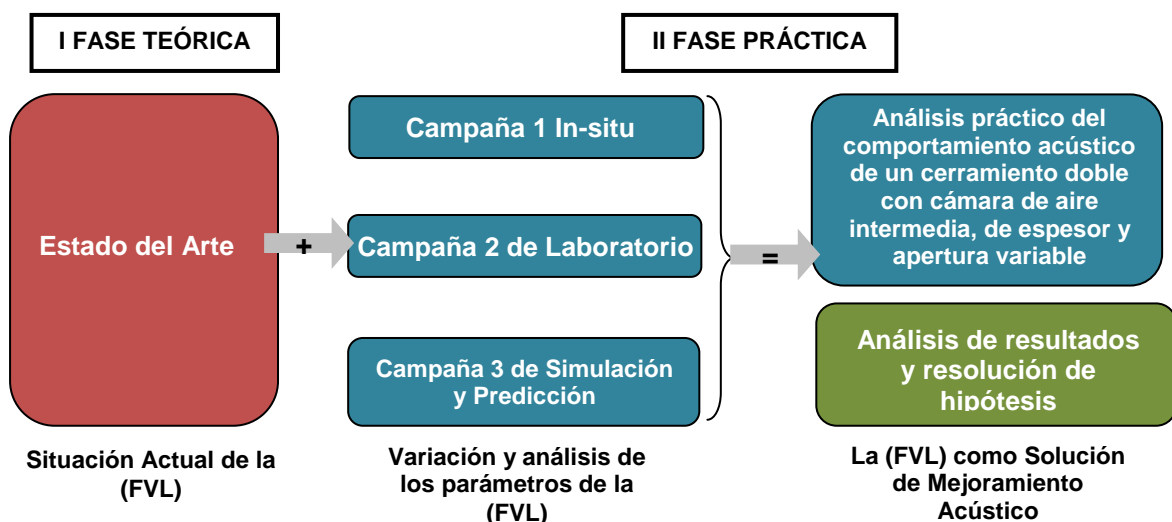


Fig.3. 1 Esquema de desarrollo de las dos fases planteadas en la tesis. (D)

I. Fase teórica: Se indaga en casos y estudios sobre el comportamiento acústico y la posible influencia de la ventilación en el aislamiento de la (FVL). En este punto se toma como mayor referente la fachada de doble hoja, partiendo de casos y ensayos acústicos existentes ya que hasta ahora la información encontrada sobre la (FVL) no es muy amplia.

II. Fase práctica: Análisis de soluciones constructivas de rehabilitación de fachadas pesadas de una sola hoja mediante la disposición de una (FVL). En cada uno de estos casos se modificará el grado de ventilación y la disposición de las aberturas de ventilación para ver cómo afecta al aislamiento acústico mejorado con respecto a la situación sin rehabilitar. En la Fase II, se plantean tres campañas experimentales en una tipología de (FVL) que incluyen mediciones acústicas.

- Una primera campaña in-situ sobre un edificio concreto real
- Una segunda campaña de laboratorio en una instalación homologada al efecto
- Una tercera campaña de simulación y predicción con la ayuda de herramientas informáticas específicas.

El orden de realización de las campañas está relacionado con las expectativas iniciales de la tesis y el modus operandi profesional de los arquitectos. En la arquitectura, la verificación de funcionamiento de una solución constructiva se basa en su diseño dentro del proyecto y posterior aplicación a una obra; por este motivo, el desarrollo de la tesis se inicia con una campaña in-situ en un edificio real, a fin de observar a primer contacto, cómo se comporta acústicamente una (FVL) en la realidad. Una práctica in-situ en una obra real permite descubrir los ajustes y complicaciones prácticos de instalación, del estado de la fachada pre-existente a la que se le añadirá el sistema y a su vez de los componentes de la (FVL): la subestructura y la concepción de la cámara con la adición de la hoja exterior. Las realizaciones in-situ son campañas singulares, por lo que los resultados que se obtienen están sujetos a la particularidad de las condiciones de realización; a fin de obtener resultados que puedan ser más generalizables, se hace necesario realizar una campaña de pruebas en un ambiente más controlado y estándar como el que ofrece una cámara de ensayos homologada.

La tercera campaña, de simulación por cálculo, se plantea aprovechando los recursos que ofrecen algunas herramientas informáticas dedicadas a la investigación en el campo de la acústica, las cuales posibilitan el cambio de variables durante el proceso de desarrollo de la Fase II de la tesis y orientan la práctica a la resolución de posibles hipótesis que surjan de las anteriores campañas. Los parámetros variables de los programas informáticos se pueden ajustar puesto que se dispone de los resultados reales obtenidos en laboratorio.

3.2 Estado del arte Acústica en paredes dobles y la ventilación en la fachada

Este apartado está enfocado directamente al aspecto acústico de la Fachada Doble Ventilada *Double Skin Facade* (DSF) y la fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL)

3.2.1 Aproximación al comportamiento acústico de la doble fachada (DSF)

La protección acústica puede ser una más de las razones de utilización de la doble fachada con cámara de aire intermedia. Al ser un doble cerramiento, en el interior del edificio ya se percibe una reducción considerable de la inmisión de ruido exterior.

“Un edificio de oficinas con una fachada simple, que presenta un 50% de superficie de ventanas, tiene en la parte ciega un índice de reducción sonora $R_w=50\text{dB}$; el valor de este índice en la carpintería, cuando se encuentra cerrada, es de R_w 37dB; cuando las ventanas están abiertas en posición oscilo batiente se mide un índice de reducción sonora $R_w=10\text{dB}$. Estos datos pueden tomarse orientativamente para el cerramiento exterior de la doble fachada cuando el cerramiento interior está totalmente abierto”(20)

El comportamiento acústico concreto de una fachada de doble hoja con cámara de aire intermedia depende pues de entrada de los materiales utilizados en cada una de las hojas y especialmente de las características de cada uno de sus componentes auxiliares:

- Las aberturas para la ventilación de la cámara de aire intermedia: su dimensión y disposición determina en gran medida la actuación del aislamiento sopesando la importancia de la ventilación con respecto al aislamiento acústico.
- Las características de la cámara intermedia: espesor, absorción acústica y grado de compartimentación
- Las posibles transmisiones por flancos: los sonidos emitidos en el interior del edificio pueden transmitirse parcialmente por el interior de la cámara de aire intermedia lo que puede provocar transmisiones indeseables entre espacios (21).

En las figuras Fig.3.2, 3.3 y 3.4 se observan los valores de atenuación acústica obtenidos en la cámara y en el cerramiento interior de los sistemas de doble fachada.

El siguiente cuadro resume algunos valores del comportamiento de la doble fachada:

(20) Oesterle, Lieb, Lutz, Heusler. Texto tomado del capítulo *Sound insulation-Against external noise* libro: *Double skin Facades* (pg. 39)

(21) Husladen Gerhard, de Saldanha Michael, Liedl Petra. Texto interpretativo capítulo *Facade Typology* libro *ClimateSkin*.

Valores comparativos	<i>Box Window / Shaft Window</i>		<i>Corridor Façade</i>		<i>Multistorey Façade Unsegmented</i>	
	Típico	Min-max	Típico	Min-max	Típico	Min-max
Superficie acristalada	50%	30-90%	90%	70-100%	90%	50-100%
Índice global de reducción acústica	R _w 40dB	R _w 32-55 dB	R _w 40dB	R _w 32-55 dB	R _w 45 dB	R _w 35-60 dB

Tabla 3. 1 Valores comparativos del comportamiento de la (DSF). Para los diferentes tipos de la doble fachada citados, información tomada directamente del libro A2 (D’).

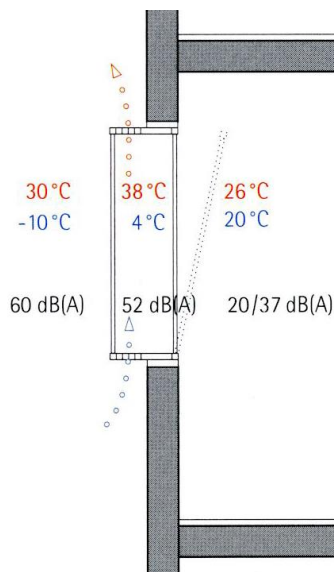


Fig.3. 2 Sistema Box Window. Comportamiento niveles de presión sonora y de temperatura (A2).

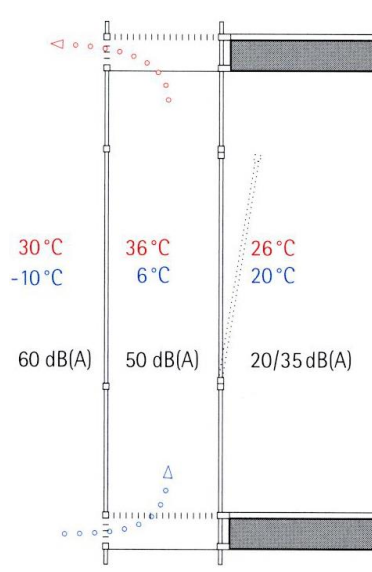


Fig.3. 3 Sistema Corridor Façade. Comportamiento niveles de presión sonora y de temperatura (A2).

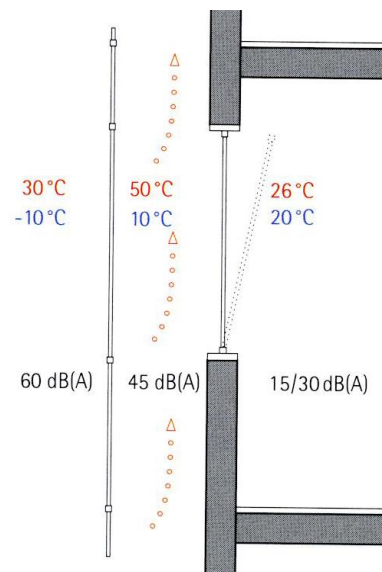


Fig.3. 4 Sistema Multistorey Façade. Comportamiento niveles de presión sonora y de temperatura (A2).

Los valores de la temperatura en colores indican: color rojo para valor de temperatura en verano y color azul para temperatura invierno, en un día soleado. La forma de la cámara así como su espesor profundidad indican una capacidad de atenuación importante, a medida que la cámara es más amplia y con mayor longitud entre hojas se obtiene un mejor comportamiento (Fig.3.2) y (Fig.3.3).

También es notorio un incremento en el comportamiento del aislamiento acústico cuando la hoja exterior tiene menos perforaciones, como es el caso del sistema *Multistorey Façade*; este sistema solo tiene aberturas en la parte inferior y en la parte superior de la fachada. Para el sistema *Multistorey Façade*, la cámara prevista es de 1.50m con una superficie de ventilación en la parte inferior de la fachada de 0.40m.

Los valores de aislamiento acústico entre los diferentes sistemas no varían considerablemente sin embargo se observan mejoras de atenuación sonora en la fachada *Multistorey Facade* frente a las fachadas *Corridor Facade* y *Box Window* como se muestran en las Fig.3.2, Fig.3.3 y Fig.3.4 en los niveles de presión sonora al interior de la fachada.

Entre las investigaciones realizadas sobre el comportamiento acústico en sistemas de fachada de doble hoja (DSF) se encuentran algunas referencias notables que incluyen experimentos y mediciones realizadas. Entre las más relevantes cabe citar:

Los autores (*Wei-Hwa CHIANG, Yi-Nuo CHAO, y Chi-Jeh WU* 2004) en su publicación[3] hacen referencia a estudios de otros autores.

-Según Stein y Reynolds (2000)(22) una ventana doble convencional puede presentar una reducción sonora de 20 a 30dB.; sin embargo frente a los niveles de ruido de tráfico se recomienda tener aislamientos superiores de hasta 35-40dB.

-Según De Salis et al (2002)(23) es importante asegurar la ventilación del aire del interior del edificio, por lo que estas ventanas deben tener un diseño complejo.

Los autores citados a su vez realizaron varios experimentos en laboratorio de modelos a escala de ventanas dobles y también de los sistemas *Multistorey Facade* a escala 1/20 (Fig.3.5) y del modelo *Box Window* a escala 1/6.25 (Fig.3.7) donde se incluyó material absorbente dentro de la cámara de aire intermedia ventilada, probando diferentes ángulos de incidencia del sonido exterior.

Para el caso de la *multistorey facade*, en la siguiente gráfica se indican los valores de atenuación acústica donde:

-Los círculos indican el comportamiento acústico de la fachada con la inclusión de material absorbente en el interior de la cámara (el círculo relleno indica el comportamiento con la ventilación cerrada y el círculo vacío indica el comportamiento con la ventilación abierta). (Fig.3.8)

- Los triángulos indican el comportamiento acústico de la fachada sin la inclusión de material absorbente en el interior de la cámara (el triángulo relleno indica el comportamiento con la ventilación cerrada y el triángulo vacío el comportamiento acústico con la ventilación abierta). (Fig.3.8)

En estos resultados se observa una notoria mejora del comportamiento acústico del sistema tras la inclusión de un material absorbente acústico en el interior de la cámara; también se aprecia una notable diferencia de atenuación con la ventilación abierta y cerrada.

(22) De Salis, M.H.F., Oldham, D.J. and Sharples, S. (2002) "Noise Control Strategies for Naturally Ventilated Buildings," *Building and Environment*. Vol. 37, 471-484.

(23) Stein, B, & Reynolds, J.S. (2000), *Mechanical and Electrical Equipment for Buildings (9th edition)*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

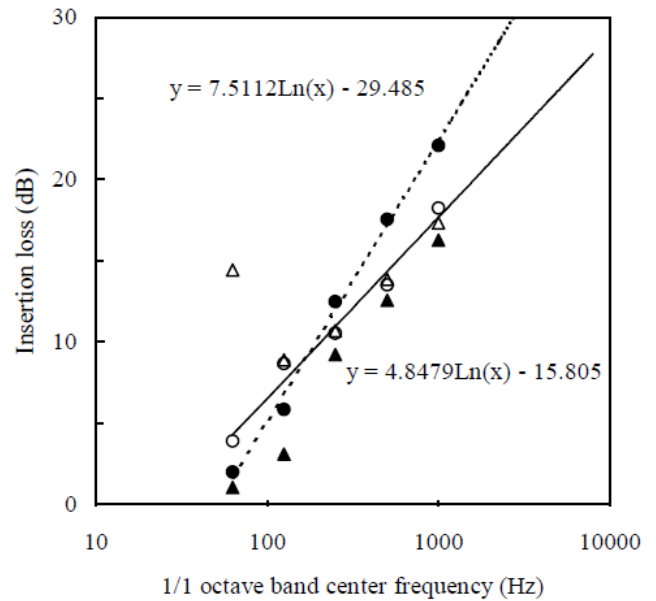
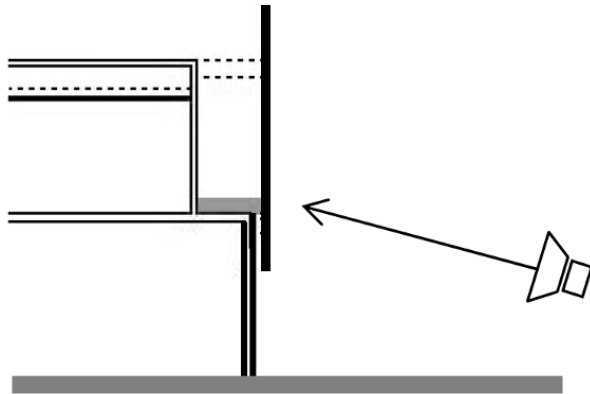


Fig.3. 5 Sistema propuesto de Multistorey. Sección a escala 1/20, cámara de 1.50m a escala (B11)

Fig.3. 6 Gráfica de resultados del sistema Multistorey. (B11)

Para el caso de éste sistema, se realizaron mediciones de prototipos variando los espesores de la cámara de 100mm a 300mm en las posiciones de ventilación abierta y ventilación cerrada incluyendo material absorbente en el interior de la cámara de aire intermedia ventilada. Las aberturas de ventilación están ubicadas solamente en la superficie inferior de las ventanas.

La gráfica siguiente (Fig.3.8), muestra los resultados del índice de reducción acústica obtenidos para el sistema de cerramiento exterior con diferentes espesores de cámara de aire intermedia ventilada y diversa orientaciones de incidencia del sonido, tanto para el sistema “cerrado o sin ventilar” (figuras rellenas) como para el sistema “abierto o ventilado” (figuras vacías). Las diferencias del índice de reducción acústica entre los diferentes espesores de cámara se notan mucho más cuando el sistema está abierto o ventilado.

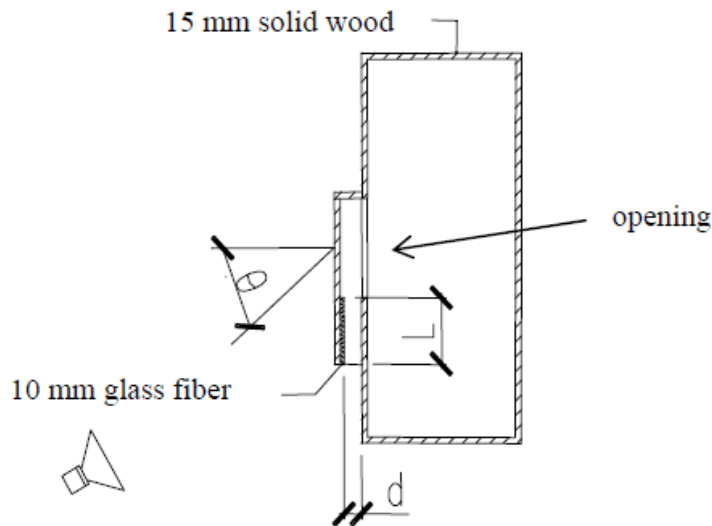


Fig.3.7 Sección a escala del sistema desarrollado. La cámara varía de espesor. Se incluyó un material absorbente en la entrada de ventilación de la ventana exterior (B11).

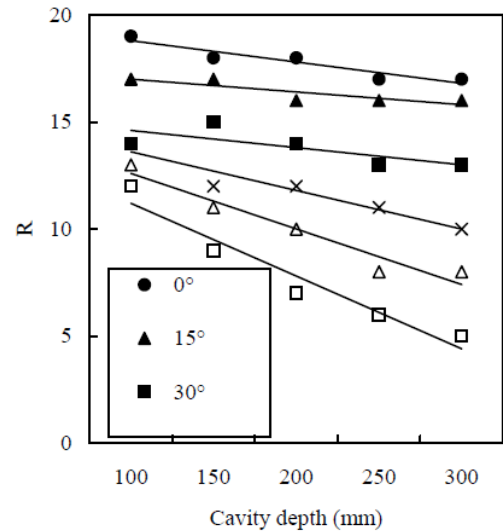


Fig.3.8 Gráfico de resultados del sistema Box Window. Índice de reducción acústica con diferentes grados de incidencia del sonido de los prototipos de sistema con diferentes espesores de cámara y la ventilación abierta (figuras vacías) y cerrada (figuras rellenas) (B11).

Los diversos sistemas de fachada de doble hoja evaluados en esta investigación comprueban que se puede incrementar el nivel de aislamiento acústico un promedio de R en 20dB en la banda de las frecuencias medias-altas; este valor estimado puede no ser superior al requerido en entornos de alto nivel de ruido exterior, sin embargo se está contando con la ventilación natural característica principal en estos sistemas.

Los autores (*M.Blasco, C. Crispin, B. Ingelaere* 2004) [4] en su publicación hacen referencia a investigaciones realizadas sobre el comportamiento acústico de la fachada de doble hoja de vidrio con cámara de aire intermedia ventilada denominada “fachada activa”, según la clasificación realizada por el BBRI(24).

Se realizaron diversas mediciones teniendo en cuenta la estanqueidad al aire del conjunto de la fachada, la absorción acústica en la cámara, la interacción con el uso en el interior del edificio. Se comprobó el aislamiento acústico interior-externo y también entre locales ubicados en los laterales de la fachada para así observar también la influencia de la transmisión por flancos y a través de la cámara.

Según los autores una fachada tradicional de un edificio de oficinas presenta un aislamiento acústico de 6dB menos en comparación con el peor caso de una fachada de de doble hoja de vidrio con cámara de aire intermedia ventilada.

(24) <http://www.bbri.be/activefacades/> Página web *Belgian Building Research Institute* dedicada a la investigación de la doble fachada acristalada ventilada.

Las condiciones del comportamiento acústico de una fachada de doble hoja de vidrio con cámara de aire intermedia ventilada (DVF) depende de múltiples factores como el tipo de acristalamiento, el tamaño de la superficie acristalada, las propiedades del espacio interior, las aberturas, el espesor de la cámara, la frecuencia de resonancia de cada una de las hojas, etc. En el estudio se resume el comportamiento estableciendo una gráfica (Fig. 3.9) promedio y una banda a su alrededor de valores máximos y mínimos probables.

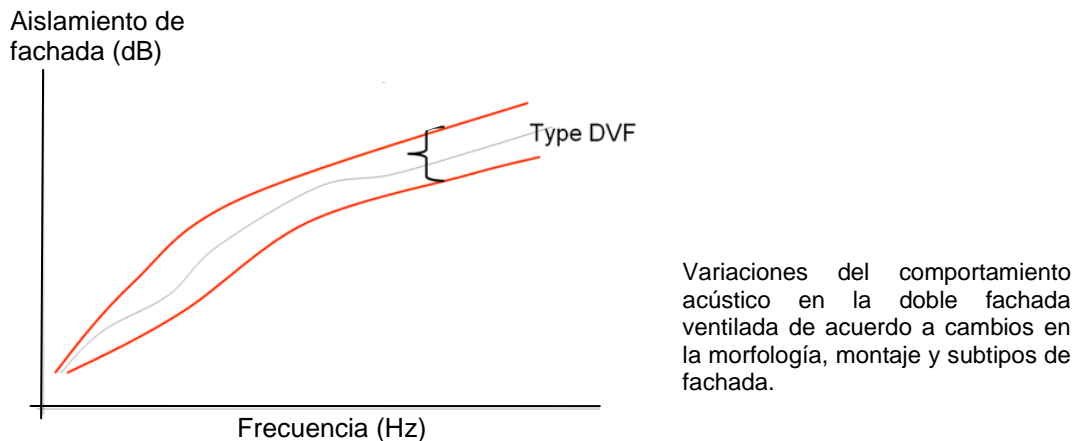


Fig.3.9 Variaciones del aislamiento acústico entre diferentes fachadas Double Ventilated Facades (DVF) (B12)

El sistema *Climate Facade* o Fachada Activa, presenta en la parte inferior de la hoja interior unas aberturas de ventilación de 1.5cm de altura en toda la hoja; la extracción del aire de la ventilación se produce por el falso techo y la cámara de aire intermedia tiene un espesor de 12.5cm. Los valores obtenidos fueron:

$$D_{ls,2m,n,w} (C:Ctr) = 38 (-2;-5)dB \text{ para hoja interior abierta.}$$
$$D_{ls,2m,n,w} (C:Ctr) = 43 (-2;-5)dB \text{ para hoja interior cerrada.}$$

En la siguiente gráfica se observa el resultado espectral en diferencia de niveles (Fig.3.11).



Fig.3.10 Sección Climate Façade. Compuesta por: hoja interior de cristal sencillo de 6mm, hoja exterior de un doble cristal 6-12-8mm y una cámara de 12.5cm (B12)

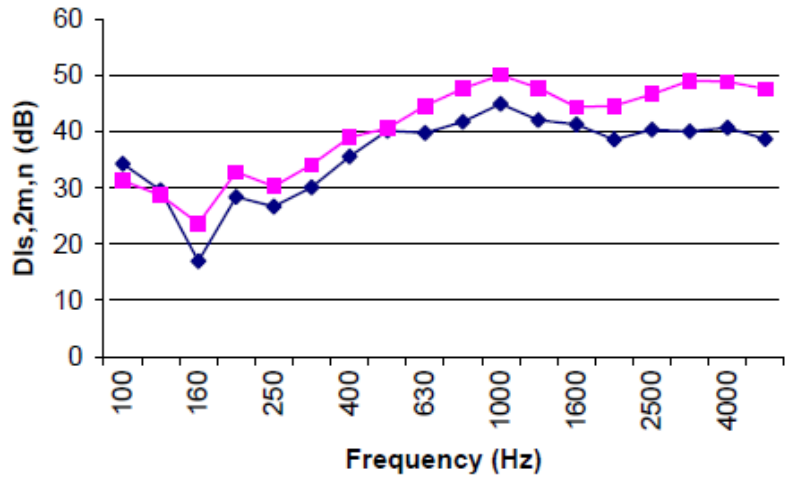


Fig.3.11 Diferencia de niveles Climate Façade. El color magenta representa los paneles de la hoja interior cerrados y el color azul representa los paneles de la hoja interior abiertos (B12)

El sistema *Double Window* consiste en una ventana doble, donde las dos ventanas son practicables; la ventana interior tiene en la parte inferior unas entradas de ventilación de 1.5cm de altura en toda el ancho de la ventana, la extracción se produce a través de la cámara en la parte superior. Los valores obtenidos fueron:

$$Dls,2m,n,w (C:Ctr) = 41 (-3;-5)dB \text{ con la ventana interior abierta.}$$

$$Dls,2m,n,w (C:Ctr) = 47 (-2;-5)dB \text{ con las dos ventanas cerradas.}$$

En la gráfica siguiente (Fig. 3.13) se observa el comportamiento en la curva espectral de la diferencia de niveles en ambos casos.

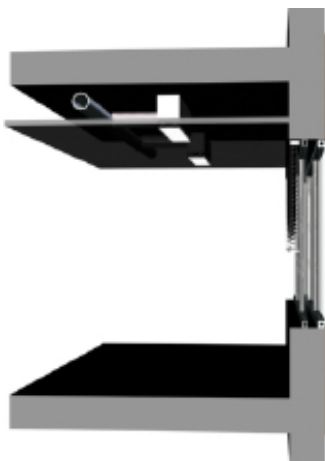


Fig.3.12 Sección Double Window. Compuesta por: ventana interior de cristal sencillo de 10mm, ventana exterior de un doble cristal 6-12-8mm y una cámara de 7cm (B12)

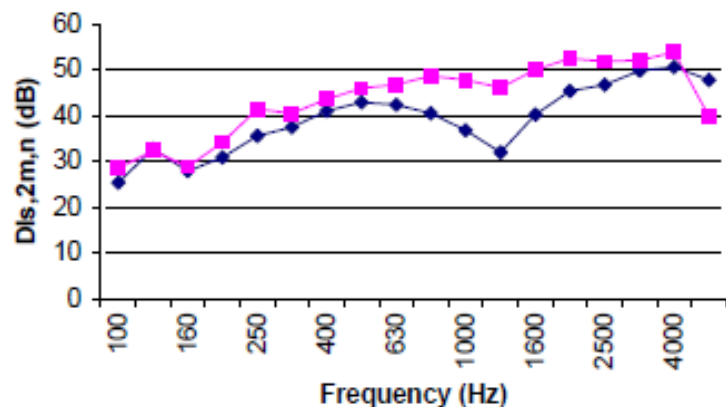


Fig.3.13 Diferencia de niveles Double window. El color magenta representa la ventana interior cerrada y el color azul representa la ventana interior abierta (B12)

El sistema *Double facade*, consiste en una fachada de doble hoja de vidrio, en la que la hoja exterior está compuesta por ventanas practicables y la hoja interior está provista de aberturas de ventilación. Los valores obtenidos son:

$$D_{ls,2m,nT,w} (C:Ctr) = 50(-1;-5)dB$$

Valor expresado en diferencia de niveles normalizada con las ventanas de la hoja exterior cerradas.

En la gráfica siguiente se observa el comportamiento espectral (Fig. 3.15).

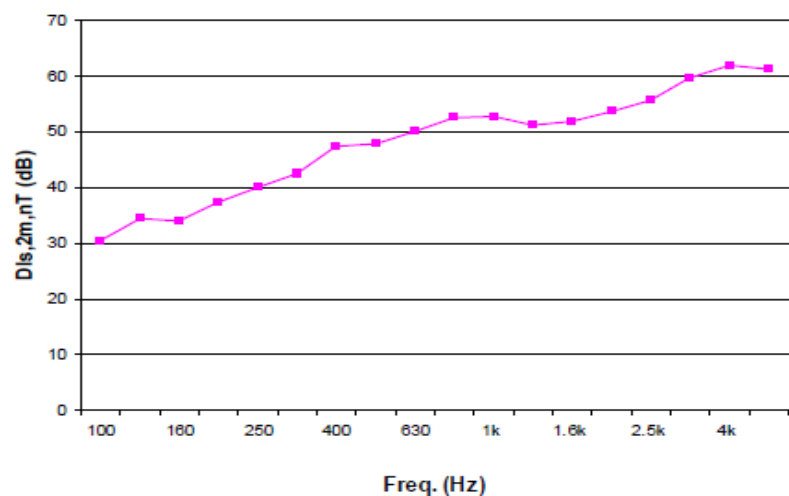


Fig.3.14 Esquema sección de la doble fachada de cristal. Compuesta por: hoja interior de doble cristal 8-12-6mm, hoja exterior de cristal sencillo 6mm y una cámara de 130cm (B11)

Fig.3.15 Gráfica de diferencia de niveles de la doble fachada. Expresado en diferencia de niveles normalizada. 50 (-1;-5) dB (B11)

De acuerdo a estos resultados presentados, es apreciable una mejora importante del aislamiento acústico con el uso de la fachada de doble hoja de vidrio con cámara de aire intermedia ventilada, incluso sobrepasando los niveles mínimos exigidos por la normativa en Bélgica (país de realización de las mediciones).

En cuanto a la transmisión lateral, parece ser que influye en el aislamiento acústico de los locales ubicados en la parte lateral del edificio. Por ello se recomienda tener en cuenta los recorridos del sonido a través de la cámara de aire intermedia ventilada, especialmente cuando la hoja interior está abierta ya que pueden presentarse transmisiones entre locales debido a que en los edificios (principalmente de oficinas), las particiones se fabrican con materiales ligeros que aportan un débil aislamiento acústico. Esta problemática de la transmisión entre locales es menor entre plantas ya que los forjados son más gruesos y se utilizan para ello materiales más pesados (normalmente hormigón) lo que hace que la transferencia de sonido a través de la cámara sea menor.

Los autores realizaron también mediciones del aislamiento lateral buscando evaluar la influencia de la cámara de aire intermedia en el comportamiento de la fachada de doble hoja. Las mediciones se realizaron con las ventanas cerradas en las dos hojas, excepto en la medida 3 cuando se consideró el impacto de la ventana abierta. La transmisión por flancos se producía entre las dos plantas a través de la cámara de aire intermedia ventilada.

“El cálculo de aislamiento lateral se puede obtener siguiendo la fórmula establecida en la normativa Europea EN 12354-1:2000 apéndice F.

$$D_{n,s} = D_{n,h} = R_{hs} + R_{hr} + 10 \log \frac{A_h A_0}{S_{hs} S_{hr}} + C \quad (\text{eq. 1})$$

Dónde:

$A_0 = 10\text{m}^3$ (referencia)

C: “posición de las aberturas, depende de la posición de las aberturas entre estas, si las aberturas están en un ángulo de 90° a menos de 1m de distancia el valor es -2dB. Si las aberturas están en ángulo 0° ó a más de 1m de distancia entre estas, el valor es 0dB. Los valores R_{hs} y R_{hr} de laboratorio es el aislamiento compuesto si hay varias aberturas o diferentes materiales”(25).

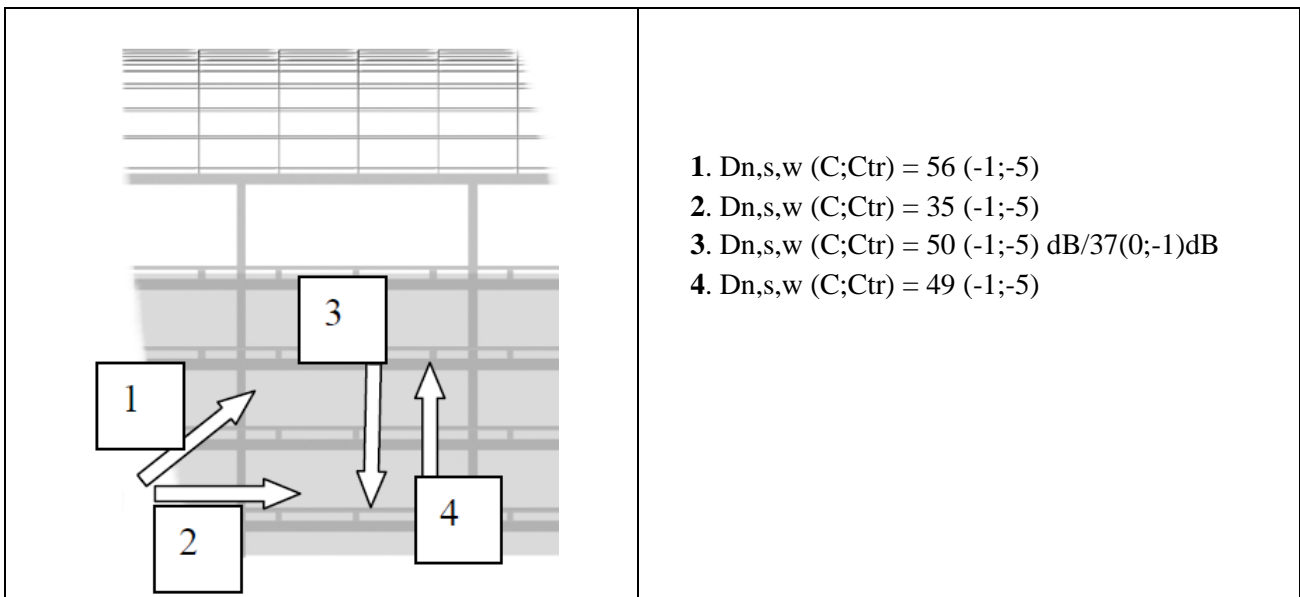


Fig.3.16 Sección longitudinal de diferentes transmisiones de una doble fachada ventilada. Fachada doble, de un edificio, mediciones de aislamiento lateral en, los valores de diferencia de niveles corresponden a los obtenidos en cada punto (B11).

(25) M.Blasco, C. Crispin, B. Ingelaere. Texto tomado de la publicación *Acoustical performances of Double Ventilated Glass facades* (Construction Physics and Indoor Climate Department, Belgian Building Research Institute). *Inter.noise 2004 The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering.*

La publicación citada concluye:

- en la medición **1** (el mejor caso) la transmisión por muros verticales es limitada ya que no hay continuidad vertical solo a través de la cámara.
- en la medición **2** la influencia de la cámara no es significativa ya que las particiones verticales son ligeras que al mismo tiempo tiene un bajo aislamiento acústico entre locales.
- en las mediciones 3 y 4 los resultados son simétricos de arriba abajo y viceversa, el segundo valor obtenido de la medida número 3 es una reducción de 13dB en una ventana sencilla de una oficina.

3.2.1.1 Comentarios

En cuanto al comportamiento del aislamiento acústico, las investigaciones consultadas muestran que el sistema de fachada de doble hoja de vidrio con cámara de aire intermedia ventilada (DSF) proporciona un alto rendimiento. La inclusión de la cámara de aire intermedia contribuye apreciablemente en la reducción acústica de la inmisión del sonido exterior, alcanzando en algunos casos hasta 15dB.

Por ejemplo, en el sistema *Corridor façade*, alcanza una atenuación sonora de conjunto de entre 20 y 30dB respecto al nivel de presión sonora exterior de 60dB, aun funcionando con la apertura de las dos hojas de vidrio para ventilar.

Por otro lado, en mediciones realizadas por M. Blasco en fachadas activas, se encuentra que los valores globales pueden estar $R_w = 45-50$ dB y en fachadas pasivas tipo *Multistorey* y *Corridor Façade* cerradas $R_w = 55-65$ dB y en *Box Window* $R_w = 55-65$ dB cerradas.

En ensayos realizados por los autores de la referencia [3] se demuestra la capacidad de aislamiento del tipo de ventana doble al efectuar las aperturas para la ventilación, indicando que la diferencia de aislamiento es más observable a medida que se va abriendo la doble ventana.

En la referencia [4] los autores aportan diferentes casos ensayos realizados in-situ de la fachada de doble hoja de vidrio y la doble ventana, evaluando su comportamiento acústico al efectuar la apertura de ventilación y también las diferentes transmisiones por flancos que pueden producirse a través de la cámara de aire intermedia continua.

En las dos referencias citadas, todos los autores coinciden sobre la influencia de la localización de las aberturas con respecto a la fuente sonora (ángulo de incidencia).

Según estos resultados aportados por diversos investigadores se puede concluir que la ventilación de la cámara de aire intermedia, tanto hacia el exterior como hacia el interior, en una fachada de doble hoja no afecta mayormente su capacidad de atenuación sonora con respecto al ruido exterior. Ello hace

pensar que en el caso de una (FVL) donde la cámara de aire intermedia no tiene relación alguna de ventilación con el interior del edificio, el comportamiento debiera ser similar o superior.

3.2.2 Aspecto acústico de La Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL)

Como se menciona anteriormente, un doble cerramiento en fachada proporciona mejora en la reducción sonora de transmisión de ruido exterior al interior de un edificio.

Como principio, en el aislamiento acústico de un cerramiento influye principalmente “la ley de masas” que indica que a mayor masa de un elemento separador, mayor será su aislamiento acústico entre los dos locales, condicionando su valor por frecuencias, teniendo en cuenta las características de la onda que lo atraviesa. En decibelios, el valor de dicho aislamiento es proporcional al cuadrado de la frecuencia (f), es decir, el nivel de aislamiento aumenta en relación con el aumento de la densidad superficial de un elemento y aumenta en relación con el aumento de la frecuencia. Para una frecuencia determinada, cuando se duplica la densidad superficial del elemento, el aislamiento aumentará en 6dB (M. Harris 1995)

Aumentar la densidad superficial para obtener un mayor aislamiento acústico no es muy funcional desde el punto de vista práctico porque no resulta económico: la evolución en los sistemas constructivos plantea cerramientos cada vez más ligeros y especializados. Una solución técnica más viable es pues el uso de cerramientos formados por dos o más capas de diferente material y espesor que vayan obstaculizando el avance de las ondas sonoras por etapas, basándose en “la ley masa-muelle-masa” éste principio físico consiste en disponer de una primera capa de cerramiento con una densidad superficial determinada que, al adosar otra capa de cerramiento con otra densidad superficial aporta una mejora respecto a un cerramiento simple. Asimismo, si se aplica una distancia separadora entre estas dos capas (una cámara de aire intermedia) se produce un cambio de impedancia en el conjunto del sistema elástico (el aire contenido en una cámara se comporta como un material elástico), sin por ello aumentar la densidad superficial.

Ejemplo: un cerramiento que tiene un aislamiento de 40dB y se le adosa otra capa de cerramiento hasta duplicar su densidad superficial, aumenta su valor de aislamiento hasta 46dB; pero si se interpone cierta distancia entre ambos (una cámara de aire intermedia), el nivel de aislamiento se incrementa. Se ha evaluado que la disposición de dicha cámara contribuye al incremento del nivel de aislamiento si su espesor se encuentra entre 8 y 12cm⁽²⁶⁾ y si se adiciona en el interior de dicha cámara

26) Aislamiento de paredes dobles. “Aplicación informática orientada a la formación y evaluación de riesgos derivados de la exposición a ruido en ambientes industriales” Escuela Politécnica Superior Universidad de Córdoba.
http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/ruido_index.htm

una capa de material con propiedades acústicas absorbentes. Dicho material absorbente mejora el comportamiento acústico de la cámara al reducir la influencia de los fenómenos de las frecuencias de resonancia, los puentes acústicos y las ondas estacionarias.

El documento *Façade Le bonne enveloppe*(27) se aportan como referencia distintos valores de aislamiento acústico obtenidos, tanto con los sistemas ETICS como los sistemas de fachada ventilada en diferentes casos. En los casos presentados es notable la influencia que representa en el valor de aislamiento acústico del conjunto.

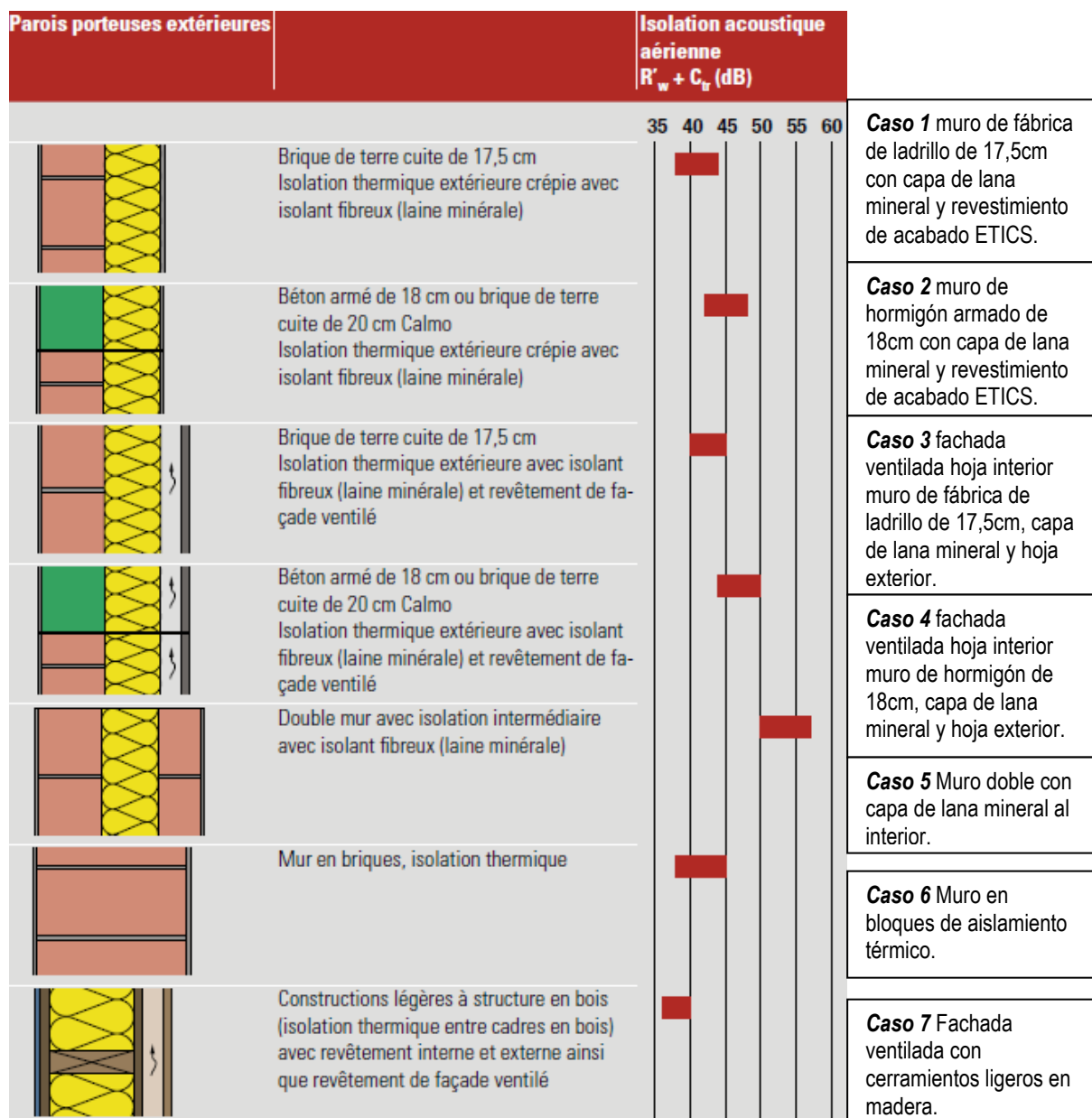


Fig.3.17 Aislamiento acústico aparente de diferentes soluciones de fachada con revestimiento. Valor global $R'_w + C_{tr}$ de diferentes sistemas con la utilización de lana mineral como capa de aislamiento (C26)

27) “*Façade Le bonne enveloppe*” publicación de la empresa “*Flum Roc*” fabricante de aislamientos minerales <http://www.flumroc.ch/documents/files/2905.pdf>

Sin embargo, en el caso de la solución de fachada ventilada con revestimiento ligero se alcanzan valores de aislamiento acústico de 40 a 45dB y 45 a 50dB en los casos 3 y 4 respectivamente; estos valores son superiores a los casos 1 y 2 donde se plantea una solución sin cámara de aire, adosando una capa de aislamiento térmico con lana mineral simplemente adosado por el exterior (Fig.3.17) por otro lado son valores orientables puesto que son índices de reducción acústica aparente (R'_w) y no datos de aislamiento R_w . En otro documento técnico de ensayos editado por fabricantes e instaladores de fachadas ligeras ventiladas se indica que la mejora del nivel de aislamiento acústico (R_w) que se obtiene interponiendo una cámara de aire intermedia en un cerramiento simple tradicional puede ser de 8 a 14dB.(Fig.3.18)

En la gráfica, se observa una amplia mejora del nivel de aislamiento acústico al crear un sistema doble (cámara de aire intermedia) con respecto al sistema simple (cerramiento de una sola hoja) en todas las frecuencias.

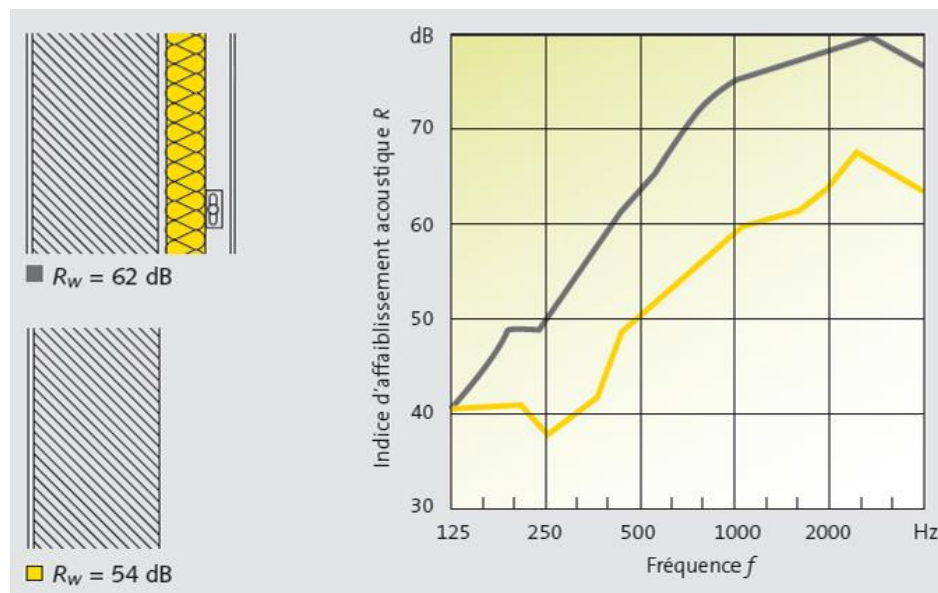


Fig.3.18 Valores comparativos de aislamiento de (FVL) Índice global de reducción acústica R_w entre un muro pesado simple y la adición del sistema suspendido de fachada ligera ventilada. (C27)

En el estudio de las consecuencias acústicas de la utilización de la hoja exterior del cerramiento ligero fijada a una hoja interior de cerramiento pesado (muro base) surgen varias preguntas acerca de la naturaleza del comportamiento acústico de dicha solución. En la publicación “*Acoustic behaviour of dry wall linings*” (J. Royar, W.Scholl 2005)[5] se plantean cuestiones como:

- El comportamiento acústico favorable de la disposición adicional de una hoja exterior ligera es independiente del comportamiento acústico previo de la hoja interior pesada (muro base)? Tiene el mismo comportamiento incremental una hoja exterior ligera aplicada sobre un muro base pesado que sobre un muro base ligero?

- Existen muchas diferencias en el nivel de aislamiento acústico resultante de aplicar un mismo tipo de hoja exterior ligera aplicado sobre diferentes muros base?

A partir de estas preguntas, diversos investigadores llevaron a cabo ensayos de contraste en dos laboratorios distintos. Se establecieron tres muros base distintos:

1. Muro base B1	2. Muro base B2	3. Muro base B3
-Muro de albañilería de 175mm de espesor de bloques de silicato de calcio. - Acabado enlucido de 10mm -Densidad superficial de 350 kg/m ²	- Muro de bloques de yeso de 60mm de espesor. - Acabado enlucido fino en los dos lados. - Densidad superficial de 60 kg/m ²	- Muro de bloques perforado de yeso de 70mm de espesor. - Acabado enlucido de 10mm - Densidad superficial de 63 kg/m ²

El muro B1 tiene una frecuencia crítica (frecuencia de coincidencia) situada en el rango de las bajas frecuencias y el muro B2 tiene una frecuencia crítica situada en el rango de las medias frecuencias; el muro B3 se ensayó para tener en cuenta la influencia de la presencia de aire dentro del muro base (bloques perforados). Las hojas ligeras de revestimiento (lining) aplicadas fueron:

1. Lining L1	2. Lining L2	3. Lining L3
Sistema de aislamiento térmico trasdosado directamente al muro base: - 12,5 mm de yeso laminado - 50 mm fibra mineral con una rigidez dinámica aproximada de 9 MN/m ³	Sistema de aislamiento térmico trasdosado directamente al muro base: - 12,5 mm placa de yeso laminado - 50 mm poliestireno expandido con una rigidez dinámica aproximada de 70 MN/m ³	Sistema de aislamiento térmico independiente soportado con perfiles metálicos: - 2 x 12,5 mm placa de yeso laminado (densidad superficial de 8,5 kg/m ²) - 100 mm de espesor de perfiles metálicos - 100 mm de espesor de lana mineral situada entre la perfilera.

Cada sistema de hoja ligera de revestimiento (L1, L2, L3) fue combinada con cada muro base (B1, B2, B3). Se realizaron en cada caso mediciones del índice de reducción acústica, del factor de pérdidas (*loss factor*) del muro base, de la rigidez dinámica y de la resistencia del flujo de aire.

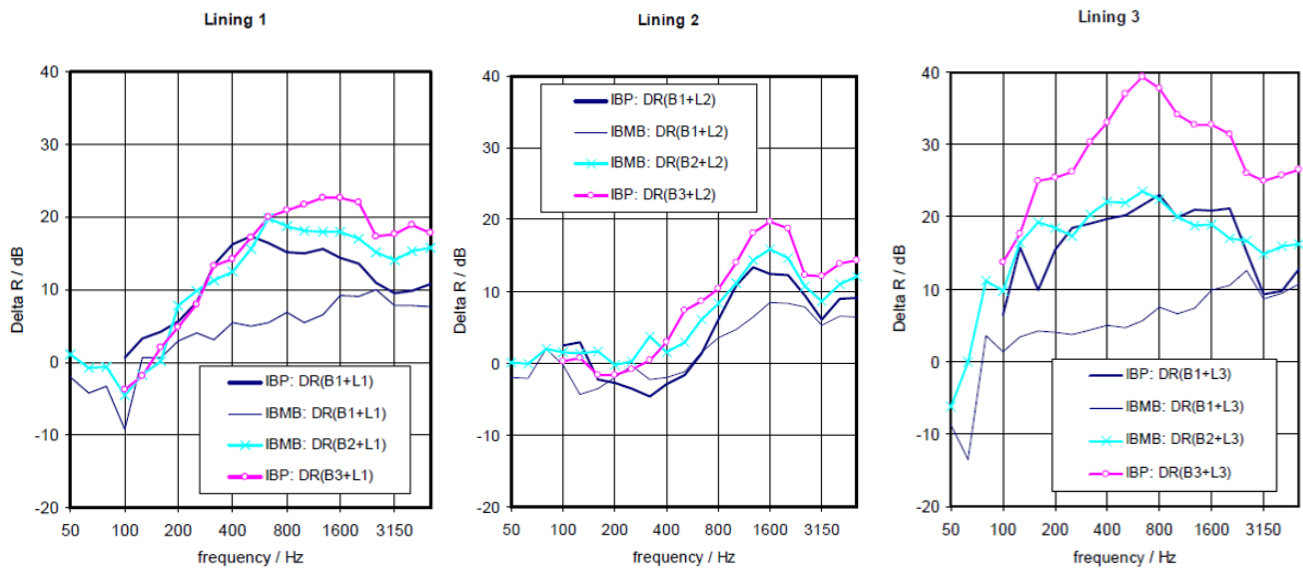


Fig.3.19 Rendimiento acústico de diferentes sistemas ligeros sobre tres tipos de muro base. Índice de reducción acústica de los diferentes casos de revestimientos. La sigla (IBP) corresponde al laboratorio *Fraunhofer-Institute für Bauphysik in Stuttgart* y (IBMB) *Materialprüfanstalt für das Bauwesen an der TU Braunschweig*. (B13)

En las gráficas (Fig.3.19) es notorio un mejor rendimiento acústico del sistema de hoja ligera de revestimiento con cámara de aire intermedia (L3) aplicado en todos los muros base; incluso a bajas frecuencias presenta un valor de mejora del índice de reducción acústica (ΔR) de más de 10dB a una frecuencia de 100Hz con el muro base de ladrillo perforado (B3).

Tras estos resultados, los investigadores autores de estos ensayos resuelven las cuestiones planteadas:

-El comportamiento acústico favorable de la aplicación de una hoja ligera de revestimiento es independiente del comportamiento acústico previo del muro base sobre el que se aplica? Existen muchas diferencias por lo que se refiere al nivel de aislamiento acústico resultante de aplicar un mismo tipo de hoja ligera de revestimiento sobre diferentes muros base?

De acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio, se puede afirmar que acústicamente hablando, el comportamiento favorable de la ubicación de una hoja ligera de revestimiento no es independiente del tipo de muro base. Una de las razones de ello es el procedimiento de instalación (adosada directamente o mediante perfilería interpuesta); en los diversos experimentos se apreció un incremento de la transmisión por flancos (indirectas).

Así mismo se notó en los resultados de los ensayos realizados en cada laboratorio que cuando un muro base ya tiene un alto índice de reducción acústica resulta complicado mejorar estos valores con la adición de una hoja ligera de revestimiento.

En el artículo *Comparativa del comportamiento Acústico entre Fachadas Multicapas Ligeras y Fachadas Tradicionales* (L. Ruiz, E. Delgado, F.J. Neila, S. Vega, 2012)[6] se exponen resultados

obtenidos en ensayos de laboratorio comparativos para fachadas con cámara de aire intermedia donde se evaluaron 3 diferentes tipos de cerramientos de fachada pesada multicapa (tradicionales) para luego comparar su desempeño con respecto al nivel de aislamiento acústico con sistemas ligeros multicapa.

Los cerramientos ligeros de las muestras ensayadas 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).

Muestra A	Muestra B	Muestra C
1. Placa yeso laminado 13mm	1. Placa yeso laminado 13mm	1. Placa yeso laminado 13mm
2. Placa yeso laminado 15mm	2. Placa yeso laminado 15mm	2. Placa yeso laminado 15mm
3. Barrera de vapor	3. Barrera de vapor	3. Barrera de vapor
4. Marco acero conformado en frío 90mm	4. Marco acero conformado en frío 90mm	4. Marco acero conformado en frío 90mm
5. Lana de vidrio ECO90 ubicada dentro 90mm	5. Lana de vidrio ECO90 ubicada dentro 90mm	5. Lana de vidrio ECO90 ubicada dentro 90mm
6. Panel OSB 12mm	6. Panel OSB 12mm	6. Panel OSB 12mm
7. Lana de vidrio ECO40D 40mm	7. Lámina Tyvek	7. Mortero base 2-3mm
8. Panel OSB 12mm	8. Lana de vidrio ECO 40D 40mm	8. Lana de roca 60mm
9. Lámina impermeabilizante y reflectiva	9. Polynum ONE 4mm	9. Mortero base + malla fibra de vidrio 3-4mm
10. Cámara de aire + montantes 50mm	10. Cámara de aire + montantes 50mm	10. Regulador de fondo CS
11. Acabado exterior: en la prueba de laboratorio no se ha implementado	11. Acabado exterior: en la prueba de laboratorio no se ha implementado	11. Revestimiento continuo acrílico 2-3

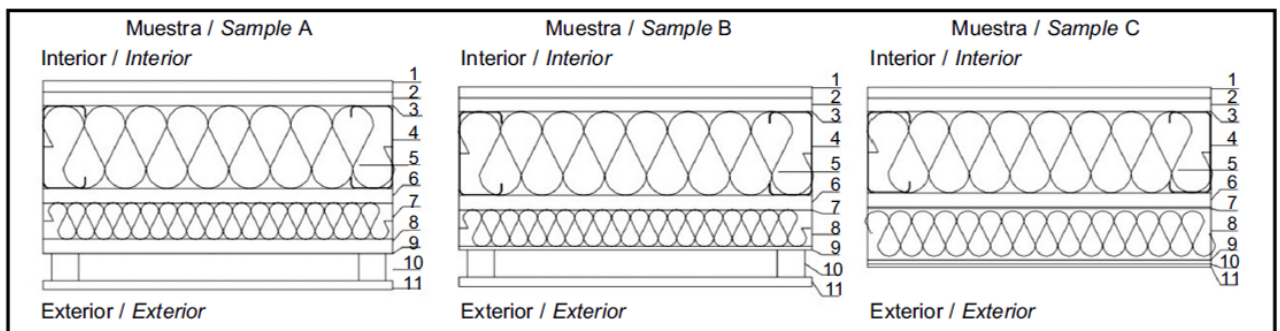


Figura 1. Detalles de la composición de las fachadas multicapas ligeras.

Fig.3.20 Características de los cerramientos multicapa. Ensayados en laboratorio. (B14)

Y los cerramientos tradicionales, las muestras:

- Muestra 1: fachada pesada de obra de fábrica de ladrillo con capa de revestimiento discontinuo y con cámara de aire ventilada.
- Muestra 2: fachada pesada de obra de fábrica de ladrillo cara vista, sin capa de revestimiento ni cámara de aire no ventilada.
- Muestra 3: fachada pesada de obra de fábrica de ladrillo con aislamiento térmico por el exterior (sistema ETICS) y revestimiento continuo, sin cámara de aire ventilada.

Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
1. Enlucido de yeso 15mm	1. Enlucido de yeso 15mm	1. Enlucido de yeso 10mm
2. Tabique hueco sencillo 40mm	2. Tabique hueco sencillo 40mm	2. Ladrillo cara vista 115mm
3. Lana de vidrio 40mm	3. Lana de vidrio 40mm	3. Mortero base 2-3mm
4. Enfoscado 15mm	4. Enfoscado 15mm	4. Lana de roca 60mm
5. Ladrillo cara vista 115mm	5. Ladrillo cara vista 115mm	5. Mortero base + malla fibra de vidrio 3-4mm
6. Cámara de aire ventilada 50mm	-	6. Regulador de fondo
7. Acabado exterior	-	7. Revestimiento continuo acrílico

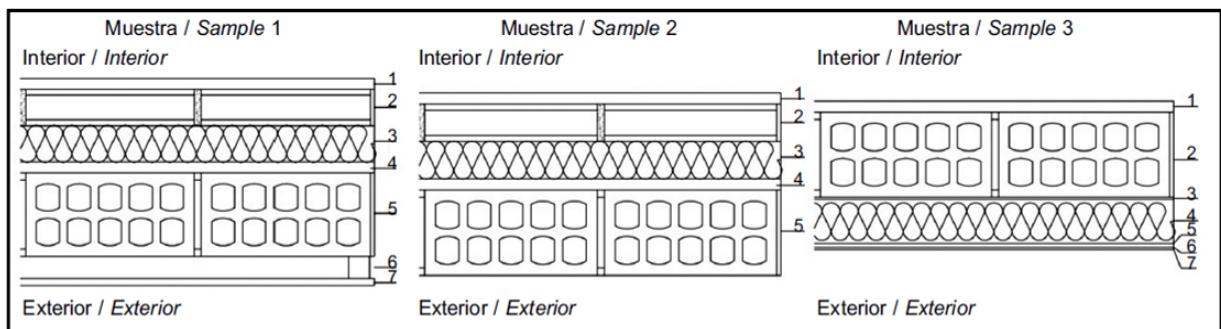


Figura 2. Detalles de la composición de las fachadas tradicionales.

Fig.3.21 Características de los cerramientos tradicionales ensayados en laboratorio. (B14)

Las diferentes muestras se ensayaron tomando como referencia las exigencias actuales del documento básico DB-HR del CTE y teniendo en cuenta los parámetros requeridos por lo que respecta al porcentaje de huecos y parte ciega de la fachada.

A continuación los resultados obtenidos para cada una de las muestras (Fig. 3.22 y Fig. 3.23):

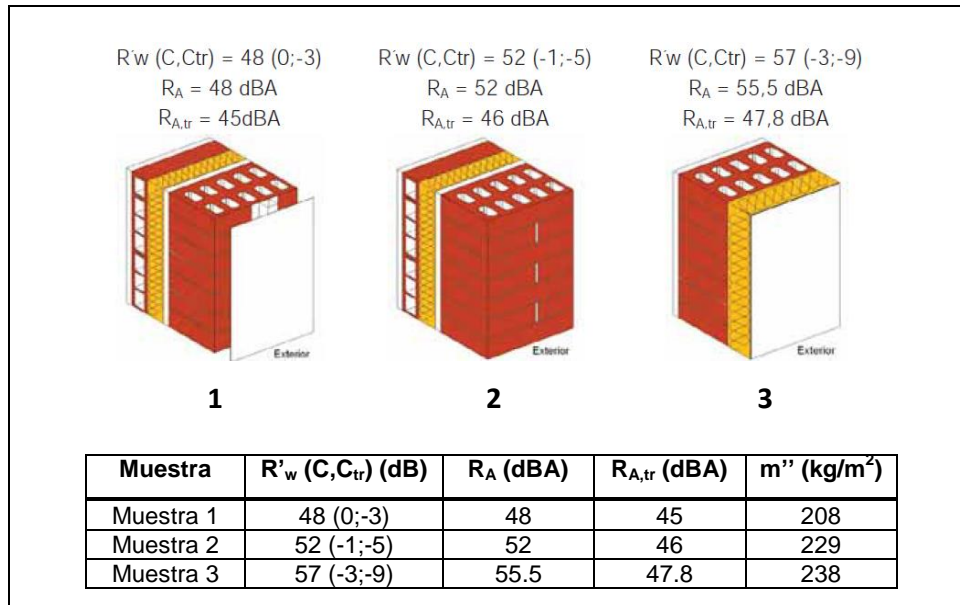


Fig.3.22 Valores de aislamiento acústico de los sistemas pesados tradicionales. Resultados de ensayos en laboratorio. (B14)

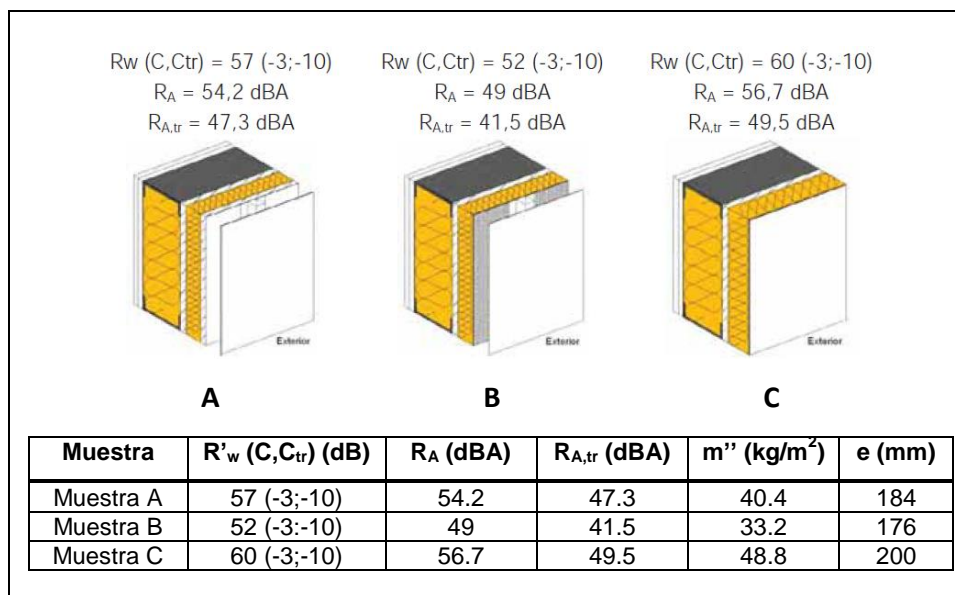


Fig.3.23 Valores de aislamiento acústico de los sistemas ligeros. Resultados de ensayos en laboratorio. (B14)

El artículo se presenta como ejemplo los resultados para el caso de fachadas con un porcentaje del 30% de superficie de ventanas y edificios ubicados en zonas tranquilas (índice $R_{Atr}=40dB$). En la gráfica (Fig.3.24) se muestra el comportamiento en el ensayo realizado para el espectro frecuencial en tercios de octava de las diferentes configuraciones ensayadas; se observa un aumento en el índice de reducción acústica para todas las muestras en el rango de las frecuencias altas, especialmente de las muestras 2 y 3, sistema con aislamiento interior y ETICS respectivamente.

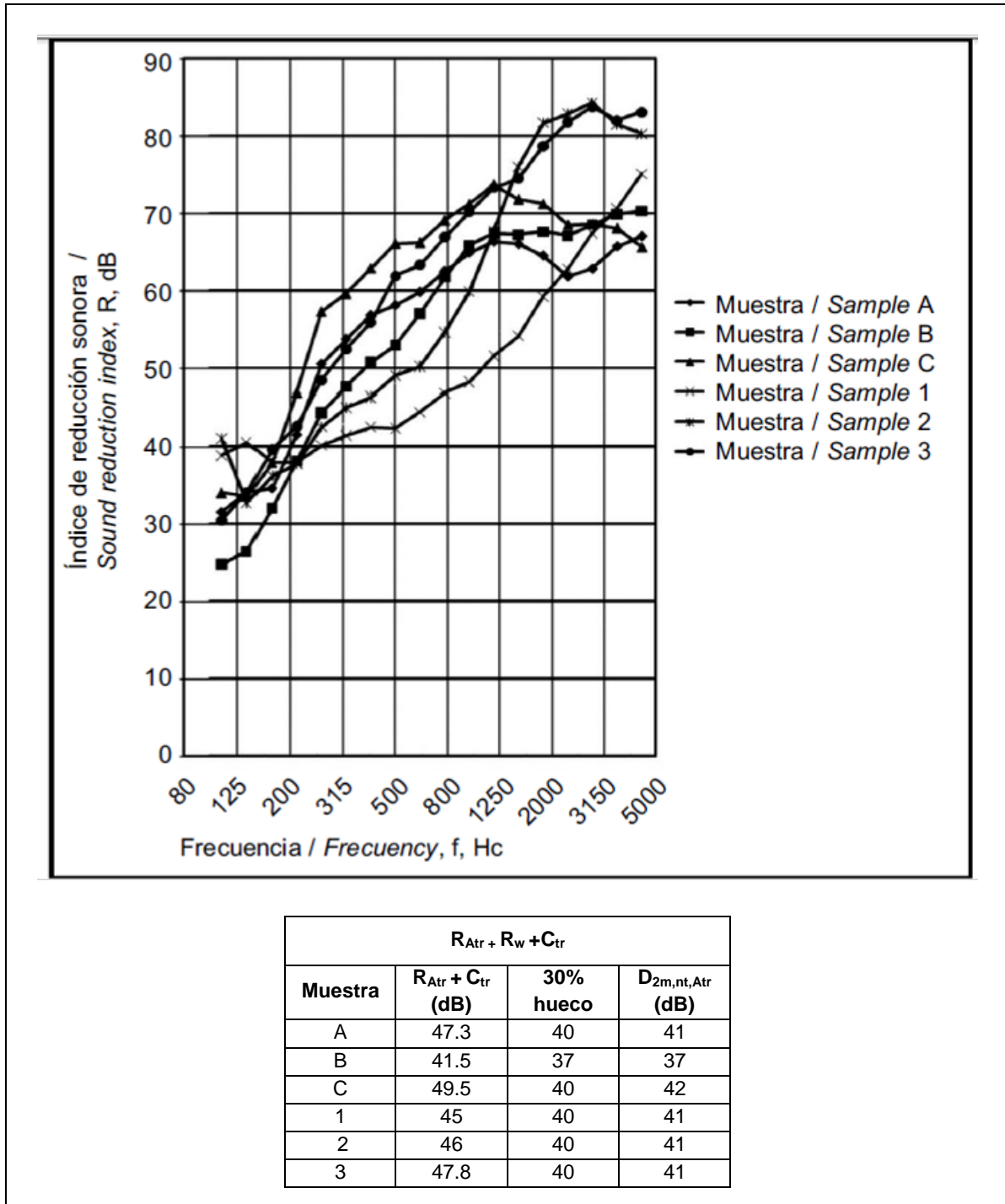


Fig.3.24 Resultados finales de la publicación. Suma de valores de aislamiento en Diferencia de niveles estandarizada. (B14)

Como conclusión, se afirma que aunque los sistemas de fachadas pesadas convencionales pueden tener un mejor comportamiento por su masa, sin embargo las diferentes pruebas realizadas demuestran que los sistemas de fachadas ligeras tienen también un alto rendimiento, incluso mayor que los estándares mínimos establecidos por el CTE para los cerramientos ligeros, e incluso teniendo en cuenta el porcentaje de huecos en la fachada de 30%, los resultados entre los sistemas ligeros múltiples y

cerramientos tradicionales son muy similares. Así mismo, el comportamiento acústico de los sistemas de fachadas ligeras es muy sensible a las transmisiones por los puntos de conexión de las diversas hojas con la perfilera, por lo que se destaca la importancia de la correcta instalación en obra.

En otras investigaciones sobre el comportamiento de una cámara de aire intermedia en un sistema doble ligero y la evaluación del correspondiente índice de reducción acústica, cabe citar la aportación de (Valtteri Hongisto, 2000)[7] en el apartado “2.2.3 *Experimental studies on double panels*” del capítulo 2 de su tesis donde habla de la influencia de la absorción en la cámara. Cita a varios autores investigadores reconocidos en este tema, quienes concluyen:

-El incremento del índice de reducción acústica con respecto a la cantidad de material absorbente que se dispone en el interior de la cámara no es lineal.

-Un espesor inicial de 1” (pulgada = 2.5cm) ya tiene un gran efecto.

-La posición del material absorbente dentro de la cámara no es relevante.

El espesor de las cámaras ensayadas fue menor de 100mm, la masa superficial de los paneles que las delimitaba era considerablemente mayor que la masa superficial del material absorbente (lana mineral) y la densidad de las lanas minerales utilizadas era $<140\text{kg/m}^3$. La influencia relativa de la presencia de la lana absorbente en el índice de reducción acústica sería mayor si la densidad superficial de los paneles fuese menor y con espesores y densidades similares a los de las lanas usadas como absorbentes.

Por otro lado hay un fuerte fenómeno de resonancia en muros dobles con espacios de 300mm entre las perfileras sustentantes (Rindel y Hoffmeyer 1991). El índice de reducción sonora baja por ello de 5 a 15dB en el rango de 125 a 200Hz comparado con el caso de separaciones de 600mm entre perfiles.

Otros autores (Quirt y Warnock 1993) hablan de la influencia de la distancia entre perfiles y de los puntos de fijación de los perfiles con las placas como subestructura de un entramado doble. En experimentos realizados con paneles de placas de yeso laminado con subestructura de perfiles de madera, demostraron que la influencia del espaciado entre los puntos de fijación (atornillado) disminuye la eficiencia de los perfiles de madera. En experimentos realizados por estos autores, se presentaron fuertes caídas por resonancia en el rango de frecuencias medias, cuando el espacio entre fijaciones de las placas con el perfil era menor, entre 200mm y 400mm. En la práctica estas distancias son usuales, este resultado es de gran importancia porque en condiciones de laboratorio las distancias de fijaciones entre perfiles y placas pueden determinarse pero en la realidad se hacen de forma arbitraria.

Respecto al comportamiento de la cámara de aire y la absorción que en ella se produce, (Hongisto, 2000) ha investigado especialmente en los sistemas de paredes dobles, tanto con cámaras absorbentes

y no absorbentes, y especialmente la relevancia de las fijaciones entre paneles; en sus estudios cita una problemática específica con respecto a la absorción acústica en la cámara de aire intermedia cuando ésta es de muy poco espesor ($d < 30\text{mm}$) y está vacía (sin presencia de lana mineral). En este caso específico, la superficie de absorción que presenta la cara oculta de los paneles pueden tener un fuerte efecto incluso en bajas frecuencias porque la energía en el campo sonoro plano no se propaga libremente debido a la fricción de las paredes que delimitan la cámara de aire intermedia, lo que en definitiva dificulta determinar aisladamente la efectividad de la cámara de aires intermedia como absorbente.

En el artículo “*Sound transmission through finite lightweight multilayered structures with thin air layers*” (A. Dijckmans y G. Vermeir, W. Lauriks, 2010) [8], se describen mediciones de pérdida de energía sonora por transmisión (*transmission loss*) realizadas por los autores, tanto en muros de hoja simple como en muros de doble hoja; éstos últimos con superficies rugosas y cámara vacía, así como en el caso de disposición de un fieltro de material absorbente de 2mm al interior de la cámara de aire. Los muros dobles con superficie rugosa mostraron un comportamiento respecto a la absorción acústica similar al de los muros dobles con un fieltro situado en el interior de la cámara de aire intermedia. Esto advierte que para una el buen comportamiento respecto a la absorción acústica de una capa de aire intermedia delgada, en el interior de la cámara no solo es importante la disposición de un material absorbente sino también considerar la absorción que aportan las superficies rugosas de las paredes delimitantes, lo cual al final también afecta las pérdidas por transmisión.

Otro autor (Hopkins 2007), sustenta que cuando el muro doble con cámara de aire intermedia forma un sistema masa-aire-masa, el aire situado en el interior de la cámara de aire intermedia y también la resistencia que ofrecen las conexiones constructivas pueden actuar como un elemento de resorte. Si a un muro simple (muro base) le añadimos un lining (*lining*, lo que denominamos la hoja exterior ligera de un sistema de fachada ligera ventilada) delimitando entre ambos una cámara de aire intermedia, dicha adición tiende a incrementar el índice de reducción acústica del muro base en medias y altas frecuencias mientras que por el contrario presenta una reducción notable cerca de la frecuencia de resonancia propia del nuevo sistema doble planteado y se sitúe en el rango de las frecuencias bajas. Los espesores constructivos de la cámara, las características mecánicas y geométricas de la placa de revestimiento habituales así como las conexiones constructivas ejecutadas entre hojas hacen que la frecuencia de resonancia se sitúe habitualmente en dicho rango.

En la siguiente figura (Fig.3.25) se muestra el incremento en el índice de reducción acústica de tres diferentes tipos de hoja ligera (*wall linings*) aplicadas como revestimiento sobre un mismo muro base de albañilería. En la gráfica se observan algunos valores negativos de mejora del índice de reducción acústica por efecto de la frecuencia de resonancia al establecerse un sistema masa-resorte-masa; se

observan también otros picos y llanos cerca de las respectivas frecuencias críticas del muro base y de la hoja ligera. En el rango de las altas frecuencias aparecen también algunas caídas y llanos producidos por la eficiencia de la hoja ligera en el rango por encima de la frecuencia crítica. La frecuencia crítica del muro base y la frecuencia del conjunto masa-resorte-masa permanecen en el rango de bajas frecuencias. Se observa que la frecuencia de resonancia presenta una distinguible caída cuando su valor se halla ubicado lejos de la frecuencia crítica del muro base.

Los ejemplos de revestimiento (a) y (b) presentan una sola frecuencia de resonancia masa-resorte-masa, debido a que el aire en la cámara de aire intermedia presenta un valor de la frecuencia crítica mas baja que en el propio muro base.

En el ejemplo de revestimiento (c) se manifiestan dos frecuencias de resonancia; una asociada con el aire de la cámara intermedia (con valor cercano a la frecuencia crítica del muro base) y otra debido a la resistencia propia del material actuando como un resorte. Cabe anotar que cualquier cálculo de la frecuencia de resonancia del conjunto masa-resorte-masa solo tiene un valor como estimación aproximada en el rango de las bandas de frecuencia en las cuales el índice de reducción acústica del muro base se ve reducido por el uso de la hoja ligera como revestimiento.

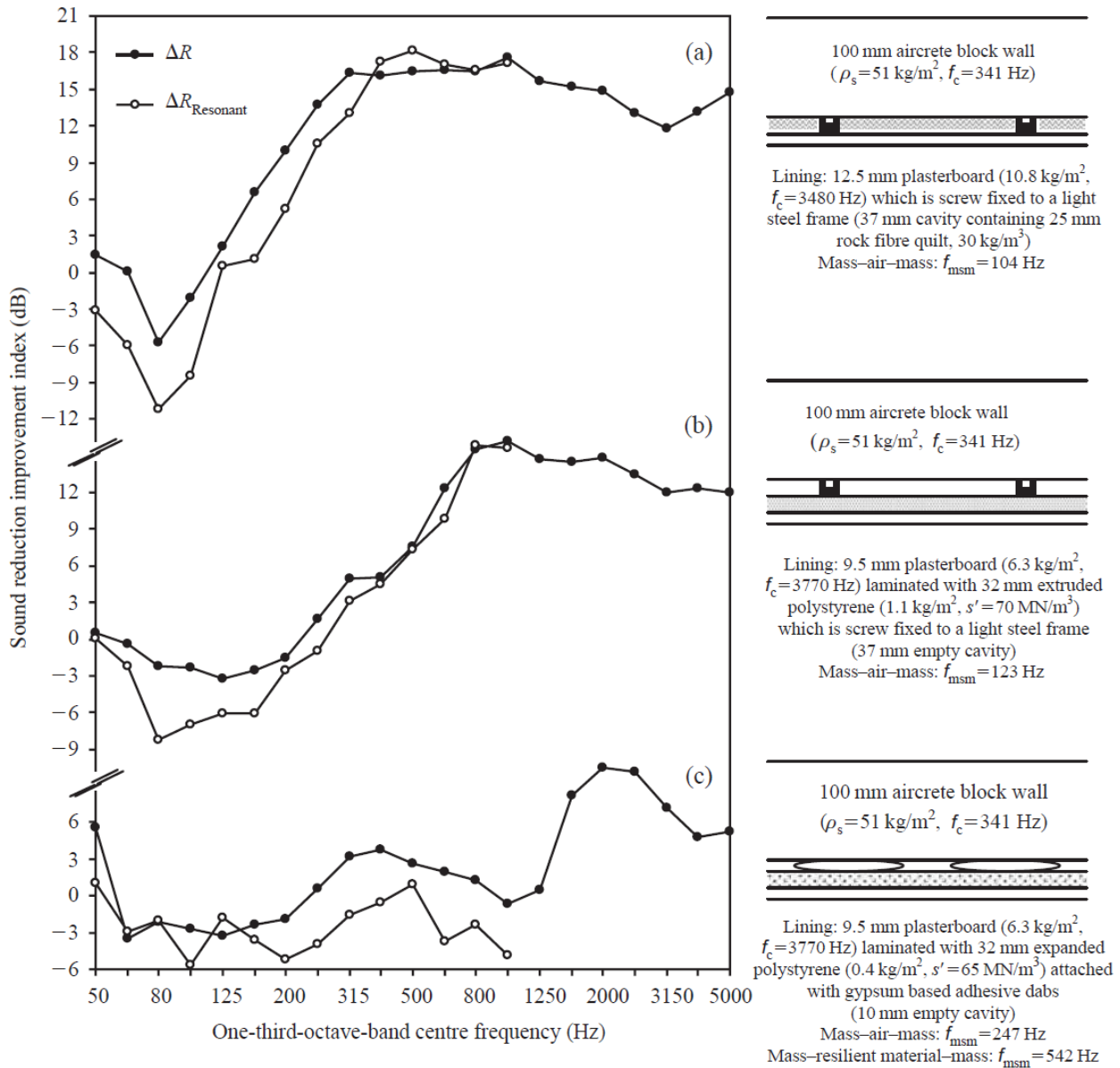


Fig.3.25 Resultado de mediciones de la mejora de índice de reducción acústica de tres diferentes hojas ligeras aplicadas como revestimiento sobre un mismo muro base de albañilería. ΔR (sound reduction improvement index) según la norma ISO 140 Parte 3. Mediciones realizadas por Carl Hopkins y reproducidas con permiso de BRE "Building Research Establishment" (A3)

Resulta presumible que los diferentes tipos constructivos de muros que pueden actuar como muro base tienen también a su vez diferentes resistencias de flujo e impedancia mecánica. Ello implica que un mismo tipo de hoja ligera como revestimiento puede presentar diferentes comportamientos por lo que se refiere a la mejora de índice de reducción acústica dependiendo de la naturaleza del muro base. Diferentes materiales presentan diferentes impedancias y esto modifica las transmisiones entre el revestimiento de hoja ligera y el muro base a través de los puntos de conexión mecánica.

En los ensayos de laboratorio se consideran comunmente muros base que han sido revestidos con pintura o yeso (lo cual sella su porosidad) por lo que las transmisiones “no resonantes” ocasionadas por la porosidad de la superficie no se considera habitualmente en éstas mediciones considerando aparte la transmisión “resonante” de la hoja ligera conectada al muro base.

En la realidad de las obras, los revestimientos con tipo de hoja ligera se aplican en muros de cara vista (no sellados y con superficie porosa) por lo que no es apropiado asumir en las mediciones del índice de reducción acústica su mejora al aplicar el revestimiento. Se ha demostrado (Heckl, 1981; Warnock, 1992) que muros de albañilería con alta porosidad pueden reducir los efectos de la frecuencia de resonancia masa-resorte(aire)-masa con el uso de revestimientos de una hoja ligera y cámara intermedia.

La mayoría de los muros de albañilería no presentan una baja resistividad al flujo de aire lo cual dificulta confirmar este efecto medible cuando la resistencia al flujo de aire (r) $> 20000 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ por causa de otras variables que afectan el nivel de aislamiento acústico. Algunas mediciones de laboratorio realizadas (Mackenzie et al., 1988). indican que aplicando una capa de acabado a un muro de 200mm de albañilería con una densidad de 2100 kg/m^3 antes de aplicar un revestimiento de hoja ligera da un bajo índice de reducción acústica cerca de la frecuencia de resonancia masa-resorte-masa comparado con un muro base con cara vista (de superficie porosa).

3.2.3 Comportamiento a bajas frecuencias

Una estructura doble funciona desde el punto de vista del aislamiento acústico mejor que una simple con la misma masa de conjunto, menos en el rango de las bajas frecuencias, donde se produce una resonancia del sistema masa-aire-masa situada típicamente entre 50 y 300Hz (Hongisto 2000), valor de frecuencia para el cual decae sensiblemente el índice de reducción acústica. Este índice mejora también en estructuras dobles cuando se incrementa bien la masa superficial del conjunto, bien la distancia entre paneles o bien la absorción al interior de la cámara.

El uso de resonadores Helmholtz en el interior de la cámara de aire intermedia puede también contribuir al incremento del aislamiento acústico para el rango de las bajas frecuencias. Investigaciones realizadas por los autores (Engen; Vigran 1985 y Mason; Fahy 1988) (referenciados por Hongisto 2000) mostraron que es posible mejorar el comportamiento de un cerramiento con doble hoja hasta 10dB en los rangos de frecuencia entre 300 y 400Hz. (Enger y Vigran, 1985) probaron que en el rango de las bajas frecuencias, el uso de resonadores era más efectivo que el uso de absorbentes porosos en la cámara, puesto que estos absorbentes porosos funcionan mejor a medianas y altas

frecuencias. En ambas investigaciones el total del volumen de los resonadores es del 10 y 15% del total de la cámara de aire intermedia, para así obtener buenos resultados.

Otro autor (Narang, Novak,1992) aplica el mismo principio físico, pero utiliza resonadores de Helmholtz en forma de ranuras practicadas en la perfilería pero sin embargo los resultados no fueron muy exitosos y solo se registraron incrementos de 1-2 dB en el índice de reducción acústica. Se logró sin embargo un mejor rendimiento usando unas tiras de material poroso flexible adherido a las caras de los montantes, interpuestas entre estos y los paneles. Los resultados beneficiosos se notaron ya a partir de los 800Hz, sin embargo no se pueden generalizar los resultados beneficiosos para el rango de las bajas frecuencias.

Respecto al uso de absorbentes de resonadores para obtener mejoras acústicas a bajas frecuencias, en la publicación “*Effect of inserting a Helmholtz resonator on sound insulation in a double-leaf partition cavity*” (Satoshi Sugie, Junichi Yoshimura y Teruo Iwase 2009) [9] se llevaron a cabo diversos ensayos reales y de predicción con un modelo de partición doble con un absorbente resonador al interior de la cámara intermedia (Fig.3.26)

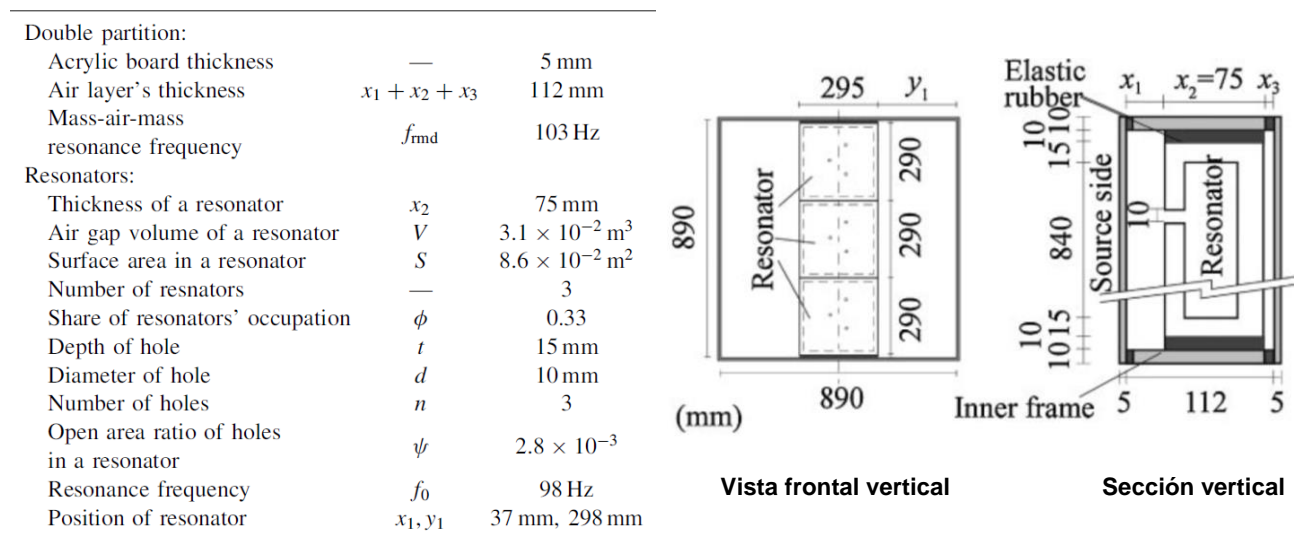


Fig.3.26 Sistema de absorción por resonador al interior de una partición doble. Características del resonador (B16)

Las hojas de la partición doble son placas acrílicas de 5mm de espesor y un total de la cámara de 112mm. Con tres resonadores también fabricados con placas acrílicas de 15mm de espesor, cada uno con tres agujeros cada uno con un diámetro de 10mm, los resonadores están separados con material elástico (caucho).

Los autores llevaron a cabo la medición del aislamiento en los términos de índice de reducción acústica (R) y de diferencia de niveles (D) así mismo realizaron simulaciones con un modelo de

predicción teórica donde obtuvieron los siguientes resultados de (R) a bajas frecuencias en tercios de octava (fig.3.27).

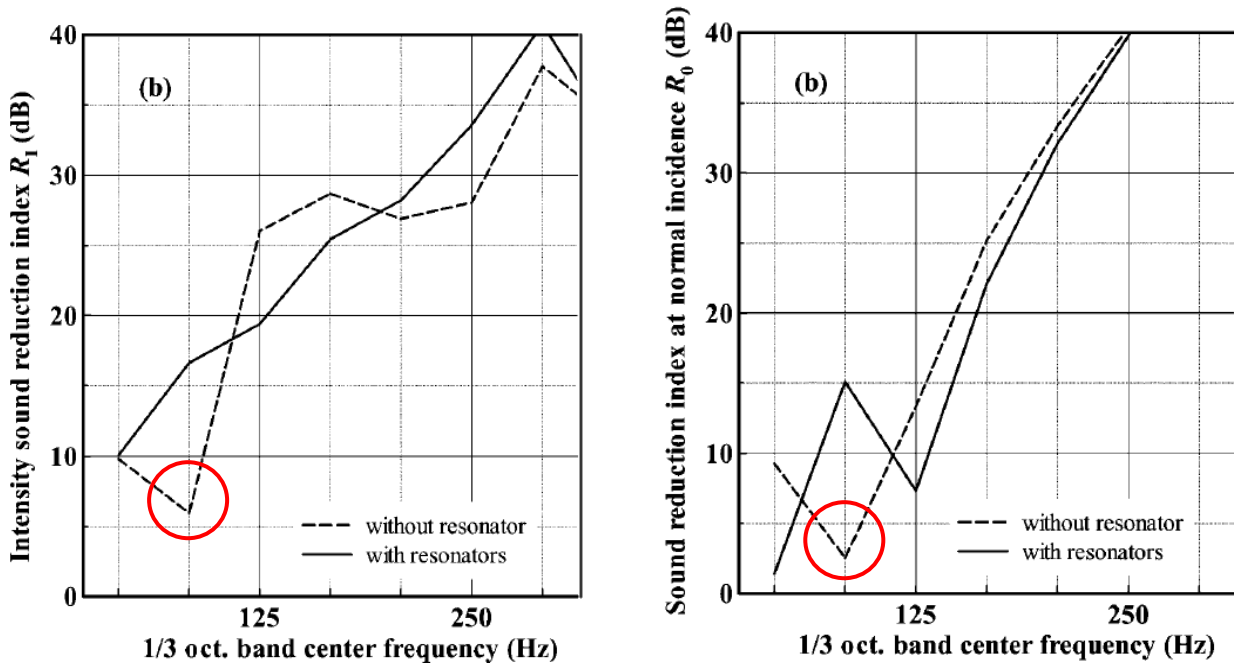


Fig.3.27 Resultados del sistema de absorción por resonador al interior de una partición doble. Resultados obtenidos en bajas frecuencias en bandas de tercio de octavas, a la Izq. Resultado de ensayos en laboratorio. Der. Resultados obtenidos de predicción (B16)

En los resultados obtenidos tanto en las mediciones de laboratorio como de predicción, se observa un marcado incremento del aislamiento acústico del cerramiento doble con la utilización del resonador en la cámara de aire intermedia por debajo de la frecuencia 250Hz, donde la frecuencia de resonancia se mantiene constante (círculos rojos Fig.3.27). Los autores llevaron a cabo diferentes pruebas donde encontraron que la frecuencia de resonancia variaba conforme a la variación del diámetro de los agujeros de los resonadores, así mismo afirman que la impedancia acústica del resonador debe ser poca por lo que los diámetros de los agujeros deben ser más amplios.

Como conclusiones de ésta publicación, se resaltan: las caídas que se producen a lo largo del rango de frecuencias no solo dependen de la frecuencia de resonancia por lo que influye el espesor de la cámara de aire intermedia, si se aplica un material absorbente al interior de la cámara y de la posición de los resonadores dentro de la misma.

3.2.4 Manejo de la ventilación

El uso de la ventilación natural en edificios vuelve a ser cada vez más común en la edificación; existen en el mercado diversos sistemas y dispositivos, bien de ventanas o bien de orificios en la fachada, que

permiten la renovación continua del aire en el interior de los espacios. Desde el punto de vista acústico, la ventilación natural no resulta muy compatible con el aislamiento acústico en fachadas, puesto que las aperturas de fachada para la ventilación constituyen habitualmente puntos débiles para el índice de reducción acústica sin embargo el uso de un revestimiento ligero con material acústicamente absorbente es beneficioso con cámaras de más de 5cm de espesor.

Algunas investigaciones están enfocadas en esta problemática; *Noise control strategies for naturally ventilated buildings* (M.H.F. De Salis, D.J. Oldham, S. Sharples, 2002)[10] hacen referencia a sistemas existentes de aperturas para ventilación ubicados en muros de fachadas. En la siguiente gráfica (Fig.3.28) muestran los valores de índice de reducción acústica de un cerraminto $R_w = 40\text{dB}$ y los valores obtenidos de (R) del conjunto conforme a la apertura de ventilación por áreas de la fachada R_A . Los valores se expresan en $SRI_w = R_w$ y $SRI_A = R_A$ (Sound Reduction Index)

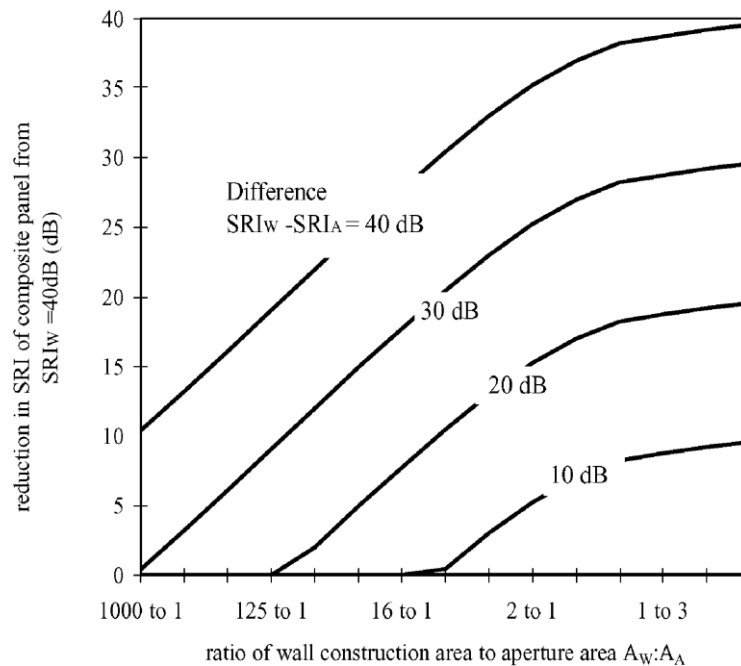


Fig.3.28 Índice de reducción acústica nominal de una partición $SRI_w=40\text{dB}$ global, el cual se va disminuyendo a medida que se incrementa el área de apertura respecto al muro de fachada representada en proporción de 1 a 1000 hasta de 1 a 3 partes del muro.(B17)

Las aperturas de ventilación practicadas en una fachada se pueden clasificar en dos categorías según el flujo de aire a través de ellas:

- grandes aperturas con dimensiones mayores a 10mm y
- pequeñas aberturas con dimensiones menores a 10mm.

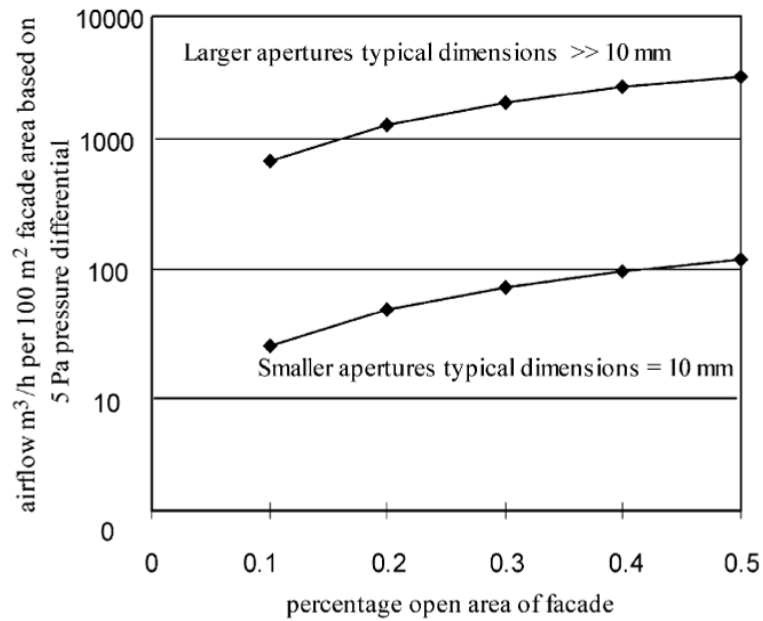


Fig.3.29 Típico flujo de aire para un área de fachada de 100m². Comportamiento de la presión de aire al interior de la fachada en las aperturas del muro, la tendencia de aumento del flujo se mantiene constante tanto en las aperturas mayores como en las menores de 10mm.(B17)

La siguiente gráfica (Fig.3.30) se muestran los diversos índices de reducción acústica obtenidos según el porcentaje de aperturas para ventilación de que dispone la fachada, con diferentes presiones de flujo de aire y la cantidad de aire que entra y sale evaluado en m³/h por 100m² de fachada.

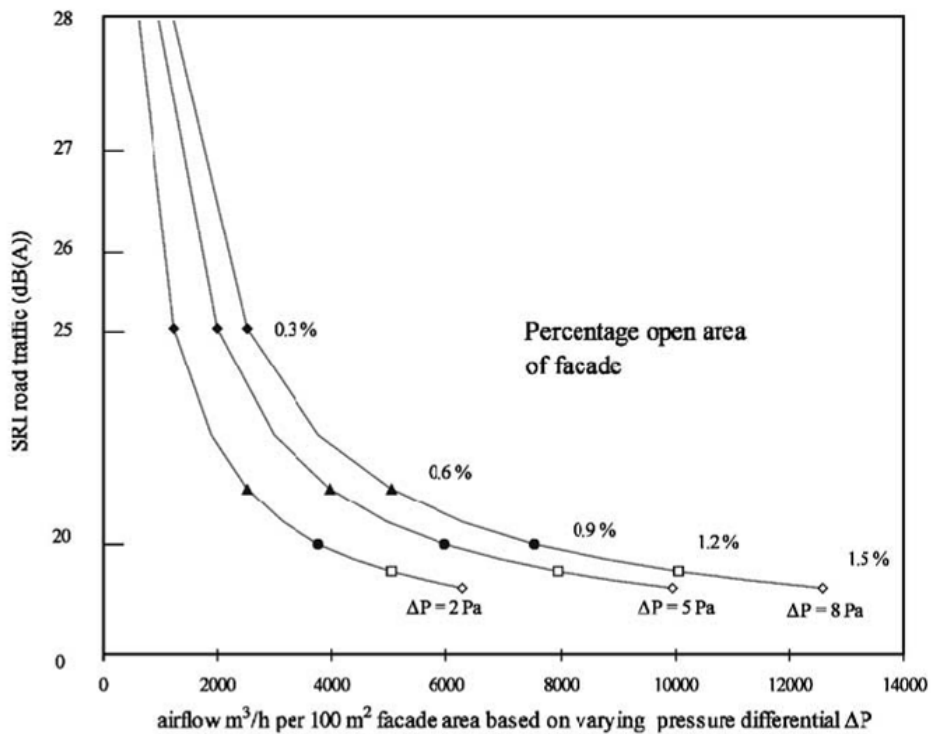


Fig.3.30 Gráfica de aislamiento acústico con diferentes porcentajes de aperturas para ventilación en la fachada. (B17)

Entre los diversos sistemas de atenuación sonora aplicados en las entradas de las aberturas para la ventilación que se practican en las fachadas, se encuentran los sistemas denominados de lamas acústicas. En un caso expuesto y ensayado para esta publicación, se describe un sistema de lamas de 900 x 900mm, que presenta una capacidad de ventilación de $2000\text{m}^3 \text{h}^{-1}/\text{m}^2$ en un área de fachada de 100m^2 , con el cual el valor de SRI se reduce en 28dB_A (caso de uso de lamas dobles) y se reduce 24dB_A para el caso de lamas sencillas.

Otros sistemas menos convencionales y que se instalan en las aperturas son los elementos resonadores diseñados por cuartos de octavas, los cuales son acústicamente ideales para su instalación en las bocas de entrada y salida del flujo de aire; pueden aplicarse visibles o no visibles (Fig.3.31).

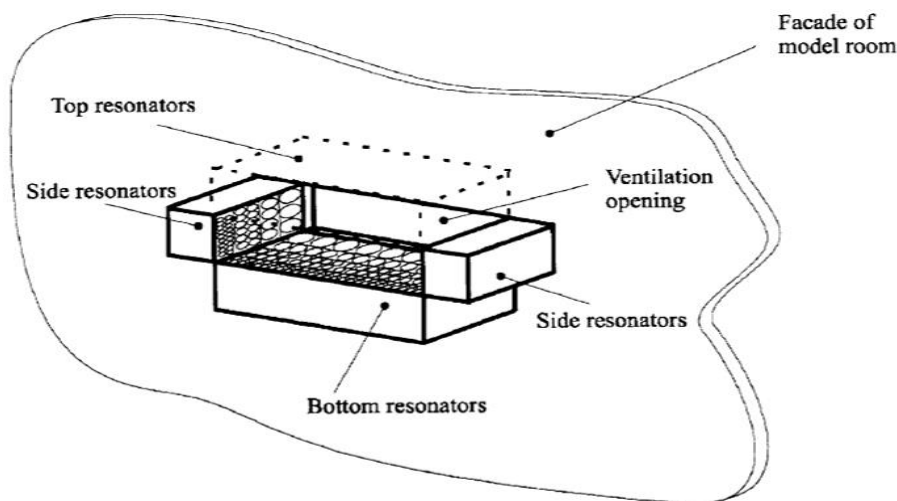


Fig.3.31 Imagen de resonador de cuartos de octavas de ondas. Colocación al lado de la apertura de ventilación. (B17).

En este artículo también indaga en el uso beneficioso de otros sistemas híbridos y de control activo en las aplicaciones de reducción sonora; estas investigaciones se llevan a cabo en las universidades de Liverpool y sheffiels Hallam.

En la publicación “*Investigation of an Open Screen Acoustic Performance*” (R. Lyons, B.M. Gibbs 1996)[11], que trata sobre los dispositivos técnicos que contribuyen a la atenuación sonora en las aberturas de ventilación de fachadas, se plantea el comportamiento de las lamas acústicas para la ventilación, denominadas como “*open screen*”, este tipo de dispositivos se utiliza especialmente en la industria para el control de ruido de cuartos de maquinarias que, por sus altas prestaciones, pueden ser instalados en edificios de usos como el residencial y el comercial. El artículo citado se enfoca hacia el estudio en el rango de las bajas frecuencias, tema importante para la industria y las aberturas (sistema

de lamas). El modelo técnico evaluado es un sistema doble de lamas, con un espacio entre ellas y un espesor de cámara determinado.(Fig.3.32)

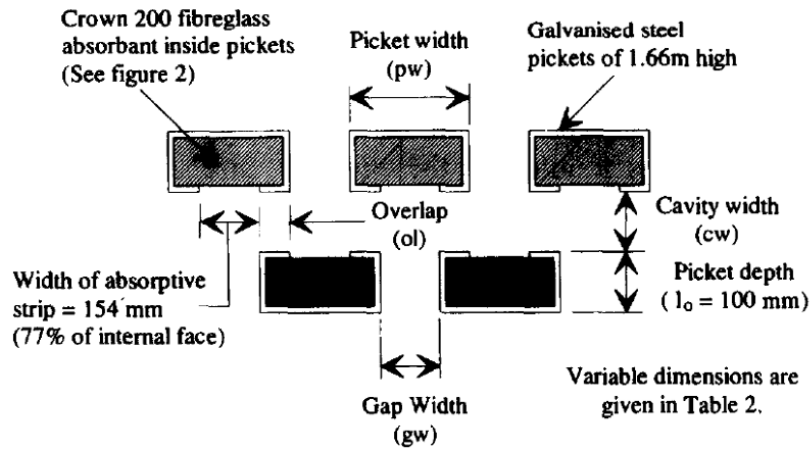


Fig.3.32 Vista en planta de lamas dobles. (B18)

Se ensayaron 100 configuraciones diferentes del sistema, variando: las dimensiones de las láminas (*picket width*, *picket depth*), el espacio entre estas (*gap width*), la superposición entre estas (*overlap*) y el espesor de la cámara (*cavity width*). Algunos de los resultados relevantes se muestran en las siguientes gráficas (Fig.3.33 y Fig.3.34).

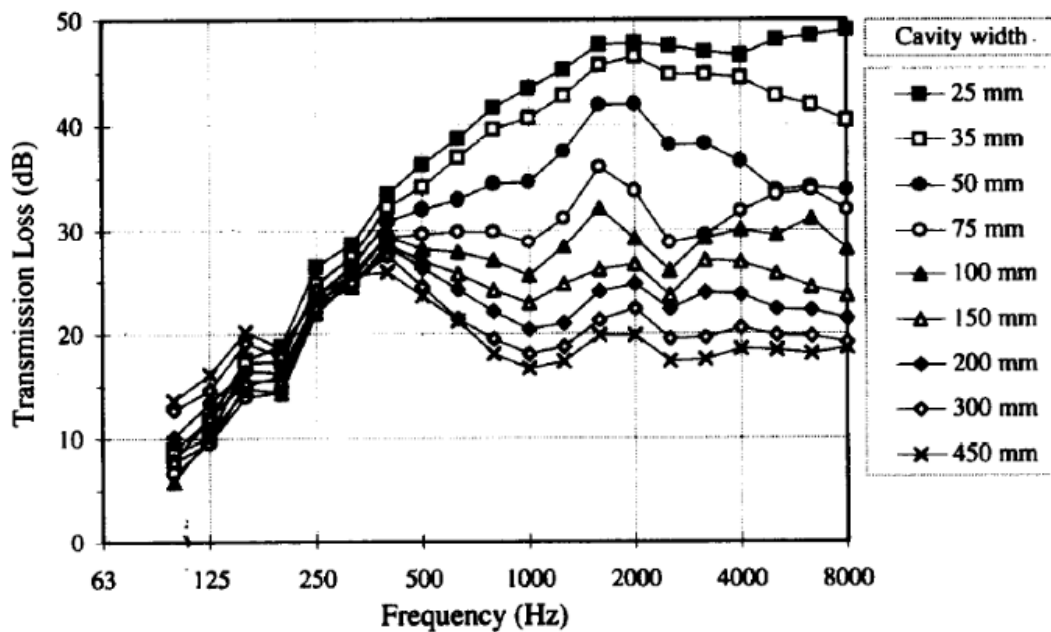


Fig.3.33 TL de diferentes espesores de cámara de la Pantalla "6". Láminas de 600x100mm y un espacio de separación entre estas de 100mm. (B18)

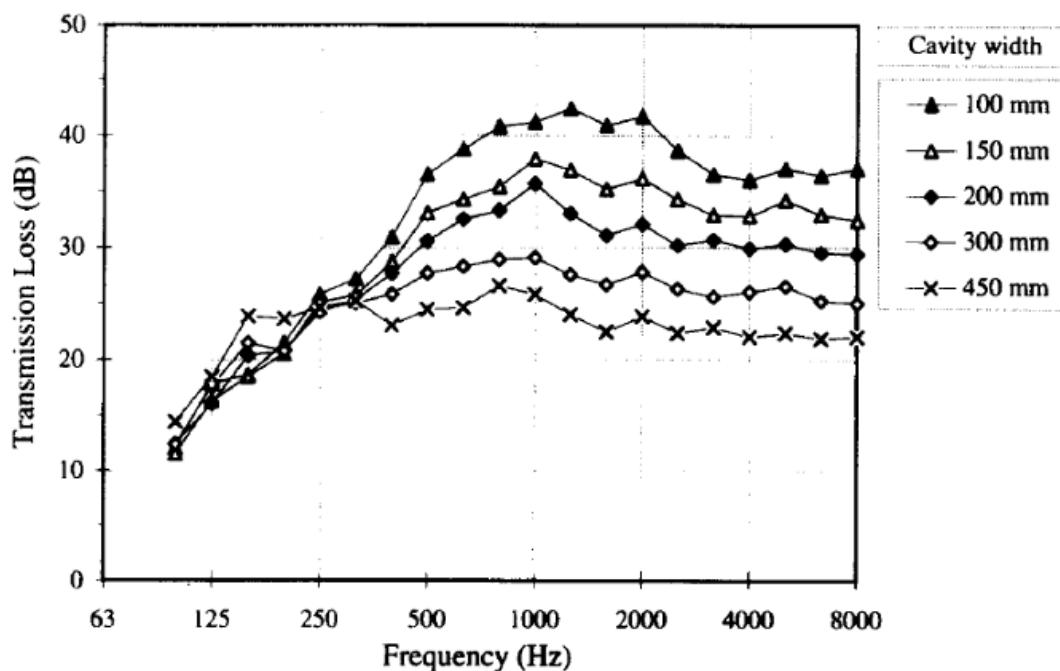


Fig.3.34 TL de diferentes espesores de cámara de la Pantalla “10”. Láminas de 1200x100mm y un espacio de separación entre estas de 175mm. (B18)

Tanto en la (Fig. 3.33) como en la (Fig. 3.34), en las gráficas se aprecia como la curva que corresponde a un mayor espesor de cámara (*cavity width*) igual a 450mm, tiene un mejor comportamiento en bajas frecuencias y mejor en bajas.

Por otro lado, en la configuración de pantalla “6” (Fig.3.33) se nota más una diferenciación de valores de (TL) entre los diferentes espesores de cámara en el rango de las bajas frecuencias, con un valor entre 5 y 7dB de incremento, respecto a los ejemplos de la configuración “10” (Fig.3.33), los cuales no muestran una gran diferenciación entre ellos, en parte por la distancia de separación.

Por otra parte en la pantalla “10”(Fig.3.33), la ganancia en el rango de las bajas frecuencias con respecto a los demás espesores de cámara no alcanza los 5dB, teniendo mas masa en las láminas que en el caso de la pantalla “6” pero menor espesor de separación entre estas (175mm) frente al caso de la pantalla “6” (100mm).

Como conclusión, se puede afirmar que a bajas frecuencias, el comportamiento de los sistemas de pantallas acusticas abiertas de lamas (*open screen acoustic*) depende de la masa superficial efectiva del conjunto y que es independiente del espesor de la cámara de aire intermedia, siguiendo prácticamente la ley de masas, pero con un gradiente que sí depende del espacio de separación entre estas. Así mismo, a altas frecuencias el comportamiento acústico del conjunto también depende del espesor de la cámara de aire intermedia y de la superposición entre lamas (Fig.3.34).

3.2.5 Predicción acústica: Metodologías y herramientas

Entre los diversos métodos de evaluación de los valores del comportamiento acústico de una fachada se encuentran los denominados de tipo predictivo que permiten aproximarse a los valores reales, en términos numéricos, del comportamiento energético de un sistema, los cuales pueden ser:

1. Teóricos, en base a modelos matemáticos y de algoritmos partiendo de algunas características de los elementos a medir, como ejemplo cabe citar los métodos de elementos finitos (FEM y BEM) usados especialmente para el análisis vibroacústico en bajas frecuencias, y
2. Los que funcionan mediante la creación de bases de datos de características modificables o de análisis estadístico de distribución energética (SEA) o el acoplo de impedancia.
3. Deterministas basados en modelos acústicos clásicos.

Los modelos de predicción permiten la variación ágil de los elementos constructivos y sus parámetros asociados, estimando valores del índice de aislamiento acústico al ruido aéreo con más o menos complejidad y grado de acierto, pero que resultan especialmente útiles cuando no es posible una medición in-situ o de laboratorio, ya sea por costos, por ahorro de tiempo de ejecución o bien la evaluación de sistemas constructivos novedosos no realizados. Para conocer el comportamiento acústico de sistemas de fachadas múltiples, como es el caso de las fachadas dobles, los cerramientos múltiples ligeros, la fachada ventilada, entre otros, es posible utilizar ya varias herramientas disponibles de predicción, tanto de tipo teórico como estadístico.

En cuanto a las herramientas teóricas, existen varios autores que han planteado modelos que han sido base para el desarrollo de interesantes hipótesis y que han dado origen a otras herramientas de evaluación. (B.H Sharp 2005), ha investigado sobre la transmisión de sonido en sistemas de fachada dobles a través de puentes acústicos, analizando la energía acústica radiada de punto a punto(28).

Algunos de los modelos más comúnmente usados en la predicción acústica aplicable a sistemas dobles y multicapa son:

El modelo (TMM) *Transfer Matrix Method* utilizado especialmente para predecir las pérdidas por transmisión en sistemas multicapa; diferentes capas elásticas, poro-elásticas y de fluidos pueden ser incorporadas en el modelo (SEA). El (TMM) es una técnica computacional eficiente para la predicción del coeficiente de transmisión.

(28) B.H. Sharp, Prediction methods for the sound transmission of building elements, Noise Control Engineering 11 (1978). Tomado del artículo "Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modeling" (J. Wang, T.L. Lu, J. Woodhouse, R.S. Langley, J. Evans) Journal of sound and Vibration 286 pp 817-847 (2005)

Matlab: (Laboratorio de matrices): Es una herramienta de software matemático con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) basado en el modelo (FMulay) que permite la representación de datos y la implementación de algoritmos; se usa en predicción de transmisión sonora y vibraciones. Con los avances de esta herramienta, es ya posible realizar simulaciones y el uso de herramientas gráficas.

SEA: *Statistical Energy Analysis*: éste método de predicción de la transmisión del sonido y las vibraciones, ha sido empleado inicialmente en la industria aéreo-espacial en los años 60; en 1970 se han incluido ya en estudios de acústica de la edificación, especialmente para la evaluación de sistemas dobles, los cuales son considerados como estructuras compuestas dobles o múltiples acústicamente “masa-aire-masa de resonancia”. Cada elemento que compone el conjunto funciona de forma independiente; el método de cálculo (SEA) estudia la energía vibratoria de cada uno de los componentes físicos de una estructura por separado y también los “modos” de influencia, por cada tipo de onda.

El funcionamiento del modelo de cálculo (SEA) ha sido ampliamente formulado por varios autores: en la tesis de master *Sound transmission through double walls using Statistical energy Analysis. A new element formulation for non-resonant response* (Magnus Lundin 2011)[12] se describe de la siguiente forma:

Cuando la estructura está dividida en subsistemas, la ecuación de balance de energía es:

$$P_{in}^i = P_{dis}^i + \sum_{j \neq i} P_{coup}^{i,j}, \quad (eq. 2)$$

Donde:

P_{in}^i es el “input” de energía del subsistema i de recursos externos,

$P_{coup}^{i,j}$ es el conjunto de energía transmitida del subsistema i al subsistema j a través del acople mecánico. $P_{coup}^{i,j} = -P_{coup}^{j,i}$ La ecuación de balance de energía (eq.2)

P_{dis}^i es la energía disipada por el elemento i y:

$$P_{dis}^i = \eta_i \omega E_i, \quad (eq. 3)$$

Donde:

η_i es el factor de pérdidas de un elemento *damping loss factor*,

E_i es el tiempo promediado de energía en el subsistema y ω es la frecuencia angular.

En el método de cálculo (SEA) se asume como premisa que la energía de acople es proporcional a la diferencia de energía modal mediante:

$$P_{\text{coup}}^{i,j} = C^{i,j} \frac{(E_i - E_j)}{n_i n_j} \quad (\text{eq. 4})$$

Formulación de un sistema mediante (SEA):

Element	Modal density, n
Plate, bending	$n(\omega) = k_B^2 S / \pi \omega = S / 3.6 c_L t$, where k_B is the bending wave number, S is the area of the plate, c_L is the longitudinal wave speed and t is the thickness of the plate. [Cremer et al., 1988, page 489]
Acoustic volume	$n(\omega) = k_0^2 V / 2\pi^2 c_0 = \omega^2 V / 2\pi^2 c_0^3$, where V is the volume, k_0 is the wave number in air and c_0 is the speed of sound in air. [Cremer et al., 1988, page 489]
Acoustic volume	$n(f) = 4\pi f^2 V / c_0^3 + \pi f S / 2c_0^2 + L / 8c_0 \Rightarrow$ $n(\omega) = \omega^2 V / 2\pi^2 c_0^3 + \omega S / 8\pi c_0^2 + L / 16\pi c_0$, where V is the volume, S is the area of all surfaces and L is the total length of all edges of the volume. [Craik and Smith, 2000a]

Fig.3.35 Densidades modales de flexión de elementos (SEA). Bending para tres elementos. (E2)

Donde:

n_i es la densidad modal “modal density” (id es el número de modos por unidad de la frecuencia angular) del subsistema i y

El parámetro $C^{i,j}$ es la conductividad del subsistema i al subsistema j . La conductividad es adimensional y simétrica:

$$C^{i,j} = C^{j,i} \quad (\text{eq. 5})$$

Esta hipótesis sigue la segunda ley de la termodinámica expresada en “The Clausius statement” por (Moran y Shapiro 1998,pg. 165) “Es imposible para cualquier sistema que opere solo que tenga como resultado la transferencia de calor de un cuerpo frío a uno caliente”. Esto significa que debe haber un equilibrio de energía entre los subsistemas y que el factor de pérdidas por acoplamiento “coupling loss factor” a través de dos subsistemas debe ser inferior al de cada uno por aparte.

La energía no fluye de un subsistema con baja energía a un subsistema con mayor energía (eq.3)

Una nueva variable que puede ser introducida para simplificar la ecuación de balance de energía (eq.1), es la de energía modal “modal energy” definida como:

$$\hat{e}_i = E_i/n_i \tag{eq. 6}$$

La traducción del término energía modal es no es exactamente “la energía del modo” (la cual se calcula como: E_i/N_i). Con todo ello la energía de la densidad modal (eq.2) se puede reescribe como:

$$P_{dis} = M_i \hat{e}_i \tag{eq. 7}$$

Donde: M_i es el factor de superposición modal “modal overlap factor” definido como:

$$M_i = \eta_i \omega n_i \tag{eq. 8}$$

El factor de superposición modal no es el único elemento que describe la disipación del sistema, pero es una característica importante de éste. Un bajo factor de superposición modal indica que los modos del sistema están separados por lo que su valor debe ser siempre >1 ; en este caso los picos de la resonancia en la curva de respuesta son claramente distinguibles el uno de otro. Con un alto factor de superposición modal, los picos de resonancia ya son más difíciles de distinguir. La ecuación (eq.3) puede reescribirse de la misma manera como:

$$P_{couple}^{i,j} = C^{i,j} (\hat{e}_i - \hat{e}_j) \tag{eq. 9}$$

La ecuación (eq.2) de todos los subsistemas puede ensamblarse ahora en una matriz:

$$\begin{bmatrix} M_1 + \sum_{j \neq 1} C^{1j} & -C^{21} & \dots \\ -C^{12} & M_2 + \sum_{j \neq 2} C^{2j} & \dots \\ -C^{13} & -C^{23} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{in}^1 \\ P_{in}^2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Fig.3.36 Ejemplo de una matriz (SEA). Los subsistemas y sus components. Ecuación 10. (E2)

Con la ecuación (eq.5) la matriz anterior es simétrica positiva y definida o semi-definida si $M_i=0$ es un buen comportamiento. Así mismo hay varias dificultades de uso con el método (SEA), las más importantes son:

- La subdivisión de una estructura en muchos subsistemas.
- La validación de la hipótesis de acople de energía (eq.3).
- La evaluación de los parámetros en la matriz son: La densidad modal n , el factor de superposición modal M , la conductividad C y la energía input P_{in} .

- No siempre se obtiene el total de información de la energía media en un subsistema.

Y como ventajas:

- Los cálculos son simples y se pueden efectuar en cualquier ordenador.
- Una vez el modelo esté hecho es posible actualizar la información de entrada, como por ejemplo el espesor de un panel o realizar cambios en un local.
- El uso de (SEA) hace posible analizar de otra manera problemas que serían inaccesibles.

Matríz (SEA)

Se basa en la correlación de los subsistemas creados mediante la transmisión de energía entre estos. Se considera la energía media de cada oscilador e_j . E_1 y E_2 el flujo de energía entre estos es proporcional a la diferencia de las energías no acopladas. Influye el valor de “*damping loss factor*” propio de cada elemento y “*coupling loss factor*” de los elementos y también entre los adyacentes. La relación de transmisión de energía entre los subsistemas se da en cada frecuencia con un tipo de onda.

Para la creación de la matríz es necesario conocer las pérdidas de disipación de los subsistemas, las pérdidas por acoplamiento entre sistemas “*coupling loss factor*” y la energía nominal de entrada en los subsistemas. Las pérdidas se conocen mediante el factor de pérdidas “*loss factor*” este es una fracción de la energía transferida por el ciclo. Se definen tres clases de factor de pérdidas “*internal*” (disipado) pérdidas de los sistemas (η_{ii})(29), “*coupling loss factor*” entre sistemas (η_{ij})(30) y “*total subsystem losses*” (η_i)(31), cuando se conoce la energía emitida “*input*” y el factor de pérdidas, es posible encontrar la energía en los subsistemas (Hopkins C. Sound Insulation 2007)

Por ejemplo un sistema (SEA) de transmisión de un plano entre dos locales, está compuesto de 3 subsistemas: local emisor (1) plano(2) y local receptor(3).

(SEA) se basa en el flujo de energía entre grupos de *modos*. En la transmisión de ruido aéreo de un plano es necesario incluir las transmisiones no resonantes entre los subsistemas.

Muros dobles y el cálculo mediante (SEA)

Los autores (Price & Crocker 1970) usaron un modelo (SEA) para paredes dobles en 1970. El modelo contenía 5 elementos donde la anotación II (Fig.3.36) fue usada como una pared simple. Transmisión resonante y no resonante (ley de masas) fueron usadas entre la cámara y los locales.

(29) (η_{ii})= *Internal loss factor for subsystem i* (-) término utilizado por Hopkins C.en *Sound Insulation* 2007

(30) (η_{ij})= *Coupling loss factor from subsystem i to subsystem j* (-) término utilizado por Hopkins C.en *Sound Insulation* 2007

(31) (η_i)= *Total loss factor for subsystem i* (-) término utilizado por Hopkins C.en *Sound Insulation* 2007

La cámara fue considerada como un sistema resonante con densidad modal y el factor de pérdidas determinado analíticamente.

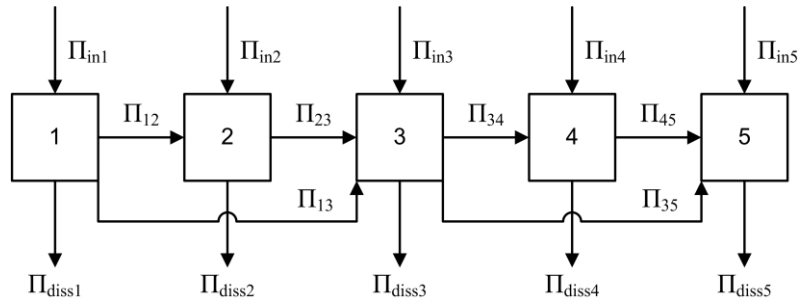


Fig.3.37 Diagrama de flujo de energía entre sistemas acoplados del método de transmisión en (SEA). Diagrama usado por Price & Crocker para una pared doble. (E2)

Estos autores no mencionaron el tema de la resonancia de paredes dobles pero obtuvieron resultados insatisfactorios en bajas frecuencias. Éste comportamiento se debió a la definición de factores de pérdida en el acoplamiento y a que la energía del segundo sistema era baja en comparación a la del primero. La razón, poca masa superficial de las paredes implicadas. Esta hipótesis fue soportada del hecho de que habría habido mejor comportamiento con paredes más pesadas.

(Craik y Smith 2000) han escrito ampliamente sobre la utilización de (SEA) y su aplicación en sistemas dobles ligeros para edificios. En una publicación del año 2000 muestran los resultados obtenidos mediante una realización de varias prácticas usando diferentes tipos de material como hojas de una estructura doble, las cuales estaban fijadas a perfiles de madera. La perfilería produce nuevos caminos de transmisiones de sonido entre las hojas de la estructura doble, dependiendo de la distancia entre fijaciones de las hojas a la perfilería. En este caso dispusieron que la mitad de la longitud de onda igual a la distancia entre fijaciones. La estructura de fijación también afecta la transmisión. El efecto era diferente dependiendo también del tipo de conexión (por puntos o por líneas) y también dependiendo de la longitud del perímetro de las dos hojas, cuando se fijan a una misma estructura.

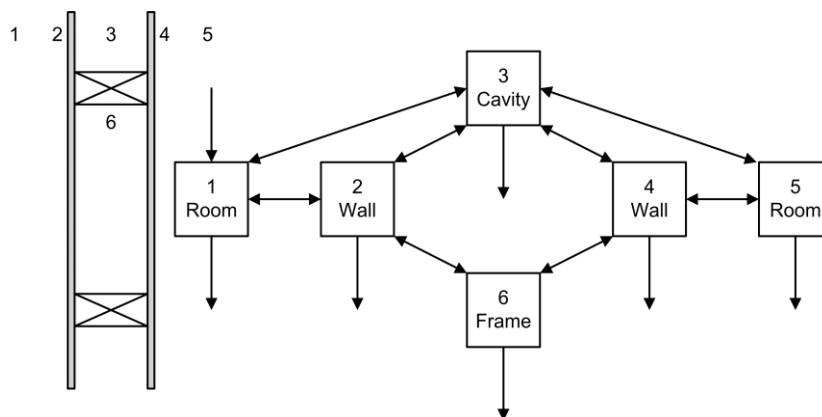


Fig.3.38 Modelo (SEA) de paredes dobles usado por Craik y Smith. Cuando el acople estructural son fijaciones por puntos (E2)

Los investigadores crearon dos modelos, uno para estudiar las altas frecuencias y otro para las bajas. En las bajas frecuencias la pared doble era considerada como una sola y fue utilizada la ley de masas para calcular la transmisión sonora. Los resultados no fueron muy satisfactorios principalmente por intentar calcular con precisión, tanto al interior como al exterior de la cámara.

En el artículo *Sound Transmission through double leaf lightweight partitions Part I: airborne sound* (R.J.M. Craik, R.S. Smith 2000)[13] Se comprueba la efectividad del modelo (SEA) para la predicción de sistemas de doble hoja. Se desarrollaron tres tipologías diferentes de sistemas dobles que fueron modelados mediante (SEA) y simultáneamente se realizaron ensayos de laboratorio para cotejar los resultados. En los ensayos se midió también el tiempo de reverberación, valor que fue usado para el modelo (SEA) y para hallar el factor de pérdidas.

Los autores concluyeron que es importante tener en cuenta el rango de frecuencia considerado y el método de construcción para obtener los mejores resultados. A bajas frecuencias la doble hoja puede modelarse adecuadamente como una partición simple mientras que a altas frecuencias es necesario subdividirla en varios subsistemas. La estructura que sustenta las dos hojas puede considerarse como un sistema de conexión por puntos o lineal, dependiendo de la distancia entre fijaciones.

Una de las características y ventajas de (SEA) es que es posible calcular las transmisiones de sonido a través de recorridos individuales y de la estructura completa, por lo que se pueden hacer cambios fácilmente en el diseño. En este artículo, se examinan los recorridos de transmisión sonora a través del conjunto completo y la estructura.

Las diferentes transmisiones que atraviesan la cámara se estudian de forma independiente (se determina que en la cámara, las transmisiones se comportan diferente que en el resto del conjunto).

Las transmisiones a través de la cámara pueden subdividirse en varias partes. Las que atraviesan la cámara no son posibles de predecir correctamente, pero en cambio las transmisiones a través de la estructura si, especialmente cuando los puntos de conexión son pocos e independientes.

En cuanto a las conexiones entre hojas, el acople estructural depende del número de fijaciones. Entre más puntos de fijación haya, más se incrementa la transmisión al interior de la cámara. Algunos de los resultados obtenidos se asemejaban a los del ensayo pero en otros fue difícil obtener mejor precisión.

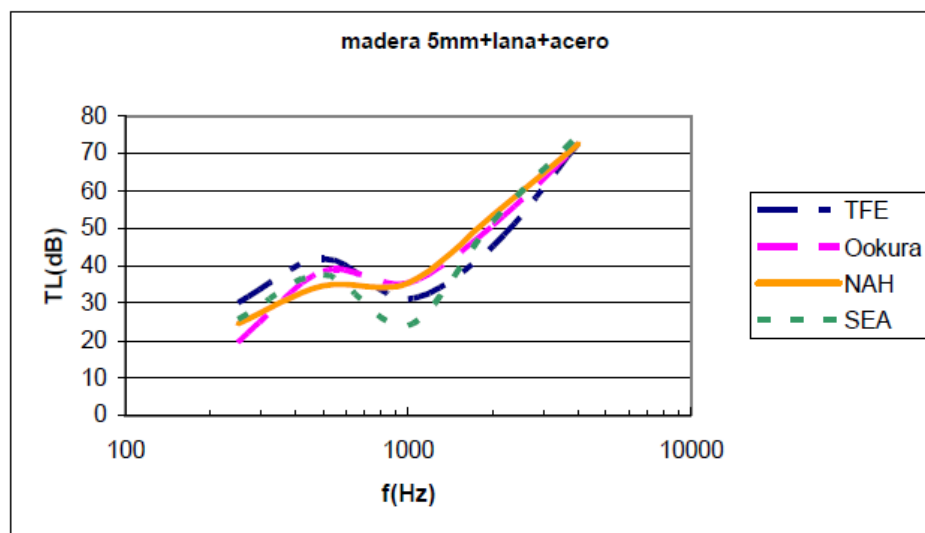
Los autores concluyen que en general a través del método (SEA) es posible modelar cualquier tipología constructiva con diferentes elementos de transmisión; con este método se pueden separar las transmisiones de recorridos a través de la estructura y a través de la cámara, posición importante para definir los beneficios de la absorción o el tipo y número de conexiones entre hojas.

3.2.5.1 Estudio de casos y resultados con diferentes modelos de predicción

Un referente de la utilización de modelos de predicción acústica de sistemas multicapas es el (NAH) “*Nearfield Acoustical Holography*” descrito en la tesis doctoral “*Estudio del comportamiento acústico de estructuras multicapa mediante NAH*” (Escuder Silla Eva M^a, 2005)[14] Esta técnica consiste en la reconstrucción de un campo sonoro y la velocidad de vibración de un objeto o fuente sonora a partir de medidas con micrófonos en un plano paralelo y cercano a la fuente. La herramienta (NAH) aparece en 1980 como una solución mejorada de la Holografía Acústica Convencional desarrollada ya anteriormente en 1960.

Las medidas se hacen normalmente en una superficie plana (plano de holograma) y estos datos se utilizan para reconstruir un campo tridimensional. En la tesis doctoral mencionada, se realiza un estudio experimental del comportamiento acústico vibratorio de estructuras multicapa usando el modelo NAH. Mediante la metodología es posible evaluar las pérdidas por transmisión y obtener representaciones visuales del comportamiento vibratorio de cada configuración.

Los resultados obtenidos son comparados con otros resultados usando el modelo (SEA) y otros modelos teóricos, obteniendo resultados muy similares (Fig. 3.39).



f(Hz)	TFE	Ookura	NAH	SEA
250	30	20	25	26
500	42	39	35	38
1000	31	35	35	24
2000	45	51	54	52
4000	73	72	73	75

Fig.3.39 Comparación de diferentes modelos de predicción en una configuración multicapa. Lámina de madera 5mm + lana mineral + lámina de acero en la obtención de niveles de transmisión. (E3)

En este caso se observa una aproximación muy cercana de los resultados con los diferentes modelos de predicción utilizados.

La aproximación de los diferentes modelos empleados para la predicción acústica es variable dependiendo de la base sobre la que se ha construido el modelo y las características de los elementos a medir utilizadas para la predicción. En el artículo *Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements* (Kurra, Selma 2012)[15] se realiza una comparación de tres modelos de predicción de aislamiento acústico al ruido aéreo utilizados en sistemas multicapa comparándolos con mediciones de laboratorio.

Los tres modelos estudiados son: 1. el programa de software (INSUL) que tiene aplicaciones gráficas, el cual está basado en el modelo teórico de (Sharp 1978) con algunas modificaciones, 2. el programa de software (Acousys) que está basado en el modelo (TMM) “*Transfer Matrix Method*” y 3. el programa de software (FMulay) basado en el modelo de impedancia mejorado. La comparación se realizó mediante un análisis estadístico de resultados obtenidos del índice de reducción acústica R_w ($C;C_{tr}$) y en bandas de 1/3 de octava, de elementos compuestos por diferentes materiales, donde se encontró que los dos últimos modelos están mejor correlacionado entre si y que a altas frecuencias hay grandes diferencias en todos los modelos.

El enfoque en los tres modelos se concentra en el cálculo de aislamiento al ruido aéreo, es decir, en la determinación de las pérdidas por transmisión (TL) en sistemas multicapa isotrópicos; los tres comparten características como:

- El empleo de teorías básicas.
- Permiten el cálculo de aislamiento al ruido aéreo para elementos simples, dobles y multicapa.
- Tienen en cuenta las dimensiones de los elementos a medir.
- Son modelos que funcionan con interface de windows reduciendo los tiempos de cálculo.
- Proporciona los valores de índice de reducción sonora en bandas de 1/3 de octavas y los resultados son visibles en tablas y diagramas facilitando las comparaciones.
- Permite establecer una base de datos con la definición de nuevos materiales con sus características físicas como espesor, densidad, (*Loss factor*), (*Poisson ratio*), (*Elasticity modulus*) y las dimensiones del elemento.

Éste estudio de análisis estadístico se realizó para los siguientes propósitos:

1. Comparación de los resultados de cálculo
2. Investigación de diferencias entre los modelos
3. Verificación de resultados con datos de experimentos realizados siguiendo la norma ISO-717

Obteniendo como resultado los siguientes valores de aislamiento:

No.	Material	R(FMULAY)	R(INSUL)	R(ACOUSYS)
11	Concrete 15 cm + air 100 mm + gypsum board	52 (2; 0)	62(-1; -5)	55(-2; -4)
12	Concrete 15 cm + glasswool 100 mm (22,000) + gypsum board	52(27,20)	73(-2; -6)	83(-4; -11)
13	Solid brick 85 mm + air 100 mm + gyps. board	52 (-2; -7)	52(-2; -6)	49(-4; -8)
14	Solid brick 85 mm + glasswool 100 mm + gyp. board	52(19,12)	64(-1; -6)	68(-2; -7)
15	Light concrete block + glasswool 100 mm + gyps. board	52 (6; 0)	52(-3; -9)	57(-2; -8)
16	Light concrete block + air 100 mm + gypsum board	46 (-3; -9)	41(-2; -8)	42(-3; -9)
17	Hollow brick 13.5 + air 100 mm + gypsum board	52(-5; -11)	48(-2; -8)	48(-5; -10)
18	Hollow brick 13.5 + glasswool 100 mm + gypsum board	52 (9; 3)	59(-4; -11)	61(-4; -9)
19	Bims concrete block 19 + glasswool 100 mm + gypsum board	52 (11; 5)	58(-3; -9)	59(-3; -8)
20	Bims concrete block 19 + air 100 mm + gypsum board	51(-4; -10)	47(-2; -7)	47(-5; -10)
21	Cemented fiber board 30 mm + air 100 mm + gypsum board	44 (-2; -8)	46(-1; -6)	40(-2; -7)
22	Cemented fiber board 30 mm + glasswool 100 mm + gyps. board	52 (7; -1)	56(-2; -8)	63(-4; -11)
23	Gypsum board + air 100 mm + gypsum board	32 (-2; -7)	37(-2; -7)	29(-2; -6)
24	Gypsum board + glasswool 100 mm + gypsum board	49(-8; -16)	46(-4; -11)	49(-6; -14)

Fig.3.40 Tabla de resultados (R) obtenidos con los tres diferentes modelos de predicción, aplicados a particiones multicapa. (B20)

En el artículo se concluye que la herramienta (Acousys) tiene resultados muy cercanos con los de laboratorio en bajas frecuencias, mientras que (INSUL) tiene menos desviaciones a altas frecuencias. En general las diferencias entre los modelos y las mediciones son amplias especialmente, en el rango de las frecuencias altas.

Esta aportación revela que no hay mayores diferencias entre los modelos como se esperaba al inicio, sin embargo es necesario hacer algunas calibraciones por ejemplo de los modelos de (Acousys) para altas frecuencias. Por otro lado, los modelos realizados en (Acousys) y (FMulay) son capaces de calcular estructuras más complejas y el (INSUL) está más limitado en la aplicación de elementos comunes en edificios. Consecuentemente, la evaluación revela que en este caso la herramienta (FMulay) es la más fiable en comparación con las otras dos herramientas.

3.2.6 Análisis de las condiciones generales para el aislamiento acústico de un elemento

Para tener en cuenta el comportamiento de aislamiento acústico al ruido aéreo de un elemento, se debe partir de las condiciones de influencia, de las cuales se derivarán los estudios y análisis o la implementación de modelos de medida y predicción.

Las condiciones para el aislamiento acústico de un elemento, dependen principalmente de su espesor y densidad. En cuanto a los materiales utilizados, del módulo de elasticidad y del factor de pérdidas principalmente y a menor escala del coeficiente de "Poisson" (deformación secundaria o inducida), estas condiciones influyen de forma determinante en la obtención de resultados. Todas estas características afectan también en la frecuencia de coincidencia f_c y la frecuencia de resonancia de un

sistema doble f_{msm} , siguiendo la aplicación de ley de masas y de masa-resorte-masa en un cerramiento simple o doble. Algunos de los conceptos y su influencia en el aislamiento acústico son:

Módulo de elasticidad “módulo de Young”

Dependiendo de la rigidez de un material sometido a diferentes tensiones sin sufrir deformaciones permanentes (vuelve a su estado original) (ley de Hooke) es su comportamiento acústico. Entre más bajo es el módulo de elasticidad (por lo tanto más flexible), contribuye mejor al aislamiento acústico.

Factor de pérdidas “loss factor”

El factor de pérdidas en un material consiste en la capacidad que tiene para disipar la energía mecánica. Influye mayormente en la transmisión al ruido aéreo y vibracional, a mayor “loss factor” mejor es el aislamiento acústico especialmente en altas frecuencias.

En la base teórica de varios métodos de predicción acústica los conceptos descritos son fundamentales, por lo tanto conocer estos valores de los elementos y materiales utilizados es de gran importancia.

Con el uso de herramientas de simulación y predicción disponibles con el desarrollo de software, es posible conocer de manera muy aproximada el comportamiento acústico de un elemento y como mejor aporte contrastar resultados con ensayos realizados: de laboratorio (un ambiente más controlado) o in-situ (con mayor complejidad por las variables a tener en cuenta) así mismo estas herramientas permiten variar algunos de los parámetros o condiciones del elemento a medir para su análisis.

3.2.6.1 Ejemplo práctico de la influencia de los conceptos mencionados, en el aislamiento acústico de una pared simple usando el método (SEA)

Con el uso de herramientas de simulación se realizó un análisis comparativo del aislamiento acústico al ruido aéreo de un muro de bloque hueco cerámico con un acabado de yeso por lado y lado, el cual fue medido en laboratorio y luego simulado con el programa de software VA-one 2012 que está desarrollado con el método (SEA).

El uso del método (SEA) a través de la herramienta VA-one 2012 para la simulación y posterior obtención de resultados de aislamiento del muro, requiere del conocimiento y aplicación de las características descritas anteriormente: peso, densidad, módulo de elasticidad, factor de pérdidas y coeficiente de poisson (Tabla 3.1)

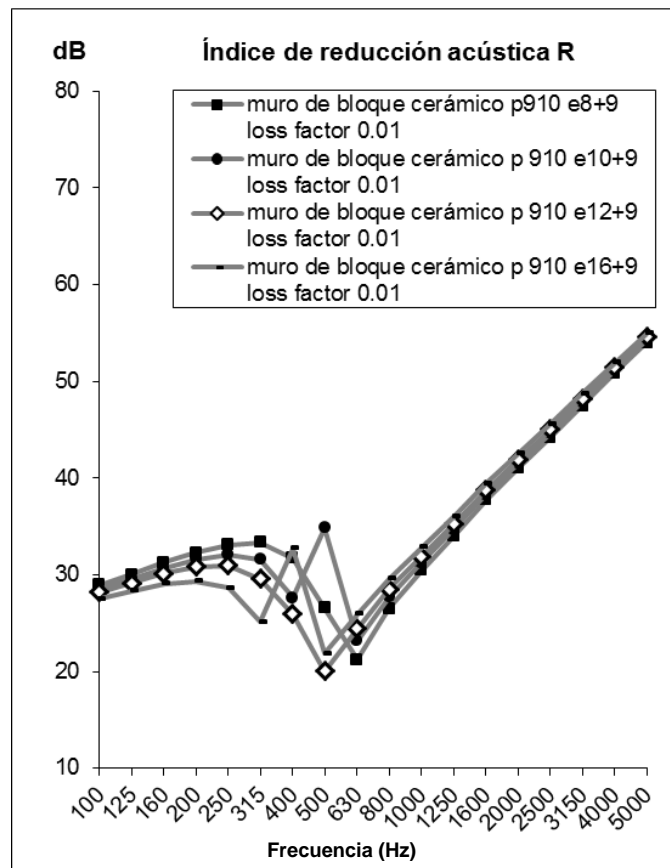
Características de muro de albañilería de bloque hueco cerámico con acabado de yeso por lado y lado para ser simulado en VA-one 2012 con el método (SEA)					
Especificaciones de dimensionamiento L=4.00m x H=3.26m Área 13.04m ²					
Material	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (Pa)	Factor de pérdidas	Coefficiente de poisson
Ladrillo hueco cerámico	0.04	ρ 910 (Catálogo de materiales CTE)	E=8x10 ⁹ 10x10 ⁹ 12x10 ⁹ 16x10 ⁹ 18x10 ⁹	η =0.01 0.08 0.7 0.008	V= 0.3
Yeso	0.01	ρ 650	E=26x10 ⁸	η =0.03	V =0.3

Tabla 3. 2 Características de muro de bloque cerámico simulado. Datos utilizados para la simulación del muro de albañilería de bloque cerámico. Los datos del yeso fueron tomados de la base de datos de otro programa de simulación (dBK Aisla) (D')

Usando para el material del bloque cerámico: factor de pérdidas constante $\eta=0.01$, coeficiente de *poisson* V= 0.3 y densidad $\rho=910$, variando solo los valores del módulo de elasticidad E=8x10⁹, 10x10⁹, 12x10⁹, 16x10⁹. Para el yeso no se varían las características de material ya que en el programa VA-one se considera como un tratamiento de acabado y no influye tanto en el aislamiento del conjunto.

Como primer ejercicio utilizando VA-one 2012 se observa una variación en los resultados de la curva de aislamiento del muro cuando se cambian los valores de los parámetros de módulo de elasticidad y factor de pérdidas.

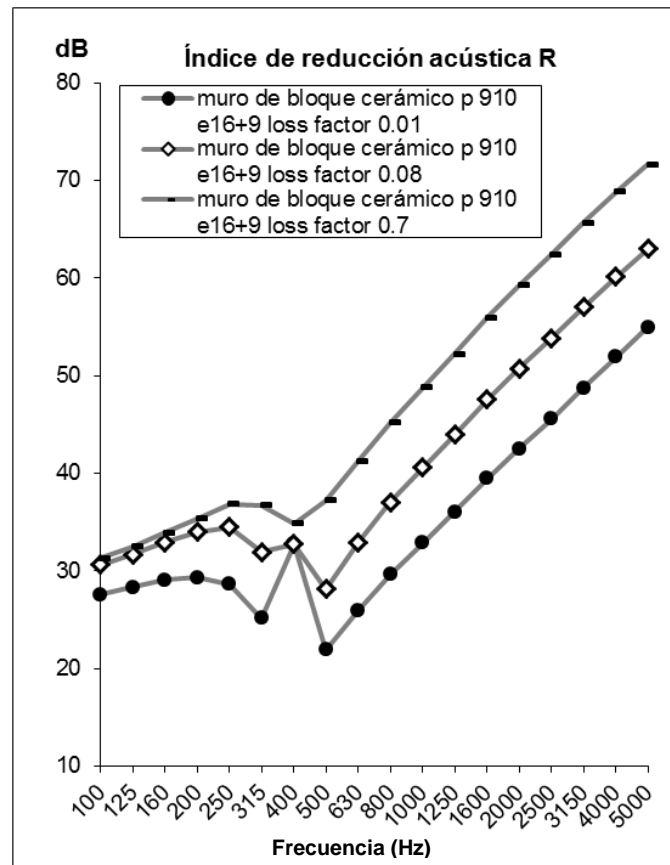
En la siguiente gráfica (Graph 3.1) se muestran los resultados obtenidos en (R) dB en del aislamiento acústico del muro.



Graph 3. 1 Resultados de la curva de aislamiento para un muro de bloque hueco cerámico. Cambiando el valor del módulo de elasticidad $E= 8 \times 10^9$, 10×10^9 , 12×10^9 y 16×10^9 mediante la utilización de VA-one 2012 (D')

La diferencia en el aislamiento acústico entre los casos comparados no es muy notoria aparentemente, sin embargo al variar el módulo de elasticidad, se nota su influencia en el desplazamiento de la frecuencia f_c del muro.

El otro caso, variando solo los valores de factor de pérdidas del bloque cerámico teniendo: módulo de elasticidad constante $E= 16 \times 10^9$, coeficiente de *poisson* $V= 0.3$ y densidad $\rho=910$ y los diferentes factores de pérdida $\eta=0.01$, 0.08 y 0.7 . En los resultados obtenidos (Graph 3.2.), se observan más diferencias en las curvas de aislamiento de los valores comparados especialmente a altas frecuencias, pero no en la que puede ser la caída por la frecuencia crítica del muro como en el caso anterior (Graph 3.1).



Graph 3. 2 Resultados de la curva de aislamiento para un muro de bloque hueco cerámico cambiando el valor del factor de pérdidas $\eta=0.01, 0.08$ y 0.7 mediante la utilización de VA-one 2012 (D^o)

El aislamiento acústico del muro de bloque hueco cerámico fue ensayado en laboratorio para medir el rendimiento acústico de un trasdosado, la realización se llevó a cabo en el laboratorio LGAI *Technological Center S.A.* para (LITA) *Laboratori d'innovació i Tecnologia a l'Arquitectura Universitat Politècnica Catalunya* en Noviembre de 2012 siguiendo la respectiva reglamentación acústica para métodos de ensayo en laboratorio.



Img. 3. 1 Imágenes del bloque cerámico usado y construcción del muro simple. 4cm de espesor con acabado de yeso de 1cm por los 2 lados (F1)

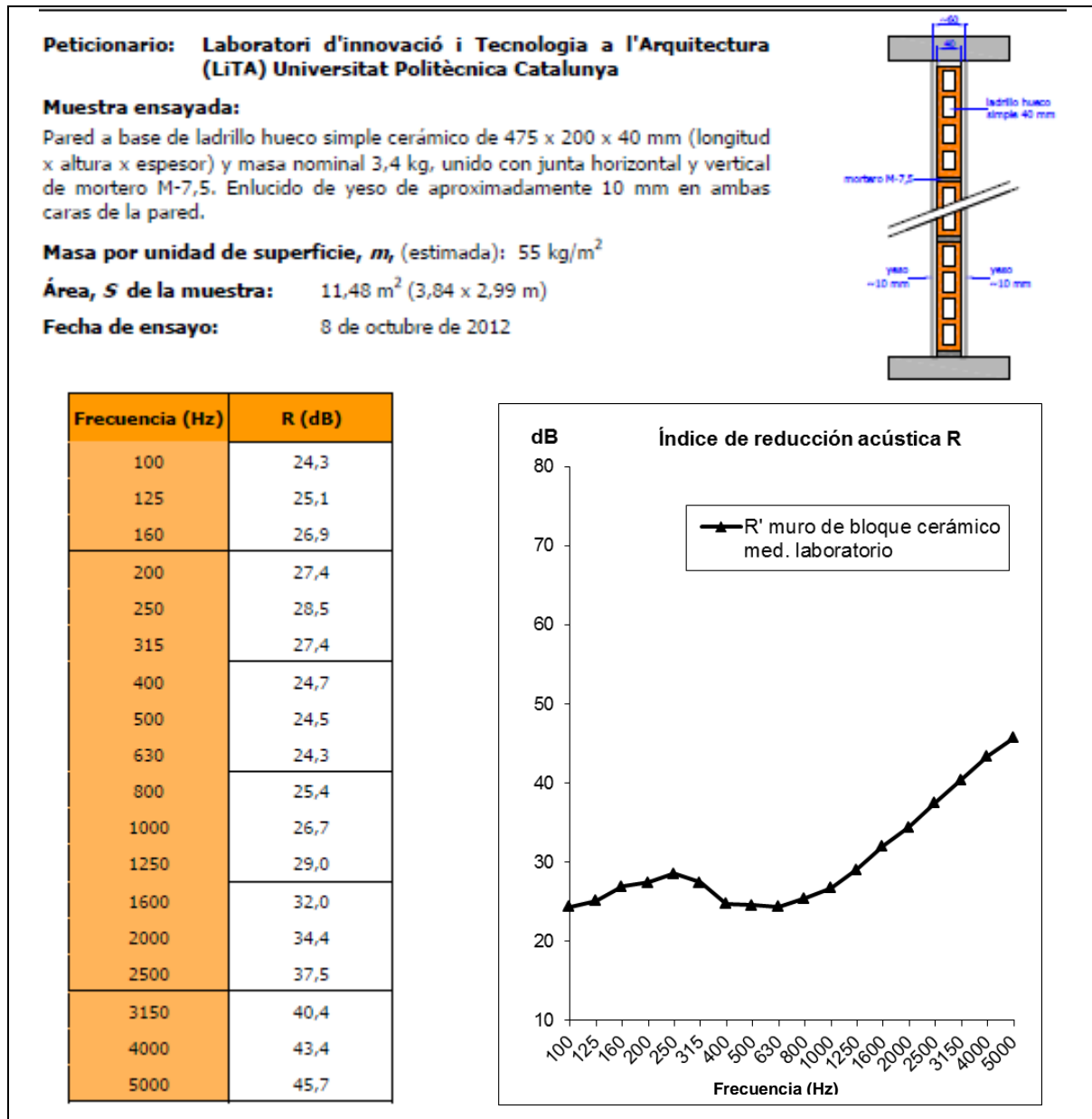
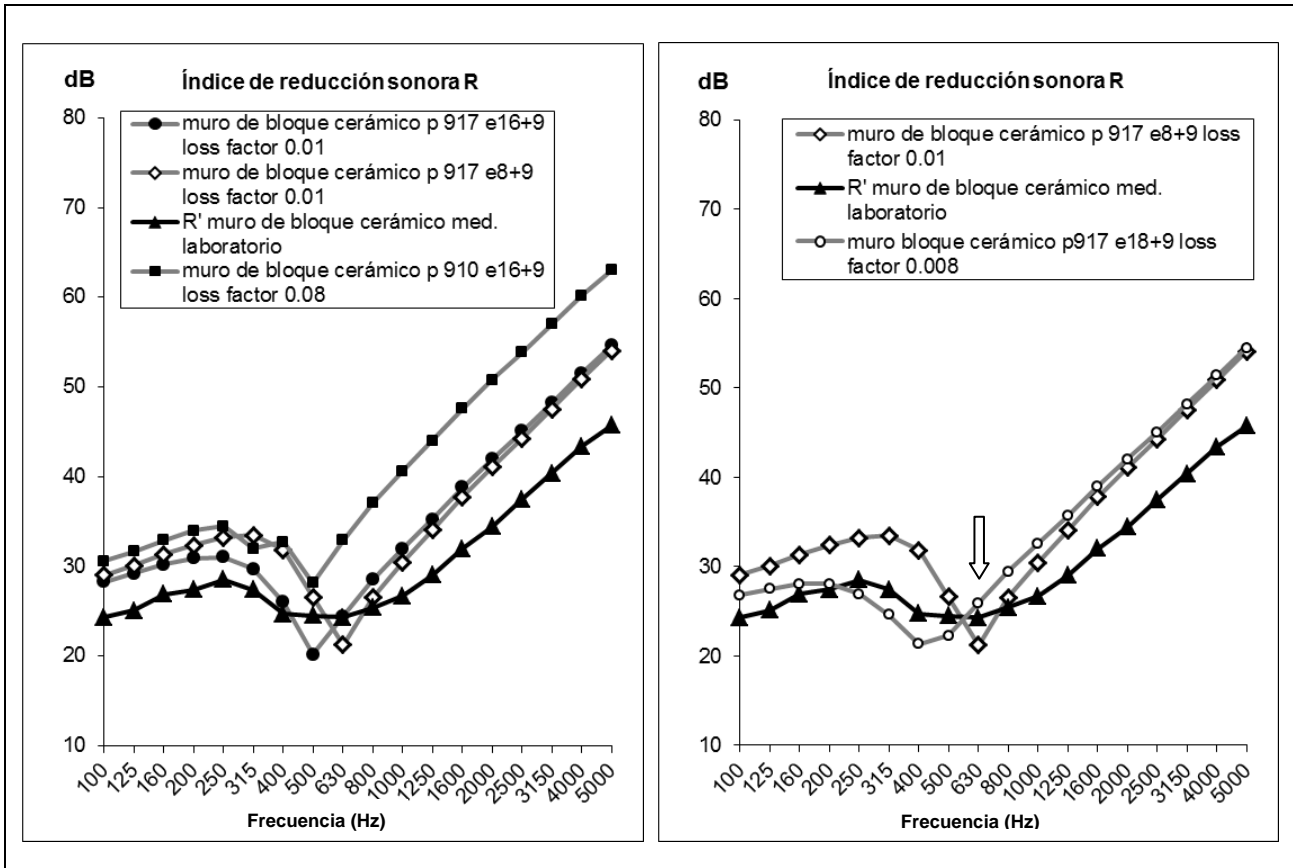


Fig.3. 41 Curva de aislamiento obtenida en laboratorio del muro simple de bloque hueco cerámico. (F1)

La frecuencia de coincidencia f_c para el muro está a 394.2Hz hallada siguiendo la fórmula correspondiente (Ver Anexo D) presente en la curva de aislamiento alrededor de 400Hz (Fig. 3.41)

A partir de los resultados de la medición en laboratorio, se comparan los valores obtenidos en la simulación del muro en VA-one. Variando los parámetros de módulo de elasticidad y factor de pérdidas se busca la aproximación entre los dos métodos. Como resultado se obtiene:



Graph 3. 3 Comparación de valores obtenidos con los dos métodos, medición en laboratorio y simulación VA-one2012. En la gráfica de la derecha se muestran las curvas que más se aproximan a la medición en laboratorio variando algunos de los parámetros y la caída de la f_c . (D')

Como conclusión de éste ejercicio, es evidente que se pueden reproducir los valores de mediciones obtenidos en ensayos de laboratorio con la herramienta de software VA-one mediante el método (SEA).

Se observa que los valores de módulo de elasticidad y factor de pérdidas influyen directamente en el aislamiento acústico de un elemento y la variación de estos valores, en este caso, contribuyen en la aproximación de la curva de índice de reducción sonora obtenida en las mediciones de laboratorio. Incluso, conociendo la f_c de una pared simple, el módulo de elasticidad puede irse variando para acercarse a este valor como se observa en la gráfica de la derecha(Graph 3.3), así mismo la variación del factor de pérdidas puede aumentar y disminuir el índice de reducción sonora.

Por otro lado la información que se tiene del ensayo es muy básica: la curva (R) obtenida, las especificaciones básicas del bloque utilizado y las dimensiones del muro por lo que para realizar las simulaciones es imprescindible conocer la densidad del muro y las características mecánicas y acústicas de los materiales utilizados, como también la frecuencia de coincidencia f_c de la pared simple.

3.2.6.2 Aislamiento acústico de una pared doble y el uso del método (SEA)

En varias investigaciones citadas en el estado del arte, la mejora en el aislamiento acústico al ruido aéreo de un elemento doble (pared-cámara-pared) puede obtenerse mediante el aumento de separación entre paredes (espesor de la cámara). Debajo de la frecuencia de resonancia masa-aire-masa, el aislamiento acústico de un elemento doble se comporta igual que el de uno simple con la misma masa. En altas frecuencias el aislamiento puede aumentar con la cámara vacía hasta 6dB, sin embargo este rendimiento puede verse afectado por las resonancias producidas entre las dos paredes, lo que mejora cuando se adhiere un material absorbente en el interior. En este caso, el aislamiento acústico depende principalmente de las características del material instalado: su capacidad de absorción y porosidad.

A bajas frecuencias (<200Hz) las dos hojas de un cerramiento doble no actúan de forma independiente. Por ejemplo cuando se utilizan métodos de predicción como el (SEA), un sistema doble es mejor modelarlo como uno simple a bajas frecuencias. La transición de la región de bajas a altas donde cada hoja se comporta de manera independiente es gradual y puede extenderse frecuencia a frecuencia (Rober J.M. Craik *Sound transmission through buildings* 1996).

En este caso la rigidez no afecta tanto el comportamiento en bajas como en altas frecuencias, donde el aislamiento depende de la rigidez y muelle entre las dos hojas mostrando diferencias en algunos casos hasta de 40dB.

Elementos de conexión entre paredes

Otro factor influyente en el comportamiento acústico de un cerramiento doble son los puntos de conexión entre las dos paredes, las fijaciones pueden generar otros recorridos de transmisión. La relevancia en la utilización de los elementos de conexión entre hojas depende del tipo de cerramiento doble, si el aislamiento de la cámara es muy bueno, las transmisiones a través de los elementos de conexión son muy importantes, pero si por el contrario el aislamiento de la cámara no es muy bueno, el tipo de elementos de conexión no es relevante porque la mayor parte de transmisión de sonido en un elemento doble se hace a través de la cámara y no de los elementos de conexión. (Poblet-Puig Jordi. *Tesis doctoral Numerical modelling of sound transmission in lightweight structures* 2008)

Con la utilización de (SEA) para la simulación y predicción de transmisiones a través de los puntos de conexión, los nuevos recorridos de transmisión generados pueden modelarse mediante muelles que establecen un vínculo entre los puntos de las dos hojas.

3.2.7 Comentarios sobre el estado del arte

Las investigaciones en temas de fachada, apuntan a que la doble hoja o los sistemas multicapa, pueden responder más eficientemente a la complejidad necesaria de las condiciones requeribles a nivel de protección en los diferentes aspectos y contribuyen al adecuado funcionamiento de la fachada.

A nivel general se obtienen mejores resultados en la reducción sonora cuando la fachada tiene más de una capa y más si se incluye una cámara de aire intermedia con un material acústicamente absorbente al interior de la cámara de aire intermedia. Por otro lado, las aperturas de un cerramiento por temas de ventilación, tanto si es de un sistema simple o doble a través de una de las hojas o de la cámara de aire intermedia (como se ha visto en algunos casos estudiados), aunque hay una disminución de la reducción acústica del elemento, no constituye una desmejora del aislamiento en el conjunto.

Es importante agregar que el comportamiento acústico de cualquier sistema múltiple es complejo, y que depende de varias condiciones que deben estudiarse por separado según la solución que se quiera tratar.

Por ejemplo el comportamiento a bajas frecuencias; en cerramientos exteriores como las fachadas es de gran importancia debido a que la mayoría de ruido proveniente del exterior tiene una gran cantidad de información en el rango de bajas frecuencias, las cuales son de difícil tratamiento para su atenuación, en este aspecto según varias investigaciones, un cerramiento doble puede aportar mejoras de aislamiento en este aspecto con la utilización de absorbentes acústicos de tipo resonadores.

En cuanto a la (FVL) o la adición de una hoja extra ligera en un cerramiento exterior grueso y pesado, con interposición de una cámara de aire intermedia ventilada, es una solución relativamente reciente que tiene origen en otros sistemas, como son los aplacados de revestimiento y los premarcos (Paricio 2006). Este sistema de fachada utiliza simultáneamente diferentes capas, que cumplen cada una de ellas una función específica, y que al mismo tiempo pueden ser adaptables a casi cualquier cerramiento. Aunque inicialmente su labor principal es la de dar un aspecto de acabado al edificio, también ofrece protección en varios niveles, como la impermeabilidad o la protección de la radiación sola.

Adicionalmente la (FVL) puede contribuir a la protección contra el ruido aéreo exterior por teniendo en cuenta las siguientes características:

- La interposición de gran cantidad de masa
- La adición de otras capas (especialmente si son de diferente densidad, espesor y características físico-mecánicas)
- La distancia de separación entre estas y
- Las condiciones del espacio de separación.

Además de las mejoras globales en la reducción de transmisión al ruido aéreo que se pueden obtener con un doble cerramiento o del tipo de (FVL), también surgen otras variables menores a considerar con capacidad de influencia:

- Las propiedades acústicas del muro base o cerramiento inicial, en el caso de la (FVL), están condicionadas según cómo son sus características mecánicas es en comparación a las capas que a él se adhieren: masa, espesor, grado de porosidad o capilaridad, entre otras, parámetros que indudablemente determina el comportamiento acústico del conjunto, razón por lo que algunos autores y documentos se basan solo en el elemento base para determinar los valores de aislamiento acústico de la (FVL).
- La aparición de resonancias en sistemas dobles es una problemática que puede influir en el aislamiento del conjunto dependiendo de la frecuencia crítica de cada una de las hojas y de la frecuencia de resonancia del sistema doble. Este tema puede ser controlado dependiendo de los materiales utilizados, espesores y distancias entre capas, así como las distancias de las fijaciones de la subestructura. A bajas frecuencias puede ser muy eficaz el uso de resonadores y hacia las altas frecuencias el uso de material absorbente puede contribuir ampliamente en la reducción de transmisión del sonido.
- La ventilación; como es sabido, en el caso de la (FVL) la cámara de aire intermedia está mayormente abierta al aire exterior y éste es uno de los temas más complejos a tratar en el aislamiento acústico y que requiere una mayor observación.

En cuanto a la simulación y predicción de los valores de aislamiento acústico, y por lo que respecta a la especialización de los modelos de simulación, aparecen varias herramientas destacables de base teórica como por ejemplo (SEA) y (FEM) que ayudan y complementan la evaluación del aislamiento acústico, que permiten avanzar en el tema del comportamiento acústico de sistemas y materiales. Las herramientas de software y los instrumentos de medición adquieren cada vez una mayor precisión y se hace posible realizar simulaciones altamente comparables con las mediciones reales, posiblemente con menor inversión de tiempo y de recursos.

En general la profundización en el tema acústico de la fachada múltiple está abierta y presenta una gran oportunidad de continuidad en su evolución. Hay grandes aportes desde la interdisciplinaridad del campo de la acústica que está directamente ligado y es aplicable a la arquitectura en soluciones constructivas para fachada.

3.3 Fuentes y referencias capítulo 3

Codificación de fuentes y referencias

Fuente A: Libro
Fuente B : Artículo (publicación, paper, congreso, etc)
Fuente C: Internet
Fuente D: Elaboración propia de Andrea Niampira Daza
Fuente D': Elaboración propia en base a resultados o varias consultas
Fuente E: Tesis
Fuente F: Ensayos acústicos

A2: Hausladen, Gerhard; de Saldanha, Michael; Liedl, Petra, with contributions from Kaufmann, Hermann “*Climate Skin: Building-skin concepts that can do more with less energy*” (Basel : Birkhäuser, cop. 2006).

A3: Hopkins Carl. “*Sound Insulation*” Elsevier (Oxford UK 2007)

B11: [3] Wei-Hwa CHIANG, Yi-Nuo CHAO, y Chi-Jeh WU. “Sound Insulation of Double Skin Façade” National Taiwan University of Science and Technology, (pg.139-149), Taiwan 2004.

B12: [4] M. Blasco, C. Crispin, B. Ingelaere. *Acoustical performances of Double Ventilated Glass facades. Construction Physics and Indoor Climate Department, Belgian Building Research Institute. Inter.noise 2004 The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering.*

B13: [5] J. Royar. Saint-Gobain Isover G+H AG, Dr Remain Albert; W. Scholl. “*Acoustical behavior of dry wall linings*”. *Forum Acusticum 2005*, Budapest Hungría 2005.

B14: [6] L. Ruiz, E. Delgado, F.J. Neila, S. Vega. “*Comparativa del comportamiento Acústico entre Fachadas Multicapas Ligeras y Fachadas Tradicionales*”. Publicación Materiales de construcción, Vol.62, 397-409, Julio-Septiembre 2012.

B15: [8] A. Dijkmans^a y G. Vermeir, W. Lauriks “*Sound transmission through finite lightweight multilayered structures with thin air layers*” *Afdeling Akoestiek en Thermische Fysica—Afdeling Bouwfysica, Katholieke Universiteit Leuven.* Publicación *Acoustical Society of America* 128 (pp. 3513-3524) 2010

B16: [9] Satoshi^{1*} Sugie, Junichi Yoshimura¹ y Teruo Iwase² “*Effect of inserting a Helmholtz resonator on sound insulation in a double-leaf partition cavity*”. ¹ Kobayasi Institute of Physical Research, Higashi-motomachi. ² Department of Architecture, Faculty of Engineering, Niigata University. *The Acoustical Society of Japan* (2009)

B17: [10] M.H.F. De Salis, D.J. Oldham, S. Saharpls. “*Noise control strategies for naturally ventilated buildings*”. *Acoustics Research Unit School of Architecture and Building Engineering, University of Liverpool. Sheffield Hallam University.* Publicado en *Building and Environment* No. 37 pg. 471-484, UK. 2002

B18: [11] R. Lyons “*Investigation of an Open Screen Acoustic Performance*”. *Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University; B.M. Gibbs Acoustics Research Unit, School of Architecture and Building Engineering. The University of Liverpool.* Publicación *Applied Acoustics*, Vol. 49, No. 3, pp. 263-282, UK.1996.

B19: [13] R.J.M. Craik, R.S. Smith “*Sound Transmission through double leaf lightweight partitions Part I: airborne sound*” *Department of Building Engineering & Surveying. Heriot-Watt University, Edimburgo UK, Applied acoustics* 61 (pp. 223-245) 2000.

B20: [15] Kurra Selma “*Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements*” *Department of Environmental Engineering, Bahcesehir University Estambul Turkia, Applied Acoustics* 73 pp. 575-589, Enero de 2012.

C26 : “*Façade Le bonne enveloppe*”. Publicación de la Empresa *Flum Roc fabricante de aislamientos minerales* <http://www.flumroc.ch/documents/files/2905.pdf>

C27: “*Aspects et faits concernant les façades*” APSFV *Association professionnelle Suisse pour des façades ventilées* <http://www.sfhf.ch/de/downloads/index.php> antes http://www.sfhf.ch/uploads/media/VHF_bro_fr.pdf

E1: [7] Valtteri Hongisto. “*Airborne sound insulation of wall structures-measurement and prediction methods*” Tesis doctoral. *Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing Helsinki University of Technology, Finlandia* Diciembre 2000.

E2: [12] Magnus Lundin “*Sound transmission through double walls using Statistical Energy Analysis. A new element formulation for non-resonant response*” Tesis de master *Marcus Wallenberg for Sound and Vibration Research Royal Institute of Technology.* (Estocolmo Suecia 2011).

E3: [14] Escuder Silla Eva M^a “*Estudio del comportamiento acústico de estructuras multicapa mediante NAH*” Tesis doctoral Departamento de Física Aplicada; Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (España Julio de 2005).

F1: Ensayo 12/5734-1660 Applus Centro Tecnológico LGAI para el Laboratori d’Innovació y Tecnologia a l’Arquitectura (LITA) Universitat Politècnica de Catalunya Noviembre de 2012.

Listado de figuras capítulo 3

Fig.3. 1 Esquema de desarrollo de las dos fases planteadas en la tesis. (D).....	77
Fig.3. 2 Sistema Box Window. (A2).	80
Fig.3. 3 Sistema Corridor Façade. (A2).....	80
Fig.3. 4 Sistema Multistorey Façade. (A2).	80
Fig.3. 5 Sistema propuesto de Multistorey. (B11).....	82
Fig.3. 6 Gráfica de resultados del sistema Multistorey. (B11).....	82
Fig.3. 7 Sección a escala del sistema desarrollado. (B11).....	83
Fig.3.8 Gráfico de resultados del sistema Box Window. (B11).....	83
Fig.3.9 Variaciones del aislamiento acústico entre diferentes fachadas Double Ventilated Facades (DVF). (B12)	84
Fig.3.10 Sección Climate Façade. (B12)	85
Fig.3.11 Diferencia de niveles Climate Façade. (B12)	85
Fig.3.12 Sección Double Window. (B12)	85
Fig.3.13 Diferencia de niveles Double window. (B12)	85
Fig.3.14 Esquema sección de la doble fachada de cristal. (B11).....	86
Fig.3.15 Gráfica de diferencia de niveles de la doble fachada. (B11).....	86
Fig.3.16 Sección longitudinal de diferentes transmisiones de una doble fachada ventilada. (B11).....	87
Fig.3.17 Aislamiento acústico aparente de diferentes soluciones de fachada con revestimiento. (C26).....	90
Fig.3.18 Valores comparativos de aislamiento de (FVL). (C27).....	91
Fig.3.19 Rendimiento acústico de diferentes sistemas ligeros sobre tres tipos de muro base. (B13).....	93
Fig.3.20 Características de los cerramientos multicapa. (B14)	94
Fig.3.21 Características de los cerramientos tradicionales ensayados en laboratorio. (B14)	95
Fig.3.22 Valores de aislamiento acústico de los sistemas pesados tradicionales. (B14).....	96
Fig.3.23 Valores de aislamiento acústico de los sistemas ligeros. Resultados de ensayos en laboratorio. (B14)	96
Fig.3.24 Resultados finales de la publicación. (B14)	97
Fig.3.25 Resultado de mediciones de la mejora de índice de reducción acústica de tres diferentes hojas ligeras aplicadas como revestimiento sobre un mismo muro base de albañilería. (A3)	101
Fig.3.26 Sistema de absorción por resonador al interior de una partición doble. (B16).....	103

Fig.3.27 Resultados del sistema de absorción por resonador al interior de una partición doble. (B16)....	104
Fig.3.28 Índice de reducción acústica nominal de una partición $SRI_w=40dB$ global. (B17)	105
Fig.3.29 Típico flujo de aire para un área de fachada de 100m ² . (B17).....	106
Fig.3.30 Gráfica de aislamiento acústico con diferentes porcentajes de aperturas para ventilación en la fachada. (B17)	106
Fig.3.31 Imagen de resonador de cuartos de octavas de ondas. Colocación al lado de la apertura de ventilación. (B17).....	107
Fig.3.32 Vista en planta de lamas dobles. (B18)	108
Fig.3.33 TL de diferentes espesores de cámara de la Pantalla “6” (B18).....	108
Fig.3.34 TL de diferentes espesores de cámara de la Pantalla “10”. (B18).....	109
Fig.3.35 Densidades modales de flexión de elementos (SEA). (E2)	112
Fig.3.36 Ejemplo de una matriz (SEA). (E2).....	113
Fig.3.37 Diagrama de flujo de energía entre sistemas acoplados del método de transmisión en (SEA). (E2)	115
Fig.3.38 Modelo (SEA) de paredes dobles usado por Craik y Smith. (E2).....	115
Fig.3.39 Comparación de diferentes modelos de predicción en una configuración multicapa. (E3).....	117
Fig.3.40 Tabla de resultados (R) obtenidos con los tres diferentes modelos de predicción, aplicados a particiones multicapa. (B20).....	119
Fig.3. 41 Curva de aislamiento obtenida en laboratorio del muro simple de bloque hueco cerámico. (F1)	124

Listado de imágenes capítulo 3

Img. 3. 1 Imágenes del bloque cerámico usado y construcción del muro simple. (F1)	123
---	-----

Listado de tablas capítulo 3

Tabla 3. 1 Valores comparativos del comportamiento de la (DSF). (D').....	80
Tabla 3. 2 Características de muro de bloque cerámico simulado. (D').....	121

Listado de gráficas capítulo 3

Graph 3. 1 Resultados de la curva de aislamiento para un muro de bloque hueco cerámico. (D')	122
Graph 3. 2 Resultados de la curva de aislamiento para un muro de bloque hueco cerámico cambiando el valor del factor de pérdidas (D')	123
Graph 3. 3 Comparación de valores obtenidos con los dos métodos, medición en laboratorio y simulación VA-one2012. (D')	125

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA TESIS

Fase II

4. DESARROLLO DE LA TESIS Fase II

A partir del estudio y análisis de diferentes investigaciones realizadas por varios autores, relacionadas con el comportamiento de aislamiento acústico de los cerramientos dobles y de la (FVL), en aspectos como: la influencia del espesor de la cámara de aire intermedia, el uso de diferentes materiales acústicamente absorbentes al interior de un cerramiento doble y el uso de aperturas para la ventilación; continuando con el desarrollo de la tesis, la II Fase se centra en la investigación práctica de la variabilidad de diferentes configuraciones de un tipo de (FVL), definidos para la evaluación del comportamiento acústico formulando las siguientes hipótesis:

4.1 Formulación de hipótesis

En base a la información de los antecedentes recopilados en esta tesis sobre el comportamiento acústico de la (FVL) a nivel de aislamiento, se proponen las siguientes hipótesis de trabajo en esta tesis doctoral:

- 1.) ¿Cómo influye el espesor de la cámara de aire intermedia ventilada de la (FVL) en el aislamiento acústico global, especialmente a bajas frecuencias?
- 2.) ¿Cómo influye el grado de apertura de la cámara de aire intermedia ventilada en el aislamiento acústico de la (FVL)?
- 3.) ¿Cómo influye la posición de las aberturas de la ventilación de la cámara de aire intermedia ventilada de la (FVL) en el aislamiento acústico global?

4.2 Propuesta de variación de los componentes de una Fachada Ventilada con revestimiento Ligero (FVL)

Tras la descripción del funcionamiento de la (FVL) y considerar las posibilidades que este sistema constructivo pueda aportar al mejoramiento del aislamiento acústico de un cerramiento exterior y teniendo en cuenta la relevancia de cada uno de los elementos que la componen (hoja interior, cámara de aire intermedia y hoja exterior), se abre la posibilidad de estudiar que tanto influye acústicamente la variación de los elementos de la (FVL). Se circunscribe al caso de la hoja exterior como primera barrera interpuesta a las ondas sonoras y la cámara de aire intermedia con capacidad de variación de la apertura de entrada y salida del flujo de aire, además de alojar en ella una capa de material

acústicamente absorbente y la propia subestructura de sustentación con el planteamiento y realización se plantean las diferentes campañas de ensayos acústicos:

- 1.) In-situ
- 2.) de Laboratorio y
- 3.) de Simulación y predicción

Para todas las campañas se ha utilizado el mismo sistema de (FVL) estándar de uso comercial, tanto por su accesibilidad, versatilidad como por la colaboración que siempre ha demostrado la empresa suministradora. Entre los sistemas comerciales de (FVL) de uso y aplicación más universal en la rehabilitación de fachadas, se encuentra el sistema *Aquapanel* de la empresa *Knauf* con presencia en varios países. La hoja exterior de la (FVL) en el sistema *Aquapanel* (ver Fig. 4.1) está compuesta por paneles de (CB) (*cement board*: mortero de cemento armado con fibras de vidrio) de 12.5mm de espesor y una dimensión de tabla de 1.20 x 2.40m. A la hoja exterior se le pueden dar diferentes acabados de revestimiento, donde las juntas entre paneles pueden estar abiertas o cerradas. El espesor de la cámara de aire es constante y viene determinado por la luz de las escuadras ancladas al muro base pre-existente y que sostienen en voladizo la perfilería de subestructura que sostiene los paneles de *Aquapanel*.

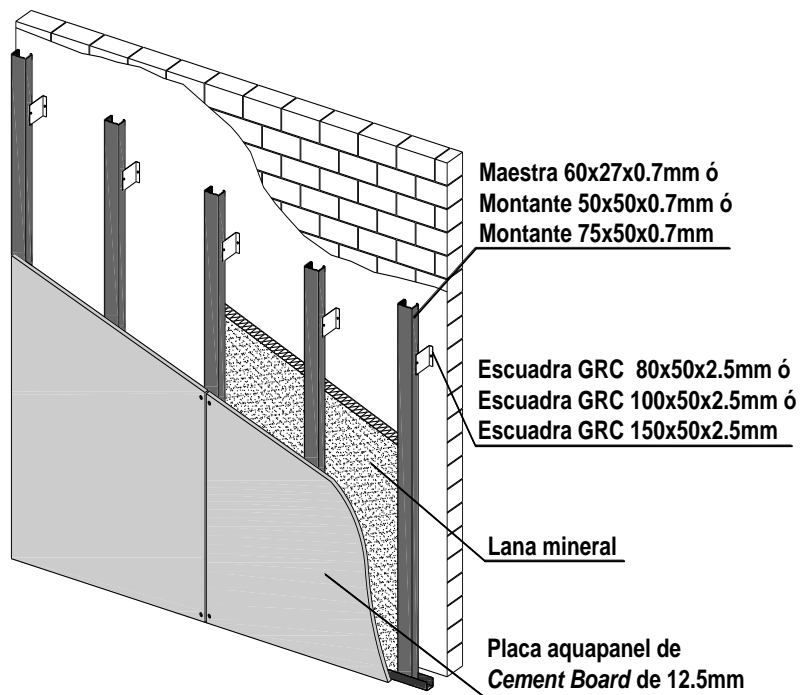


Fig.4. 1 Isonometría del sistema de (FVL) Aquapanel. Descripción de los componentes y elementos de fijación (D')

Al escoger este sistema se consideraron diversas ventajas como su flexibilidad:

- la subestructura puede ser modificable (variar el espesor de cámara por ejemplo) con el uso de diferentes piezas de conexión (escuadras de fijación de dimensión variable).
- la composición de paneles en la hoja exterior, facilita el diseño de diferentes configuraciones.

Las mediciones de tipo in-situ y de laboratorio, permiten conocer empíricamente el comportamiento acústico real de la (FVL) y aportan la información necesaria para la ejecución posterior de ejercicios de simulación mediante modelos informáticos, la gran ventaja de las herramientas de simulación es que ofrece la posibilidad de ahorro en tiempo y dinero para la obtención de resultados cuando se quiere evaluar una gran cantidad de diversas combinaciones de espesores, grados de ventilación y disposición de las aberturas.

Planeadas las tres campañas, se contacta con la empresa fabricante, (*GmbH Knauf España* y *Knauf Insulation*) con la se contó en colaboración para la realización de la campaña 1 in-situ llevada a cabo en Febrero de 2011 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallès ETSAV de La Universidad Politècnica de Catalunya, (Sant Gugat del Vallès Cataluña España), tanto por lo que se refiere al suministro de materiales como a su puesta en obra. Las mediciones fueron realizadas aplicando la norma UNE-EN ISO140-5: 1998 Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción Parte 5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas.

En la campaña de laboratorio, realizada en el laboratorio LARGE en (Ghent-Bélgica) en Abril de 2012 con la colaboración del profesor Marcelo Blasco de la *Universite Catholique de Louvain* y de *Ghent University*, se contó también con la colaboración de la empresa *Knauf Belgium* tanto por lo que se refiere al suministro de materiales como a su puesta en obra. Las mediciones fueron realizadas aplicando la norma EN ISO 10140-2: 2010 Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo.

Así mismo para la evaluación de resultados, se aplicó la normativa UNE EN ISO 717-1 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Agosto 1997.

En la realización de la campaña 3 de simulación y predicción con la ayuda de herramientas informáticas, se indagó con diversos expertos sobre los programas de software disponibles que podían ajustarse mejor a la modelación y simulación de la variación de la (FVL) en cuanto a espesores de cámara y aperturas para la ventilación y su comportamiento de aislamiento acústico, ésta campaña fue desarrollada en dos períodos: en Octubre de 2012 (Bogotá Colombia) y de Septiembre de 2013 a Marzo de 2014, en el Centro tecnológico ASCAMM en (Cerdanyola del Vallès, Cataluña España).

4.2.1 Configuración de prototipos de (FVL)

Para establecer una evaluación comparativa en las diferentes campañas, se propone partir de un sistema comercial existente de (FVL) (*Aquapanel* de la empresa *Knauf*) sin incorporar ningún tipo de acabado final. Compuesto por una subestructura de perfiles metálicos de dimensiones variables, una capa de aislamiento principalmente de lana mineral y una hoja exterior de paneles de (CB) con un espesor de 12,5mm (Fig.5.1). Las juntas entre paneles se sellan con una pasta que dan finalmente al conjunto el aspecto total de continuidad (ver Apartado 2.2.2 Clasificación por tipo de hoja exterior de la (FVL)). El comportamiento acústico estimado para un sistema similar, según datos consultados es:

“...un panel de 10mm de Glass Reinforced Concret (GRC) con densidad de 20 kg/m² se obtiene una reducción sonora de 22dB a 350Hz hasta 39dB a 4000Hz y un promedio de 30dB en el rango de frecuencias medias. Si el espesor del panel se aumenta a 20mm la reducción general se incrementa solo a 35dB. Para mejorar el aislamiento acústico, los paneles pueden funcionar mejor en sistema sándwich, sin embargo si se conecta con perfilierías a otras capas se reduce el aislamiento acústico del conjunto...)(32).

Contando con ésta tipología de (FVL), se plantea su posible variación en tres aspectos:

- 1.) Configuración de la hoja exterior.
- 2.) Superficie de apertura de la cámara dispuesta para la ventilación.
- 3.) Espesor de la cámara intermedia

4.3 Desarrollo de la Campaña 1. In-situ: Variación de configuración de la hoja exterior y variaciones del grado de apertura de la cámara de aire intermedia para la ventilación de la (FVL)

La realización de la campaña In-situ se centró inicialmente en la variación de la configuración de hoja exterior de la (FVL) y de las aberturas de paso del flujo de aire utilizando un solo espesor de cámara (100mm) el máximo utilizado en diversos sistemas comerciales de (FVL).

La campaña in-situ se llevó a cabo en Febrero de 2011, en una fachada del edificio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés (ETSAV) de la *Universitat Politècnica de Catalunya* en Sant Cugat del Vallès (Cataluña, España), (ver Anexo A de la tesis). La campaña contó con el apoyo y colaboración de las empresas *Knauf* con el suministro y montaje de la (FVL) y *Knauf Insulation* con el suministro del material absorbente de lana de roca aplicado al interior de la cámara de aire

(32) Brookes Alan, Comportamiento acústico (GRC) Libro *Cladding of Buildings*. 3rd ed. (Pg.73)

Intermedia. En las mediciones acústicas se contó con la colaboración del (LEAM) *Laboratory d'Enginyeria Acústica i Mecànica* de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC) con sede en Terrassa (Cataluña, España).

Para la realización de ésta campaña se propusieron 3 tipologías de hoja exterior:

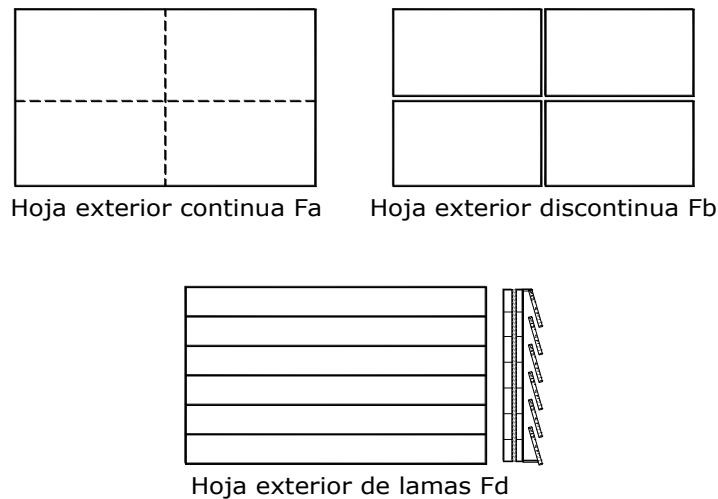


Fig.4.2 Esquema de los tres tipos de hoja exterior de la (FVL) propuestos. Prototipos de ensayo y análisis para la primera campaña in-situ. (D)

Las configuraciones (Fa) y (Fb) forman parte respectivamente de las (FVL) con hoja exterior continua con juntas entre placas cerradas y abiertas respectivamente. La configuración (Fd) no forma parte de la solución comercial de *Aquapanel*. Aunque insolita en nuestro entorno construido próximo (España), es más habitual en otros, especialmente en los que la madera es un material comúnmente utilizado para las soluciones de (FVL). El planteamiento de la hoja exterior construida con lamas horizontales se diseñó con el fin de considerar que la ventilación de la cámara de aire intermedia no se produjera solo por efecto chimenea entre los remates superior e inferior sino también a través de la propia hoja exterior, ofreciendo aberturas perpendiculares al cerramiento de la fachada.

Para la variación de la ventilación de la cámara de aire intermedia, se plantean diferentes grados de apertura en los remates horizontales, superior e inferior de la cámara.

La superficie de estas áreas se definió de acuerdo con la normativa Española vigente de construcción (CTE) *Código Técnico de la Edificación*, en su apartado DB-HS1, donde se considera que las aberturas de ventilación de una cámara de aire intermedia deben disponerse respectivamente en los extremos inferior y superior de la cámara, favoreciendo así la ventilación natural ascendente por efecto chimenea en su interior. ...”Espesor de 3 a 10cm y área efectiva mínima de 120cm² por cada 10cm² de paño de fachada entre forjados. Área repartida al 50% entre la parte inferior y superior”.

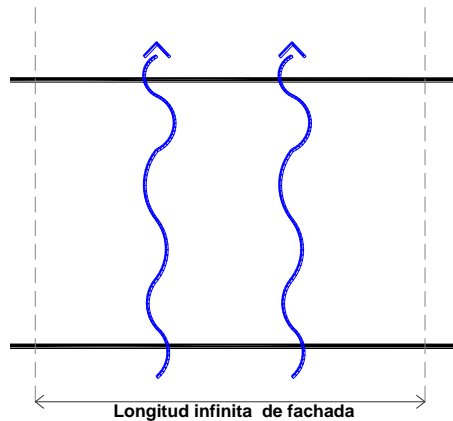


Fig.4.3 Ventilación ascendente de la (FVL) propuesta (D)

Se establecen inicialmente 5 grados de apertura (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) en las superficies, superior e inferior, horizontales de la cámara de aire intermedia para la ventilación, mediante secciones removibles con segmentos del mismo material (CB) dispuestos en la superficie destinada para la apertura de la cámara (Fig.4.4).

Sistema utilizado para variar la apertura de la superficie inferior y superior de la cámara ventilada				
1	2	3	4	5
Vista frontal				
A [
Vista superior en plantade la cámara de aire intermedia				
Vista inferior en planta de la cámara de aire intermedia				

Fig.4.4 Esquema de representación en planta y en alzado de la apertura de la cámara de la (FVL). Donde: A = (FVL), B= Sistema de revestimiento ligero compuesto por: la subestructura, la capa de material aislante, la cámara ventilada y la hoja exterior y C= muro base (hoja interior) en este caso el muro doble de albañilería de bloque cerámico del edificio ETSAV denominado (FI). Los estados de ventilación de la superficie destinada para la ventilación de la cámara de aire intermedia corresponden a: 1 = (0% ventilada), 2 = (25% ventilada), 3 = (50% ventilada), 4 =(75% ventilada), 5 =(100% ventilada) (D).

El sistema de (FVL) de hoja exterior con paneles de (CB) utilizado para la campaña in-situ, se añade habitualmente a una pared existente mediante una subestructura metálica de perfiles y escuadras de fijación, delimitando una cámara de aire intermedia de 100mm, de los cuales 40mm son ocupados por una manta de lana de lana de roca con una densidad aproximada de entre 30 y 60kg/m³.

Los diversos prototipos de configuración de la (FVL) (Fa, Fb, y Fd) se instalaron sobre un tramo opaco de fachada (las especificaciones de la localización del tramo de fachada utilizado, se encuentra en el Anexo A de la tesis) para evitar en lo posible las transmisiones secundarias por ventanas y puertas. Dicho tramo se correspondía en el interior con una sala de descanso para los estudiantes. El techo de la sala estaba compuesto por la c del exterior al interior del edificio. La sala interior es un aula de descanso para los estudiantes. El techo de la sala estaba compuesto por la cubierta del edificio, la cual presentaba una serie de lucernarios para la iluminación natural.

La fachada del tramo considerado es un muro doble de obra de fábrica de ladrillo visto revestido directamente con pintura blanca, al que se denominó muro base (FI). Ambas hojas delimitan una cámara de aire intermedia no ventilada, de entre 5 a 7cm de espesor, que aparentemente no dispone de material acústicamente absorbente en su interior. Este tramo de fachada presenta en su centro una junta de dilatación vertical que atraviesa toda la fachada, con un ancho aproximado de un 1cm sellado totalmente con polímeros flexibles. El comportamiento acústico previo de éste muro se desconocía por completo, por lo que las primeras mediciones se orientaron a su caracterización.

Las diferentes mediciones acústicas se realizaron según la metodología indicada en la normativa UNE-EN ISO140-5: 1998 Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción Parte 5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas. El valor del nivel de aislamiento acústico alcanzado en una medición realizada in-situ, (Graph 4.1) se expresa en valores de ($D_{2m,nT}$). Los niveles de presión sonora en el exterior se midieron a 2 metros de la fachada.

Se procedió a medir el valor de ($D_{2m,nT}$) del tramo de la fachada existente (FI) primero desnuda y después con la instalación del sistema *Aquapanel* (FVL) con las diferentes configuraciones de la hoja exterior propuesta: (Fa, Fb y Fd) a fin de conocer el comportamiento acústico de la (FI) y el posible incremento obtenido de aplicar la (FVL) al sistema en conjunto con los distintos grados de ventilación.

4.3.1 Análisis y resultados de la campaña 1. In-situ

La ampliación detallada de los resultados obtenidos se encuentra en el anexo B. En la campaña in-situ, se presentaron varias situaciones que influyeron en la ejecución y mediciones acústicas:

1-La sala interior receptora no es un espacio aislado acústicamente independiente, sino que está integrada al resto del edificio y delimitada mediante una tabiquería de lunas de vidrio; así mismo su techo que es la propia cubierta del edificio, presenta unos lucernarios lineales de plancha de metacrilato. (ver fotografías en el Anexo B).

2-El muro base (fachada existente, FI) al ser también una pared doble, en principio debería tener un comportamiento acústico solvente, inicialmente se desconoce totalmente el valor de aislamiento acústico de un muro con características similares, en consultas realizadas, se encontró poca información sobre la estimación de valores de aislamiento acústico para un muro doble de albañilería (Tabla 4.1). Estos valores son estimativos no muy fiables ya que pertenecen a una normativa acústica anterior (NBE CA-88) al DB- HR (normativa de protección acústica vigente de España de 2009).

3- Así mismo se recalca que el muro (FI) de la campaña in-situ tiene una obertura que atraviesa toda la sección de fachada de ensayo (la junta de dilatación constructiva), la cual es difícil de atenuar acústicamente y pudo variar los resultados de las mediciones in-situ.

Fábrica de ladrillo (Formato catalán)

Hoja Exterior		Hoja Interior (ladrillo hueco)	Espesor (cm)		Masa Unitaria (Kg/m ²)	Aislamiento Acústico Rw _{Atr}
			Exterior	Interior		
Medio pie	Cerámico Hueco	Tabique	14	4	182	41
		Tabicón	14	9	217	44
		Medio pie	14	14	256	46

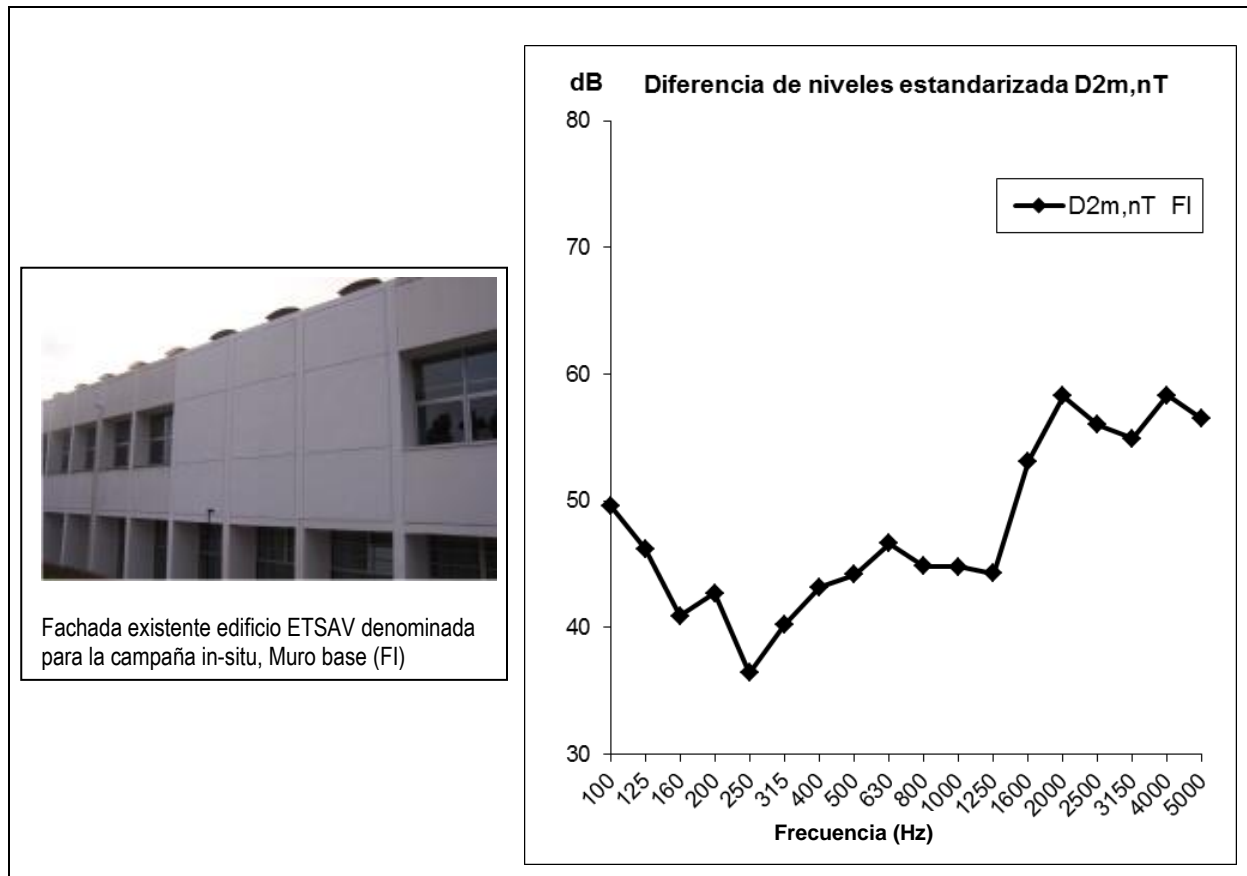
Tabla 4. 1 Tabla informativa sobre el aislamiento acústico Rw_{Atr} de un muro doble de ladrillo. Las casillas en naranja muestran el comportamiento para un muro similar al de la realización in-situ (C28).

En las mediciones in-situ realizadas para la (FI), se calculó la (DnT_w) siguiendo la normativa de realizaciones in-situ UNE-EN ISO 140-5:1998 y de magnitudes globales UNE-EN ISO 717-1:1996

Muro doble de fábrica de ladrillo ETSAV Fachada inicial (FI) Área de la sección de la fachada de ensayo = 57.91m ²	DnT_w	47dB
---	---------	-------------

El valor obtenido, alrededor de 47dB no es comparable directamente con los resultados de laboratorio de un muro con similares características debido a que son unidades de medida diferentes; los valores de la Tabla 4.1 están expresados en índice de reducción acústica (R) y los obtenidos en la campaña in-situ están expresados en diferencia de niveles por lo que la comparación se considera orientativa, sin embargo son valores muy cercanos.

En la siguiente gráfica se muestran los resultados en la curva de diferencia de niveles estandarizada, obtenida en las mediciones in-situ para el muro base (FI):



Graph 4. 1 Curva de diferencia de niveles estandarizada de (FI). Resultados de la medición in-situ, ETSAV Febrero de 2011 (D')

En la campaña in-situ, se hallaron también los valores de frecuencia de coincidencia y frecuencia de resonancia (las fórmulas utilizadas se detallan en el Anexo D.1) para la fachada existente (FI) donde se obtuvo:

Muro doble de fábrica de ladrillo ETSAV Fachada inicial (FI)	Frecuencia de coincidencia f_c Muro de bloque cerámico 14cm	139Hz
	Frecuencia coincidencia f_c Muro de bloque cerámico 9cm	269Hz

Frecuencia de resonancia f_{msm} pared doble (FI)	22Hz
---	-------------

En la curva obtenida (Graph 4.1), aparentemente no se observa una influencia marcada de la frecuencia crítica de alguna de las dos hojas de bloque de ladrillo cerámico de la fachada existente (FI) ni algún problema de resonancia según los valores hallados.

Se realizó una amplia búsqueda en diferentes fuentes de información como normativas y documentación técnica sobre ensayos acústicos reales u otros datos tabulados de muros dobles de

ladrillo cerámico que pudiesen servir de guía para comparar el comportamiento acústico de un muro doble similar, sin embargo no se hallaron datos de ensayos que sirvieran como aporte.

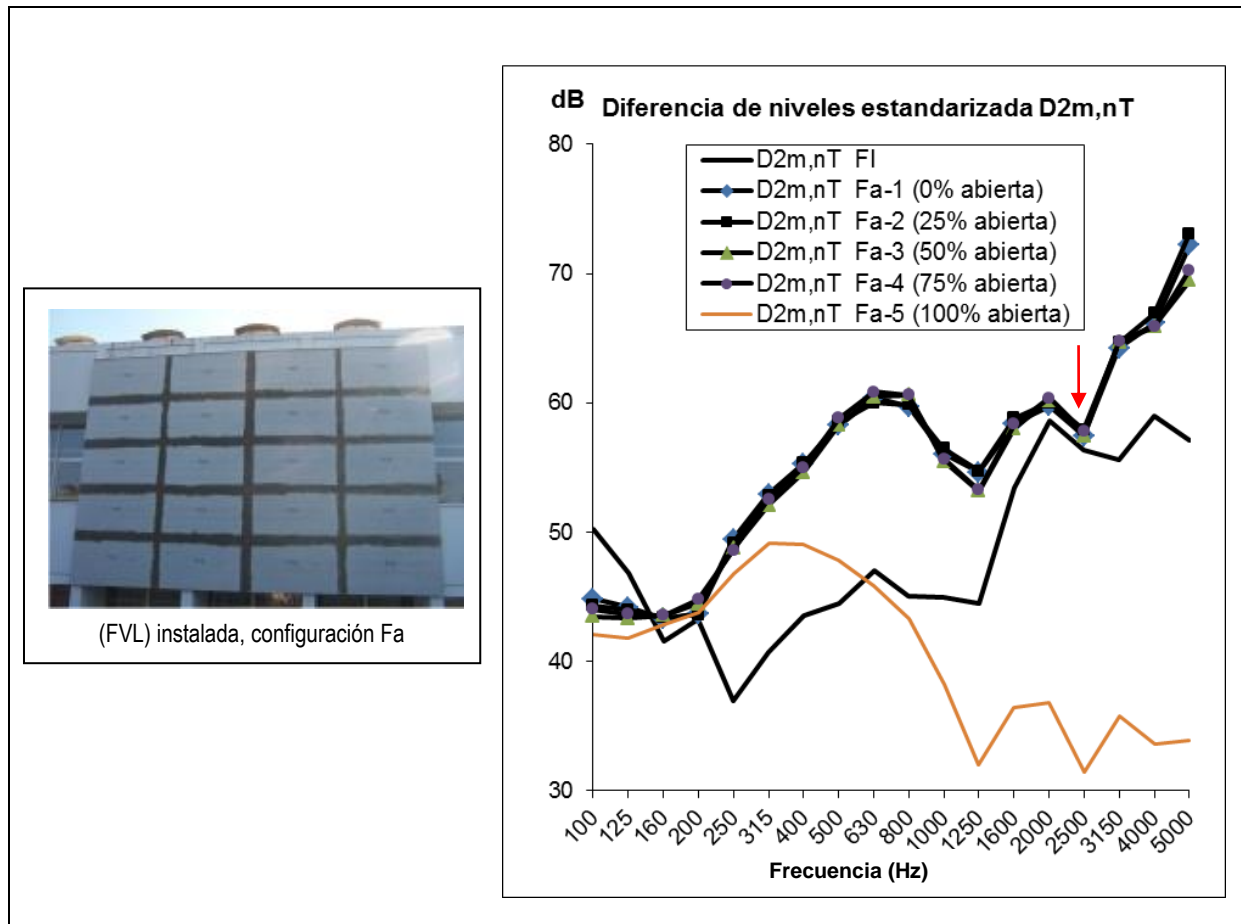
Las mediciones acústicas realizadas in-situ pueden mostrar comportamientos reales de una situación determinada de una fachada y su posible mejora al agregar un revestimiento ligero convirtiéndose en una (FVL), sin embargo los resultados obtenidos son siempre particulares y de limitada comparación.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con la instalación de las diferentes configuraciones de hoja exterior y su comparación con la fachada inicial (FI) desnuda. Los valores se expresan en Diferencia de niveles estandarizada. ($D_{2m,nT}$).

Resultados para (Fa) modelo de (FVL) de hoja exterior continua con juntas selladas entre placas:

En la gráfica(Graph 4.2) se indican los resultados obtenidos de las mediciones para la configuración (Fa), en cada uno de los diversos grados de apertura para la ventilación de la cámara de aire intermedia, siguiendo el procedimiento propuesto de apertura,(Fig.4.4) comparados con los resultados obtenidos de la (FI).

A simple vista, ya se observa una mejora del rendimiento acústico de la (FVL) con respecto a la Fachada inicial (FI), especialmente en el rango de frecuencias medias y en altas, con una tendencia marcada de mejora a partir de 2500Hz. En cuanto al grado de la apertura de ventilación de la cámara de aire intermedia, no se observa ninguna diferencia apreciable entre la disposición de la cámara abierta o cerrada hasta a partir de una abertura de ventilación >75%; se descarta la medición realizada de la ventilación de la cámara de aire intermedia al 100% abierta ya que no concuerda con las demás mediciones y es marcadamente peor que el propio muro inicial (FI).



Graph 4. 2 Resultados obtenidos de la configuración (Fa) de (FVL). Realización in-situ. La línea naranja indica un resultado erróneo, la flecha en rojo indica la frecuencia de coincidencia hallada para la hoja exterior de (CB). (D')

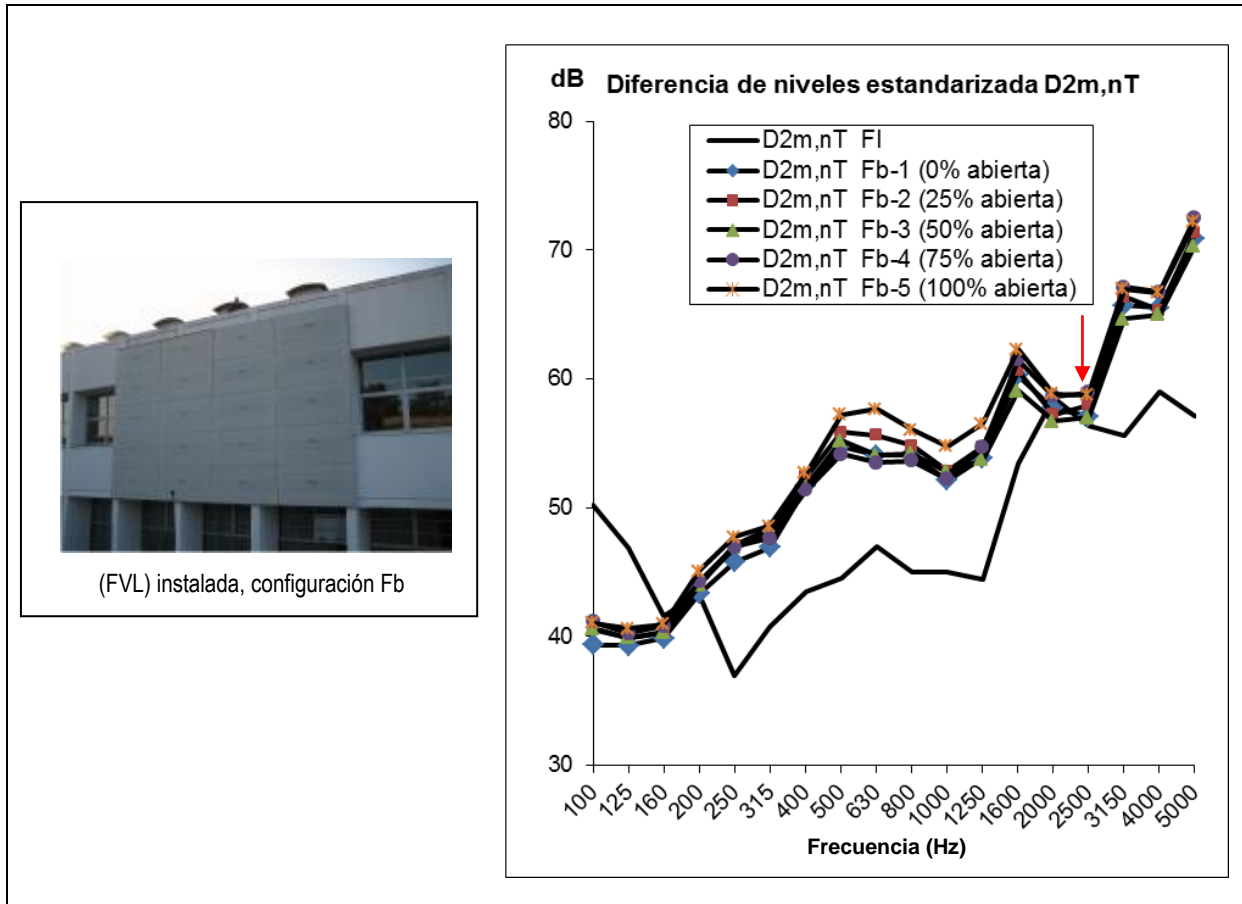
Los valores de frecuencia crítica y frecuencia de resonancia del conjunto (FVL) hallados son:

Hoja exterior (FVL)	Frecuencia de coincidencia f_c paneles de (CB) de 0.125cm de espesor	2470Hz
---------------------	--	---------------

Frecuencia de resonancia f_{msm} del conjunto de (FVL) hoja interior (FI) + hoja exterior	28Hz
---	-------------

Resultados para (Fb) modelo de (FVL) de hoja exterior continua con juntas abiertas entre placas:

En las mediciones efectuadas para la configuración (Fb) surgieron algunos inconvenientes de tipo técnico, los niveles L_1 registrados, son muy bajos y no concuerdan con los niveles L_2 . Tras observar este hecho, los cálculos se efectuaron tomando los valores L_1 del ensayo de la configuración (Fd) a fin de reconstruir algunos resultados.



Graph 4. 3 Resultados extrapolados de la configuración (Fb) de (FVL). Realización in-situ, la flecha roja indica la frecuencia de coincidencia hallada para la hoja exterior de (CB) (D')

La anomalía en el ensayo de la configuración (Fb) pudo ser causada por un cable extensor, puesto que el micrófono no estaba puesto en el sonómetro directamente, sino conectado a éste mediante un cable extensor, el cual pudo no estar bien conectado por lo que diera una lectura errónea del registro del nivel de presión sonora exterior L_1 . Por ésta razón se tomaron en sustitución los valores de L_1 de la configuración (Fd), teniendo en cuenta que los niveles de presión sonora del exterior registrados durante este ensayo son los más uniformes de los capturados entre las diferentes mediciones.

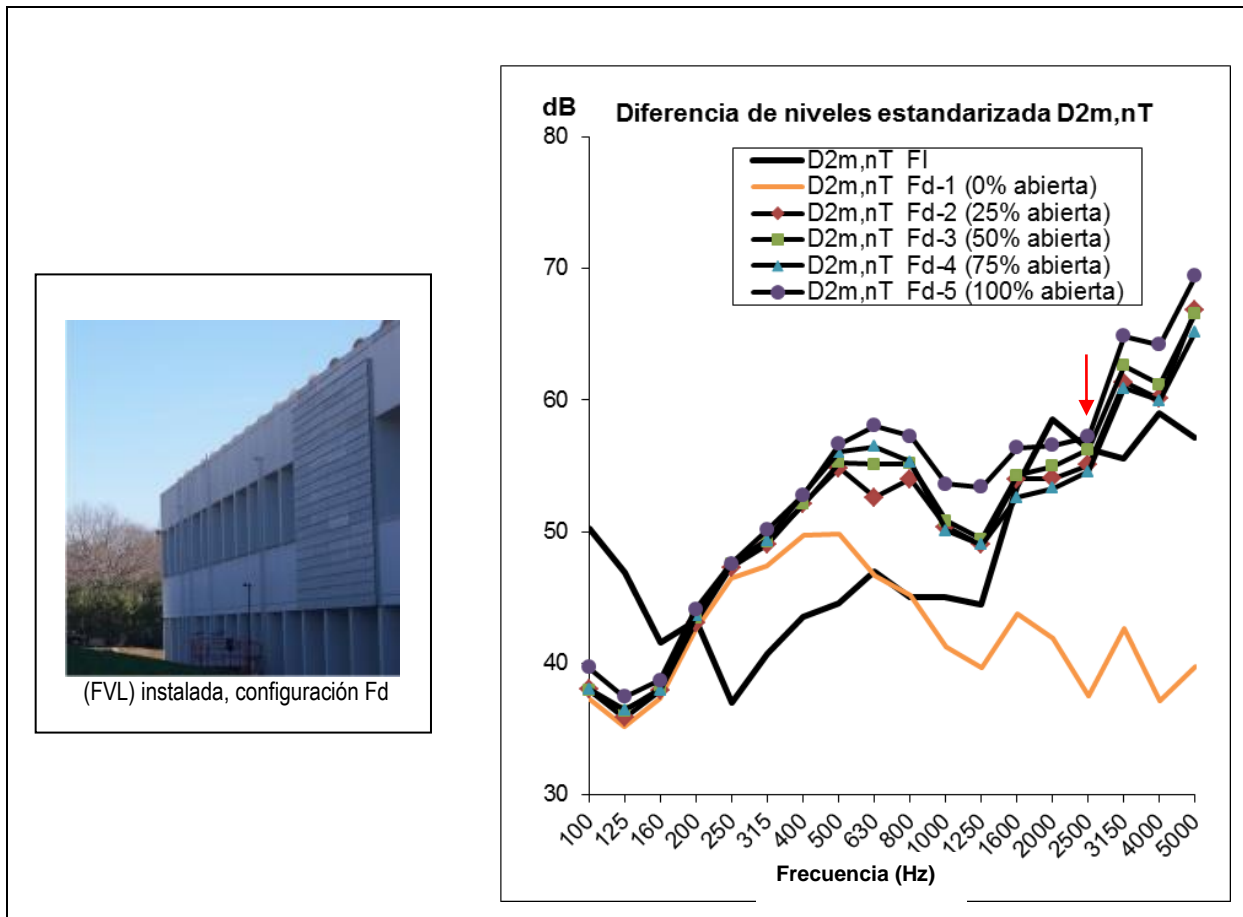
En cuanto a los resultados, la tendencia de mejora se mantiene en el mismo rango de frecuencias que en el ensayo anterior (mediciones Fa) aunque con peor comportamiento cerca de la frecuencia de coincidencia de la hoja exterior (2470Hz).

Respecto al grado de apertura de ventilación de la cámara de aire intermedia, parecen haber algunas variaciones significativas entre los diferentes grados, pero sin embargo es difícil afirmar de forma contundente que realmente haya una influencia entre la cámara totalmente cerrada (0%) y abierta gradualmente hasta (100%) ya que la diferencia en dB es mínima y por otro lado la hoja exterior de

(Fb) tiene una mayor superficie de ventilación real por tener las juntas abiertas (sin sellar) entre paneles.

Resultados para (Fd) modelo de (FVL) de hoja exterior con lamas superpuestas:

En los ensayos de (FLV) con la configuración (Fd) se descartó también un resultado de la medición de uno de los grados de apertura (0%) debido a que es probablemente errónea ya que no concuerda con los resultados de las mediciones en los demás grados de apertura de la cámara: (25%), (50%), (75%), (100%) y de la fachada desnuda (FI). En la gráfica siguiente (Graph 4.4) se muestra la medición errónea en color naranja (como en el ensayo de la configuración (Fa) donde también se descartó una de las mediciones).



Graph 4.4 Resultados obtenidos de la configuración (Fd) de (FVL). Realización in-situ, la línea naranja representa la medición descartada (0% abierta), la flecha en rojo indica la frecuencia de coincidencia hallada para la hoja exterior de (CB). (D)

En los resultados obtenidos se observa que la ganancia de aislamiento acústico conseguida con la (FVL) de hoja exterior con lamas horizontales superpuestas es menor que la alcanzada en las demás configuraciones (Fa y Fb), aunque sigue habiendo una cierta mejora con respecto al comportamiento acústico de la fachada desnuda (FI). La mejora se encuentra especialmente en el rango de las

frecuencias medias medias, entre 200Hz y 1500Hz aproximadamente, mostrando una leve mejora después de la frecuencia crítica.

En cuanto a las variaciones de ventilación, se observan algunas diferencias entre los diferentes grados de apertura de la cámara, que sin embargo no son especialmente significativos.

En los resultados de todos los ensayos de esta campaña in-situ, se constata que en bajas frecuencias parece haber un peor comportamiento de la (FVL) respecto a la fachada desnuda (FI) (antes de 200Hz y por efecto de la frecuencia de resonancia); sin embargo, en la configuración (Fa), esta tendencia no es tan marcada.

En la siguiente tabla se relacionan los valores de aislamiento en Diferencia de Niveles Estandarizada obtenidos de en los casos probados de las configuraciones Fa, Fb y Fd de la (FVL) llevados a cabo en la campaña 1 In-situ.

Valores de Diferencia de Niveles Estandarizada D_{2m,n,Tw} (C;Ctr) de (FVL) variando el grado de apertura de la cámara de aire intermedia obtenidos en la campaña 1 In-situ						
Configuración de (FVL) d=100	Grado de apertura para la ventilación (100%) F-5	Grado de apertura para la ventilación (75%) F-4	Grado de apertura para la ventilación (50%) F-3	Grado de apertura para la ventilación (25%) F-2	Grado de apertura para la ventilación (0%) F-1	Muro base de doble hoja de fábrica de ladrillo 30cm
(Fa)	39dB (0;1)	59dB (-3;-6)	58dB(-3;-5)	59dB(-2;-6)	58dB(-2;-5)	47dB (0;-2)
(Fb)	57dB (-2;-5)	54dB (0;-3)	55dB (-2;-5)	56dB (-2;-5)	55dB (-2;-5)	
(Fd)	57dB (-3;-6)	56dB (-5;-7)	55dB (-4;-6)	55dB (-4;-6)	42dB (-1;-0)	

Tabla 4. 2 Resultados de aislamiento en Diferencia de Niveles Estandarizada campaña 1 In-situ. Los valores marcados en gris son mediciones erróneas descartadas.(D^o)

El procedimiento y resultados de esta campaña de mediciones in-situ se adjunta en un informe específico realizado durante el desarrollo de la campaña, el cual se encuentra en el Anexo B. de la tesis.

4.4 Desarrollo de la Campaña 2. de Laboratorio: Variación de espesores de la cámara de aire intermedia y variaciones del grado de apertura de la cámara de aire intermedia para la ventilación de la (FVL)

A nivel general en la primera campaña in-situ se detectaron varios inconvenientes circunstanciales relevantes. Las condiciones de la fachada y de la sala de ensayo no eran totalmente neutrales y además se produjeron algunos infortunios de tipo técnico. Por otro lado, el propósito de variar el espesor de la cámara de la (FVL) era de compleja realización por los limitados tiempos de ejecución y el coste que suponía el montaje y desmontaje de la (FVL).

Para mayor control de las condiciones iniciales (contorno) y ver la posibilidad de variar el espesor de la cámara de aire intermedia, se contactó con el Profesor Marcelo Blasco en Bélgica experto en acústica y mediciones para fachada, para utilizar su laboratorio y así realizar una estancia formativa en esta Universidad. Para la construcción y montaje de los prototipos de configuración de (FVL) se contó de nuevo con la colaboración de la empresa *Knauf* y *Knauf Insulation* a través de su sede en Bélgica. Los componentes de la (FVL) como los perfiles y escuadras de fijación de la estructura y el material aislante, se ajustaron a los materiales utilizados normalmente en *Knauf* Bélgica para este tipo de solución de fachada.

La campaña de laboratorio se realizó en Abril de 2012 en el laboratorio *LARGE* “*Laboratory for Acoustic Research on Glass and Large Envelopes*”, en la ciudad de Ghent (Bélgica), siguiendo la metodología de la normativa EN ISO 10140-2: 2010 Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo.

El espacio utilizado se trata de una cámara reverberante (Ver anexo C.1) con un campo emisor difuso. La cámara está dividida con un muro de hormigón de 20cm el cual se utilizó como muro base un hoja interior en la instalación de la (FVL) de configuración (Fa) hoja exterior con juntas cerradas entre paneles.

En cuanto al espesor de la cámara de aire intermedia ventilada (distancia entre la hoja interior y la hoja exterior) se estableció un ancho mínimo de 20mm, tal como se indica en la (Tabla 1.1) de la tesis (apartado 1.1), de acuerdo con la Guía de DITE 034-*Kits for external wall claddings*, y un ancho conveniente de 30 a 100mm de acuerdo al DB-HS1 del CTE para que la cámara sea muy ventilada. Según varias investigaciones consultadas sobre paredes dobles, el aumento de distancia entre dos hojas tiende a favorecer el aislamiento acústico en todas las bandas de frecuencias.

Se plantean 3 diferentes anchos crecientes de la cámara intermedia ventilada, partiendo como referencia del espesor máximo usado en los sistemas comerciales de (FVL) y del espesor aplicado en

la campaña in-situ (100mm). Para crear con un intervalo gradual de dimensión equivalente en cada ancho de cámara de aire intermedia, la modificación gradual de dicho espesor se llevó a cabo mediante unos perfiles de expansión ubicados en los extremos verticales de la (FVL).

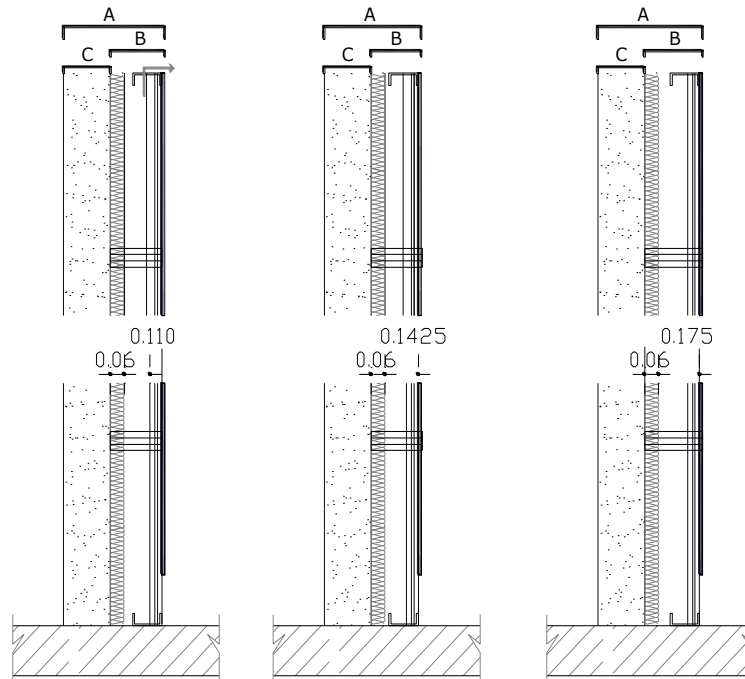


Fig.4.5 Sección de los diferentes espesores de cámara propuestos $d=110$, $d=142,5$ y $d=175$ mm. Donde: A = (FVL), B = Sistema de revestimiento ligero compuesto por: la subestructura, la capa de material aislante, la cámara ventilada y la hoja exterior y C = muro base (hoja interior) en éste caso el muro de hormigón de 20cm de LARGE (D)

La información más ampliada y detallada sobre la campaña de laboratorio realizada en LARGE se encuentra en el Anexo C.

El modelo de (FVL) instalado para esta campaña 2 de laboratorio presenta una variación con respecto a la de la campaña 1 in-situ debido al propio espacio de ensayo: al tratarse de un cámara reverberante cerrada, los extremos de remate horizontal, superior e inferior, de la cámara (espacios especialmente dispuestos para la graduación de la apertura de ventilación de la cámara intermedia) estarían expuestos a las diferentes reflexiones de las ondas en el suelo y techo de la cámara reverberante para lo cual, se propuso variar la localización de la apertura de la (FVL), ubicando las aberturas en la parte frontal, de la hoja exterior, a una distancia mínima de 40cm del suelo y techo.

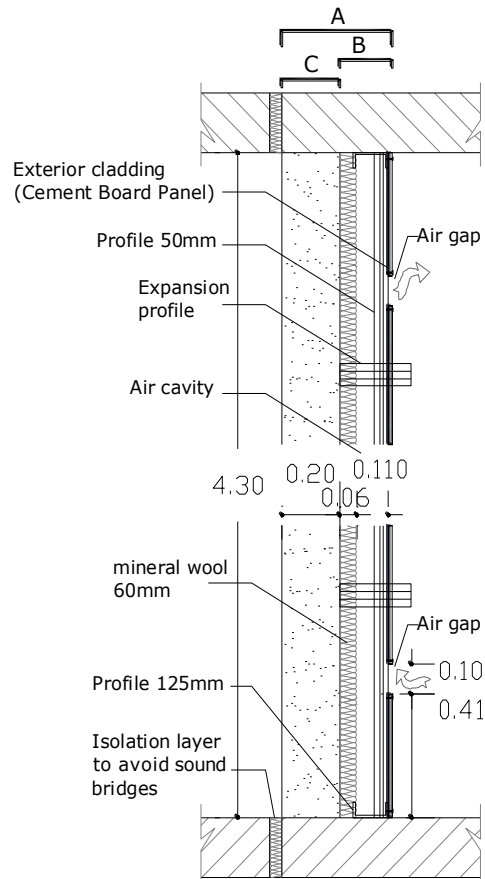


Fig.4.6 Vista en sección de la (FVL) instalada en LARGE. Sección con las aberturas de la cámara en la cara frontal de la hoja exterior (D)

Se plantearon dos aberturas de ventilación de la cámara de aire intermedia, en los extremos horizontales superior e inferior de la hoja exterior, de una longitud de 4.00m y un alto de 0.10m cada una; esta altura de cada abertura se definió equivalente al ancho usado en las aberturas de la cámara de aire intermedia de la (FVL) utilizadas en la campaña 1 in-situ y la longitud según las dimensiones de la cámara reverberante (4.60m de largo) cuidando de evitar también reflexiones de onda de las paredes laterales de la cámara.

Se definieron de forma simplificada 3 grados de apertura de la ventilación de la cámara de aire intermedia del modelo instalado de (FVL) a través de la hoja exterior: 0%, 50% y 100% abierta. El cerramiento regulado de las aberturas de ventilación se efectuó con secciones de (CB) al igual que en la campaña 1 in-situ.

Método utilizado para definir los estados de apertura de la cámara

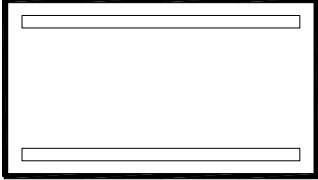
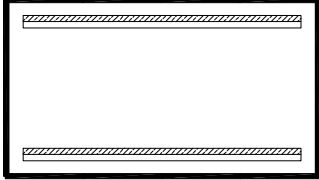
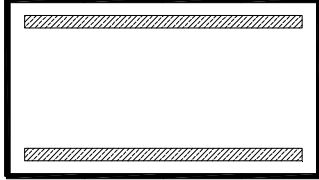
Estado 1	Estado 2	Estado 3
		
Vista frontal oberturas en la hoja exterior		
100% ventilada	50% ventilada	0% ventilada

Fig.4.7 Esquema del método de apertura de la (FVL) construida en LARGE. Durante los ensayos de laboratorio (D)

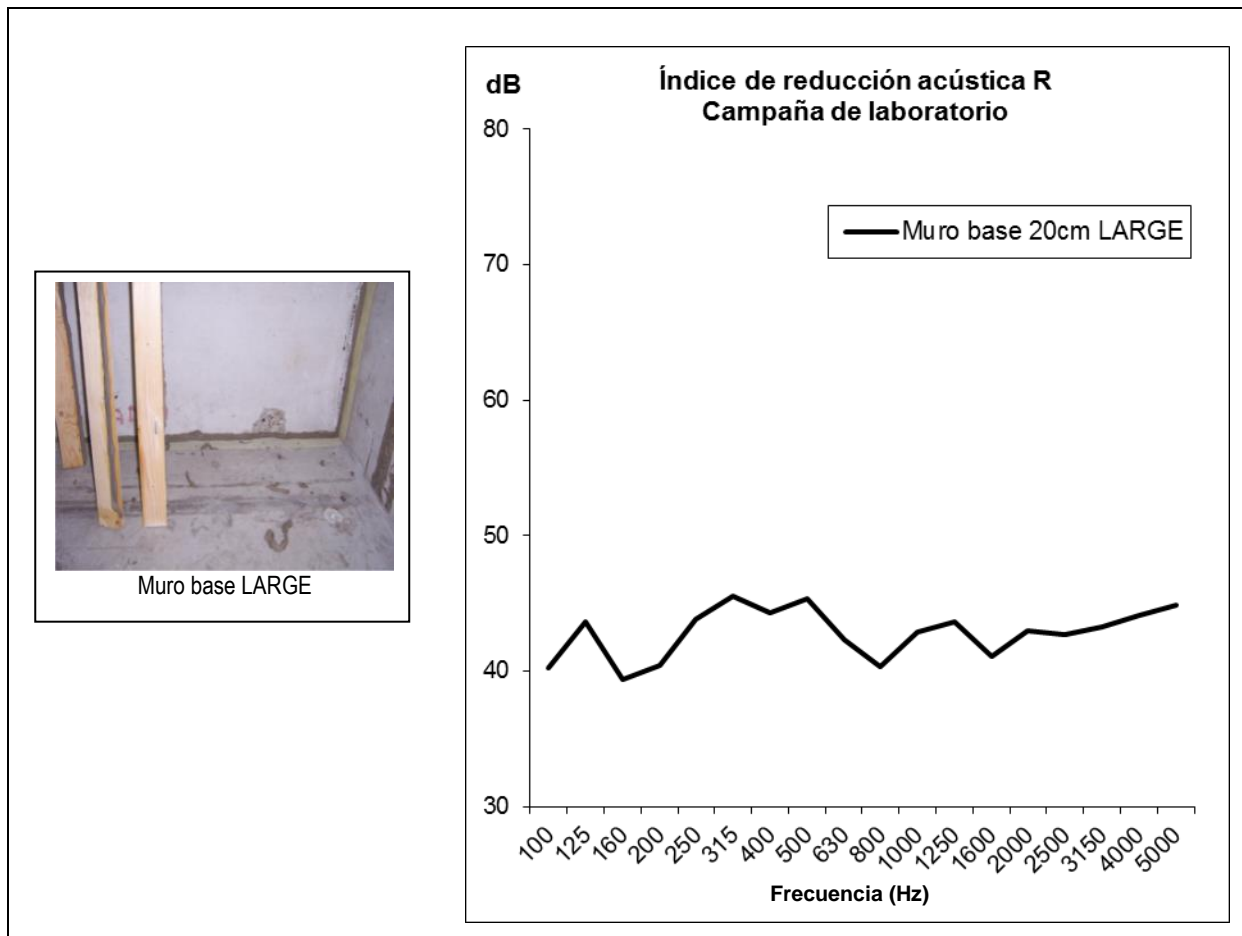
4.4.1 Análisis y resultados de la campaña 2. de Laboratorio

Los resultados obtenidos en la campaña 2 de laboratorio se expresan en valores de Índice de Reducción Acústica (R), siguiendo el procedimiento normativo para mediciones en laboratorio y cálculo de resultados.

Hay que destacar que los resultados obtenidos en este caso para el muro base (FI) no parecen mostrar el comportamiento acústico habitual y tabulado de un muro pesado de hormigón de 20cm de espesor, debido a que este muro de concreto tiene una disminución de su aislamiento acústico, al no encontrarse totalmente sellado totalmente al paso del aire (realizada de forma intencional) para presentar un comportamiento muy semejante en todas las frecuencias(Graph 4.5)

La frecuencia de coincidencia hallada para el muro de hormigón de 20cm es:

Muro base LARGE	Frecuencia de coincidencia f_c Muro de hormigón 20cm	105Hz
--------------------	--	--------------

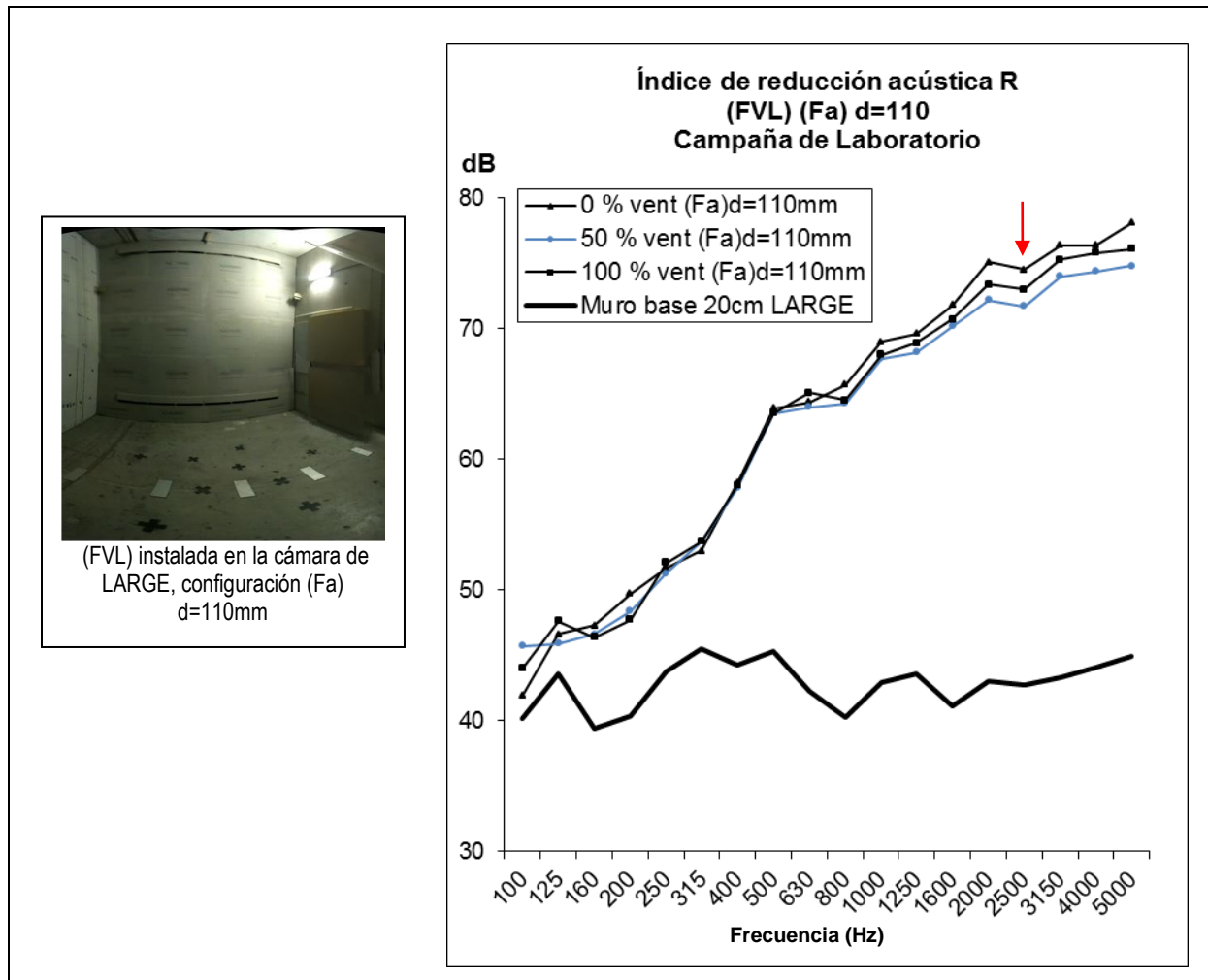


Graph 4.5 Resultado de mediciones de laboratorio para el muro base. Aislamiento en valores de índice de reducción acústica del muro base para la campaña realizada en laboratorio (D')

Resultados para la (FVL) (Fa) d=110 comparados con el muro base:

En la siguiente gráfica (Graph 4.6.) se muestran los resultados obtenidos con la configuración (Fa) con espesor de cámara de 110mm con los diferentes grados de apertura a través de la hoja exterior de paneles de (CB). Se observa un incremento de aislamiento acústico de la configuración (Fa) frente al muro base de hormigón en todo el espectro de frecuencias analizado; por otro lado, la caída del índice de reducción acústica por efecto de la frecuencia de coincidencia de la hoja exterior (2470Hz) no es muy notoria, de forma opuesta a como se observa en la campaña 1. in-situ.

En cuanto a los diferentes grados de apertura para la ventilación (0%, 50% y 100%), se nota en el índice de reducción acústica una diferencia positiva de pocos dB que va aumentando progresivamente conforme se entra en el rango de las altas frecuencias: se destaca que, extrañamente, la medición correspondiente a un grado de apertura del 50% (línea azul) parece tener peor comportamiento que cuando el grado de apertura es del 100%.

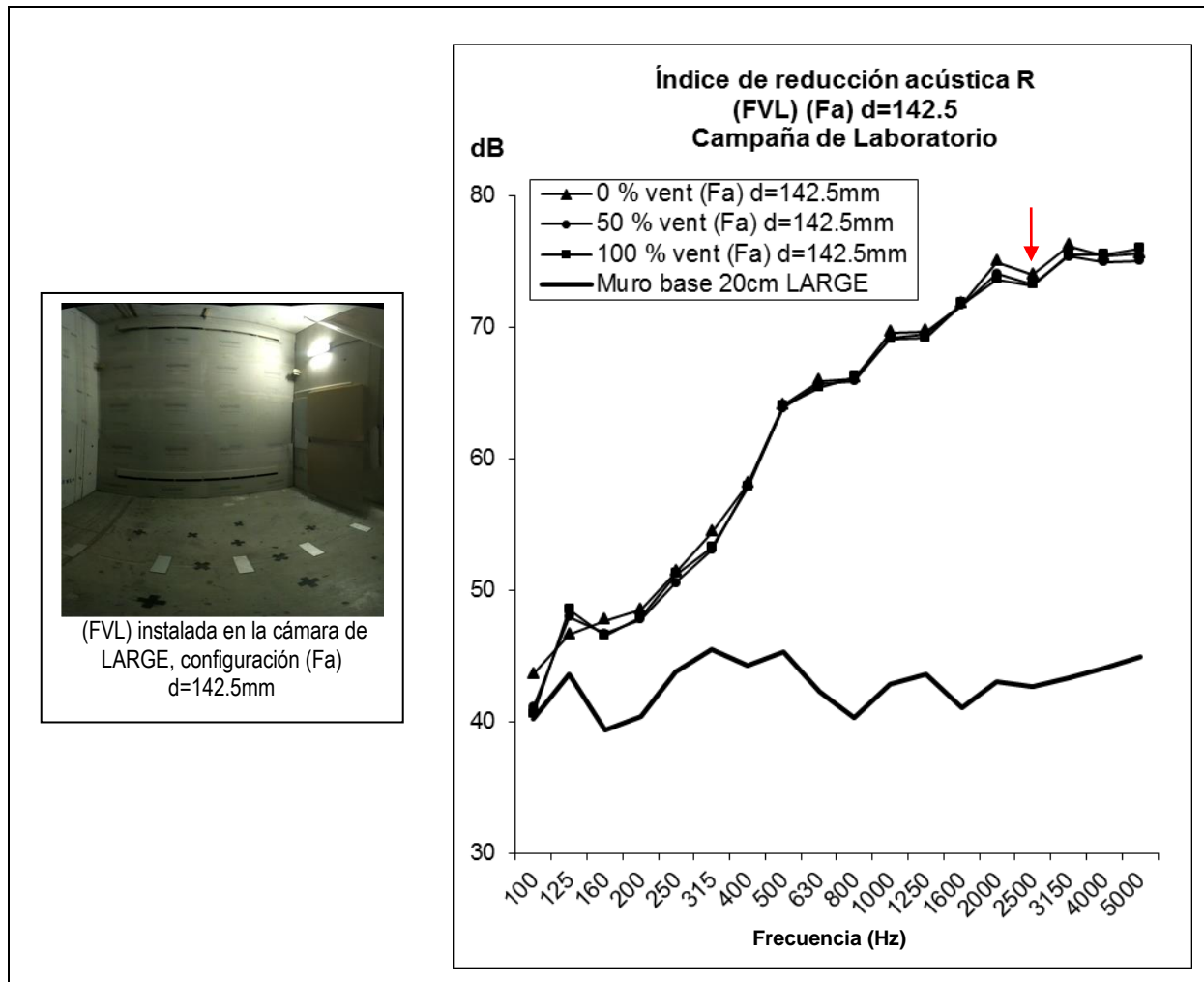


Graph 4.6 Resultado de mediciones de (FVL) configuración (Fa) d=110mm obtenida en laboratorio. Aislamiento en valores de índice de reducción acústica frente al muro base. La flecha roja muestra la frecuencia de coincidencia para la hoja de paneles de (CB). (D')

Resultados para la configuración (Fa) de (FVL), d=142.5

Al igual que en la configuración (Fa) d=110 se observa una mejora del índice de reducción acústica con respecto al muro base, manifiesta en todo el espectro de frecuencias analizado; la frecuencia de coincidencia determinada para la hoja exterior de la (FVL) no es muy notoria.

En cuanto a los grados de apertura de la cámara, no se observan variaciones apreciables para 0%, 50% y 100% abierto, en ningún rango de frecuencias.

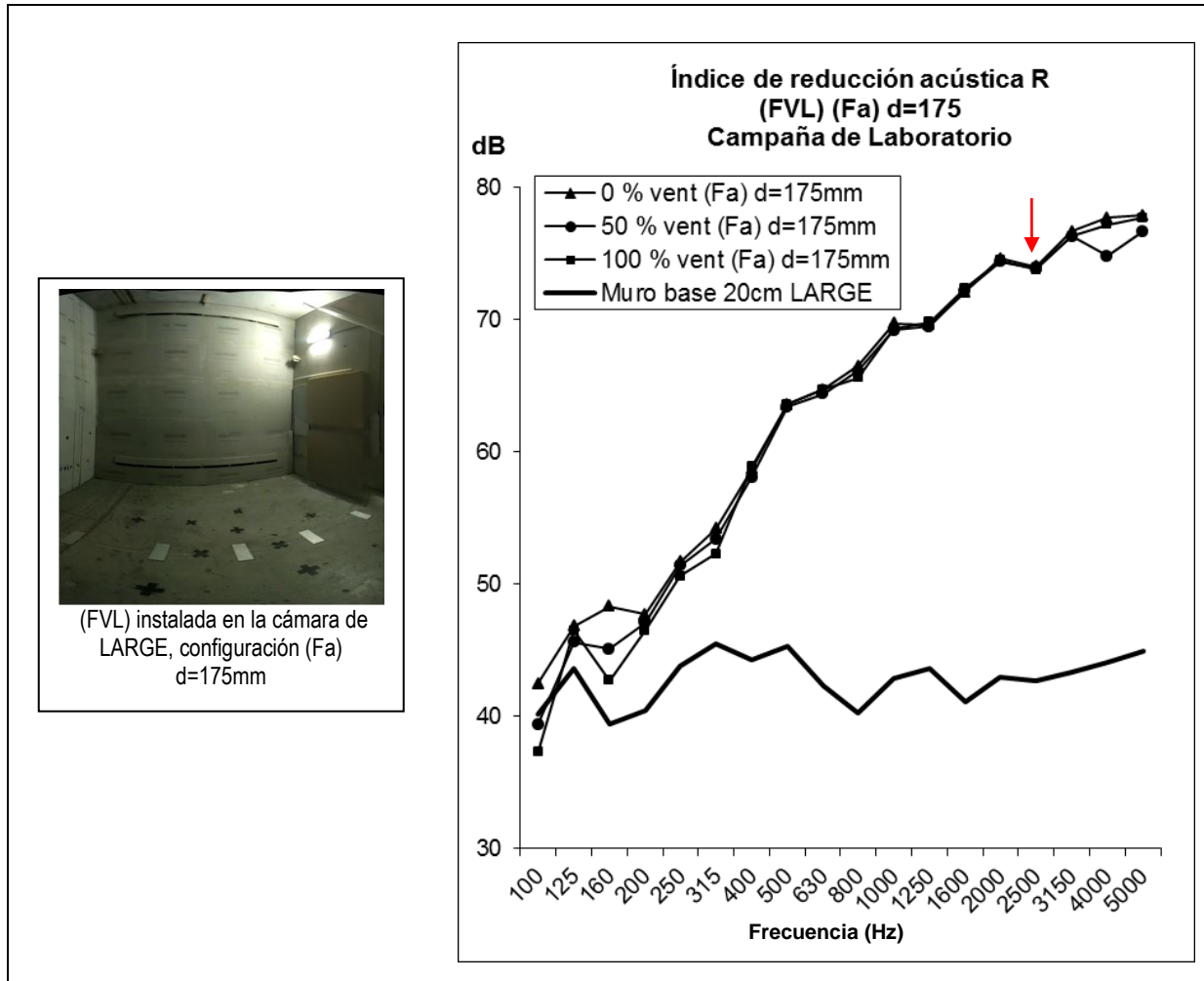


Graph 4.7 Resultados de mediciones de (FVL) configuración (Fa) d=142.5mm en laboratorio. Aislamiento en valores de índice de reducción acústica frente al muro base. La flecha roja muestra la frecuencia de coincidencia para la hoja de paneles de (CB). (D')

Resultados para la configuración (Fa) de (FVL) d=175

En los resultados obtenidos con la configuración (Fa) d=175 mostrados a continuación, se observa claramente la mejora del comportamiento de la (FVL) frente al muro base.

Por otro lado, la influencia del grado de apertura de la cámara de aire en los tres grados establecidos no es muy significativa; aunque cabe anotar que a bajas frecuencias, (por debajo de los 200Hz) hay un ligero incremento del índice de reducción acústica cuando la (FVL) está totalmente cerrada (0% abierta); sin embargo, en términos prácticos es una cantidad que no puede considerarse como una mejora real.

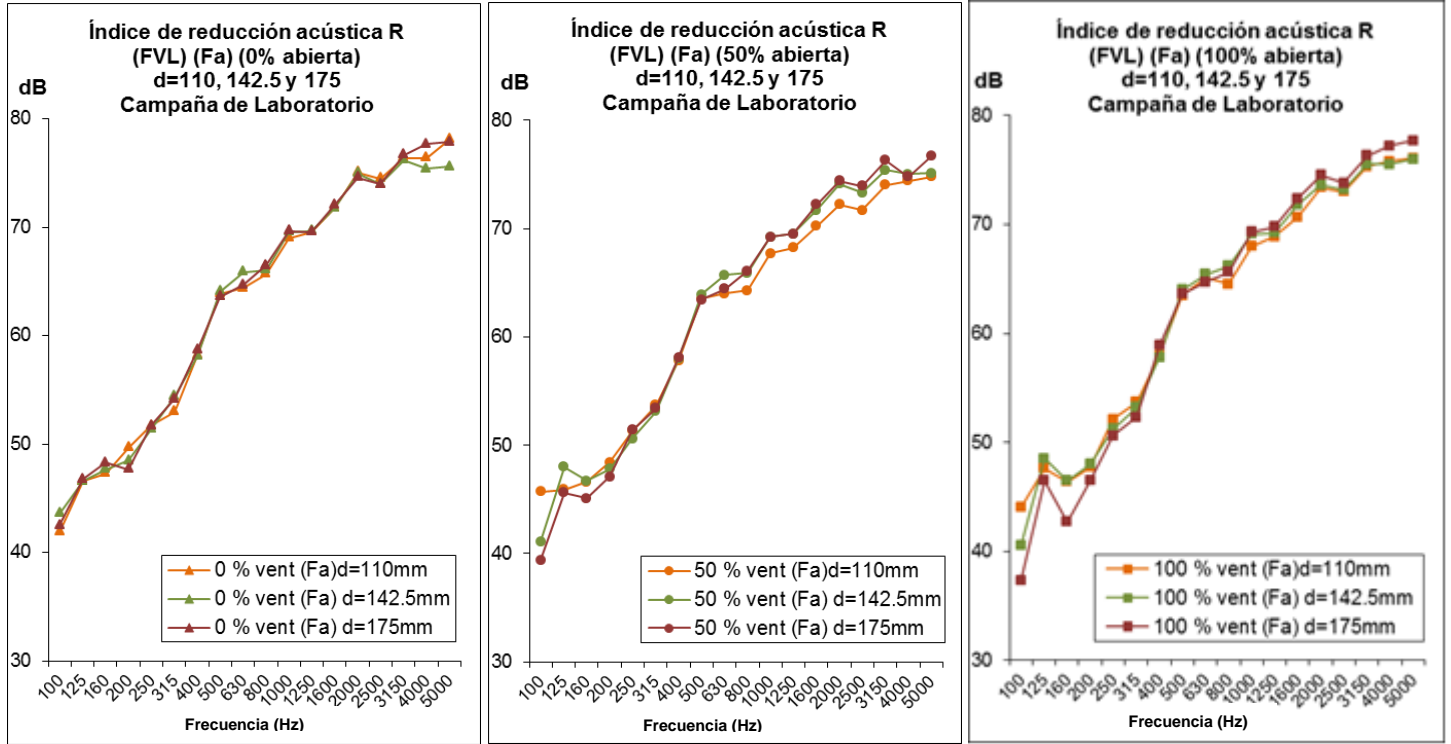


Graph 4.8 Resultado de mediciones de (FVL) configuración (Fa) d=175mm en laboratorio. Aislamiento en valores de índice de reducción acústica frente al muro base, campaña de laboratorio. La flecha roja muestra la frecuencia crítica para la hoja de paneles de (CB). (D')

Hasta ahora en todos los resultados de la campaña 2 de laboratorio se ha podido observar una mejora significativa del índice de reducción acústica con el uso de un revestimiento ligero sobre un muro base, con la interposición de una cámara de aire intermedia ventilada; al ir aumentando gradualmente la superficie destinada a la ventilación en este modelo de (FVL) desde un 0% a 100% no parece haber diferencias significativas; solo se aprecia un incremento positivo significativo cuando el espesor de cámara de aire intermedia ventilada “d” es de 110mm y más ligeramente a bajas frecuencias cuando tiene un espesor “d” de 175mm.

En cuanto a la comprobación de si la variación de la distancia entre hojas (espesor de la cámara intermedia ventilada) influye en el comportamiento acústico de una (FLV), en esta campaña de laboratorio no es muy visible. Tal vez ello sea motivado porque la variación se produce en un intervalo pequeño puesto que la tecnología propia de la (FVL) no aconseja, por las limitaciones del sistema de escuadras, adoptar espesores superiores.

En las siguientes gráficas (Graph 4.9), se muestran los resultados del índice de reducción acústica obtenida con cada espesor de cámara de aire intermedia ventilada y la comparación entre los tres valores de los tres valores “d” propuestos.



Graph 4.9 Resultados obtenidos en laboratorio de aislamiento acústico de (FVL) configuración (Fa) con los diferentes espesores de cámara. d=110, d=142.5 y d=175mm y con el estado de ventilación (0% abierto) obtenidos en LARGE (D)

En la siguiente tabla se relacionan los valores globales de aislamiento acústicos obtenidos en los casos probados de la configuración (Fa) de la (FVL) llevados a cabo en la campaña 2 de Laboratorio.

Valores de índice de reducción acústica global R_w (C; C_{tr}) de (FVL) obtenidos en la campaña 2 de laboratorio				
Configuración (Fa) de la (FVL)	Grado de apertura para la ventilación (100%)	Grado de apertura para la ventilación (50%)	Grado de apertura para la ventilación (0%)	Muro base de concreto de 20cm
d= 110mm	64dB (-2;-7)	63dB (-1;-6)	64dB (-2;-7)	43dB (0;-1)
d= 142,5mm	63dB (-1;-6)	63dB (-2;-7)	64dB (-2;-7)	
d= 175mm	62dB (-2;-8)	63dB (-2;-8)	64dB (-2;-7)	

Tabla 4. 3 Resultados globales de la campaña 2 de laboratorio. (D')

Según las gráficas anteriores comparadas (Graph 4.9), todo indica que la variación de los espesores de la cámara intermedia ventilada propuestos del modelo ensayado no influye apreciablemente en el índice de reducción acústica de la (FVL). Solo cuando la cámara se va abriendo gradualmente 50% y

100% (con las superficies definidas para esta experimentación), parece haber un incremento mínimo para el espesor de cámara $d=175\text{mm}$.

De las dos campañas realizadas 1 In-situ y 2 de Laboratorio surgen varios cuestionamientos que dan origen a nuevas preguntas:

- Obtención de resultados contrastables entre diferentes métodos de experimentación y de medición del comportamiento acústico de la (FVL).
- En la configuración de (FVL) de hoja exterior continua de juntas selladas entre paneles (Fa), se plantea que tanto puede influir la posición (extrema y separada) y disposición (paralela o perpendicular) de las aberturas para la ventilación de la cámara de aire intermedia teniendo en cuenta que en la campaña 1 in-situ se realizó en los extremos horizontales (directamente en el espesor de la cámara) y en la campaña 2 de laboratorio separada de los extremos (directamente en la hoja exterior de la (FVL)).

4.5 Desarrollo de la Campaña 3. de simulación: Variación de espesores de la cámara de aire intermedia y variaciones del grado de apertura de la cámara de aire intermedia para la ventilación de la (FVL) mediante el uso comparativo de las herramientas de software INSUL, dBK Aisla y VA-one en (SEA) y (FEM).

Las herramientas consultadas de aplicación en el caso de la campaña 3 de simulación y predicción son:

- **INSUL 7.0**⁽³³⁾ Software comercial desarrollado por la empresa *Marshall Day Acoustics* con representación en diferentes países. Éste programa está basado en modelos teóricos clásicos de predicción[16] y es principalmente utilizado para el cálculo de valores de aislamiento (tiene en cuenta la normativa internacional para el cálculo y expresión de resultados) en sistemas ligeros y multicapa de techos, forjados y muros, así como la evaluación de materiales y sistemas constructivos.

dBK Aisla⁽³⁴⁾ Software comercial de cálculo de aislamiento acústico de sistemas para la construcción, desarrollado por la empresa (ICR) *Ingeniería para el control del ruido*. Éste programa utiliza como referencia las normativas acústicas internacionales y la normativa de construcción de España (CTE) *Código Técnico de la Edificación*.

(33) **INSUL 7.0** *Marshall Day Acoustics* <http://www.insul.co.nz/>

(34) **dBK Aisla** (IRC) <http://www.dbkaisla.com/cast/>

- **VA-One**⁽³⁵⁾ Software comercial especializado en vibro-acústica, orientado a aplicaciones en el sector automotriz y la aeronáutica entre otros, creado por la empresa *ESI Group*. Éste programa es de desarrollo más complejo que los anteriores y está estructurado en diferentes módulos basados en modelos teóricos como: (SEA) *Statistical Energy Analysis*, (FEM) *modelo de elementos finitos*, (BEM) *Boundary Element Model*, y otros. Así mismo permite crear modelos “híbridos” con la combinación de los diferentes métodos anteriormente citados. Éste software permite la modelización de una situación determinada en espacios o sistemas constructivos, para simular y calcular niveles de presión sonora resultantes considerando un sonido emitido por una fuente.

Estas tres herramientas de simulación y cálculo funcionan mediante la creación y consulta de bases de datos, donde se pueden introducir características de los materiales utilizados del modelo de simulación. Algunas de estas herramientas tienen más libertad de modelización que otras y permiten introducir variaciones más complejas como la inclusión de aberturas para la ventilación.

Simulación con la herramienta INSUL 7.0

Se realizó una simulación con el software INSUL (v7.0) mediante una versión (demo) proporcionada por los distribuidores de *Marshall Day Acoustics* en Colombia y en España, gracias a la colaboración de las empresas: *Ingeniería Acústica Aplicada* (Colombia) y *Grupo Alava Ingenieros, S.A* (España). Ésta simulación se llevó a cabo en Octubre de 2012. (Fotografías de la realización en el Anexo C.3)

La herramienta INSUL se utilizó inicialmente para simular la experimentación de las dos campañas anteriores (1 y 2) y analizar posteriormente de forma comparativa los resultados. A través de este Software se puede estimar el nivel de aislamiento acústico de diferentes sistemas de construcción multicapa para muros, suelos y techos; la herramienta permite la opción de expresar los resultados en diferentes unidades de valor de aislamiento según la simulación deseada y la utilización de la normativa acústica, que se ajusta a la de varios países.

La predicción del aislamiento acústico en paredes dobles que se obtiene con la herramienta INSUL está basado en el cálculo de pérdidas por transmisión (*Transmission loss*) de la pared doble en cuatro regiones de frecuencias:

- Región 1, a bajas frecuencias se determina principalmente por la ley de masas por lo que cuenta como un solo elemento incrementando el TL en 6dB/ octava
- Región 2, marcada por la frecuencia masa-aire-masa determinada por la densidad superficial de cada una de las paredes y el espacio de separación incrementando el TL en 18dB/ octava.

(35) **VA-One** ESI Group <https://www.esi-group.com/software-services/virtual-performance/va-one>

- Región 3, cuando el espesor de la cámara se iguala a la longitud de onda creando la frecuencia “ f_l ”, donde los modos de la cámara de aire intermedia logran un acoplamiento con los paneles y se obtiene un incremento de TL de 12 dB/ octava.

- Región 4, las conexiones entre paredes se toman como puentes acústicos y el aislamiento acústico obtenido por la ley de masas limita el incremento a 6dB/ octava.

En la siguiente gráfica (Fig. 4.8) se muestra el funcionamiento de predicción del aislamiento para una pared doble con la herramienta INSUL.

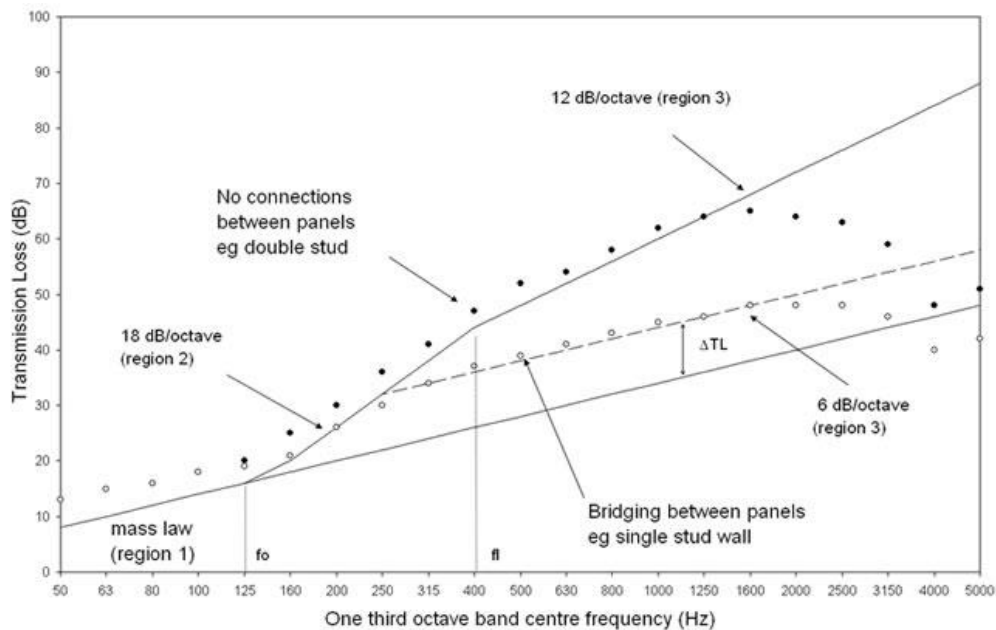


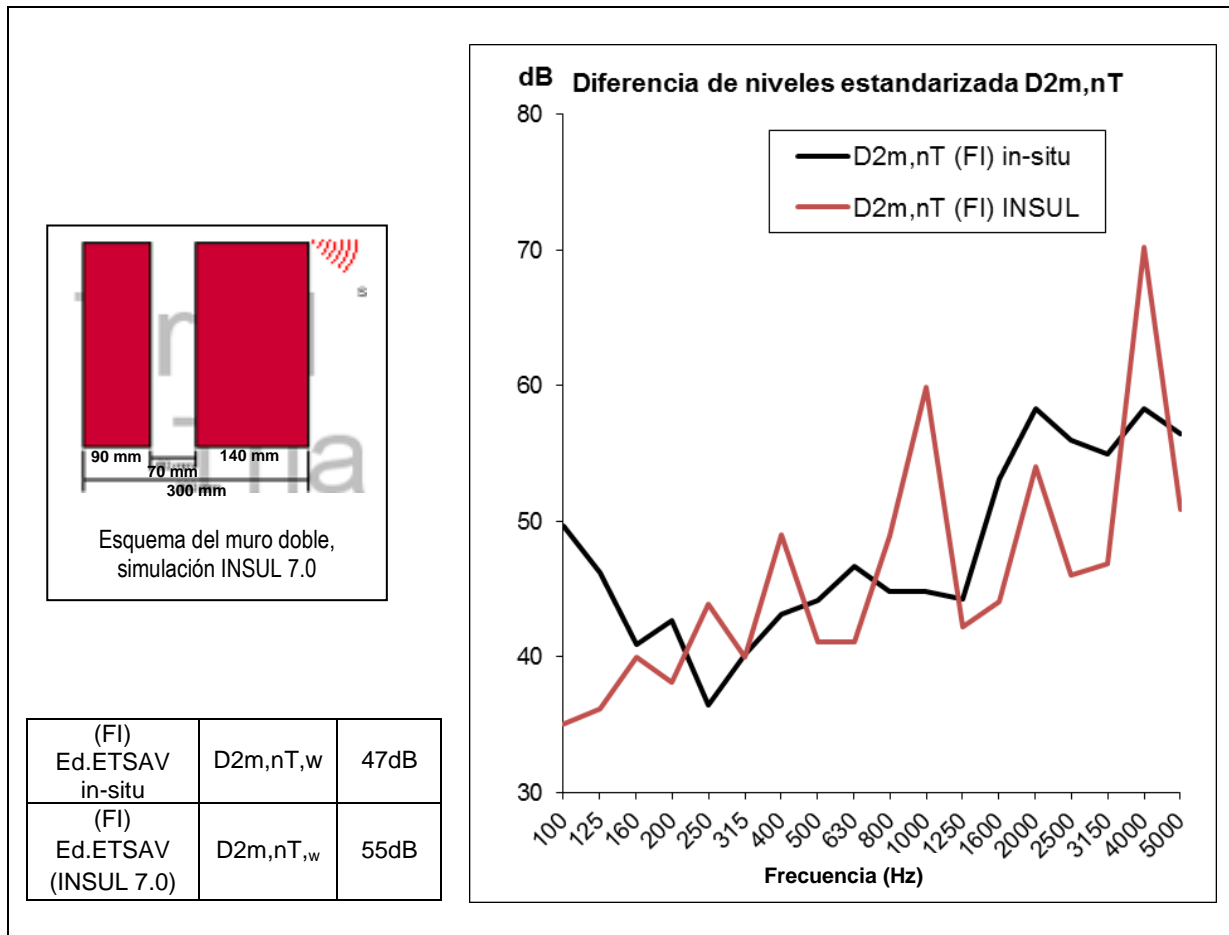
Fig.4. 8 Curva de aislamiento de una pared doble, predicción INSUL. Se establece en 4 regiones de frecuencia. (C29)

Como primer ejercicio usando la herramienta INSUL v.7.0 se simuló el muro base doble de fábrica de ladrillo cerámico ETSAV de la campaña 1 in-situ (Sant Cugat del Vallès, España Febrero de 2011) con las mismas características del muro real (Tabla 4.4)

Características para el muro base (FI) campaña 1. en la simulación en INSUL 7.0								
Hoja ext. 1 de ladrillo hueco		Cámara de aire intermedia vacía		Hoja int. 2 de Ladrillo hueco		Densidad muro doble	Fachada	Sala interior
Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	(Kg/m ³)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
140	132	70	-	90	85	943	57.91	660.8

Tabla 4. 4 Característica del muro base (FI) ETSAV campaña 1. para simulación en INSUL 7.0 (D')

El cálculo se realizó en diferencia de niveles estandarizada ($D_{2m,nT}$) para comparar los valores obtenidos en los ensayos de la campaña 1 In-situ (Graph 4.10)



Graph 4.10 Comparación de diferencia de niveles obtenidos de la campaña 1 in-situ y la simulación (campaña 3) mediante INSUL 7.0 de (FI). Muro doble de fábrica de ladrillo cerámico con características similares (D')

En la simulación, se introdujo la existencia de la abertura de la junta de dilatación permeable al aire (1cm de ancho aproximadamente) existente en el muro base real (FI). Se aprecia que el valor global estimado por INSUL es apreciablemente mayor, lo que concuerda con los casos reales en los que siempre el comportamiento real es más deficiente. Los datos por bandas de frecuencias ya son más equívocos, especialmente por debajo de 160Hz.

En el ejercicio de simulación con la herramienta INSUL v 7.0 se definió la (FVL) utilizada en las campañas 1 y 2, en las siguientes tablas se especifican las características principales de la solución de (FVL) simulada (Tabla 4.5 y Tabla 4.6).

Características para la (FVL) planteada en la campaña 1 In-situ y su simulación en INSUL 7.0								
Hoja ext. CB			Cámara de aire intermedia con lana mineral			Hoja int. Doble de ladrillo hueco		
Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Densidad (Kg/m ³)	Espesor total (mm)	Espesor lana mineral (mm)	Densidad Lana mín. (Kg/m ³)	Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Densidad (Kg/m ³)
12.5	15	1050	100	40	30	300	217	943

Tabla 4. 5 Característica de (FVL) de la campaña 1 para simulación INSUL 7.0 (D')

Características de la subestructura de la (FVL) planteada en la campaña 1 In-situ y su simulación en INSUL 7.0			
Perfiles metálicos de acero galvanizado cada 0.60m			
Ancho del perfil (mm)	Alto del perfil (mm)	Grosor del metal (mm)	Densidad (Kg/m ³)
50	50	0.7	2700

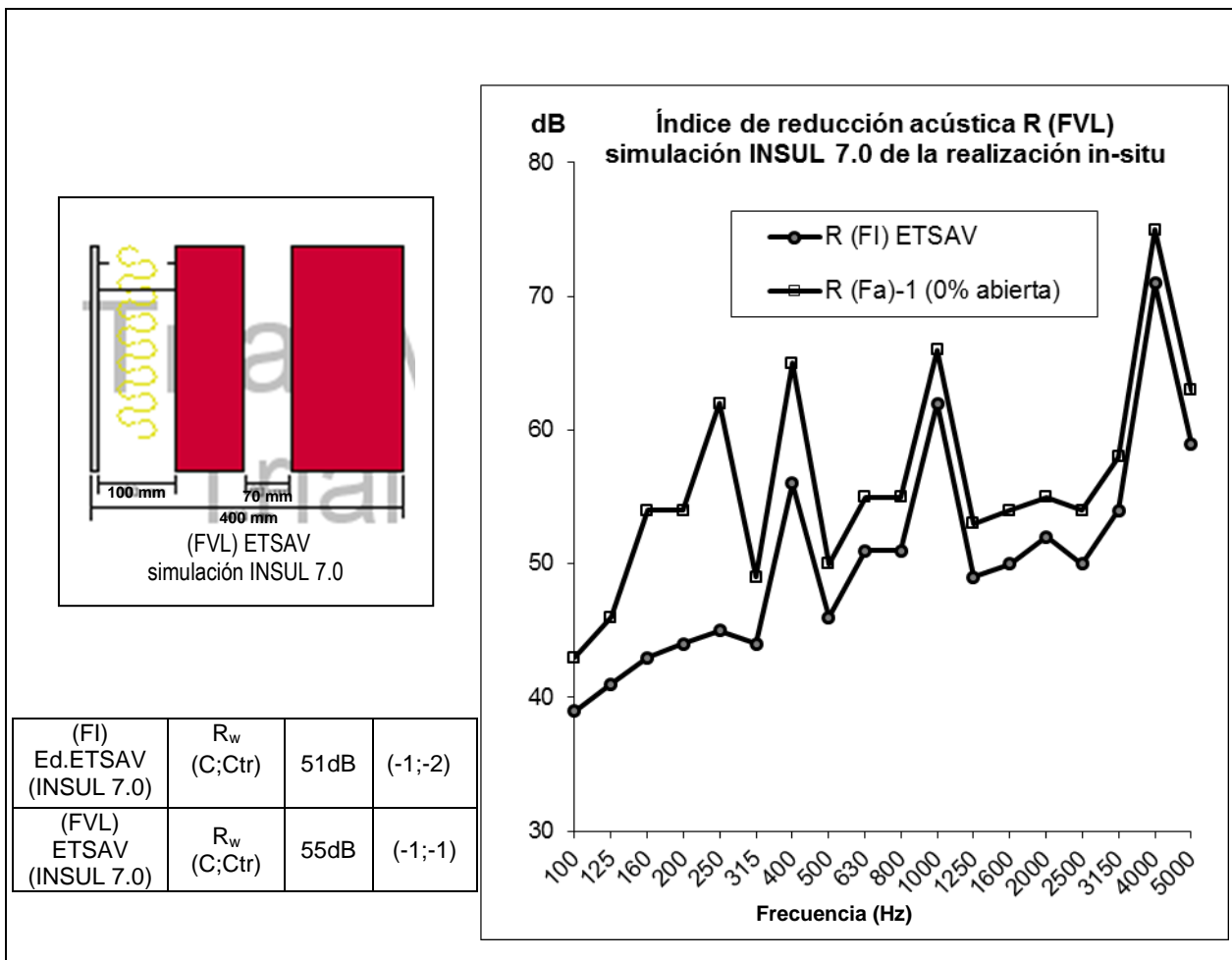
Tabla 4. 6 Característica de la subestructura de la (FVL) de la campaña 1 para simulación INSUL 7.0 (D')

En la simulación de la (FVL) realizada en INSUL v.7.0 se pretendía inicialmente hacer una comparación entre las campañas 1 y 2, por lo que teniendo las características del muro base (FI) de la campaña 1 (Tabla 4.3) se procedió a realizar el cálculo del índice de reducción acústica de toda la solución de (FVL) de la campaña 1 (in-situ) donde los valores mostrados en la (Graph 4.11) se expresan en índice de reducción acústica.

En la siguiente gráfica (Graph.4.11), se expresan los valores de aislamiento acústico de la (FVL) con la configuración (Fa) con un espesor de cámara intermedia (d=100mm) en el grado de apertura (0% abierta) frente al muro (FI) doble de ladrillo hueco cerámico los valores obtenidos con la herramienta INSUL para el muro doble (FI) y el conjunto de (FVL) de configuración (Fa), sin considerar aberturas de ventilación para la cámara de aire intermedia (0% abierto).

El Software INSUL v7.0, permite definir aberturas para simular transmisiones secundarias, la cual fue aplicada para la simulación del muro doble (FI) solamente (junta de dilatación del muro ETSAV de la campaña 1) y no permite en cambio añadir otras aberturas transversales como las previstas para la cámara de aire intermedia, por este motivo no fue posible la simulación de los diferentes grados de apertura para la ventilación de la (FVL).

En los resultados (Graph.4.11) se observa un incremento de aislamiento acústico con la aplicación de una hoja ligera para formar la (FVL) respecto al muro doble desnudo (FI) apreciable en todas las frecuencias y una mejora global de 4dB, la cual no parece cuantiosa.



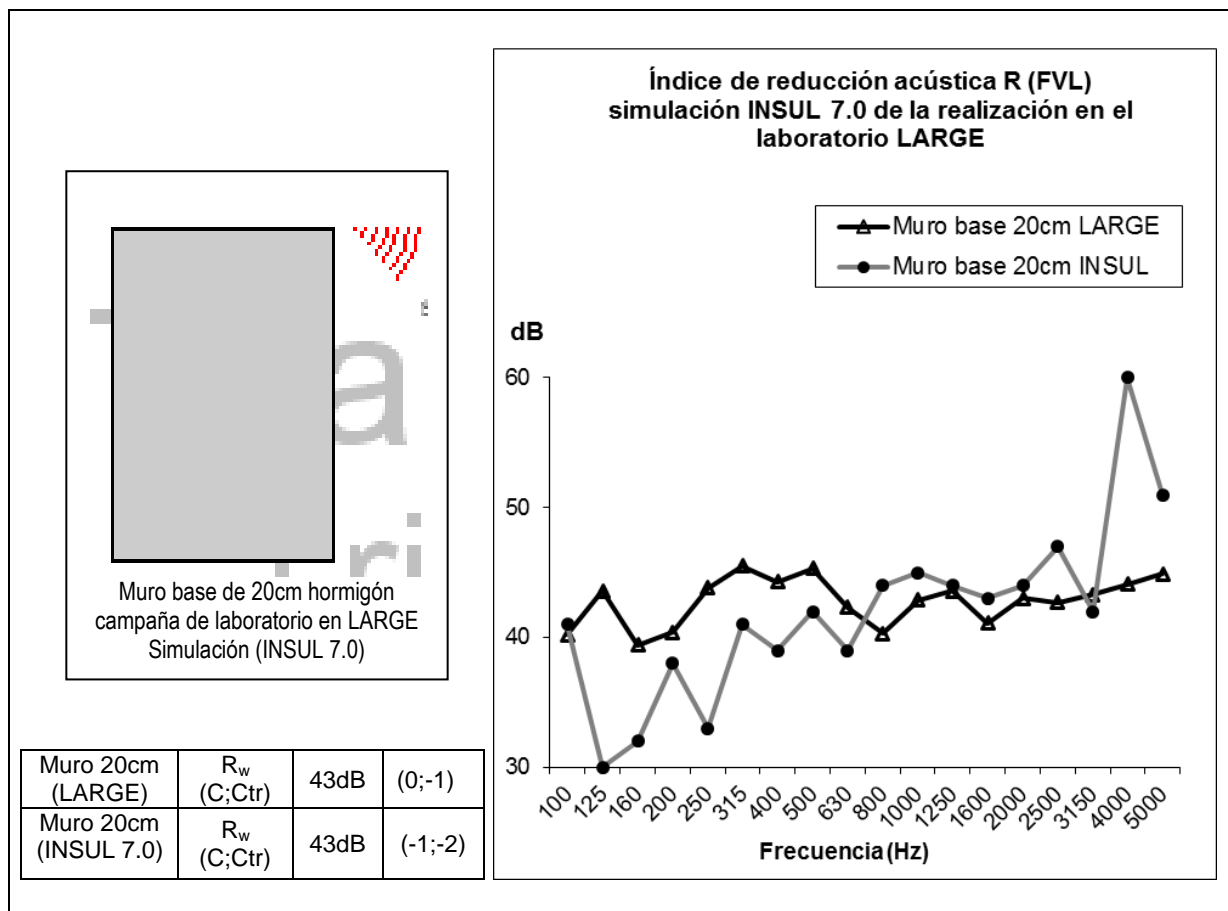
Graph 4.11 Resultados del índice de reducción acústica de la (FVL). Simulación INSUL 7.0 de la campaña 1 in-situ (D')

Los resultados de la gráfica (Graph 4.11) se muestran en Índice de Reducción Acústica (R) debido a que se calculó como si las mediciones se hubiesen efectuado en laboratorio. A fin de hacer una comparación se calculó también el valor (R) de la realización in-situ con los niveles de presión sonora obtenidos por lo tanto éste resultado es tentativo ya que los valores calculados en mediciones in-situ deben hacerse en Diferencia de Niveles Estandarizada D2m,nT,w. Estos cálculos se llevaron a cabo en Octubre de 2012 con una versión temporal del software INSUL v.7.0 por lo que ahora no es posible repetirlos.

A continuación se realizaron simulaciones para la campaña 2 de Laboratorio LARGE (Ghent, Bélgica Abril de 2012), probando con los diferentes espesores de cámara de la (FVL) en la configuración (Fa), sin incluir las aberturas del grado de ventilación de la cámara de aire intermedia. En esta simulación se consideró que el muro de hormigón de 20cm de espesor (con una densidad superficial de 500Kg/m²) tuviese una densidad superficial de 250kg/m² para aproximar sus valores a la curva de aislamiento obtenida en el laboratorio LARGE (Tabla 4.7) donde se obtuvieron los siguientes resultados (Graph 4.12).

Características para el muro base (FI) de la campaña 2 en la simulación en INSUL 7.0							
Muro de hormigón LARGE			Muro de hormigón INSUL			Fachada	Sala interior
Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Densidad (Kg/m ³)	Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Densidad (Kg/m ³)	Área superficie (m ²)	Volumen (m ³)
200	500	2500	200	250	1250	19.78	115

Tabla 4. 7 Característica del muro base LARGE campaña 2. para simulación en INSUL 7.0 (D')



Graph 4.12 Comparación de resultados de aislamiento acústico obtenidos del muro base de la campaña 2 y del muro base en INSUL v.7.0. Resultados del muro de 20cm de hormigón con diferente densidad superficial (500 kg/m² LARGE) y (250Kg/m² INSUL v.7.0) (D')

A nivel global se ha conseguido igualar los resultados, sin embargo las curvas de aislamiento por bandas de frecuencia se muestran distintas, especialmente en el rango de las bajas frecuencias.

A continuación se realizaron también las simulaciones de la (FVL) de la configuración (Fa) con los diferentes espesores de cámara planteados en la campaña 2 d=110, d=142.5 y d=175 sin aberturas (0% abierta) teniendo en cuenta el muro base con densidad superficial de 250 kg/m². las características del muro base y de la solución de (FVL) planteada se muestran a continuación (Tabla 4.8 y Tabla 4.9).

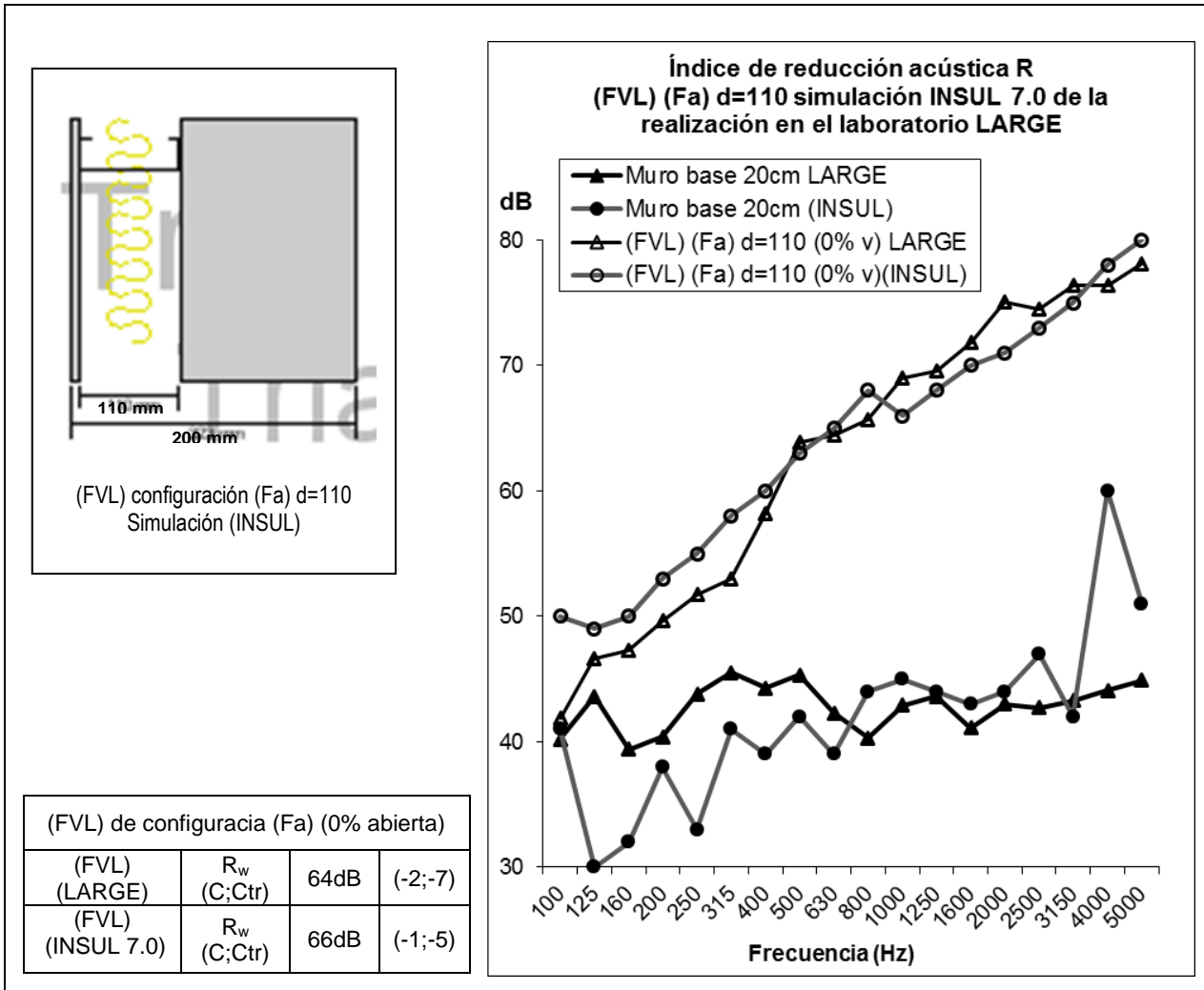
Características para la (FVL) planteada en la campaña 2 de laboratorio y su simulación en INSUL								
Hoja ext. CB			Cámara de aire intermedia con lana mineral d=110, d=142.5 y d=175			Muro base de hormigón		
Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Densidad (Kg/m ³)	Espesor total (mm)	Espesor lana mineral (mm)	Densidad Lana min. (Kg/m ³)	Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	Densidad (Kg/m ³)
12.5	15	1050	110 142.5 175	60	40	20	250	1250

Tabla 4. 8 Característica de (FVL) de la campaña 2 para simulación INSUL v.7.0. Configuración (Fa) (D')

Características de la subestructura de la (FVL) planteada en la campaña 2 de Laboratorio y su simulación en INSUL 7.0			
Perfiles metálicos de acero galvanizado cada 0.60m			
Ancho del perfil (mm)	Alto del perfil (mm)	Grosor del metal (mm)	Densidad (Kg/m ³)
50	50	0.7	2700

Tabla 4. 9 Característica de la subestructura de la (FVL) de la campaña 2 para simulación INSUL 7.0. (D')

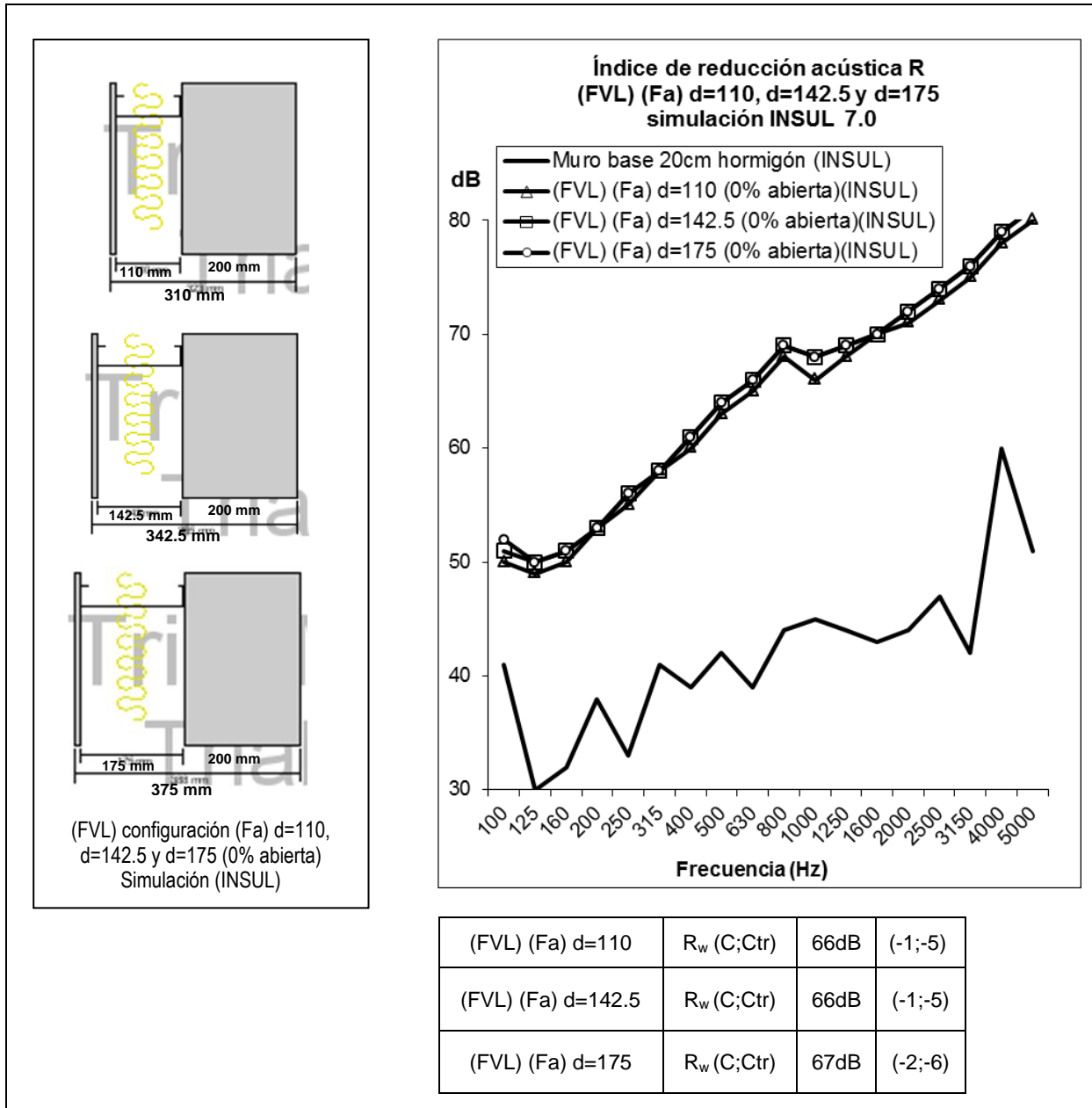
En la siguiente gráfica (Graph 4.13) se muestran los resultados obtenidos de la simulación en INSUL v.7.0 con los resultados obtenidos en la campaña 2 de Laboratorio para la (FVL) de configuración (Fa) con espesor de cámara d=110 sin efectuar la apertura de la cámara de aire intermedia (0% abierta).



Graph 4.13 Comparación de resultados de aislamiento obtenidos en INSUL 7.0 y en laboratorio para la (FVL) de configuración (Fa) d=110 (0% abierta) (D')

El comportamiento de la (FVL) en el caso simulado es bastante aproximado al del ensayo de laboratorio de la campaña 2, pudiendo observar el contraste con los resultados obtenidos.

Con el uso de INSUL v. 7.0 se llevaron a cabo también simulaciones del espesor de la cámara de aire intermedia (d) de la (FVL) planteados en la campaña 2: d=110, d=142.5 y d=175 (Graph 4.14).



Graph 4.14 Resultados de aislamiento acústico en (INSUL 7.0) de la (FVL) de configuración (Fa) con los diferentes espesores de cámara (Fa) d=110, (Fa) d=142.5, (Fa) d=175 (D')

Tanto en la gráfica de resultados como en los valores del índice global de reducción acústica, obtenidos para cada uno de los casos simulados, no se observan cambios aparentes en la variación del espesor de la cámara de la (FVL).

Como conclusión de estas simulaciones se muestra que es posible contrastar las mediciones llevadas a cabo en las campañas 1. in-situ y 2. en laboratorio) obteniendo resultados asimilables, por otro lado la simulación y predicción de la influencia de la apertura de la (FVL) en el aislamiento acústico no pudo realizarse con el software INSUL v.7.0 debido a que ésta herramienta no tiene esta posibilidad.

Así mismo se confirma que la variación del espesor de la cámara en la (FVL) (dentro de los rangos considerados hasta ahora), parece no tener ninguna influencia en su rendimiento acústico.

Simulación con la herramienta VA-one con base en (SEA) y (FEM) y la ayuda de la herramienta dBK Aisla

Hasta ahora se ha podido profundizar en el comportamiento acústico de la (FVL) comprobando a través de diversos métodos (mediciones in-situ, de laboratorio y de simulación) que el uso de un revestimiento ligero con una cámara de aire intermedia ventilada mejora el rendimiento de aislamiento acústico de un cerramiento de fachada; sin embargo no está muy claro si la variabilidad de apertura de las aberturas de ventilación de la (FVL) puede influir en la mejora acústica.

El software VA-one 2012 especializado en vibro-acústica, constituye un paso adelante en la simulación de comportamiento acústico con respecto a los software anteriormente citados. El VA-one es una herramienta de gran complejidad por su desarrollo y principios de funcionamiento, posibilita la modelización de diferentes geometrías con mayor libertad y la aplicación de variables que otras herramientas de predicción acústica como las anteriormente utilizadas no permiten.

Esta herramienta de software tiene varios métodos para la simulación de elementos y piezas constructivas. Uno de ellos es el uso de (SEA), método estadístico que genera resultados a partir de comparaciones de las relaciones establecidas entre pérdidas y ganancias de energía; para ello crea un conjunto de subsistemas tanto físicos: recintos, muros, etc., como por el tipo de onda y su forma de transmisión a través de cada elemento que afectan al aislamiento acústico del conjunto. (Apartado 3.2.5). El método (SEA) es ampliamente utilizado en acústica y tiene mejores resultados a altas frecuencias.

También dispone de un módulo (FEM) modelo de elementos finitos; en el campo de la acústica para obtener datos con mayor precisión y aproximación a situaciones reales, así como la modelación y modificación de geometrías complejas, se utiliza el método de elementos finitos (FE) que funciona notablemente mejor en el rango de bajas frecuencias.

El método (SEA) funciona mediante el promedio de varias mediciones realizadas.

El comportamiento de un elemento modelado en (SEA) presenta unas ventajas y tiene unos requisitos de cumplimiento.

Las ventajas están relacionadas con que método de predicción es más conveniente sobre el sistema (FEM) que funciona bien en un amplio rango de frecuencia pero a altas frecuencias es ineficiente debido al tiempo de cómputo recursos computacionales. A altas frecuencias se puede usar un método

no determinista, el método (SEA) es una alternativa aunque no funciona a bajas frecuencias debido a la presencia de bajas densidades modales en ese rango de frecuencias.

Una de las diferencias entre los dos métodos es que (FEM) se basa en los principios fundamentales de la dinámica y mecánica, mientras que (SEA) aunque se deriva del principio de conservación de energía, se basa principalmente en una hipótesis respecto al flujo de energía entre dos partes de un sistema.

Requisitos a tener en cuenta en la construcción de un elemento a través de subsistemas:

- **modal density** Promedio del número de modos de resonancia por unidad de frecuencia.
- **modal overloop factor** Es la relación entre la densidad modal y el factor de pérdidas.
- **coupling loss factor** Cantidad de disipación del subsistema.

Los modos por banda deben ser de 3 a 7 (36) Respecto al CLF “coupling loss factor”, este valor es la medida del flujo de energía media fuera del subsistema a través de la unión con otro subsistema. Donde η_{12} y η_{21} son definidos por una unión de conexión de los tipos de onda “*wave field*” entre el subsistema 1 y 2. El valor “coupling loss factor” entre dos subsistemas debe ser inferior a la de cada subsistema *ej.* $\eta_{21} \ll \eta_{22}$ y $\eta_{21} \ll \eta_{11}$ (Daniel johansson, Peter connell 2010).

Por cada tipo de onda dependiendo del elemento componente (sistema medido) se genera un subsistema. Debido a que cada tipo de onda tiene un comportamiento diferente, en VA-one se establecen como:

Tipo de onda	}	Afectación en el medio de propagación:
- Flexure		En el aire (una cámara) es uniforme y en un elemento, según el material
-Extension -Shearing		genera unos modos de vibración (condicionante directa propia del material)
-Torsion (para vigas)		que varia de frecuencia en frecuencia (por la velocidad de propagación).

Los subsistemas deben tener un débil acoplamiento entre ellos de tal manera que cuando se le aplica una presión a uno en concreto, la respuesta de éste en términos de energía debe ser mayor que la de los demás.

“Su funcionamiento consiste en la división de un continuo en un conjunto de elementos pequeños unidos por una serie de puntos llamados “nodos” lo que lo determina como un conjunto con un

(36) *An introduction to Statistical Energy Analysis* ESDU (1999)

número finito de grados de libertad. El problema se formula mediante matrices que marcan el comportamiento del elemento donde se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas que ofrecen el valor de los grados de libertad en los nodos del sistema". [15].

Una de sus mayores complejidades radica en el análisis de las condiciones de contorno. En el uso de (FE) en la acústica, a medida que la frecuencia va aumentando es necesario un mayor número de nodos de análisis y el cálculo de estos sistemas se hace muy extenso y de difícil resolución computacional en muchos casos.

Para la realización de esta nueva serie de simulaciones de la campaña 3, se contó con el apoyo del Centro Tecnológico ASCAMM *Asociación Catalana de Empreses de Moldes y Matrices* en Cerdanyola del Vallès, (Cataluña España) con soporte especializado en el funcionamiento del software VA-one 2012 y en temas de acústica. También se tuvo acceso al programa de cálculo y predicción dBK Aisla 3.01 para contrastar resultados obtenidos en algunas simulaciones y para el uso de la base de datos de cara a la obtención de valores característicos de materiales.

La utilización del software VA-one 2012 se inició con la simulación de algunos de los ensayos realizados en las campañas anteriores: 1. in-situ y 2. de Laboratorio.

En el Software VA-one como se menciona anteriormente se puede elegir utilizar los métodos de construcción y simulación (SEA) y (FEM) a través de aplicaciones gráficas que se desarrollan con la definición de valores paramétricos de las características físico-mecánicas de los elementos de configuración en la base de datos. El software está construido en base a ecuaciones teóricas de los distintos métodos (SEA) y (FEM) pero su utilización está simplificada con la aplicación gráfica de modelación y de los valores definidos en la base de datos.

A nivel operacional, la herramienta de software VA-one funciona mediante una aplicación gráfica *3D window* y una aplicación de asignación de características de simulación y de materiales con bases de datos *Menú Browser*. (ver en el Anexo D el apartado 3.2 Utilización del programa VA-one 2012 para la campaña de simulación). Los diferentes valores se obtuvieron de bases de datos y de la consulta de las características físicas de los materiales como densidad superficial, espesor, densidad y las características mecánicas como factor de pérdida (*loss factor*), módulo de elasticidad y los coeficientes de (*poisson*).

En las primeras simulaciones se modeló una cámara similar a la utilizada en la campaña de laboratorio generando un recinto emisor y un recinto receptor y entre los dos un muro de hormigón (tal como el existente en LARGE) (Fig. 4.9) al que se le aplicaría el sistema ligero de la (FVL).

Inicialmente con una división entre el recinto emisor y el recinto receptor (muro base) se establecen los valores de las características físico-mecánicas para el muro de hormigón (Tabla 4.10).

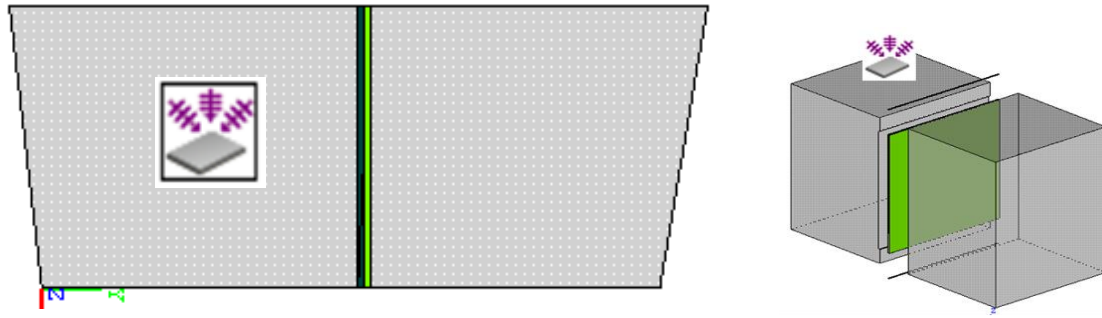


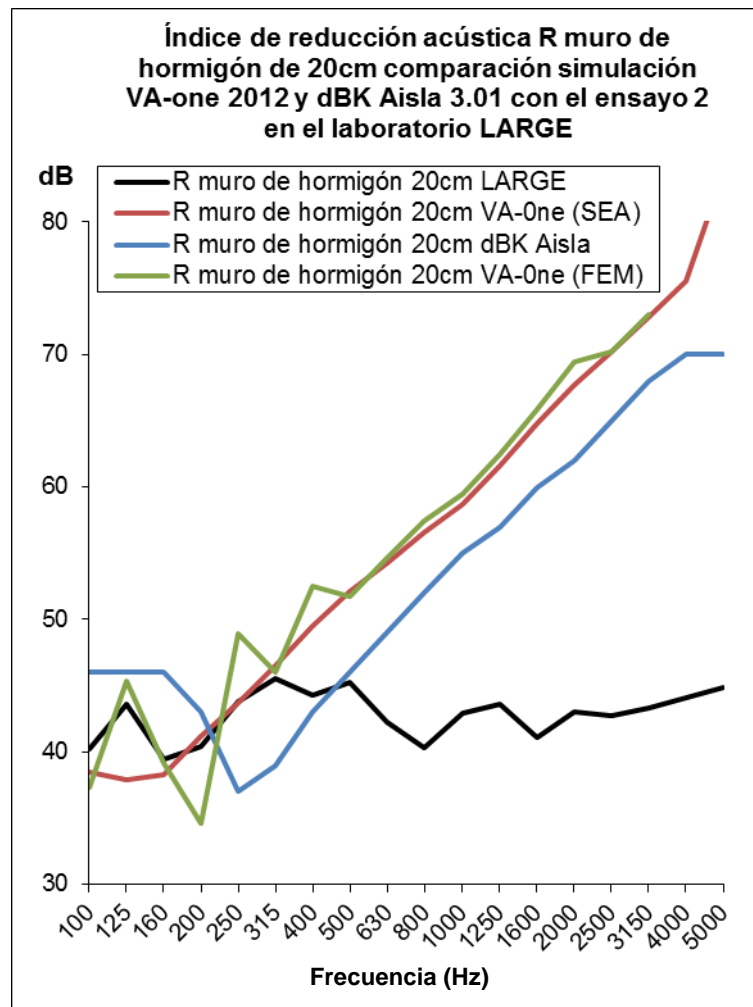
Fig.4.9 Modelo simulado en VA-one 2012. Izk. Cámara emisora. Der. Cámara receptora (D) Isométrico del modelo en VA-one 2012 (D)

Características físico-mecánicas del muro de hormigón utilizadas en la simulación en VA-one v. 2012						
Dimensionamiento de la superficie de (FVL) (L=4.60m x H=4.30m Área 19.78m ²						
Elementos de configuración	Espesor (mm)	Densidad superficial m ² (kg/m ²)	Densidad ρ (kg/m ³)	Módulo de elasticidad E	Factor de pérdidas η	Coefficiente de poisson ν
Muro base de hormigón	200	500	2500	25x10 ⁹	Variable por frecuencias	0.3

Tabla 4. 10 Valores utilizados para la simulación en VA-one 2012 del muro base de LARGE. Características físico-mecánicas del muro de hormigón (D')

Adicionalmente se utilizó la herramienta dBK Aisla v. 3.01 para contrastar los resultados obtenidos en la simulación, la utilización de ésta herramienta requiere solo como datos de entrada espesor, densidad superficial y espesor.

En la siguiente gráfica (Graph 4.15) se expresan los diferentes resultados obtenidos de la simulación en VA-one 2012, con los módulos (SEA) y (FEM), expresados en valores de índice de reducción acústica y su comparación con los resultados de la campaña 2 de laboratorio y los obtenidos con el software dBK Aisla v. 3.01.



Graph 4.15 Gráfica de resultados de aislamiento de la simulación de un muro de hormigón de 20cm. Comparación de resultados de simulaciones con los obtenidos en laboratorio (D’).

En la gráfica se observa que los resultados entre los diferentes métodos de simulación numérica mantienen una misma tendencia de aumento de aislamiento (por ley de masas) del muro de hormigón de 20cm. Específicamente la simulación realizada con (FEM) muestra un comportamiento con mayor aproximación a la curva obtenida en la campaña 2 de laboratorio en el rango de bajas frecuencias hasta cerca de los 500Hz. Recordemos que el muro base utilizado en la campaña de laboratorio en LARGE no tenía un comportamiento típico de un muro pesado convencional de hormigón de 20cm de espesor, debido a que no estaba totalmente sellado al paso del aire con el fin de obtener una curva de aislamiento lo más uniforme posible en todas las bandas de frecuencia.

Basándose en los resultados obtenidos, y tras varias alternativas de modelización y uso de aplicaciones del programa VA-one 2012, se eligió continuar la simulación solo con el módulo (SEA) ya que facilita la obtención de resultados en tiempos de ejecución y permite el uso de otras aplicaciones útiles del mismo programa. Seguidamente se efectuó la simulación de (FVL) de configuración (Fa) con los tres diferentes espesores de cámara $d=110$, $d=142.5$ y $d=175$ propuestos y ensayados en la campaña 2, en

este caso se utilizó la aplicación (NCT) (37) que consiste en agregar capas de materiales a una pared predeterminada. Este fue el método inicial de simulación utilizado para aproximarse a la campaña 2 de laboratorio.

Los valores utilizados en la definición de las características físico-mecánicas de la (FVL) se expresan en la siguiente tabla (Tabla 4.11):

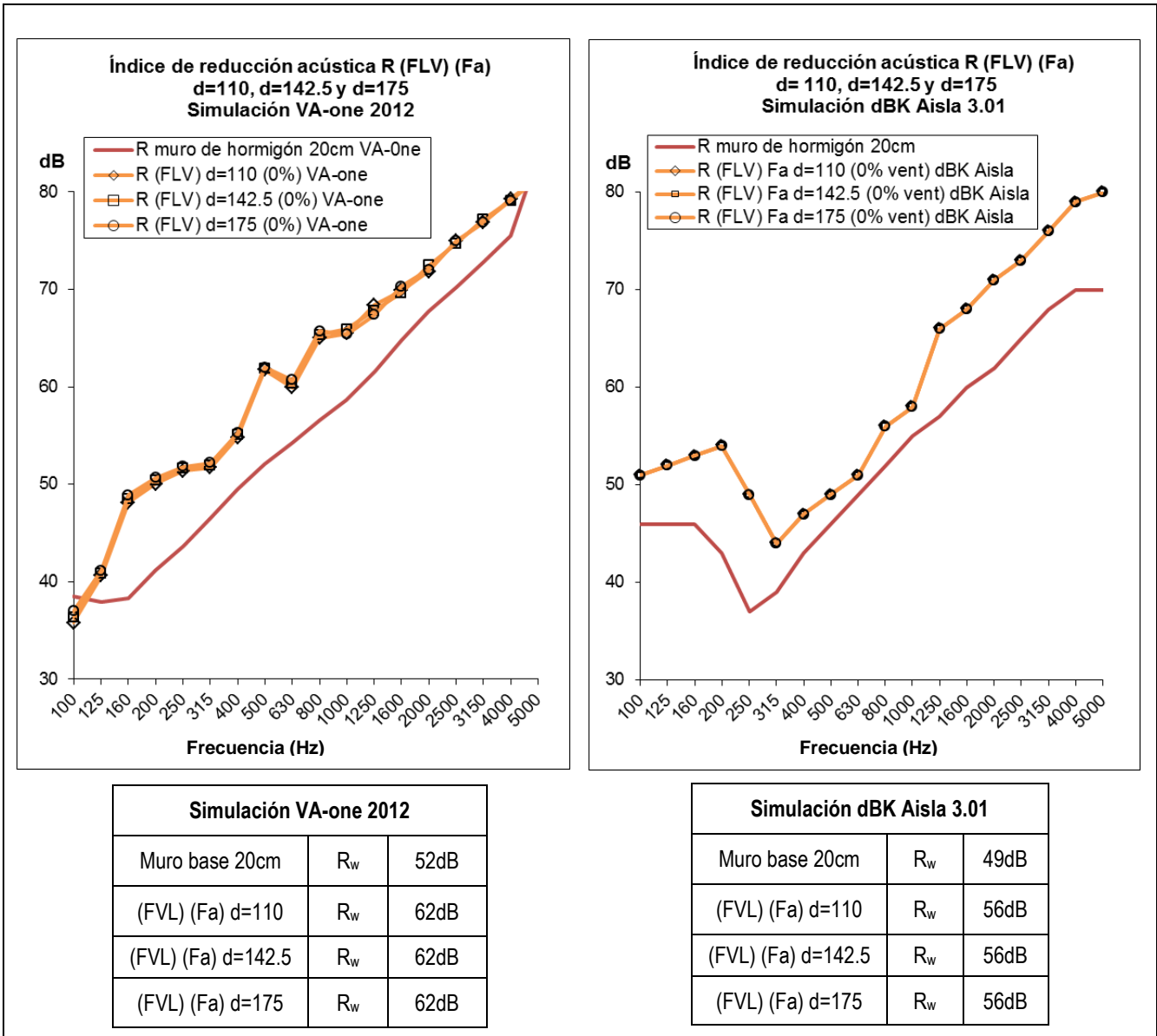
Características de la (FVL) sobre muro de hormigón, simulación en VA-one 2012 con la aplicación (NCT) mediante el módulo (SEA)							
Dimensionamiento de la superficie de (FVL) (L=4.60m x H=4.30m Área 19.78m ²)							
Elementos de configuración	Espesor (mm)		Densidad superficial m ² (kg/m ²)	Densidad ρ (kg/m ³)	Módulo de elasticidad E	Factor de pérdidas η	Coefficiente de poisson ν
Muro base de hormigón	200		500	2500	25x10 ⁹	Variable por frecuencias	0.3
Cámara intermedia	Lana mineral	+aire	2.4	40		-	Porosidad
							8.00E-01
							Tortuosidad
							1.1
							Flow resistivity
Hoja exterior (CB)	12.5		15	1050	5x10 ⁹	0.005	0.3

Tabla 4. 11 Valores de la (FVL) utilizados para la simulación en VA-one 2012. Características físico-mecánicas de la (FVL) de aportación al software para el cálculo con la herramienta (NCT). (D')

La simulación se realizó inicialmente con el estado de apertura (0% abierta), a fin de contrastar los resultados con el uso de otro software el dBK Aisla 3.01 (38), los resultados obtenidos se expresan en valores de índice de reducción acústica (Graph 4.16)

(37) (NCT) *Noise Control Treatment* aplicación del programa VA-one 2012 donde a una pared creada (en este caso el muro base de 20cm) se le agregan otras capas de materiales o de aire como un tratamiento de aislamiento acústico en conjunto simulando un sistema multicapa confinado sin aperturas.

(38) En la herramienta dBK Aisla 3.01 es posible el cálculo y predicción de sistemas ligeros multicapa, sin embargo no es posible introducir aperturas por lo que se pueden simular diferentes espesores de cámara pero no agregar aberturas.

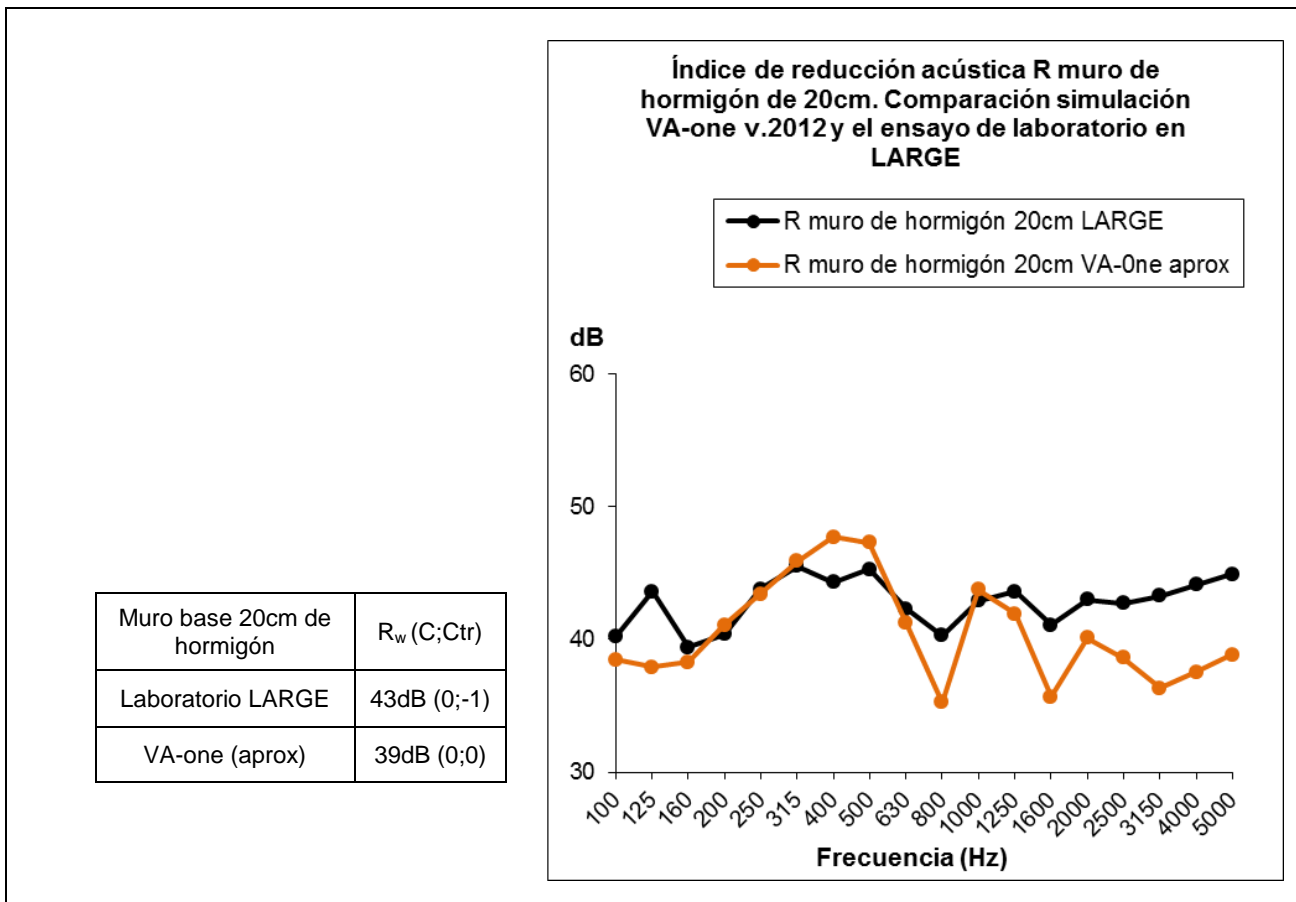


Graph 4.16 Resultados de aislamiento acústico de la (FVL) con las herramientas VA-one 2012 aplicación (NCT) y dBK Aisla 3.01. Simulación de (FVL) (Fa) con diferentes espesores de cámara d=110, d=142.5 y d=175 (0% abierta). (D')

En los resultados obtenidos de las dos simulaciones, se observa siempre un incremento significativo de aislamiento de la (FVL) frente al muro base desnudo y respecto a la variación de los espesores de cámara, tanto las gráficas como los resultados globales indican que la diferencia de espesor de la cámara de aire intermedia sin aperturas, no representa un cambio en el aislamiento como también se comprobó en la serie de simulaciones realizadas con INSUL 7.0.

Continuando con el ejercicio de simular la campaña 2 de laboratorio, se llevó a cabo una nueva serie de simulaciones en VA-one 2012, utilizando otras aplicaciones del software, mediante la creación de

una cámara intermedia⁽³⁹⁾ entre el muro base de hormigón de 20cm y el revestimiento ligero para conformar la (FVL), e introducir aberturas y simular los diferentes estados de apertura. Se inició simulando de nuevo el muro base utilizado en laboratorio, esta vez intentando aproximarse lo mejor posible a los valores de la curva de aislamiento obtenida en LARGE, de acuerdo a la realización de la campaña 2 en laboratorio, como se menciona anteriormente, el muro de hormigón no estaba totalmente sellado. Para su aproximación, se utiliza la aplicación del programa VA-one “*flanking leaks*” que permite disminuir el aislamiento de un elemento a través de introducir valores de pérdidas por transmisión de flancos o la inclusión de pequeñas fugas o agujeros puntuales, obteniendo:



Graph 4.17 Comparación de las curvas de aislamiento obtenidas en VA-One y en laboratorio del muro base. Resultado de laboratorio (línea negra) y resultado final VA-one (línea naranja) del muro base de hormigón de 20cm utilizado en la campaña de laboratorio (D')

En los resultados del índice de reducción acústica, la diferencia entre el valor global correspondiente a la campaña 2 de laboratorio y la simulación en VA-one 2012 es de 4dB, una aproximación aceptable.

(39) En el módulo (SEA) del software VA-one v.2012 existe la opción de creación de cámaras intermedias (paredes dobles). Esta aplicación permite adicionar elementos al interior como material absorbente acústico y la apertura de la cámara.

A continuación de la simulación del muro base, se procede a agregar el revestimiento ligero de la (FVL) mediante la creación de una cámara intermedia, para poder agregar aberturas y simular los diferentes grados de apertura planteados en el desarrollo de la campaña 2. En el caso de la creación de la cámara de aire intermedia, se utilizaron las mismas características físico-mecánicas de los elementos de configuración agregando la conexión entre hojas, los perfiles metálicos en los cantos horizontales inferior y superior de la (FVL) con las siguientes características:

Características de los perfiles metálicos de la (FVL) en la simulación con el método de creación de una cámara intrmedia (pared doble) en el módulo (SEA) de VA-one 2012						
Dimensionamiento de cada perfil metálico de la (FVL) 50X50 mm						
Elementos de configuración	Espesor (mm)	Densidad superficial m'' (kg/m ²)	Densidad ρ (kg/m ³)	Módulo de elasticidad E	Factor de pérdidas η	Coeficiente de poisson ν
Perfiles metálicos	0.7	18.9	2700	7.1×10^{10}	0.001	0.3

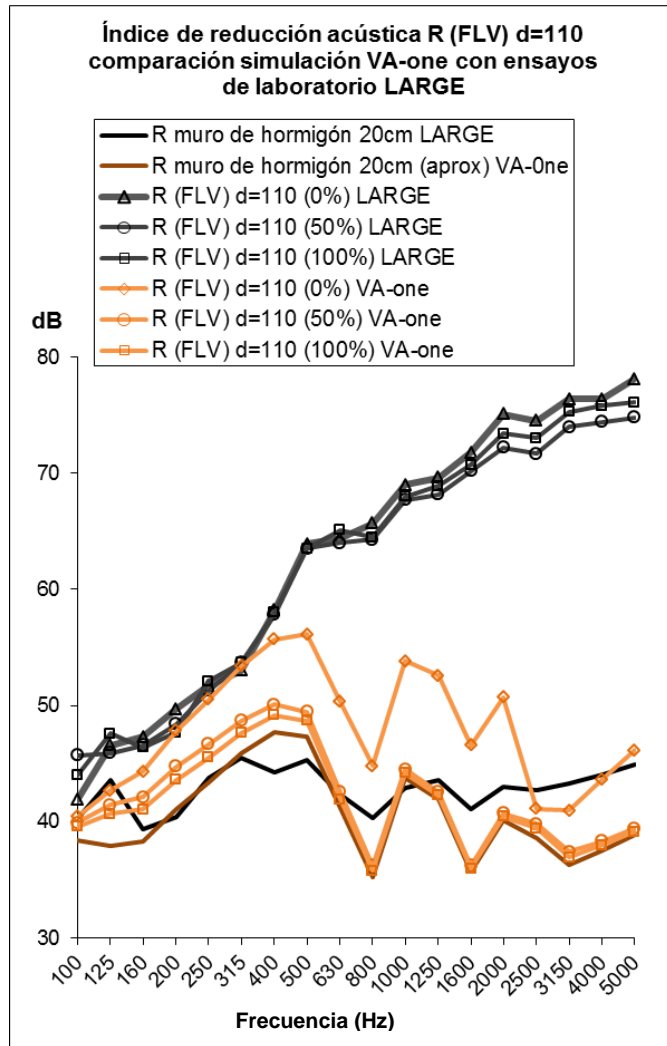
Tabla 4.12 Definición de los valores paramétricos de los perfiles de la (FVL) para la simulación VA-one. (D')

Las simulaciones se realizaron tanto para el muro base con el comportamiento habitual de un muro de hormigón de 20cm, como para el muro base usado en la campaña 2, al cual se le aplicó una disminución del aislamiento acústico con la herramienta *flanking leaks* (para representar la disminución del aislamiento acústico del muro base de LARGE) (Graph 4.18 y 4.19).

En los resultados obtenidos de la simulación en VA-one 2012 de los diferentes grados de apertura planteados en la campaña 2 (0%, 50% y 100%) de la cámara de aire intermedia de la (FVL) de configuración (Fa) d=110 mediante la modelación en (SEA) y el método de creación de una cámara intermedia, se encontraron diferencias en el la curva de aislamiento acústico entre los diferentes grados de apertura de la (FVL) respecto al muro base de hormigón en los dos casos de muro base probados.

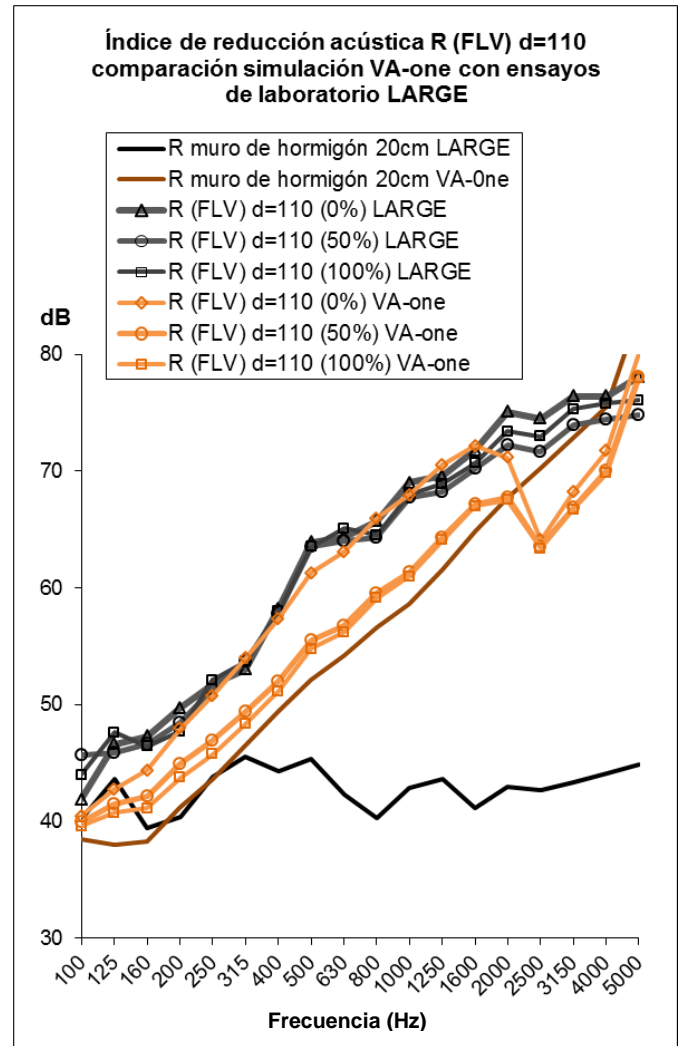
En el caso de la simulación del muro base de LARGE (resultado 1 Graph 4.18) los diferentes grados de apertura para la ventilación de la (FVL) siguen la curva del muro base, es decir presenta un comportamiento similar aunque con un aumento marcado del aislamiento. Mientras que en el caso del muro base sin alteraciones (Graph 4.19) las curvas de aislamiento de los diferentes grados de apertura de la (FVL) muestran una caída en la frecuencia de coincidencia del material (CB) $f_c = 2470\text{Hz}$

Simulación aproximándose al resultado en laboratorio (teniendo en cuenta una disminución del aislamiento del muro)



Graph 4.18 Resultados 1 de aislamiento de simulación de VA-One de la (FVL) con diferentes grados de apertura. Teniendo como muro base la simulación aproximada al muro de LARGE (D')

Simulación sin alterar el muro base (correspondiente a un muro de hormigón de 20cm de espesor)



Graph 4.19 Resultados 2 de aislamiento de simulación de VA-One de la (FVL) con diferentes grados de apertura. Teniendo como muro base la simulación de un muro de hormigón de 20cm (D')

Conviene recordar que cuando una placa (elemento sólido plano de gran superficie y poco espesor) tiene una frecuencia crítica (o de coincidencia) muy alta, como la que tiene un vidrio o una placa de cartón yeso, y además presenta aberturas, estas transmisiones a través de las aberturas se ven influidas por la propia placa que atraviesan (Hopkins 2007).

Aparentemente el comportamiento de la (FVL) al incluir aberturas de ventilación en la cámara de aire intermedia, es diferente en los dos casos simulados (resultado 1 Graph 4.18 y resultado 2 Graph 4.19). En los resultados globales también se observan estas diferencias (Tabla 4.13)

Simulación VA-one 2012 (Aproximación del muro base al de LARGE) Resultado 1 (Graph 5.18)			Simulación VA-one 2012 (muro base sin alterar) Resultado 2 (Graph 5.19)		
Muro base 20cm	R_w	39dB	Muro base 20cm	R_w	52dB
(FVL) (Fa) d=110 (0% abierta)	R_w	47dB	(FVL) (Fa) d=110 (0% abierta)	R_w	61dB
(FVL) (Fa) d=110 (50% abierta)	R_w	44dB	(FVL) (Fa) d=110 (50% abierta)	R_w	55dB
(FVL) (Fa) d=110 (100% abierta)	R_w	43dB	(FVL) (Fa) d=110 (100% abierta)	R_w	56dB

Simulación VA-one 2012 Resultado 1	ΔR_w (FVL) (Fa) d=110 (0% abierta) frente al muro base	8dB
Simulación VA-one 2012 Resultado 2	ΔR_w (FVL) (Fa) d=110 (0% abierta) frente al muro base	9dB

Tabla 4.13 Resultados globales de aislamiento en la simulación VA-One 2012 de (FVL) con los diferentes grados de apertura. Comparación de los dos métodos de simulación efectuados (D')

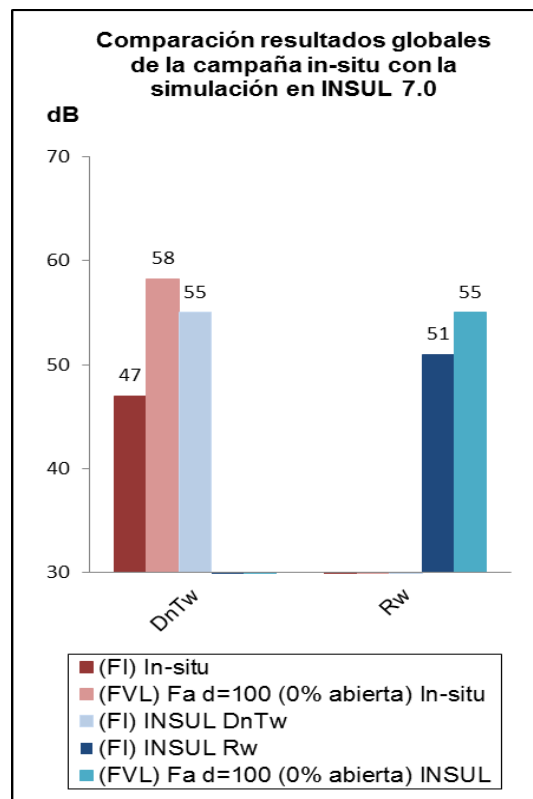
Continuando con este procedimiento, se efectuaron las simulaciones de los diferentes espesores (d) de la (FVL) de configuración (Fa) (Hoja exterior continua con juntas selladas) desarrollados para la campaña 2 de laboratorio; los resultados obtenidos fueron muy similares entre ellos, sin presentar diferencias entre los casos de variación de los espesores de cámara de aire intermedia d=110, d=142.5 y d=175.

En el uso del software VA-one se planteó también simular la campaña 1 in-situ, realizada en un tramo del edificio de la ETSAV. Se llegó a simular el muro base (FI) pero se descartaron los resultados obtenidos por ser poco fiables debido a la dificultad de reproducción de las condiciones específicas del lugar de ensayo y su complejidad de: el muro doble, la forma de la sala receptora y la cubierta con lucernarios (características de las condiciones de la campaña 2). En acústica para representar condiciones similares y llegar a su posterior análisis no es de fácil obtención, al menos con las herramientas exploradas, por otro lado se encontró necesaria la utilización del módulo (FEM) de VA-one 2012 lo cual fue de lenta experimentación y los resultados no fueron satisfactorios por lo que no se concluyó la simulación de la campaña 1.in-situ.

4.5.1 Análisis y conclusiones de los resultados obtenidos en la campaña 3. de simulación

En la campaña 3 de simulación, mediante el uso de las diferentes herramientas informáticas disponibles para esta tesis INSUL v.7.0, dBK Aisla v.3.01 y VA-one v.2012, fue posible comprobar el rendimiento beneficioso de la (FVL) frente a un muro base desnudo, contrastando los resultados obtenidos con los valores de las campaña 1. in-situ y la campaña 2. de laboratorio.

A continuación se muestran de forma resumida la comparación de los resultados del rendimiento acústico en valores de índice global de reducción acústica (R_w) y en valores de diferencia de niveles estandarizada ($D_{nT,w}$) obtenidos en la simulación de la campaña 1 in-situ, la cual se pudo efectuar solo con el software INSUL v.7.0.



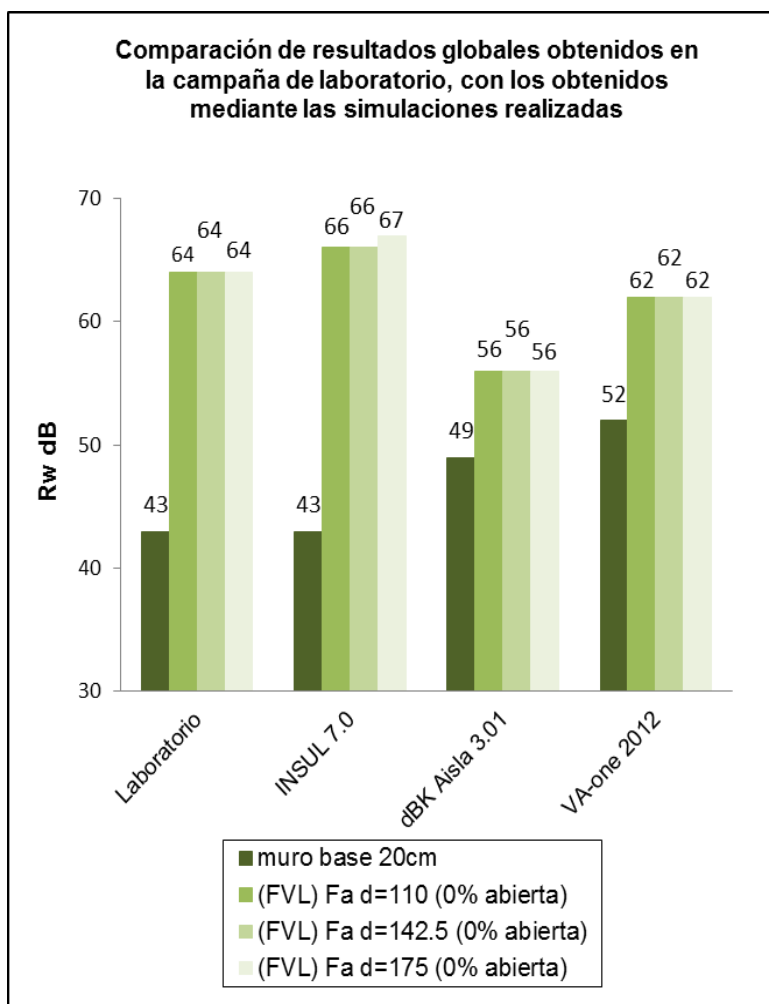
Graph 4.20 Comparación de resultados globales obtenidos mediante INSUL 7.0 para la campaña in-situ. Contraste en valores de diferencia de niveles estandarizada y en índice de reducción acústica (D')

De ésta simulación se concluye que aunque los valores obtenidos en la simulación pudieron aproximarse suficientemente a los obtenidos en la campaña 1 in-situ para al muro base (FI), los resultados globales no llegan a ser similares (valores $D_{nT,w}$ en la Graph 4.20).

En cuanto al rendimiento acústico logrado con la solución de (FVL) frente al muro base (FI), los valores alcanzados en la campaña 1 in-situ son aparentemente mayores (aproximadamente 11dB) frente a los obtenidos con INSUL 7.0 (aproximadamente 4dB); tal vez el motivo de esta diferencia esta en el hecho de que a la simulación realizada con INSUL 7.0 se le agregó una obertura “virtual” de transmisión por flancos en el muro base (FI), lo cual pudo influir en el cálculo informático para la obtención de resultados (ver Graph 4.11).

En los ejercicios de simulación llevados a cabo con las diferentes herramientas de software, no fue posible la simulación completa de la campaña in-situ debido principalmente a la difícil representación de las condiciones físicas y ambientales de la realización. Por otro lado las tres herramientas de software utilizadas, solo el programa VA-one tiene la posibilidad de recrear situaciones casi reales con suficiente precisión, tanto por la recreación espacial como a la descripción de situaciones acústicas concretas como aberturas puntuales o diferentes tipos de cerramientos y materiales, para ello es importante conocer a fondo las características y valores necesarios para introducirlos en el software, los cuales en algunos casos son de difícil adquisición. En general se puede afirmar que los software de cálculo y predicción utilizados sirven para la obtención de resultados orientativos y es necesario su contraste con ensayos reales.

La simulación de la (FVL) de configuración (Fa) con diferentes espesores de cámara de aire intermedia (campaña 2) se realizó mediante las diferentes herramientas de software utilizadas, lo que permitió contrastar los resultados con los valores obtenidos en la campaña 2 de laboratorio con la (FVL) 0% abierta. La apertura gradual de la superficie para la ventilación de la cámara de aire intermedia de la (FVL) se llevó a cabo con la ayuda del programa VA-one 2012. Los resultados en R_w de la simulación y de la campaña 2 de laboratorio se muestran en la siguiente gráfica (Graph 4.21)



Graph 4.21 Resultados de aislamiento acústico de la (FVL) con diferentes espesores de la cámara de aire intermedia. Obtención mediante la simulación con las herramientas utilizadas y los resultados de la campaña de laboratorio (D²)

Los resultados globales muestran valores similares entre los obtenidos con INSUL y los valores obtenidos en la campaña 2 de laboratorio; cabe recordar que en la simulación realizada con INSUL, el muro base de 20cm se tomó con una densidad superficial de 250Kg/m² (la mitad del valor real del muro del laboratorio LARGE) para lograr una aproximación numérica.

Por otro lado los valores globales obtenidos respectivamente en dBK Aisla3.01 y VA-one2012 muestran un comportamiento muy similar entre ellos pero no con respecto a los de la campaña 2 de laboratorio; en estos casos no se alteró el valor nominal de la densidad superficial del muro base de 20cm de hormigón, por lo que el incremento de rendimiento obtenido es de 7dB en la simulación dBK Aisla y de 10dB en la simulación VA-one; por el contrario en los resultados de la campaña 2 de laboratorio se obtiene un incremento de rendimiento global de 21dB y de 23dB respectivamente en la

simulación con INSUL. Este software es el que menos valora el rendimiento de las condiciones de partida y el que más valora el incremento obtenido en las condiciones finales.

Estos resultados interpretados parecen indicar indirectamente que la densidad superficial del muro base (FI) influye de forma muy determinante en el incremento del rendimiento global de la solución de la (FVL). La adición de un sistema de revestimiento ligero como componente de la (FVL) a un muro base de baja masa representa una mejora relativamente importante en el incremento del aislamiento acústico de partida.

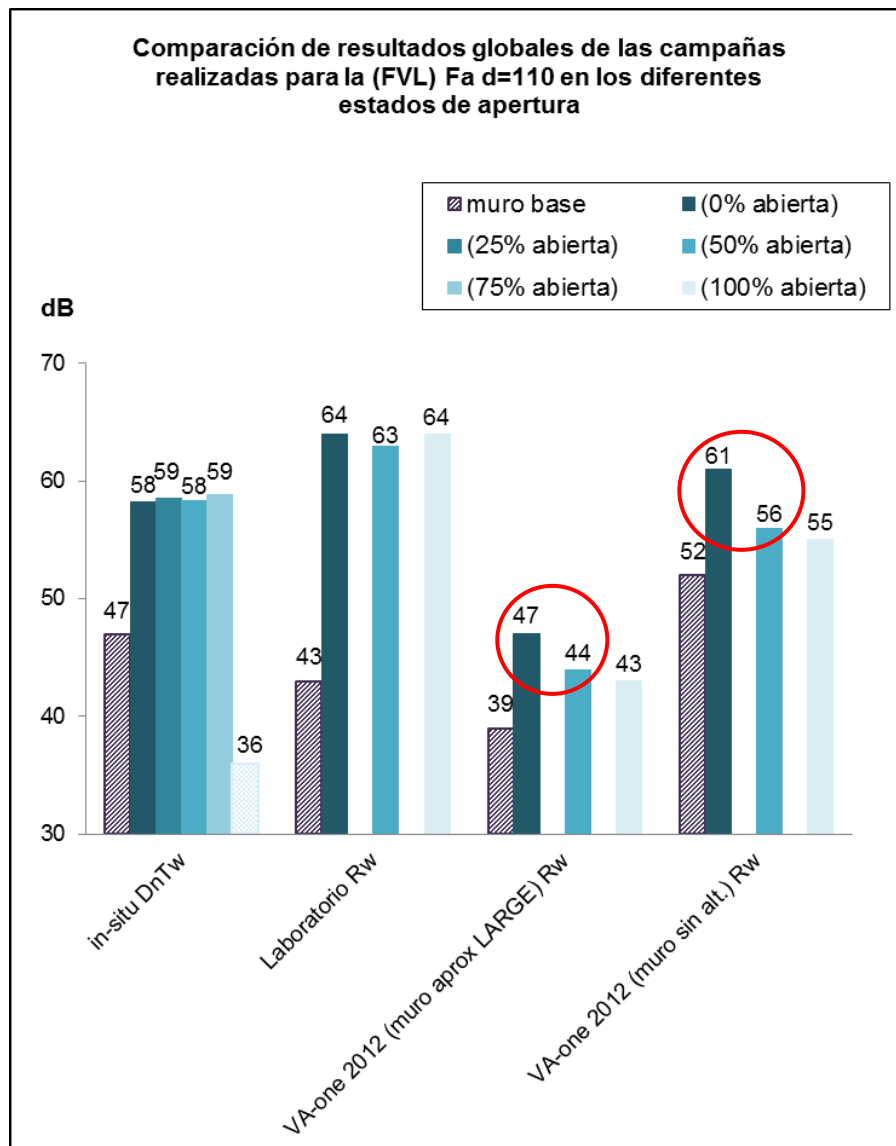
Volviendo a los resultados globales R_w (Graph 4.21), tanto en las mediciones realizadas en la campaña 2 de laboratorio como en las simulaciones efectuadas con las diferentes herramientas de software usadas, aparentemente no se observa ninguna diferencia significativa en la variación del espesor de la cámara de aire ventilada dentro del rango del sistema de (FVL) probado.

En cuanto al grado de apertura de la cámara de aire intermedia ventilada del sistema de (FVL), en la siguiente gráfica (Graph 4.22) se muestran los resultados globales en índice de reducción acústica R_w y diferencia de niveles estandarizada D_{2m,nT_w} obtenidos para la (FVL) de configuración Fa d=110 con los grados de apertura planteados para la campaña 1 in-situ (0%, 25%, 50%, 75% y 100% abierta) y para la campaña 2 de laboratorio (0%, 50% y 100% abierta), contrastadas con dos simulaciones efectuadas en VA-one 2012, única herramienta informática que permite variar el grado de apertura de la cámara de aire intermedia :

- Una simulación se realizó con la alteración previa de las características del muro base para aproximarse a los resultados obtenidos en la campaña 2 de laboratorio y
- Otra simulación se realizó con el muro base sin ninguna alteración previa.

En las dos simulaciones de la densidad superficial considerada del muro es de 500Kg/m², como la que constituye el muro de LARGE utilizado en la campaña 2 de laboratorio.

En los valores globales de la campaña 2 de laboratorio se observa que aparentemente no hay una variación de valores marcada entre los diferentes grados de apertura; excepto en los ejercicios de simulación, donde si se observa una cierta variación en los resultados de la (FVL) en el tramo de grados de apertura de 0% a 50%, de 3 a 5dB (círculos en rojo).



Graph 4.22 Comparación de los resultados obtenidos en las diferentes campañas para la (FVL) Fa d=110 con los grados de apertura. Los círculos rojos muestran la variación de los resultados globales de la apertura de la (FVL) en las simulaciones (D')

Esto podría responder a una lógica propia del programa informático, donde por ejemplo si la cámara de aire intermedia de la (FVL) presenta un 0% abierta de superficie de ventilación se asume que la cámara de aire intermedia es estanca y que al abrirla progresivamente hay una modificación paulatina del aislamiento al modificarse la elasticidad del medio (aire) (Graph 4.18, 4.19 y 4.22); sin embargo en el tramo de 50% a 100% de apertura, esta elasticidad (efecto resorte) ya no se modifica substancialmente, solo 1dB. Ésta última pequeña diferenciación del aislamiento acústico entre los grados de apertura, es un aspecto a estudiar respecto a que tanto influye el grado de apertura de la cámara de aire intermedia ventilada en los valores de aislamiento acústico del conjunto de la (FVL).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las simulaciones de los diferentes grados de apertura de la cámara de aire intermedia ventilada se efectuaron partiendo de las características de la (FVL) desarrollada para la campaña 2 de laboratorio, aplicando las superficies de las aberturas en el mismo plano de la hoja exterior (paneles de CB); en este punto hay que considerar si la orientación del plano de la superficie de la abertura (perpendicular o paralelo al frente de la onda acústica) puede representar algún cambio significativo en el comportamiento acústico; cabe recordar que en la campaña 1 in-situ las aberturas se realizaron en los extremos horizontales (inferior y superior) del perímetro de la cámara de aire intermedia, mientras que en la campaña 2 de laboratorio, el plano de la superficie de abertura se situó en la misma hoja de (CB) para evitar al máximo el efecto de las reflexiones de los planos horizontales de la sala.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la campaña 3 de simulación y las reflexiones mencionadas, se plantea otra serie de simulaciones con el software VA-one2012 y la ayuda de dBK Aisla 3.0, a fin de intentar aclarar algunas cuestiones sobre el comportamiento acústico de una pared doble con una cámara de aire intermedia de espesor (d).

- Según se describió anteriormente, varios investigadores como: (M. Harris 1995) (Warnock and J.D. Quirt 1997) y (Hopkins 2007) entre otros, sostienen que el aumento de espesor de la cámara de un cerramiento doble puede incrementar su rendimiento acústico, en la siguiente gráfica (Fig. 4.10) se ejemplifica esta variación según los investigadores, aunque sería necesario su futura comprobación con nuevas simulaciones que no se han realizado hasta ahora:

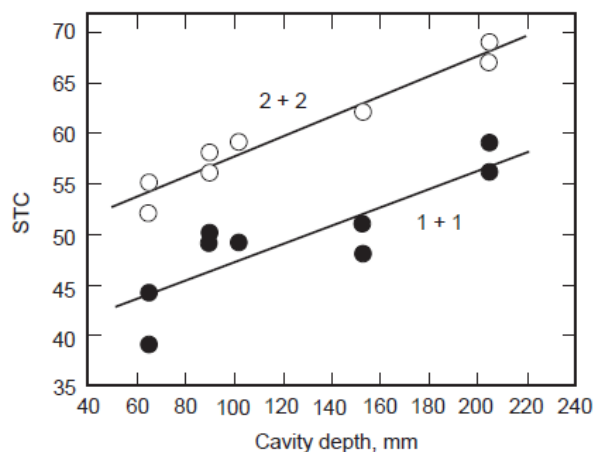


Fig.4.10 Gráfica del aumento del rendimiento acústico de un entramado autoportante de yeso variando el espesor de la cámara. El valor 2+2 indica doble placa y 1+1 una placa, en todos los casos la cámara esta rellena de material absorbente proporcional (B21)

Una interpretación posible en el caso que nos ocupa, es que la presencia de una capa de 60mm de material acústicamente absorbente dentro de la cámara de aire intermedia enmascare en gran parte el efecto de las pequeñas variaciones del espesor de la cámara de aire intermedia (d=110, d=142.5 y

d=175) este posible “enmascaramiento” se produce por igual sea cual fuere la orientación de la superficie de obertura.

4.6 Análisis práctico del comportamiento acústico de un cerramiento doble con cámara de aire intermedia de espesor y apertura variable

Este apartado de la tesis está dedicado a la observación y desarrollo práctico del comportamiento acústico de un cerramiento doble cuando se varían algunas de las características de la cámara de aire intermedia como son: el espesor, la inclusión de material acústicamente absorbente y el grado de apertura a fin de conocer como es su comportamiento frente a estas variables, este análisis surge tras investigar estos aspectos de la (FVL) propuesta y desarrollada en la tesis.

Hasta ahora se han obtenido varios resultados aceptables que demuestran como es el comportamiento acústico de la (FVL) y su comportamiento frente a la variabilidad de las características de la cámara de aire intermedia. Como se menciona anteriormente, los resultados obtenidos de tipo predictivo con el uso de herramientas de simulación deben poder contrastarse con ensayos reales para asegurar su fiabilidad, a lo largo del desarrollo de ésta tesis se ha contrado que existe escasa documentación sobre la realización de ensayos acústicos efectuados a sistemas de (FVL) debido a su singularidad de uso y aplicación, por lo que se recurre a indagar en elementos de doble pared que representan una baja complejidad y de los cuales se encuentra mas información tanto de ensayos acústicos como de características de materiales. A partir de la búsqueda y análisis de ensayos y su contraste, se realiza una nueva serie de simulaciones con la herramienta de software VA-one 2012 y la ayuda de dBK Aisla, a fin de dilucidar la influencia de los parámetros de apertura de la cámara de aire intermedia, propuestos anteriormente.

Se consultaron publicaciones y ensayos realizados por varias empresas sobre cerramientos dobles (muros de partición interna) conformados por placas de yeso laminado (PYL) y perfilería metálica con varios espesores de cámara de aire intermedia (Fig.4.11).

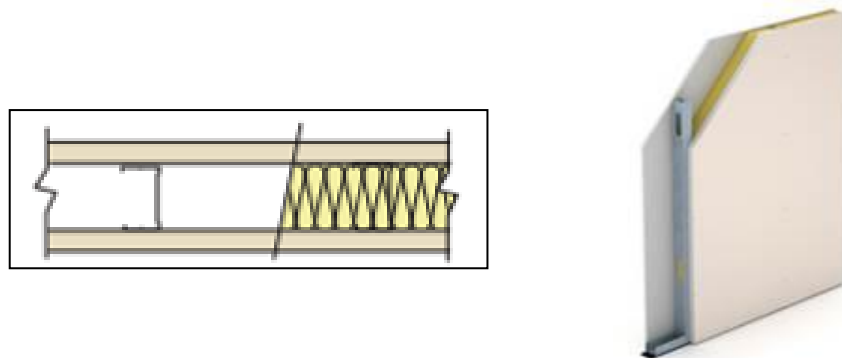


Fig.4.11 Esquema de un cerramiento doble de placas de yeso o entramado autoportante.
Con y sin material absorbente. (C30)

A partir de referentes consultados se profundizó en el aislamiento acústico de los cerramientos dobles con diversos espesores de cámara de aire intermedia, con y sin disposición de una capa de material acústicamente absorbente en su interior. Así mismo se investigó en identificar diferencias en el aislamiento acústico entre los distintos valores de espesor de cámara y la influencia de la inclusión de material absorbente dentro de dicha cámara.

4.6.1 Comparación de diferentes casos de cerramientos dobles de placas de yeso laminado (PYL) a partir de ensayos de laboratorio

Ensayos realizados por la empresa Yesos Ibéricos, marca Pladur, que produce placa de yeso laminado y ofrece sistemas de cerramientos interiores realizados con entramados autoportantes de perfiles ensamblados.

A continuación se describen las configuraciones ensayadas:

- Cerramiento doble con cámara de aire intermedia, vacía:

Ensayo denominado por la empresa como: (AC3-D10-97.VII) con la configuración de placas de yeso laminado PYL 19+46+PYL19 (mm) y el ensayo denominado por la empresa como: (AC3-D7-92.9) con la configuración de placas de yeso laminado PYL 19+70+PYL19 (mm)

- Cerramiento doble con cámara de aire intermedia con material acústicamente absorbente (Lv):

Ensayo denominado por la empresa como: (AC3-D10-80.II) de configuración de placas de yeso laminado PYL19+46Lv+PYL19 (mm) y el ensayo denominado por la empresa como: (AC3-D1-82.6) de configuración de placas de yeso laminado PYL19+70Lv+PYL19 (mm)

Placas de yeso PYL (mm)	Cámara intermedia con perfiles metálicos "c" (mm)	Material acústicamente absorbente Lv (mm) m"	Superficie m ²
19	48 -50	-	12 m ²
19	70	-	12 m ²

Tabla 4. 14 Especificaciones de la configuración del entramado autoportante. Ensayos (AC3-D10-97.VII), (AC3-D7-92.9), (AC3-D10-80.II) y (AC3-D1-82.6) (F2).

En una publicación sobre el estudio del aislamiento acústico de estos cerramientos de entramados autoportante, "*Análisis acústico de soluciones constructivas con hojas de entramado autoportante*". (Vázquez, Olaya, Zaballos 2008) [17] se muestran también diversos casos ensayados en laboratorio de entramados autoportantes formados por las siguientes configuraciones de placas de yeso laminado de 25mm de cámara de aire intermedia con y sin material acústicamente absorbente (MA).

PYL25+46+PYL25/ PYL25+70+PYL25 y PYL25+46(MA)+PYL25/ PYL25+70(MA)+PYL25 (mm)

Placas de yeso PYL (mm)	Cámara intermedia con perfiles metálicos "c" (mm)	Material acústicamente absorbente MA (mm) m"	Superficie m ²
25	46	40mm y 1.2kg/m ²	10m ²
25	70	50mm y 2.5kg/m ²	10m ²

Tabla 4. 15 Especificaciones de la configuración del entramado autoportante. Ensayos de la publicación [17] (F2).

En el documento *"Gypsum Board Wall: Transmission Loss Data"* (Halliwell, R.E; Nightingale, T.R.T; Warnock, A.C.C, Birta, J.A 1998)[18] se encuentran también varios ensayos similares realizados. El aislamiento acústico resultante se mide en valores de (TL) "Transmission loss" y como valor global STC *"Sound Transmisssion Class"* método de la normativa estadounidense equivalente al índice de reducción acústica R de la norma ISO.

-Cerramiento doble cámara vacía:

Ensayo denominado en la publicación como: (TL-93-032) con la configuración de placas de yeso laminado PYL16mm+ una cámara de 65mm +PYL16 y el ensayo denominado por la publicación como: (TL-92-376) con una configuración similar de placas de yeso laminado PYL16+ una cámara de 90mm+PYL16 (mm)

-Cerramiento doble de placas de yeso laminado (PYL), cámara con y sin material acústicamente absorbente (MA):

Ensayo denominado en la publicación como: (TL-93-033) con la configuración de placas de yeso laminado (PYL) PYL16+65(MA)+PYL16 mm y el ensayo (TL-92-399) con la configuración PYL16+90(MA)+PYL16 (mm).



Fig.4.12 Esquema de entramado autoportante. Con y sin material absorbente, tomado de la publicación [18] (B24).

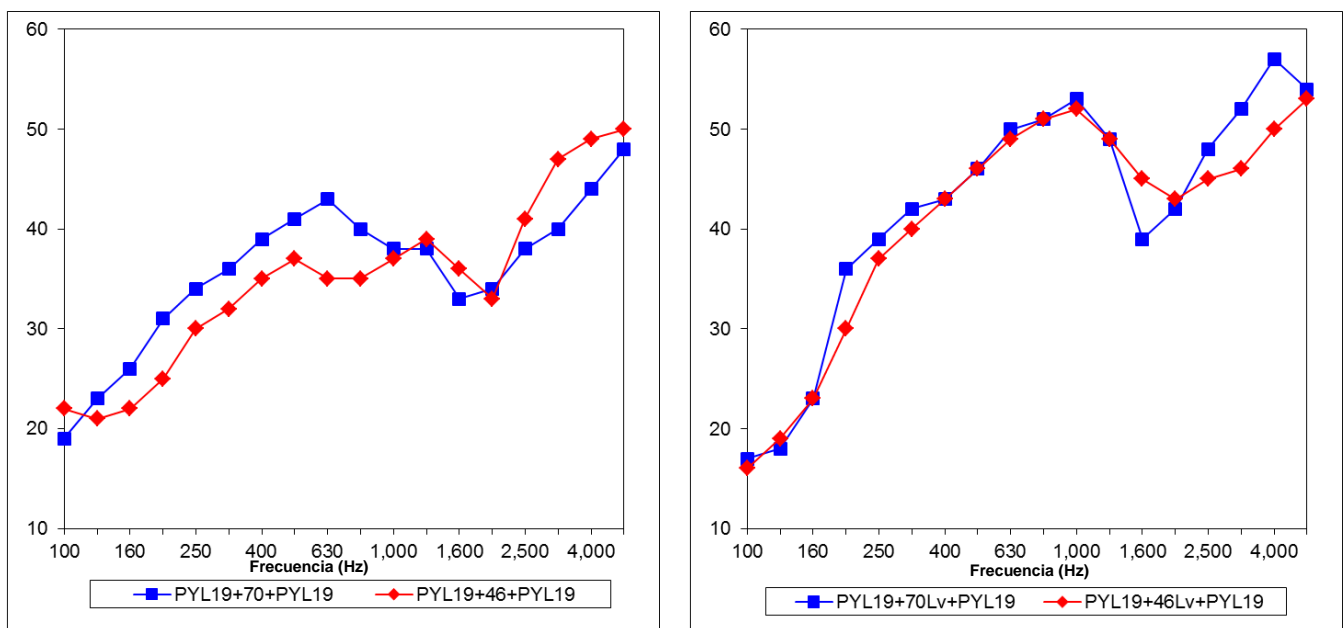
Placas de yeso PYL (mm)	Cámara intermedia con perfiles metálicos "c" (mm)	Material acústicamente absorbente Lv (mm) m"	Superficie m ²
16	65	65mm y 0.8kg/m ²	11 m ²
16	90	90mm y 1.2kg/m ²	11 m ²

Tabla 4. 16 Características de los entramados autoportantes. Con y sin material absorbente, tomado de la publicación [18] (B24).

A continuación se analiza el índice de reducción acústica de estos diferentes ensayos consultados y se contrastan entre si por espesores de cámara y por la inclusión, o no, de material absorbente.

En los ensayos (AC3-D10-97.VII) y (AC3-D7-92.9) realizados con placas de yeso de 19mm de grosor y espesores de cámara de aire intermedia de 46 y 70mm (sin interposición de material absorbente) (Graph 4.23 Izq.), se observa un incremento en el índice de reducción acústica a bajas frecuencias cuando la cámara intermedia tiene un espesor de 70mm frente al caso del espesor de 46mm. Hacia el rango de las frecuencias más altas se presenta un marcado decrecimiento en el caso de la cámara de 70mm, decrecimiento situado justo después de la caída tipo que se manifiesta por la frecuencia crítica, rango donde el entramado con cámara de aire intermedia de 46mm muestra una mejora respecto al de 70mm. La diferencia de espesor entre una y otra cámara es de 24mm.

En los ensayos (AC3-D10-80.II) y (AC3-D1-82.6) con cámaras de aire intermedia de 46 y 70mm de espesor (con material acústicamente absorbente en su interior) (Graph 4.23 Der.), la diferencia de valores del índice de reducción acústica entre los dos casos no varía tanto, sin embargo a altas frecuencias hay un incremento de mejora de aislamiento en el caso de la cámara de aire intermedia con mayor espesor.



Graph 4.23 índice de reducción acústica de entramados autoportantes de placa de yeso de 19mm y cámaras de 46mm y 70mm. Izq. Cámara vacía (AC3-D10-97.VII) y (AC3-D7-92.9) **Der.** Cámara con material absorbente (AC3-D10-80.II) y (AC3-D1-82.6) (F2)

La frecuencia de coincidencia f_c de la placa de yeso de 19mm de espesor y la frecuencia de resonancia f_{msm} para el sistema doble, con y sin material absorbente son:

$f_c =$	1691 Hz
---------	---------

f_{msm} Cámara vacía 46mm =	98 Hz
f_{msm} Cámara vacía 70mm =	80 Hz

f_{msm} Cámara con mat. abs. 46mm =	52 Hz
f_{msm} Cámara con mat. Abs. 70mm =	42 Hz

El aislamiento global de estas soluciones:

AC3-D10-97.VII PYL19+46+PYL	Rw (C;CTr) = 37 (-2;-5) dB RA = 36dB	AC3-D7-92.9 PYL19+70+PYL19	Rw (C;CTr) = 38 (-2;-4) dB RA = 37dB
AC3-D10-80-II PYL19+46Lv+PYL19	Rw (C;CTr) = 42 (-3; -9) dB RA = 40.5dB	AC3-D1-82.6 PYL19+70Lv+PYL19	Rw (C;CTr) = 42 (-3;-9) dB RA = 40dB

Tabla 4.17 Valores de aislamiento global de los entramados autoportantes, placas de yeso de 19mm. Con diferentes espesores de cámara, con y sin material absorbente. (F2)

En los casos de la publicación [17] de cerramientos interiores realizados con entramados de doble hoja de placas de yeso de 25mm de espesor, con una cámara de aire intermedia sin absorbente, de configuraciones PYL25+46+PYL25 y PYL25+70+PYL25 (mm) (Graph 4.23 Izq.), se observan algunas diferencias entre los dos casos, especialmente en el rango de las bajas frecuencias. Se evidencia un incremento del índice de reducción acústica en el caso de la cámara de aire intermedia vacía y de mayor espesor, en el rango de las altas frecuencias se presenta una situación similar a la ya comentada en los ensayos anteriores: una ligera mejora del comportamiento de la configuración del cerramiento con cámara de aire intermedia de menor espesor, después de la caída de la curva de aislamiento motivada por la frecuencia crítica.

En las configuraciones PYL25+46(MA)+PYL25 y PYL25+70(MA)+PYL25 (mm) (Graph 4.24 Der.) en las que las cámaras de aire intermedias con material absorbente, las curvas tienden a mostrar menor diferencia entre los dos espesores de cámara, sin embargo se mantiene un ligero incremento de aislamiento cuando la cámara rellena es de 46mm de espesor frente a la de 70mm.

La frecuencia de coincidencia f_c de la placa de yeso de 25mm de espesor y la frecuencia de resonancia f_{msm} para el sistema doble, con y sin material absorbente, es:

$f_c =$	1285 Hz
---------	---------

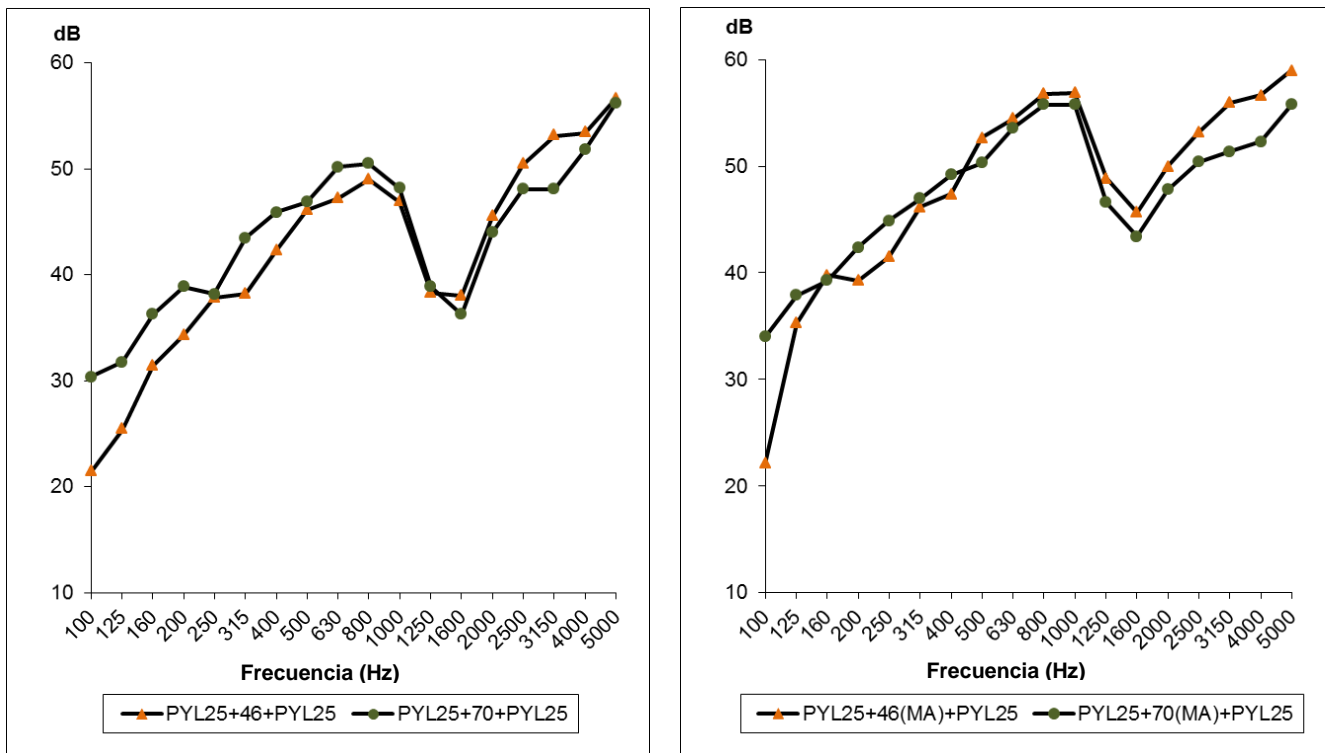
f_{msm} Cámara vacía de 46mm =	86 Hz
f_{msm} Cámara vacía de 70mm =	70 Hz

f_{msm} Cámara con mat. abs. 46mm =	46 Hz
f_{msm} Cámara con mat. abs. 70mm =	37 Hz

El aislamiento global de estas soluciones:

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">PYL25+46+PYL25</td> <td style="padding: 5px;">Rw (C;CTr) = 44dB (-3;-7)</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="padding: 5px;">RA = 41dB</td> </tr> </table>	PYL25+46+PYL25	Rw (C;CTr) = 44dB (-3;-7)		RA = 41dB	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">PYL25+70+PYL25</td> <td style="padding: 5px;">Rw (C;CTr) = 45dB (-3;-4)</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="padding: 5px;">RA = 42dB</td> </tr> </table>	PYL25+70+PYL25	Rw (C;CTr) = 45dB (-3;-4)		RA = 42dB
PYL25+46+PYL25	Rw (C;CTr) = 44dB (-3;-7)								
	RA = 41dB								
PYL25+70+PYL25	Rw (C;CTr) = 45dB (-3;-4)								
	RA = 42dB								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">PYL25+46(MA)+PYL25</td> <td style="padding: 5px;">Rw (C;CTr) = 50dB (-3;-9)</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="padding: 5px;">RA = 47dB</td> </tr> </table>	PYL25+46(MA)+PYL25	Rw (C;CTr) = 50dB (-3;-9)		RA = 47dB	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">PYL25+70(MA)+PYL25</td> <td style="padding: 5px;">Rw (C;CTr) = 50dB (-2;-3)</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="padding: 5px;">RA = 48dB</td> </tr> </table>	PYL25+70(MA)+PYL25	Rw (C;CTr) = 50dB (-2;-3)		RA = 48dB
PYL25+46(MA)+PYL25	Rw (C;CTr) = 50dB (-3;-9)								
	RA = 47dB								
PYL25+70(MA)+PYL25	Rw (C;CTr) = 50dB (-2;-3)								
	RA = 48dB								

Tabla 4.18 Valores de aislamiento global de los entramados autoportantes, placas de yeso de 25mm. Con diferentes espesores de cámara, con y sin material absorbente. (B19)



Graph 4.24 índice de reducción acústica de entramados autoportantes placa de yeso de 25mm, cámaras de 46mm y 70mm. Izq. Cámara vacía Der. Cámara con material absorbente (B29)

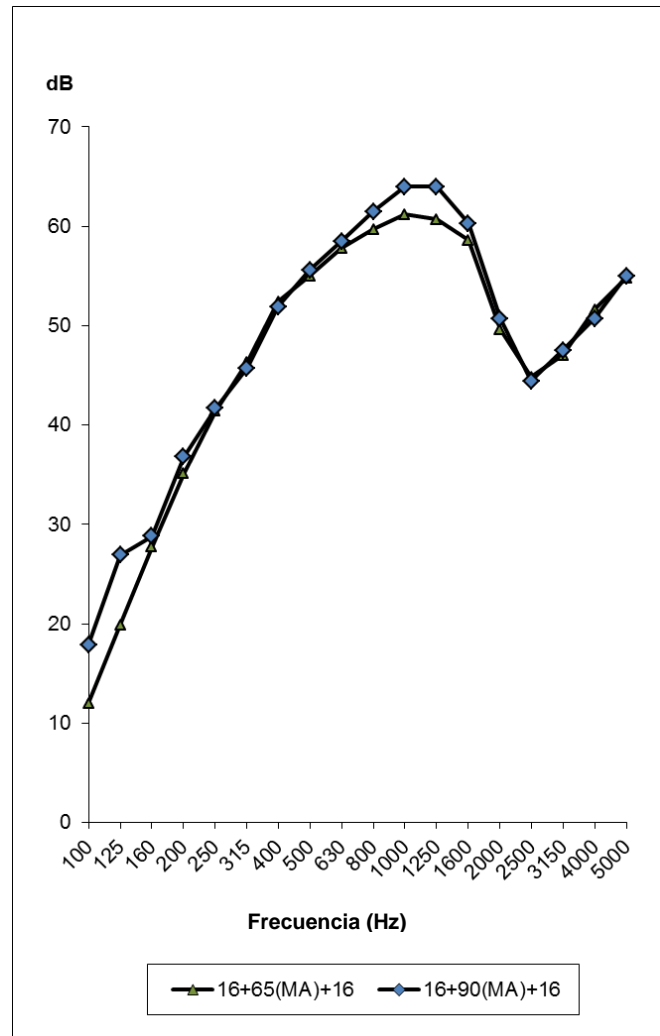
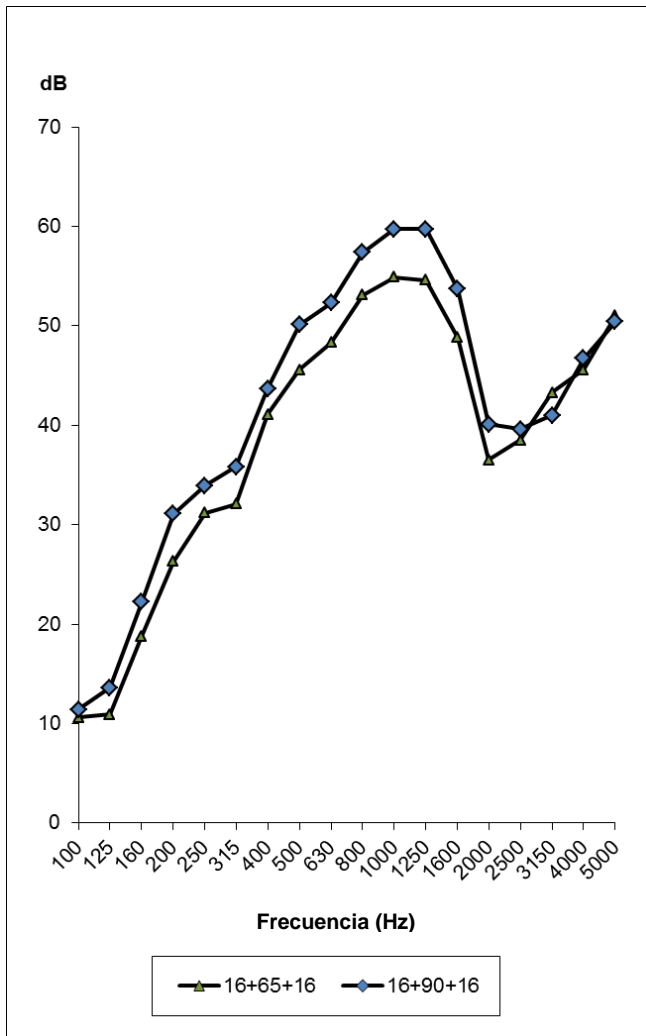
En los ensayos tomados de la publicación referenciada anteriormente No.[18] de entramados de placas de yeso laminado (PYL) de 16mm con cámara de aire intermedia sin absorbente (TL-93-032) y (TL-92-376) (Graph 4.25 Izq.), se observa un mejor comportamiento del índice de reducción acústica del cerramiento doble cuando la cámara de aire intermedia tiene un mayor espesor (90mm) frente a la de menor espesor (65mm); esto sucede en casi todo el rango de frecuencias, disminuyendo sin embargo su rendimiento después de la frecuencia f_c . La inclusión de material absorbente dentro de la cámara de aire intermedia (ensayos TL-93-033) y (TL-92-399) (Graph 4.25Der.), no muestra una sensible diferencia en el comportamiento acústico entre los dos casos.

La frecuencia de coincidencia f_c de la placa de yeso laminado (PYL) de 16mm de espesor y la frecuencia de resonancia f_{msm} para el sistema doble, con y sin material absorbente, es:

$f_c =$	2008 Hz
---------	---------

f_{msm} Cámara vacía 65mm =	90 Hz
f_{msm} Cámara vacía 90mm =	77 Hz

f_{msm} Cámara con mat. abs. 65mm =	48 Hz
f_{msm} Cámara con mat. Abs. 90mm =	41 Hz



Graph 4.25 (TL) de entramados autoportantes placa de yeso de 16mm. Cámaras de 65mm y 90mm. Izq. Cámara vacía (TL-93-032) y (TL-92-376). Der. Cámara con material absorbente (TL-93-033) y (TL-92-399) (B30)

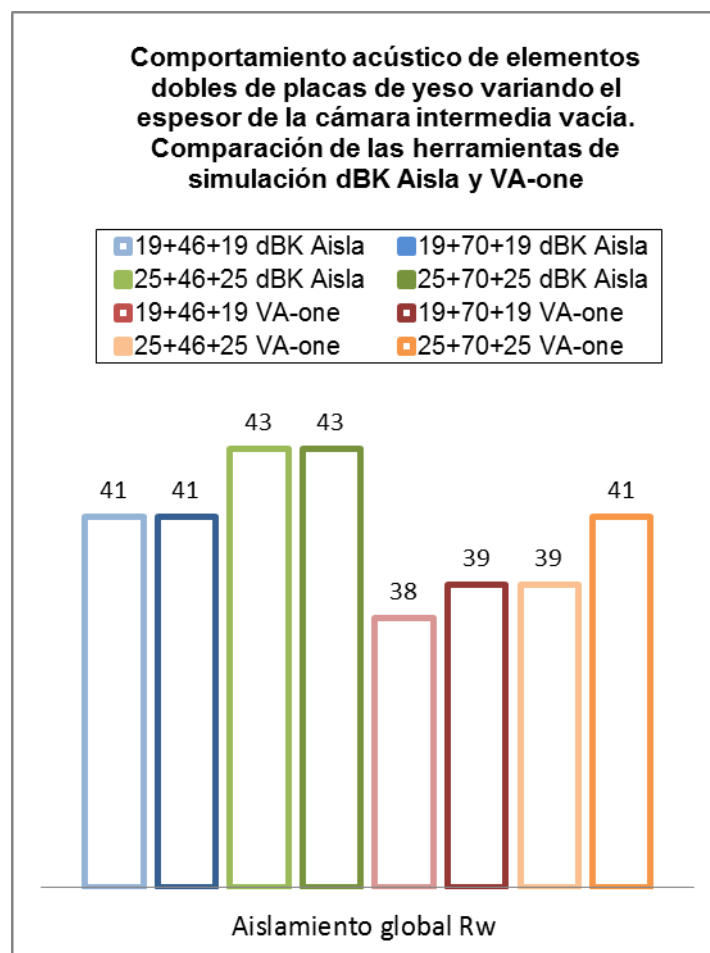
El aislamiento global de estas soluciones en STC es:

<table border="1"> <tr> <td>TL-93-032 16+65+16</td> <td>STC = 35dB</td> </tr> </table>	TL-93-032 16+65+16	STC = 35dB	<table border="1"> <tr> <td>TL-92-376 16+90+16</td> <td>STC = 38dB</td> </tr> </table>	TL-92-376 16+90+16	STC = 38dB
TL-93-032 16+65+16	STC = 35dB				
TL-92-376 16+90+16	STC = 38dB				
<table border="1"> <tr> <td>TL-93-033 16+65(MA)+16</td> <td>STC 44dB</td> </tr> </table>	TL-93-033 16+65(MA)+16	STC 44dB	<table border="1"> <tr> <td>TL-92-399 16+90(MA)+16</td> <td>STC 48dB</td> </tr> </table>	TL-92-399 16+90(MA)+16	STC 48dB
TL-93-033 16+65(MA)+16	STC 44dB				
TL-92-399 16+90(MA)+16	STC 48dB				

Tabla 4.19 Valores de aislamiento acústico global STC de entramados autoportantes de 16mm. (B27)

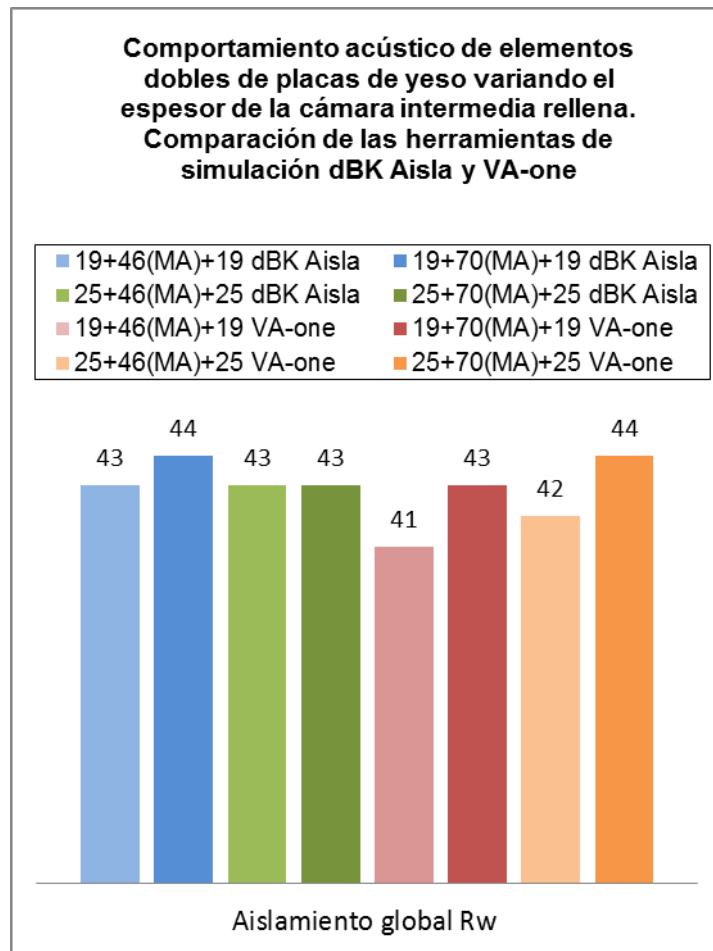
Comentarios finales de los casos comparados:

En los tres ejemplos comparativos se puede observar una cierta influencia en los valores de índice de reducción acústica al variar el espesor de la cámara de aire intermedia de un cerramiento doble formado con placas de yeso laminado (PYL) de igual espesor; se aprecia un incremento global (muy poco) conforme la cámara tiene un mayor espesor, pero esta diferencia es más notoria cuando la cámara está vacía, es decir, sin la inclusión de material acústicamente absorbente (MA) en su interior (Graph 4.26). Al simular esta variable se aprecia que el programa dBK Aisla no es tan sensible a este parámetro como el programa VA-one.



Graph 4.26 Gráfica 1 comparativa del aislamiento acústico global de las diferentes configuraciones contrastadas. Cerramientos dobles cámara vacía (D')

La diferencia de valores de índice de reducción acústica para diversos espesores de cámara de aire intermedia es más notoria en el caso en que las placas de yeso laminado (PYL) que la delimitan son de mayor espesor (25mm). Se mantiene la tendencia a la mejora del aislamiento acústico en las bajas frecuencias conforme aumenta el espesor de la cámara de aire intermedia, comportándose sin embargo peor en el rango de las altas frecuencias.



Graph 4.27 Gráfica 2 comparativa del aislamiento acústico global de las diferentes configuraciones contrastadas. cámara con material absorbente (D')

Cuando se incluye una capa de material acústica absorbente (MA) en los cerramientos dobles con cámara de aire intermedia parece influir mucho menos el incremento del espesor de la cámara en el valor global del índice de reducción acústica (Graph 4.27).

4.6.2 Utilización de las herramientas dBK Aisla 3.01 y VA-one 2012 en la simulación de cerramientos dobles

A partir de los ejemplos seleccionados y teniendo en cuenta los resultados de su análisis, se realiza la simulación mediante herramientas de software, de un cerramiento doble conformado por placas de yeso laminado (PYL) de 19mm de espesor que delimitan una cámara de aire intermedia, bien de 46mm o bien de 70mm, ajustando la simulación de acuerdo con los ensayos de la empresa Yesos Ibéricos.

Con cámara de aire intermedia vacía (sin material acústicamente absorbente), ensayo (AC3-D10-97.VII) de configuración PYL19+46+PYL19 (mm) y el ensayo (AC3-D7-92.9) de configuración PYL19+70+PYL19 (mm).

Con la cámara de aire intermedia con material absorbente al interior, ensayo (AC3-D10-80.II) de configuración PYL19+46Lv+PYL19 (mm) y el ensayo (AC3-D1-82.6) de configuración PYL+70Lv+PYL19 (mm), con el fin de contrastar los datos de los ensayos de laboratorio con las herramientas de software de medida y simulación.

Posteriormente se simula la existencia de una obertura de ventilación de la cámara de aire intermedia, con una superficie determinada y con distintos grados de apertura, para observar la variación del índice de reducción acústica de los cerramientos dobles cuando la cámara intermedia se abre parcialmente para ventilar.

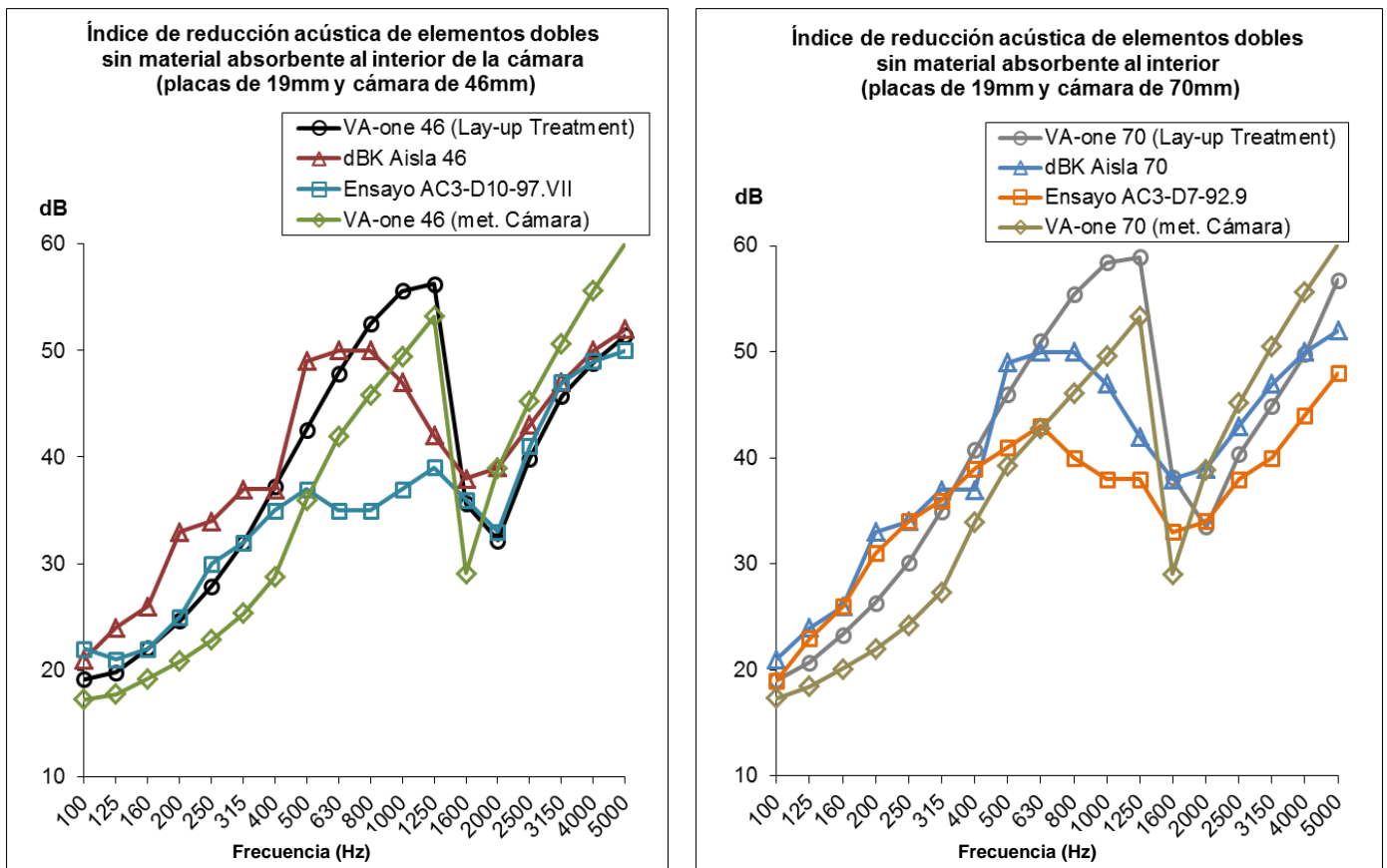
La simulación con la herramienta VA-one 2012 se hace mediante dos formas de construcción virtual:

1- A partir de la creación previa de una primera hoja del cerramiento, para luego agregar los elementos constructivos restantes, como la cámara de aire intermedia (con o sin material absorbente) con su espesor determinado más la siguiente hoja del cerramiento; los diversos elementos constructivos se agregan como capas de tratamiento (denominadas "*Lay-up Treatment*") una herramienta opción del programa VA-one 2012 donde se puede aplicar un (NCT "*Noise Control Treatment*").

2- creando una cámara intermedia (con o sin material absorbente) entre las dos hojas del cerramiento, dándole el espesor indicado. Con la herramienta (NCT) se obtienen los valores de niveles de presión sonora, expresados en dB (en el espacio emisor y en el espacio receptor, a través del cerramiento doble simulando la situación de una campaña de ensayos en un laboratorio); mediante la fórmula para determinar los valores de aislamiento acústico según la normativa ISO, se obtiene el Índice de Reducción Acústica (R) y el Índice de Aislamiento Global (R_w).

La simulación con la herramienta dBK Aisla 3.01 se lleva a cabo introduciendo algunos parámetros solicitados para los materiales empleados y estableciendo el espesor de la cámara intermedia, con la opción de inclusión, o no, de material absorbente en un interior. A través de ésta herramienta se obtienen directamente los valores (R) y el valor (R_w) de los cerramientos dobles.

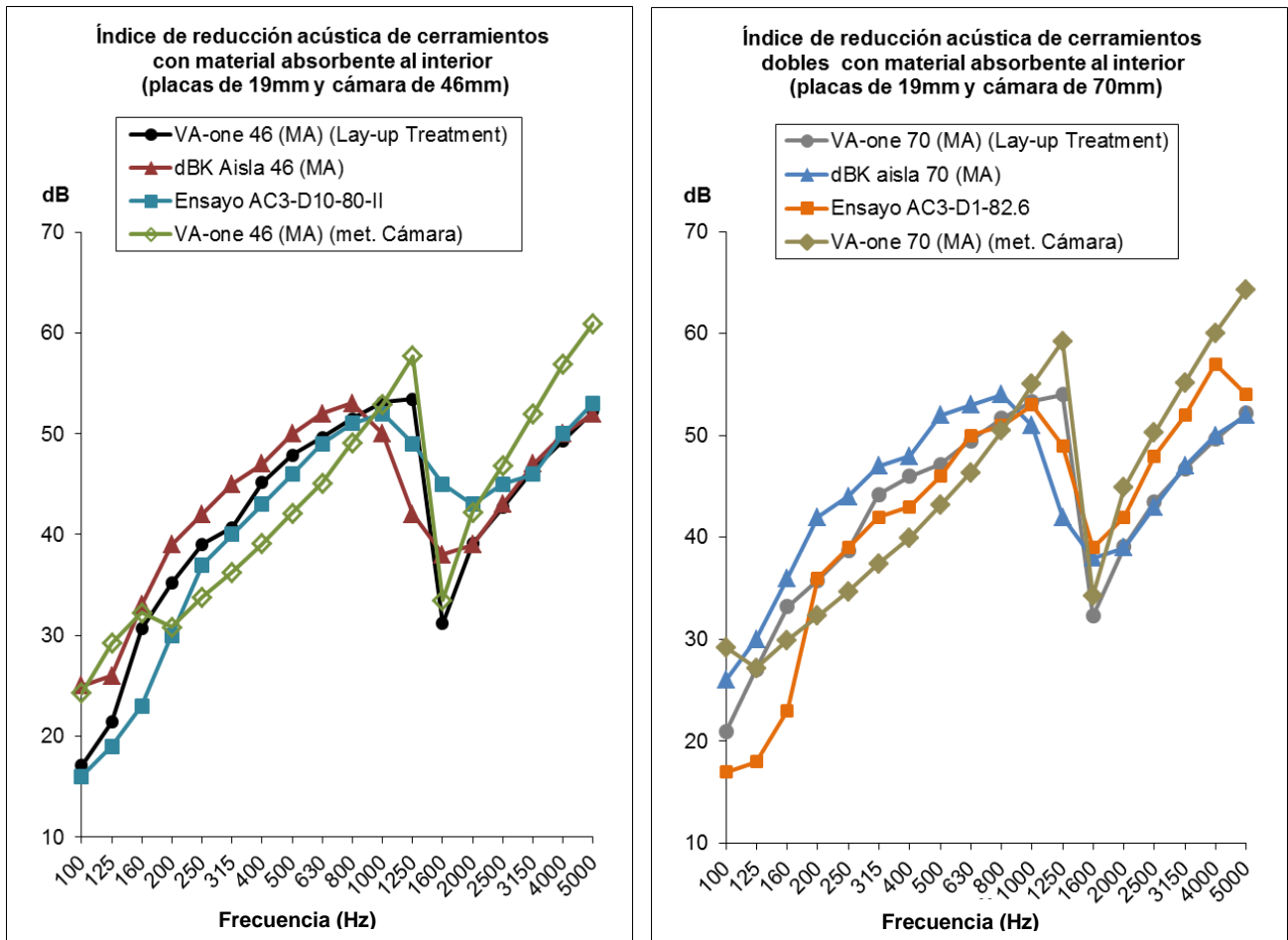
En las siguientes gráficas (Graph 4.28 y 4.29) se muestran los resultados obtenidos del Índice de Reducción Acústica (R) de los diferentes modelos de simulación contrastados con los datos de los ensayos de laboratorio.



Graph 4.28 Resultados de aislamiento acústico obtenidos con las diferentes herramientas de software para los entramados autoportantes sin material absorbente. Izq. Placas de yeso de 19mm y cámara vacía de 46mm. **y Der.** Placas de yeso de 19mm y cámara vacía de 70mm. El ensayo (AC3-D10-97.VII) corresponde a la configuración PYL19+46+PYL19 (mm) y el ensayo (AC3-D7-92.9) corresponde a la configuración PYL19+70+PYL19 (mm) (D')

Las gráficas de aislamiento acústico por bandas de frecuencia de tercios de octava obtenidas con las diferentes herramientas, para los casos de las cámaras vacías (sin material acústico absorbente) de 46 y de 70mm de espesor respectivamente una aproximación más cercana a los resultados de los ensayos de laboratorio en el rango de bajas frecuencias y también en altas frecuencias pero después de la frecuencia de coincidencia (de caída). En el rango de medias frecuencias, entre 400 y 1600Hz, tanto con la herramienta dBK Aisla 3.01, como con los métodos de construcción en VA-one 2012, los resultados obtenidos no son coincidentes con los datos de los ensayos de laboratorio.

Por el contrario, en los casos de los cerramientos dobles que tienen una capa de material acústicamente absorbente en el interior de la cámara de aire intermedia (Graph.4.29), los resultados obtenidos con las herramientas de simulación utilizadas se aproximan más a los datos de los ensayos de laboratorio, con algunas pequeñas variaciones en las frecuencias iniciales de medida.

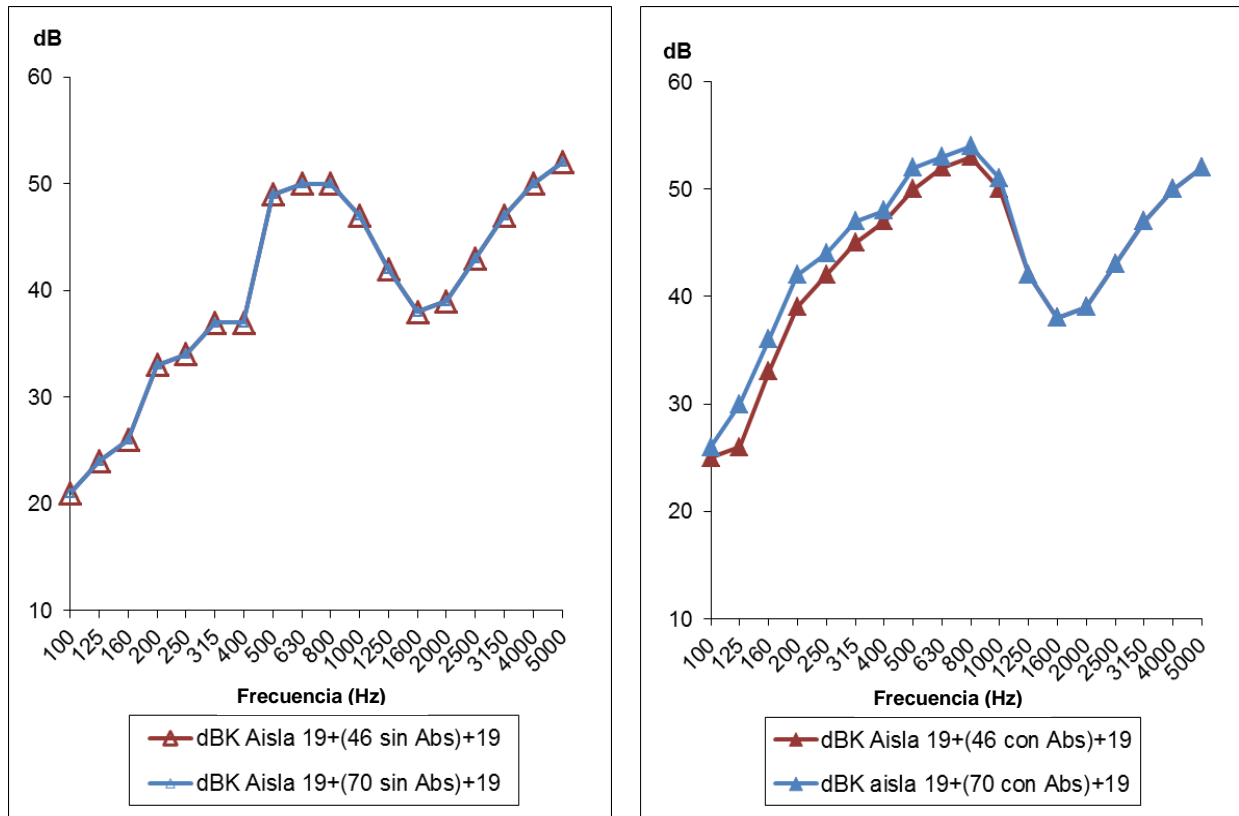


Graph 4.29 Resultados de aislamiento acústico obtenidos con las diferentes herramientas de software para los entramados autoportantes con material absorbente. Izq. Placas de yeso de 19mm y cámara de 46mm con material absorbente. **Der.** Placas de yeso de 19mm y cámara de 70mm con material absorbente. El ensayo (AC3-D10-80-II) corresponde a la configuración PYL19+46Lv+PYL19 y el ensayo (AC3-D1-82.6) corresponde a la configuración PYL19+70Lv+PYL19. Ensayos encontrados y simulación en VA-one 2012 y dBK Aisla 3.01 (D')

En el tramo de frecuencias 160 y 200Hz los valores de las gráficas de aislamiento acústico obtenidas por bandas de frecuencia se igualan más a las obtenidas en los ensayos de laboratorio seleccionados, siendo este el aspecto relevante para continuar con el proceso de simulación.

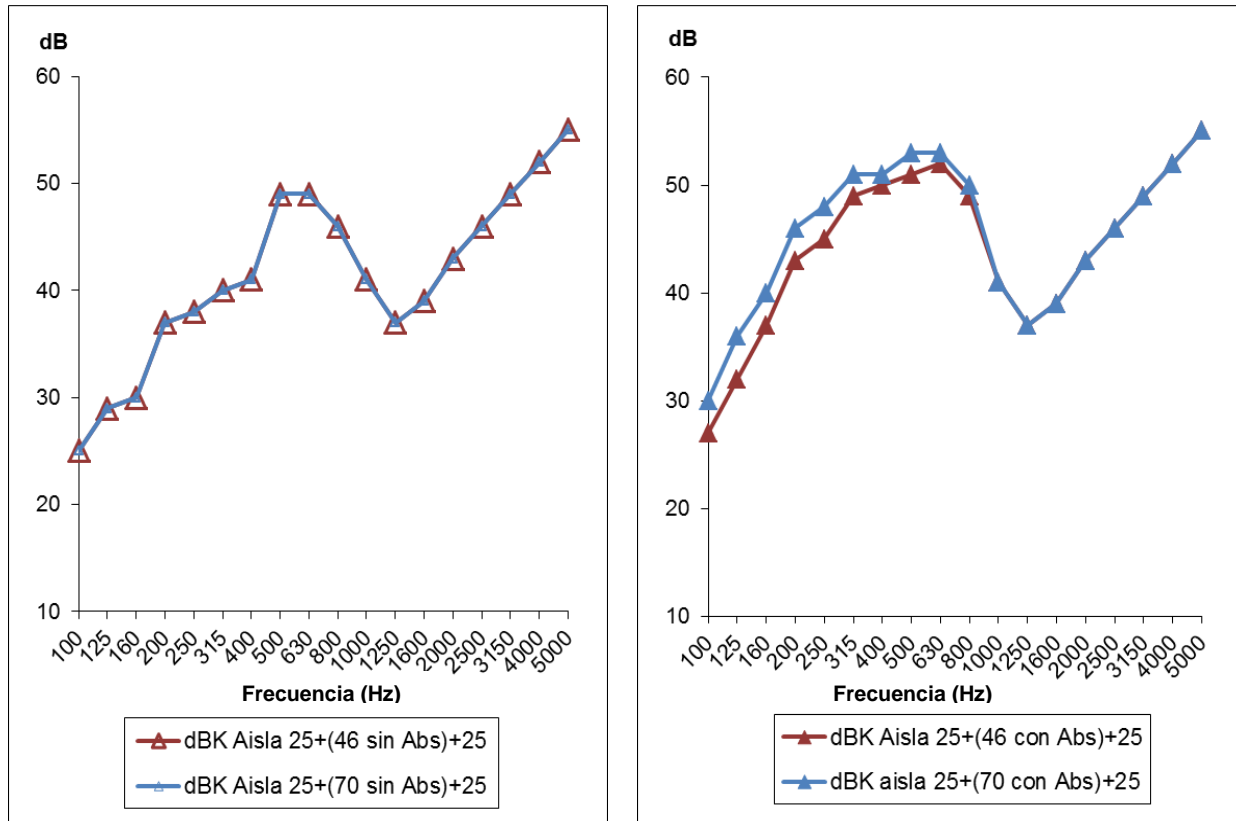
Continuando con el estudio comparativo de la influencia de la variación de espesores de la cámara de aire intermedia en el aislamiento acústico de cerramientos dobles, con o sin material acústicamente absorbente en el interior de la cámara de aire intermedia, se muestran los resultados obtenidos con las herramientas de simulación citadas para comprobar si el comportamiento es similar al indicado anteriormente en los ensayos seleccionados. Cuando la cámara de aire intermedia está vacía se nota aún más la diferencia de los valores de aislamiento acústico resultantes entre los diferentes espesores de cámara de aire intermedia, que cuando ésta tiene dispuesta una capa de material acústicamente absorbente en su interior.

Mediante las herramientas dBK Aisla 3.01 y VA-one 2012 mediante la aplicación “*Lay-up Treatment*” se simulan algunas de las configuraciones anteriores en las gráficas siguientes se muestran los resultados obtenidos con dBK Aisla (Graph 4.30).



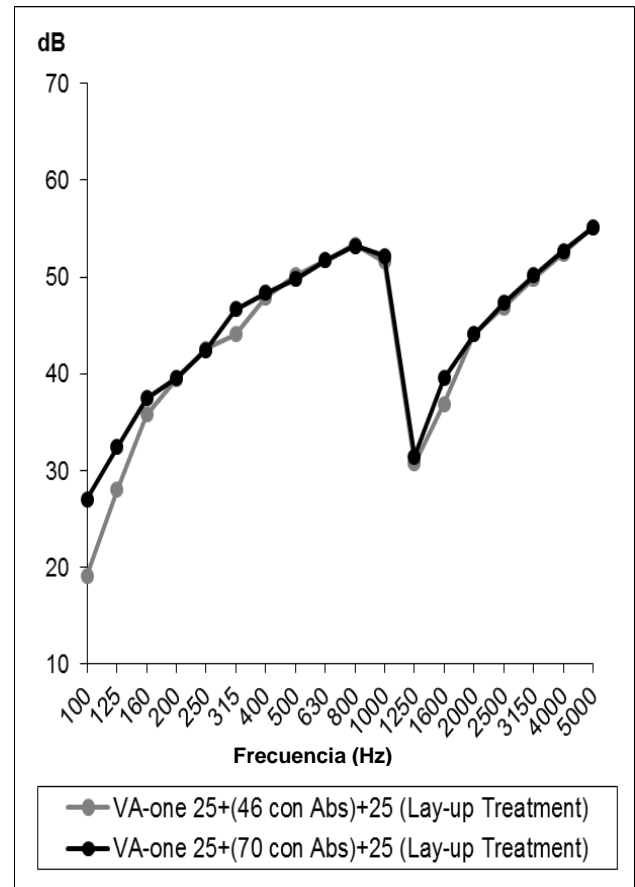
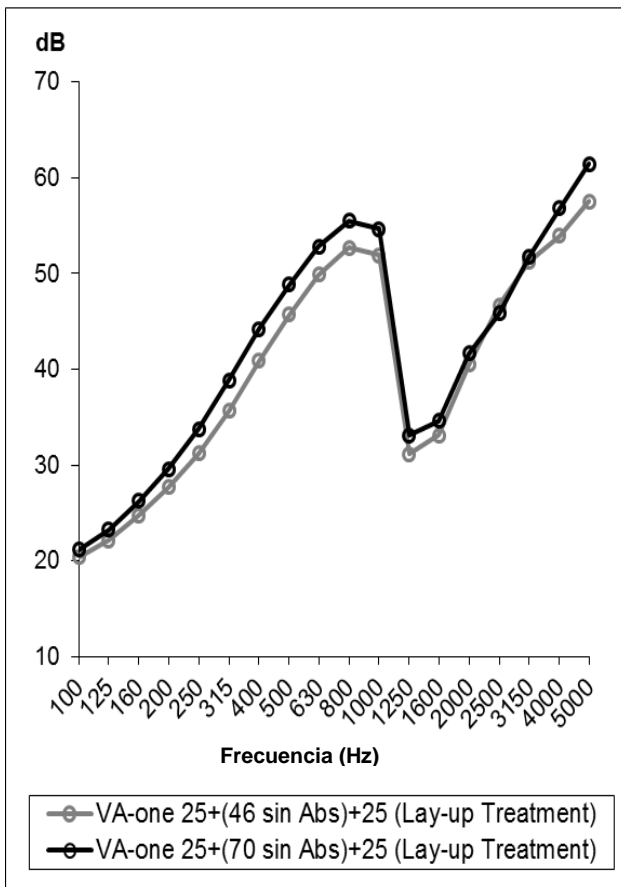
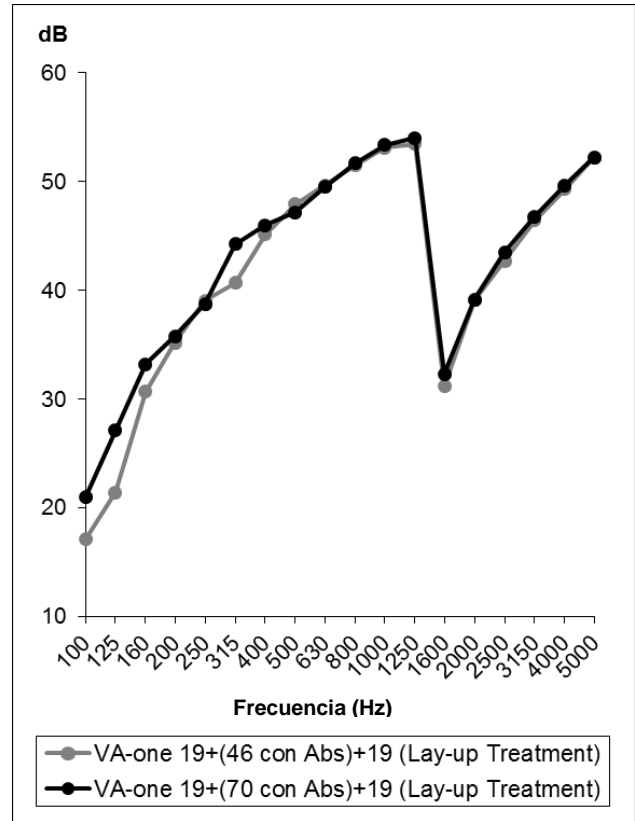
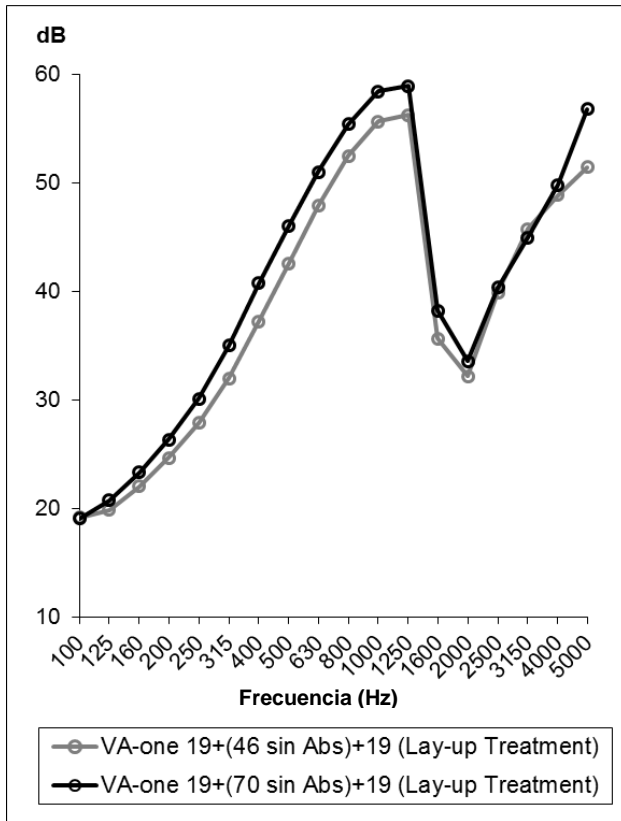
Graph 4.30 Comportamiento acústico de entramados de placa de yeso de 19mm. Simulación en dBK Aisla 3.01 Gráficas comparativas del comportamiento acústico de cerramientos dobles de placas de yeso. **Izq.** De 19mm con espesores de cámara de 46 y 70mm, sin material absorbente. **Der.** De 19mm con espesores de cámara de 46 y 70mm con material absorbente. (D)

- Cerramiento doble de placas de yeso laminado de 19mm de espesor y cámaras de 46 y 70mm con y sin material absorbente.
- Cerramiento doble de placas de yeso de 25mm de espesor y cámaras de 46 y 70mm con y sin material absorbente.



Graph 4.31 Comportamiento acústico de entramados de placa de yeso de 25mm. Simulación en dBK Aisla 3.01 Gráficas comparativas del comportamiento acústico de cerramientos dobles de placas de yeso. **Izq.** De 25mm con espesores de cámara de 46 y 70mm, sin material absorbente. **Der.** De 25mm con espesores de cámara de 46 y 70mm con material absorbente. (D')

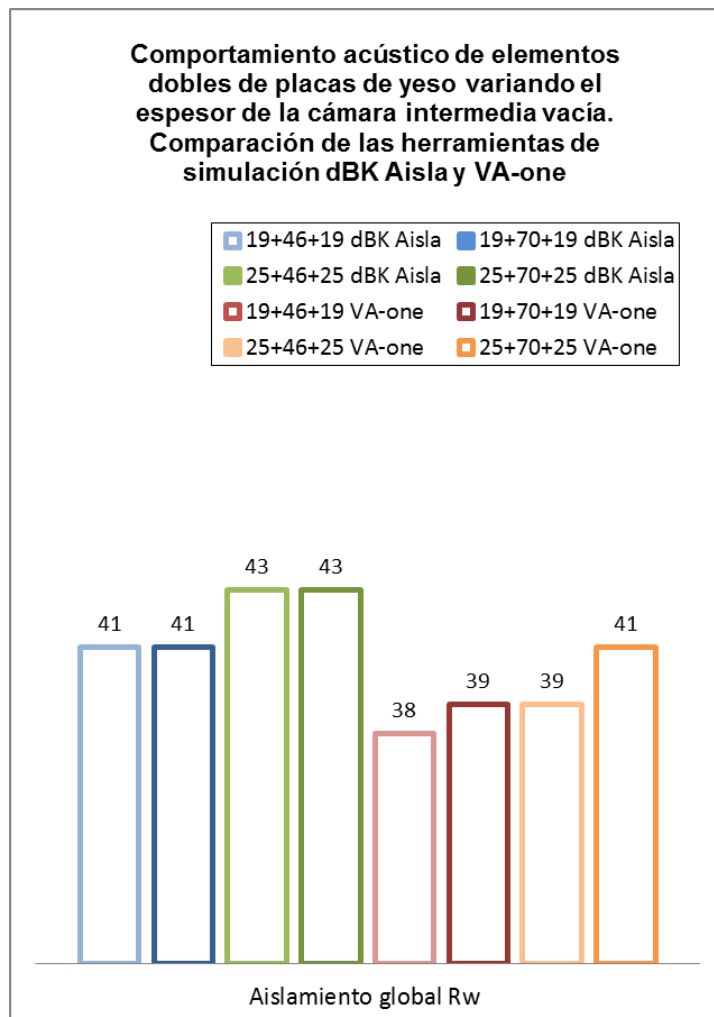
En la comparación de las diversas configuraciones con la herramienta de simulación dBK Aisla 3.01 se observa que no hay variación perceptible en la curva de aislamiento acústico entre los diferentes espesores de cámara de aire intermedia cuando ésta está vacía. Cuando se agrega una capa de material acústicamente absorbente, se aprecia un ligero incremento del aislamiento acústico en el rango de las bajas frecuencias cuando la cámara de aire intermedia es de mayor espesor (70mm) que con respecto a la de menor espesor (46mm), situación que se reproduce de forma similar entre las configuraciones placas de yeso de (19 y 25mm) respectivamente. A continuación se muestran los resultados obtenidos con VA-one 2012 y el método descrito anteriormente “*Lay-up Treatment*” de (NTC).



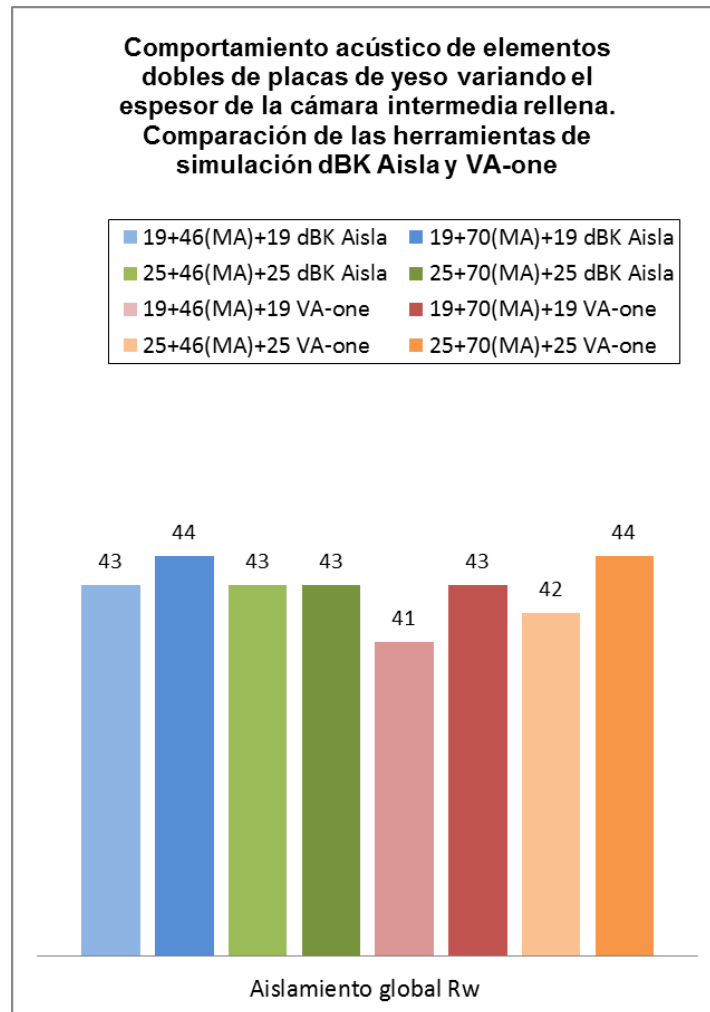
Graph 4.32 Resultados de simulación de entramados de yeso. Simulación en VA-one 2012, (método NCT) gráficas comparativas del comportamiento acústico de cerramientos dobles de placas de yeso. Izq. De 19 y 25mm con espesores de cámara de (46 y 70mm), sin material absorbente. Der. Con material absorbente (D²)

Se observan algunas diferencias en los valores de aislamiento acústico al comparar entre si las dos configuraciones con diversos espesores de cámara de aire intermedia, cuando ésta no tiene material absorbente en su interior (Graph 4.32 Izq.), notándose también esta diferencia en el caso de la inclusión de una capa de material acústicamente absorbente en el interior de la cámara (Graph 4.32 Der.).

A nivel general se presentan algunas diferencias apreciables en los valores de aislamiento acústico global (R_w) entre las diferentes configuraciones, con los dos espesores de cámara evaluados y bien, vacía o rellena con material acústicamente absorbente, en las simulaciones llevadas a cabo con las herramientas utilizadas. En el siguiente cuadro se expresan los valores (R_w) y la variación entre las distintas configuraciones simuladas:



Graph 4.33 Gráfica comparativa del índice global de reducción acústica R_w de las diferentes configuraciones de entramado con cámara vacía. Simulación con las herramientas dBK Aisla 3.01 y VA-One 2012 (D')



Graph 4.34 Gráfica comparativa del aislamiento acústico global R_w de las diferentes configuraciones de entramado de cámara con material absorbente. Simulación con las herramientas dBK Aisla 3.01 y VA-One 2012 (D')

4.6.3 Simulación de la apertura de la cámara intermedia de un cerramiento doble con la herramienta VA-one 2012 (método creación de cámara intermedia)

Esta simulación se aborda a partir de la simulación anterior de cerramientos dobles de placas de yeso laminado (PYL) de igual espesor y dos espesores diferentes de la cámara de aire intermedia; se seleccionan las configuraciones 19+46+19 (mm) y 19+70+19 (mm) con cámara de aire intermedia, con y sin la inclusión de una capa de material acústicamente absorbente. En la simulación se aplicaron aberturas aumentando progresivamente el grado de apertura (superficie de ventilación) de la cámara de aire intermedia; dicha superficie de ventilación se dispone a través de una de las hojas que enmarcan el cerramiento doble. Posteriormente se analizará su influencia en el comportamiento del aislamiento acústico del cerramiento doble.

La simulación con la herramienta VA-one 2012 se realizó con el “método de construcción virtual de una cámara” en el que se crea una cámara independiente entre las dos hojas del cerramiento doble, cabe recordar que con el método de simulación utilizado en el ejercicio anterior de creación de capas mediante “*Lay-up Treatment*” de (NCT) no se pueden generar las aberturas de ventilación en la cámara de aire intermedia.

En esta nueva serie de simulaciones se aplicaron diferentes grados de apertura determinados por porcentajes de (0% ,1%, 10%, 90% y 100%) de la superficie total de un cerramiento doble recreado para la simulación 19.78m² (4.60 x 4.30). Para esta serie de simulaciones se tomó como ejemplo de superficie de medición, las dimensiones del laboratorio LARGE (utilizado para la campaña 2 de laboratorio). Los porcentajes simulados se determinaron según varias pruebas que mostraron cierta variabilidad en los resultados.

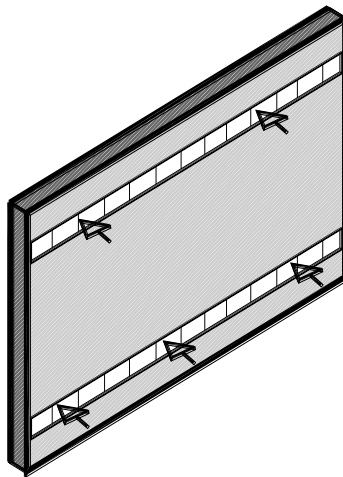
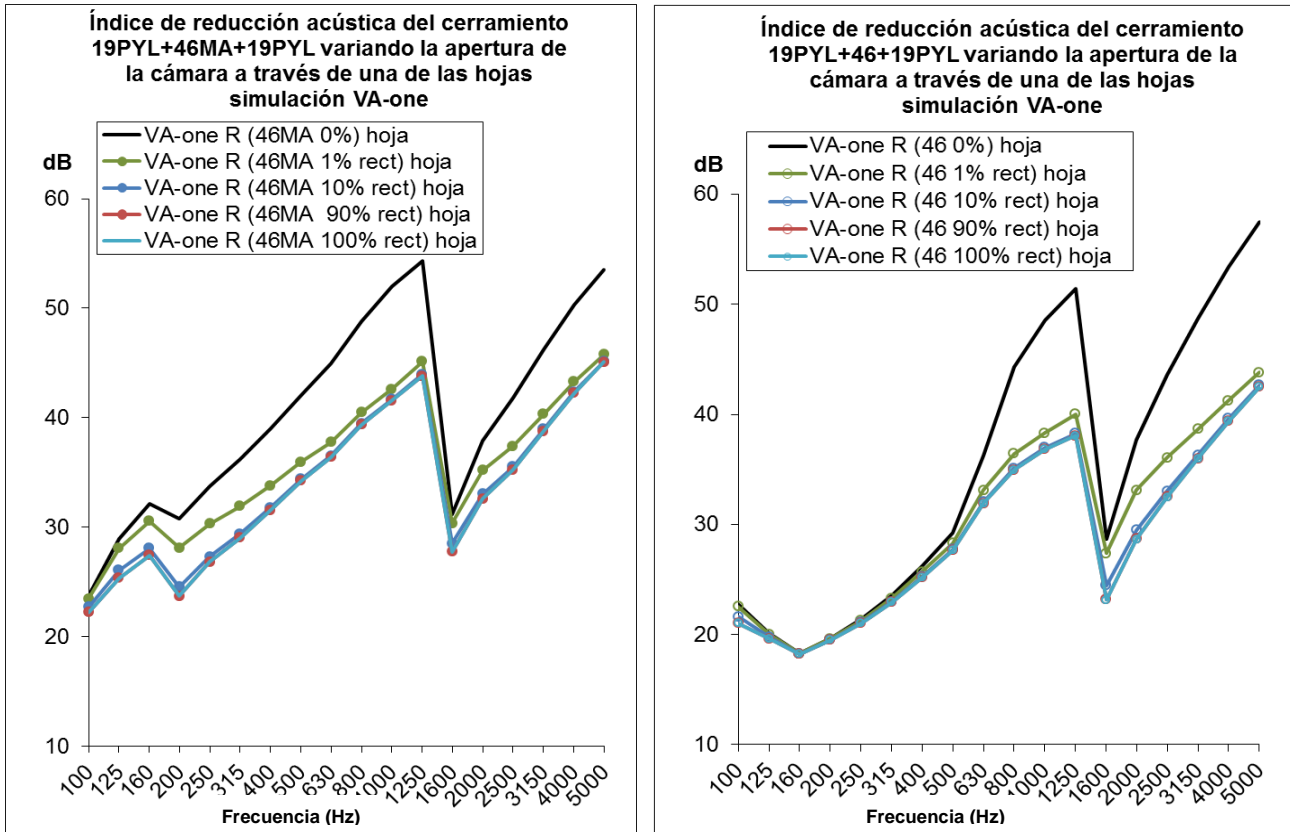


Fig.4.13 Esquema de apertura de la cámara de aire intermedia a través de una de las hojas, de un cerramiento autoportante simulado (D)

En esta situación de crear la apertura de la cámara de aire intermedia a través de una de las hojas del cerramiento doble; el porcentaje de apertura se realiza mediante aberturas del largo total de la hoja modelada 4.60m por una altura variable que determina el 1% de la superficie total de la hoja, 2 x (4.60 x 0.0215m) hasta el equivalente del 100% de apertura 2x (4.60 x 2.15m) (altura total de la muestra utilizada). (Ver Tabla D.6 del Anexo D).

La simulación de variación de la apertura de ventilación de la cámara de aire intermedia para el cerramiento doble, a través de una de las hojas, se realizó para las siguientes configuraciones:

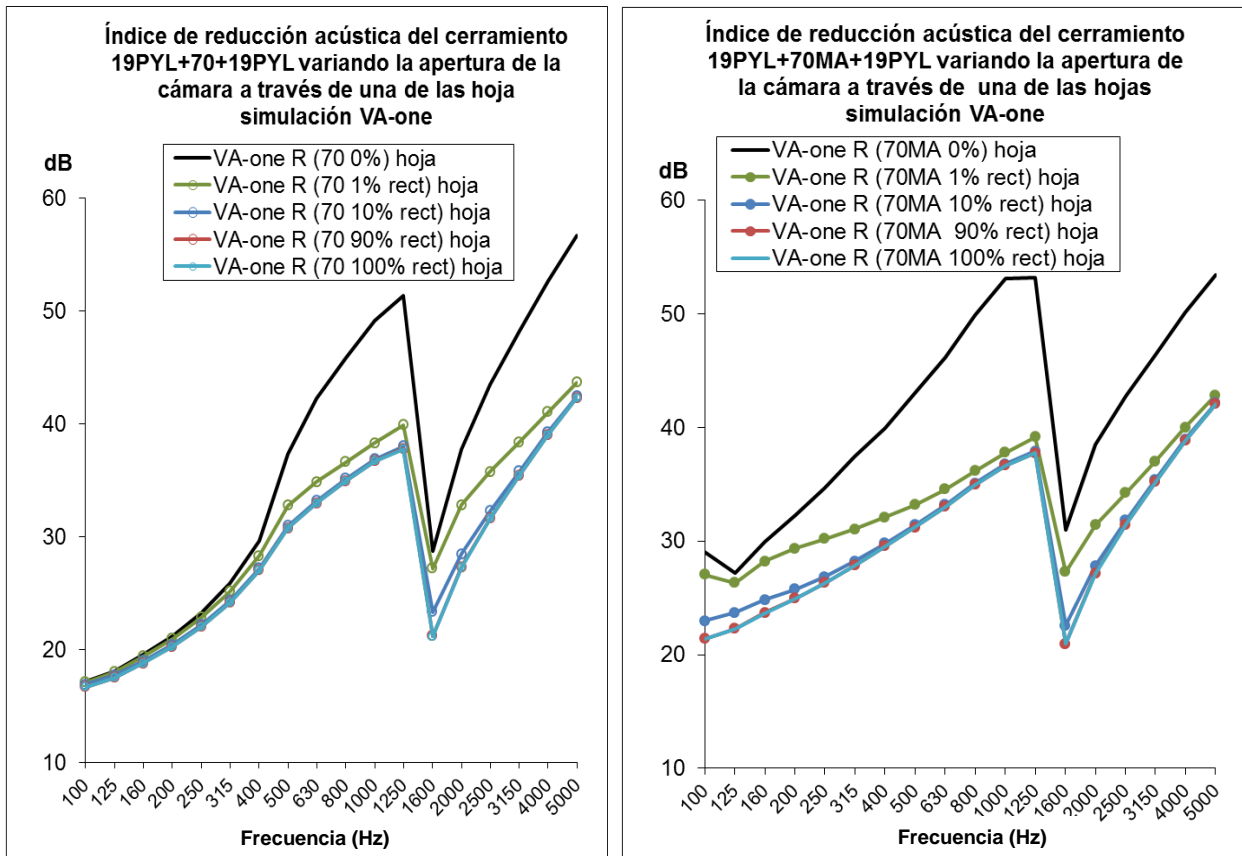
- PYL19+46+PYL19 (mm)
- PYL19+46(MA)+PYL19 (mm)
- PYL19+70+PYL19 (mm)
- PYL19+70(MA)+PYL19 (mm)



Graph 4.35 Resultados de aislamiento acústico de un entramado autoportante placa de 19mm y cámara de 46mm con aperturas a través de una de las hojas. Simulación VA-One 2012, configuración de placa de yeso de 19mm de espesor y cámara de 46mm vacía y 46mmMA rellena de material absorbente, variando la apertura de la cámara intermedia a través de una de las hojas (D')

En las gráficas anteriores (Graph 4.35) se observa marcadamente la frecuencia de caída que se repite en los diferentes estados de apertura, tal como ya se apreciaba en las simulaciones de la campaña 2 de laboratorio de los grados de apertura de la (FVL).

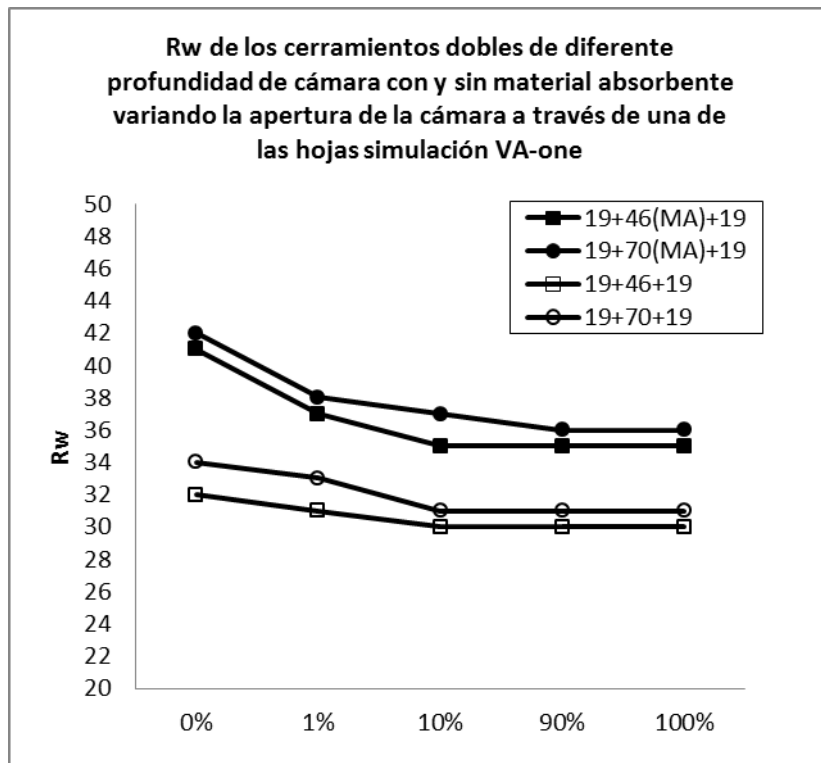
En las gráficas posteriores (Graph 4.36) se observa en el rango de las bajas frecuencias, para las dos configuraciones con diferente espesor de cámara de aire intermedia, que cuando la cámara de aire intermedia está vacía, la variación del grado de apertura aparentemente no influye en el valor del aislamiento acústico, mientras que cuando ésta tiene una capa de material acústicamente absorbente en su interior, se nota aún más la diferencia de aislamiento acústico entre los diferentes grados de apertura.



Graph 4.36 Resultados de aislamiento acústico de un entramado autoportante de placa de yeso de 19mm y cámara de 70mm con aperturas a través de una de las hojas. Simulación VA-One 2012, configuración de cerramiento doble con placa de yeso de 19mm de espesor y cámara de 70mm vacía y 70MA rellena de material absorbente, variando la apertura de la cámara intermedia a través de una de las hojas (D')

De acuerdo con la simulación realizada con el programa VA-one 2012, en ambas configuraciones la variación más importante apreciada en las curvas de aislamiento, en el salto del grado de apertura del 0% al 1% y a partir del 10% la variación es mucho menor. La caída habitual mostrada en las gráficas se produce por el efecto de la frecuencia crítica, que se mantiene en todos los casos alrededor de 1600Hz la misma calculada anteriormente para la placa de yeso de 19mm de espesor f_c 1691Hz.

En la siguiente gráfica (Graph 4.37) se comparan los valores obtenidos (R_w) para las diferentes configuraciones y su comportamiento según los diferentes grados de apertura de la superficie de ventilación de la cámara de aire intermedia. Es notorio también en este caso el descenso apreciable de los valores de índice global de reducción acústica a partir del 10% de apertura en todos los casos. Por otro lado se puede constatar que hay un mejor rendimiento cuando la cámara de aire intermedia tiene un mayor espesor, con y sin material acústicamente absorbente dispuesto en su interior.



Graph 4.37 Variación del índice global de reducción acústica de las diferentes configuraciones al efectuar las aperturas a través de una de las hojas. Simulación en VA-One 2012 con las aperturas dispuestas de la cámara intermedia a través de una de las hojas (D')

También se llevó a cabo la simulación de grados de apertura de la superficie de ventilación de la cámara de aire intermedia, en los casos probados a través de los límites perimetrales horizontales del cerramiento (inferior y superior), con las configuraciones:

- PYL19+46+PYL19 (mm)
- PYL19+46(MA)+PYL19 (mm)

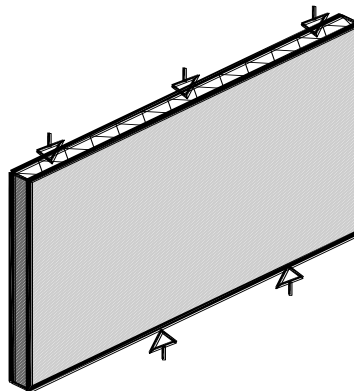


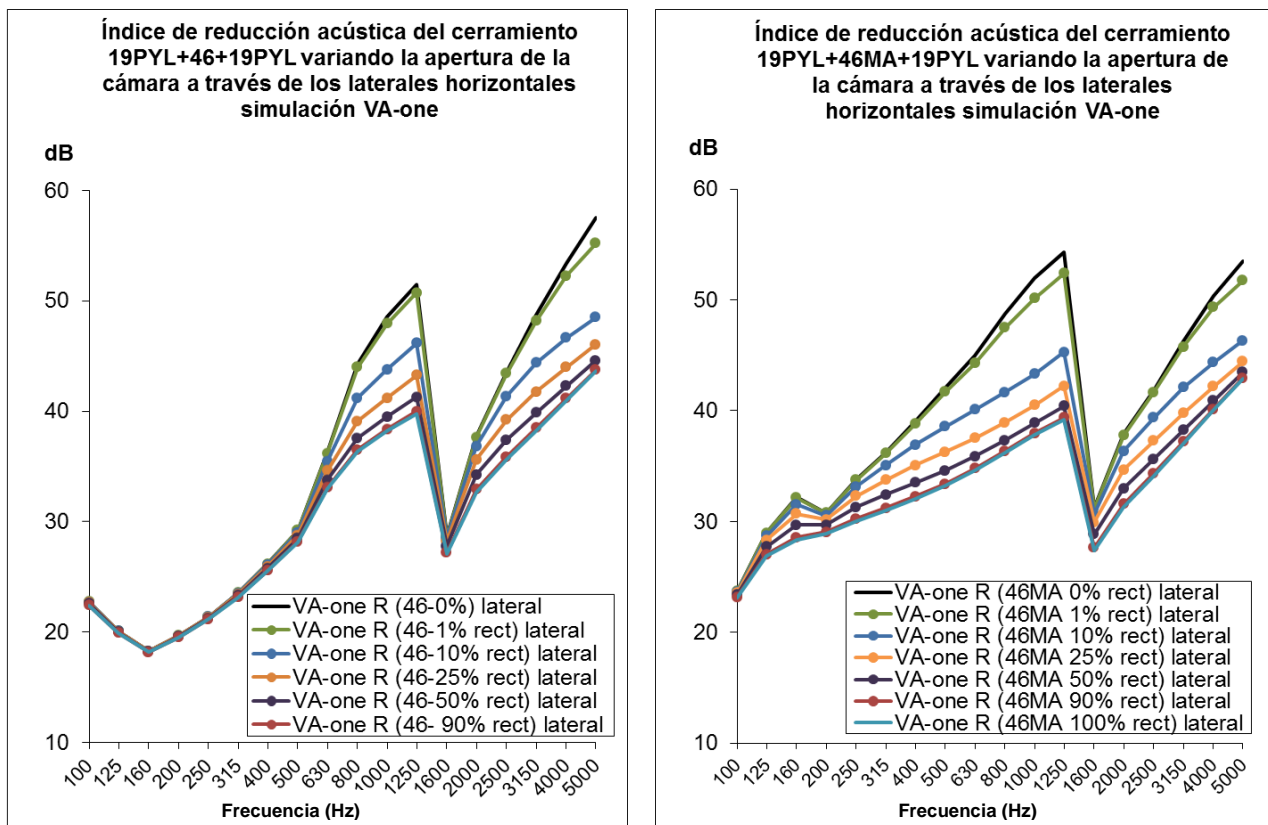
Fig.4.14 Esquema de apertura de la cámara de un entramado autoportante a través de los perímetros horizontales inferior y superior (D)

Los grados de apertura se efectuaron de la misma forma que en la simulación anterior, por porcentajes de, 0%, 1%, 10%, 90% y 100% incluyendo también al 25% y al 50% (debido a que se observó inicialmente que habían más variaciones entre porcentajes) para las dos configuraciones PYL19+46+PYL19 (mm) y PYL19+70+PYL19 (mm).

Las superficies de las aberturas de ventilación, inferior y superior, se definieron del largo igual al total de la longitud del tramo de muestra (4.60m) por un ancho variable en función de los espesores de la cámara de aire intermedia simulados (46mm y 70mm) y a su vez del grado de apertura, por ejemplo:

Para el espesor de cámara de aire intermedia de (46mm), se definió el 1% como $2 \times (4.60 \times 0.00046m)$ y para el 100% del grado de apertura $2 \times (4.60 \times 0.046m)$. Para el espesor de cámara de aire intermedia de (70mm), se definió el 1% como $2 \times (4.60 \times 0.00070)$ y para el 100% del grado de apertura $2 \times (4.60 \times 0.070m)$. (Ver Tabla C.6 del Anexo C).

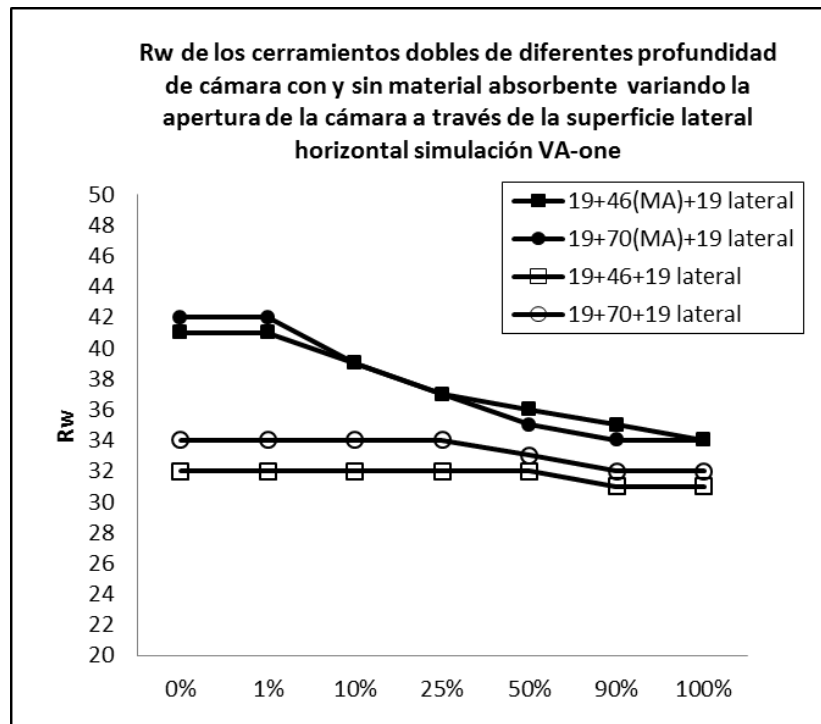
Los resultados obtenidos se expresan en las siguientes gráficas:



Graph 4.38 Resultados de aislamiento acústico de un entramado autoportante placa de 19mm y cámara de 46mm con aperturas a través de los laterales horizontales. Simulación VA-One 2012 para la configuración de 19mm de espesor y cámara de 46mm vacía y 46mmMA rellena de material absorbente (D')

En las dos configuraciones simuladas se observa que el comportamiento del aislamiento acústico es diferente cuando la apertura de la cámara de aire intermedia se efectúa por los laterales horizontales de la cámara a, cuando se hace a través de una de las hojas del cerramiento doble.

En la siguiente gráfica (Graph 4.39) se muestran los resultados del Índice Global de Reducción Acústica (R_w) obtenidos por porcentajes de apertura con los dos espesores de cámara de aire intermedia (46 y 70mm) con y sin material acústicamente absorbente al interior:

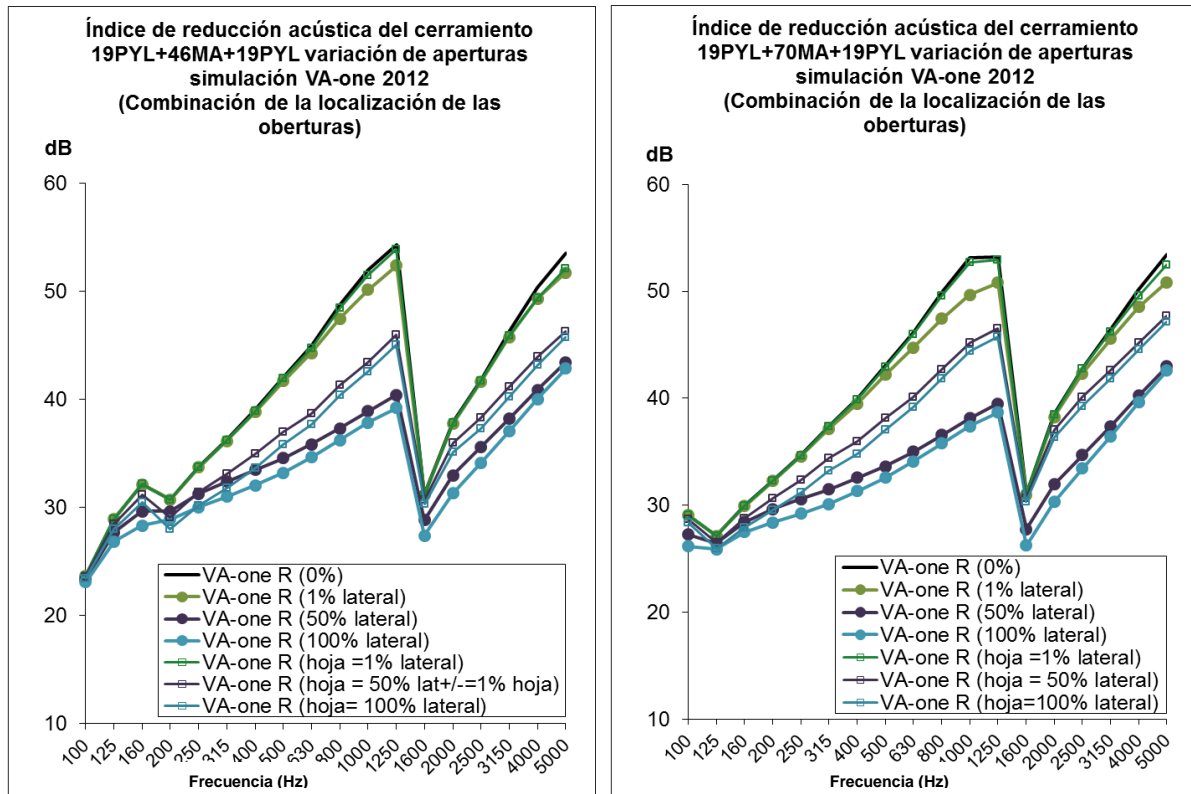


Graph 4.39 Variación del índice global de reducción acústica de las diferentes configuraciones al efectuar las aperturas a través de los perfiles horizontales. Configuraciones PYL19+46+19 (mm) y PYL19+70+19 (mm) con y sin material absorbente con las aperturas dispuestas de la cámara intermedia (D')

En cuanto a los grados de apertura por porcentajes, se observa más variación en el Índice Global de Reducción Acústicaa medida que se abre la cámara, cuando el cerramiento doble simulado tiene una capa de material acústicamente absorbente en el interior de la cámara de aire intermedia.

Teniendo en cuenta que se obtuvieron valores de aislamiento acústico apreciablemente diferentes en las dos versiones de disposición de las aberturas de ventilación (frontal y lateral) de la cámara de aire intermedia, se propone analizar una nueva simulación para descartar que el origen sea la diferencia cuantitativa de superficies (m^2) de las aberturas de ventilación. Para ello se practican aberturas de ventilación de la cámara de aire intermedia a través de una de las hojas (disposición frontal) pero con superficies similares a las utilizadas en el caso de aberturas de ventilación de la cámara de aire

intermedia, a través de los límites perimetrales superior e inferior (disposición lateral), en las dos configuraciones, los resultados se expresan a continuación:



Graph 4.40 Aislamiento acústico de las configuraciones de entramados comparando la influencia de aperturas por localización. Configuraciones PYL19+46(MA)+PYL19 (mm) y PYL19+70(MA)+PYL19 (mm) influencia en el aislamiento de las aberturas por localización o por superficie de apertura, simulación VA-One 2012

lateral = superficies (m²) de las aberturas horizontales obtenidas con el método de apertura a través de los cantos horizontales.

hoja = superficies (m²) de las aberturas correspondientes a las utilizadas en los cantos horizontales con el método de apertura a través de la hoja. (D')

En las gráficas anteriores (Graph 4.40) se observan ciertas variaciones significativas en las curvas de aislamiento acústico obtenidas al disponer aberturas a través de la hoja (disposición frontal) con las mismas áreas de ventilación utilizadas para las aberturas laterales horizontales (disposición lateral) correspondientes al 1%, 50% y 100%.

Ello parece indicar pues que, según el modelo de (SEA) de VA-one 2012, construido, simulando las dos situaciones de disposición de las aberturas de ventilación de la cámara de aire intermedia:

-A través de una de las hojas (disposición frontal) y

-A través de los laterales horizontales (disposición lateral)

Si que hay un diferente comportamiento acústico en cada una de las situaciones, al menos en la variabilidad de los grados de apertura en cada una, por lo que, aparentemente, si influye la posición de las aberturas en el aislamiento acústico de un cerramiento doble.

4.6.4 Interpretación de los resultados del Análisis práctico del comportamiento acústico de un cerramiento doble con cámara de aire intermedia de espesor y apertura variable

En el estudio realizado se manifiesta una diferencia en el aislamiento acústico, cuando una cámara de aire intermedia cerrada (sin ventilar) varía de espesor; esta diferencia es más notable en el caso de la cámara vacías (sin la inclusión de material acústicamente absorbente en su interior). Cuando la cámara de aire intermedia esta rellena en su totalidad de material acústicamente absorbente, las posibles diferencias en el comportamiento acústico entre dos espesores de cámara de aire intermedia considerados disminuyen.

Sin embargo cuando se simula con los software de cálculo y simulación dBK Aisla 3.01 y VA-one 2012, los valores del aislamiento acústico, en los espesores de cámara de aire intermedia considerados, no cambian apreciablemente cuando ésta se encuentra vacía. En el caso específico de las simulaciones realizadas con el programa dBK Aisla 3.01 para un cerramiento doble con hojas de yeso laminado (ver Graph 4.31), la diferencia entre las curvas de aislamiento acústico se nota más cuando la cámara de aire intermedia tiene una capa de material absorbente en su interior. En el caso específico de la simulación con el programa VA-one 2012 (ver Graph 4.32), con el método de construcción “*Lay-up Treatment*” de (NCT) se nota alguna diferencia entre las curvas de aislamiento acústico, en los dos casos de cámara considerados: cámara de aire intermedia vacía y cámara de aire intermedia con material acústicamente absorbente, esta diferencia es despreciable en los dos casos.

Al simular la existencia de aberturas de ventilación de la cámara de aire intermedia del cerramiento doble de placas de yeso laminado, según las dos disposiciones probadas:

- Caso 1: desde una de las hojas (disposición frontal), (Tabla 4.20) y
- Caso 2: en los laterales perimetrales horizontales de la cámara de aire intermedia (disposición lateral), (Tabla 4.21).

1. Resultados del Índice Global de Reducción Acústica en los diferentes grados de apertura propuestos para los cerramientos autoportantes, con y sin material acústicamente absorbente, a través de una de las hojas (disposición frontal) simulación VA-One 2012				
Estados de apertura	PYL19+46(MA)+PYL19 R_w	PYL19+46+PYL19 R_w	PYL19+(70MA)+PYL19 R_w	PYL19+70+PYL19 R_w
0%	41dB	32dB	42dB	34dB
1%	35dB	31dB	34dB	33dB
10%	32dB	30dB	32dB	31dB
100%	32dB	29dB	32dB	30dB

Tabla 4.20 Resumen de los resultados del Índice global de reducción acústica obtenidos de la simulación de las configuraciones de entramado, al efectuar las aperturas a través de una de las hojas (D')

2. Resultados del Índice Global de Reducción Acústica en los diferentes grados de apertura propuestos para los cerramientos autoportantes, con y sin material acústicamente absorbente, a través de los laterales perimetrales horizontales de la cámara de aire intermedia (disposición perimetral) simulación VA-One 2012				
Estados de apertura	PYL19+46(MA)+PYL19 R_w	PYL19+46+PYL19 R_w	PYL19+(70MA)+PYL19 R_w	PYL19+70+PYL19 R_w
0%	41dB	32dB	42dB	34dB
1%	41dB	32dB	42dB	34dB
10%	39dB	32dB	39dB	34dB
50%	36dB	32dB	35dB	33dB
100%	34dB	31dB	34dB	32dB

Tabla 4.21 Resumen de los resultados del Índice global de reducción acústica obtenidos de la simulación de las configuraciones al disponer las aberturas de ventilación a través de la cámara de aire intermedia (D')

Caso 1 Aberturas en la disposición frontal: al abrir la cámara de aire intermedia para la ventilación a través de una de las hojas del cerramiento doble, se observa una marcada diferencia en el comportamiento acústico cuando ésta se encuentra cerrada (0%) con respecto a un primer grado de apertura; esta tendencia se mantiene en todos los casos, con las dos diferentes profundidades de la cámara de aire intermedia (46 y 70mm) y también con y sin material acústicamente absorbente al interior. En los casos de inclusión de material acústicamente absorbente al interior de la cámara de aire intermedia, la diferencia es más notoria (ver Graph 4.37).

Cuando el grado de apertura de la cámara de aire intermedia es menor (1% = 0.1978 m²) ya se nota desde entonces un cambio en la curva de aislamiento acústico; sin embargo al doblar esta superficie, ya no se aprecia gran diferencia; cuando esta superficie ya se aumenta 10 veces (10% = 1.978 m²) se aprecia otra variación significativa; cuando esta superficie ya se aumenta más (90% = 17.80 m²) y (100% = 19.78 m²) ya no hay un cambio significativo con respecto al 10% de abertura, situación similar en los dos espesores de cámara de aire intermedia probados (46mm y 70mm) (ver Graph 4.36 y Graph 4.37).

Caso 2. Aberturas en la disposición perimetral: al abrir la cámara de aire intermedia para la ventilación a través de los laterales perimetrales horizontales (inferior y superior), la influencia del grado de apertura es más marcada a partir del 10% y hasta el 50%, mientras que después de este porcentaje, la variabilidad es menor; esto sucede en casi todas las frecuencias cuando la cámara de aire intermedia tiene una capa de material acústicamente absorbente en su interior y cuando la cámara de aire intermedia está vacía (sin material acústicamente absorbente en su interior), la influencia del grado de apertura se percibe más después del 25% de apertura (ver Graph 4.39).

Según las simulaciones realizadas con el programa VA-one 2012 con el método (SEA), la influencia en el aislamiento acústico de un cerramiento doble de placas de yeso laminado, al practicar aberturas en la cámara de aire intermedia para la ventilación a través de una de las hojas (disposición frontal), se nota ya a partir del 1% del grado de apertura; con un grado de apertura del 10% de la cámara de aire intermedia a través de una de las hojas, el elemento doble puede considerarse totalmente abierto. Cuando las aberturas de la cámara de aire intermedia para la ventilación se sitúan en el perímetro de la cámara (disposición lateral), puede considerarse (acústicamente hablando) que la cámara de aire intermedia está totalmente abierta cuando alcanza el 50% del grado de apertura.

Conviene aclarar que los porcentajes del grado de apertura del cerramiento doble de placas de yeso laminado con cámara de aire intermedia, se aplicaron en función de la superficie total determinada.

Caso 1 -A través de una de las hojas (fig.4.13) con un área total de $19.78\text{m}^2 = 4.60 \times 4.30\text{m}$

Caso 2 -A través de los laterales perimetrales horizontales (fig. 4.14) de la cámara de aire intermedia con un área total de aberturas de ventilación de:

$-0.2116\text{m}^2 = 2 \times (4.60 \times 0.046\text{m})$ para la configuración PYL19+46+PYL19 (mm) y

$-0.322\text{m}^2 = 2 \times (4.60 \times 0.070\text{m})$ para la configuración PYL19+70+PYL19 (mm)

Aunque las superficies de las aberturas para la ventilación, en los casos 1 y 2, son de diferentes áreas, los resultados de las simulaciones realizadas indican que aparentemente si hay una influencia en el comportamiento del aislamiento acústico de un cerramiento doble con cámara de aire intermedia cuando se varía la disposición de las aberturas para la ventilación. (ver Graph 4.40).

4.7 Comentarios de la fase II

A través de los ensayos in-situ y de laboratorio (campañas 1 y 2) fue posible conocer el comportamiento de una (FVL) con diferentes características de muro base y condiciones de medición, en las dos se observaron incrementos de mejora de aislamiento acústico frente al muro base desnudo. En el caso de la realización un-situ (campaña 1) por tratarse de una fachada real que además es un

muro doble, por lo tanto con una buena capacidad de aislamiento acústico, se mostraron valores de incremento significativos dadas las condiciones de realización sin embargo la variación del grado de apertura de la (FVL) no presentó resultados relevantes. En el caso de ensayo de laboratorio (campana 2) el incremento de aislamiento de la (FVL) fue mucho más notorio y gracias a las condiciones de ensayo se pudieron medir diferentes espesores de la cámara de aire intermedia obteniendo resultados con muy pocas variaciones entre los diferentes casos, así mismo la variación del grado de apertura de la misma no presentó resultados que confirmaran una diferenciación del comportamiento al aislamiento acústico de la (FVL) al estar abierta o cerrada (según los parámetros determinados en esta tesis).

En cuanto a la simulación de diferentes situaciones de la (FVL) (campana 3) se pudieron comprobar varios de los resultados obtenidos en las campañas anteriores y llevar a cabo otro tipo de comprobaciones partiendo de ensayos de sistemas de doble pared como los autoportantes.

Aunque en este caso no se realizaron simulaciones directamente en una (FVL) principalmente por carecer de ensayos comparativos y sobre todo porque el planteamiento de comprobación de la variación de espesor del espacio de separación entre hojas (cámara de aire intermedia) de una pared doble, así como la variación de apertura de la misma en diferentes posiciones (extremos laterales horizontales de la cámara y a través de una de las hojas) requería del conocimiento preciso de sus características físico-mecánicas y que fuese lo más simple posible, por lo que se eligieron sistemas de doble hoja como los entramados autoportantes.

De éste último planteamiento se comprobó de forma orientativa que la variación del espesor del espacio de separación entre hojas (Cámara de aire intermedia) influye en el comportamiento de aislamiento acústico de la doble hoja dependiendo de la inclusión de material acústicamente absorbente al interior, donde hay una diferencia más notoria cuando la cámara de aire intermedia está vacía. En cuanto a la variación de apertura de la hoja doble se comprobó que la influencia en el aislamiento acústico se determina según la superficie de apertura, donde con una mínima cantidad de apertura, la influencia sobre la actuación de aislamiento acústico de la doble hoja es notoria y a partir de una cierta cantidad de superficie abierta, su influencia en el aislamiento acústico ya no afecta más.

De los resultados obtenidos en esta serie de experimentaciones prácticas, se pueden aplicar algunos conceptos de aportación al funcionamiento de aislamiento acústico de la (FVL) como el hecho de que el espesor de la cámara de aire intermedia puede ser variable sin influir en el comportamiento acústico de la (FVL) donde si influirá el tipo de material acústicamente absorbente que se utilice, respecto a la ventilación, esta función puede estar presente en la (FVL) sin afectar la mejora acústica obtenida donde si puede haber una influencia notoria de hasta el 10% de las superficie a determinar para la ventilación y así mismo tener en cuenta la localización de las obrturas para la función de ventilación,

desde los extremos laterales de la cámara de aire intermedia o a través de la hoja exterior como es el caso de varios sistemas comerciales de (FVL).

4.8 Fuentes y referencias capítulo 4

Codificación de fuentes y referencias

<p>Fuente A: Libro Fuente B : Artículo (publicación, paper, congreso, etc) Fuente C: Internet Fuente D: Elaboración propia de Andrea Niampira Daza Fuente D': Elaboración propia en base a resultados o varias consultas Fuente E: Tesis Fuente F: Ensayos acústicos</p>

B21: Warnock and J.D. Quirt “*Control of Sound Transmission through Gypsum Board Walls*” Construction Technology Update No. 1, Institute of Research in Construction (IRC), National Research Council of Canada, Enero de 1997.

B22: [16] 1. B.H.Sharp, “*Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements*”. *Noise Control Engineering* Vol 11. 1978.

2. L.Cremer M.Heckel E.E.Ungar, “*Structureborne Sound*”. Springer Verlag, 1988.

3. F.Fahy, “*Sound and Structural Vibration*”. Academic Press, 1985.

B23: [17] Vázquez, Olaya, Zaballos. “*Análisis acústico de soluciones constructivas con hojas de entramado autoportante*”. Actas de las II jornadas de investigación en construcción. Informes de la Construcción, Vol 60, No 511. 2008.

B24: [18] Halliwell, R.E; Nightingale, T.R.T; Warnock, A.C.C; Birta, J.A. “*Gypsum Board Walls: Transmission Loss Data*”. *Internal Report IRC-IR-761 Institute for Research in Construction. National Research Council of Canada* 1998.

C28: <http://www.ceramica-lapaloma.es/zona-tecnica-documentacion-tecnica.html> (consultada en Noviembre de 2013)

C29: *Marshall Day Acoustics* <http://www.insul.co.nz/> (Consultada en Agosto de 2014)

C29: <http://www.yesosibericos.com/selectorsistemas/>

F2: Ensayos URSA Yesos Ibéricos (AC3-D10-97.VII y AC3-D7-92.9) (AC3-D10-80.II y AC3-D1-82.6) (2011).

Listado de figuras capítulo 4

Fig.4. 1 Isonometría del sistema de (FVL) Aquapanel. (D´).....	136
Fig.4.2 Esquema de los tres tipos de hoja exterior de la (FVL) propuestos. (D).....	139
Fig.4.3 Ventilación ascendente de la (FVL) propuesta (D).....	140
Fig.4.4 Esquema de representación en planta y en alzado de la apertura de la cámara de la (FVL). (D). 140	
Fig.4.5 Sección de los diferentes espesores de cámara propuestos d=110, d=142,5 y d=175mm. (D)	150
Fig.4.6 Vista en sección de la (FVL) instalada en LARGE. (D)	151
Fig.4.7 Esquema del método de apertura de la (FVL) construida en LARGE. (D).....	152
Fig.4. 8 Curva de aislamiento de una pared doble, predicción INSUL. (C29).....	160
Fig.4.9 Modelo simulado en VA-one 2012. Izq. (D).....	171
Fig.4.10 Gráfica del aumento del rendimiento acústico de un entramado autoportante de yeso variando el espesor de la cámara. (B21)	184
Fig.4.11 Esquema de un cerramiento doble de placas de yeso o entramado autoportante. (C30)	185
Fig.4.12 Esquema de entramado autoportante. (B24).....	187
Fig.4.13 Esquema de apertura de la cámara de aire intermedia a través de una de las hojas, de un cerramiento autoportante simulado (D).....	202
Fig.4.14 Esquema de apertura de la cámara de un entramado autoportante a través de los perímetros horizontales inferior y superior (D).....	205

Listado de tablas capítulo 4

Tabla 4. 1 Tabla informativa sobre el aislamiento acústico R_{wAtr} de un muro doble de ladrillo. (C28)..	142
Tabla 4. 2 Resultados de aislamiento en Diferencia de Niveles Estandarizada campaña 1 In-situ.(D´)....	148
Tabla 4. 3 Resultados globales de la campaña 2 de laboratorio. (D´).....	157
Tabla 4. 4 Característica del muro base (FI) ETSAV campaña 1. (D´).....	160
Tabla 4. 5 Característica de (FVL) de la campaña 1 para simulación INSUL 7.0 (D´)	162
Tabla 4. 6 Característica de la subestructura de la (FVL) de la campaña 1 para simulación INSUL 7.0 (D´)	162
Tabla 4. 7 Característica del muro base LARGE campaña 2. (D´)	164
Tabla 4. 8 Característica de (FVL) de la campaña 2 para simulación INSUL v.7.0. (D´)	165
Tabla 4. 9 Característica de la subestructura de la (FVL) de la campaña 2 para simulación INSUL 7.0. (D´).....	165
Tabla 4. 10 Valores utilizados para la simulación en VA-one 2012 del muro base de LARGE. (D´)	171
Tabla 4. 11 Valores de la (FVL) utilizados para la simulación en VA-one 2012. (D´).....	173
Tabla 4.12 Definición de los valores paramétricos de los perfiles de la (FVL) para la simulación VA-one. (D´).....	176
Tabla 4.13 Resultados globales de aislamiento en la simulación VA-One 2012 de (FVL) con los diferentes grados de apertura. (D´)	178
Tabla 4. 14 Especificaciones de la configuración del entramado autoportante. (F2).	186
Tabla 4. 15 Especificaciones de la configuración del entramado autoportante. (F2).	187
Tabla 4. 16 Características de los entramados autoportantes. (B24).....	187
Tabla 4.16 Valores de aislamiento global de los entramados autoportantes, placas de yeso de 19mm. (F2)	189
Tabla 4.17 Valores de aislamiento global de los entramados autoportantes, placas de yeso de 25mm. (B19)	190
Tabla 4.19 Valores de aislamiento acústico global STC de entramados autoportantes de 16mm. (B27)..	191
Tabla 4.20 Resumen de los resultados del Índice global de reducción acústica obtenidos de la simulación de las configuraciones de entramado, al efectuar las aperturas a través de una de las hojas (D´)....	210
Tabla 4.21 Resumen de los resultados del Índice global de reducción acústica obtenidos de la simulación de las configuraciones al disponer las aberturas de ventilación a través de la cámara de aire intermedia (D´)	210

Listado de gráficas capítulo 4

Graph 4. 1 Curva de diferencia de niveles estandarizada de (FI). (D´).....	143
Graph 4. 2 Resultados obtenidos de la configuración (Fa) de (FVL). (D´).....	145
Graph 4. 3 Resultados extrapolados de la configuración (Fb) de (FVL). (D´).....	146
Graph 4.4 Resultados obtenidos de la configuración (Fd) de (FVL). (D).....	147
Graph 4.5 Resultado de mediciones de laboratorio para el muro base. (D´).....	153
Graph 4.6 Resultado de mediciones de (FVL) configuración (Fa) d=110mm obtenida en laboratorio. (D´)	154
Graph 4.7 Resultados de mediciones de (FVL) configuración (Fa) d=142.5mm en laboratorio. (D´).....	155
Graph 4.8 Resultado de mediciones de (FVL) configuración (Fa) d=175mm en laboratorio. (D´).....	156
Graph 4.9 Resultados obtenidos en laboratorio de aislamiento acústico de (FVL) configuración (Fa) con los diferentes espesores de cámara. (D).....	157
Graph 4.10 Comparación de diferencia de niveles obtenidos de la campaña 1 in-situ y la simulación (campaña 3) mediante INSUL 7.0 de (FI). (D´).....	161
Graph 4.11 Resultados del índice de reducción acústica de la (FVL). (D´).....	163
Graph 4.12 Comparación de resultados de aislamiento acústico obtenidos del muro base de la campaña 2 y del muro base en INSUL v.7.0. (D´).....	164
Graph 4.13 Comparación de resultados de aislamiento obtenidos en INSUL 7.0 y en laboratorio para la (FVL) de configuración (Fa) d=110 (0% abierta) (D´).....	166
Graph 4.14 Resultados de aislamiento acústico en (INSUL 7.0) de la (FVL) de configuración (Fa) con los diferentes espesores de cámara (Fa) d=110, (Fa) d=142.5, (Fa) d=175. (D´).....	167
Graph 4.15 Gráfica de resultados de aislamiento de la simulación de un muro de hormigón de 20cm. (D´).	172
Graph 4.16 Resultados de aislamiento acústico de la (FVL) con las herramientas VA-one 2012 aplicación (NCT) y dBK Aisla 3.01. (D´).....	174
Graph 4.17 Comparación de las curvas de aislamiento obtenidas en VA-One y en laboratorio del muro base. (D´).....	175
Graph 4.18 Resultados 1 de aislamiento de simulación de VA-One de la (FVL) con diferentes grados de apertura. (D´).....	177
Graph 4.19 Resultados 2 de aislamiento de simulación de VA-One de la (FVL) con diferentes grados de apertura. (D´).....	177
Graph 4.20 Comparación de resultados globales obtenidos mediante INSUL 7.0 para la campaña in-situ. (D´).....	179
Graph 4.21 Resultados de aislamiento acústico de la (FVL) con diferentes espesores de la cámara de aire intermedia. (D´).....	181
Graph 4.22 Comparación de los resultados obtenidos en las diferentes campañas para la (FVL) Fa d=110 con los grados de apertura. (D´).....	183
Graph 4.23 índice de reducción acústica de entramados autoportantes de placa de yeso de 19mm y cámaras de 46mm y 70mm. Izq. (F2).....	188
Graph 4.24 índice de reducción acústica de entramados autoportantes placa de yeso de 25mm, cámaras de 46mm y 70mm. Izq. Cámara vacía Der. (B29).....	190
Graph 4.25 (TL) de entramados autoportantes placa de yeso de 16mm. (B30).....	191
Graph 4.26 Gráfica 1 comparativa del aislamiento acústico global de las diferentes configuraciones contrastadas. (D´).....	192
Graph 4.27 Gráfica 2 comparativa del aislamiento acústico global de las diferentes configuraciones contrastadas. (D´).....	193
Graph 4.28 Resultados de aislamiento acústico obtenidos con las diferentes herramientas de software para los entramados autoportantes sin material absorbente. (D´).....	195
Graph 4.29 Resultados de aislamiento acústico obtenidos con las diferentes herramientas de software para los entramados autoportantes con material absorbente. (D´).....	196

Graph 4.30 Comportamiento acústico de entramados de placa de yeso de 19mm. Simulación en dBK Aisla 3.01 Gráficas comparativas del comportamiento acústico de cerramientos dobles de placas de yeso. (D)	197
Graph 4.31 Comportamiento acústico de entramados de placa de yeso de 25mm. Simulación en dBK Aisla 3.01 Gráficas comparativas del comportamiento acústico de cerramientos dobles de placas de yeso. (D')	198
Graph 4.32 Resultados de simulación de entramados de yeso. Simulación en VA-one 2012, (método NCT) gráficas comparativas del comportamiento acústico de cerramientos dobles de placas de yeso. (D')	199
Graph 4.33 Gráfica comparativa del índice global de reducción acústica R_w de las diferentes configuraciones de entramado con cámara vacía. (D')	200
Graph 4.34 Gráfica comparativa del aislamiento acústico global R_w de las diferentes configuraciones de entramado de cámara con material absorbente. (D')	201
Graph 4.35 Resultados de aislamiento acústico de un entramado autoportante placa de 19mm y cámara de 46mm con aperturas a través de una de las hojas. Simulación VA-One 2012 (D')	203
Graph 4.36 Resultados de aislamiento acústico de un entramado autoportante de placa de yeso de 19mm y cámara de 70mm con aperturas a través de una de las hojas. (D')	204
Graph 4.37 Variación del índice global de reducción acústica de las diferentes configuraciones al efectuar las aperturas a través de una de las hojas. (D')	205
Graph 4.38 Resultados de aislamiento acústico de un entramado autoportante placa de 19mm y cámara de 46mm con aperturas a través de los laterales horizontales. (D')	206
Graph 4.39 Variación del índice global de reducción acústica de las diferentes configuraciones al efectuar las aperturas a través de los perfiles horizontales. (D')	207
Graph 4.40 Aislamiento acústico de las configuraciones de entramados comparando la influencia de aperturas por localización. (D')	208

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE NORMATIVA Y REGLAMENTACIÓN ACÚSTICA

5. ANÁLISIS DE NORMATIVA Y REGLAMENTACIÓN ACÚSTICA

En este capítulo se indaga sobre la reglamentación acústica de la edificación en varios países a nivel de protección y aislamiento acústico respecto de la inmisión del ruido exterior a través de la fachada y en las estancias compartidas entre unidades independientes. Los valores de parametrización cuantitativa del ruido existente se basan en la medición de los niveles de presión sonora, expresados en dB, configurados según las escalas de ponderación para cada tipo de ruidos y situación predominante. Se definen cuatro escalas determinadas por la normativa internacional ISO denominadas A, B, C, D.

La escala **A** está pensada para ponderar la sensibilidad del oído humano cuando soporta niveles de presión sonora bajos (<55dB) a las distintas frecuencias; la escala **B** está pensada para ponderar la sensibilidad del oído humano cuando soporta niveles de presión sonora intermedios (55-85dB); la escala **C** está pensada para ponderar la sensibilidad del oído humano cuando soporta niveles de presión sonora altos (>85dB) y la **D** está pensada para ponderar la sensibilidad del oído humano cuando soporta niveles de presión sonora muy altos (tratamiento de entornos muy ruidosos: maquinaria, industria, etc.). La escala de ponderación **A** es la más común utilizada en la literatura de reglamentación acústica para la edificación.

Dependiendo de la actividad que se realice y del sitio en donde se desarrolle, la reglamentación establecen los valores máximos de presión sonora permitidos y los valores de transmisión de ruido exigibles para un elemento o conjunto constructivo que separa ambientes con distinto nivel de presión sonora, ya sea al ruido aéreo, al ruido de impacto o de transmisiones por vibraciones ocasionadas usualmente por equipos mecánicos instalados en los edificios o su proximidad.

La exposición al ruido aéreo exterior en áreas urbanas proviene de actividades como la industria, el tráfico vehicular, el tráfico de trenes y aeropuertos, entre otros. En el caso de la protección de los edificios frente al ruido aéreo exterior, se establecen los valores de presión acústica máximos permitidos en los denominados mapas de ruido (principalmente en entornos urbanos).

Las primeras mediciones de propagación del sonido exterior en áreas urbanas fueron realizadas entre las décadas de 1940 y 1950 del siglo XX para referenciar la localización óptima de sirenas y alarmas de emergencia. Los primeros datos al respecto fueron aportados por Wiener et al. en 1965 considerando tanto el nivel de ruido como el tiempo de reverberación (40).

(40) "Experimental study of sound propagation in a street" (J. Picaut, T. Le Pollès, P. L'Hermite, V. Gary) Applied acoustics 66 (2005) 149-173 (pg. 150)

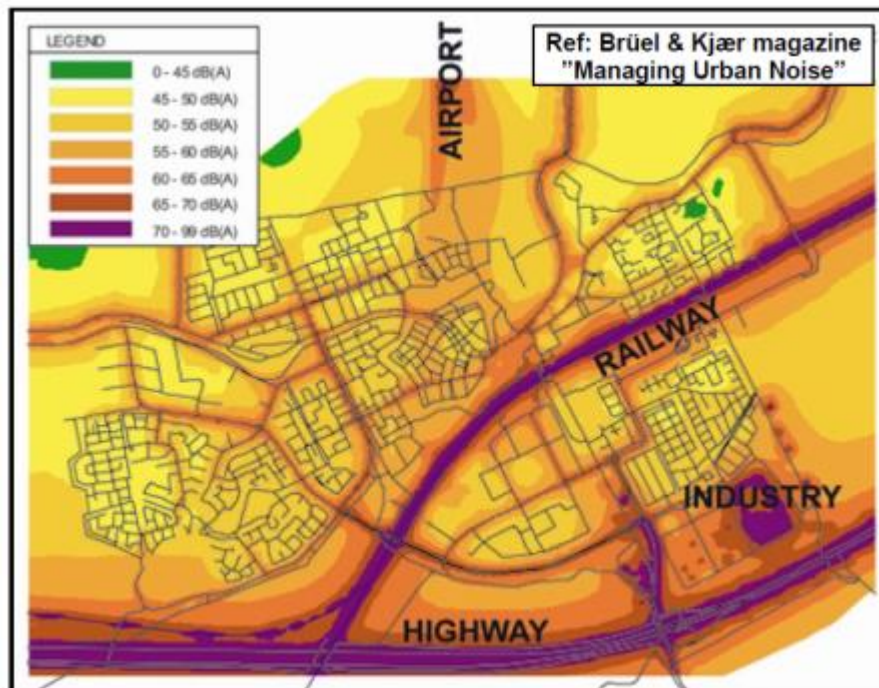


Fig.5. 1 Ejemplo de un mapa de ruido. (B25)

Para la medición y establecimiento de estos niveles de presión sonora se utilizan como protocolo de medición el que establecen las normas ISO. En los países de la región de Europa son reguladas y admitidas de forma específica por el comité europeo de normalización CEN. La regulación Europea del aislamiento acústico en edificación con respecto a la protección frente a la inmisión del ruido exterior se establece por la norma **EN 12354** Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos, dividida en varias partes; la parte 3 se refiere al *“Aislamiento acústico a ruido aéreo frente al ruido exterior”*. Esta norma, especifica un modelo de cálculo normalizado para la determinación del aislamiento acústico considerado como la diferencia normalizada de niveles de presión acústica de una fachada o de cualquier superficie externa de un edificio. El cálculo se basa en el índice de reducción acústica de los distintos elementos que componen la fachada e incluye también las transmisiones tanto directas como indirectas.

En la actualidad, las normativas establecen también métodos normalizados para la comprobación mediante ensayos in-situ y de laboratorio de estos valores de atenuación, a través de las normas internacionales **ISO 140-1**(anterior **ISO 140-2,3,4**) y la **ISO 717**.

La norma ISO 140-1 proporciona especificaciones relativas a las instalaciones de laboratorio necesarias para la medición del aislamiento acústico de elementos de construcción; también esta

norma se divide a su vez se divide en varias partes. La ISO 140-5 se refiere a las mediciones in-situ del aislamiento acústico al ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas.

La norma ISO 717 tiene como objetivo la normalización de un método por el cual la variación frecuencial del aislamiento al ruido aéreo externo pueda expresarse en un solo parámetro que caracterice el comportamiento acústico. Objeto y campo de aplicación de la norma ISO 717:

- a) Define magnitudes globales para el aislamiento al ruido en edificios y de elementos de construcción tales como paredes, suelos puertas y ventanas. Parte 1: Aislamiento al ruido aéreo.
- b) Toma en consideración los diferentes espectros sonoros que afectan al interior de los edificios tales como ruido de tráfico exterior y de aeronaves.
- c) Proporciona reglas para la determinación de éstas magnitudes, a partir de los resultados de medición realizados en bandas de tercios de octava o de octavas.

5.1 Normativa en España de la protección acústica de la fachada respecto al ruido exterior

La regulación estatal con respecto a la protección y aislamiento acústico en España es relativamente reciente; las normativas de la edificación se consolidaron y establecieron de aplicación obligatoria en todo el estado hacia 1977, con la promulgación de las primeras Normas Básicas de la Edificación (NBE).

La primera normativa básica de condiciones acústicas de la edificación fue la NBE-CA-81, en la cual se establecen varios parámetros de cumplimiento de aislamiento acústico en edificios destinados a diferentes usos y de elementos y materiales de construcción; en esta normativa se fija un valor de aislamiento acústico global mínimo de $R=30\text{dB}$ (Término desestimado con la nueva normativa) para cualquier fachada y ubicación; se considera como suficiente este nivel de aislamiento acústico proporcionado si la fachada cuenta con ventanas con carpinterías de clase A-1, provistas como mínimo de acristalamientos de espesor igual o superior a 5-6mm. En los anexos de ésta normativa, se establecen algunas consideraciones respecto de las s de ruido aéreo externo a los edificios, como son el ruido generado por el tráfico rodado, el cual por su complejidad de origen, es necesario analizar a través de su espectro energético y su fluctuación en el tiempo, utilizando un tratamiento estadístico que permitiera establecer niveles globales. Los más usados son:

- a) Nivel L_{10} : Nivel sonoro en dB(A) que se sobrepasa durante el 10% del tiempo de observación.
- b) Nivel L_{50} o nivel medio: Nivel sonoro que se sobrepasa el 50% del tiempo de observación.
- c) Nivel L_{90} : Nivel sonoro que se sobrepasa el 90% del tiempo de observación.

d) Nivel L_{eq} o nivel sonoro continuo equivalente: es el nivel de un hipotético ruido constante correspondiente a la misma cantidad de energía acústica que el ruido real considerado, en un punto determinado durante un período de tiempo T.

e) Nivel L_{NP} o nivel de contaminación sonora: es el índice obtenido a partir del nivel de ruido equivalente L_{eq} teniendo en cuenta la fluctuación de niveles.

f) Índice T_{NI} o índice de ruido de tráfico, es un índice empírico que tiene en cuenta el valor de nivel sonoro L_{90} y la dispersión.

La norma **NBE-CA-88** es una actualización de la normativa anterior y presenta algunas aclaraciones en sus anexos, aun así continua siendo muy similar en las exigencias de aislamiento acústico en fachadas. En el anexo 3 de aislamiento acústico de los elementos constructivos se definen materiales y sistemas de cerramientos normalizados con detalle de espesores, masa y el índice de aislamiento acústico que les corresponde expresado en R (dB) Así mismo en esta norma ya se reconoce la escasez de datos más reales obtenidos mediante ensayo en laboratorio y la dificultad de obtener un conocimiento más preciso del comportamiento acústico de los elementos constructivos en la obra.

La evolución de la reglamentación acústica de la edificación en España ha generado con posterioridad, y dentro del Código Técnico de la Edificación (CTE), el Documento Básico de Protección frente al Ruido **DB-HR** con la última actualización publicada en Septiembre de 2009.

De la normativa anterior (NBE-CA-88) respecto a la actual varían los siguientes aspectos:

- 1) se pasa de contar solo con los valores obtenidos de laboratorio (nominales), a obtener un acercamiento más aproximado con valores obtenidos in-situ,
- 2) mayores exigencias en los valores de aislamiento acústico al ruido aéreo y de impacto, así como la introducción del control de la reverberación en salas, aulas de conferencias, restaurantes, etc.,
- 3) cambio de terminología para su ajuste a la normativa internacional,
- 4) inclusión de métodos de cálculo y predicción
- 5) aclaración de las condiciones de diseño de la separación de elementos verticales, horizontales, tabiquería, medianeras, fachadas y cubiertas que influyen en la transmisión de ruido y vibraciones entre recintos adyacentes o entre el exterior y un recinto. Se tienen ya en cuenta las transmisiones indirectas producidas por las condiciones específicas de los edificios
- 6) nivel de aislamiento de fachadas variable en función del ruido exterior dominante (ruido de tráfico, ferroviario o de aeronaves),
- 7) implementación de un Catálogo de Elementos Constructivos, como documento reconocido, que describe ampliamente las condiciones específicas de materiales y sistemas constructivos más habituales de la edificación.

En esta normativa se expresan los valores mínimos de aislamiento para una fachada, parámetro denominado $D_{2m,nT,Atr}$ (Diferencia de Niveles Estandarizada en decibelios “A”, para un ruido de tráfico t_r) entre 30 y 47dB(A) teniendo en cuenta los diversos niveles de ruido día L_d . (período de 12h comprendido entre las 7h a las 19h) Estos valores L_d están determinados por los mapas de ruido de cada zona y pueden consultarse a las autoridades competentes. Estos niveles de ruido día se categorizan entre ≤ 60 dB(A) ó < 75 dB(A). El $D_{2m,nT,Atr}$ se estimará en función del uso de los edificios, las condiciones de las estancias interiores que están en contacto con el exterior y la localización urbana de la fachada. (Fig.5.2)

Tabla 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 .

L_d dBA	Uso del edificio			
	Residencial y hospitalario		Cultural, sanitario ⁽¹⁾ , docente y administrativo	
	Dormitorios	Estancias	Estancias	Aulas
$L_d \leq 60$	30	30	30	30
$60 < L_d \leq 65$	32	30	32	30
$65 < L_d \leq 70$	37	32	37	32
$70 < L_d \leq 75$	42	37	42	37
$L_d > 75$	47	42	47	42

⁽¹⁾ En edificios de uso no hospitalario, es decir, edificios de asistencia sanitaria de carácter ambulatorio, como despachos médicos, consultas, áreas destinadas al diagnóstico y tratamiento, etc.

Fig.5.2 Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo del CTE. Tabla orientativa de los valores de aislamiento en diferencia de niveles para diferentes estancias (A8)

Las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de separación verticales (interior-interior), se establecen dependiendo de la masa y solución constructiva del cerramiento de separación. En el Documento Básico de Protección frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación (DB-HR) se establecen 3 tipos principales constructivos de cerramientos verticales: (ver Fig.5.3)

Tipo 1: Elementos compuestos por un elemento base de una o dos hojas de fábrica, hormigón o paneles prefabricados pesados (Eb), sin trasdosado o con un trasdosado por ambos lados (Tr).

Tipo 2: Elementos de dos hojas de fábrica o paneles prefabricados pesados (Eb), con bandas elásticas en su perímetro dispuestas en los encuentros de, al menos, una de las hojas con forjados, suelos, techos, pilares y fachadas.

Tipo 3: Elementos de 2 hojas de entramado autoportante (Ee).(41)

(41) Texto tomado de la norma DB-HR del CTE apartado 3.1.2.3.1 *Definición y composición de los elementos de separación.*

En este caso de los elementos divisorios interiores se consideran soluciones constructivas con cámara de aire intermedia, no ventilada, y que está ocupada parcialmente por alguna capa de material aislante o absorbente.

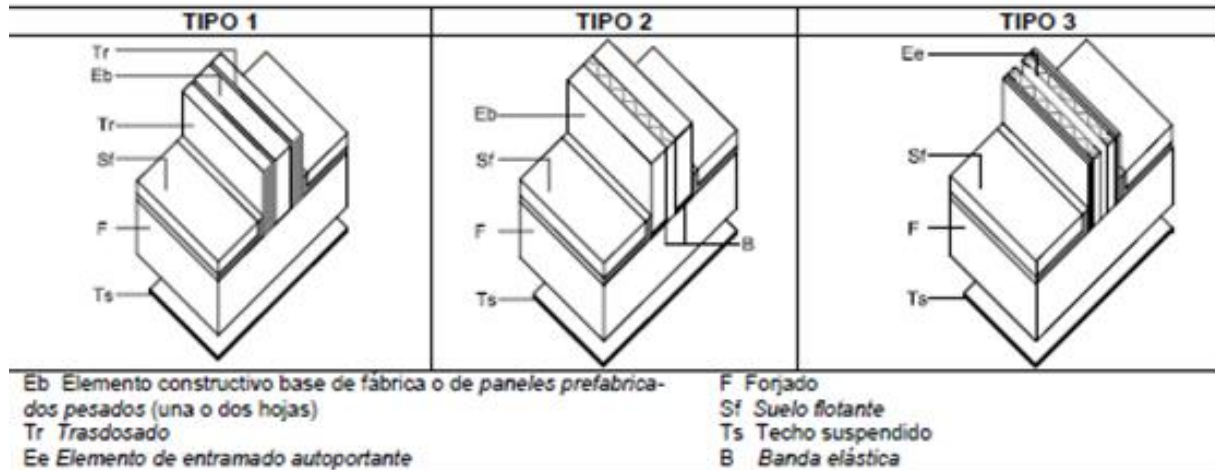


Fig.5. 3 Elementos de separación entre recintos DB-HR (A8)

En cuanto al caso de las fachadas, el texto normativo se focaliza más en la problemáticas de las aberturas (porcentaje de huecos). Para fachadas con un mayor porcentaje de huecos se establecen exigencias superiores para las soluciones constructivas ciegas de la fachada. (Fig.5.4)

Tabla 3.4 Parámetros acústicos de fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior de recintos protegidos

Nivel límite exigido (Tabla 2.1) $D_{2m,nT,Atr}$ dBA	Parte ciega ⁽¹⁾ 100 % R_{Atr} dBA	Parte ciega ⁽¹⁾ ≠ 100 % R_{Atr} dBA	Huecos Porcentaje de huecos R_{Atr} de los componentes del hueco ⁽²⁾ dBA				
			Hasta 15 %	De 16 a 30%	De 31 a 60%	De 61 a 80%	De 81 a 100%
			$D_{2m,nT,Atr} = 30$	33	35 40 45	26 25 25	29 28 28
$D_{2m,nT,Atr} = 32$	35	35	30	32	34	34	35
		40	27	30	32	34	
		45	26	29	32	33	
$D_{2m,nT,Atr} = 34^{(1)}$	36	40	30	33	35	36	36
		45	29	32	34	36	
		50	28	31	34	35	
$D_{2m,nT,Atr} = 36^{(1)}$	38	40	33	35	37	38	38
		45	31	34	36	37	
		50	30	33	36	37	
$D_{2m,nT,Atr} = 37$	39	40	35	37	39	39	39
		45	32	35	37	38	
		50	31	34	37	38	
$D_{2m,nT,Atr} = 41^{(1)}$	43	45	39	40	42	43	43
		50	36	39	41	42	
		55	35	38	41	42	
$D_{2m,nT,Atr} = 42$	44	50	37	40	42	43	44
		55	36	39	42	43	
		60	36	39	42	43	
$D_{2m,nT,Atr} = 46^{(1)}$	48	50	43	45	47	48	48
		55	41	44	46	47	
		60	40	43	46	47	
$D_{2m,nT,Atr} = 47$	49	55	42	45	47	48	49
		60	41	44	47	48	
$D_{2m,nT,Atr} = 51^{(1)}$	53	55	48	50	52	53	53
		60	46	49	51	52	

⁽¹⁾ Los valores de estos niveles límite se refieren a los que resultan de incrementar 4 dBA los exigidos en la tabla 2.1, cuando el ruido exterior dominante es el de aeronaves.

⁽²⁾ El índice R_{Atr} de los componentes del hueco expresado en la tabla 3.4 se aplica a las ventanas que dispongan de aireadores, sistemas de microventilación o cualquier otro sistema de abertura de admisión de aire con dispositivos de cierre en posición cerrada.

Fig.5. 4 Parámetros del índice de reducción sonora R_{Atr} de la fachada. Parte ciega y porcentaje de huecos que incluyan aireadores o sistemas de ventilación, respecto a los niveles exigidos (A8)

5.1.1 Normativa en España y la (FVL)

Respecto a las exigencias específicas de aislamiento acústico para la solución de fachada ventilada con revestimiento ligero (FVL), el DB-HR no establece condiciones específicas pero sí que indica algunos valores teniendo en cuenta los tipos de cerramiento descritos anteriormente en la Fig. 5.3.

- El sistema (FVL) podría estar considerado entre los cerramientos de **tipo 1** sí:
 - Tiene una hoja interior de obra de fábrica o de hormigón que presente una masa superficial $>135\text{Kg/m}^2$ con un índice de reducción acústica, ponderado $R_A > 42\text{dB}$, siendo $R_A = R_w + C$ en (dB)
 - Es una fachada ventilada o bien una fachada no ventilada cuya hoja interior sea ligera ($<26\text{Kg/m}^2$) y de entramado autoportante y el índice de reducción sonora $R_A > 43\text{dB(A)}$ (42).

En esta tipología no se contemplan las fachadas de dos hojas, con una hoja interior de obra de fábrica o de hormigón (pesada) usada conjuntamente con una hoja exterior (ligera) de entramado autoportante.

- El sistema (FVL) podría estar considerado entre los cerramientos de **tipo 2** si:
 - Se trata de una fachada ventilada, con la hoja interior de obra de fábrica o de hormigón si la masa de la hoja interior es $>170\text{Kg/m}^2$ con un índice de reducción $R_A > 50\text{dB}$ y una masa conjunta mínima $>225\text{Kg/m}^2$.
- Lo más cerca que podría estar el sistema (FVL) considerado entre los cerramientos de **tipo 3** es sí:
 - La fachada ventilada o ligera no ventilada tiene una hoja interior de entramado autoportante cuya masa sea de mínimo 26Kg/m^2 y el índice de reducción acústica de la hoja interior sea $>43\text{dB}$.

En este caso no se contemplan las fachadas de dos hojas ventiladas o no, con hoja interior de fábrica, hormigón o de paneles prefabricados pesados.

Para las diferentes soluciones constructivas de elementos de separación vertical, las exigencias se resumen en una tabla que incluye los valores de peso por unidad de superficie de los elementos base y los índices de reducción sonora que deben cumplir las hojas que conforman los cerramientos dobles. (Fig.5.5).

En la siguiente tabla se expresan los valores mínimos exigidos para trasdosados (cerramientos dobles de placas de yeso con cámara de aire intermedia rellena con material acústicamente absorbente) que no son parte propiamente de la (FVL) pero se incluyen en este análisis a manera de base orientativa, por ser elementos de separación vertical y su relación entre la masa superficial y los valores mínimos de aislamiento acústico definidos por la normativa acústica de España.

(42) Apartado 3.1.2.3.4 Condiciones mínimas de los elementos de separación verticales DB-HR del CTE

Tabla 3.2. Parámetros acústicos de los componentes de los elementos de separación verticales

Elementos de separación verticales				
Tipo	Elemento base ⁽¹⁾⁽²⁾ (Eb - Ee)		Trasdoso ⁽³⁾ (Tr) (en función de la tabiquería)	
	m kg/m ²	R _A dBA	Tabiquería de fábrica o paneles prefabricados pe- sados ⁽⁴⁾ ΔR _A dBA	Tabiquería de entramado autoportante ΔR _A dBA
TIPO 1 Una hoja o dos hojas de fábrica con Trasdoso	67	33		16 ⁽⁸⁾⁽¹¹⁾
	120	38		14 ⁽⁸⁾⁽¹¹⁾
	150	41	16 ⁽⁸⁾	13 ⁽¹¹⁾
	180	45	13	9 ⁽¹¹⁾ (12) ⁽¹¹⁾
	200	46	11 ⁽¹¹⁾	10 ⁽¹³⁾ (10) ⁽¹¹⁾
	250	51	6 ⁽¹³⁾	4 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹³⁾
	300	52	3 ⁽¹³⁾ 8 (9)	3 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹³⁾
	300 ⁽⁷⁾	55 ⁽⁷⁾	-	-
	350	55	5 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹¹⁾	0 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹³⁾
	400	57	0 ⁽¹³⁾ 2 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹³⁾	0 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹³⁾
TIPO 2 Dos hojas de fábrica con bandas elásticas perimétricas	130 ⁽⁵⁾	54 ⁽⁶⁾	-	-
	170 ⁽⁵⁾	54 ⁽⁶⁾	-	-
	(200) ⁽⁶⁾	(61) ⁽⁶⁾	-	-
TIPO 3 Entramado autopor- tante	44 ⁽¹²⁾	58 ⁽¹²⁾		
	(52) ⁽⁶⁾	(64) ⁽⁶⁾		
	(60) ⁽¹⁰⁾	(68) ⁽¹⁰⁾		

*Los números entre paréntesis son aclaraciones que se encuentran en el DB-HR del CTE

Fig.5. 5 Tabla de parámetros acústicos de los componentes de los elementos de separaciones verticales. (A8)

En el documento *Catálogo de Elementos Constructivos del CTE* (A9) es posible ampliar la información sobre la configuración de los cerramientos más habitualmente usados para fachada y conocer orientativamente los valores de aislamiento acústico que se pueden alcanzar.

Dentro de las soluciones más específicas para el tipo de fachadas denominadas ventiladas se pueden consultar las siguientes tablas orientativas (Fig.5.6, Fig.5.7 y Fig.5.8) (transcritas del Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación CTE). En la tabla 4.2.15 de esta publicación, apartado *Fachada de entramado estructural de madera* (Fig.5.8) se menciona este tipo porque contempla el uso de cámara ventilada. Otras soluciones de cerramientos ligeros para fachada, no fueron reproducidas en este documento porque la cámara está cerrada o en algunos casos no tiene.

Cada tabla tiene sus propias convenciones, a continuación se aclaran los siguientes símbolos:

B3	Barrera de resistencia muy alta a la filtración. -una cámara de aire ventilada y con aislante no hidrófilo: * la cámara debe disponerse del lado exterior del aislante.
B3'	El elemento interior de cierre de la cámara no se degrade por la humedad
C1	Hoja principal de espesor medio. Se considera como una fábrica con mortero de: - ½ pie de ladrillo cerámico, que debe ser perforado o macizo cuando no exista revestimiento exterior o cuando exista un revestimiento exterior discontinuo o un aislante exterior fijados mecánicamente.
C1'	Es equivalente a C1 un elemento ligero de cerramiento con las siguientes características: -compatibilidad de sus movimientos, debidos a las acciones e influencias previsibles con el resto de los componentes de la solución; -permeabilidad al agua y al aire que proporciones una suficiente estanquidad.
R2	Revestimiento exterior con un espesor entre 3 y 15mm con una resistencia alta a la filtración. Discontinuos rígidos fijados mecánicamente.
R3	Revestimiento con resistencia muy alta a la filtración. - estanquidad al agua para que la filtración no entre en contacto con la hoja del cerramiento dispuesta inmediatamente por el interior del mismo; - adherencia al soporte; - permeabilidad al vapor - comportamiento muy bueno frente a la fisura; - estabilidad frente a ataques físicos - revestimientos discontinuos fijados mecánicamente: - escamas: elementos de piezas pequeñas (pizarras, barro, etc) - lamas: (lamas de madera o metal) - placas: elementos de grandes dimensiones (fibrocemento, metal) - sistemas derivados: formados por cualquiera de los elementos discontinuos anteriores y un aislamiento térmico.

FACHADA Hoja principal de fábrica con revestimiento continuo					
CON CÁMARA DE AIRE VENTILADA					
Aislamiento por el exterior					
<p>RE revestimiento exterior discontinuo C cámara de aire ventilada⁽⁷⁾ AT aislante no hidrófilo HP hoja principal LC fábrica de ladrillo cerámico BH fábrica de bloque de hormigón⁽⁶⁾ BC fábrica de bloque cerámico LHO fábrica de ladrillo perforado de hormigón⁽⁶⁾ BP fábrica de bloque de picón⁽⁶⁾ RI revestimiento interior formado por un enlucido, un enfoscado o un alicatado</p>					
Código	Sección (mm)	Datos entrada	HR ⁽²⁾		
		RE	R _A (dBA)	R _{Atr} (dBA)	m (kg/m ²)
F 8.1		R2	42 [43]	39 [40]	156 [168]
		R3 o B3			

F 8.2		R2			
		R3 o B3	44 ⁽³⁾ 41 ⁽⁴⁾	41 ⁽³⁾ 38 ⁽⁴⁾	205 ⁽³⁾ 177 ⁽⁴⁾
F 8.3		R2	42 [44]	39 [41]	143 [167]
		R3 o B3			
F 8.4		R2	44 ⁽³⁾ 42 ⁽⁴⁾	41 ⁽³⁾ 39 ⁽⁴⁾	200 ⁽³⁾ 179 ⁽⁴⁾
		R3 o B3			
F 8.5 ⁽⁸⁾		R2	49	46	226 [206]
		R3 o B3			
F 8.6 ⁽⁵⁾⁽⁸⁾		R2 o B3	53	50	252 [227]

- (2) En el caso de elementos de fábrica de ladrillo aparecen dos valores de m , de R_A y de R_{Atr} ; el primero de ellos es un valor mínimo y el segundo, que figura entre corchetes, es un valor medio.
En el caso de hoja principal de ladrillo cerámico, los valores de m , de R_A , y R_{Atr} son aplicables sólo en el caso de que la hoja principal sea de ladrillo perforado o macizo.
- (3) Valores de m , R_A y R_{Atr} para fábricas de bloque o ladrillo de hormigón convencional o de áridos densos.
- (4) Valores de m , R_A y R_{Atr} para fábricas de bloque o ladrillo de hormigón de áridos ligeros.
- (5) Valores válidos para bloques de picón de 25cm de espesor con dos o tres cámaras.
- (6) Cuando la hoja principal sea de bloque o ladrillo de hormigón, salvo cuando sea curado en autoclave, el valor de absorción de los bloques o ladrillos medido según ensayo de UNE 41170:1989EX debe ser como máximo $0,32g/cm^3$.
- (7) Según se establece en el DB-HS 1, una cámara de aire ventilada tiene un espesor de $\geq 3cm$ y $\leq 10cm$, un sistema de recogida y evacuación del agua y aberturas de ventilación con una anchura de $>5mm$ repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior de un paño entre forjados.
El área de ventilación efectiva será $\geq 120cm^2$ por cada $10m^2$ de fachada entre forjados.
- (8) Valores de R_A y R_{Atr} válidos para una densidad del material de $1.800kg/m^3$ y $1.500kg/m^3$. Entre corchetes figura el valor de m correspondiente a una densidad del material de $1.500kg/m^2$.

Fig.5.6 Aspecto acústico de revestimientos hoja interior maciza. Tabla 4.2.8 Fábrica con revestimiento discontinuo, con cámara de aire ventilada, aislamiento por el exterior (A9)

FACHADA LIGERA						
CON CÁMARA DE AIRE VENTILADA						
RE revestimiento exterior discontinuo fijado mecánicamente C cámara de aire ventilada ⁽⁶⁾ AT aislante HI hoja interior T tablero o panel impermeable, por ejemplo, tablero con base de cemento Ci cámara interior no ventilada YL placa de yeso laminado						
Código	Sección (mm)	Datos entrada		HR		
		RE	HI	R_A (dBA)	R_{Atr} (dBA)	m (kg/m^2)
F.10.1 ⁽⁷⁾		B3'	C1'	43 ⁽²⁾	36 ⁽²⁾	48 ⁽²⁾
				48 ⁽³⁾	40 ⁽³⁾	56 ⁽³⁾
F.10.2 ⁽⁷⁾		B3'	C1'	47 ⁽²⁾	43 ⁽²⁾	48 ⁽²⁾
				47 ⁽³⁾	43 ⁽³⁾	56 ⁽³⁾

F.10.3⁽⁷⁾		B3'	C1'	47 ⁽²⁾	43 ⁽²⁾	48 ⁽²⁾
				47 ⁽³⁾	43 ⁽³⁾	56 ⁽³⁾
F.10.4		B3	C1'	30 ⁽²⁾	26 ⁽²⁾	48 ⁽²⁾
				34 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	56 ⁽³⁾
F.10.5		B3	C1'	30 ⁽²⁾	26 ⁽²⁾	48 ⁽²⁾
				34 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾	56 ⁽³⁾
<p>⁽²⁾ El valor de R_{Atr}, R_A y m para fachadas con un trasdosado formado por una placa de yeso laminado de 15mm por el interior.</p> <p>⁽³⁾ el valor de R_A, R_{Atr} y m para fachadas con un trasdosado formado por dos placas de yeso laminado de 12,5mm por el interior.</p> <p>⁽⁶⁾ Según se establece en el DB-HS 1, una cámara de aire ventilada tiene un espesor de $\geq 3\text{cm}$ y $\leq 10\text{cm}$, un sistema de recogida y evacuación del agua y aberturas de ventilación con una anchura de $>5\text{mm}$ repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior de un paño entre forjados. El área de ventilación efectiva será $\geq 120\text{cm}^2$ por cada 10m^2 de fachada entre forjados.</p> <p>⁽⁷⁾ Valores de R_A y R_{Atr} son válidos si el aislante AT es una lana mineral o un material absorbente acústico poroso con un a resistividad al flujo del aire, $r \geq 5\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.</p>						

Fig.5.7 Aspecto acústico revestimientos hoja interior ligera. Tabla 4.2.10 Fachada ligera ventilada (A9)

FACHADA de entramado estructural de madera				
CON CÁMARA DE AIRE VENTILADA				
RE revestimiento exterior. Elemento con una masa por unidad de superficie $\geq 9,45 \text{ kg/m}^2$ C cámara de aire ventilada con rastreles de madera ⁽¹⁾ AT aislante HI hoja interior TM tablero de madera MM montante de madera ⁽²⁾⁽³⁾ Ci cámara interior no ventilada con rastreles de madera YL placa de yeso laminado B barrera contra el vapor. Solo si hay riesgo de condensación según lo dispuesto en el Documento Básico DB HE-1 Limitación de la demanda energética				
Código	Planta (mm)	HR		
		R _A (dBA)	R _{Atr} (dBA)	m (kg/m ²)
F.15.1 ⁽²⁾⁽³⁾		45	41	42 ⁽²⁾ /45 ⁽³⁾
F.15.2 ⁽²⁾⁽³⁾		45	41	43 ⁽²⁾ /46 ⁽³⁾
F.15.3 ⁽²⁾⁽³⁾		46	42	44 ⁽²⁾ /47 ⁽³⁾
F.15.4 ⁽³⁾		46	41	51
F.15.5 ⁽³⁾		7	42	52

<p>F.15.6⁽³⁾</p>		<p>47</p>	<p>42</p>	<p>53</p>
<p>(1) Según se establece en el DB-HS 1, una cámara de aire ventilada tiene un espesor de $\geq 3\text{cm}$ y $\leq 10\text{cm}$, un sistema de recogida y evacuación del agua y aberturas de ventilación con una anchura de $>5\text{mm}$ repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior de un paño entre forjados. El área de ventilación efectiva será $\geq 120\text{cm}^2$ por cada 10m^2 de fachada entre forjados. (2) Separación mínima entre elementos estructurales de 600mm (3) Separación mínima entre elementos estructurales de 400mm (5) La barrera contra el agua debe ser una barrera resistente a la penetración al agua clase W1 y permeable</p>				
<p>Al vapor de agua, que cumpla con UNE-EN 13.859-2: 2006+ A1:2009 "Láminas flexibles para impermeabilización. Definiciones y características de las láminas auxiliares. Parte 2: Láminas auxiliares para muros". (5) Valores de R_A y R_{Atr} son válidos si el aislante AT es una lana mineral o un material absorbente acústico poroso con un a resistividad al flujo del aire, $r \geq 5\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.</p>				

Fig.5. 8 Aspecto acústico entramado de madera. Tabla 4.2.15 Fachada de entramado estructural de madera, con cámara de aire ventilada (A9)

Entre las diferentes soluciones seleccionadas y extraídas de la publicación citada, no se evidencia a nivel general una gran diferencia por lo que respecta a los índices de reducción sonora alcanzados, incluso en las configuraciones que tienen, o no, una cámara de aire intermedia sin ventilar. Una excepción a esta afirmación es el caso del tipo con hoja principal de obra de fábrica (Fig.5.6), donde parece que la masa de esta hoja por unidad de superficie parece determinar los resultados obtenidos, diferenciándose casi en 10dB entre el comportamiento acústico de una hoja de 120mm de espesor con respecto al comportamiento acústico de una hoja de 250mm de espesor. En todos los casos, la cámara de aire intermedia ventilada abierta se contempla con un espesor mínimo de 30mm. Tal vez debido al comportamiento de ésta configuración (Fig.5.6), en el documento DB HR del CTE, la adición de una hoja ligera exterior con interposición de una cámara de aire intermedia (o solución de fachada ventilada con revestimiento ligero) no se considera como aporte al aislamiento acústico del conjunto de la fachada puesto que el aporte significativo de la solución constructiva recae solo en la hoja interior.

Sin embargo, en los demás sistemas de configuración de fachada con cámara ventilada mostrados en el documento *Catálogo de Elementos Constructivos (A9)*, aunque son soluciones en conjunto más ligeras (no se consideran hojas principales de obra de fábrica), los valores del aislamiento acústico no parecen diferir ostensiblemente. En la tabla 4.2.10 Fachada ligera ventilada (Fig. 5.7), cuentan con una cámara ventilada de 100mm y registra valores de aislamiento acústico similares, excepto en los casos de uso

de una cámara interior no ventilada, sin material aislante, en los cuales el comportamiento es casi inferior al exigido en la norma R de 30 a 47dB.

En la tabla 4.2.15 (Fig.5.8) Fachada de entramado estructural de madera con cámara de aire ventilada, las soluciones presentan índices de reducción sonora cercanos a los de los cerramientos ligeros y con menos masa. En estas soluciones, la cámara ventilada, no tiene material absorbente.

Tomando como base el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, se puede concluir que: Hay un aporte al aislamiento acústico con el uso de los sistemas de fachada ligera ventilada y que en algunos casos la conformación de la hoja principal puede influir o determinar el comportamiento, especialmente si esta es de fábrica o de hormigón macizo y con gran masa.

Por otro lado, el aporte al aislamiento acústico más significativo está representado por el uso de una capa de material absorbente al interior de la cámara ventilada (adosado a la cara exterior del cerramiento base principal). El espesor de la cámara influye sustancialmente en la mejora de los índices de reducción sonora globales de todas las soluciones constructivas.

5.2 Reglamentación en otros países

La regularización acústica aplicada a la edificación tiene ya más de 50 años Europa; la protección al ruido exterior es un poco más reciente y varía en cada Estado de la Unión, dependiendo de los aspectos que se contemplan y los grados de exigencia que se establecen.

La nomenclatura para definir los valores de aislamiento acústico está definida por las normas internacionales. En la tabla siguiente (Fig.5.9) se expresa la nomenclatura específica usada hasta hoy en distintos países de Europa, respecto a la protección al ruido aéreo, al ruido de impacto, niveles de exposición y los índices de reducción sonora en muros exteriores.

Country	Airborne Sound Insulation		Impact Sound Insulation		Equipments Noise		Exterior Walls Insulation	
Austria	R'_{w}	dB	$L'_{nA,w}$	dB	L_p	dB(A)	$R_{\theta,w}$	dB
Belgium ⁽¹⁾	$R + D_n$ + Belgium Graphs	dB(A)	L'_{nA} + Belgium Graphs	dB(A)	L_{eq}	dB(A)	$R'/D_n/L_{eq}$ + Belgium Graphs	dB(A)
Denmark	R'_{w}	dB	$L'_{nA,w}$	dB	L_{eq}	dB(A)	L_{eq}	dB(A)
Finland	R'_{w}	dB	$L'_{n,w}$	dB	L_p	dB(A)	L_p	dB
France	D_{nAT} (pink)	dB(A)	L'_{nAT}	dB(A)	L_{eq}	dB(A)	D_{nAT} (traffic)	dB(A)
Germany	R'_{w}	dB	$L'_{nA,w}$	dB	L_p	dB(A)	$R_{\theta,w}$	dB
Greece	R'_{w}	dB	$L'_{nA,w}$	dB	L_p	dB(A)	$R_{\theta,w}$	dB
Netherlands	R'_{w}	dB	$L'_{nA,w}$	dB	L_p	dB(A)	$R_{\theta,w}$	dB
Portugal	R'_{w}	dB	$L'_{nA,w}$	dB	-		$R_{\theta,w}$	dB
Spain	R_A	dB(A)	L'_{nAA}	dB(A)	-		R_A (pink)	dB(A)
Sweden	R'_{w}	dB	$L'_{n,w}$	dB	L_{eq}	dB(A)	L_p/L_{eq}	dB
United Kingdom	$D_{nT,w}$	dB	$L'_{nT,w}$	dB(A)	L_p	dB(A)	$R_{\tau,w}$	dB

⁽¹⁾ Information based on 1992 data

Fig.5. 9 Nomenclatura Acústica. Tabla comparativa de nomenclatura usada en varios países de Europa (B26)

Estas exigencias de aislamiento acústico mínimo se expresan con referencia a los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio normalizados donde se obtienen el valor en el parámetro Índice de Reducción acústica aparente R'_{w} , siguiendo el protocolo de ensayo y de cálculo establecido en las normas ISO actualmente las exigencias de aislamiento acústico mínimo se expresan con referencia a los resultados obtenidos en mediciones normalizadas realizadas in situ donde se obtienen el valor del parámetro Diferencia de Niveles Estandarizada (D_{nAT} y $D_{nT,w}$).

En los últimos años, los diversos Estados de la Unión han desarrollado un proceso de regularización de métodos de medición para ajustarse a las normativas internacionales al mismo tiempo que se han ido incrementando los niveles de exigencia a nivel nacional.

En Inglaterra y Gales la regulación acústica se ha modificado a partir del año 2002 en aspectos como:

- Cambio de los requerimientos para la protección al ruido aéreo y de impacto entre viviendas.
 - aplicación a todo tipo de viviendas, incluyendo residencial, hoteles, hostales, pero no hospitales o instituciones similares.
 - incremento de las exigencias de aislamiento cerca de 3dB.

- inclusión de nuevos Índices de Aislamiento ajustándose a la norma ISO 717 (términos de adaptación de espectro $D_{nT,w}+C_{tr}$ para la protección al ruido aéreo y $L'_{nT,w}+C_I$ para ruido de impacto).

- Nuevos requerimientos para el Índice de aislamiento al ruido aéreo específicos para muros interiores y forjados, comparables con ensayos de laboratorio.
- Inclusión de requerimientos de aislamiento acústico en fachadas para la protección al ruido aéreo.
- Nuevos requerimientos para el control de la reverberación en los espacios interiores de los edificios.
- Inclusión de requerimientos de aislamiento acústico entre aulas en escuelas y la protección al ruido exterior.

Estas modificaciones han sido incorporadas después de un análisis del estado de construcción de edificios nuevos y también de los existentes así como las estadísticas de quejas de vecinos por molestias de ruido.

Los valores mínimos de aislamiento acústico exigible entre viviendas en diferentes Estados de la Unión Europea pueden ser comparables mediante el término de índice global de reducción acústica R_w . En el cuadro comparativo (Fig.5.10) se describen los valores exigidos en algunos países de la zona Europea. Esta referencia se toma de manera informativa sobre la reglamentación acústica aplicada.

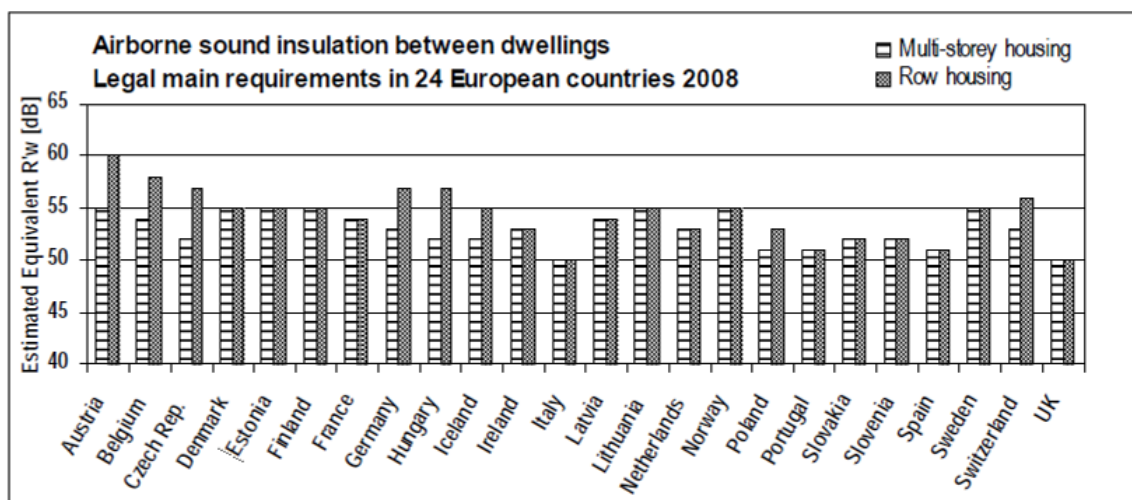


Fig.5. 10 Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo. Tabla resumen de exigencia en los diferentes países. Los valores de UK corresponden a Inglaterra y Gales. (B27)

Por lo que respecta a los niveles de protección frente al ruido exterior, la nomenclatura también varía entre Estados. En Portugal se establecen unos valores mínimos fijos dependiendo del tipo de edificio o de la clasificación de la zona urbana en rangos cualitativos como “tranquilo” o “muy ruidoso”; en

Suecia, se usan los índices L_p y L_{eq} que representan el nivel máximo instantáneo y equivalente como referencia del ruido exterior. En Francia, la normativa *La Nouvelle Réglementation Acoustique (NRA)* establece una clasificación de 1 a 5 de los niveles mínimos de aislamiento acústico en función del nivel de ruido exterior.

Categorie	Niveau sonore environnant	Isolation minimum en façade
1	+ de 81 dB	45 dB
2	entre 76 et 81 dB	42 dB
3	entre 70 et 76 dB	38 dB
4	entre 65 et 70 dB	35 dB
5	entre 60 et 65 dB	30 dB

Fig.5. 11 Reglamentación acústica en Francia para fachada (A10)

Desde el año 2000 la normativa en Francia ha tenido sucesivas adaptaciones siguiendo las normativas internacionales de mediciones acústicas normalizadas, especialmente con respecto al rendimiento de los productos de construcción y el control de la evaluación en los índices de aislamiento obtenidos. En 2003 entró en vigor una clasificación específica para escuelas, hospitales y hoteles. El documento *Reglementation Acoustique. Les changements de l'an 2000* [19] recoge los cambios de la normativa anterior con respecto a las nuevas modificaciones mediante unas tablas informativas comparativas:

	Bruits aériens		Bruits de choc	
	Ancien	Nouveau	Ancien	Nouveau
Indice	D_{nAT}	$D_{nT,A}$ $D_{nT,A,tr}$	L_{nAT}	$L'_{nT,w}$
Équivalence	$D_{nT,A} \approx$ $D_{nT,A,tr} \approx$	$D_{nAT} - 1$ D_{nAT}	pas d'équivalence	
Nom	Isolement acoustique normalisé	Isolement acoustique standardisé pondéré	Niveau de pression acoustique normalisé	Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé
Unité	$dB(A)_{rose}$ $dB(A)_{route}$	dB	dB(A)	dB

	Bruits aériens		Bruits de choc	
	Ancien	Nouveau	Ancien	Nouveau
Indice	R_{rose} R_{route}	$R_w(C; Ctr)$ $R_A = R_w + C$ $R_{A, tr} = R_w + C_{tr}$	ΔL	ΔL_w
Équivalence	R_A $R_{A, tr}$	$R_{rose} - 1$ R_{route}	pas d'équivalence	
Nom	Indice d'affaiblissement acoustique	Indice d'affaiblissement acoustique pondéré	Efficacité aux bruits de choc	Réduction du niveau de bruit de choc pondéré
Unité	$dB(A)_{rose}$ $dB(A)_{route}$	dB	dB(A)	dB

Fig.5.12 Terminología de medición de aislamiento en Francia. Cambios de terminología entre la normativa acústica anterior y la nueva en Francia a partir de 2000. La tabla de arriba corresponde a las mediciones de aislamiento in-situ en los edificios y la de abajo a las mediciones realizadas en laboratorio (A10)

En Alemania, el aislamiento acústico exterior-interior, como ya sucede en la mayoría de países de la Unión Europea, depende de los niveles de presión sonora existentes en el exterior del edificio (ruido urbano).

External measured noise in A-weighted sound pressure levels	Façade isolation
Up to 55 dB	30 dB
56 to 60 dB	30 dB
61 to 65 dB	35 dB
66 to 70 dB	40 dB
71 to 75 dB	45 dB
76 to 80 dB	50 dB
Above 80 dB	Needs a special study

Fig.5.13 Tabla de valores de aislamiento acústico en fachadas. La medición exterior está dada niveles de presión sonora ponderados "A" (B28)

En algunos Estados de la UE ya se definen escalas de clasificación de la calidad acústica; por ejemplo en varios de los países nórdicos se establece una clasificación similar que varía de 1 a 5 posiciones (A,B,C,D y E) en edificios residenciales, donde la posición "A" es la más exigente.

Los criterios de clasificación para el nivel de aislamiento acústico de las viviendas han sido desarrollados en los años 90's del S XX en las normas (INSTA-B); sin embargo, algunos de los criterios contenidos en esta norma han sido desarrollados de forma diferente en cada Estado por los

comités correspondientes de estandarización. La siguiente tabla (Fig. 5.14) muestra información sobre los códigos nacionales, el año de publicación, la clasificación de exigencias y la clasificación para viviendas, nuevas o renovadas, en los Estados de Dinamarca (DK), Finlandia (FI), Islandia (IS), Noruega (NO) y Suecia (SE).

Country	Class denotations ⁽¹⁾	Year of publication	CS Reference (latest version)	BC	Link BC to CS	BC Reference to CS	Classes for new buildings	Classes for "old" buildings
DK	A/B/C/D	2001/2007	DS 490 (2007) [1]	2010 [7]	+	Class C	A, B, C	D
FI	A/B/C/D	2004	SFS 5907 (2004) [2]	1998 [8]	-	None (2)	A, B, C	D
IS	A/B/C/D	2003/2011	IST 45 (2011) [3]	2012 [9]	+	Class C	A, B, C	D
NO	A/B/C/D	1997/2005/2008	NS 8175 (2008) [4]	2010 [10]	+	Class C	A, B, C	D
SE	A/B/C/D	1996/1998/2004	SS 25267 (2004) [5]	2012 [11]	+	Class C	A, B, C	D

Abreviaciones BC = "Building Code" (Regulación de requerimientos); CS = Esquema de clasificación

(1) La clasificación está indicada en orden ascendente. La mejor es la primera.

(2) La regulación especifica los mismos límites que la clase C

Fig.5.14 Clasificación de exigencias de aislamiento acústico. Esquema de clasificación de exigencias de aislamiento en viviendas nuevas y usadas año 2012 (B29)

Este criterio de clasificación está definido exclusivamente para el aislamiento acústico al ruido aéreo entre viviendas proveniente de otras viviendas o espacios comunes del edificio; los valores son bastantes similares variando muy poco entre Estados; solo en Suecia el criterio mínimo está 1 ó 2 dB por debajo. Por lo que se refiere al ruido de impacto hay más diferencias porque en algunos casos se tiene en cuenta el tipo de construcción y en algunos Estados como Noruega y Suecia se tienen en cuenta limitaciones de volumen (Fig.5.15).

Airborne sound insulation between dwellings - Main class criteria in dB Status March 2012							
Country		Class A	Class B	Class C	Class D	Comments	BC reference to CS
DK	[1]	$R'_w + C_{50-3150} \geq 63$	$R'_w + C_{50-3150} \geq 58$	$R'_w \geq 55$	$R'_w \geq 50$		Class C
FI	[2]	$R'_w + C_{50-3150} \geq 63$	$R'_w + C_{50-3150} \geq 58$	$R'_w \geq 55$	$R'_w \geq 49$		None (BC = Class C)
IS	[3]	$R'_w + C_{50-3150} \geq 63$	$R'_w + C_{50-3150} \geq 58$	$R'_w \geq 55^{(1)}$	$R'_w \geq 50$		Class C
NO	[4]	$R'_w + C_{50-5000} \geq 63$	$R'_w + C_{50-5000} \geq 58$	$R'_w \geq 55^{(1)}$	$R'_w \geq 50$		Class C
SE	[5]	$R'_w + C_{50-3150} \geq 61$	$R'_w + C_{50-3150} \geq 57$	$R'_w + C_{50-3150} \geq 53$	$R'_w \geq 49$	Volume limitations apply, cf. [5], 3.1.	Class C

(1) Use of $C_{50-3150/5000}$ is recommended also in Class C. If applied, the limit values may be reduced by 2 dB

Fig.5.15 Tabla de valores de aislamiento al ruido aéreo exigido en países nórdicos de Europa (B15)

Las exigencias de aislamiento acústico son mayores para las viviendas nuevas, proporcionando para este caso 3 escalas de valores de aislamiento exigibles denominados con letras, donde "C" es la

clasificación mínima; para las viviendas antiguas objeto de renovación la exigencia es más flexible con la categoría “D”.

En la publicación *Sound Classification of Dwellings in the Nordic Countries- Differences and similarities between the five national schemes*, la autora Birgit Rasmussen [20] compara las diferencias de las normativas de aislamiento acústico entre varios Estados de Europa. El siguiente cuadro comparativo (Fig.5.16), muestra los niveles de presión sonora máximos permitidos en el interior de una vivienda; los valores varían según el criterio de aplicación en cada país: nivel equivalente, nivel día, nivel noche, etc.

Nordic schemes - Main class criteria for traffic noise levels in living rooms – March 2012								
Country with indication of reference	Required performance for quality levels (1), [dB]						Comments	
	Descriptor	Class A	Class B	Class C	Class D	Details		
DK	[1]	$L_{Aeq,24h}$ (indoor)	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35	[1] Table 5a	For classification, either Table 5a or 5b can be used. Sum of all traffic sources. For regulations, see note (3).
		L_{den} (indoor)	≤ 23	≤ 28	≤ 33	≤ 38	[1] Table 5b	
		L_{night} (indoor)	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	Night 22-07	
FI	[2]	$L_{Aeq, 07-22}$ (indoor)	≤ 25	≤ 30	≤ 35	≤ 35		5 dB higher limits apply for kitchen
		$L_{Aeq, 22-07}$ (indoor)	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 30		
IS	[3]	$L_{p,Aeq,24h}$ (indoor)	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35		5 dB higher limits apply for kitchen
		$L_{p,Amax, 23-07}$ (indoor)	≤ 35	≤ 40	≤ 45	None	See note (2)	
NO	[4]	$L_{p,Aeq,24h}$ (indoor)	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35		Limits for $L_{p,AFmax}$ apply to sleeping rooms only.
		$L_{p,AFmax, 23-07}$ (indoor)	≤ 35	≤ 40	≤ 45	≤ 50	See note (2)	
SE	[5]	$L_{p,Aeq,24h}$ (indoor)	≤ 22	≤ 26	≤ 30	≤ 34		Higher limits apply for kitchen
		$L_{p,AFmax, 22-06}$ (indoor)	≤ 37	≤ 41	≤ 45	≤ 49	See note (2)	

Nota:

(1) Los criterios y definiciones son tomados de varios artículos, referenciados en esta publicación.
 (2) Islandia y Noruega: tienen ≥ 10 eventos, no eventos individuales; Suecia: No se miden más de 3 momentos por media en el nivel noche.
 (3) Dinamarca: nivel día 07-19h (por defecto), nivel tarde noche 19-22, nivel noche 22-07
 El código de la edificación de Dinamarca (*The Danish Building Code*) hace referencia a L_{den} como el valor único límite, válido tráfico rodado y trenes separadamente.

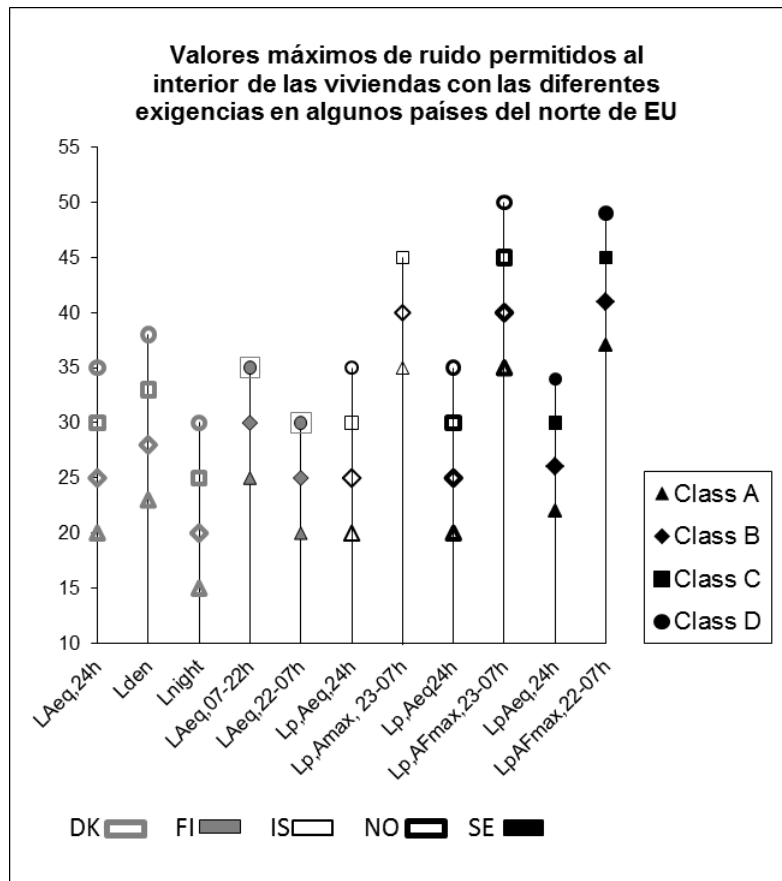
Fig.5.16 Clasificación de exigencias de aislamiento en diferentes países. Tabla comparativa entre diferentes países que usan la clasificación de exigencia de aislamiento acústico. Valores de presión sonora máximos, permitidos al interior de la vivienda (B29)

Se observan más diferencias entre las normativas Estatales por lo que se refiere a los niveles de presión sonora máximos permitidos en el interior de la vivienda que en las exigencias de aislamiento acústico entre viviendas.

En la siguiente gráfica (Graph 5.1) se expresan las variaciones entre los diferentes valores y exigencias de las clasificaciones A, B, C y D de los países comparados en la figura anterior (Fig.5.16)

Se observa que la clasificación A (más exigente, par obra nueva) no sobre pasa los 25dB excepto en Islandia y Noruega que se permite hasta 35dB en la franja noche. En la clasificación D (edificios

antiguos y de renovación) no sobre pasa los 35dB como valor máximo exigido, excepto en Noruega y Suecia de 50 y 49dB respectivamente en la franja noche.



Graph 5. 1 Variación de exigencias por clasificación de los países comparados. Análisis Fig. 3.16 En la barra horizontal, se expresan los niveles de medición utilizados para la obtención de valores de exigencia en los diferentes países. (D')

Hasta el año 2008, nueve Estados de Europa utilizaban esquemas de clasificación del nivel de exigencia en su reglamentación acústica: Dinamarca, Noruega, Suecia, Finlandia, Islandia, Alemania, Francia, Holanda y Lituania, con variaciones particulares según el texto normativo de cada uno. En otros países de la zona Europea, se especifican valores de aislamiento mínimos entre viviendas pero no una clasificación de dicha exigencia en categorías.

La normativa española por ejemplo define un valor mínimo de aislamiento al ruido aéreo en $D_{nT,A}$ entre espacios colindantes, vertical u horizontalmente, que no pertenecen a la misma unidad de uso (estancias comunitarias) siempre que no compartan puertas y ventanas, si comparten puertas y ventanas, el valor mínimo es más exigente,

La investigación y reglamentación en temas de protección acústica en la edificación en la zona de Europa, ha ido evolucionando hacia la unificación de los criterios de exigencia con la ayuda de

proyectos de cooperación como los auspiciados por **COST European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research**. Se ha publicado también el documento (END)2002/49/EU *Environmental Noise Directive* que potencia la elaboración de mapas de ruido con los niveles de presión sonora exterior producidos por el tráfico rodado, el tráfico ferroviario y el de la industria.

Programas específicos como **COST Action TU0901 Integrating and harmonising sound insulation aspects in sustainable urban housing constructions**, han llevado a cabo investigaciones y transferencias de conocimiento en temas de compilación de datos sobre soluciones acústicas típicas y de alto rendimiento; así mismo sobre evaluación psicoacústica, considerando la opinión de la comunidad de usuarios y vecinos acerca de la calidad acústica de las edificaciones y de las zonas de espacio público. En este proyecto también participan delegados de otros países que no hacen parte de la Unión Europea como Nueva Zelanda.

En la normativa acústica en otros Estados no europeos, como por ejemplo en Australia y Nueva Zelanda, los valores del aislamiento acústico de referencia se expresan en R_w , de forma similar al *STC Sound Transmission class* ASTM E-413, término de medición del comportamiento acústico de un elemento en laboratorio; también se usa el término $D_{nT,w}$ para las mediciones realizadas in-situ.

El (ABCB) *Australian Building Codes Board* en su documento *Guideline Document on Sound Insulation in Buildings 2004* proporciona una clasificación de la exigencia acústica dependiendo del tipo de edificio y de construcción, definidos en:

Volumen uno, Parte F5

Class 2 buildings Edificios que contienen una o más unidades de usos separadas, bloques residenciales.

Class 3 buildings Edificios diferentes a vivienda, ejemplo (hotel, motel, etc.).

Class 9c buildings Edificio de conservación arquitectónica

Volumen dos, Partes 2.4 y 3.8.6

Class 1 buildings Viviendas individuales o adosadas mediante muros medianeros de protección contra incendios (en línea), así como casas pequeñas.

Class	Requirement	Verification
Class 1	$R_w + C_{tr} \geq 50$	$D_{nT,w} + C_{tr} \geq 45$
Class 2	$R_w + C_{tr} \geq 50$	$D_{nT,w} + C_{tr} \geq 45$

Fig.5.17 Requerimientos de aislamiento acústico en Australia (B30)

Para la validación del aislamiento acústico en casos específicos, este documento afirma que es posible hacerlo mediante prescripciones de rendimiento obtenidas por:

- ensayos de laboratorio
- verificación de métodos de ensayo in situ
- juicio de expertos
- comparación con sistemas de alto rendimiento
- la validación de prueba de aptitud.

Este documento también proporciona pautas de buenas prácticas; por ejemplo en el diseño inicial de los espacios habitables tener en cuenta la ubicación de las áreas más sensibles a la exposición al ruido, como los dormitorios, procurando que no se encuentren cerca de las áreas de servicios.

En la regulación de Canadá, el documento *National Building Code* desarrollado por *The National Research Council* se limita a establecer el valor de aislamiento mínimo $STC > 50\text{dB}$ entre viviendas y 55dB cerca de los ascensores.

En cuanto a las aberturas en los elementos constructivos, como ventanas y puertas, cada Estado tiene su propia legislación; en Francia, por ejemplo, se fijan unos valores mínimos orientativos previamente establecidos para diferentes tipos de carpintería. El comportamiento y estanqueidad de los elementos de carpintería frente a la protección acústica depende en gran manera de la selección de los materiales constituyentes y de la tipología de la abertura. Recalca el uso de bandas elastómeras en los bordes de cierre, por donde puede fallar la estanqueidad al aire lo que difícilmente permitirá alcanzar un aislamiento $> 30\text{dB}$.

La norma francesa establece unos valores mínimos para el índice R_A para cada categoría de clasificación para el vidrio de la ventana, valores según CEKAL (43).

(43) CEKAL organización de certificación de vidrios aislantes <http://www.cekal.com/>

Clase AR	I	II	III	IV	V	VI
Indice $R_{A,Tr}$ minimum du vitrage en dB	25	28	31	33	35	37

	Épaisseur mm	Poids kg/m ²	Classe CEKAL	R_w dB	$R_{A,Tr}$ dB
Simple vitrage	4	10		30	27
	5	12,5	.	30	28
	6	15	.	31	29
	8	20	.	32	30
	10	25	.	33	31
	12	30	.	34	32
Double vitrage	4(6)4	20	I	30	27
	4(8)4	20	I	30	27
	4(12)4	20	I	30	27
	5(12)5	25	II	32	28
	6(12)6	30	II	33	30
8(10)8	40	III	34	31	
Double vitrage acoustique	4(6)6	25	II	34	30
	4(6)8	30	III	35	31
	4(6)10	35	III	35	32
	8*(12)8	40,5	V	40	35
	8*(12)10	45,5	VI	41	37
	8*(20)11*	48	VI	47	40

Fig.5. 18 Tablas de clasificación de carpintería en la normativa acústica Francesa. Arriba, escala de clasificación del 1 al 6 del índice de reducción sonora obtenida de varios tipos de cristal, siendo VI la mejor clasificación. Abajo rendimientos de diferentes configuraciones de ventana (A10)

Hasta ahora se ha hecho un recorrido sobre la regularización en la protección al ruido exterior y las exigencias tanto para fachada como para estancias de recintos independientes mostrando casos de diferentes países, en ninguna de las normativas hasta ahora presentadas se abordan claramente valores de exigencia para los sistemas de fachada ventilada. La (FVL) como otros sistemas similares, al no estar contemplados dentro de las soluciones de cerramiento convencional (muros simples o dobles de albañilería o paneles de concreto) a fin de demostrar su funcionamiento y efectividad, deben recurrir a otro tipo de certificaciones.

5.2.1 Certificaciones Europeas como mecanismo de regularización de la (FVL)

En cuanto a la regulación acústica de los sistemas de fachadas ventiladas y ligeras ventiladas, las normativas no están tan concretamente definidas ya que depende de muchos más factores y los valores de referencia pueden variar ostensiblemente.

Regulaciones y certificaciones cuando una obra o un organismo lo requieran, existen documentos de aprobación del uso de un producto o un sistema constructivo innovador o singular que no esté

considerado en las normativas, debido a que es un producto nuevo o es un sistema de novedosa aplicación.

Estos documentos están definidos como (ETA) *European Technical Approval* en inglés y (DITE) Documento de Idoneidad Técnica en español. A partir del 01 de Julio de 2013(44), se han establecido estos documentos como esquema único de evaluación de la fachada ligera ventilada.

Las exigencias genéricas para este tipo de documentos de evaluación están establecidas en el espacio Europeo por la organización (EOTA) *European Organisation for Technical Approvals*. Los documentos (ETAG) *Guidelines for European Technical Approval* proporcionan los ítems de evaluación y cumplimiento requeridos para un producto o sistema puesto en obra; por ejemplo el (ETAG-034) *Kits for external wall claddings* está destinado a regular en varios aspectos la evaluación del funcionamiento de los *kits* (componentes) de fachada ligera ventilada; una vez puestos en obra pasan a ser sistemas constructivos, cuyo documento de aprobación es el denominado (CUAP) *Common Understanding of Assessment Procedure*.

En su última versión recientemente aprobada, el (ETAG-034) está dividido en 2 partes:

Parte 1: *Kits* de fachada ventilada formados por elementos de revestimiento y los dispositivos asociados de fijación.

Parte 2: *Kits* de revestimiento de fachada formados por elementos de revestimiento, dispositivos asociados de fijación, subestructura y una capa opcional de aislamiento térmico.

El requerimiento de protección acústica al ruido exterior se denomina **ER5**, y en el capítulo 6. *Evaluación del comportamiento de uso*, el apartado 6.5, se refiere específicamente a la protección contra el ruido. Los puntos ER5 y 6.5 no son relevantes en la parte 1 del documento.

En la parte 2 del documento ETAG-034, se determina que el *kit de fachada* debe garantizar la protección y el comportamiento acústico, manteniendo bajos los niveles de presión sonora en el interior del edificio. El muro base (hoja interior) y la hoja exterior deben ser diseñados conociendo los requerimientos de comportamiento acústico establecidos para cada proyecto.

El aislamiento acústico de la fachada se determina en función del diseño y la instalación del *ki*, y se evalúa siguiendo la normativa EN-ISO 10140 *Medición en laboratorio de aislamiento acústico de los elementos de construcción* y EN-ISO 717 *Evaluación del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción* cuando una fachada es de al menos 4m².

(44)<http://www.itec.es/certificacion/pdf/presentacioncpr.pdf>

La evaluación precisa del aislamiento acústico de una fachada ligera ventilada solo es posible si se realizan ensayos de laboratorio conjuntos de todos los componentes de la fachada ligera ventilada, incluyendo los sistemas de fijación. En el resultado final influyen aspectos como la rigidez dinámica del material aislante, la masa por m² del material de revestimiento (hoja exterior) y el tipo de elementos de fijación de la subestructura. Se utiliza el término de (R_w) para categorizar el aislamiento acústico obtenido pero no se determinan los valores de cumplimiento, que deben ser objeto de las normas estatales.

En Europa cada país tiene su propio sistema de Certificación de Aprobación Técnica, que debe ser compatible con la reglamentación general europea. En el Reino Unido, por ejemplo, en el documento CWCT/2.19 publicado por el *Center for Window and Cladding Technology*. Esta organización edita y colabora en la regulación de los (BS) *British Standards* de los sistemas de fachada por medio de guías. El aislamiento acústico en estos sistemas de fachada ligera ventilada (denominada también en este caso como *rainscreens*) está especificado en las cláusulas H92/460 (transmisión del ruido interior y exterior), H92/465 (transmisión a través de juntas de forjados colindantes con la fachada ligera ventilada) y H92/470 (transmisión entre locales colindantes con la fachada ligera ventilada), donde se limitan los valores mínimos del índice de reducción acústica.

La siguiente gráfica esquematiza el recorrido y procedimiento de aprobación, en términos de normativa acústica europea, para este sistema (Fig.5. 19).

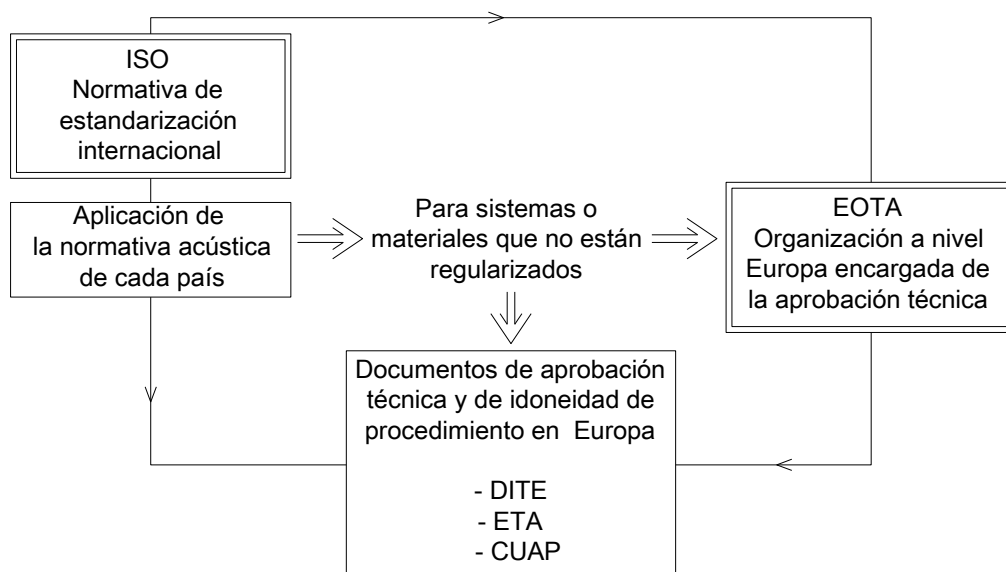


Fig.5. 19 Esquema de aplicación normativa a la (FVL). síntesis de la normativa de protección acústica dentro del espacio Europeo (D)

5.3 Comentarios

El desarrollo de la reglamentación acústica es propio de cada Estado donde se define y pone en práctica y existen diferentes variables de aplicación y casos concretos locales. Sin embargo, revisar a nivel comparativo como se desarrollan las normativas en distintos Estados, proporciona una visión global de buenas prácticas y ejemplos de aplicación.

En España, el documento básico de protección al ruido DB-HR del Código Técnico de la Edificación está desarrollado de forma amplia para el tratamiento del aislamiento acústico en la edificación, determinando valores mínimos. Las posibilidades que ofrecen las diferentes soluciones constructivas se desarrollan en la Guía del catálogo de elementos de construcción del CTE, en donde se hallan algunos ejemplos de la (FVL).

En algunos Estados se ha empezado a diferenciar entre los edificios nuevos y los antiguos a rehabilitar a la hora de establecer las exigencias; ello abre la posibilidad de mejoras en las soluciones adoptables, en aspectos como: el análisis de la calidad acústica de las construcciones existentes, la sensibilidad frente al valor de la calidad sonora de un ambiente, la caracterización de sistemas y materiales adecuados para propuestas de mejora.

Los próximos avances se producirán en el desarrollo o ampliación de guías que puedan orientar en la aplicación de las mejoras de protección y aislamiento acústico, teniendo en cuenta las diferencias existentes entre tipologías arquitectónicas y constructivas de edificios. La normativa aparte de determinar valores mínimos, también debería ser un aporte de mejoramiento y buenas prácticas.

En cuanto a la regularización de la (FVL), hasta ahora en la documentación encontrada sobre normativa acústica tanto de fachadas y ruido exterior como entre viviendas, en los diferentes casos y países estudiados, no se contempla ampliamente el comportamiento acústico de la (FVL) y no se encontraron valores de exigencia mínimos, esto puede deberse a que la (FVL) se ve como un revestimiento que depende principalmente del muro base (al que se aplica) , por otro lado el hecho de que el sistema esté abierto para la ventilación se menosprecia su capacidad de mejora sin ahondar en la demostración de su actuación. Así mismo analizando las normativas encontradas en los diferentes países estudiados, los niveles de aislamiento exigidos para fachada y estancias interiores depende mayormente del nivel de exposición de ruido exterior, por lo que dependiendo de la zona o país, los valores varían, sin embargo a través de algunas mediciones acústicas realizadas de la tipología de (FVL) elegida para la investigación de esta tesis , se han obtenido niveles de aislamiento $R = >50\text{dB}$, valores que superan las exigencias de la regularización para fachadas en las normativas consultadas de los diferentes países.

Por otro lado, como se indica en el último apartado, la regularización de la (FVL) debe tomar el camino de las certificaciones, las cuales normalmente se destacan más en temas estructurales y de configuración y en contados casos la térmica sin mencionar el aspecto acústico de cumplimiento o de exigencia. Solo algunos de los fabricantes indican valores de mejora pero no hacen parte de la certificación.

La regularización acústica de la (FVL) tiene la complejidad de que puede presentar particularidades como: cuales son las características del muro base y cuales las del sistema ligero en si utilizado, sin embargo al menos en obra nueva es posible conocer las características de los elementos de configuración de la (FVL) y mediante ensayos de laboratorio e in-situ es posible la obtención de valores globales que permitan conocer su comportamiento y valores de exigencia determinados por la instalación del sistema elegido.

5.4 Fuentes y referencias capítulo 5

Codificación de fuentes y referencias
Fuente A: Libro
Fuente B : Artículo (publicación, paper, congreso, etc)
Fuente C: Internet
Fuente D: Elaboración propia de Andrea Niampira Daza
Fuente D': Elaboración propia en base a resultados o varias consultas
Fuente E: Tesis
Fuente F: Ensayos acústicos

A8: Documento Básico de protección frente al ruido de la normativa española Código Técnico de la Edificación DB-HR del CTE (España2009)

A9: Catálogo de elementos constructivos del CTE (España 2010)

A10: [19] Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement “*Reglementation acoustique. Les changements de l'an 2000*” Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction. Con la participación del (CSTB) *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, Francia 2000.

B25: Rasmussen Birgit “*Facade sound insulation comfort criteria in Eropean classification schemes for dwellings*”. Euronoise 2006 (Tampere, Finlandia).

B26: A.P Oliveira Carvalho, J Amorim Faria “Acoustic Regulation in European Union Countries”, Conference in Building Acoustics, Acoustic Performance of Medium-Rise Timber Buildings Dublin (Irlanda Diciembre de 1998)

B27: Rasmussen Birgit. Sound classification schemes in Europe-Quality classes intended for renovated housing. Programa Action TU0701 (EU 2010)

B28: *Noise Control Engineering Journal* . Publicación Vol. 50, No.2, pg.60 Abril-Marzo de 2002

B29: [20] “*Rasmussen Birgit. Sound Classification of Dwellings in the Nordic Countries-Differences and similarities between the five national schemes*”. BNAM2012 Join-Baltic-Nordic Acoustic Meeting Odense, (Dinamarca Junio de 2012)

B30: Mahn Jeffrey, Davy John L, Pears John *The Acoustic Requirements of Dwellings in New Zealand*. Forum Acusticum, Aalborg (Dinamarca 2011)

Listado de figuras y gráficas capítulo 5

Fig.5. 1 Ejemplo de un mapa de ruido. (B25)	220
Fig.5.2 Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo del CTE. (A8).....	223
Fig.5. 3 Elementos de separación entre recintos DB-HR (A8).....	224
Fig.5. 4 Parámetros del índice de reducción sonora R _{Atr} de la fachada. (A8)	225
Fig.5. 5 Tabla de parámetros acústicos de los componentes de los elementos de separaciones verticales. (A8)	227
Fig.5.6 Aspecto acústico de revestimientos hoja interior maciza. (A9).....	230
Fig.5.7 Aspecto acústico revestimientos hoja interior ligera. (A9).....	231
Fig.5. 8 Aspecto acústico entramado de madera. (A9).....	233
Fig.5. 9 Nomenclatura Acústica. (B26)	235
Fig.5. 10 Valores de aislamiento acústico al ruido aéreo. (B27)	236
Fig.5. 11 Reglamentación acústica en Francia para fachada (A10).....	237
Fig.5.12 Terminología de medición de aislamiento en Francia. (A10).....	238
Fig.5.13 Tabla de valores de aislamiento acústico en fachadas. (B28).....	238
Fig.5.14 Clasificación de exigencias de aislamiento acústico. (B29).....	239
Fig.5.15 Tabla de valores de aislamiento al ruido aéreo exigido en países nórdicos de Europa (B15)	239
Fig.5.16 Clasificación de exigencias de aislamiento en diferentes países. (B29).....	240
Fig.5.17 Requerimientos de aislamiento acústico en Australia (B30).....	242
Fig.5. 18 Tablas de clasificación de carpintería en la normativa acústica Francesa. (A10).....	244
Fig.5. 19 Esquema de aplicación normativa a la (FVL). (D)	246
Graph 5. 1 Variación de exigencias por clasificación de los países comparados. (D')	241

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES FINALES

6. CONCLUSIONES FINALES

En la realización de ésta tesis se ha profundizado en el conocimiento del comportamiento acústico de una fachada ventilada con revestimiento ligero con cámara de aire intermedia (FVL); enfocándose principalmente en las diversas configuraciones y condiciones de apertura de la cámara de aire intermedia que pueden influir en dicho comportamiento y que son variables significativas en los proyectos de edificación.

En la primera parte de la tesis se ha realizado una clasificación de las tipologías de (FVL) más comunes usadas comercialmente y de los elementos que la componen, encontrando que hay una gran variedad de sistemas de fijación y de materiales que proporcionan flexibilidad y adaptabilidad de aplicación para fachadas, esta variedad representa una ventaja de utilización en obra y es compatible con el mejoramiento del aislamiento acústico en los edificios; teniendo en cuenta que aunque los elementos pueden ser de diversos materiales y estilos de fijación, dependiendo de la actuación que se le de a los componentes en común como la definición de la cámara de aire intermedia con la inclusión de un material acústicamente absorbente y la disposición de la hoja exterior, el rendimiento puede ser diferente por ejemplo:

- En la cámara de aire intermedia, el tamaño y el espesor, determinan que ésta sea ventilada o no, la diferentes normativas consultadas sobre las condiciones de ventilación de una pared doble incluida la (FVL) consideran que la ventilación mínima de una cámara de aire intermedia se puede obtener con espesores de cámara de mínimo 2cm con áreas de ventilación de 500cm² por cada metro lineal de fachada situadas en la parte inferior y superior de la fachada, de 3 a 10cm con un área efectiva mínima de 120cm³ por cada 10m² de superficie repartida al 50% en la parte inferior y superior de la superficie de fachada y en el caso concreto de la (FVL), espesores de entre 2 y 4cm cuando las juntas de la hoja exterior están abiertas.

-Características de la capa de aislamiento incluida en la cámara de aire intermedia, (la cual puede ser acústicamente absorbente). En los sistemas de (FVL) se plantea la adición de ésta capa en la cara exterior del edificio (muro base), la cual puede ser de diferente composición física y de diferentes materiales, con morfologías como paneles rígidos y semirígidos o mantas flexibles cumpliendo con el requisito de aislamiento a grandes rasgos con espesores de 3 a 6cm y de 8 a 10cm (estos últimos espesores son utilizados mayormente en los sistemas de tratamiento exterior (SATE) ó (ETICS)). Para mejora del rendimiento acústico de la (FVL) en este aspecto, se debe tener en cuenta que los materiales sean porosos o fibrosos de cavidad abierta, los cuales proporcionan mejor absorción del sonido, su contribución al aislamiento acústico del conjunto es mejor cuanto mayor densidad superficial tengan sin importar demasiado el espesor de la capa. Los materiales que mejor se adaptan a

esta condición son los materiales fibrosos tipo lana de roca o lana de vidrio u otro tipo de fibra, mientras que los paneles de tipo poliestireno aunque pueden cumplir con los requisitos de aislamiento térmico, a nivel acústico no representan una mejora especialmente.

- La subestructura. Se encuentran diferentes tipos de sistemas de fijación y de materiales dependiendo del tipo de hoja exterior a usar, por ejemplo si se trata de aplacados cerámicos o de piedra, se requieren elementos de mayor masa y rigidez, mientras que para paneles más ligeros como maderas, fibrocementos o sintéticos, la perfilería puede tener menos elementos y ser más ligera. En general entre los sistemas existentes de fijación predominan los de perfiles con escuadras de fijación y rieles, con materiales como madera y metal. Respecto a su contribución en la mejora acústica en conjunto de la (FVL) se deben evitar en lo posible puentes acústicos a través de las conexiones entre la hoja interior y la hoja exterior ya que producen transmisiones de sonido directas entre las superficies y pueden aumentar los problemas de resonancia al interior de la cámara de aire intermedia, esta situación puede ser menor si se tienen fijaciones de tipo puntual sin embargo esta solución puede ser de compleja aplicación ya que depende del condicionamiento de montaje requerido en cada tipo de (FVL), por otro lado varios fabricantes de sistemas de fijación tienen en cuenta soluciones como el uso de perfiles perforados o de toques de materiales elásticos en las fijaciones para evitar problemas de transmisión del sonido.

- La hoja exterior ligera, pudiendo ser de diferentes formas y materiales, en lo que nos compete la ventilación y el mejoramiento de aislamiento acústico de la (FVL), su influencia se da mediante la disposición de los elementos de composición paneles y lamas por ejemplo y si tiene juntas abiertas o cerradas para el cumplimiento de la condición de ventilación, en el caso de juntas abiertas se define la ventilación con espesores de 0.3 a 0.5cm como mínimo entre paneles y en el caso de la hoja continua con juntas cerradas entre paneles, su influencia se da dependiendo de la superficie de apertura para la ventilación del conjunto la cual determina su actuación.

A lo largo de la tesis se ha ponderado la (FVL) como solución idónea para la rehabilitación de fachadas antiguas conformadas por muros simples de albañilería. Aunque la renovación estética y térmica son las que desencadenan habitualmente los procesos de renovación de fachadas, el incremento de confort acústico puede ser un valor añadido. Sin embargo los resultados acústicos de la (FVL) no dependen solamente de sus características sino también de con que clase de muro inicial se cuenta, cual es su composición y que valores de aislamiento acústico presenta por sí solo antes de la intervención.

El aislamiento acústico en los elementos simples de cerramiento sigue principalmente el comportamiento de la ley de masas: a mayor masa superficial, mejor comportamiento de aislamiento acústico; sin embargo se conoce que por el carácter logarítmico de esta ley, al doblar la masa

superficial del cerramiento, el incremento obtenido de aislamiento no dobla su valor; he aquí una oportunidad para la implantación de cerramientos dobles los cuales pueden ofrecer soluciones aceptables sin un incremento de peso notable. Los cerramientos dobles para fachada consisten en dos hojas separadas por una cámara de aire intermedia no ventilada (de diferentes características de hoja, espesor y la adición de un material acústicamente absorbente) con las cuales es posible obtener mejores resultados en el rendimiento de aislamiento acústico que los cerramientos simples con la misma densidad superficial. Esta constatación constituye una gran oportunidad para el desarrollo de la implantación de la (FVL) sin embargo en la mayor parte de los casos, la cámara de aire intermedia del sistema, presenta una ventilación para atender sus exigencias de barrera a la lluvia y a la radiación solar, esta necesaria ventilación (solo frente a la lluvia y a radiación de la fachada) ha impedido hasta ahora que la normativa de España (CTE) Código Técnico de la Edificación considere su contribución al aislamiento acústico del conjunto.

En el marco de la normativa actual en España para la edificación, el (CTE), el documento de soporte (*Catálogo de elementos constructivos del CTE*) aporta unos valores globales de aislamiento acústico obtenibles con el uso de revestimientos ligeros en fachadas ventiladas con valores meramente orientativos y no reconocidos en el DB-HR (*Documento Básico de protección frente al ruido del CTE*) a la (FVL) como un sistema de mejora del aislamiento acústico de una fachada. Esto principalmente es así porque la (FVL) se considera una solución de revestimiento, que tiene una cámara de aire intermedia ventilada. En los requerimientos de aislamiento, cuando se trata del uso de revestimientos ligeros para fachada como es el caso de la (FVL) se aclara que las aportaciones de mejora dependen principalmente de la hoja interior con unos valores determinados de densidad superficial; sin embargo, inicialmente en investigaciones realizadas se ha comprobado que los valores de aislamiento acústico que pueden llegar a obtenerse con la (FVL) sobre pasan los valores de requerimiento mínimo (43dB para fachadas).

Respecto a la regularización acústica de la (FVL), en las normativas consultadas de varios países dentro y fuera del espacio Europeo se encontraron valores mínimos de (R) exigidos para el aislamiento acústico al ruido aéreo exterior en el caso de fachadas y valores mínimos entre unidades privadas dentro de edificios y medianeras, donde los valores mínimos de requerimiento varían según la normativa de cada país, por ejemplo en el caso de países del norte de Europa y de Oceanía tienen un sistema de clasificación de exigencias para los edificios dependiendo del año de construcción o de usos como es el caso de Australia, sin embargo ninguna de éstas normativas se refiere directamente a requisitos de cumplimiento de la (FVL) frente al ruido aéreo exterior, en el caso de la normativa de España el CTE muestra valores de exigencia para particiones verticales y paredes dobles, en el caso de trasdosados los valores mínimos de exigencia están condicionados por su densidad superficial, así mismo cuando se habla de la inclusión de un revestimiento ligero, los valores de exigencia se refieren

directamente a la hoja interior prevaleciendo los valores de densidad superficial de éste elemento como parámetro de obtención de resultados de aislamiento acústico. Los sistemas de revestimiento ligero utilizados para la (FVL) normalmente deben recurrir al cumplimiento de las diferentes normativas mediante los mecanismos de certificación, sin embargo en varios casos el aislamiento acústico no es requerible.

En esta tesis se han realizado diversas mediciones acústicas en casos reales, en laboratorio y mediante la utilización de software específico para el estudio de la (FVL) utilizando siempre la misma configuración que es la propia de un sistema comercial en uso denominado *Aquapanel*, para así facilitar el contraste de los resultados obtenidos en las diversas campañas. No se ha considerado la existencia de ventanas u otras aberturas por lo que los resultados obtenidos y mostrados en esta tesis están relacionados con el comportamiento de la (FVL) sobre la parte opaca de la fachada en donde se han podido alcanzar las siguientes conclusiones:

- El uso de la (FVL) si representa la obtención de un incremento en el aislamiento acústico de un muro pesado de obra de albañilería existente, con valores globales de mejora del índice de reducción acústica (ΔR) de mínimo entre 5dB y 7dB y hasta un máximo de 20dB en algunos rangos de frecuencia (medias altas), más susceptibles en la transmisión del ruido aéreo, para la parte opaca de la fachada.
- Se debe tener en cuenta que cuanto más masa superficial tenga el muro base (muro existente), la mejora obtenida con la solución de (FVL) es menos notoria; por lo que el uso de la (FVL) proporciona mejores efectos de aislamiento acústico en muros simples con poca densidad superficial. Por ejemplo los muros utilizados en: la campaña 1 in-situ se trataba de un muro doble de fábrica de ladrillo de (30cm) de espesor, con una masa superficial de (217kg/m²) y en la campaña 3 de simulación con la herramienta INSUL 7.0 en un muro de hormigón de (20cm) de espesor con una masa superficial de (250kg/m²).
- La cámara de aire intermedia ventilada de la (FVL) al encontrarse abierta (posición de ventilación) no representa una gran disminución del aislamiento acústico (hasta cierto grado de apertura) respecto a los aportes de mejora obtenidos, por lo que el balance es beneficioso.
- En cuanto al espesor de la cámara de aire intermedia (separación entre las dos hojas que forman el cerramiento), en la campaña 2 de laboratorio, se observó que en los 3 valores de separación propuestos (110, 142.5 y 175m, seleccionados en función de las configuraciones comerciales) no mostraron una variación notoria en el comportamiento acústico de la (FVL). Otras investigaciones citadas sobre aislamiento acústico en paredes dobles, sostienen que el aumento del espesor de la cámara de aire intermedia situada entre las dos hojas puede contribuir a la mejora en la reducción acústica por

transmisión; sin embargo la pared doble puede verse afectada por los fenómenos de resonancia, los cuales están muy condicionados por la densidad superficial de las hojas y las características del medio que las separa (aire o material absorbente). En la realización de la tesis no se comprobó una marcada diferenciación de influencia en el comportamiento acústico de la (FVL) con la variación del espesor de la cámara de aire intermedia, más sí, de la influencia de la inclusión de material acústicamente absorbente al interior de la misma.

En la realización de diversas simulaciones con herramientas informáticas llevadas a cabo a lo largo de la tesis, muestran que la variación de la separación entre hojas (espesor de la cámara de aire intermedia) influye particularmente en el aislamiento acústico del conjunto mayormente cuando la cámara está vacía (sin material acústicamente absorbente); por el contrario cuando la cámara está rellena de material acústicamente absorbente, la diferencia es menor sobre todo si el espesor de la hoja es poco como en el caso de una placa de yeso laminado, entre (16 y 19mm). A mayor espesor de la hoja ligera (25mm) se empieza a diferenciar más la influencia beneficiosa en el comportamiento de aislamiento acústico de una pared de doble hoja ligera al variar la distancia entre las dos hojas con la inclusión de un material acústicamente absorbente en el interior de la cámara de aire intermedia.

- Por lo que se refiere al grado de apertura de las aberturas para la ventilación de la cámara de aire intermedia y su influencia en el comportamiento acústico de la (FVL), en las campañas 1 y 2 realizadas en la tesis, se observó que al variar el grado de apertura de la (FVL) según los diversos grados de apertura propuestos no representa un cambio notable en el comportamiento de aislamiento acústico del conjunto; este hecho se comprobó con dos disposiciones de la superficie de las aberturas pero con sistemas artesanales y no homologados que pudieron influir en la obtención de resultados con mayor notoriedad de la variación del grado de apertura. Debido a estas circunstancias se recurrió al análisis configuraciones similares y de cerramientos dobles de entramados de yeso laminado (PYL) mediante herramientas informáticas de simulación donde si se encontraron ciertas diferencias en el comportamiento del aislamiento acústico cuando la cámara de aire intermedia está totalmente cerrada (0% abierta) y cuando está totalmente abierta (100% abierta) (porcentajes de la superficie de ventilación destinada para el estudio en los cantos horizontales de la superficie inferior y superior); a partir de un grado de apertura mínimo, el 1% de apertura de la superficie total dispuesta para la ventilación ya se nota un cambio en los valores de aislamiento acústico y a partir del 10% de apertura de la superficie ya no hay variaciones y se puede considerar la cámara de aire intermedia completamente abierta acústicamente hablando. Así mismo cuando un cerramiento doble tiene un material acústicamente absorbente dentro de la cámara de aire intermedia, es aún más notoria esta diferencia.

También se observó que al abrir las aberturas dispuestas para la ventilación del cerramiento doble de placas ligeras de yeso laminado (PYL) en las simulaciones realizadas, el comportamiento de las curvas de aislamiento acústico resultantes siguen la caída de la frecuencia crítica f_c de la hoja ligera en todo el rango de frecuencias como sostienen varios investigadores respecto a esta situación.

- La disposición (localización y orientación) de las aberturas dispuestas para la ventilación, parece tener cierta influencia en el comportamiento acústico de un cerramiento de doble hoja con cámara de aire intermedia. Por ejemplo en la campaña 1 in-situ dominaba un campo direccional a 45° mientras que en la campaña 2 de laboratorio en un campo difuso reverberante y en la campaña 3 de simulaciones con la herramienta VA-one v.2012, se recreó un campo completamente difuso donde se puede observar que al efectuar la apertura a través de una de las hojas de un cerramiento doble ligero (entramado de PVL), hay una diferencia del comportamiento de aislamiento acústico a partir del 1% del grado de apertura del total de la superficie y al efectuar la apertura a través de los perímetros horizontales (inferior y superior), ésta diferencia se nota a partir del 10% de apertura del total de la superficie dispuesta para la ventilación.

Los resultados obtenidos en la fase II del análisis y simulaciones de la variación de grados de apertura de sistemas de entramados autoportantes de (PVL), pueden contribuir al estudio del comportamiento de aislamiento acústico de la (FVL) poniendo en conocimiento de forma orientativa la influencia de abrir la cámara de aire intermedia en diferentes grados de apertura según la superficie dispuesta para ello. Estos datos permiten reconocer que hasta un cierto grado de apertura del sistema en conjunto, la (FVL) representa un mejor comportamiento de aislamiento acústico frente a la ventilación y a partir de éste la apertura ya no influye considerándose así la (FVL) abierta completamente sin representar necesariamente un decaimiento del rendimiento acústico del conjunto de fachada.

Como conclusión final sobre las comprobaciones realizadas se puede afirmar que el uso de la (FVL) constituye una solución arquitectónica eficiente para la mejora del patrimonio construido (caso de rehabilitación de edificios) y que además añade un valor acústico remarcable aún siendo un sistema abierto para la ventilación del conjunto, verificado el valor añadido de mejoramiento acústico a través de diversos procedimientos de medición acústica: a pie de obra, en laboratorio y mediante simulación numérica, obteniendo en todos los casos resultados positivos a pesar de las limitaciones de cada procedimiento.

También comentar que la valoración del incremento de aislamiento acústico del conjunto en una fachada es de compleja medición y análisis por la incidencia de diversas variables que son distintas en cada proyecto de edificación.

Respecto a las herramientas de cálculo informático utilizadas para ésta tesis: Insul v.7.0, dBK Aisla v.3.01 y VA-one v.2012, se puede decir que su utilidad está sujeta al conocimiento previo de las características de los elementos a evaluar, incluso en varios casos es necesario tener el conocimiento de antemano de los valores de aislamiento acústico que puede alcanzar un material a usar. De estas herramientas de cálculo informático, se encontró que el software Insul es de fácil uso, puede aportar en valores de aislamiento acústico de sistemas constructivos pre-determinados tipo multi-capas para paredes exteriores y particiones interiores así como de techos y forjados frente a transmisiones de ruido aéreo por vía directa o indirecta sin la introducción de muchos datos, sin embargo en el caso de la (FVL) estudiada, esta herramienta no permitía la variación de los elementos o de la configuración como la adición de más de un cerramiento doble o la inclusión de aberturas en la cámara de aire intermedia. La herramienta dBK Aisla es la menos compleja de las tres, requiere pocos datos de introducción pero también su utilización es limitada (al menos la versión utilizada v. 3.01) ya que no muestra resultados a más de 70dB, su utilización fue de gran utilidad para el contraste de algunos de los resultados obtenidos con las otras herramientas y su amplia base de datos permite tomar algunos de éstos valores para caracterizar los materiales de algunos de los elementos usados en las diferentes simulaciones. La herramienta VA-one, es la más compleja de las tres y la que permite mayor flexibilidad de variación de elementos y sus configuraciones, la disponibilidad de uso de métodos como (SEA) y (FEM) permiten contrastar diferentes resultados y ampliar con precisión la obtención de valores respecto a los reales, así mismo los recursos de aplicación gráfica y numérica y de base de datos la hace una herramienta muy completa y apropiada para la simulación de ejercicios experimentales y de investigación.

En el campo de la arquitectura y la construcción se hallan varias dificultades en el conocimiento preciso de todas las características físico-mecánicas y acústicas de los elementos en conjunto, techos, muros, forjados etc. y de sus materiales y productos utilizados ya que no son datos con los que se trabaje normalmente y no están disponibles en los catálogos comerciales y aún cuando la construcción es cada vez más industrializada, las condiciones de montaje real en la obra nunca son exactas, una de las razones por las que el uso de herramientas informáticas de cálculo y predicción de aislamiento acústico tendrían mejor aplicación en el campo de la construcción en productos finales prefabricados tipo paneles, puertas, ventanas, etc. por todo ello, aunque es posible la obtención de resultados satisfactorios mediante simulaciones con herramientas informáticas de cálculo y predicción acústica solo pueden validarse totalmente mediante el contraste con ensayos reales ya sean in-situ o de laboratorio, siendo esta la mejor herramienta de comprobación del rendimiento acústico de un elemento o sistema.

Continuidad de la investigación

Teniendo en cuenta el trabajo realizado y los resultados obtenidos hasta ahora, la continuidad de esta investigación puede darse en aspectos de tipo práctico y de propuestas de aporte teórico para el uso de la (FVL) como sistema de mejoramiento acústico para edificios.

Algunas de las propuestas más relevantes serían:

- la caracterización de diferentes tipologías de muros existentes para fachada, los cuales podrían tener la cualidad de “muro base” en la aplicación de la (FVL) por pertenecer a edificios que requieran ser renovados.

- Trabajar en un estudio de clasificación de calidad acústica de edificios por tipo de muro de fachada y data de construcción, esto requeriría una toma de muestras y carecterización por grupos y zonas de uno o varios sectores de una ciudad, el cual pueda ser repetible con el fin de que la información colectada pueda aportar en la normativa acústica.

- Planteamiento de una nueva serie de mediciones en laboratorio de prototipos de (FVL) con otro tipo de hoja exterior (al menos dos mas) para contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas de los sistemas de entramados autoportantes definiendo las superficies de obertura utilizadas en los diferentes grados de apertura en al menos 3 tipos de espesores de cámara mejorando la estanqueidad para garantizar los grados de apertura. Esta realización permitiría comprobar la verdadera influencia de la ventilación de la (FVL).

- Mediciones in-situ de prototipos de (FVL) con características similares a las planteadas para mediciones en laboratorio y teniendo en cuenta el tipo de muro base al que se aplica.

- Elaboración de un programa de cálculo para envolventes dobles, que incluya datos de la ventilación en la cámara de aire intermedia.

FINAL CONCLUSIONS

This thesis deepens the knowledge of the acoustic performance of lightweight ventilated façades (LVFs) with open air cavities, focusing mainly on the different configurations and the open variability of the air cavity that can influence in the façade behavior and its applications to building projects.

In the first part of the thesis the types of (LVFs) are specified. There are a wide variety of facade fixation systems and materials used commercially that offer flexible adaptability to apply in façades. This diversity represents advantages in the construction area and are compatible with the betterment of the airborne sound isolation in buildings. Though the components can be made of different materials and fixation systems, the (LVF) acoustic performance depends predominately on the characteristics of the air cavity such as the width, the presence of an acoustical absorber material inside the cavity, and the external cladding. For example:

- In the air cavity between layers, the size and the thickness of this, determining the ventilation. The current Spanish regulations for ventilation states that for a double wall (including the LVF) the minimum requirement for ventilation can be obtained from an air cavity with thickness from 2cm, with a ventilation surface area of 500cm², for each linear meter of the façade; and from a thickness of 3 to 10cm with a minimum effective area of 120cm² per each 10m² façade surface, distributed equally in the lower and upper part of the façade. For the (LVF) the thickness minimums are between 2 and 4cm with open sealed joints in the exterior cladding.

- Layers of insulation materials inside the air cavity can be acoustically absorbent. In the LVF system the isolation layer is appended to the outer surface of the building façade (base wall). This isolation layer may have physical and material composition with different characteristics. The most common in use are the rigid and semi-rigid panels, and flexible blankets, which are typically 3 to 6cm thick (and 8 to 10cm is more commonly used in the outer treatment ETICs) to comply with isolation requirements. For improved acoustical insulation performance in the (LVF) it is important that the materials used are porous and fibrous with rough edges, so as to be good sound absorbers. The contribution in the overall sound insulation is better using materials with a higher surface density, and the thickness of the layer does not matter significantly. Among the best sound insulating materials are the glass or rock wool and another types of fibrous material. While the polystyrene panels can aid the thermic insulation performance of façades, they do not yield an improvement in the sound insulation.

- The substructure. Different types of fixation systems and material have been used, varying dependent on the type of exterior cladding. For example, in the case of ceramic or stone panels elements with more mass and stiffness are required, while for lightweight panels like wood, cement board or

synthetics, the substructure can have fewer elements and be more lightweight. In general, fixing systems with mounting brackets and rails in wood and metallic materials are the most abundant. Regarding the contribution of fixation systems to sound insulation, the overall (LVF) system should avoid “sound bridges”, conducting vibrations through the fixing connection between layers (base wall and exterior cladding). Many fixation systems produce direct sound transmissions between the surfaces and can raise resonance problems inside of the air cavity. The effects can be reduced by installing fixation systems with point, rather than linear, connections, however this solution can be complex because the appropriate fixation is also dependent on other conditions required by each type of (LVF). Some manufacturers take into account solutions like the use of perforated profiles or rubber layers in the fixations to avoid sound transmissions.

- The lightweight exterior cladding can be of different shapes and materials. The ventilation and the sound insulation characteristics of a (LVF) depends on its features, panels or louvers for example, and if the exterior cladding have joints that are sealed or not (i.e. whether the cladding is made up of freestanding and separate, or interlocking panels). In the case of open joints, the distance between the panels for ventilation is 0.3 to 0.5cm minimum, while in the case the joints of the external cladding are sealed, the ventilation depends on the open surface of the overall (LVF) to determine their performance.

This thesis considers suitability of (LVFs) when renovating façade buildings with simple masonry walls. Though the renovation of building façade is normally undertaken for thermal and aesthetic reasons, the improvement of sound insulation can represent an added value. It is important to say that the level of sound reduction from the (LVF) depends on the base wall (the pre-existing wall of the façade building) characteristics and its level of sound insulation before renovation, the materials used in the renovation and how the (LVF) is built.

Sound insulation follows the Mass Law: The more weight there is, the better the sound insulation behavior. However, if the weight is doubled, the increase in the sound insulation is not represented linearly by yielding twice insulation. For this reason the double walls with lower mass can offer good results. Normally, a double wall with different configurations of the walls and a non-ventilated air cavity containing a sound absorbing layer between them can obtain better sound insulation results than a simple wall with the same areal density. This fact represents an opportunity for the development and use of the (LVFs). However in most cases, the air cavity between walls is ventilated to comply with rain prevention and sunlight absorption requirements, and this use of ventilated air-cavities is not taken into consideration in Spain (DB-HR) by the CTE *Código Técnico de la Edificación* regulation for its contribution toward overall sound insulation.

The current Spanish regulation (CTE) “*Código Técnico de la Edificación*” in the “*Catálogo de materiales*” lists some overall airborne sound insulation values obtainable with lightweight exterior claddings, however these values are estimates and are not recognized by the (DB-HR) regulation (the basic document to protection of noise in buildings of CTE) as a means to increase the sound insulation in facades. In this regulation the requirements, of airborne sound insulation in double wall facades and (LVFs), specify that the entirety of the sound insulation must come from the inner wall, with a specific areal density. However, the research undertaken throughout thesis work has found that the sound insulation values obtained with a (LVF), with exterior cladding and a ventilated air cavity that is open, can be higher than the minimum requirement (43dB) in façades.

Regarding the (LVF) acoustic regulation, different countries, within and outside European zone, have found minimum values of the sound reduction index (R) required for the airborne sound insulation in facades, and in private units inside and between buildings. The minimum values required by regulation varies according to the country. For example in the cases of northern European and Oceania countries have a required classification depending of the date buildings or uses (Australian is one specific example). However, none of these regulations make reference directly to the outer airborne insulation requirements of the (LVF). In Spain the CTE regulation has the minimum values required for internal walls and double walls. In the case of lightweight drywall the values are conditioned by the areal density, and when there is an exterior cladding the requirement is applied only to the inner wall (base wall) to define the overall sound insulation. The regulation for the construction of objects such as a (LVF) must be certified for compliance with the different building regulations, nevertheless these is no reference to sound insulation.

During the research presented in this thesis, different acoustic measurements have been taken using on-site, laboratory and computer simulation methodologies, with software tools calculating acoustic predictions for the analysis of the (LVF). The same commercial Aquapanel material was used in all the measurements to make the comparison of the results using the different measurement testing more enlightening. In this research work windows or other kind of openings in the wall were not considered, so the results presented are related to the (LVF) performance in the opaque part of façade. Under these conditions it was possible to reach the following conclusions:

- The (LVFs) contributes significantly to improve the overall sound insulation in an existent heavy masonry wall (base wall). Overall values of the improvement in the sound reduction index (ΔR) range from a minimum 5dB -7dB to a maximum of 20dB in mid-high frequency.
- A base wall that has high areal density will have less acoustic improvement with a (LVF). Therefore (LVFs) can offer better sound insulation performance paired with simple walls with a low areal density. For example, the walls used in the experimentation undertaken for the thesis, in the on-site

experiment a double masonry wall (30cm) thickness with a areal density of (217kg/m²) was used, and in the computer simulation by INSUL v.7.0 a concrete wall (20cm) thickness with a areal density (250kg/m²) was modelled.

- When the air cavity of the (LVF) has an open slit for ventilation there is no significant decrease in the important of sound insulation, in comparison with the improvement obtained with the (LVF) with no ventilation. Therefore there is a good balance between ventilation and sound insulation of façade.

- The width of the air cavity (distance between the base wall and the exterior cladding) was varied in the second campaign of laboratory testing. It was observed that varying the three different widths (110, 145 and 175mm selected by the commercial configurations) yielded no apparent variation in the acoustic performance in the sound insulation of the (LVF). There is much research suggesting that an increase of distance between walls of double wall can contribute to sound reduction by transmission; however, the double wall may be affected by resonances, conditioned for the areal density of the walls and the characteristics of the cavity (i.e. with or without an acoustic absorber material). During the testing, the research undertaken has not shown a large influence by varying the thickness of the air cavity of a (LVF), while if an acoustic absorber material inside of the air cavity is added the difference in acoustic performance is significant.

The computer simulations, performed by software tools, give evidence that varying the distance between the walls (thickness of the air cavity) can affect the overall sound insulation of the wall, particularly when the air cavity is empty (without acoustic absorber material inside). Conversely, when the air cavity is filled with an acoustic absorbing material the difference is less, especially with a small air cavity between the walls. In the case of the gypsum laminated panel (16 and 19mm), a greater thickness than the lightweight (25mm), there is evidence for a greater beneficial influence on the behavior of sound insulation of a lightweight double wall as the air cavity varies and has an acoustic absorbing material inside.

In the campaigns 1 and 2 (the on-site and laboratory experiments), it was observed that varying the width of the ventilation slit in the (LVF) does not cause a noticeable change in the overall sound insulation behavior. The slit was positioned in two different places on the ventilation surface of the (LVF) prototype. These were handmade which could influence in the results obtained. Due to circumstance, the same configurations in gypsum laminated double drywall were analyzed using software tools. The simulations found some difference in the sound insulation behavior when the air cavity was totally closed compared to when it was totally open (the ventilation surface was positioned at both the top and he bottom of the façade for these simulations). From a minimum opening of 1% of the surface width, there was some change in the sound insulation values obtained, as the width was increased, until 10%. From 10% open up to completely (100%) open, no change was measured in the

sound insulating behavior of the double wall. However, when the double wall had an acoustic absorbing material in the air cavity, the difference is more significant.

While observing the change in acoustic properties by opening ventilation slits of a laminated gypsum double drywall the sound insulation curve was measured, graphing the ability to absorb air borne sound at different frequencies. The behavior of the sound insulation curves, as the openness of the ventilation slits varied, suggests the critical frequency, f_c , of the gypsum laminated lightweight drywall remained constant.

The positioning of the ventilation slits has an influence in the sound insulation behavior of a double wall with air cavity (simulation). In the campaign 1, the on-site experiments, the sound produced for testing had a directional field 45° from below, while in the campaign 2, the laboratory experiments, and the campaign 3 simulations, the sound produced had reverberant diffuse field (sound from all around). In the simulations it was observed that opening the ventilation slits of the lightweight wall panel generated a difference in the sound insulation behavior.

The results obtained in the practical phase II of the analysis and the computer simulations, by varying the opening of gypsum laminated double drywall, contribute to the study of the acoustic performance of (LVFs), with new insight into the acoustic effects of varying the ventilation slits of the air cavity. The data collected suggests that an open surface of ventilation gives a better acoustic performance in sound reduction of the overall (LVF) and after that, there is not a big influence considering the system totally open so that not represents yet a decrease of the sound reduction improvement in the façade.

From the findings it can be concluded that the use of ventilated (LVFs) is an efficient solution for the improvement of buildings facades in the case of building renovations, and gives the added benefit of a reduction of outer airborne sound. Throughout this thesis, this statement as been empirically tested through: on-site, laboratory and computer simulation experiments obtaining positive results in all cases, despite the limitations of each procedure.

Throughout this thesis three software tools, Insul v.7.0, dBK Aisla v.3.01 and VA-one v.2012 we used for modelling and simulations. Their use is subject to prerequisite knowledge of the characteristics of the materials being evaluated, in some cases it is necessary to know the sound reductions values each material before simulations can be carried out. Insul is an easy-to-use tool that which can be implemented to obtain the sound insulation abilities of lightweight multilayer structures, exterior and inner walls, ceilings and floors against the airborne noises by direct and indirect paths. Insul does not requirements too much data to run simulations. In the case of the (LVFs) studied however, this software tool was not appropriate as I does not allow the user to manipulate the configuration elements, such as adding more than one double wall or the addition of ventilation openings for the air

cavity. The dBK Aisla software is the least complex of the three software tools used. It also requires a little data to run calculations, but its use is limited (at least the version used v.3.01) because it does not show results more than 70dB. The dBK Aisla software was useful to contrast against some results obtained with the other software tools, and it has a good database containing the characteristics of materials, which was helpful in fulfilling the data requirements of other software. The VA-one software is the most complex of the three software tools used, and allows more flexibility in the manipulation of the system elements. This software applies two methods in its modeling process, the SEA and FEM calculations, which allow the user to contrast the different results, and gives more accurate predictions with regard to the real values obtained. Also the ability to apply graphic tools and the large database make it the most complete and appropriate software tool for the simulation of acoustic systems in experimental research.

Assessing the increase in overall sound insulation of a façade is complex to measure and analyze because there are several variables differently affecting each building project. As well as in the architecture and building field, there are many gaps in the knowledge of the acoustic, physical and mechanical characteristics of components like ceilings, walls, floor frameworks. Although such components are frequently used in construction, precise information about these properties is not normally used building construction and the data is not available in the commercial catalogs. Though building construction is an increasingly industrialized industry, the on-site assembly conditions are not particularly accurate and for this reason the use of software tools for prediction and calculation is better applied to final products like prefabricated panels, doors windows etc. where greater uniformity is more likely. All the results obtained in software acoustic testing may be completely valid by contrast with laboratory or on-site testing being the better way to prove acoustic performance of elements.

6.1 Further work

From the research developed and the results obtained in this thesis, the continuation of this line of study could be in the practical aspects and proposals contribution of use of the (LVF) as method of sound reduction improvement in building facades.

Some of the proposals of future research on this topic would be

- Characterizing the different types of façade walls currently standing that need, or are soon to be needing, renovation which could have the quality of "base wall" for the implementation a (LVFs) as a renovation solution.
- Work on developing a classification for the sound insulation qualities of buildings by type of façade construction and date of construction. This would require samples from several areas of a city, in order to provide exhaustive collected information that could contribute to the municipal noise regulations.
- Undertake a new series of acoustic tests in the laboratory, using the (LVF) prototype and experimenting with at least two more types of exterior cladding to contrast the results obtained in the simulations performed on gypsum laminated double drywalls (campaign 3). The experiments would use the same slits surface used previously, and the opening variation would be tested with three different widths of the air cavity. This experiment could prove the real influence of open ventilation slits of the (LVF).
- On-site acoustic testing of (LVF) prototypes with the same features referred to in the acoustic laboratory testing, and taking into account the kind of base wall being examined.
- Development of a software tool to calculate sound absorption qualities of double enclosures, including ventilation slits in the air cavity.

Currículo formativo

ANDREA NIAMPIRA DAZA

Fecha y lugar de nacimiento: 03/03-1978 Bogotá Colombia

Domicilio actual: Calle de l'Or 2Bis /08012/ Barcelona España

Formación académica

2006-2014

Programa de doctorado: Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio Ambiente en la Arquitectura

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona ETSAB

Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona (TECH)

JUNIO 2010

DEA-Diplomado de estudios avanzados

Fase de docencia e investigación del programa de doctorado:

Ámbitos de investigación en la Energía y el Medio Ambiente en la Arquitectura.

Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona (Tech).

JUNIO 2010

Presentación del Proyecto de Tesis

Comportamiento Acústico de la Fachada Ventilada con Revestimiento Ligero: Análisis de la variación de las características de la ventilación

ETSAB Universitat Politècnica de Catalunya

OCTUBRE 2002

Licenciatura en Arquitectura

Universidad Piloto de Colombia.

Octubre de 2002 Bogotá D.C. Colombia

Estancias de investigación

SEPTIEMBRE –FEBRERO 2013-2014

Centro Tecnológico ASCAMM

Asociación Catalana de Empreses de Moldes y Matrices Cerdanyola del Vallès (Cataluña España)

Formación en temas de aislamiento acústico y realización de simulaciones en VA-One v.2012.

ABRIL-JUNIO 2012

Universitè Catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve) Bélgica

Departamento de investigación “*Architecture et Climat*”

Proyecto de mediciones acústicas en laboratorio para la tesis doctoral.

Llevado a cabo en *LARGE Laboratory for Acoustic Research on Glass and large Envelopes* (Ghent, Bélgica).

Participación en congresos y conferencias

ABRIL 2012

Acoustics 2012 11^o Congreso Francés de Acústica. (Nantes, Francia)

JUNIO 2012

ICAE 2012 VI Congreso Internacional de Envolventes Arquitectónicas (Donostia-San Sebastián, España)

Participación en proyectos de investigación

FEBRERO 2011

LlTA *Laboratori d'Innovació i Tecnologia de l'Arquitectura* en colaboración con el LEAM *Laboratory d'Enginyeria Acústica i Mecànica* Universitat Politècnica de Catalunya Terrassa.

Desarrollo de prototipos de fachada ligera ventilada variando la apertura de la cámara de aire.

Planteamiento e instalación de prototipos en una fachada real para la realización de mediciones acústicas.

Proyecto experimental in-situ para la fase práctica de realización de la tesis doctoral.

Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés ETSAV.

Participación en concursos de arquitectura

JUNIO 2009

Promotion and Rehabilitation of Western shipyards and landscape renovation in Heraklion Crete

Concurso de diseño en Heraclion Creta

Participación.

Experiencia profesional

MAYO 2007-FEBRERO 2010

Integral S.A

Barcelona España

OCTUBRE 2006-FEBRERO 2007

Fundación mas i terra

Barcelona España

MARZO-JULIO 2005

Secretaría de Educación, Gobernación de Cundinamarca

San Francisco Cundinamarca Colombia

2003-2005

Proyección y ejecución de proyectos de reforma

Bogotá Colombia

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

Hopkins Carl. “*Sound Insulation*”. Elsevier Oxford UK 2007

Kaack, Ulrich; Klein, Tillmann; Auer Thomas. “*Façades: principles of Constructions*”. Ed. Birkhauser 2007

Hausladen, Gerhard; de Saldanha, Michael; Liedl, Petra. “*Climate Skin*”. Ed. Birkhauser 2006

Oesterle, Lieb; Heusler, Lutz. “*Double-Skin Facades: Integrated Planning*”. Munich Prestel, cop. 2001

Pardal, Cristina; Paricio, Ignacio. “*La fachada ventilada y ligera*”. Barcelona. Bisagra, 2006

Avellaneda i Díazgrande, Jaume. Papers de construcció: “*Façanes lleugeres ventilades. Criteris per al disseny constructiu*”. Edició ETSAV Sant Cugat del Vallés Septiembre de 1997.

Bernstein, D; J.P, Champetier; Peiffer, F. Construcción. “Nuevas técnicas en la obra de fábrica. El muro de dos hojas en la arquitectura de hoy”. Ed. Gustavo Gili 1985

Abalos, Iñaki; Herreros, Juan. “Técnica y Arquitectura en la Ciudad Contemporánea 1950-2000”. 3º ed. Nerea Madrid. 2000.

Bazzocchi Frida, Nuti Franco. “*Facciate ventilate: architettura, prestazioni e tecnologia*”. Alinea, cop. Florencia Italia 2002

Ballarín Iraballen, Alberto, Casinello Plaza Josefa, Cebrian Quesada Felipe y otros. “Tratado de Construcción Fachadas y cubiertas (II)”. Ediciones Munilla-Lería, SL. Madrid 2007.

M. Harris Cyril. “Manual de medidas acústicas y control del ruido”. MC.GRAW-HILL, 1995

Craik Robert J.M. “Sound Transmission Through Buildings. Using Statistical Energy Analysis”. Grower, 1996.

ITEC. Fachadas ligeras. Documento: “Manual de introducción al proyecto arquitectónico”. Publicaciones ITEC Barcelona Septiembre de 2005.

Vera Soriano, Roberto. Temas de construcción 2. “Fachadas de edificios con aplacado de piedra trasventilado”. Editorial Club universitario San Vicente, Alicante 2001.

Querol Noguera, Josep M. “Aislamiento acústico en la edificación. Proyecto cálculo, control técnico y administrativo”. Manuales profesionales III. Col·legi d'Arquitectes Tècnics de Tarragona, 2003.

Wigginton Michael, Harris Jude. “*Intelligent skins*”. Oxford. Architectural Press, 2002.

Brookes, Alan. “Cladding of buildings” 3rd ed. London: E&FB Spon, 1998

Egan, M. David. “*Architectural Acoustics*”. Mc Graw-Hill, 1988

Arau Higini. “ABC de la Acústica Arquitectónica”. CEAC, DL 1999. Barcelona
Carrión Isbert, Antoni. “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Ediciones Universidad
Politécnica de Cataluña SL. 1998, Barcelona. reimpresso 2006.

Colina Tejeda, C. “Acústica de la edificación”. Fundación Escuela de la Edificación, cop. Madrid
1997.

Recuero López Manuel. “Estudio Acústico de los materiales”. Escuela universitaria de ingeniería
técnica de telecomunicaciones, Barcelona 1983.

Crocker, Malcom J. Handbook of Acoustics. (Editor-in-Chief) 1998

Serra florensa, Rafael. “Arquitectura y Climas” Ed. Gustavo Gili, Barcelona 1999

Paramio Pintado Yolanda. “Elementos de la construcción”, Las rosas. La Ley-actualidad, Madrid
España 2005.

Herzog Thomas, Krippner Roland, Lang Laussane Werner. “*Construire des façades*”. Presses
Polytechniques et universitaires romances, cop. 2007

Wigginton Michael, Harris Jude. “*Intelligent skins*”. Oxford [etc.]: Architectural Press, 2002.

Tesis:

Escuder Silla Eva M^a “*Estudio del comportamiento acústico de estructuras multicapa mediante NAH*”
Tesis doctoral Departamento de Física Aplicada; Universidad Politécnica de Valencia. Valencia
(España Julio de 2005).

Poblet-Puig Jordi. “Numerical Modelling of Sound Transmission in Lightweight structures” Tesis
doctoral; Programa de Doctorado: *D’enginyeria civil, Laboratori de Càlcul Numèric; Universitat
Politàcnica de Catalunya* Barcelona, Enero de 2008.

Lehmann Fernández Claudia Sofía. “Revisión de los Algoritmos de Predicción del Aislamiento
Acústico Proporcionado por Paredes Dobles: un Análisis Comparativo” Tesis de Ingeniería Acústica;
Escuela de Ingeniería Acústica; Facultad de Ciencias de la Ingeniería; Universidad Austral de Chile
Abril 2007.

Johansson Daniel, Connell Peter. “Statistical Energy Analysis software. Development and
implementation of an open source code in Matlab/Octave” Tesis de master; Programa: *Sound and
Vibration Department of Civil and Environmental Engineering, Division of applied Acoustics,
Vibroacoustics Group, Chalmers University Of Technology*, Göteborg Suecia 2010.

Magnus Lundin “*Sound transmission through double walls using Statistical Energy Analysis. A new
element formulation for non-resonant response*” Tesis de master *Marcus Wallenberg for Sound and
Vibration Research Royal Institute of Technology*. Estocolmo Suecia 2011.

Adjemian Oria, Anouch. “la evolución de las fachadas ventiladas, nuevos materiales y sistemas constructivos” Proyecto final de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación. Universitat Politècnica de Valencia. 2011.

Janer Angelet, Marcel. “*Impact sound insulation using SEA*” Tesis de master en Matemática Aplicada. Facultad de estadística y matemática. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona 2010

Pardal March, Cristina. “La hoja interior de la fachada ventilada: Análisis, Taxonomía y Prospectiva” Tesis doctoral en Tecnologia de l’Arquitectura, Edificació i Urbanisme. Departament de Cosnruccions Arquitectòniques 1. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona 2009.

Artículos, publicaciones y revistas:

TECTONICA Nº 2. Revista: envolventes II. ATC ediciones Madrid Mayo de 1996.

Lambert Guy; Graf Franz. *The Sheds of the Voirin-Marinoni Factory in Montataire. “A Patented Architecture By Auguste And Gustave Perret, Architects, Louis Gellusseau, Engineer”*. Revista Decomomo No. 31. Septiembre 2004.

A. J. Price, M. J. Crocker. “*Sound Transmission through Double Panels Using Statistica Energy Analysis*” *Department of Building Science, The University of Liverpool. The Journal of the Acoustical Society of America* Vol 47 pp. 683-693 (1970)

J. Wang^a, T.J.Lu^b, J. Woodhouse^b, R.S. Langley^b, J. Evans^c. “*Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modelling*” *School of Aeronautical Engineering, Queen’s University, Belfast, UK.* ^b*Department of Engineering, University of Cambridge.* ^c*Banro Holdings Ltd. Journal of Sound Vibration* 286 (pp. 817-847) 2005

Davy John L. “*Predicting the Sound Insulation of Walls*” *Journal of Building Acoustics* Vol. 16 No. 1, 2009

Legault Julien, Atalla Noureddine. “*Numerical and experimental investigation of the effect of structural links on the sound transmission of a lightweight double panel structure*” *GAUS Department of Mechanical Engineering, Université de Sherbrooke Quebec Canada. Journal of Sound and Vibration* 324 (pp. 712-732) 2009.

Robert J. M. Craik. “*Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis*” *Department of Building Engineering and Surveying, Heriot-Watt University, Edinburgo. Applied Acoustics* 64 pp. 325-341 (2003)

J. Picaut, T. Le Pollès, P. L’Hermite, V. Gary “***Experimental study of sound propagation in a street***” *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Section Acoustique Routière et Urbaine, Cedex Francia Applied acoustics* 66 (2005) 149-173 (pg. 150)

A.P Oliveira Carvalho, J. Amorim Faria “*Acoustic Performance of Medium-Rise Timber Buildings*” *Acoustic Laboratory, FEUP-DEC-SCC. Oporto, Portugal. Conference in Building Acoustics* Diciembre de 1998 Dublin Irlanda.

Rasmussen Birgit “*Sound classification schemes in Europe-Quality classes intended for renovated housing*” SBI Danish Building Research Institute, Alborg University, Dinamarca. Programa Action TU0701, publicación “*Improving the Quality of Suburban Building Stock*”, University of Malta, mayo 2010.

Hopkins, Carl (1); Grimwood, Colin (1); Seller, John (1); Wright, Philip (1); Ling, Mateehew (1); Fothergill, Les (2) “*New Building Regulations on the Resistance to the Passage of Sound for England & Wales*” (1) Acoustics Centre BRE, Watford. (2) Department of Transport, Local Government and the Regions. (Building Regulations Division) London. *Forum Acusticum* 2002 Sevilla España.

Rasmussen Birgit “*Sound insulation between dwellings-Requirements in building regulation in Europe*” SBI Danish Building Research Institute, Alborg University, Dinamarca. *Applied Acoustics* 71 (pp. 373-385) 2010.

“*Noise Control Engineering Journal*” *The Journal of the Institute of Noise Control Engineering of USA. Publicación Vol. 50, No.2 Abril-Marzo de 2002*

Warnock and J.D. Quirt “*Control of Sound Transmission through Gypsum Board Walls*” Construction Technology Update No. 1, Institute of Research in Construction (IRC), National Research Council of Canada, Enero 1997.

S. Ljunggren, “*Airborne sound insulation of thin walls*”. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol 89,(p 2324). 1991

J.H. Rindel, “*Sound Radiation from Building Structures and Acoustical Properties of Thick Plates*”. COMETT-SAVOIR Course Notes, CSTB Grenoble 1995.

Rasmussen, Birgit “*Facade sound insulation comfort criteria in European classification schemes for dwellings*”. VELUX A/S, W-Product Quality, Hørsholm, Dinamarca. *Euronoise* 2006, Tampere, Finlandia.

Fuentes calles, Laura. “El método de los elementos finitos aplicado al cálculo de pequeñas estructuras. Pre y post procesado”. Escuela Técnica superior de Ingeniería Industrial Béjar, universidad de Salamanca 2011.

L. Bragança; C. Wetzel; V. Buhagiar; L.G.W. Verhoef. COST C16 “*Improving the Quality of Existing Urban Building Envelopes: Facades and Roofs. Research in Architectural Engineering*” Volume 5.

Lawson, Mark. “*European case studies on over-cladding comercial and residencial buildings*”. UK 2008

Rasmussen, Birgit. “*Sound classification schemes in Europe-Quality classes intended for renovated housing*”. Programa Action TU0701. EU 2010.

Mahn, Jeffrey; Davy, John L; Pears John “*The Acoustic Requirements of Dwellings in New Zealand*”. Forum Acusticum, Aalborg Dinamarca 2011.

Bento Fernández, María. “Los sistemas de cerramiento de fachadas ventiladas y el CTE”. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña ITEC Artículo Técnico, Conarquitectura CA35 Julio 2010.

Paricio Ansuategui, Ignacio. “La fachada ventilada con ladrillo cara vista” Artículo Técnico, Nueva Arquitectura con arcilla cocida NA2.

C.-M. Lee; Y. Xu. “A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials”. *Journal of sound and Vibration* 329 (pp.290-301) 2009.

Konstantinou, Thaleia; Knaack Ulrich. “An approach to integrate energy efficiency upgrade into refurbishment design process, applied in two case-study building in Northern European climate” *Energy and Buildings* 59 (pp.301-309) 2013.

Poel, Bart; van Cruchten, Gerelle; Balaras, Constantinos A. “Energy performance assessment of existing dwellings” *Science Direct. Energy Building* 39 (pp 393-403) 2007.

L. Bragança; M. Almeida; R. Mateus. “Technical Improvement of Housing Envelopes in Portugal” University of Minho, Guimarães, Portugal 2007.

Suarez Medina, Rafael. “Rehabilitación acústica a ruido exterior en vivienda social: un caso práctico” Seminario satélite. Rehabilitación acústica en la edificación. Soluciones y casos prácticos. *Tecniacústica* 2011 Cáceres.

Robert J. M. Craik. “Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis” *Applied Acoustics* 64 (pp 325-341) 2003.

John L. Davy “Predicting the Sound Insulation of Walls” *Journal of Building Acoustics*, Volume 16, No.1. 2009

Normativas:

Documento Básico de protección frente al ruido de la normativa española Código Técnico de la Edificación DB-HR del CTE, España 2009.

Catálogo de elementos constructivos del CTE, España 2010.

La Nouvelle Réglementation Acoustique NRA, Les changements de l’an 2000, Francia 2000.

“Sound Inulation Handbook” (ABCB) “Australian Building Codes Board” *Guideline Document, Australian Government and States and Territories of Australia* 2004

UNE-EN 140-5 Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Mediciones in-situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y fachadas 1998 y 1999.

UNE-EN 12354-3 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra ruido del exterior. 2001.

UNE-EN ISO 10140-2 Medición en laboratorio del aislamiento acústico de elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. 2010.

UNE EN ISO 717-1 Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: aislamiento al ruido aéreo. 1997.

ITEC. Documento: DAU 09/052 Aquapanel Outdoor, sistemas W387 y W388. Barcelona Enero de 2009.

ITEC. Documento: DAU 09/058 A Faveton Bersal SS/Acero Barcelona Enero de 2010.

Sitios web de interés:

<http://www.certiene.pt>

Certificação Energética Edifícios

www.kemt.fei.tuken.sk

Department of electronics and multimedia communications Slovakia. Noise transmission. Consulted in 2011.

<http://www.bbri.be/activefacades/>

Promovido por el CSTC centre scientifique et technique de la construction ministerio de asuntos económicos de Bélgica.

<http://www.eaa-fenestra.org/>

EAA Fenestra. Portal creado por la asociación europea de acústica para divulgación de publicaciones, calendario de eventos y avances en temas de acústica.

<http://www.idae.electura.es/>

Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. Ministerio de industria, energía y turismo España.

<http://www.ietcc.csic.es/index.php/es/>

Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Ministerio de economía y competitividad España.

<http://www.itec.es/>

Institut de tecnologia de la Construcció de Catalunya.

www.pladur.com

Empresa de tabiquería seca.

http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik8/8Diffuse.pdf

Diffuse field. Wolfgang Kropp pdf. Division of Applied Acoustics Chalmers University of Technology. Consultada en Noviembre 2013.

<http://www.insul.co.nz/>

Software INSUL.

http://webs.uvigo.es/gcastro/PFC/PROYECTO_ZALO.htm

Guía de Aislamiento Acústico. Departamento de Teoría do Sinal e Comunicaci3ns. Universidade de Vigo.
Consultada en Abril de 2013.

www.cstb.fr

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Francia.

<http://www-climat.arch.ucl.ac.be/>

Architecture et Climat. UCL Universite Catholique de Louvain La-Neuve, Bélgica.

http://www.arauacustica.com/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=74&lang=es

Arau Publicaciones.

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Acoustique,13397.html>

Consulta de reglamentaci3n acústica en Francia. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

<http://cwc.ca/publications/>

Canadian Wood Council.

<http://www.tatasteelapps.com/acousticperformance/Walls.aspx>

Acoustic Performance Prediction Tool for Separating Floors and Walls. SCI Steel Knowledge.

ANEXO A

ANTECEDENTES DE LA FACHADA DE DOBLE HOJA Informacion complementaria

ANEXO A ANTECEDENTES DE LA DOBLE FACHADA

1 Orígenes de los cerramientos dobles para fachada

La fachada de un edificio debe tener en cuenta las condiciones climáticas del entorno y sus variaciones, procurando mitigar y regular los efectos de la radiación solar, los efectos de las temperaturas del aire exterior, los efectos de la humedad del ambiente, los efectos de la lluvia incidente y así mismo la protección al ruido exterior. La fachada de doble hoja con cámara de aire intermedia proporciona un gran potencial regular varios de los efectos mencionados. La aparición de las fachadas de doble hoja se remonta a cientos de años; su función inicial fue la protección frente a la humedad aunque posteriormente se fueron comprobando sus otras bondades.

La utilización de muros dobles se remonta a la antigüedad, existen registros de la fabricación de doblado en obra de fábrica de ladrillo para impermeabilización de muros desde hace 2000 años las paredes de los baños públicos romanos eran a menudo de ladrillo hueco, en el medioevo se aparejaba con dos capas de piedra labrada y el intervalo de separación entre éstas se rellenaba con mampuestos de grava (D. Bernstein, J.p Champetier, F. Peiffer 1985).

Entre otros ejemplos más recientes, dentro de la arquitectura vernácula, está el sistema constructivo específico utilizado en el *Lake District* (Gran Bretaña) que consistía en dos hojas de albañilería de piedra pizarra apareada con uso de mortero, separadas por otra capa intermedia de grava de pizarra suelta y esparcida, sin mortero. En las hiladas de las dos hojas de albañilería de piedra pizarra, los mampuestos se colocaban un poco inclinados para contrarrestar la entrada del agua de lluvia gracias a la capilaridad del mortero.

En el siglo XIX, en Inglaterra, aparece ya referenciado explícitamente un muro de fachada de doble hoja con cámara de aire intermedia, propuesto ya como una nueva forma de construcción más eficaz, (Fig.A.1). En 1805 W. Atkinson el arquitecto inglés, describió un muro de fachada de 35cm de espesor, compuesto por dos hojas de albañilería y una cámara de aire intermedia de 15cm de espesor. Un mampuesto tizón colocado cada 90cm establecía la unión mecánica entre las dos hojas. Esta solución se recomendada por la economía en el buen uso de materiales y su mejor aislamiento térmico. En 1839 S.H. Brooks propuso un muro doble de fachada en el que proponía el uso de la cámara de aire como paso del aire caliente para la calefacción. Hacia 1850, en una publicación sobre el hábitat de la clase obrera, H. Roberts propuso un muro de 27,5cm de espesor total con una cámara de aire intermedia vacía de 5cm de espesor, dimensiones próximas a las establecidas ya 50 años después.

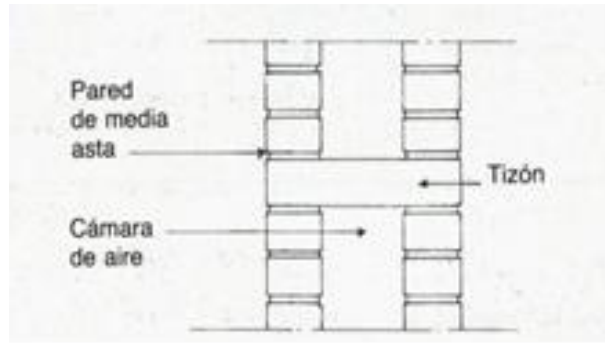


Fig.A.1 Ejemplo precedentes de muros dobles. Propuesta de W. Atkinson. 1805 (A11)

A finales del siglo XIX la tecnología de la fachada de doble hoja ya estaba bien definida. En la publicación del *Builder's Journal* del 31 de Agosto de 1898 (Fig.A.2 Izq.) se describen algunos detalles constructivos. En los lugares donde el muro se aproxima a jambas de puertas y ventanas se aprecian unos anclajes de hierro colado galvanizado que presentaban un ligero pliegue en medio para impedir mejor el paso de alguna gota de agua. Entre los ejemplos aquí recopilados se encuentran también detalles del arquitecto alemán Muthesius extraídos de su obra *Das English Haus* (Fig.A.2 Der.).

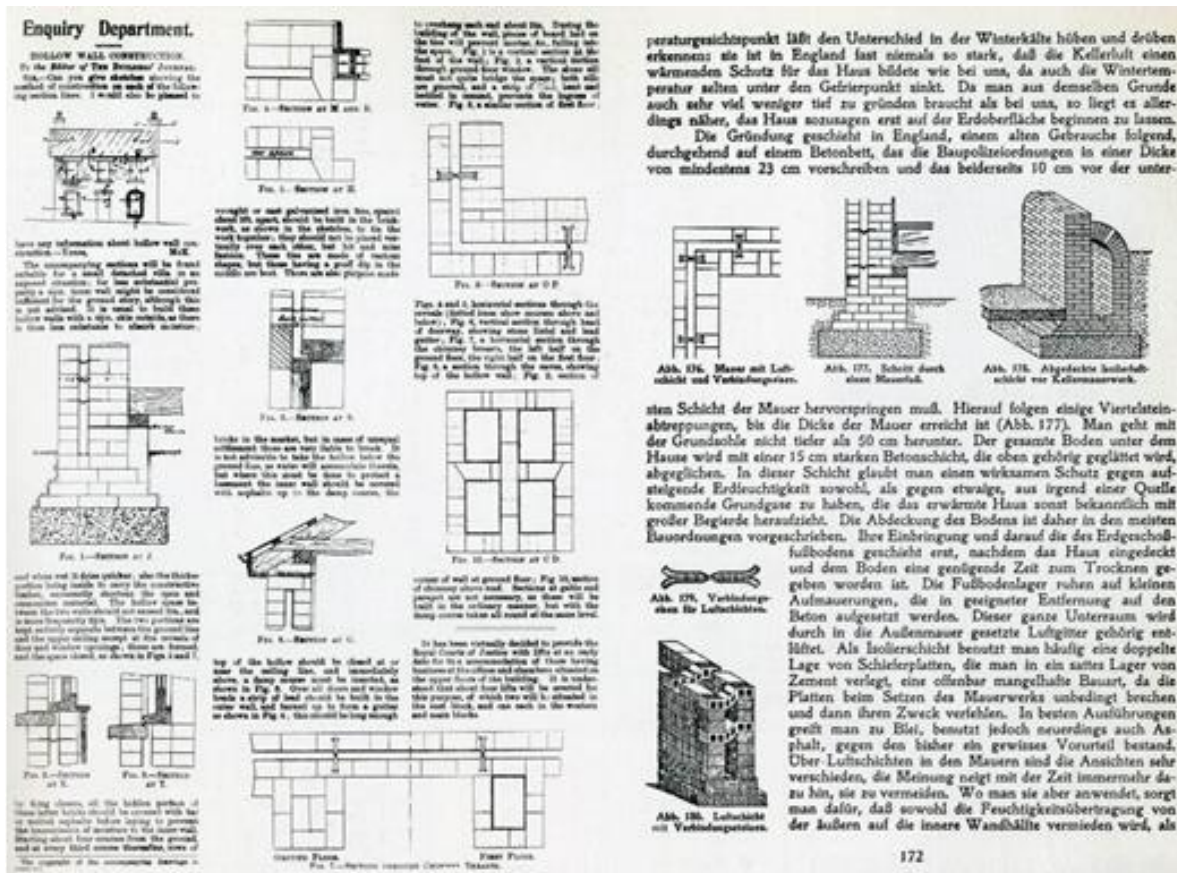


Fig.A.2 Descripción del muro inglés. (A11)

La evolución técnica posterior buscó obtener fachadas de hoja doble pero más ligeras pero sin renunciar a las características de protección alcanzadas. Los primeros ejemplos de este concepto se desarrollan en muros de fachada de albañilería de fábrica de ladrillo, como el denominado *cavity Wall*, muro de dos hojas de 100mm de espesor con una cámara intermedia de entre 100 a 250mm de espesor, desarrollado en Inglaterra hacia 1925. En este caso la hoja exterior estaba totalmente desvinculada mecánicamente de la hoja interior para evitar puentes higrotérmicos. Este modelo de muro de dos hojas tenía un ancho total de entre 225 y 300mm. La hoja exterior (de cerramiento) estaba conectada puntualmente a la hoja interior (de carga) con grapas de acero galvanizado (Fig.A.3). La función principal de la cámara de aire intermedia era evacuar las humedades que en algún momento consiguieran atravesar la hoja exterior. Las grapas de conexión entre las dos hojas presentan un goterón intermedio para asegurar que no sean paso de gotas de agua entre las dos hojas. La cámara de aire intermedia estaba ligeramente ventilada para facilitar la evaporación de la humedad que se acumulaba en la cámara.

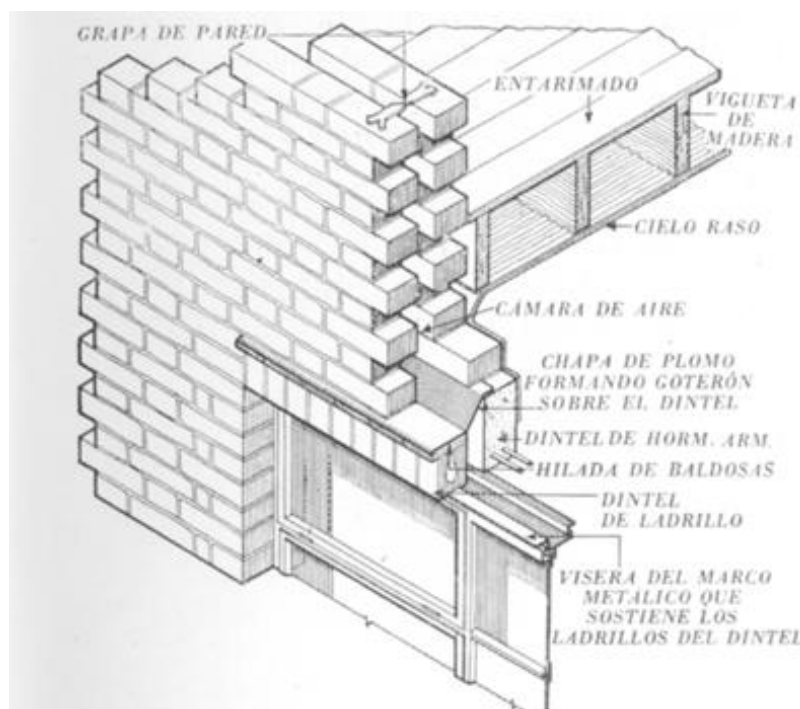


Fig.A.3 Descripción del muro inglés. Grabado extraído de “La construcción moderna” de E.G. Warland, publicado en España en 1947 (C30).

También hay que destacar el desarrollo del muro triple para fachadas concebido por los arquitectos *Auguste y Gustave Perret* 1920 (45) y aplicado principalmente durante el período comprendido entre

(45) “The sheds, of Voirin-Marioni Factory in Montataire” Publicación de la revista Technical Decomomo No. 31 Septiembre 2004 (pg 122).

las dos guerras mundiales, del que surgen posteriormente diversas variantes durante el periodo de reconstrucción posterior a la segunda guerra mundial. El auge y difusión de estos sistemas constructivos experimenta un nuevo paso de avance después de la crisis energética de los años 70 del S XX, que llevó al planteamiento de forma rigurosa y generalizada de soluciones de aislamiento térmico para reducir el consumo de energía destinada a la climatización de los edificios; se incidió especialmente en el desarrollo de los productos de aislamiento térmico, de los vidrios dobles con cámara de aire intermedia especiales y de los vidrios de baja emisividad.

1.2 El tabique pluvial

En las zonas del sur de Europa se desarrolla la solución específica del tabique pluvial que se caracteriza por el reducidísimo espesor de la hoja exterior que casi se considera un revestimiento ligero. Como revestimiento ligero se han utilizado tanto materiales permeables como impermeables.

El tabique pluvial se aplicaba específicamente a muros medianeros y azoteas sin aberturas, solución que impedía el paso del agua de la lluvia hacia el interior del edificio gracias al efecto benéfico de la cámara de aire intermedia ventilada que facilitaba la evaporación del agua que conseguía alcanzar la cámara de aire intermedia. Además la ventilación de la cámara posterior actúa como refrigerante de la hoja exterior sometida a la radiación solar y el elemento interior queda protegido de la radiación directa.

La hoja exterior o de revestimiento del tabique pluvial se moja intensamente con las lluvias y el viento, pero la cámara de aire intermedia impide la progresión del agua hacia el interior del edificio. El agua que llega a la cara interior de la hoja exterior de revestimiento resbala por gravedad y sobresale por las aberturas destinadas a la ventilación de la cámara de aire intermedia. La ventilación de la cámara de aire intermedia contribuye también al rápido secado del tabique pluvial cuando cesan las lluvias. Las exigencias de aislamiento térmico están conduciendo hacia la práctica de colocar capas de materiales específicos para este cometido que ocupan parcialmente el espesor de la cámara de aire intermedia ventilada.

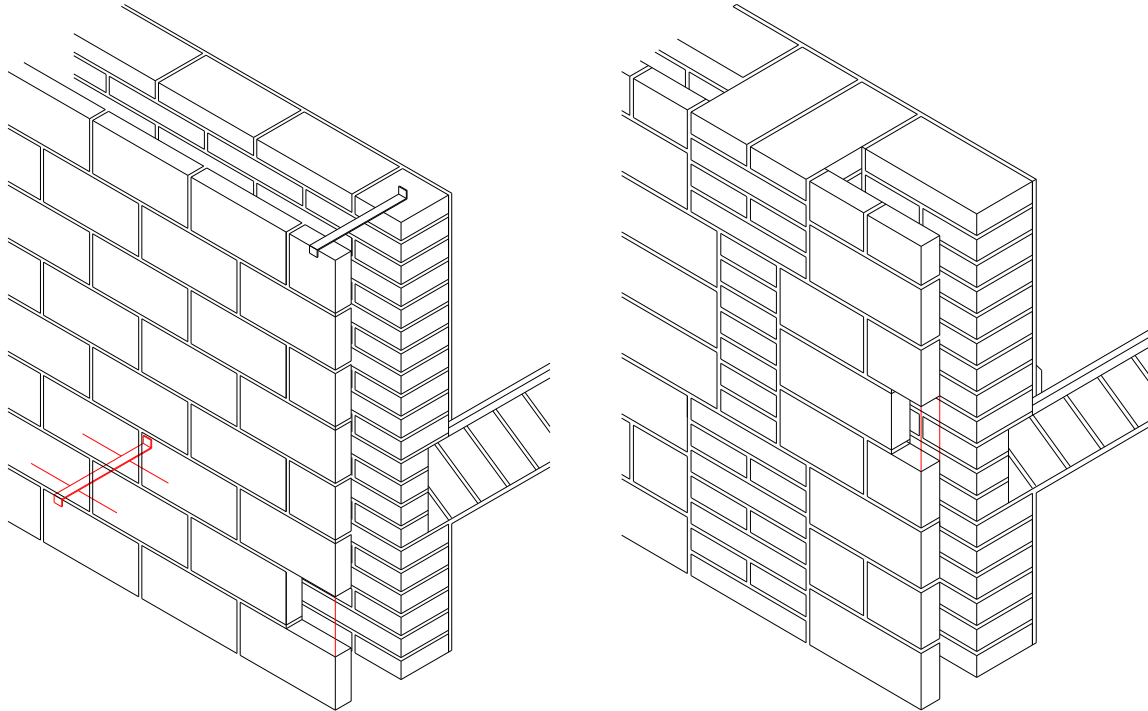


Fig.A.4 Isonometría del tabique pluvial. Se observa la primera hoja exterior libremente dilatante, el esquema muestra la solución habitual con apoyo en machones de la medianera (C31)



Img.A.1 Imagen tabique pluvial. En un edificio de viviendas en Barcelona España (D)

A continuación, se muestran algunos ejemplos de edificios recientes innovadores con fachadas de doble hoja:



Img.A.2 Edificio Parque de investigación Biomédica de Barcelona (PRBB). Fachada de lamas de madera, Arquitectos Manel Brullet y Albert de Pineda (C32)

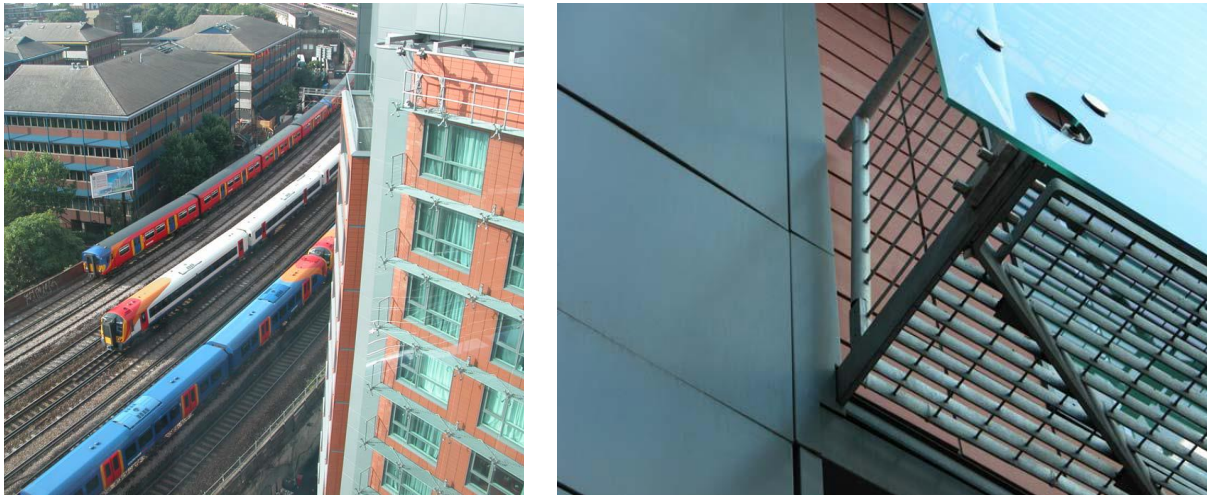


Img.A.3 Edificio Media-TIC Barcelona. Fachada realizada en ETFE permite el aprovechamiento del calor y ahorro energético en un 20%, Arquitecto Enric Ruiz-Gelic (C33)

En cuanto a la protección acústica del edificio en el caso de las fachadas de doble hoja, la orientación, forma y proporción de la fachada son factores componentes de gran relevancia en la capacidad de atenuación del sonido, especialmente en edificios situados en zonas de elevado nivel acústico como son las próximas a infraestructuras de transporte o vías urbanas de levado tránsito.



Img.A.4 Edificio Neven-DuMont-Schauberg publishing house. Vista pantalla acústica realizada frente del edificio en Colonia Alemania (C34)



Img.A.5 Fachada de edificio en Londres con una hoja extra de cristal. Atenuación del sonido producido por las vías del tren, las ventanas del edificio siguen siendo practicables (C35)

1.3 La fachada de doble cristal o Double Skin Facade (DSF)

La (DSF) es un cerramiento acristalado de fachada de doble hoja: una hoja de vidrio interior y otra hoja de vidrio exterior que a su vez normalmente está compuesta de dos capas acristaladas. Las características de la cámara de aire intermedia (diseño, ventilación y espesor) entre las dos hojas acristaladas se determinan en cada proyecto. La ventilación de la cámara de aire intermedia se puede producir tanto hacia el exterior como hacia el interior del edificio. La ventilación de la cámara de aire intermedia se produce por medio de aberturas que se ubican en cada una de las hojas que componen la fachada. El aire de la cámara de aire intermedia se calienta a lo largo del día y genera movimientos de convección dentro de la cámara. Este aire caliente puede ser disipado hacia el exterior o hacia el interior como aire térmicamente pretratado en el caso de climas fríos. La (DSF) tiene pues un ámbito de uso muy ligado a la mejora de la eficiencia energética en climas fríos. La doble fachada o (DSF) es también conocida como “fachada colectora” empleada como un sistema pasivo de obtención de energía.

Un temprano ejemplo de este sistema se encuentra en la ventana de triple hoja particionada propuesta por el arquitecto Alvar Aalto para el sanatorio de Paimio (Finlandia) destinado a enfermos de tuberculosis (1929-1933) (Fig.A.5).

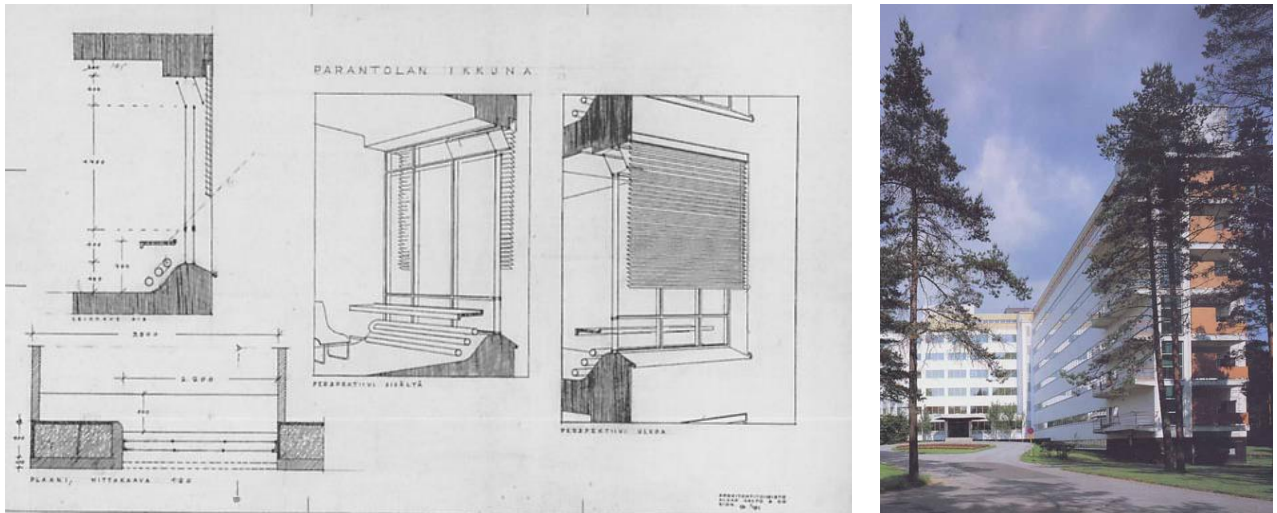


Fig.A.5 Ed. Sanatorio Paimio 1. Sección y vista frontal de las ventanas tipo de las habitaciones de pacientes. Arquitecto Alvar Aalto, Finlandia 1929-1933 (C35)

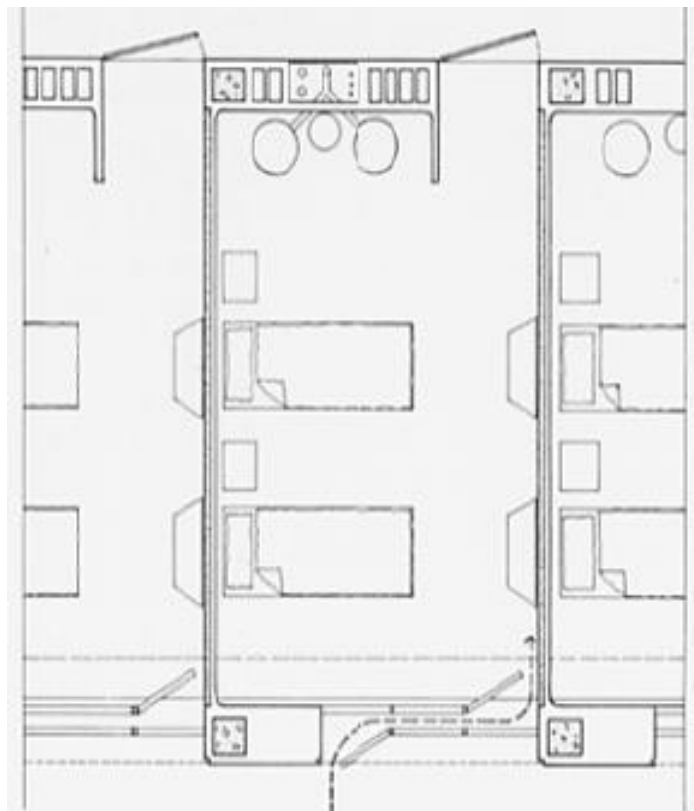


Fig.A.6 Ed. Sanatorio Paimio 2. Vista en planta de las habitaciones, funcionamiento de la ventana (C35).

Otro ejemplo a destacar es el *Mur neutralisant* (Fig.A.7), solución propuesta por el arquitecto Le Corbusier hacia 1933 para *Le Cité de Refuge* (Francia) (Img.A.6). La solución consiste en un sistema de circulación forzada de aire caliente por el interior de una cámara intermedia situada entre dos hojas de vidrio. El objetivo de este sistema era obtener una temperatura artificial en el interior de los

espacios del edificio independiente de la temperatura exterior. En el año 1933 no fue posible la materialización de esta idea y la fachada entera fue rediseñada con ventanas practicables convencionales. Sin embargo se puede considerar el precedente conceptual de los sistemas actuales de fachada múltiple con interposición de una cámara de aire intermedia para regular mejor los intercambios térmicos entre el interior y el exterior del edificio.

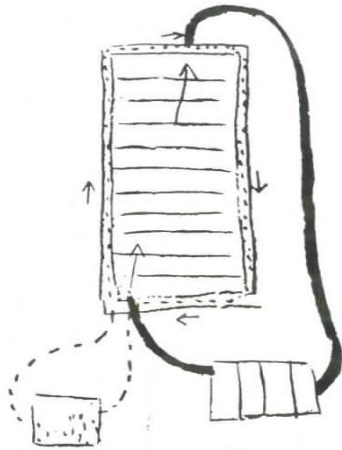


Fig.A.7 Esquema mur neutralisant (A1).



Img.A.6 Le cité de Refugie. Imagen actual de la fachada construida. Arquitecto Le Corbusier Francia 1930 (C35).

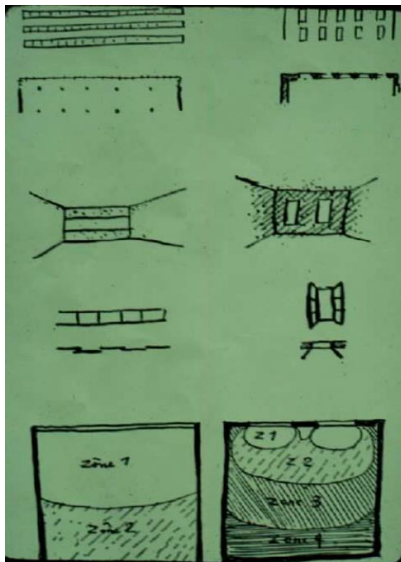


Fig.A.8 Mur neutralisant. Principio de funcionamiento por zonas (C36).

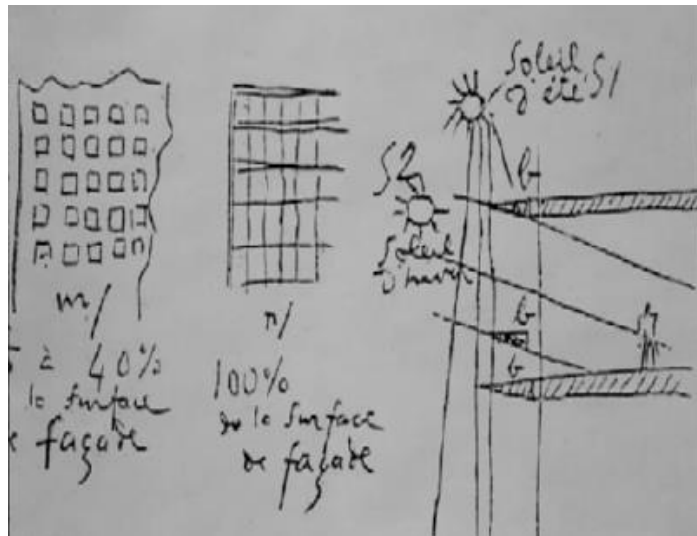


Fig.A.9 Eficiencia de la fachada colectora. (C36).

La aplicación de cerramientos dobles de vidrio se inició con la tecnología de las ventanas múltiples de hojas practicables, desarrollada y aplicada en los siglos XIX y XX especialmente en Europa central. A finales de 1950 se implementó la tecnología de ventana *Box Windows* donde las dos hojas de vidrio

están conectadas mecánicamente y pueden actuar como una sola ventana permitiendo simultáneamente la ventilación natural y el paso de la luz solar.

Hacia los años 40 el arquitecto Buckminster Fuller ya planteó también algunos de estos conceptos mediante la propuesta de una estructura tridimensional de cerramiento en forma de domo. El cerramiento de este domo era de doble hoja con una cámara de aire intermedia donde se desarrollaba pasivamente un microclima independiente, El efecto controlado del viento y del sol sobre el cerramiento del domo era el único mecanismo para generar el control climático del interior, sea el enfriamiento, la ventilación o la calefacción (46). Estas ideas no pudieron ser llevadas inmediatamente a la realidad hasta la construcción de algunos ejemplos de prototipos de arquitectura solar en los años 60 y 70 en casas independientes de autoconstrucción. En el capítulo 6 de la tesis se encuentra información ampliada sobre el funcionamiento del sistema (*DSF*).

Otro ejemplo destacable es el sistema *Polivalent Wall* desarrollado por Richard Rogers y Mike Davies en 1981, concepto en el que se plantea una fachada formada mediante diferentes hojas con de vidrio que proporciona una especial protección frente a la radiación solar. La regulación de la fachada es automática según las condiciones existentes, tanto exteriores como interiores, Se aprovecha para ello la capacidad colectora de energía de los muros vidriados.

(46) Knaack Ulrich, Klein Tillmann, Bilow Marcel, Auer Thomas. Texto interpretativo Capítulo 6 “Adaptive facades” libro: “Facades Principles and Construction”. (pg.89)

1.4 Fuentes y referencias Anexo A

Codificación de fuentes y referencias

Fuente A: Libro
Fuente B : Artículo (publicación, paper, congreso, etc)
Fuente C: Internet
Fuente D: Elaboración propia de Andrea Niampira Daza
Fuente D': Elaboración propia en base a resultados o varias consultas
Fuente E: Tesis
Fuente F: Ensayos acústicos

A1: Knaack, Ulrich; Klein, Tillmann; Auer Thomas. *Façades principles of Constructions* Ed. Birkhauser 2007

A11: Bernstein, D; J.P, Champetier; Peiffer, F. *Construcción. Nuevas técnicas en la obra de fábrica. El muro de dos hojas en la arquitectura de hoy* Ed. Gustavo Gili. 1985

A2: Hausladen, Gerhard; de Saldanha, Michael; Liedl, Petra. *Climate Skin*. Ed. Birkhauser 2006

C30: <http://www.bemsite.com/main/articulo/n91>

C31: <http://www.hispalyt.es/cd1/hispalyt/071.htm>

C32: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2012/05/29/parc-de-recerca-biomedica-de-barcelona-prbb-pinearq-brullet-de-luna-arquitectes/>

C33: <http://de.construmatica.com/media-tic-la-arquitectura-empatica/>

C34: <http://spa.archinform.net/projekte/2893.htm>

C35: <http://www.culture.gouv.fr/culture/inventai/itiinv/archixx/imgs/p27-01.htm>

C36: *The tectonics of the double skin: Understanding double façade systems*. Meyer Boake Terri Waterloo Architecture University of Canada. http://www.tboake.com/arch_crs/f09/226_complete_double_2009.pdf

Listado de figuras e imágenes Anexo A

Fig.A.1 Ejemplo precedentes de muros dobles. (A11).....	284
Fig.A.2 Descripción del muro inglés. (A11).....	284
Fig.A.3 Descripción del muro inglés. (C30).....	285
Fig.A.4 Isonometría del tabique pluvial. (C31).....	287
Fig.A.5 Ed. Sanatorio Paimio 1. (C35).....	290
Fig.A.6 Ed. Sanatorio Paimio 2. (C35).....	290
Fig.A.7 Esquema mur neutralisant (A1).....	291
Fig.A.8 Mur neutralisant. (C36).....	291
Fig.A.9 Eficiencia de la fachada colectora. (C36).....	291
Img.A.1 Imagen tabique pluvial. En un edificio de viviendas en Barcelona España (D).....	287
Img.A.2 Edificio Parque de investigación Biomédica de Barcelona (PRBB). (C32).....	288
Img.A.3 Edificio Media-TIC Barcelona. (C33).....	288
Img.A.4 Edificio Neven-DuMont-Schauberg publishing house. (C34).....	288
Img.A.5 Fachada de edificio en Londres con una hoja extra de cristal. (C35).....	289
Img.A.6 Le cité de Refugie. (C35).....	291

ANEXO B

INFORME CAMPAÑA 1

Ensayos In-situ

ANEXO B INFORME DE ENSAYO ACÚSTICO IN SITU: Evaluación de prototipos para sistemas de (FVL)

Comportamiento Acústico de distintos Prototipos de (FVL) al Variar el Grado de Ventilación de la Cámara y la Constitución de la Hoja Exterior

Doctoranda, Andrea Niampira Daza
Director, Joan Lluís Zamora i Mestre

Programa de doctorado “Àmbits de Recerca en l’Energia i el Medi Ambient a l’Arquitectura”.
Departament de Construccions Arquitectòniques I
Universitat Politècnica de Catalunya
Sant Cugat del Vallès (Barcelona)
Septiembre de 2011

PRESENTACIÓN

Este informe está basado en los ensayos realizados como parte experimental de la tesis doctoral, en curso “Comportamiento acústico de la fachada ventilada con revestimiento ligero: Análisis de las características de la ventilación”.

Los ensayos se realizaron en el mes de febrero de 2011, para ello se contó con la colaboración de las empresas *Knauf* y *Knauf insulation*, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés ETSAV y del Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería industrial y Aeronáutica de Terrassa ETSEIAT ambas instituciones de la Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona (TECH).

TABLA DE CONTENIDO ANEXO B

PRESENTACIÓN	299
1. ANTECEDENTES DE LOS ENSAYOS	301
1.1 Protección acústica contra la inmisión de ruido exterior	301
1.2 Análisis de la normativa actual.....	301
1.3 Características acústicas de una fachada ventilada.....	303
2. OBJETIVO DE ENSAYOS.....	304
3. LUGAR DE ENSAYO Y CONSIDERACIONES PREVIAS.....	305
3.1 Características generales del tramo de fachada	305
3.2 Características de la sala.....	308
3.3 Acondicionamiento previo de la fachada base y de la sala.....	309
4. DEFINICIÓN DE LOS PROTOTIPOS A ENSAYAR.....	311
4.1 Diseño de la subestructura general	311
4.2 Descripción de los prototipos	314
4.3 Variabilidad del grado de ventilación de la cámara de aire intermedia de aire en los prototipos.....	317
5. MÉTODO DE ENSAYO.....	317
6. EQUIPO DE MEDICIÓN.....	318
7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	318
7.1 Selección y posición de los puntos de medida en el interior de la sala	318
7.2 Condiciones al exterior.....	320
7.3. Fechas y tiempos de realización	322
8. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES	323
8.1 Mediciones realizadas en los diversos prototipos.....	325
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES	327
9.1 Medición 1, Fachada existente (FI), Sin los prototipos instalados Ensayo número 4	327
9.2 Mediciones (FVL) Fa d=100 Ensayo número 3	330
9.3 Mediciones (FVL) Fb d=100 Ensayo número 2.....	333
9.4 Mediciones, sistema de (FVL) configuración (Fd) Ensayo número 1.....	338
10 RESUMEN DE MEDIDAS	341
APÉNDICE 1.....	342
APÉNDICE 2.....	343
REFERENCIAS, FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA	350

1. ANTECEDENTES DE LOS ENSAYOS

Los ensayos se han desarrollado como parte de la tesis doctoral, la cual se plantea dentro del ámbito de investigación aplicada dirigida al análisis del comportamiento acústico de los sistemas de fachada ventilada. El objetivo es el planteamiento de mejoras e innovaciones con posibles aplicaciones a nivel comercial tanto en obra nueva como en rehabilitación de edificios.

1.1 Protección acústica contra la inmisión de ruido exterior

La problemática de la inmisión del ruido exterior en el interior de los edificios tiene tendencia al aumento por la dinámica del entorno urbano actual hacia la formación de grandes núcleos urbanos, donde las fuentes de ruido son difíciles de controlar o atenuar por su complejidad de emisión y espectro.

1.2 Análisis de la normativa actual

En España, como en el resto de Europa, el tema de la protección acústica es aún relativamente reciente y está en proceso de evolución continua y más especialmente cuando se trata de regularización de nuevos sistemas como es la fachada ventilada.

El artículo *Los sistemas de cerramiento de fachadas ventiladas* y el CTE [B.1] establece 3 niveles de características prestacionales aplicables a un sistema constructivo alternativo como es el caso de la fachada con cámara ventilada.

1. Características que se encuentran plenamente definidas en los DB, incluido su valor límite o criterio de evaluación y su método de verificación y que por tanto se pueden justificar por aplicación directa de los DB del CTE.

2. Características que se encuentran parcialmente definidas en los DB, en este sentido podemos encontrar:

A. Características indicadas en los DB que tienen definido el valor límite o criterio de evaluación pero no el método de verificación.

B. Características indicadas en los DB que tienen definido el método de verificación pero no el valor límite o criterio de evaluación.

C. Características indicadas en los DB que no tienen definido ni el valor límite o criterio de evaluación ni el método de verificación.

3. Características que, siendo aplicables al sistema constructivo alternativo, no se encuentran definidas dentro de los DB pero sí se encuentra definida la exigencia básica en el CTE.

Nivel de definición	Nivel 1	Nivel 2			Nivel 3
Exigencia básica	Sí	Sí			Sí
Característica prestacional	Sí	Sí			No
		a	b	c	
Valor límite o criterio de evaluación	Sí	Sí	No	No	No
Método de verificación	Sí	No	Sí	No	No

Tabla B. 1 Nivel de definición de las exigencias básicas para la (FVL). Características prestacionales aplicables a las soluciones alternativas de sistemas constructivos [B.1]

A continuación se establecen los niveles de exigencia de los documentos básicos para los sistemas de fachada ventilada donde se muestra la aplicabilidad separando el sistema en los elementos hoja interior y hoja exterior según el grado de competencia en cada uno.

Se observa que en algunos casos incluye los dos elementos en los diferentes niveles de exigencia.

En el caso de la exigencia de protección frente al ruido HR, esta definida como nivel 1 puesto que se establecen los valores de requerimiento y verificación, sin embargo el criterio de evaluación es aplicable solo a la hoja interior como único elemento de cumplimiento, mientras que la hoja exterior no cuenta como elemento de mejora del comportamiento acústico de la fachada.

Requisito	Exigencia	Característica	Aplicable a	Nivel de definición según tabla 2
Seguridad estructural (SE)	SE1: Resistencia y estabilidad	Resistencia mecánica y estabilidad	Hoja interior y Hoja exterior	Nivel 1
	SE2: Aptitud de servicio	Deformación (flechas y desplomes)	Hoja interior y Hoja exterior	Nivel 2
Seguridad en caso de incendio (SI)	SI1: Propagación interior	Reacción al fuego de la cara interior	Hoja interior	Nivel 1
	SI2: Propagación exterior	Reacción al fuego de la cara exterior	Hoja exterior	Nivel 1
		Resistencia al fuego	Hoja interior	Nivel 1
Higiene, salud y protección del medio ambiente (HS)	HS1: Protección frente a la humedad	Grado de impermeabilidad al agua de lluvia	Hoja interior Hoja exterior	Nivel 2
		Capacidad de drenaje de la cámara de aire	Hoja exterior	Nivel 2
		Limitación de condensaciones	Hoja interior	Nivel 1
	Sustancias peligrosas	Contenido o desprendimiento de sustancias peligrosas	Materiales de los componentes	Nivel 3
Seguridad de utilización y accesibilidad (SUA)	SUA2: Riesgo de impacto	Resistencia a impactos	Hoja interior Hoja exterior	Nivel 3
	SUA8: Riesgo de acción del rayo	Equipotencialidad	Hoja interior Hoja exterior	Nivel 3
Protección frente al ruido (HR)	HR: Protección contra el ruido	Aislamiento al ruido aéreo procedente del exterior	Hoja interior	Nivel 1
Ahorro de energía y aislamiento térmico (HE)	HE1: Limitación de la demanda energética	Aislamiento térmico	Hoja interior	Nivel 1
		Permeabilidad al aire	Hoja interior	Nivel 2
Otros requisitos adicionales	Durabilidad	Corrosión	Componentes metálicos	Nivel 3
		Comportamiento a envejecimiento acelerado	Materiales de los componentes	Nivel 3
	Identificación de los componentes	Características de los componentes relacionadas con las prestaciones del sistema	Componentes	Nivel 2

Tabla B. 2 Requisitos, exigencias básicas y características prestacionales aplicables a los cerramientos de la (FVL) [B.1]

La utilización de los sistemas de fachada ventilada ha ido aumentando su aplicación en la construcción actual, especialmente en la rehabilitación de edificios, sin embargo, su inclusión en el código técnico no está muy definida.

Una de las opciones que tienen las empresas fabricantes de sistemas de fachada con cámara ventilada es disponer de un documento de adecuación (DAU) expedido por el ITEC o (DIT) expedido por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja o el (ETA) *European Technical Approval Guidelines* a nivel europeo, que analiza las soluciones constructivas puntuales de los materiales, pero que en el caso de los fabricantes, (tanto del sistema completo como de sus componentes), el aspecto acústico no es de mayor relevancia.

1.3 Características acústicas de una fachada ventilada

Dependiendo de los aislamientos y de las superficies respectivas, tanto de su carpintería como de su parte ciega, el DB-HR fija un aislamiento global mínimo para la fachada (solo proveniente de la

aportación de la hoja interior, ya que la cámara por estar ventilada no está contemplada) de 43 dBA con una masa mínima por unidad de superficie de 26 kg/m².

En el documento: Manual Básico de Fachadas Ventiladas y Aplacados [B2] se hace referencia a un estudio experimental básico del aislamiento a ruido aéreo de una fachada ventilada montada en un muro soporte tipo. El ensayo propone analizar los siguientes aspectos:

- Mejora acústica introducida por el mayor o menor espesor de la cámara, considerando también la posibilidad de que exista o no un material absorbente en su interior.
- Influencia de las juntas abiertas o cerradas entre paneles de la hoja ligera exterior.
- Influencia de las características mecánicas y densidad superficial de la masa del panel.
- Estudio experimental de la transmisión de sonido a través del anclaje.

Como se muestra en los casos anteriores de algunos análisis realizados por expertos sobre la normativa actual de la fachada ventilada y sus características, hay aspectos donde no se proporciona valores de uso restando importancia a su posible efectividad acústica el cual es un camino a explorar, durante el proceso de desarrollo del trabajo de ésta tesis.

2. OBJETIVO DE ENSAYOS

La realización de los ensayos in-situ hacen parte de la fase práctica de la tesis doctoral. Los sistemas de fachada ventilada ligera utilizados actualmente, proporcionan diferentes niveles de protección al edificio; en el aspecto acústico, suponen un incremento en la protección a la inmisión de ruido aéreo exterior por tratarse de un cerramiento doble, sin embargo, los diseños usados para el desarrollo del sistema, aunque existen diversas marcas y materiales, no ofrecen mayores variaciones alternativas de sus componentes en función del avance y mejoramiento de los niveles de protección (hoja exterior y composición de la cámara ventilada).

Teniendo en cuenta que la investigación de la que hace parte éste trabajo, está enfocada a la evaluación del aspecto acústico del sistema de la (FVL), se propone la innovación del modelo estándar existente (cámara de 2cm mínimo de espesor normalmente muy abierta en casi todos los extremos y la hoja exterior modulada dependiendo del material utilizado con juntas abiertas o cerradas).

La intervención de la fachada ligera ventilada, comienza por la cámara, proponiendo un espesor de 10cm, así como la variación de apertura para su ventilación (la cual es la misma para todos los sistemas propuestos) y en la hoja exterior variando la composición del cerramiento, dando paso a los 3 prototipos desarrollados, los cuales fueron elaborados e instalados en una fachada real, en este caso la

sección de una fachada existente en uno de los edificios de la ETSAV, para posteriormente evaluar su capacidad a través de ensayos acústicos.

El objetivo de la realización de los ensayos, es hacer una aproximación de la evaluación comparada in situ del comportamiento acústico de los prototipos propuestos de fachada con cámara de aire ventilada: **Fa** sistema continuo fachada de hoja ligera con juntas cerradas entre placas, **Fb** sistema continuo fachada de hoja ligera con juntas abiertas entre placas y **Fd** sistema fachada de hoja ligera con lamas.

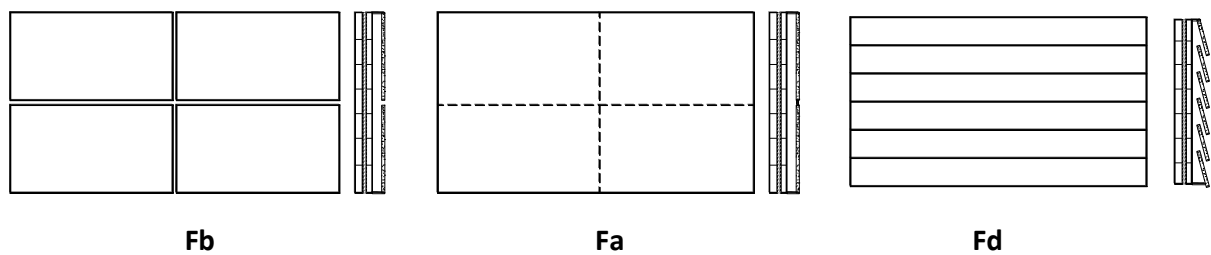


Fig.B. 1 Propuesta de la hoja exterior de la (FVL) a ensayar. (D)

3. LUGAR DE ENSAYO Y CONSIDERACIONES PREVIAS



Img.B.1 Vista aérea Edificio ETSAV. Sant Cugat del Vallès (B.3)



Img.B.2 Sector de ensayo en la fachada norte (D)

La serie de ensayos in-situ se llevó a cabo en un tramo de la fachada norte del edificio de aulas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura ETSAV en Sant Cugat del Vallès.

3.1 Características generales del tramo de fachada

La zona de fachada donde se realizó la experimentación no tiene aberturas, la cual se eligió precisamente para evitar transmisiones de flancos por ventanas. Sin embargo, cabe citar que por la mitad de la fachada y de la sala posterior hay una junta de dilatación del edificio (ésta junta es la unión

de la parte existente del edificio con una nueva construida en otro periodo posterior). (Descripción del edificio ver Anexo 2) La superficie total del tramo de fachada de evaluación es de 57.88 m².

La cubierta del edificio tiene unos lucernarios con aberturas de ventilación en los extremos.

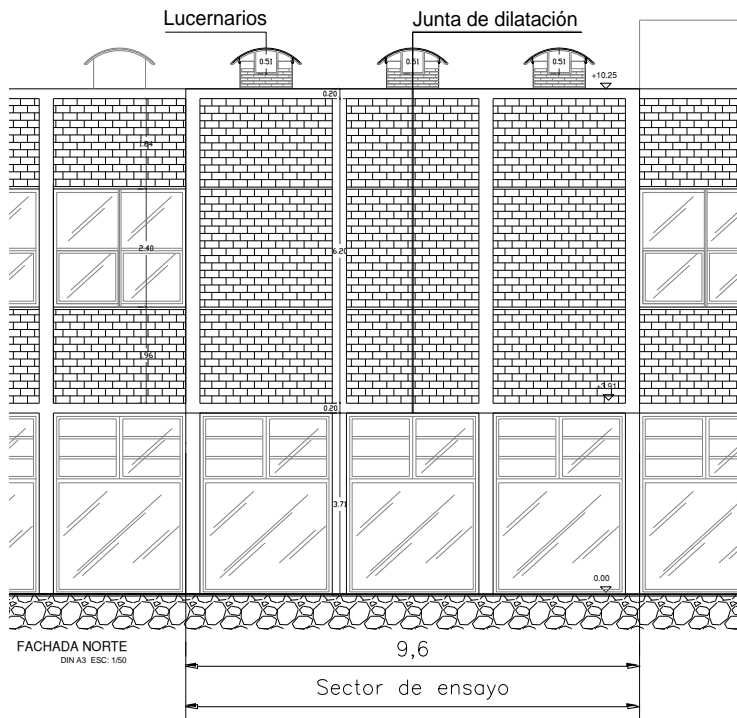


Fig.B. 2 Detalle en alzado del tramo de fachada (D')

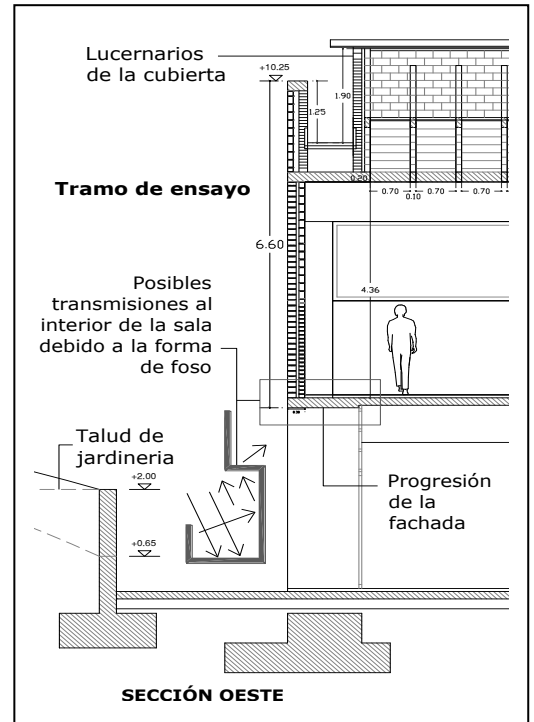


Fig.B. 3 Sección del tramo de fachada (D')



Img.B.4 Vista fachada con junta de dilatación (D)



Img.B.3 Lucernarios de la cubierta
Detalle de las aberturas de ventilación (D)

3.1.1 Descripción del muro base

La fachada base donde se fija la subestructura para el montaje de los prototipos de fachada con cámara ventilada, es un muro doble de obra de albañilería de 30cm de espesor total constituido por una hoja interior de ladrillo hueco formato catalán de 9cm **2**, una cámara de aire cerrada vacía de 5 a 7cm **3**, y una hoja exterior de 15 cm de ladrillo hueco **4**.

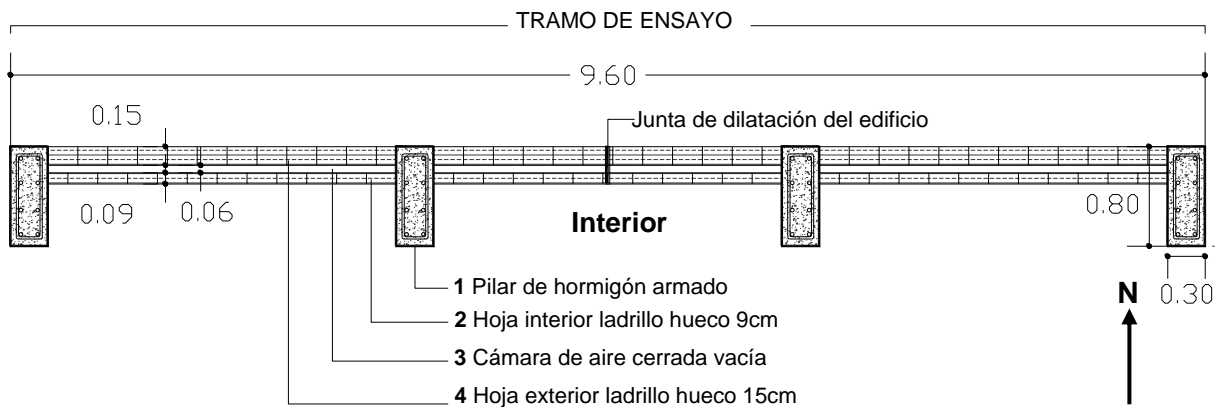


Fig.B. 4 Detalle en planta del tramo de ensayo (D')

La hoja interior de la fachada base tiene una particularidad y es que contiene 2 tipos de ladrillo: una parte de ladrillo hueco y otra de ladrillo macizo.

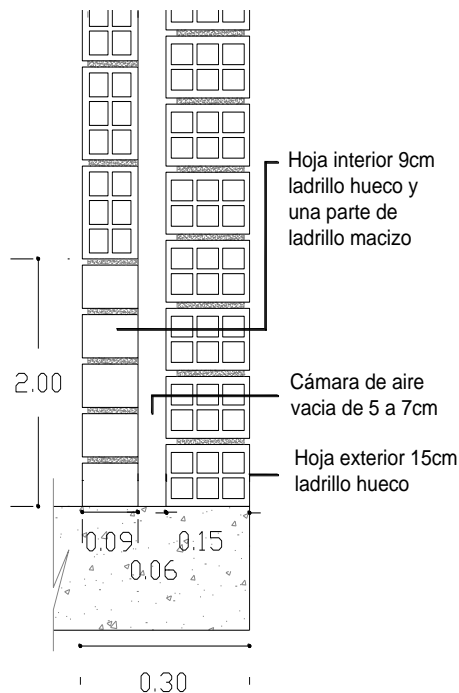
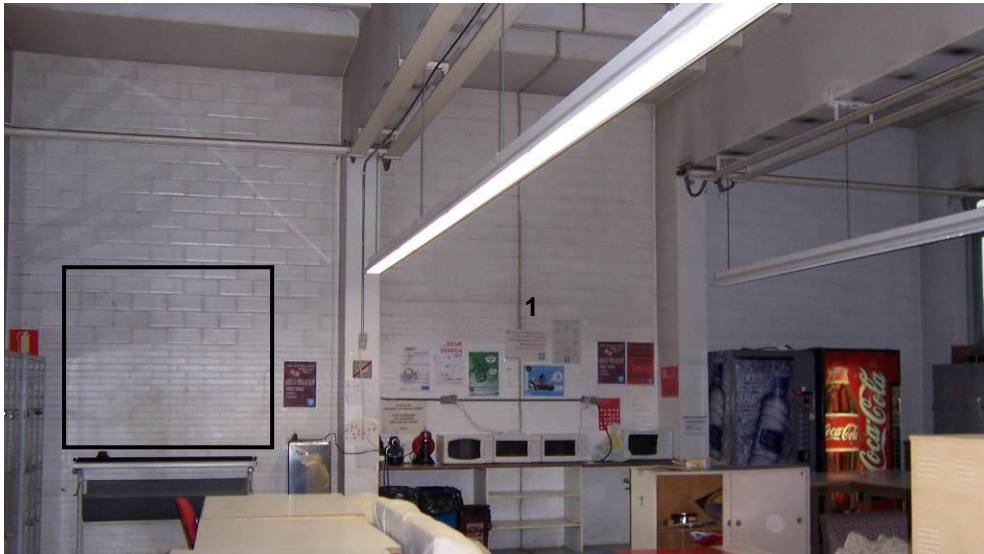


Fig.B. 5 Detalle sección muro base (D)



Img.B.5 Vista interior del tramo de fachada y de la sala interior. El recuadro muestra los dos tipos de ladrillo, se observa también la junta de dilatación a lo largo de la sala 1 (D)

3.2 Características de la sala

La sala que limita interiormente el tramo de la fachada objeto de ensayo, está ubicada en la segunda planta del edificio de aulas de la ETSAV y está destinada al descanso de los estudiantes. La superficie de la sala en planta es de 132.87m², con una longitud interior de 14.20m por 9.30m de ancho.

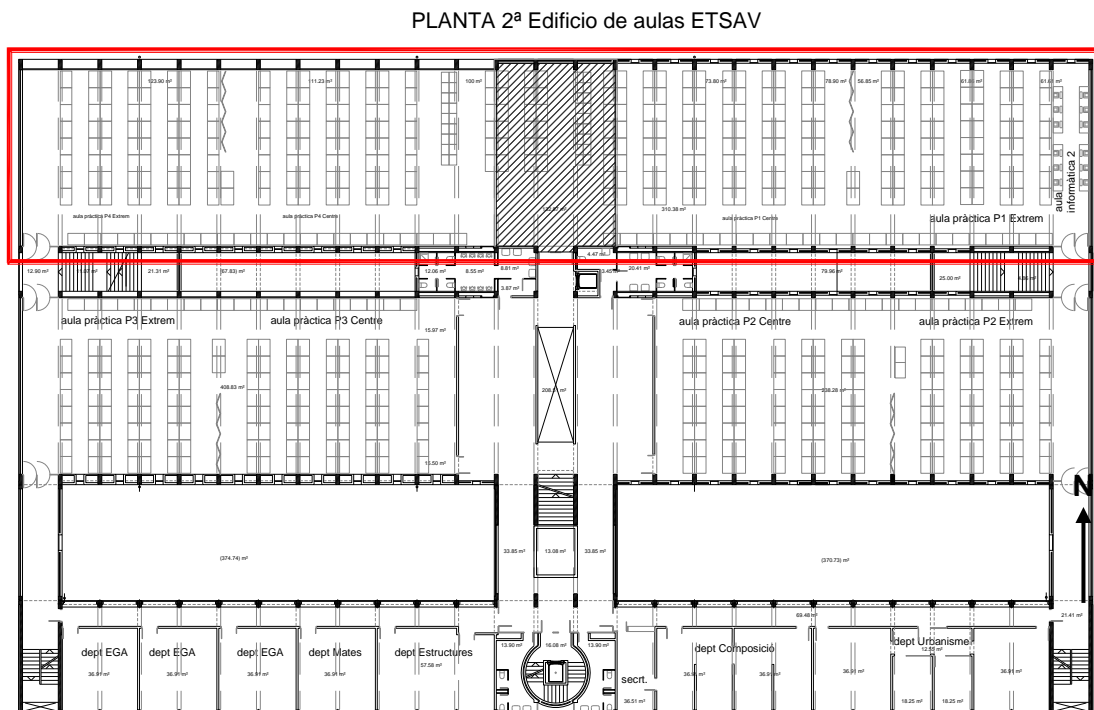


Fig.B. 6 Planta 2ª edificio ETSAV (el área sombreada corresponde al sector de ensayo) (D')

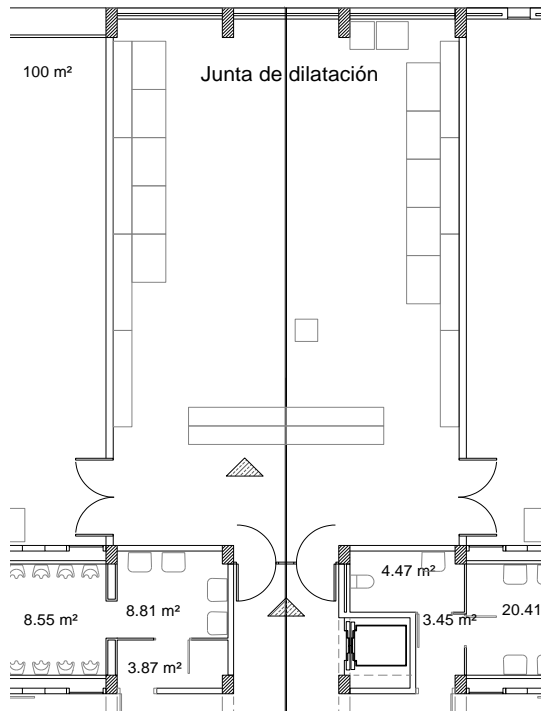


Fig.B. 7 Sala de ensayo planta 2º (D')



Img.B.6 Acceso a la sala (D)

3.3 Acondicionamiento previo de la fachada base y de la sala

Debido a las condiciones “reales” concretas del tramo del edificio en el que se realiza la experimentación, fue recomendable realizar un acondicionamiento previo para homogenizar el aislamiento acústico de la sala con respecto a las posibles aberturas, ya que eran potenciales vías de transmisión secundaria indirecta especialmente del sonido exterior.

La solución debía ser de fácil colocación y remoción ya que el experimento es temporal y tenían que reestablecerse las condiciones de los espacios de intervención tanto al interior como al exterior de la fachada.

Para el tratamiento de la junta de dilatación se recubrió por etapas el interior de la sala, usando bandas de lana mineral Ultravent Black de Knauf, el mismo instalado en la fabricación de los prototipos de fachada.

En parte del techo de la sala hay unos lucernarios del edificio que tienen una geometría compleja y un aislamiento débil acústicamente que podía afectar las mediciones realizadas durante los ensayos, en éste caso, se optó por instalar paneles rígidos de lana de roca Hardrock- E-391 de espesor 40mm de Rockwool cortados a la medida de cada uno de espacios de lucernario 70 x 50cm.



Img.B.7 Acondicionamiento previo de la sala. Colocación de bandas de lana mineral Ultravent en la junta de dilatación fijadas con cinta adhesiva (D)

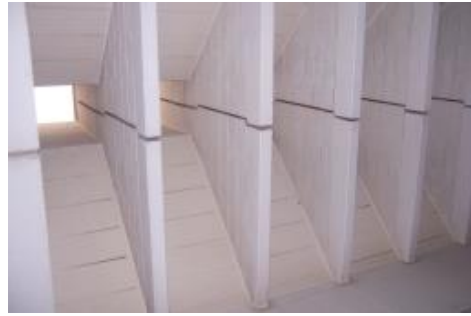


Foto A.8 Vista interior de los lucernarios de la sala. Antes de la intervención (D)



Img.B.8 Colocación de paneles rígidos en los lucernarios. Paneles rígidos de lana de roca instalados a presión para el acondicionamiento de la sala (D)

En el exterior estos lucernarios tienen una cubierta de sección tipo bóveda realizada en policarbonato extruido transparente, la cual se revistió con una membrana acústica tipo Danosa de fibras de algodón prensadas con un recubrimiento de betún por una cara.



Img.B.10 Vista exterior de los lucernarios antes de los ensayos (D)



Img.B.9 Acondicionamiento de los lucernarios para los ensayos (D)

4. DEFINICIÓN DE LOS PROTOTIPOS A ENSAYAR

4.1 Diseño de la subestructura general

Los prototipos ensayados fueron diseñados previamente tomando como punto de partida el sistema *Aquapanel Outdoor W682E* Revestimiento exterior de fachada con montantes de *Knauf*.

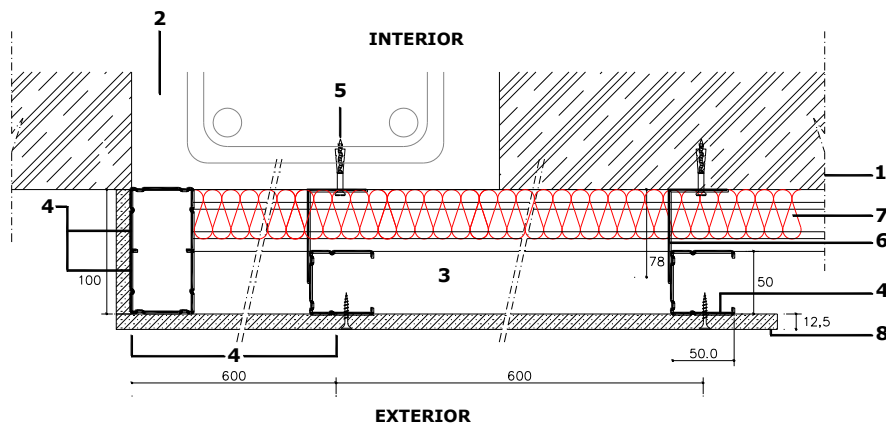


Fig.B. 8 Detalle en planta de la sección de la subestructura para la construcción de los prototipos de (FVL) Fa, Fb y Fd (D')

El sistema usado para éste ensayo está compuesto por una subestructura de perfiles metálicos constituida mediante montantes (acero galvanizado) de 50x50mm **4** y escuadras de fijación de 78mm **6**, fijadas con tornillos **5**, a un muro base **1** y una hoja exterior de placas GRC de Aquapanel de 2.40m x1.20m x12.5mm de espesor **8**, las cuales están atornilladas a la subestructura.

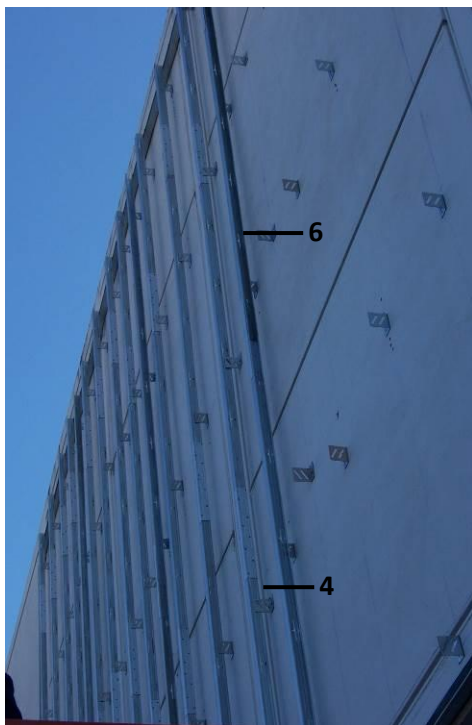
La cámara intermedia **3**, se construyó con un espesor de 100mm obtenida mediante la unión de dos perfiles montantes base de 50mm en los extremos verticales del sistema para así proporcionar el cerramiento exterior de la cámara (en todos los prototipos la cámara esta totalmente cerrada en los perímetros laterales).

En el interior de la cámara se incluyó una capa de lana mineral de 40mm de Knauf Insulation (**7**) en toda la superficie de ensayo del muro base. Normalmente esta capa se adhiere a la cara exterior de la hoja interior mediante unos tacos de fijación, sin embargo dadas las condiciones de temporalidad del ensayo, ésta capa fue simplemente adosada dentro de la cámara para no afectar demasiado el muro base.

LEYENDA Figura B.8 y Img B.11 y B.12

- 1- Muro base existente (muro de obra de fábrica de ladrillo hueco)
- 2- Pilar de hormigón armado.
- 3- Cámara de 100mm, cerrada a los lados de toda la fachada.
- 4- *Montantes de 50 x 50mm. (Distancia entre montantes 600mm).
- 5- Tornillos de fijación.
- 6- *Escuadras de fijación de 78mm.
- 7- Lana mineral Ultravent Black de Knauf insulation.
- 8- Placa Aquapanel GRC de 12,5mm de espesor.

*Los perfiles y las escuadras utilizados en la construcción de la subestructura son de 0,7mm de espesor de acero galvanizado tipo Z275.



Img.B.12 Colocación de la subestructura de la (FVL) (D)



Img.B.11 Colocación del aislamiento de la cámara de la (FVL) (D)

Los tres prototipos desarrollados tienen en común la misma subestructura y características de montaje: la cámara, el espesor y las aperturas para el paso interior del aire.

Sin embargo, la configuración **Fd** cerramiento continuo exterior de hoja ligera tipo lamas, tiene una variación adicional en la subestructura, para colocar las lamas en los montantes se adosaron unos perfiles auxiliares (del mismo ancho de los montantes, 50mm) de 290mm de largo para lograr así el grado necesario de inclinación de las lamas, las cuales se iban solapando 50mm con 10mm de distancia entre lama y lama.

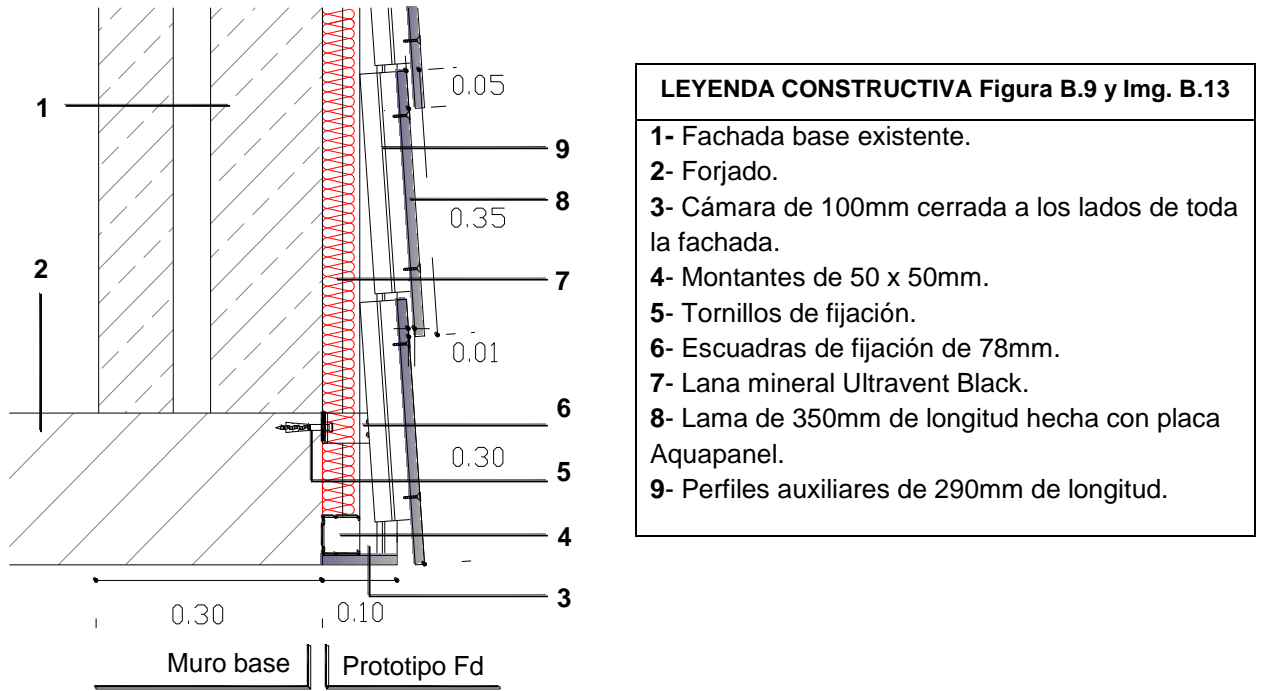
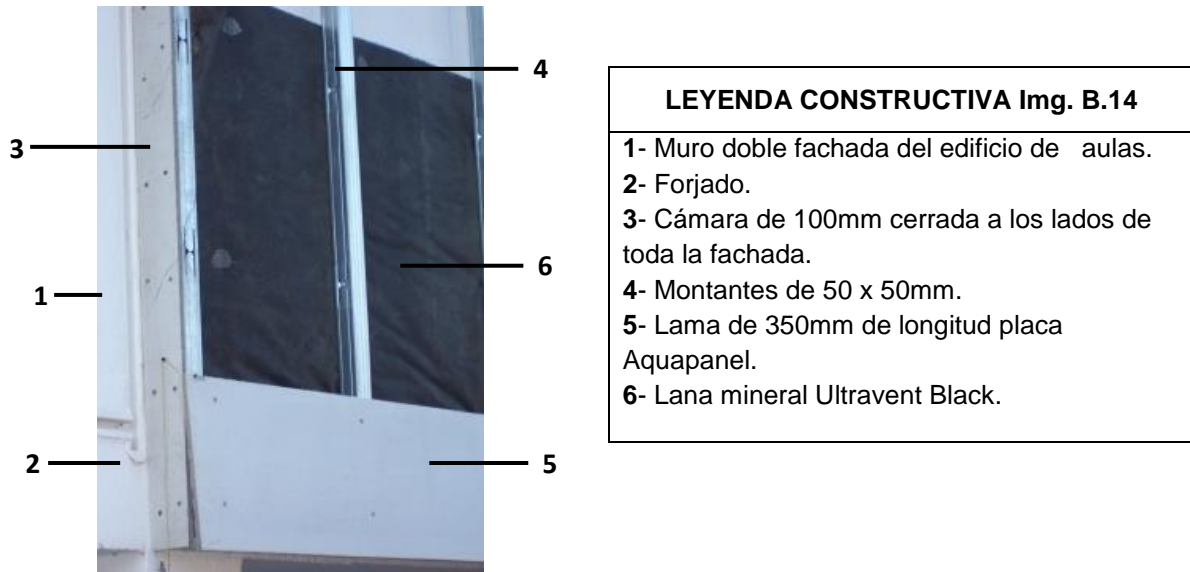


Fig.B. 9 Detalle en sección vertical de la subestructura. Colocación de los perfiles auxiliares adicionales para las lamas de la configuración (Fd) (D)



Img.B.13 Colocación de los perfiles auxiliares configuración (Fd). (D)



Img.B.14 Colocación de lamas de la configuración (Fd) (D)

4.2 Descripción de los prototipos

Los tres prototipos se construyeron en etapas sucesivas utilizando la misma subestructura y conservando el mismo espesor de la cámara, cambiando en cada prototipo solo la disposición hoja exterior fabricada de placas GRC de Aquapanel. (Imágenes detalladas del proceso de montaje en el anexo C)

Sistema de (FVL) configuración Fa

Cerramiento formado por placas de (CB) enteras de 1,20m x 2,40m montadas con una separación de 5mm, posteriormente sellada entre placa y placa con mortero mezclado con agua.

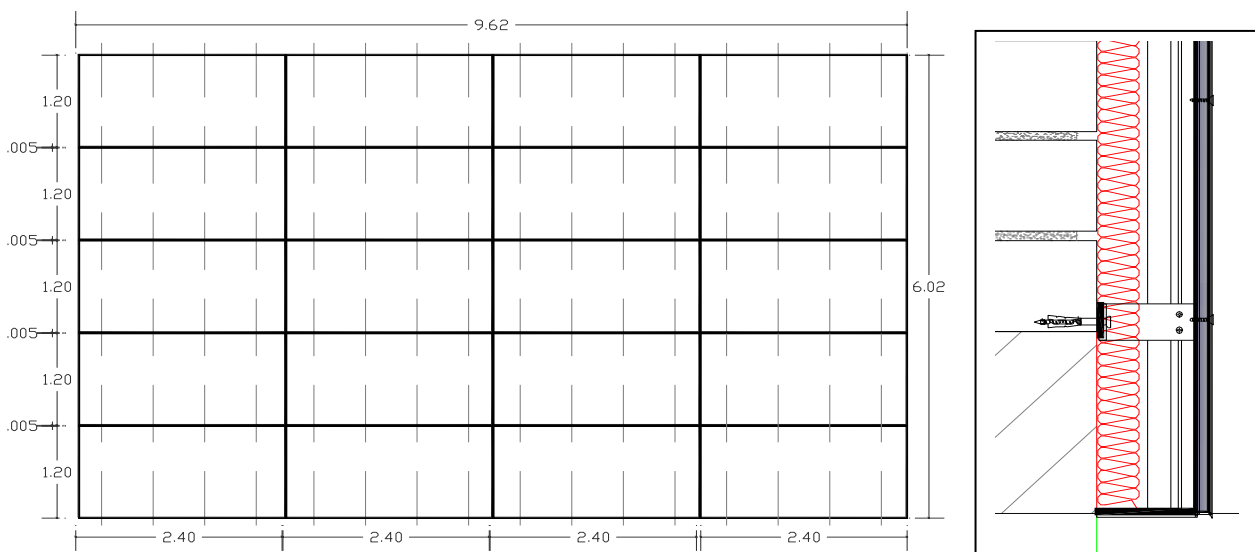


Fig.B. 10 Disposición de las placas en alzado de fachada y detalle en sección vertical (D)



Img.B.15 (FVL) configuración (Fa). Imagen realizada durante el proceso de construcción de los prototipos para los ensayos (D)

Sistema de (FVL) configuración (Fb)

Cerramiento formado por placas (CB) enteras de 1,20m x 2,40m con una separación de 5mm entre placa y placa.



Img.B.16 (FVL) configuración (Fb). Imagen realizada durante el proceso de construcción de los prototipos para los ensayos (D)

Sistema de (FVL) configuración (Fd)

Cerramiento con lamas, formado por cortes de placa de (CB) de 35cm de alto y tienen la longitud del ancho de toda la fachada (juntas cerradas entre placas), las lamas tienen una leve inclinación, se solapan 5cm y están separadas 1cm entre ellas.

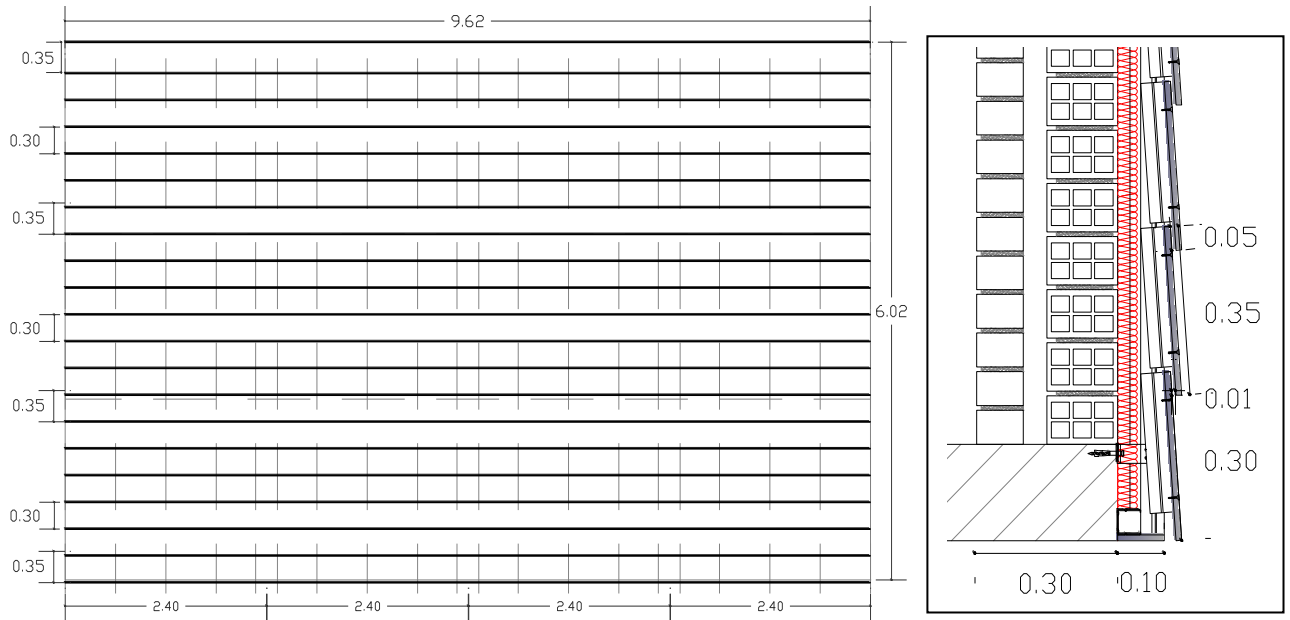


Fig.B. 11 Alzado y sección de (FVL) configuración (Fd) Lamas de 350mm solapadas 50mm longitud visible 300mm con distancia entre lama y lama de 10mm alzado en fachada y detalle en sección (D)



Img.B.17 (FVL) configuración (Fd). Imagen realizada durante el proceso de construcción de los prototipos para los ensayos (D)

4.3 Variabilidad del grado de ventilación de la cámara de aire intermedia de aire en los prototipos

Como se ha mencionado anteriormente, la cámara de aire intermedia esta totalmente cerrada en sus extremos laterales verticales (coincidiendo con los límites del tramo de ensayo).

El sistema para variar el grado de apertura de la cámara, se estableció mediante la segmentación del perímetro inferior y superior del área de ensayo en 5 tramos iguales (Fig. B12), éstos tramos se hicieron con cortes de placa (CB) *Aquapanel*, los cuales se iban quitando y poniendo durante los ensayos.


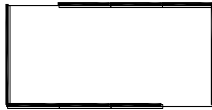
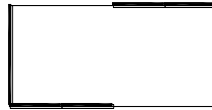
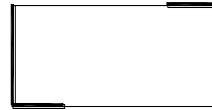

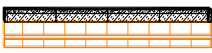









Sistema utilizado para establecer el grado de ventilación de la cámara				
1	2	3	4	5
				
Alzado	Alzado	Alzado	Alzado	Alzado
				
Perímetro superior	Perímetro superior	Perímetro superior	Perímetro superior	Perímetro superior
				
Perímetro inferior	Perímetro inferior	Perímetro inferior	Perímetro inferior	Perímetro inferior

Fig.B. 12 Sistema de ventilación de la (FVL) Donde: 1(0% ventilada), 2(25% ventilada), 3(50% ventilada), 4(75% ventilada), 5(100% ventilada). Se realizó una medición para cada grado de ventilación. Ejemplo: para el sistema **Fb** será: **Fb-1, Fb-2, Fb-3, Fb-4, Fb-5** (D)

5. MÉTODO DE ENSAYO

Para la realización de los ensayos acústicos se ha consultado la normativa acústica vigente:

-UNE EN ISO 140-5 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas. Mayo 1999.

-UNE EN ISO 717-1 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Agosto 1997.

-CTE DB-HR Documento básico protección frente al ruido. Abril 2009.

Los resultados se expresan en valores de diferencia de niveles estandarizada D2m,nT de acuerdo al procedimiento de medición al ruido aéreo exterior en fachadas y elementos de fachada realizado a 2 metros de la fachada.

6. EQUIPO DE MEDICIÓN

Los equipos utilizados para la medición en los ensayos fueron los siguientes:

- Sonómetro modelo SC310 CESVA tipo 1. (cantidad 2, uno en el interior de la sala y otro en el exterior para medición del nivel de presión acústica).
- Micrófono de condensador de ½" modelo CESVA C-130
- Cable prolongador para preamplificador y micrófono CN-010
- Pantalla antiviento hemisférica modelo PVM-05 CESVA
- Sonido rosa para mediciones acústicas emitido desde un reproductor de CD
- Fuente de ruido altavoz JBL. EON 15G2 de dimensiones 686 mm x 430 mm x 444 mm. Potencia de 400W (LF 300W / HF 100W), con respuesta de frecuencia 39Hz-18kHz y un nivel máximo de presión acústica de 129dB.
- Trípode.

7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Las mediciones de los ensayos se realizaron al interior y al exterior de la sala mencionada en el apartado 3 de éste documento. La superficie total de la sala en planta es de 132.87 m² con un volumen de 660.8m³ incluyendo los lucernarios.

Los ensayos se realizaron para valorar la posible reducción de la transmisión de ruido aéreo al interior de la sala a través de la fachada existente como muro base, denominada (FI) fachada inicial sin sistemas instalados aplicando los prototipos desarrollados sobre la misma.

7.1 Selección y posición de los puntos de medida en el interior de la sala

Es importante que los puntos de medición tengan una distribución adecuada en la sala que permita captar una lectura general del nivel sonoro en el espacio a medir. Para ello se deben tener en cuenta las distancias entre dichos puntos. Para evitar afectaciones en bajas frecuencias, la distancia debe ser de al menos un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia más baja que interesa para la medición. La toma de medidas fue realizada en bandas de tercios de octava iniciando en 20Hz. Sin embargo para el

análisis posterior de resultados, se tomó como frecuencia más baja 100Hz para lo cual se necesita más o menos 1m de diferencia entre punto y punto de medición.

Para establecer la posición de los puntos de medición en el interior, se tuvo en cuenta la forma regular y simétrica que tiene la sala así como los materiales que la componen y los cerramientos que la limitan, lo que proporciona cierta uniformidad del campo sonoro.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones parámetros, se determinaron 4 puntos de medida, de los cuales se tomaron registros acústicos con un micrófono móvil (directo desde el sonómetro). Según la norma ISO140-5:1998 cuando el micrófono es móvil, el radio de barrido debe ser de 0.70 m como mínimo entre punto y punto y de 0.50m respecto a los límites de la habitación o de otros objetos presentes.

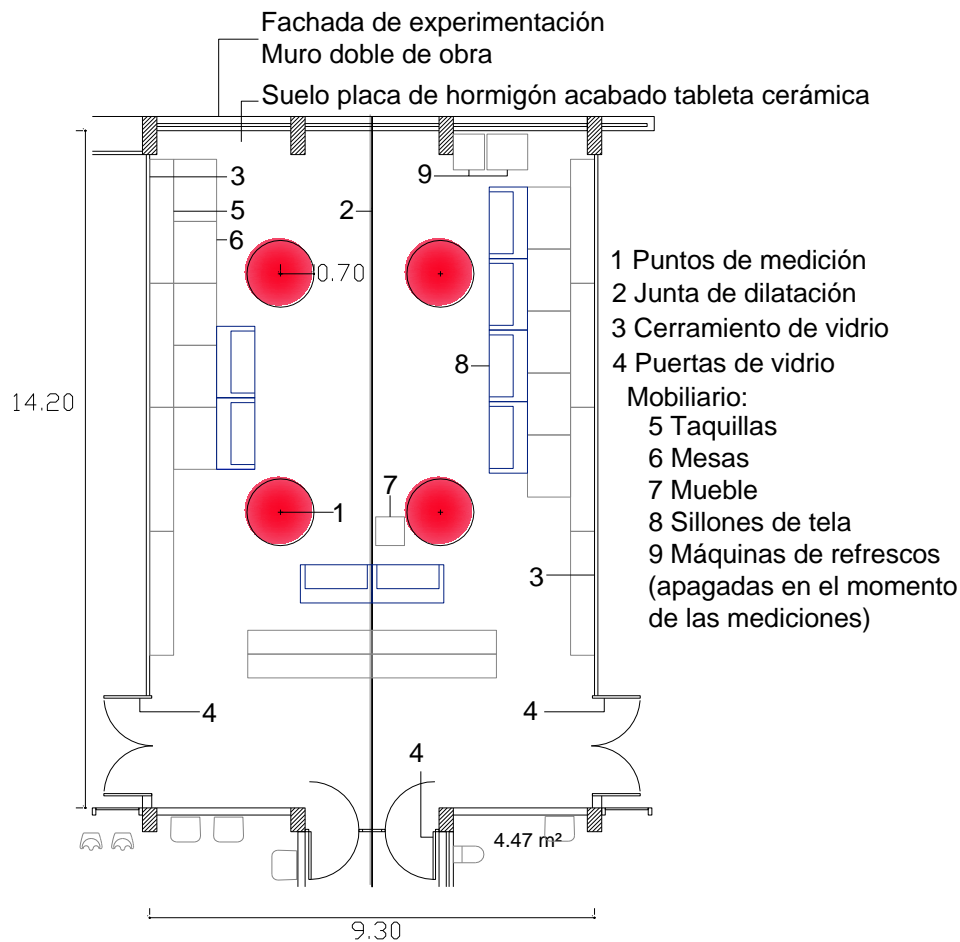


Fig.B. 13 Localización en planta de los puntos de medición al interior de la sala receptora (D)



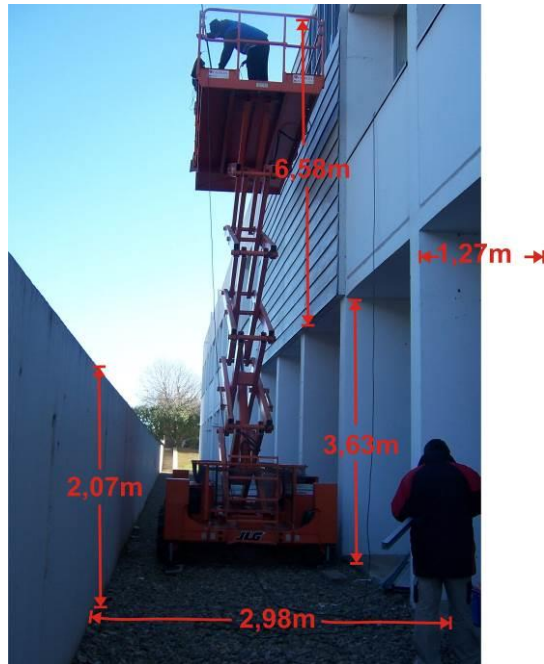
Img.B.18 Configuración general de la sala durante los ensayos. Colocación de banda para el aislamiento la junta de dilatación del edificio (D)

7.2 Condiciones al exterior

Frente al tramo de fachada objeto del ensayo, hay un talud de jardinería y un foso a nivel de la planta baja (Img. B.20).



Img.B.19 Vista de las condiciones exteriores del ensayo (D)



Img.B.20 Vista del foso situado entre el edificio y el talud de jardinería (D)

En la planta baja situada debajo del sector de ensayo, la fachada presenta un retroceso, no se ha considerado que afecte a las condiciones del ensayo porque se trata de una losa maciza de hormigón, sin embargo, puede ser un punto importante de transmisión sonora a través del forjado donde está interrumpida por la junta de dilatación del edificio.



Img.B.21 Detalle del muro base en la sección de ensayo. Se observa la junta de dilatación (D)

7.3. Fechas y tiempos de realización

La época y duración del experimento se previó en un período no lectivo, buscando que no afectara la normalidad en los horarios de clases ni permanencia de los estudiantes en la escuela, razón por la que se llevó a cabo durante el mes de febrero de 2011, época en la que hay poco tránsito de estudiantes y aún no se han reanudado las clases, aunque se realizan exámenes de proyecto de fin de carrera. Esto obligó a que el experimento fuese breve y muy ágil en su desarrollo, evitando así en lo posible la incomodidad generada por ruido y el tránsito de materiales usados para el ensayo.

El orden en el montaje de los prototipos de (FVL) se determinó en la siguiente manera:

1º configuración Fd, (con lamas): Éste sistema es el más complejo por la utilización de perfiles auxiliares y la fijación de las lamas.

2º Configuración Fb, (continuo con juntas abiertas entre placas): Éste sistema es de menor complejidad por la utilización de placas enteras separadas entre si.

3º Configuración Fa, (continuo con juntas cerradas entre placas): A partir de la configuración anterior “Fb” solo se realizó el sellado de juntas.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores, la duración total del experimento fue de 4 semanas.

- **Semana 1:** Acondicionamiento previo del interior de la sala, instalación sobre la fachada existente (FI) la subestructura común para todos los prototipos de (FVL), montaje de (Fd) y ensayo acústico correspondiente.
- **Semana 2:** Desmontaje de prototipo Fd, montaje del siguiente, Fb y ensayo acústico correspondiente.
- **Semana 3:** Montaje del siguiente prototipo (rellenado de juntas para Fa) y ensayo acústico correspondiente.
- **Semana 4:** Desmontaje de Fa y la subestructura, reestablecimiento de la fachada original y ensayo acústico correspondiente a la fachada inicial.

8. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES

Se realizaron un total de 4 ensayos, uno por cada prototipo desarrollado y uno para la fachada existente sin ninguno de los prototipos.

- Configuración **Fa**, cerramiento de fachada ligera continua con juntas cerradas entre placas instalado sobre la fachada existente (**ensayo número 3**, mediciones realizadas 5).
- Configuración **Fb**, cerramiento de fachada ligera continua con juntas abiertas entre placas instalado sobre la fachada existente (**ensayo número 2**, mediciones realizadas 5).
- Configuración **Fd**, cerramiento de fachada ligera con lamas, instalado sobre la fachada existente (**ensayo número 1**, mediciones realizadas 5).
- Fachada existente (**FI**), sin ninguno de los prototipos instalados **ensayo número 4**, mediciones realizadas 1 (teniendo en cuenta que para los prototipos se median los distintos estados de apertura de la cámara y en este caso solo se mide el estado de la fachada).

En todas las mediciones, se llevó a cabo el mismo procedimiento general:

En el exterior del edificio:

Siguiendo como base el procedimiento de la norma ISO 140-5:1998 para la medición del nivel sonoro exterior, se colocó el micrófono en el centro de la fachada, a una distancia de 2m medida desde el plano de la fachada, situado a una altura de 1.50m con ayuda de un trípode de soporte para el micrófono, el cual estaba dotado de una pantalla de protección de viento. El micrófono se conectó al sonómetro mediante un cable prolongador tal como se muestra en la (Img. B.25)

La fuente sonora de ruido rosa consistió en un altavoz ubicado a una distancia más o menos de 10m en un ángulo de 45° de la fachada, aprovechando la parte alta del talud de la jardinería (Img.B.22).

Se tomaron 3 registros para cada medición con una duración de 20 segundos cada una (para facilitar la realización simultánea de las mediciones al interior), tomadas siempre desde un solo punto fijo.



Img.B.23 Imagen de la fuente sonora: Altavoz JBL. EON 15G2 (D)



Img.B. 22 Vista general de la zona de ensayo. Localización del altavoz durante el ensayo de la (FVL) Fd (D)



Img.B.24 Ubicación del micrófono. Localización a 2m para la realización de las mediciones exteriores. En este caso para la (FVL) (Fd) con lamas (D)



Img.B.25 Imagen del sonómetro de medición. Situado al interior de la sala (D)

En el interior de la sala:

Las mediciones se realizaron en los 4 puntos seleccionados (ver apartado 7.1) usando el micrófono directamente conectado al sonómetro. Las mediciones se hicieron con una duración de 20 segundos (de 3 a 4 segundos para cada punto) tomando 3 registros de cada medición.

Las mediciones se realizaron de forma simultánea al interior y al exterior de la sala en cada uno de los ensayos.

8.1 Mediciones realizadas en los diversos prototipos

Siguiendo el mismo procedimiento descrito, se hicieron varias mediciones para cada uno de los prototipos, una por cada grado de apertura de la cámara ensayando 5 grados en total, definidos por su porcentaje de superficie de ventilación. (*Ver descripción en el apartado 4. Desarrollo de prototipos*).



Img.B.26 Imagen del proceso de segmentación de la superficie superior de ventilación de la cámara.
Ejemplo para la (FVL) (Fb) (D)



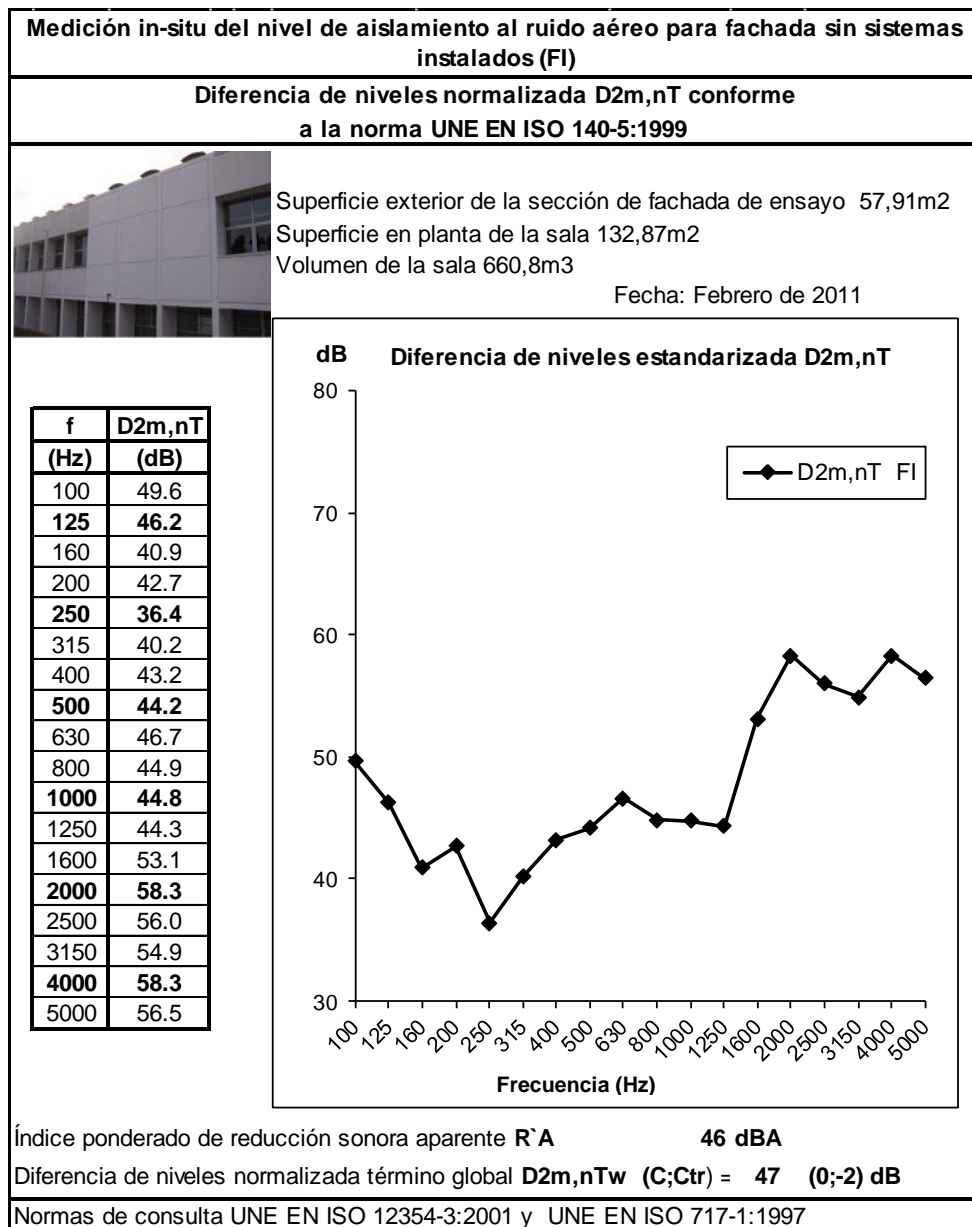
Img.B.27 Imagen de la superficie inferior de ventilación de la cámara totalmente abierta (100%). Ejemplo sistema (Fb-5) (como se indicó anteriormente (Fig. A.11), el grado de apertura de la cámara se realizó en 5 estados siendo “1” cámara totalmente cerrada (0%) y “5” cámara totalmente abierta (100%) (D)



Img.B.28 Imagen de la superficie inferior de ventilación de la cámara parcialmente abierta (75%) de la (FVL) (Fb-4) (D)

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES

9.1 Medición 1, Fachada existente (FI), Sin los prototipos instalados Ensayo número 4



Condiciones ambientales 17 de febrero de 2011				
Hora inicio	Hora final	Temperatura media exterior	Humedad Relativa	Velocidad viento
8:08 AM	8:30 AM	6 °C	76%	4.0 km/h NNW

Análisis del resultado (FI)

En la diferencia de niveles estandarizada de la fachada (FI), se observa una marcada disminución del aislamiento a 1250Hz y otra más leve en 2500Hz, lo que puede indicar la posibilidad de haber sido afectado por los fenómenos de frecuencia crítica y de coincidencia particulares en los muros dobles.

Para analizar la posible afectación de éstos fenómenos en el resultado de la medición, se realizó el cálculo de la frecuencia crítica y de coincidencia para el muro base con sus propias características.

Como se menciona anteriormente en el punto 3.1.1 *Descripción del muro base* del presente informe, éste cerramiento tiene un espesor total de 30cm compuesto de dos hojas de fábrica de ladrillo la primera de 9cm y la segunda de 14cm con una cámara vacía de entre 5 y 7cm.

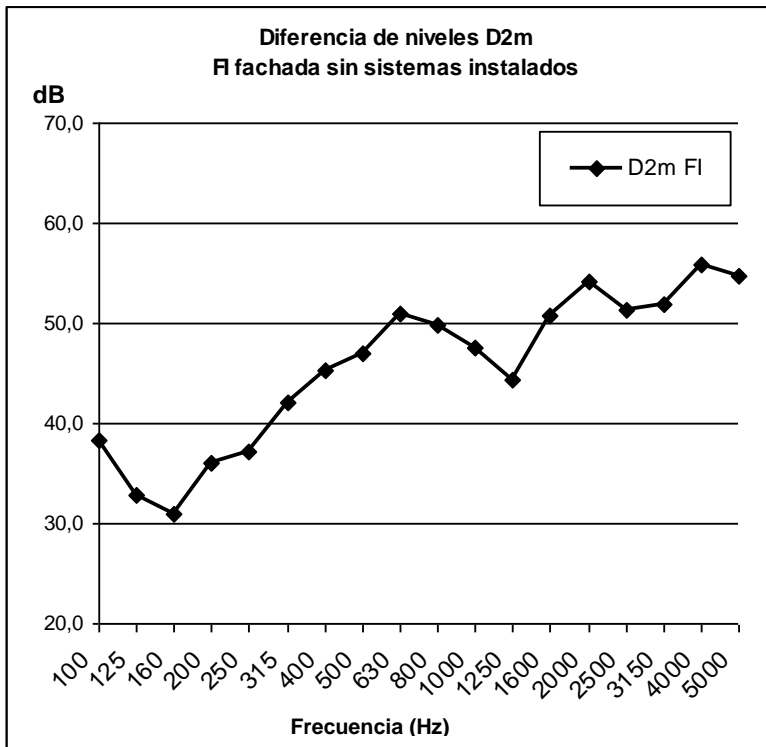
Las características de (FI) son:

Elementos (FI)	Espesor (mm)	Densidad superficial (Kg/m ²)	F_0	f_{msm}
Hoja 1	140	217	108.1Hz	32 Hz
Hoja 1	90		168.2Hz	
Cámara	De 50 a 70	-	-	-

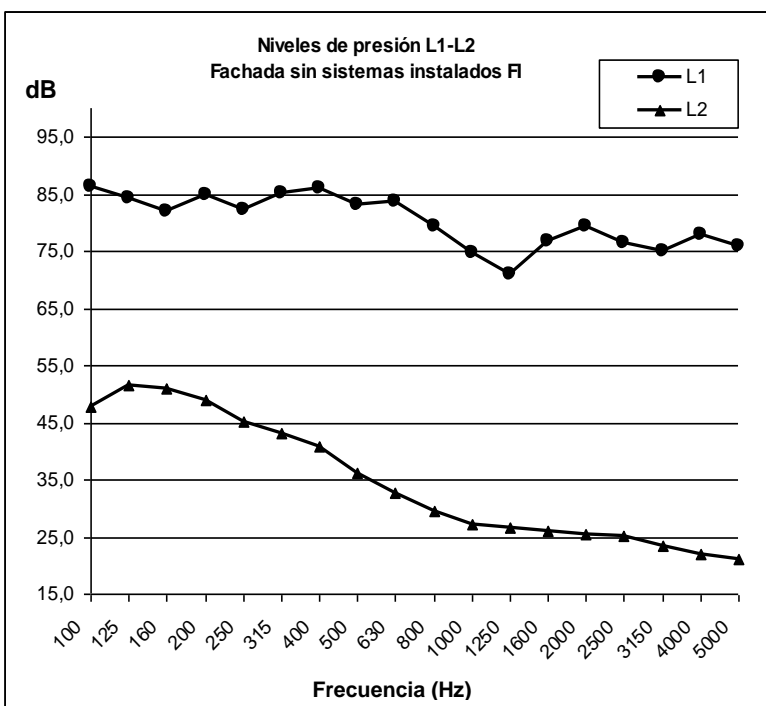
Tabla B. 3 Características del cerramiento doble de la fachada (FI) (D^o)

En cuanto al resultado de aislamiento global, volviendo a la composición del cerramiento de la fachada base (FI), cabe recordar que está compuesta por dos tipos diferentes de ladrillo (hueco y perforado), la diferencia del material y la junta en medio del muro podría haber influido en la obtención de resultados.

Para continuar con el seguimiento, se analizan los datos previos:



Graph B.1 Diferencia de niveles fachada (FI) (D')

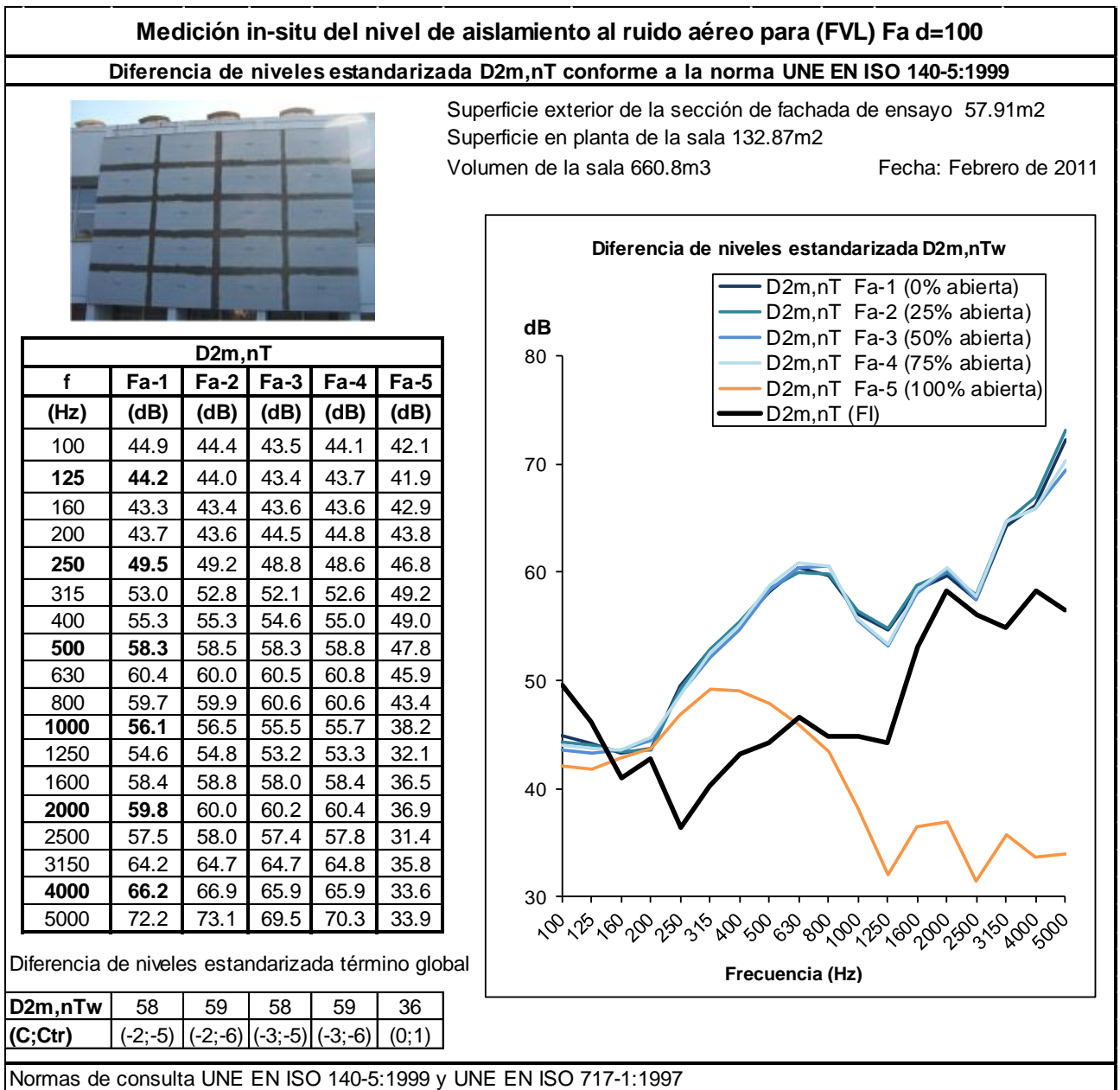


Graph B.2 Niveles de presión sonora ensayo en la fachada (FI) L₁ y L₂ (D')

En la gráfica de diferencia de niveles D_{2m} de la fachada FI (Graph B.1), se observan las caídas antes señaladas, sin embargo, analizando los niveles de presión sonora por separado (Graph B.2), se observa que el nivel exterior L_1 presenta la misma caída, sin embargo no parece repercutir en el nivel interior L_2 .

A continuación se muestran los resultados obtenidos $D_{2m,nT}$ de los diferentes prototipos ensayados en la (FI)

9.2 Mediciones (FVL) Fa d=100 Ensayo número 3



(FVL)	Condiciones ambientales 11 de febrero de 2011					
	(Fa) d=100	Hora inicio	Hora final	Temperatura media exterior	Humedad Relativa	Velocidad viento
Fa-1 (0% abierta)		9:20 AM	9:23 AM	6 °C	86%	0 km/h
Fa-2 (25% abierta)		9:35 AM	9:37 AM	6 °C	84%	0 km/h
Fa-3 (50% abierta)		9:50 AM	9:52 AM	6 °C	84%	0 km/h
Fa-4 (75% abierta)		10:01 AM	10:03 AM	7 °C	81%	1,6 km/h WNW
Fa-5 (100% abierta)		10:18 AM	10:20 AM	8 °C	76%	0 km/h

Se observa una mejora considerable de reducción acústica frente a la (F)I tanto en bajas frecuencias como en la tendencia de aumento a altas frecuencias. La apertura de la cámara se realiza

simultáneamente en la superficie de ventilación inferior y superior en todos los grados de apertura. La medición Fa-5 (100% abierta se descarta)

Las características de los elementos de la (FVL) son:

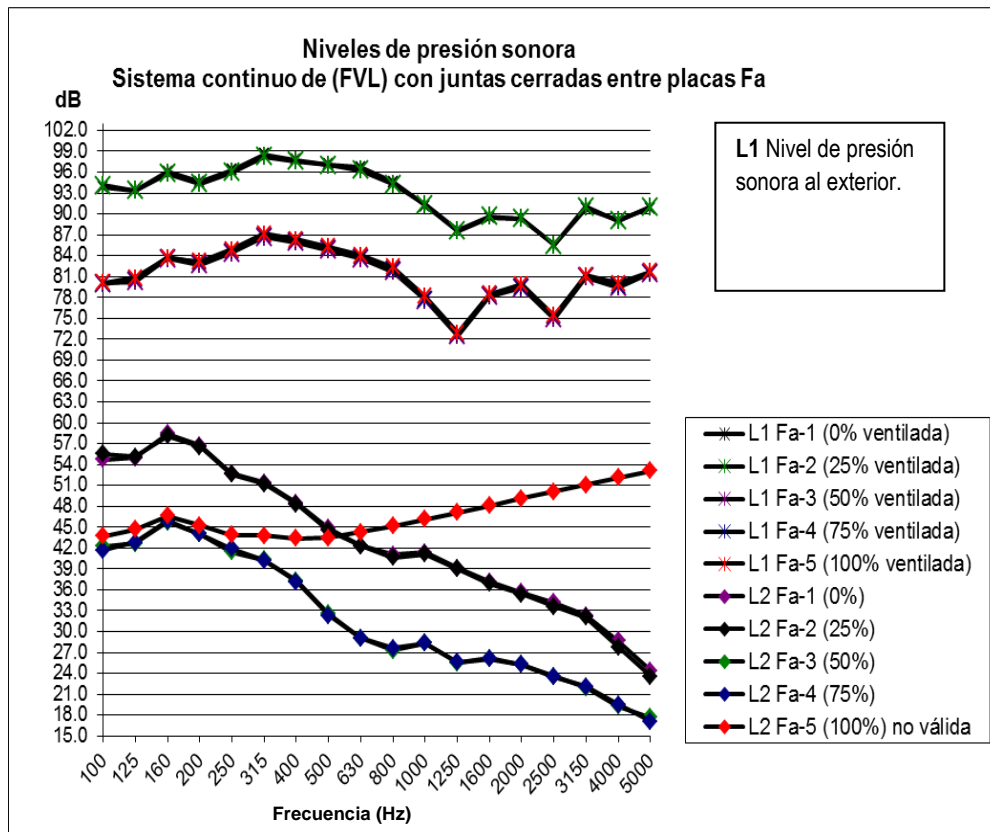
Elementos (FI)	Espesor (mm)	Densidad superficial (kg/m ²)	F_c	f_{msm}
FI	300	217	108.1Hz y 168.2Hz	32 Hz
Hoja ext (FVL)	12.5	15	2470Hz	28Hz
Cámara intermedia	100	-	-	
Material absorbente	40	1.2		
Perfilería	50	16.2		

Tabla B. 4 Características de la (FVL) (D')

Análisis de los resultados de la configuración (Fa)

Hasta ahora los resultados obtenidos para el Sistema Fa presentan más valores regulares entre cada estado de apertura de la cámara, mostrando una variación muy poco significativa de casi 1dB favoreciendo los resultados de la configuración con la cámara más ventilada.

Los resultados obtenidos pueden analizarse con más detalle desde los niveles de presión sonora medidos entre los distintos estados de la (FVL) (Fa).

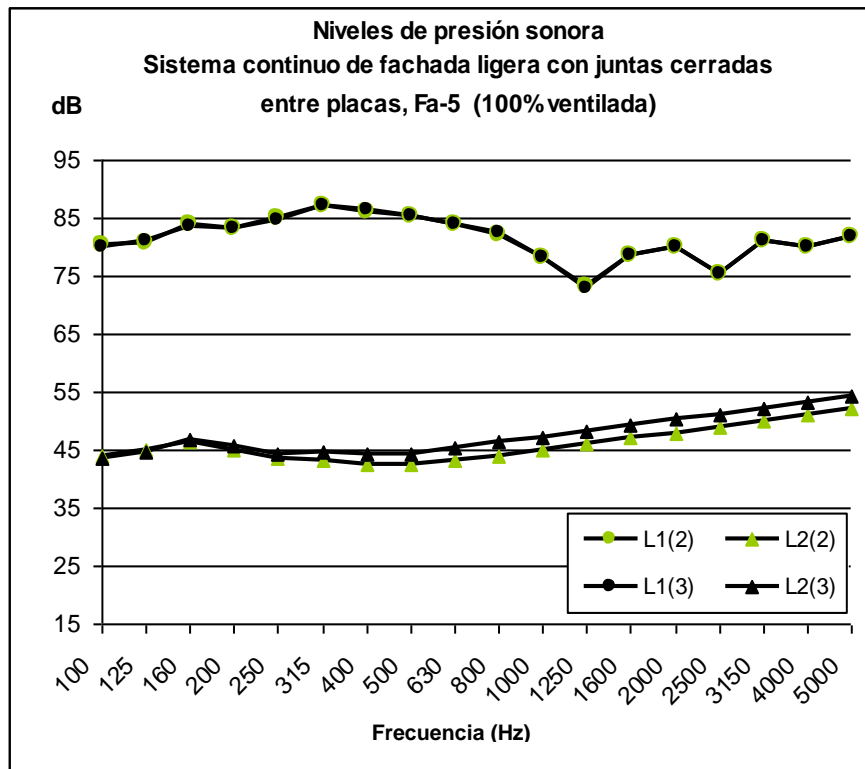


Graph B.3 Niveles de presión sonora al exterior y al interior medidos para la configuración (Fa) (D')

En la gráfica (Graph B.3 se observan diferencias entre los valores de emisión exterior L_1 entre las dos primeras mediciones (Fa-1 y Fa-2) y las siguientes (Fa-3, Fa-4 y Fa-5) del ensayo que inevitablemente se ven reflejadas en los niveles de presión sonora al interior L_2 . La situación presentada puede ser una de las causas de la pequeña variación en la medición a favor de los estados con mayor apertura de la cámara.

En cuanto a la medición 5, correspondiente a Fa-5 (100% ventilada) es decir con la cámara totalmente abierta (a nivel inferior y superior), se descarta como ensayo válido teniendo en cuenta los resultados no coherentes obtenidos para el nivel de presión sonora en el interior de la sala.

En la gráfica (Graph B.3) se observan como los valores de nivel de presión sonora en el interior de la sala obtenidos en la medición Fa-5 presentan una lectura errática que parece no corresponder con los valores de emisión de la fuente sonora al exterior.

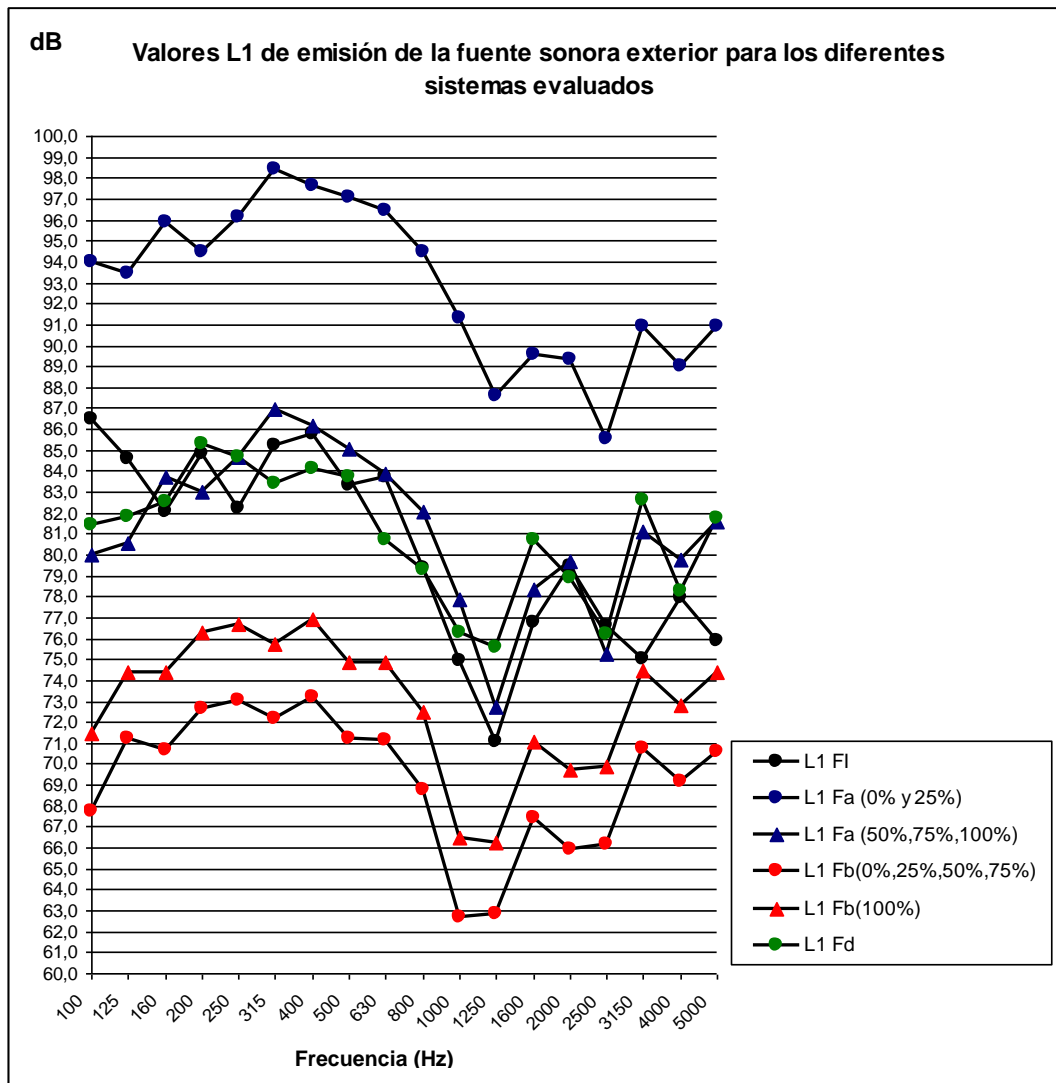


Graph B.4 Niveles de presión sonora para (Fa-5) (D')

9.3 Mediciones (FVL) Fb d=100 Ensayo número 2

El ensayo número 2, (FVL) continua hoja exterior de placas con juntas abiertas configuración (Fb) presentó una problemática en la lectura de datos del nivel de presión sonora exterior L₁: Los niveles de la fuente de emisión son demasiado bajos en relación a los niveles obtenidos en los demás ensayos y son insuficientes para los valores apropiados de un ruido rosa para mediciones según la normativa.

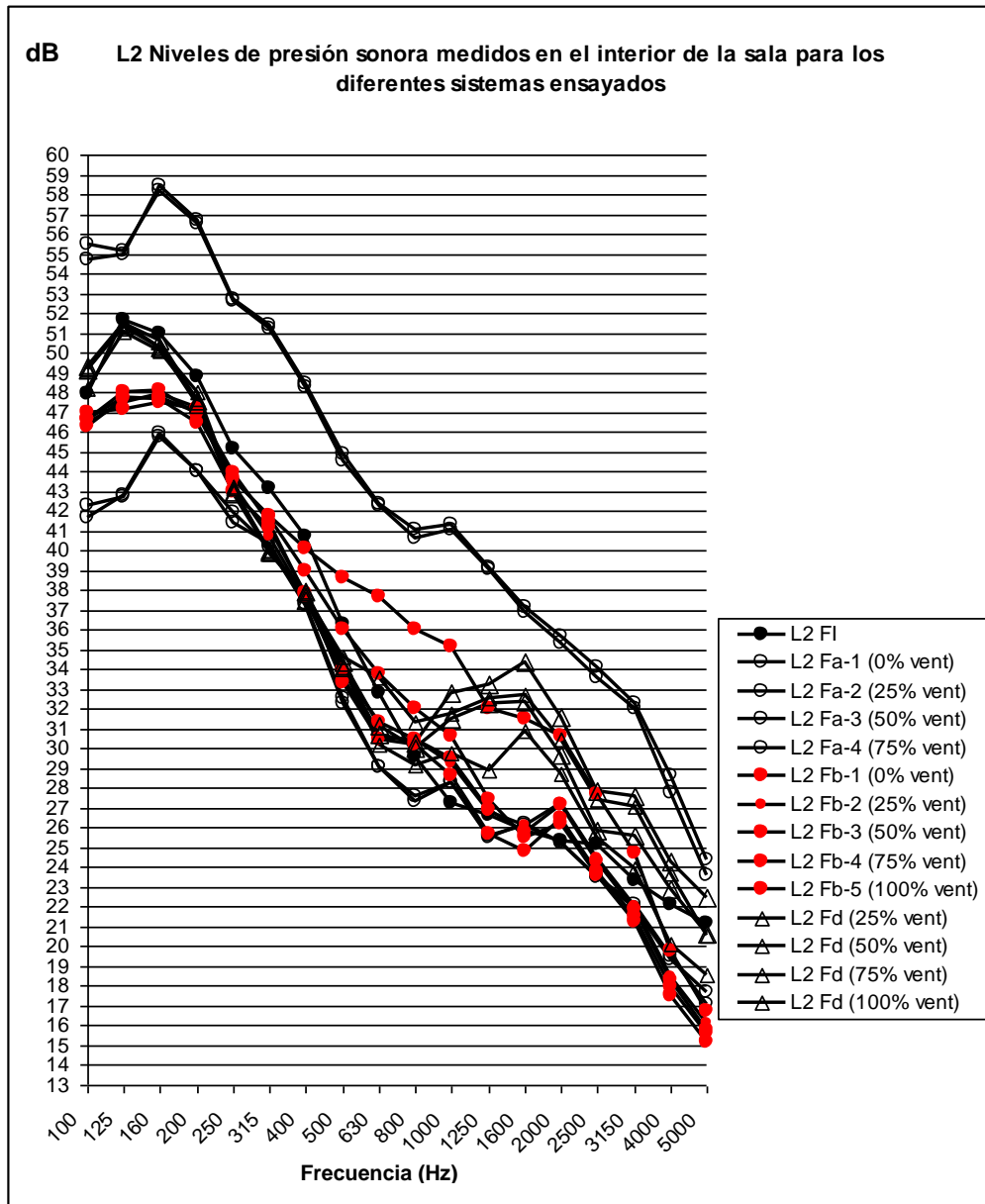
Estos bajos niveles de presión sonora de la fuente de emisión exterior, se ven reflejados en los valores globalizados del índice de reducción sonora, los cuales presentan unos resultados incluso inferiores a los de la fachada inicial (FI) razón por la que estos valores no pueden darse como válidos incluso a simple vista.



Graph B.5 Comparación de los diferentes niveles de presión sonora de la fuente de emisión exterior para todas las configuraciones ensayadas (D')

Las curvas marcadas con los valores en color rojo pertenecen a los valores L_1 de la configuración (Fb) donde se observa que son claramente inferiores a las demás en algunas frecuencias. La diferencia es casi de 30dB.

Sin embargo, cabe citar que los niveles de presión sonora en el interior de la sala para la configuración (Fb) muestran que no se han visto tan afectados por los bajos niveles de emisión registrados en el exterior.



Graph B.6 Niveles de presión sonora L_2 medidos en el interior de la sala para los diferentes sistemas. Con la aplicación de corrección de ruido de fondo en los casos necesarios (D')

En la gráfica (Graph B.6) se observa que los valores L_2 para la configuración (Fb) son comparables con los de los demás sistemas por lo que se descarta que los niveles exteriores L_1 medidos sean los emitidos realmente.

Una posible hipótesis, es un error en el registro del sonómetro que se encontraba en el exterior para tomar los datos de emisión de Ruido Rosa ya que el micrófono no estaba conectado directamente al sonómetro sino a un cable prolongador, teniendo en cuenta que los datos tomados al interior son comparables, lo que lleva a concluir que afuera si había el nivel suficiente para tomar los niveles de presión sonora.

Al calcular la diferencia de niveles, los valores obtenidos son relativamente inferiores y no comparables con los obtenidos en la evaluación de los demás sistemas, lo cual se ve reflejado en los datos conseguidos por el sonómetro de los niveles de presión sonora.

Extrapolación de resultados de la configuración (Fb) ensayo numero 2

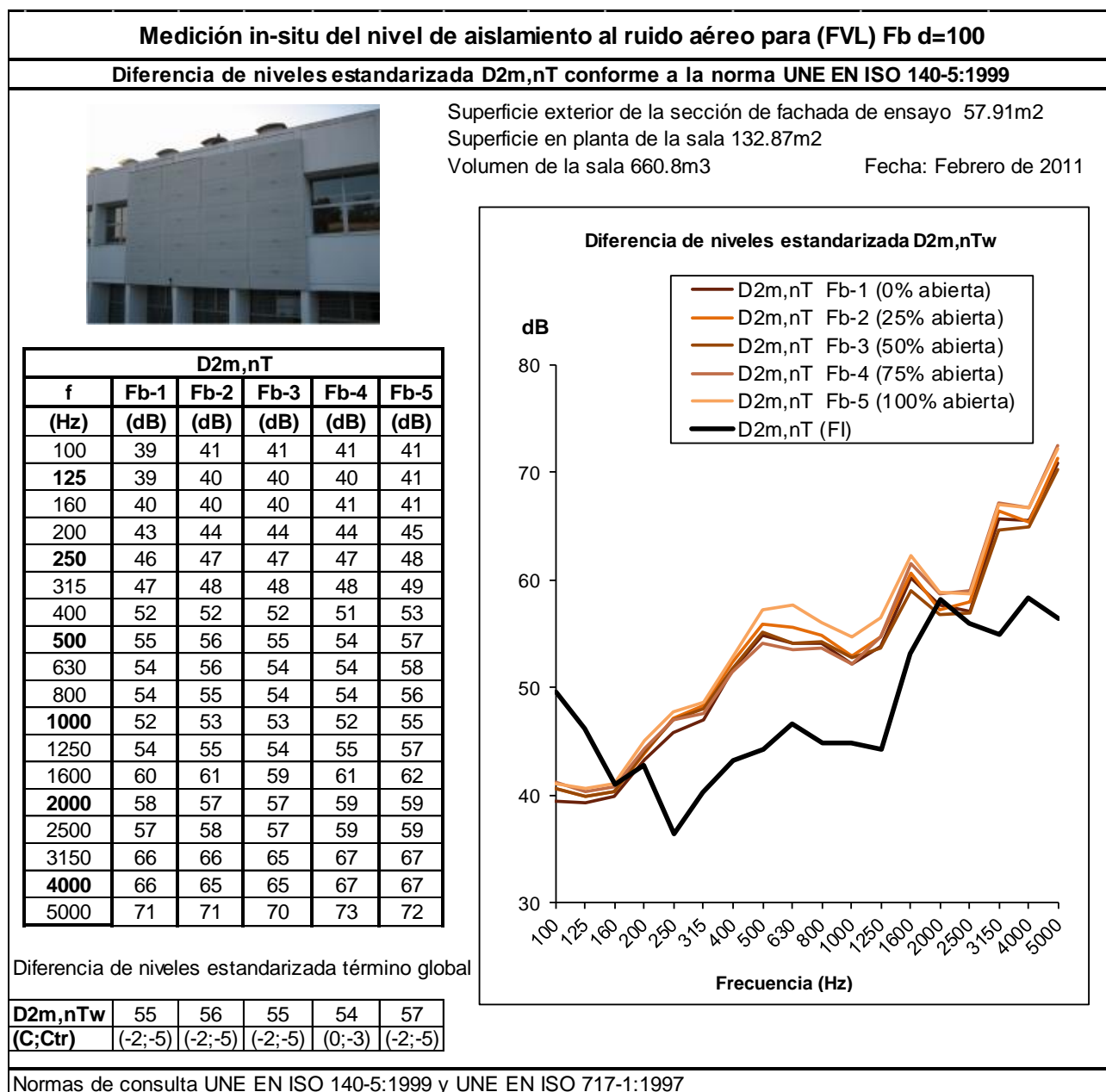
Para poder mostrar resultados orientativos del ensayo se tomaron como valores virtuales L_1 los niveles de presión sonora exterior obtenidos en el ensayo de la configuración de lamas (Fd). La elección de estos valores se determinó teniendo en cuenta que son los más regulares entre si y también con relación a la configuración (Fa) y a la fachada inicial (FI).

Análisis de resultados extrapolados sistema (Fb).

Utilizando con cautela estos valores extrapolados extremos, de la configuración (Fb-1), cámara totalmente cerrada y en la configuración (Fb-5) con la cámara totalmente abierta, se obtiene una ganancia global de 3 a 4 dB con respecto a la fachada inicial (FI).

Volviendo al seguimiento conjunto de las curvas de reducción sonora de los diferentes estados de ventilación de la configuración (Fb), se observa que éste tiene una tendencia al aumento de mejora especialmente en el rango de las altas frecuencias y un mejoramiento en bajas frecuencias de al menos 4dB.

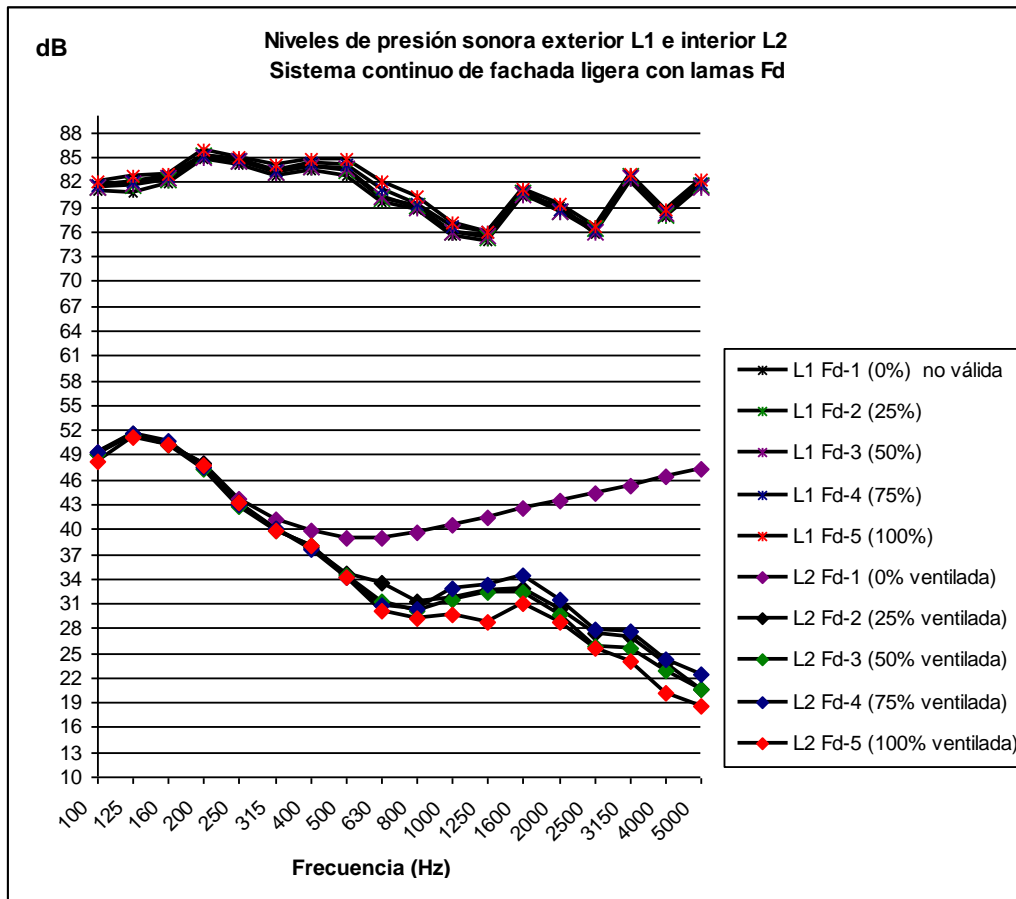
Los resultados se muestran a continuación:



(FVL)	Condiciones ambientales 09 de febrero de 2011					
	(Fb) d=100	Hora inicio	Hora final	Temperatura media exterior	Humedad Relativa	Velocidad viento
	Fb-1 (0% abierta)	8:41 AM	8:43 AM	2 °C	84%	0 km/h
	Fb-2 (25% abierta)	8:52 AM	8:54 AM	2 °C	83%	0 km/h
	Fb-3 (50% abierta)	9:03 AM	9:05 AM	2 °C	83%	0 km/h
	Fb-4 (75% abierta)	9:18 AM	9:20 AM	4 °C	78%	0 km/h
	Fb-5 (100% abierta)	9:34 AM	9:36 AM	4 °C	78%	0 km/h

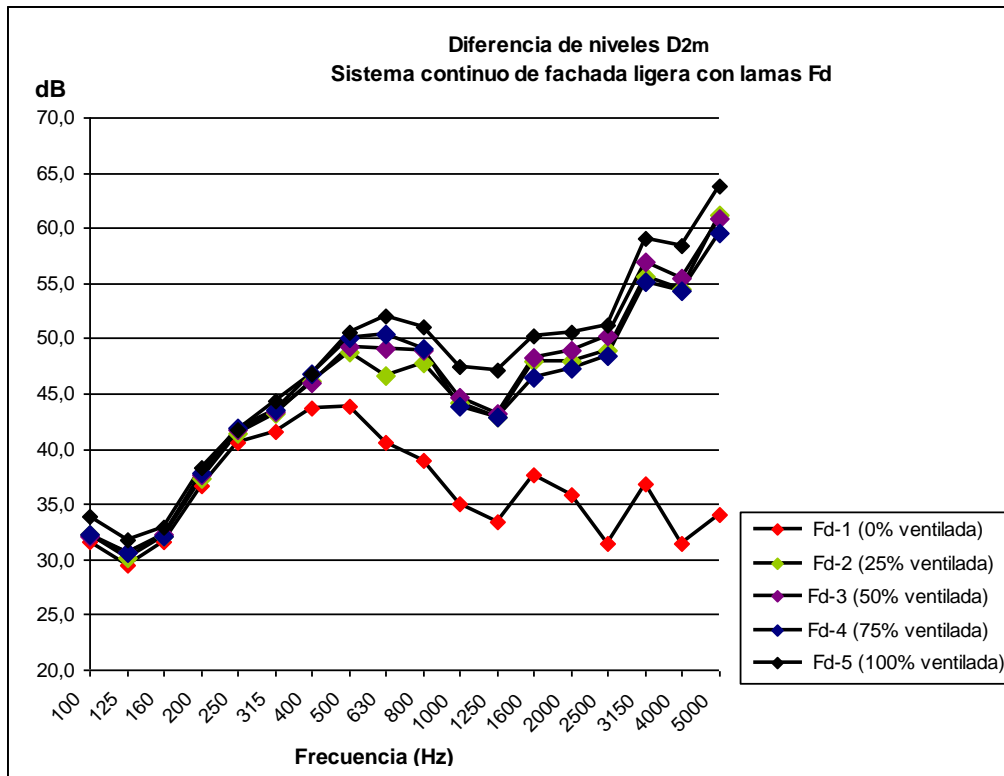
9.4 Mediciones, sistema de (FVL) configuración (Fd) Ensayo número 1

La medición correspondiente a la configuración (Fd-1) cámara cerrada en su totalidad, no es válida debido a que también presenta un error evidente en la curva del nivel de presión sonora en el interior de la sala, error probablemente de causa similar al que se muestra anteriormente en la configuración (Fa-5).



Graph B.7 Niveles de presión sonora L₁ y L₂ de la configuración (Fd) (D')

En la gráfica (Graph B.7) se observa la tendencia errónea que presenta (Fd-5) (0% ventilada) con relación a los demás estados y los niveles exteriores L₁ por lo que no se da como válida.



Graph B.8 Diferencia de niveles de la configuración Fd (D')

Visiblemente, la diferencia de niveles para la fachada (Fd-1) (cámara 0% ventilada) se ve afectada al utilizar el registro erróneo del nivel de presión sonora obtenido en el interior de la sala L_2 expresado en la gráfica (Graph B.8).

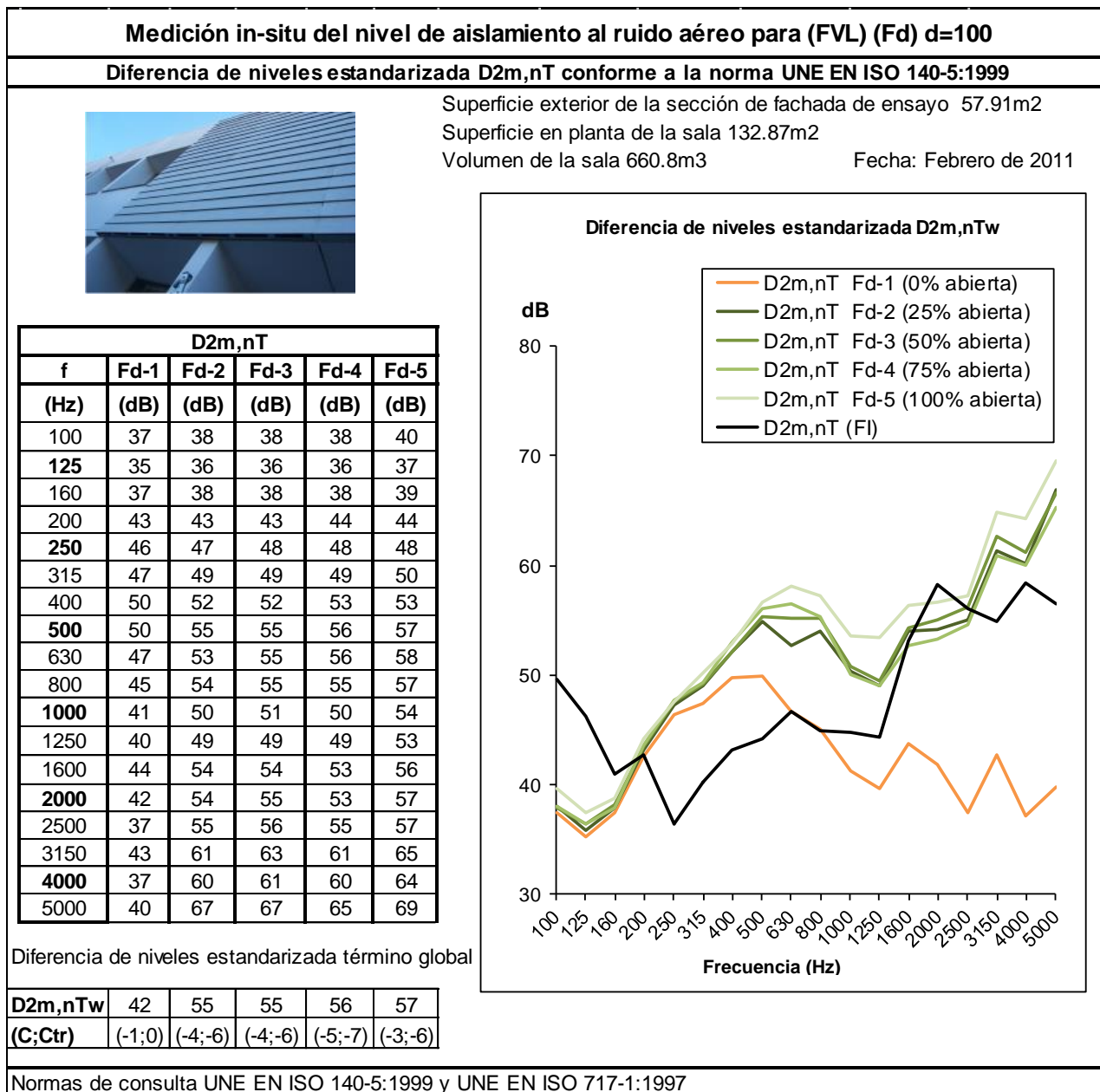
Mediciones, sistema de (FVL) configuración (Fd) Ensayo número 1

Análisis de resultados sistema Fd

Los valores de diferencia de niveles estandarizada muestran un limitado aumento del aislamiento de 2dB frente a la fachada inicial (FI) Sin embargo la curva presenta un aumento notable del aislamiento en las bandas de altas frecuencias.

En los valores de resultados globales la configuración (Fd) muestra una mejora entre 2 y 3 dB respecto a los valores de la fachada (FI). A simple vista la mejora no parece muy significativa, pero hay que tener en cuenta que se trata de un cerramiento de lamas lo cual lo hace de entrada más permeable al sonido razón por la que el resultado representa aparentemente una mejora considerable.


A continuación se muestran los resultados obtenidos para la (FVL) (Fd):





(FVL)	Condiciones ambientales 04 de febrero de 2011				
	Hora inicio	Hora final	Temperatura media exterior	Humedad Relativa	Velocidad viento
Fd-1 (0% abierta)	1:28 PM	1:55 PM	13 °C	43%	3,2 km/h WNW
Fd-2 (25% abierta)	2:14 PM	2:18 PM	14 °C	43%	4,8 km/h WNW
Fd-3 (50% abierta)	2:32 PM	2:34 PM	14 °C	42%	4,8 km/h WNW
Fd-4 (75% abierta)	2:48 PM	2:50 PM	14 °C	41%	4,8 km/h WNW
Fd-5 (100% abierta)	3:12 PM	3:24 PM	14 °C	40%	4 km/h WNW


10 RESUMEN DE MEDIDAS

Cuadros de resumen de los diferentes valores globales obtenidos por los diferentes sistemas tras la evaluación In-situ. Los valores enmarcados en color gris, corresponden a mediciones irregulares.

	Fachada inicial sin sistemas instalados (FI)	
	R'	46dB
	D2m,nTw	47 (0;-2) dB

	Sistema de (FVL) espesor de cámara d=100 Hoja exterior con juntas selladas entre placas (Fa)					
	Fa-1 (0% abierta)	Fa-2 (25% abierta)	Fa-3 (50% abierta)	Fa-4 (75% abierta)	Fa-5 (100% abierta)	(FI)
	D2m,nTw (C;Ctr)	58dB (-2;-5)	59dB (-2;-6)	58dB (-3;-5)	59dB(-3;-6)	36dB(0;1)

	Sistema de (FVL) espesor de cámara d=100 Hoja exterior con juntas abiertas entre placas (Fb) Valores extrapolados					
	Fb-1 (0% abierta)	Fb-2 (25% abierta)	Fb-3 (50% abierta)	Fb-4 (75% abierta)	Fb-5 (100% abierta)	(FI)
	D2m,nTw (C;Ctr)	55dB (-2;-5)	56dB (-2;-5)	55dB (-2;-5)	54dB(0;-3)	57dB(-2;-5)

	Sistema de (FVL) espesor de cámara d=100 Hoja exterior de lamas sobre puestas (Fd)					
	Fd-1 (0% abierta)	Fd-2 (25% abierta)	Fd-3 (50% abierta)	Fd-4 (75% abierta)	Fd-5 (100% abierta)	(FI)
	D2m,nTw (C;Ctr)	42dB (-1;0)	55dB (-4;-6)	55dB (-4;-6)	56dB(-5;-7)	57dB(-3;-6)

APÉNDICE 1.

INFORMACIÓN DEL EDIFICIO

El edificio SC1 / SC2 pertenece a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés ubicado en C/ Pere Serra, 1-15 en la ciudad de Sant Cugat del Vallés, construido en 1991 y diseñado por el Arquitecto Lluís Nadal i Oller.

Tiene una superficie total construida 9,267.45 m² y consta de planta baja + 2 plantas más.

El edificio presenta una planta modular y fue construido con un sistema de pilares y vigas de hormigón armado, los muros envolventes son dobles, de obra de fábrica de ladrillo y de arcilla cocida en su mayoría, con una cámara intermedia vacía de 5 a 7cm.

El edificio tuvo una ampliación en el año 1994 siguiendo los mismos parámetros modulares.

La sala interior utilizada para los ensayos está atravesada por la junta de unión entre la parte existente y la nueva.

APÉNDICE 2.

FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS PROTOTIPOS DE (FVL)



Img.B.29 Lugar de realización de la fase práctica. Plataforma mecánica para la ejecución de los prototipos (D)



Img.B.30 Fijación de perfil perimetral de la subestructura para los prototipos.
Sobre la fachada (FI) muro base (D)



Img.B.31 Colocación de montantes de la subestructura. Perfiles de 50 x 50mm cada 60cm, en algunos puntos la distancia es menor (47cm) cerca de los pilares para no afectar demasiado a la estructura del edificio (D)



Img.B.32 y Img.B.33 Unión de montantes de 50 x 50mm para formar la cámara de 10cm (D)



Img.B.34 Colocación de lamas de la configuración (Fd). Primer prototipo de (FVL) que se instaló (D)



Img.B.36 Adecuación de aislamiento al interior de la sala. Colocación de lana de roca en la junta de dilatación (D)



Img.B.35 Aislamiento al interior de la sala. La sala está atravesada por tuberías de instalación de la calefacción y electricidad por lo que la insonorización no era posible en su totalidad pero se utilizó lana de roca para atenuar la intrusión externa a la sala. (D)



Img.B.37 Ensayo 1 -Febrero 04 de 2011- medida 2 de la configuración (Fd-2)
(cámara 25% ventilada) vista inferior (D)



Img.B.38 Ensayo 1 -Febrero 04 de 2011- medida 3 de la configuración (Fd-3)
(cámara 50% ventilada) vista superior (D)



Img.B.39 Ensayo 1 -Febrero 04 de 2011- medida 5 de la configuración (Fd-5)
(cámara 100% ventilada) vista inferior (D)



Img.B.40 Instalación Configuración (Fb). Juntas abiertas entre placas, se observa la subestructura común con los demás sistemas y la lana de roca de 40mm en toda la superficie. (D)



Img.B.41 Ensayo 2 -Febrero 09 de 2011- medida 1 de la configuración (Fb-1) (cámara 0% ventilada) vista inferior (D)



Img.B.42 Ensayo 2 -Febrero 09 de 2011- medida 2 de la configuración (Fb-2) (cámara 25% ventilada) momento de apertura de la cámara para la realización del ensayo (D)



Img.B.43 Ensayo 2 -Febrero 09 de 2011- medida 3 de la configuración (Fb-3) (cámara 50% ventilada) vista inferior se observa la junta de dilatación que atraviesa la sala (D)



Img.B.44 Ensayo 4 -Febrero 17 de 2011- medida 1 de (FI) fachada sin sistemas instalados (D)



Img.B.45 Escuadras de fijación 75mm de largo de acero galvanizado (D)



Img.B.46 Lana de roca *Ultravent black* de *Knauf insulation* rollo. 40mm de espesor aislamiento de la cámara de la (FVL) (D)



Img.B.47 Placas de 1.20 x 2.40 y 12.5mm de espesor de (CB) *Aquapanel* de *Knauf*, hoja exterior de la (FVL) (D)

REFERENCIAS, FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA

[B.1] Bento Fernández, María. Los sistemas de cerramiento de fachadas ventiladas y el CTE Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña ITEC Artículo Técnico, Conarquitectura CA35. Julio 2010.

[B.2] Pérez Navarro, Julián; Álvarez Sandoval, Antonio; Montero Fernández de Bobadilla, Eduardo. *Manual básico para fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad.* Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte Comunidad Autónoma de la Región de Murcia España 2007.

B.3: (Google maps)

D: Elaboración propia Andrea Niampira Daza

D': Elaboración propia en base a otros recursos

-AENOR. Manual de normas UNE. Acústica en la edificación. AENOR, 2002.

-Cyril, M. Harris. Manual de medidas acústicas y control de ruido. McGraw-Hill, 1995.

-Querol Noguera, Josep M. Aislamiento acústico en la edificación. Proyecto cálculo, control técnico y administrativo. Manuales profesionales III. Col·legi d'Arquitectes Tècnics de Tarragona, 2003.

-Egan, M. David. Architectural Acoustics. Mc Graw-Hill, 1988.

- ITEC. Documento: DAU 09/052 A. Aquapanel Outdoor sistemas W387 y W388
Barcelona, Enero de 2009.

- AUDIOSCAN *Enginyeria del so. Estudi Acústic de les Aules Practiques P1 i P4 de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura del Vallès.* Ref. 4601/98. Junio de 1998.

Listado de figuras Anexo B

Fig.B. 1 Propuesta de la hoja exterior de la (FVL) a ensayar. (D).....	305
Fig.B. 2 Detalle en alzado del tramo de fachada (D').....	306
Fig.B. 3 Sección del tramo de fachada (D').....	306
Fig.B. 4 Detalle en planta del tramo de ensayo (D').....	307
Fig.B. 5 Detalle sección muro base (D).....	307
Fig.B. 6 Planta 2ª edificio ETSAV (D').....	308
Fig.B. 7 Sala de ensayo planta 2ª (D').....	309
Fig.B. 8 Detalle en planta de la sección de la subestructura para la construcción de los prototipos de (FVL) (D').....	311
Fig.B. 9 Detalle en sección vertical de la subestructura. (D).....	313
Fig.B. 10 Disposición de las placas en alzado de fachada y detalle en sección vertical (D).....	314
Fig.B. 11 Alzado y sección de (FVL) configuración (Fd) (D).....	316
Fig.B. 12 Sistema de ventilación de la (FVL) (D).....	317
Fig.B. 13 Localización en planta de los puntos de medición al interior de la sala receptora (D).....	319

Listado de imágenes anexo B

Img.B.1 Vista aérea Edificio ETSAV. Sant Cugat del Vallès (B.3).....	305
Img.B.2 Sector de ensayo en la fachada norte (D).....	305
Img.B.3 Lucernarios de la cubierta Detalle de las aberturas de ventilación (D).....	306
Img.B.4 Vista fachada con junta de dilatación (D).....	306
Img.B.5 Vista interior del tramo de fachada y de la sala interior. (D).....	308
Img.B.6 Acceso a la sala (D).....	309
Img.B.7 Acondicionamiento previo de la sala. (D).....	310
Img.B.8 Colocación de paneles rígidos en los lucernarios. (D).....	310
Img.B.9 Acondicionamiento de los lucernarios para los ensayos (D).....	310
Img.B.10 Vista exterior de los lucernarios antes de los ensayos (D).....	310
Img.B.11 Colocación del aislamiento de la cámara de la (FVL) (D).....	312
Img.B.12 Colocación de la subestructura de la (FVL). (D).....	312
Img.B.13 Colocación de los perfiles auxiliares configuración (Fd). (D).....	313
Img.B.14 Colocación de lamas de la configuración (Fd). (D).....	314
Img.B.15 (FVL) configuración (Fa). (D).....	315
Img.B.16 (FVL) configuración (Fb). (D).....	315
Img.B.17 (FVL) configuración (Fd). (D).....	316
Img.B.18 Configuración general de la sala durante los ensayos. (D).....	320
Img.B.19 Vista de las condiciones exteriores del ensayo. (D).....	320
Img.B.20 Vista del foso situado entre el edificio y el talud de jardinería (D).....	321
Img.B.21 Detalle del muro base en la sección de ensayo. Se observa la junta de dilatación (D).....	321
Img.B. 22 Vista general de la zona de ensayo. (D).....	324
Img.B.23 Imagen de la fuente sonora: Altavoz JBL. EON 15G2 (D).....	324
Img.B.24 Ubicación del micrófono. (D).....	324
Img.B.25 Imagen del sonómetro de medición. Situado al interior de la sala (D).....	324
Img.B.26 Imagen del proceso de segmentación de la superficie superior de ventilación de la cámara (D).....	325
Img.B.27 Imagen de la superficie inferior de ventilación de la cámara totalmente abierta (100%). (D).....	326
Img.B.28 Imagen de la superficie inferior de ventilación de la cámara parcialmente abierta (75%) (D).....	326
Img.B.29 Lugar de realización de la fase práctica. Plataforma mecánica para la ejecución de los prototipos (D).....	343
Img.B.30 Fijación de perfil perimetral de la subestructura para los prototipos. (D).....	343

Img.B.31 Colocación de montantes de la subestructura. (D)	343
Img.B.32 y Img.B.33 Unión de montantes de 50 x 50mm para formar la cámara de 10cm (D)	344
Img.B.34 Colocación de lamas de la configuración (Fd). Primer prototipo de (FVL) que se instaló. (D) .	344
Img.B.35 Aislamiento al interior de la sala. (D)	345
Img.B.35 Adecuación de aislamiento al interior de la sala. (D)	345
Img.B.37 Ensayo 1 -Febrero 04 de 2011- medida 2 de la configuración (Fd-2) (D)	345
Img.B.38 Ensayo 1 -Febrero 04 de 2011- medida 3 de la configuración (Fd-3) (D)	346
Img.B.39 Ensayo 1 -Febrero 04 de 2011- medida 5 de la configuración (Fd-5) (D)	346
Img.B.40 Instalación Configuración (Fb).(D)	346
Img.B.41 Ensayo 2 -Febrero 09 de 2011- medida 1 de la configuración (Fb-1) (cámara 0% ventilada) vista inferior. (D)	347
Img.B.42 Ensayo 2 -Febrero 09 de 2011- medida 2 de la configuración (Fb-2) (cámara 25% ventilada) (D)	347
Img.B.43 Ensayo 2 -Febrero 09 de 2011- medida 3 de la configuración (Fb-3) (cámara 50% ventilada) (D)	348
Img.B.44 Ensayo 4 -Febrero 17 de 2011- medida 1 de (FI) fachada sin sistemas instalados (D)	348
Img.B.45 Escuadras de fijación 75mm de largo de acero galvanizado (D)	349
Img.B.46 Lana de roca <i>Ultravent black</i> de <i>Knauf insulation</i> rollo. (D)	349
Img.B.47 Placas de 1.20 x 2.40 y 12.5mm de espesor de (CB) <i>Aquapanel</i> de <i>Knauf</i>. (D)	349

Listado de tablas Anexo B

Tabla B. 1 Nivel de definición de las exigencias básicas para la (FVL). [B.1]	302
Tabla B. 2 Requisitos, exigencias básicas y características prestacionales aplicables a los cerramientos de la (FVL). [B.1]	303
Tabla B. 3 Características del cerramiento doble de la fachada (FI). (D´)	328
Tabla B. 4 Características de la (FVL). (D´)	331

Listado de gráficos Anexo B

Graph B.1 Diferencia de niveles fachada (FI) (D´)	329
Graph B.2 Niveles de presión sonora ensayo en la fachada (FI) (D´)	329
Graph B.3 Niveles de presión sonora al exterior y al interior medidos para la configuración (Fa) (D´) ...	332
Graph B.4 Niveles de presión sonora para (Fa-5) (D´)	333
Graph B.5 Comparación de los diferentes niveles de presión sonora de la fuente de emisión exterior para todas las configuraciones ensayadas (D´)	334
Graph B.6 Niveles de presión sonora L₂ medidos en el interior de la sala para los diferentes sistemas. (D´)	335
Graph B.7 Niveles de presión sonora L₁ y L₂ de la configuración (Fd) (D´)	338
Graph B.8 Diferencia de niveles de la configuración Fd (D´)	339

ANEXO C

INFORME CAMPAÑA 2

Ensayos de laboratorio

ANEXO C ACOUSTIC REPORT (LVF) Prototype: Evaluation of the Acoustic Performance

**Varying the Thickness and the Surface of the Ventilation Inlet in the Air cavity –
June 2012**

PhD student Andrea Niampira Daza

Collaboration

PhD Thesis Director Professor Joan Lluís Zamora I Mestre Universitat Politècnica de Catalunya
PhD Professor André De Herde Université Catholique de Louvain (UCL)
PhD Professor Marcelo Blasco (LARGE)
Knauf Company Belgium

Doctorate Program "Àmbits de recerca en l'energia i el medi ambient a l'arquitectura".
Departament de Construccions Arquitectòniques I
Universitat Politècnica de Catalunya

SUMMARY

This report is based on the acoustic testing done as part of a PhD thesis regarding the study of the acoustic improvement of facades by means of using a lightweight ventilated cladding developed by A. Niampira Daza, supervised by J.L. Zamora-Mestre in the doctorate program “*ÀMBITS DE RECERCA EN L'ENERGIA I MEDI AMBIENT A L'ARQUITECTURA* in the *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC).Barcelona Tech, with the collaboration of the *Acoustic Laboratory LARGE* directed by Marcelo Blasco, *Aquapanel Knauf* company and *Université Catholique de Louvain* (UCL)

The Laboratory testing was performed at LARGE (Laboratory for Acoustic Research on Glass and large Envelopes) in Ghent (Belgium). The installation of the samples were done by Aquapanel Knauf Company, the acoustic experiments were developed by Marcelo Blasco and Andrea Niampira Daza.

CONTENTS TABLE ANEXO C

SUMMARY	357
INTRODUCTION	359
1. BACKGROUND OF THE TESTS.....	359
2. DEVELOPMENT OF THE LABORATORY TESTING	361
3. GENERAL OBJECTIVES	361
3.1 Location laboratory.....	361
3.2 Base wall characteristics.....	363
4. DESCRIPTION OF THE (LVF) PROTOTYPE	363
4.1 Changes in the cavity depths of the (LVF).....	365
4.2 Variation of the opening of the ventilation inlet in the (LVF).....	366
5. METHODOLOGY AND TESTING PROCEDURE	366
5.1 Conditions essay rooms	367
5.2 Realization to the assembly	368
6. MEASUREMENTS.....	368
7. RESULTS AND ANALISYS.....	370
7.1 Description of measurement results	370
7.2 Comparison between the entire (LVF) [A] and the naked base wall [C] case (Fa) d=110.....	374
8. MEASUREMENT SUMMARY	375
9. DOUBLE LAYERS PERFORMANCE	376
10. CONCLUSIONS	377
11. REFERENCES AND LIST OF FIGURES	379

INTRODUCTION

The Lightweight Ventilated Facade is commonly used to offer benefits in different fields as sun radiation protection, in thermic aids to establish the temperature inside of building and having an air cavity, can performance to refresh by the air flow ventilation and avoid the humidity transmission to the façade produced by the rain, in acoustics a double layer can improve the sound reduction, using this system the betterment is visible in medium and high frequencies 500Hz-1000Hz. In the rehabilitation buildings the lightweight ventilated system is an opportunity to improve the protection in different levels and change the aspect of the facades. The thermal and acoustic regulations CTE Technical Building Code DB-HR basic document noise protection and DB-HE basic document energy savings in the case of Spain and the rest of European countries establish new requirements that some of the old buildings may be cannot satisfy. Some buildings before to 1979 (year to was approved the first thermal regulation in Spain) [C.1] cannot meet these requirements due to in that moment the buildings did not have to satisfy an specific efficiency energy regulation and about the construction, the walls have not an enough thickness to protect as well as the use lack of insulation materials in some cases. For this reason the lightweight systems used as external claddings in buildings can improve the high performance and in acoustics the characteristics of the air cavity can contribute in the sound reduction. This research is approach in the acoustic performance using the lightweight ventilation system as exterior cladding.

The purpose of this research was to measure the acoustic performance of a wall (base wall) applying a lightweight ventilated exterior cladding in laboratory, changing the thickness of the air cavity and varying the surface of the ventilation inlets at the upper and bottom parts of a prototype developed. This practice work was motived after to done on-site experiments that due to the surroundings, conditioned the results (show in this report).

BACKGROUND OF THE TESTS

Is known that the use of an extra layer can improve the acoustic performance in a wall but how many? in the Spain regulation CTE the use of the exterior claddings do not count like an acoustic betterment of the façade having an air layer between the original façade and the exterior cladding however there is a new document in process “*Catálogo de Elementos Constructivos*” (officially not yet published) in the apart 4.2.8 (*fábrica con revestimiento discontinuo, con cámara de aire ventilada, aislamiento por el exterior*) starts to describe the values of sound reduction index R_A dBA and R_{Atr} for the enclosures with simple wall applying a lightweight system (isolation layer in the exterior part of the interior layer, air cavity ventilated and the exterior cladding). In the next table are indicated some values for facades with open joints exterior cladding applied in different simple walls.

As is indicated in the table, the acoustic improvement of sound reduction using a lightweight system depends largely of the composition of the inner leaf (base wall).

4.2.8. Fábrica con revestimiento discontinuo, con cámara de aire ventilada, aislamiento por el exterior

FACHADA Hoja principal de fábrica con revestimiento discontinuo CON CÁMARA DE AIRE VENTILADA Aislamiento por el exterior							
	RE	revestimiento exterior discontinuo					
	C	cámara de aire ventilada ⁽⁷⁾					
	AT	aislante no hidrófilo					
	HP	hoja principal					
	LC	fábrica de ladrillo cerámico					
	BH	fábrica de bloque de hormigón ⁽⁶⁾					
	BC	fábrica de bloque cerámico					
	LHO	fábrica de ladrillo perforado de hormigón ⁽⁶⁾					
	BP	fábrica de bloque de picón ⁽⁶⁾					
	RI	revestimiento interior formado por un enlucido, un enfoscado o un alicatado					
Código	Sección	Datos entrada		HE ⁽¹⁾ U (W/m ² K)	HR ⁽²⁾		
		RE	HS		R _A	(dBA)	R _{Air}
			GI		(dBA)	(dBA)	(kg/m ²)
F 8.1		R2	4	1/(0,47+R _{AT})	42	39	156
		[43]	[40]		[168]		
F 8.2		R2	4	1/(0,48+R _{AT}) ⁽³⁾ 1/(0,97+R _{AT}) ⁽⁴⁾	44 ⁽³⁾	41 ⁽³⁾	205 ⁽³⁾
		[41 ⁽⁴⁾]	[38 ⁽⁴⁾]		[177 ⁽⁴⁾]		
F 8.3		R2	4	1/(0,61+R _{AT})	42	39	143
		[44]	[41]		[167]		
F8.4		R2	4	1/(0,40+R _{AT}) ⁽³⁾ 1/(0,60+R _{AT}) ⁽⁴⁾	44 ⁽³⁾	41 ⁽³⁾	200 ⁽³⁾
		[42 ⁽⁴⁾]	[39 ⁽⁴⁾]		[179 ⁽⁴⁾]		
F 8.5 ⁽⁸⁾		R2	4	1/(0,69+R _{AT}) [1/(0,77+R _{AT})]	49	46	226
		[206]					
F 8.6 ⁽⁵⁾⁽⁸⁾		R2 o B3	5	1/(0,74+R _{AT}) [1/(0,83+R _{AT})]	53	50	252
		[227]					

(1) El factor de temperatura de la superficie interior, f_{res} se calculará según la siguiente expresión: f_{res}=1-U·0,25
(2) En el caso de elementos de fábrica de ladrillo aparecen dos valores de m, de R_A y de R_{Air}; el primero de ellos es un valor mínimo y el segundo, que figura entre corchetes, es un valor medio. En el caso de hoja principal de ladrillo cerámico, los valores de m, de R_A y de R_{Air} son aplicables sólo en el caso de que la hoja principal sea de ladrillo perforado o macizo.
(3) Valores de U, m, R_A y R_{Air} para fábricas de bloque o ladrillo de hormigón convencional o de áridos densos
(4) Valores de U, m, R_A y R_{Air} para fábricas de bloque o ladrillo de hormigón de áridos ligeros
(5) Valores válidos para bloques de picón de 25 cm de espesor con dos o tres cámaras
(6) Cuando la hoja principal sea de bloque o ladrillo de hormigón, salvo cuando sea curado en autoclave, el valor de la absorción de los bloques o ladrillos medido según el ensayo de UNE 41170:1989EX debe ser como máximo 0,32 g/cm³.
(7) Según se establece en el DB HS 1, una cámara de aire ventilada tiene un espesor e_{AT} ≥ 3 cm y a ≥ 10 cm, un sistema de recogida y evacuación del agua y aberturas de ventilación con una anchura >5 mm repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior de un paño entre forjados. El área de ventilación efectiva será h 120 cm² por cada 10 m² de fachada entre forjados.
(8) Valores de R_A y R_{Air} válidos para una densidad del material de 1.800 kg/m³ y 1.500 kg/m³. Entre corchetes figura el valor de m correspondiente a una densidad del material de 1.500 kg/m³.

Table C. 1 Values of lightweight façade with open joints exterior cladding applied in different base walls.(C.A1)

About the regulation, the manufacturers can generate a DAU (*documento de adecuación al uso*) dossier where specifics the performance in different areas of one system, in the case of Aquapanel DAU document published in this year, does not mentioned the values of improvement how in other areas like structural security, fire protection, thermal contributions just limited the action to probe by acoustic testing follow the regulation EN ISO 10140-1.

In conclusion of this experiment is visible a few improvement using the lightweight system, however the wall used (original wall) is too heavy with a very good acoustic performance difficult to improve, this reason and the surrounding influence motivated the realization of a new testing in laboratory to see the acoustic performance.

DEVELOPMENT OF THE LABORATORY TESTING

Based on the results obtained during the on-site experimentation and following the research in the use of lightweight ventilated systems, in this new test scheme, focuses in the acoustic performance using this system and trying different thickness in the air cavity and the variation opening in the ventilation surfaces inlet. For this experiment was built a (VLF) prototype installed in a base wall based in one of the models designed in the on-site experiment, the configuration (**Fa**) defined as “Façade a: Lightweight external cladding Cement Board panels, with sealed joints between panels”, the choice of this model was determined taking into account the results obtained in the sound reduction behaviour and this configuration is near to the typical Aquapanel lightweight system configuration (system chosen to done the experiment).

GENERAL OBJECTIVES

- In a more controlled environment, observe the real improvement in the sound reduction index of the lightweight Aquapanel system and the behaviour varying the opening of the ventilation inlet.
- Trying different air cavity depths to see possible variations in the sound reduction index and more specifically in the lower range of frequencies which are the most complicated to attenuate.

Location laboratory

LARGE (Laboratory for Acoustic Research on Glass and large Envelopes) is located in Ghent Belgium certified according to EN ISO 17025. The measured criterion is the sound reduction index (R) according to EN ISO 10140-2. [B.4]



Img.C. 1 Laboratory location Zwijnaarde Ghent (B.C1)



Img.C.2 Laboratory general view (D1)

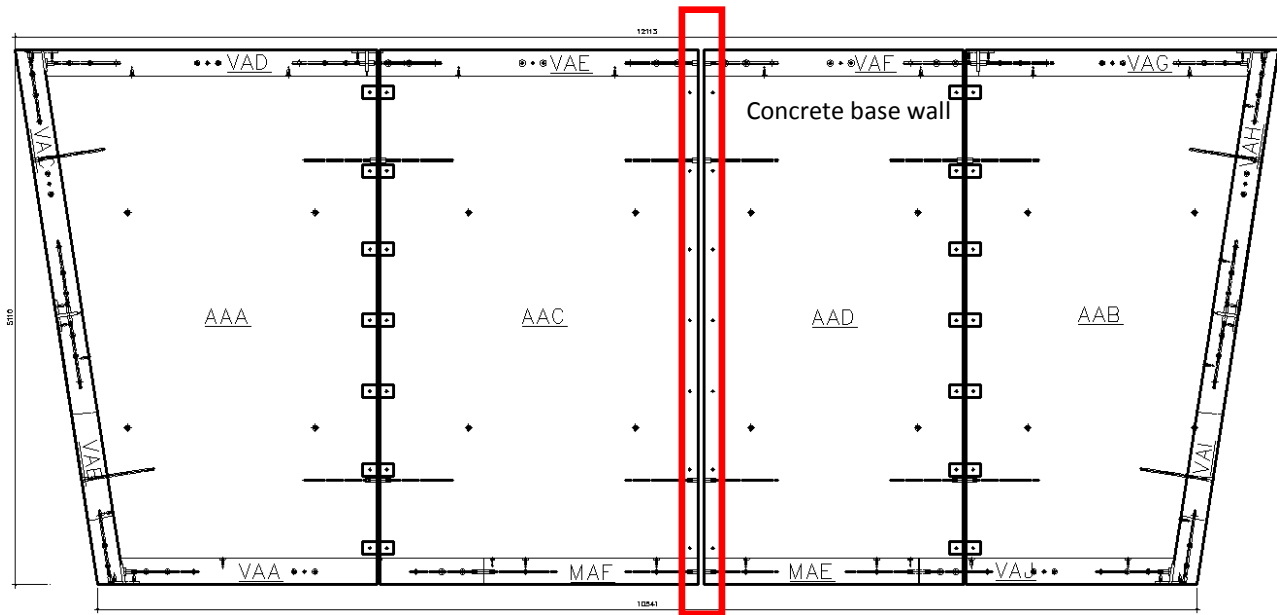


Fig.C. 1 LARGE laboratory plan view (D1)

The main dimensions of the laboratory are 5.11m wide x 12.11m large x 4.85m high

Base wall characteristics

The base wall is a massive concrete wall of 20cm thickness which will be used to simulate the real façade; the surface used for the testing was 4.60m wide x 4.30m high.

DESCRIPTION OF THE (LVF) PROTOTYPE

For the acoustic testing we used one configuration of the external cladding, being a light substructure and three different cavity depths defined as $Fa d=110\text{mm}$, $Fa d=142.5\text{mm}$ and $Fa d=175\text{mm}$ installed in the base wall to have the double ventilated façade.

To build the prototype a light moveable substructure was used to avoid as much as possible drilling in the laboratory wall. The substructure consists of metallic profiles 50mm screwed only in at the top and bottom part of the total surface inside the air cavity an insulation layer of mineral wool panels 60mm was used.



Img.C.3 Substructure and insulation layer glued to the base wall (D1)

The exterior cladding was made of glass fibre reinforced concrete panels (GRC) with sealed joints. The prototype was built in the entire surface of the base wall to have a uniform behaviour.



Img.C.4 Detail installed prototype (D1)

Changes in the cavity depths of the (LVF)

The development of the double layer ventilated façade with lightweight external cladding is definite by three components as in the on-site experiments **A** [the double ventilated façade] **B** [the lightweight system] **C** [base wall in this case], where the component $A = B+C$

The changes of the cavity depth were made by moving the lightweight wall, the sizes obtained were:

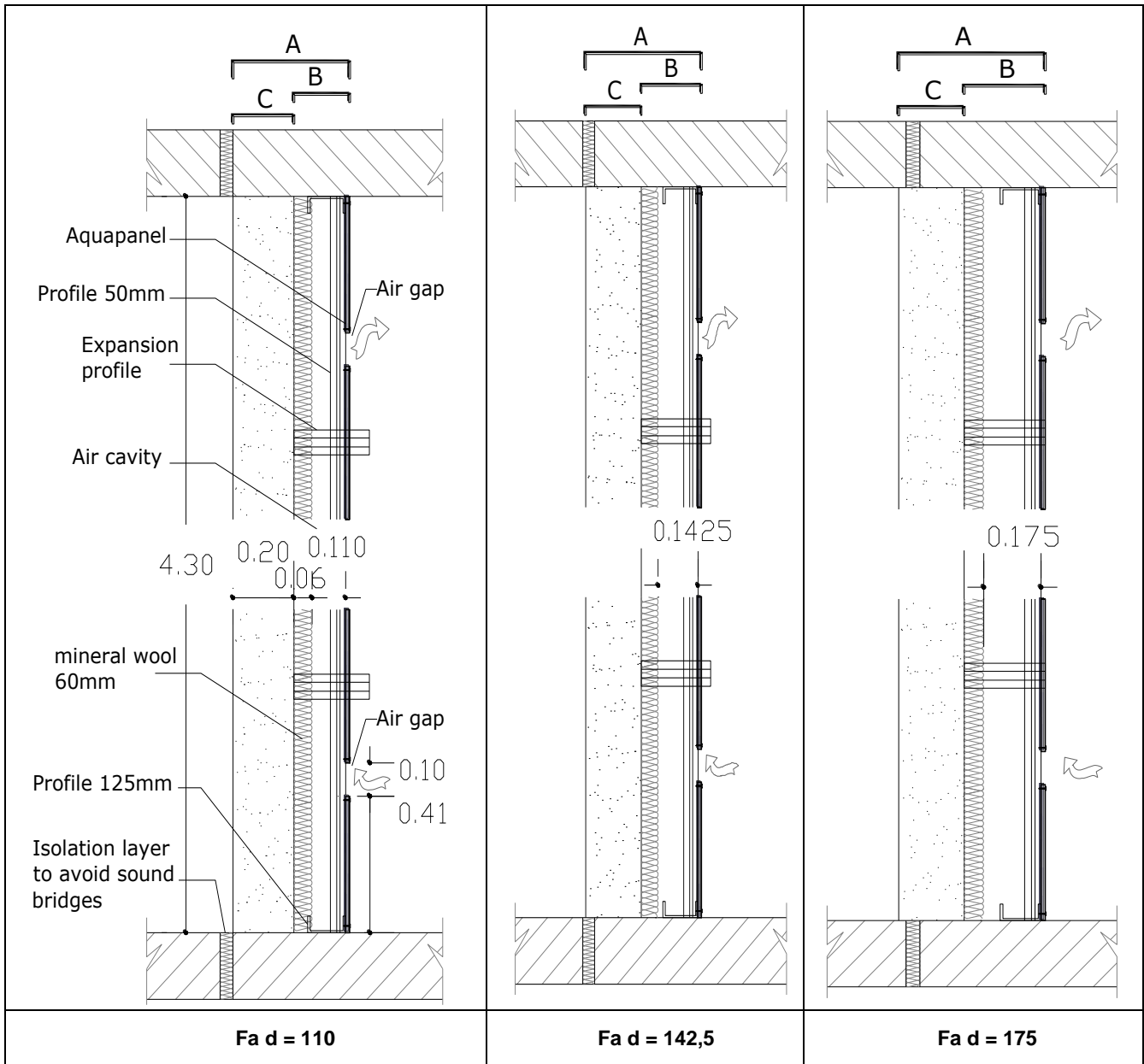


Fig.C.2 Section different cavity depths. (D)

Variation of the opening of the ventilation inlet in the (LVF)

For this testing were defined 3 different states of ventilation amount using continuous openings at 50cm distance compared to the level of the floor and ceiling.

The ventilation opening was placed in the front surface of the lightweight wall as opposed to the experiments on-site, where the opening was made in upper and bottom surface of the lateral parts in the lightweight wall.

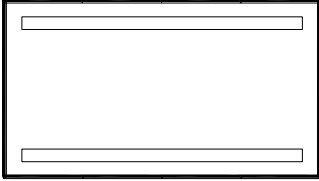
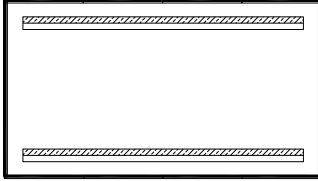
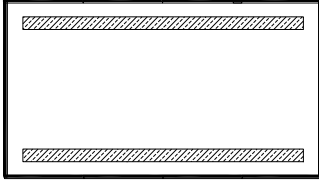



Overview of different ventilation inlets used in the prototype		
1	2	3
		
Front section	Front section	Front section
		
Top and bottom surface	Top and bottom surface	Top and bottom surface
100% ventilated	50% ventilated	0% ventilated

Fig.C.3 Ventilation inlet method (D)

METHODOLOGY AND TESTING PROCEDURE

For the realization of the laboratory measurements the following standards were used:

- EN ISO 10140-2: 2010 *Acoustics laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2; Measurement of airborne sound insulation.*

The equipment used was:

- A sound level meter Brüel & Kjaer type 2270
- Sound source using white noise
- Loud speaker Mackie SRM 450. 660mm height, 390mm width, 376mm depth. The loud speaker was located on a tripod.

The lightweight system was installed on one side of the base wall which divides the space of the laboratory into two rooms. The volumes of both rooms are 95 m³ and 115 m³. [C.4]

Conditions essay rooms

In the emission room a diffuse sound field was created using diffusing screens located on the ceiling and the loudspeaker emitting its sound towards the corner of the room.



Img.C.5 Loudspeaker in the corner of the emission room during the testing (D)

The sound pressure level was measured in both rooms in the range of frequencies from 50Hz up to 5000Hz.

The measurements were done using the SLM in five different locations of the room (10 seconds averaging time per position), this process was done in both rooms.



Img.C.6 Measure points in the emission room (D)

Realization to the assembly

The assembly and testing of the prototype followed this order:

- 1) Fa double layer ventilated façade with lightweight external cladding (CB) panels, by sealed joints between panels; 175mm depth thickness air cavity.
- 2) Fa double layer ventilated façade with lightweight external cladding (CB) panels, by sealed joints between panels; 110mm depth thickness air cavity.
- 3) Fa double layer ventilated façade with lightweight external cladding (CB) panels, by sealed joints between panels; 142,5mm depth thickness air cavity.

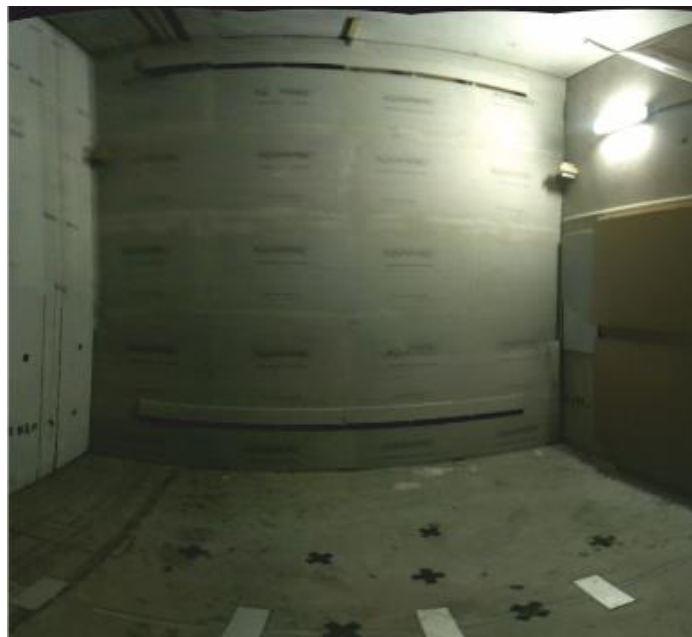
For the measurements of the different ventilation states, the ventilation surfaces were closed by 0%, 50% and 100% using covers of the same material (CB).

MEASUREMENTS

One measurement was done for each ventilation state (100% ventilated, 50% ventilated and 0% ventilated) and this procedure was followed for each of the different cavity depths, yielding 10 measurements in total (including the measurement of the base wall).



Img.C.7 Prototype installed air cavity 100% ventilated (D1)



Img.C.8 Prototype installed air cavity 50% ventilated (D1)



Img.C.9 Prototype installed air cavity 0% ventilated (D1)

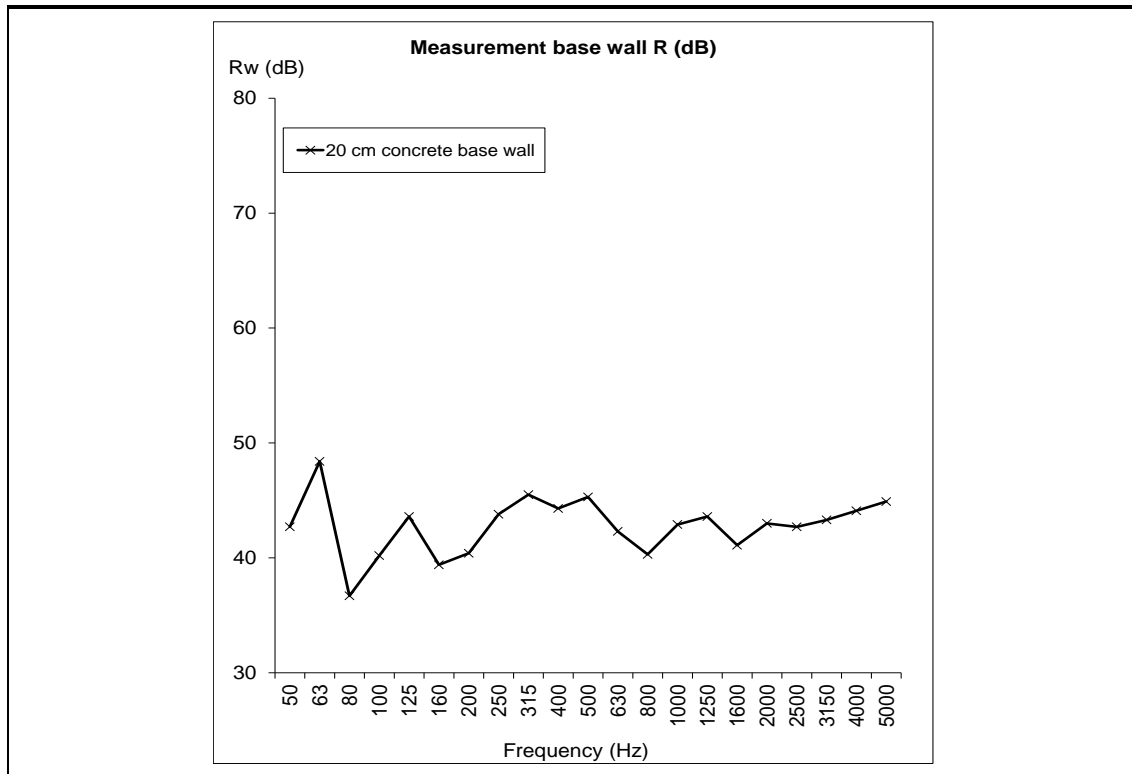
RESULTS AND ANALISYS

The results obtained of the sound reduction index R for the different cases following the method of the regulation UNE EN ISO 717-1:1997. For the laboratory measurements was use white noise. [C.5]

Description of measurement results

Base wall [C]

Concrete wall 20cm thickness	
Surface area	19.78m ²
Mass	500Kg/m ²
Volume room 1	115m ³
Volume room 2	95m ³
Temperature indoor lab	20 ^o
Humidity relative	55%
TR room 1	1.39 Sec.
TR room 2	1.14 Sec.
R_w (C ₅₀₋₅₀₀₀ ; C _{tr 50-5000})	43 (0;-1) dB



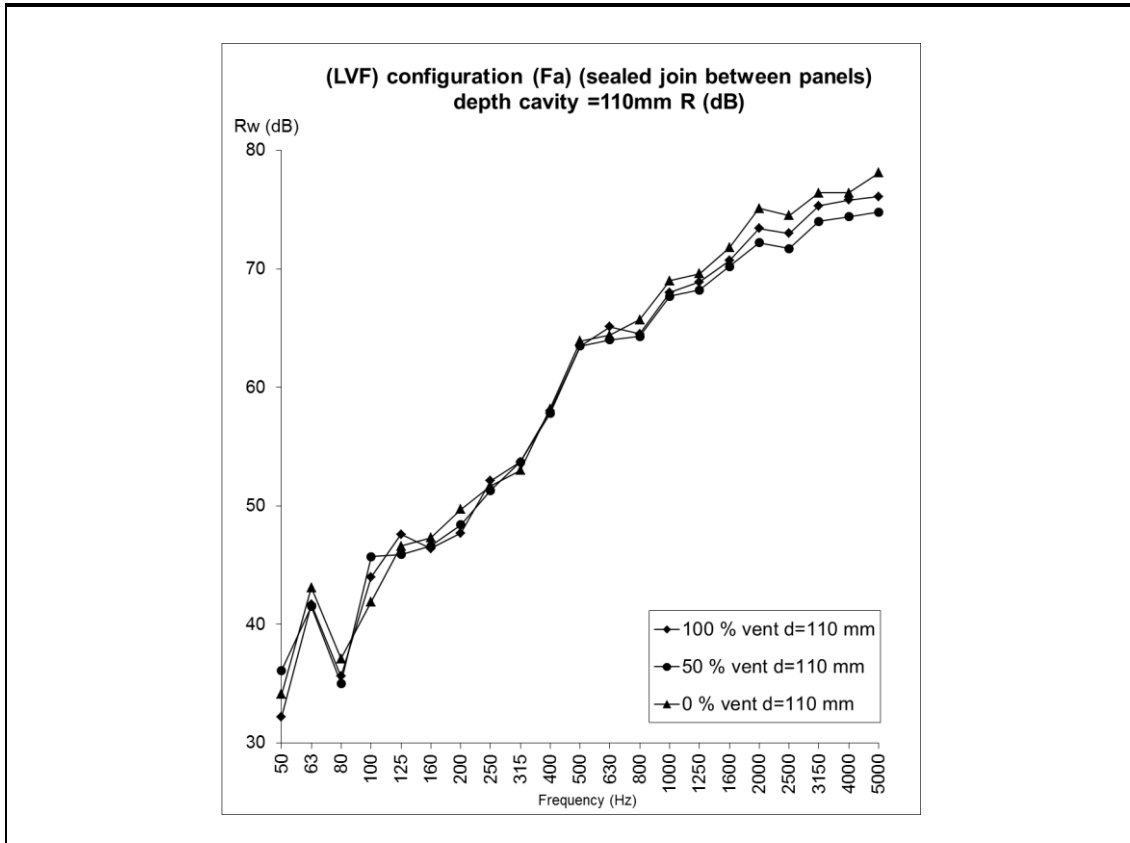
Graph C. 1 Range frequency sound reduction index base wall. (D1)

The results for the base wall shows drops of the sound reduction especially in low frequencies probably due to the resonant frequency of the wall that in this case will be 93Hz but the predominance is in 80Hz and appear again in 160Hz, 800Hz and 1600Hz.

Fa d=110mm [A]

Double layer ventilated façade with lightweight external cladding (GRC) panels with sealed joints between panels, 110mm air cavity depth in three different ventilation states 100% ventilated, 50% ventilated, 0% ventilated.

Fa d=110mm			
Surface area	19.78m ²		
Mass	16Kg/m ²		
Volume room 1	115m ³		
Volume room 2	95m ³		
Temperature indoor lab	20°C		
Humidity relative	55%		
TR room 1	1.39 Sec.		
TR room 2	1.14 Sec.		
R _w (C ₅₀₋₅₀₀₀ ; C _{tr 50-5000})	100% ventilated	50% ventilated	0% ventilated
	64 (-2,-7) dB	63 (-1,-6) dB	64 (-2,-7) dB



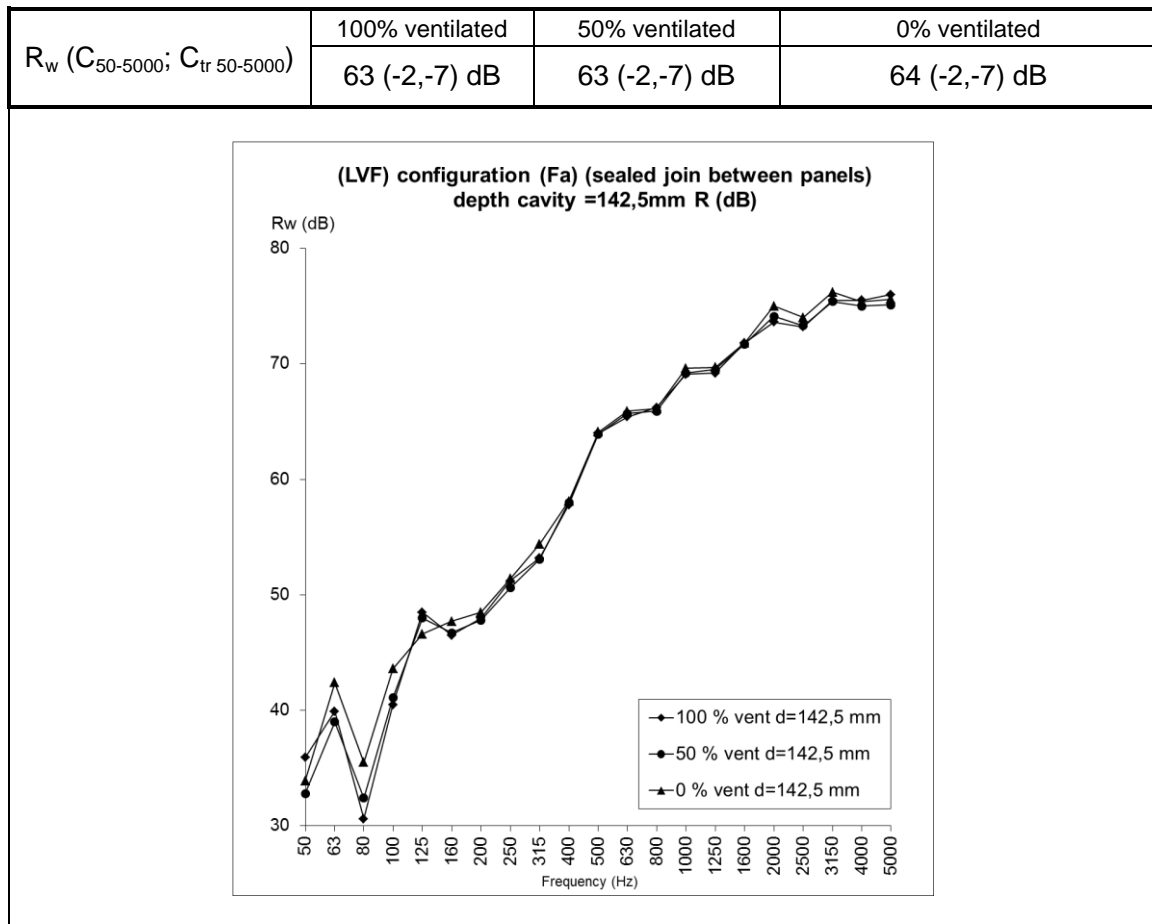
Graph C. 2 Range frequency sound reduction index Fa d=110mm. (D1)

Is observed an improvement up to high frequencies. In the spectral comparison of the different ventilation states for the prototype Fa d=110 only a minimal variation in high frequencies is visible. The drop near to the resonant frequency of the wall itself persists.

Fa d=142,5mm [A]

Double layer ventilated façade with lightweight external cladding (CB) panels with sealed joints between panels, 142,5mm air cavity depth in three different ventilation states 100% ventilated, 50% ventilated, 0% ventilated.

Fa d=142,5mm	
Surface area	19.78m ²
Mass	16Kg/m ²
Volume room 1	115m ³
Volume room 2	95m ³
Temperature indoor lab	20°
Humidity relative	55%
TR room 1	1.39 Sec.
TR room 2	1.14 Sec.



Graph C. 3 Range frequency sound reduction index Fa d=142,5mm. (D1)

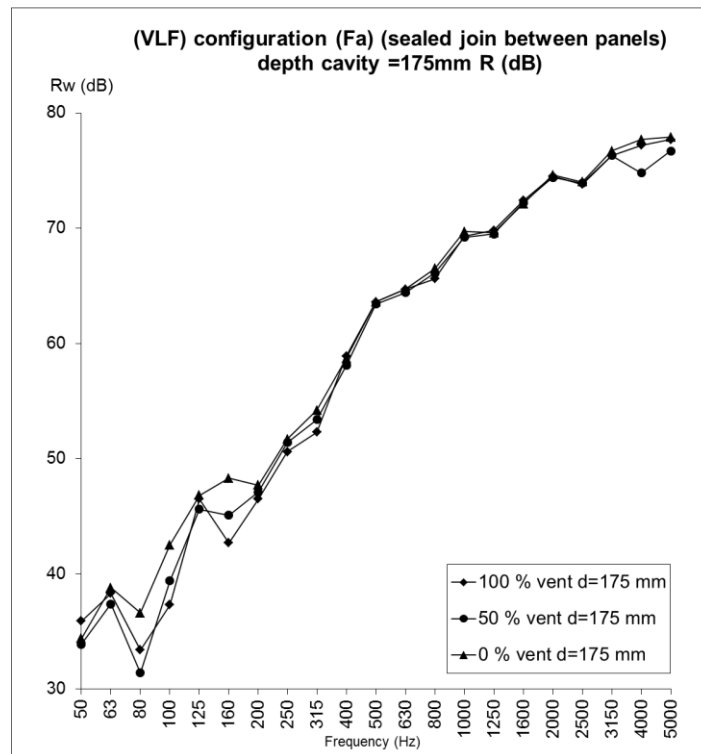
In this case the spectral comparison of the different ventilation states, the behaviour is very similar within the different ventilation openings; however a small variation is visible in the low frequencies. The drop more visible is in 80Hz that is even worse than in the case Fa d=110.

Fa d=175mm [A]

Double layer ventilated façade with lightweight external cladding (CB) panels with sealed joints between panels, 175mm air cavity depth in three different ventilation states 100% ventilated, 50% ventilated, 0% ventilated.

Fa d=175mm	
Surface area	19.78m ²
Mass	16Kg/m ²
Volume room 1	115m ³
Volume room 2	95m ³
Temperature indoor lab	20°C
Humidity relative	55%
TR room 1	1.39 Sec.
TR room 2	1.14 Sec.

$R_w (C_{50-5000}; C_{tr 50-5000})$	100% ventilated	50% ventilated	0% ventilated
	62 (-2,-8) dB	63 (-2,-8) dB	64 (-2,-7) dB

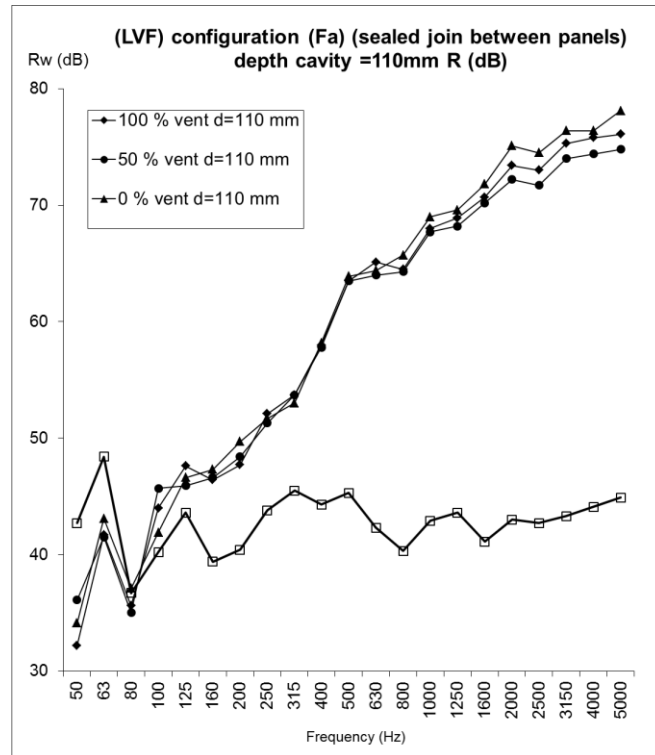


Graph C. 4 Range frequency sound reduction index Fa d=175mm. (D1)

The spectral comparison between the different ventilation states shows some variations in the low frequencies particularly in the 80Hz and 160Hz band where the difference between 100% and 0% ventilated reaches 5dB.

Comparison between the entire (LVF) [A] and the naked base wall [C] case (Fa) d=110


Regarding the comparison between the prototype and the base wall, an important improvement is visible in the sound reduction index. The base wall performs less good than a normal concrete wall due to leakages. This was done in order to better see the improvement using the lightweight system.






Graph C. 5 Range frequency sound reduction index comparison Fa d=110mm and the base wall (D')

There is a drop in 80Hz frequency visible all of the prototypes that seems worse when there is an air cavity and more depth, the reason for this drop is the wavelength in the tall dimension inside of the laboratory, following the formula is found that there is a modal wave at 80Hz, and about the behaviour in the thickness of the different air cavity prototypes at 80Hz frequency can be related for the double layer performance.

MEASUREMENT SUMMARY

	Sound reduction index R_w Non-airtight base wall (facade without systems)	
	$R_w (C_{50-5000}; C_{tr 50-5000})$	43 (0;-1) dB

Sound reduction index R_w in the different prototypes				
	Fa Double layer ventilated façade with lightweight external cladding (GRC) panels by sealed joints air cavity depth = 110mm			Base wall
	Air cavity 100% ventilated	Air cavity 50% ventilated	Air cavity 0% ventilated	
$R_w (C_{50-5000}; C_{tr 50-5000})$	64 (-2;-7) dB	63 (-1;-6) dB	64 (-2;-7) dB	43 (0;-1) dB
	Fa Double layer ventilated façade with lightweight external cladding (GRC) panels by sealed joints air cavity depth = 142,5mm			Base wall
	Air cavity 100% ventilated	Air cavity 50% ventilated	Air cavity 0% ventilated	
$R_w (C_{50-5000}; C_{tr 50-5000})$	63 (-2;-7) dB	63 (-2;-7) dB	64 (-2;-7) dB	43 (0;-1) dB
	Fa Double layer ventilated façade with lightweight external cladding (GRC) panels by sealed joints air cavity depth = 175mm			Base wall
	Air cavity 100% ventilated	Air cavity 50% ventilated	Air cavity 0% ventilated	
$R_w (C_{50-5000}; C_{tr 50-5000})$	62 (-2;-8) dB	63 (-2;-8) dB	64 (-2;-7) dB	43 (0;-1) dB

DOUBLE LAYERS PERFORMANCE

Many researches show the improvement in the sound reduction in double wall and double facades taking into account the importance of the double wall components as well as the distance and characteristics of the cavity between them, when the leaf mass increases the resonance frequency decreases, however some conditions of the ensemble indicates the affectation of the each element in the sound reduction especially in low frequencies.

In double leaf the sound reduction performance depends of the mechanical coupling between the individual layers and their mass, the depth in the air cavity and the use of an absorber material inside.

The influence of these factors can change the behaviour depending on the characteristics. More depth in the air cavity generally is better to attenuate the sound; however the air inside of the leafs is a spring transmitting the vibration energy from the layer to layer, these interactions produces drops in the sound reduction curve and the mass-air-mass resonance frequency. [C.6], [C.7], [C.8], [C.9], [C.10], [C.11].

Using the resonance frequency mass-air-mass formula is obtained the resonance frequency for the different prototypes:

Resonance frequency in the prototypes	
Fa d=110mm	56Hz
Fa d=142,5mm	49Hz
Fa d=175mm	45Hz

And the natural frequency in the base wall [C] is:

Coincidence frequency f_0 in the base wall	
Concrete wall 20cm thickness	93,91Hz

In other literature found to obtain the critical frequency for a simple wall is used a table with constant in Hz values for different materials by millimetres thickness, in the case of the concrete is 18700Hz/mm and for the base wall the coincidence frequency is 93,5Hz. [C.6]

CONCLUSIONS

The present report shows the process, results and analysis of the laboratory testing realized to measure the behaviour and sound reduction index of the double layer ventilated façade with lightweight external cladding prototype [A] of configurations by varying the cavity depth and the opening of the ventilation inlet, carried out in the laboratory.

Comparing the current results obtained with the on-site experiment regardless of the values, there are big differences in the behaviour of the double layer ventilated façade with lightweight external cladding [A] in front of the base wall naked [C].

The sound insulation values obtained in the on-site experiments with and without the use of the lightweight exterior cladding system, indicates an improvement near to 5dB mostly uniform in all frequencies in the Fa configuration (see Graph C.1.).

In the laboratory the improvement using the lightweight exterior cladding [B] with relation to the naked base wall [C], reaches 5dB in low frequencies and even up to 20dB in high frequencies for the three different depth types measured (see Graph C.8,C.9,C.10). Is important know that the substructure installed in the laboratory experiment was not the same than the on-site, in the laboratory experiments were used less screw connections to avoid drill the base wall and in this case the substructure was done to move the lightweight exterior cladding [B] to obtain the different depths in the air cavity. The ventilation of the prototype was propose in front of the lightweight external cladding to have one total area opening in the entire wall, these conditions can influence in the results of the sound reduction index between the on-site and laboratory experiments.

With regards to the variation of the ventilation inlet, in the on-site experiments, the results did not show a visible difference between the ventilation states, most likely due to the testing conditions; however, in the laboratory experimentation there are no relevant differences either. The variance is around 1dB in the prototypes Fa d=110 and Fa d=142,5 and 2dB in the case of the prototype Fa d=175mm. When looking at it spectrally we observe more clear variations in performance in the prototypes depending on the cavity depth. In the case of Fa d=110mm it is possible to see differences in the middle and high frequencies of around of 2dB between the three ventilation states (see graph 5.) and in the case of Fa d=175mm the differences are only in the low frequencies up to 200Hz varying 3dB and 5dB in 80Hz and 160Hz respectively (see Graph C7.).

The behaviour in low frequencies in the three different prototypes Fa [A] and the base wall [C], show a strong drop in 80Hz caused by the wavelength, is visible a worse performance in Fa d=142,5mm 80Hz specially when the air cavity is 100% ventilated where the difference rises 5dB below of the base wall (Graph C.9.). In 160Hz the drop on the three different prototypes is above the base wall and the minimal improve (2 or 3dB approximately) is produced in Fa d=175mm 100% ventilated (Graph C.10.) increasing to 7dB above the base wall in the case Fa d=110 (Graph C.8).

A double layer suppose an improve in the sound reduction in low and high range frequencies especially if is increase the air layer between them and is used an absorber layer inside, however in the results showed, is notorious a loss in the sound reduction in low frequencies even bellow that the base wall in Fa d=175mm and 142,5mm respectively. This behaviour could occur by the resonance effect that could have influence when the air cavity is more depth.

The research done until now about the acoustic performance using the lightweight ventilated system in general show an improvement in the sound reduction index in a surface without openings on-site and in the laboratory experiment, is evident in both testing the influence of the base wall in the behaviour of the double layer with lightweight ventilated exterior cladding, in on-site case the original façade was a wall with high insulation performance and the improvement applying the prototypes was difficult to determinate, so that in the laboratory testing can probe. About the changing of the thickness in the air cavity for the acoustic performance when the depth of the air cavity is bigger show a difference of 1dB between the ventilation inlets may be conditioned by the amount of absorbent material used inside of the air cavity.

However is important to say that the openings in a façade are the weak points of the acoustic performance and the windows quality are the most influential element to determinate the improvement of the sound reduction. The lightweight systems can improve the high performance of the façades especially in renovation buildings in different fields as thermic, esthetical and acoustic but in the last instance, always can be conditioned by the glass opening surfaces of the entire façade. Therefore it is important to know the value of the sound reduction in windows and the base wall (through their characteristics) to determine what is the acoustical improvement using the lightweight ventilated systems as external cladding.

REFERENCES

- [C.1] CIC Centro informativo de la construcción No. 459 *En busca de la elección eficiente de aislamiento para cumplir el CTE pag 42 Dicember 2008 pg. 42*
- [C.2] UNE-EN ISO 140-5 *Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and facades.*
- [C.3] UNE-EN 12354-3 *Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.*
- [C.4] EN ISO 10140-2 *Acoustics laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2; Measurement of airborne sound insulation.*
- [C.5] UNE EN ISO 717-1 *Acoustics. Rattling of sound insulation in buildings and of buildings elements. Part 1: Airborne sound insulation. Amendment 1: Rounding rules related to single number ratings and single number quantities.*
- [C.6] M. Harris Cyril. *Handbook of acoustical measurements and noise control.* McGraw Hill 1995.

[C.7] Blasco Marcelo, Crispin Charlotte. Geventileerde dubbele gevels. Akoestische evaluatie in situ en labo metingen, modelisatie en evaluatie van de toepasbaarheid van de bestaande normalisatie. Centre scientifique technique du Bâtiment CSTB. October 2004 pg10-23.

[C.8] J. Nurzynski. The effect of additional thermal lining on the acoustic performance of a wall. Building Research Institute. Congress Acoustics 2008 Paris.

[C.9] Frutos Vázquez B., Olaya Adán M., Zaballos Nieto J. Análisis acústico de soluciones constructivas con hojas compuestas de entramado autoportante. ACTAS de las II Jornadas de investigación en Construcción. Instituto de ciencias de la construcción EDUARDO TORROJA (CSIC). *Vol 60, No 511 (2008)* Madrid, Spain.

[C.10] Department of electronics and multimedia communications Slovakia www.kemt.feit.tuke.sk
Noise transmission. Consulted in 2011

[C.11] Bradley, J.S.; Birta, J.A. A Simple model of the sound insulation of gypsum board on resilient supports. *Noise Control Engineering Journal*, v. 49, no. 5, Sept-Oct. 2001, pp. 216-223.

SOURCES

C.A1: Catálogo de elementos constructivos del CTE (Spain, March 2010)

C.12: Google maps

D: Own elaboration Andrea Niampira Daza

D': Own elaboration in base to other sources

D1: Marcelo Blasco, LARGE Elaboration

Index of figures, images, tables and graphs ANNEX C

Fig.C. 1 LARGE laboratory plan view. (D1)	363
Fig.C.2 Section different cavity depths. (D)	365
Fig.C.3 Ventilation inlet method. (D)	366
Img.C. 1 Laboratory location Zwijnaarde Ghent (B.C1)	362
Img.C.2 Laboratory general view. (D1)	362
Img.C.3 Substructure and insulation layer glued to the base wall. (D1)	364
Img.C.4 Detail installed prototype. (D1)	364
Img.C.5 Loudspeaker in the corner of the emission room during the testing. (D)	367
Img.C.6 Measure points in the emission room. (D)	368
Img.C.7 Prototype installed air cavity 100% ventilated. (D1)	369
Img.C.8 Prototype installed air cavity 50% ventilated. (D1)	369
Img.C.9 Prototype installed air cavity 0% ventilated. (D1)	370
Table C. 1 Values of lightweight façade with open joints exterior cladding applied in different base walls.(B.A1)	360
Graph C. 1 Range frequency sound reduction index base wall. (D1)	371
Graph C. 2 Range frequency sound reduction index Fa d=110mm. (D1)	372
Graph C. 3 Range frequency sound reduction index Fa d=142,5mm. (D1)	373
Graph C. 4 Range frequency sound reduction index Fa d=175mm. (D1)	374
Graph C. 5 Range frequency sound reduction index comparison Fa d=110mm and the base wall. (D')..	375

ANEXO D

FORMULAS Y PROCEDIMIENTO

De cálculo

ANEXO D FÓRMULAS Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

En este apartado se encuentra información sobre fórmulas de procedimientos que se tuvieron en cuenta para la realización de la tesis. Se divide en tres partes:

- 1- Fórmulas para hallar las propiedades acústicas de los diferentes elementos de la (FVL)
- 2- Fórmulas utilizadas en las mediciones acústicas para el cálculo de resultados.
- 3- Información complementaria sobre las herramientas de software utilizadas.

1. Fórmulas para hallar las propiedades acústicas de los diferentes elementos de la (FVL)

1.1 Ley de masas

El comportamiento de un cerramiento de acuerdo a la ley de masas tiene tres zonas de influencia:

- Zona de dominio de la elasticidad ($f < f_0$), correspondiente a muy bajas frecuencias donde el aislamiento desciende hasta f_0 , frecuencia de resonancia del primer modo vibratorio de la partición, donde es prácticamente nulo.
- Zona de dominio de la masa, ($f_0 < f < f_c$), donde el aislamiento es gobernado por la ley de masas, (aumento de 6dB/octava).
- Zona de dominio del amortiguamiento interno o coincidencia, ($f > f_c$), donde el aislamiento baja considerablemente hasta llegar a f_c para después volver a crecer de modo progresivo a razón de unos 10dB/octava.

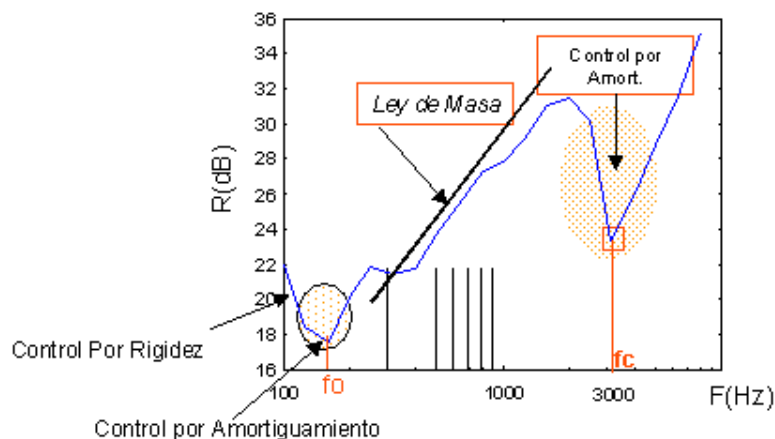


Fig.D. 1 Comportamiento ley de masas. Aislamiento a ruido aéreo en condiciones de laboratorio

de un panel de yeso de 10mm de espesor ($M=7.5 \text{ kg/m}^2$) (DC.1)
La fórmula utilizada para hallar la frecuencia crítica es:

$$F_c = (c^2 / 1,8d) \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

Eq. 10 (DA.1)

Donde:

c = velocidad del sonido (345m/s)

d = espesor de la pared

ρ = densidad

E = módulo dinámico de young

1.2 Aislamiento en paredes dobles

Al duplicar la masa se obtiene una mejora de 6dB, para obtener mayor aislamiento se necesita más masa que por cuestiones de diseño y economía no es viable, una solución es el uso de varias capas de diferente espesor y composición. Las paredes dobles contribuyen teniendo un espacio de separación ya sea vacío o relleno.

El aislamiento en este caso, lleva a la aparición de frecuencias en el entorno de las cuales existe una fuerte reducción del aislamiento acústico. En éste caso se trata de la frecuencia natural del sistema f_0 y de la frecuencia de cavidad.

La frecuencia natural del sistema a se refiere a un conjunto de masas $m1$ y $m2$ unidas por un resorte de rigidez K .

Este sistema de masa-muelle-masa, con la capacidad de vibrar, posee una frecuencia de resonancia propia con la siguiente fórmula:

$$f_{msm} = 60 \sqrt{\frac{\rho_{s1} + \rho_{s2}}{\rho_{s1} \rho_{s2} L_z}}$$

Eq. 11 (DA.2)

Donde:

P_s = masa por unidad de área /densidad superficial kg/m^2

d = su separación en (m)

$K= 60$ para una cámara vacía

L_z = profundidad de la cámara

$$f_{msm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_g}{\left(\frac{\rho_{s1}\rho_{s2}}{\rho_{s1} + \rho_{s2}}\right)}}$$

Eq. 12: (DA.2)

En este caso, s' es el valor K cuando la cámara tiene un material absorbente al interior

El valor K en una cámara rellena se halla dividiendo el módulo de elasticidad E en el espesor del material aislante.

En una cámara rellena parcialmente se halla la frecuencia del material poroso

$$L_{z,eff} = (L_z - d) + \phi d$$

Eq. 13: (DA.2)

Donde:

$L_{z,eff}$ = es la profundidad efectiva de la cámara

L_z = profundidad de la cámara

d = grosor del material poroso

ϕ = porosidad del material

2. Fórmulas utilizadas en las mediciones acústicas para el cálculo de resultados

Para el cálculo de las diferentes mediciones efectuadas se utilizaron los los siguientes términos y respectivas fórmulas:

2.1 Niveles de presión sonora

Nivel de emisión L_1 y otro al interior L_2 , teniendo en cuenta que el nivel de presión L_1 fuese suficiente para que el valor L_2 estuviese por encima de 10dB en todas las frecuencias o si la diferencia es inferior a 10dB pero mayor de 6dB se aplicara una corrección de ruido de fondo con la ecuación:

$$L_2 = 10 \lg(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10})$$

Eq. 14: (DA.3)

Donde:

L_2 es el nivel corregido de la señal en dB medido en el interior de la sala receptora.

L_{sb} es el nivel combinado de la señal y el ruido de fondo, en dB.

L_b es el nivel de ruido de fondo en dB medido en el interior de la sala receptora

Si la diferencia es inferior a 6dB en cualquiera de las bandas de frecuencia se usa la corrección 1,3 dB que corresponde a una diferencia de 6dB.

A partir de la obtención de los valores L_1 y L_2 se determina la diferencia de niveles D_{2m} , que es la diferencia en decibelios, entre el nivel de presión sonora exterior medido a 2m frente a la fachada, $L_{1,2m}$ y el valor medio espacio-temporal del nivel de presión sonora L_2 , en el interior del local receptor.

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad \text{Eq. 15: (DA.3)}$$

2.2 Índice de reducción acústica R

Es 10 veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia sonora, W_1 , incidente en la muestra de ensayo y la potencia sonora, W_2 , transmitida a través de la muestra:

$$R = 10 \lg \left[\frac{W_1}{W_2} \right] \text{ dB} \quad \text{Eq. 16: (DA.3)}$$

2.3 Diferencia de niveles estandarizada $D_{2m,nT}$

Es la diferencia entre el nivel de presión acústica en el exterior a 2m de la fachada y el nivel de presión acústica en el recinto receptor, relativa a un valor de referencia del tiempo de reverberación.

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB} \quad \text{Eq. 17: (DA.4)}$$

Donde:

$L_{1,2m}$ = es el nivel de presión acústica medio a 2m de la fachada en dB

T = es el tiempo de reverberación del recinto receptor en segundos

L_2 = es el nivel de presión acústica medio del recinto receptor en dB

T_0 = es el tiempo de reverberación de referencia, en segundos; para viviendas es $T_0 = 0.5s$

3. Herramientas de software utilizadas

3.1 Imágenes de simulaciones con el programa INSUL 7.0

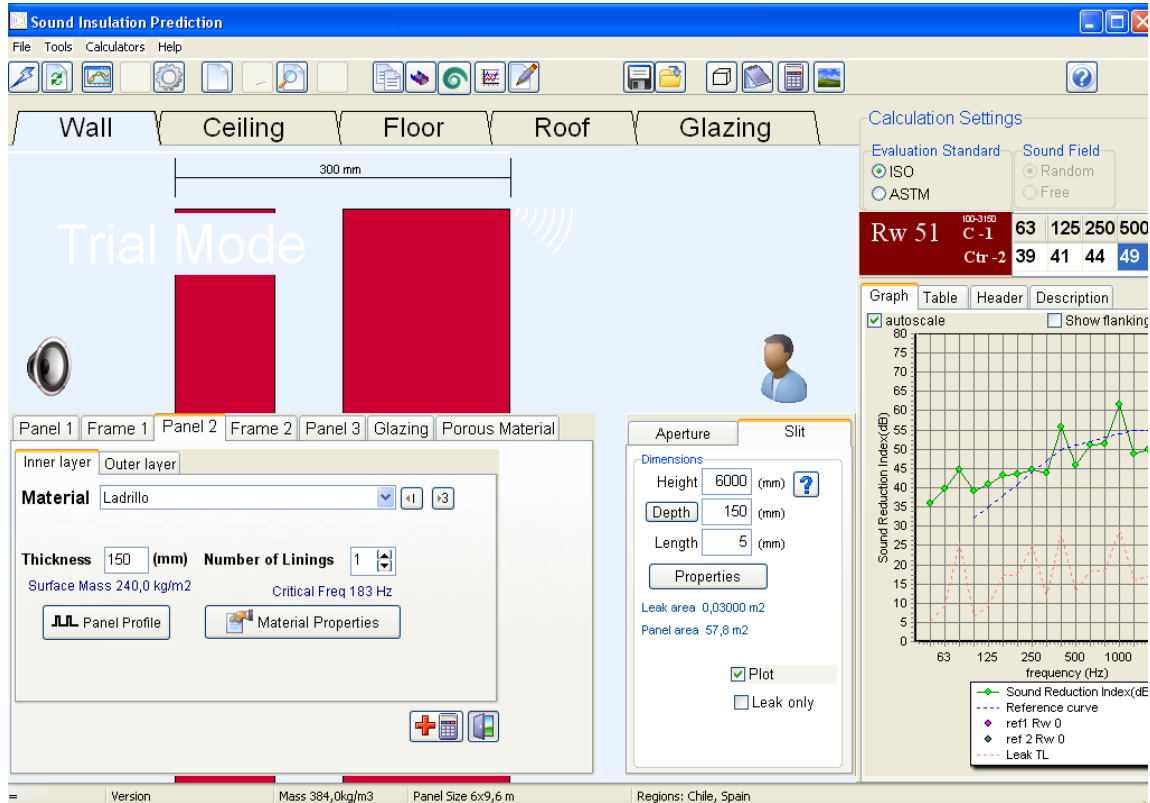


Fig.D.2 Cálculo del muro base (FI) de ETSAV. Simulación en INSUL 7.0 del muro utilizado en la campaña in-situ (D2)

El programa tiene la opción de definir en que normativa se quieren obtener los resultados y el tipo de cerramiento si es simple o múltiple, así mismo se pueden introducir aberturas “slit” ó “Aperture”

Las siguientes imágenes corresponden a la simulación del muro (FI) en diferencia de niveles estandarizada de la medición del ruido aéreo exterior para fachada.

En la herramineta se puede definir el tipo de fuente sonora de medición, sonido rosa, blanco, etc. y el parámetro de forma de fachada definido en la norma EN 12354/3.

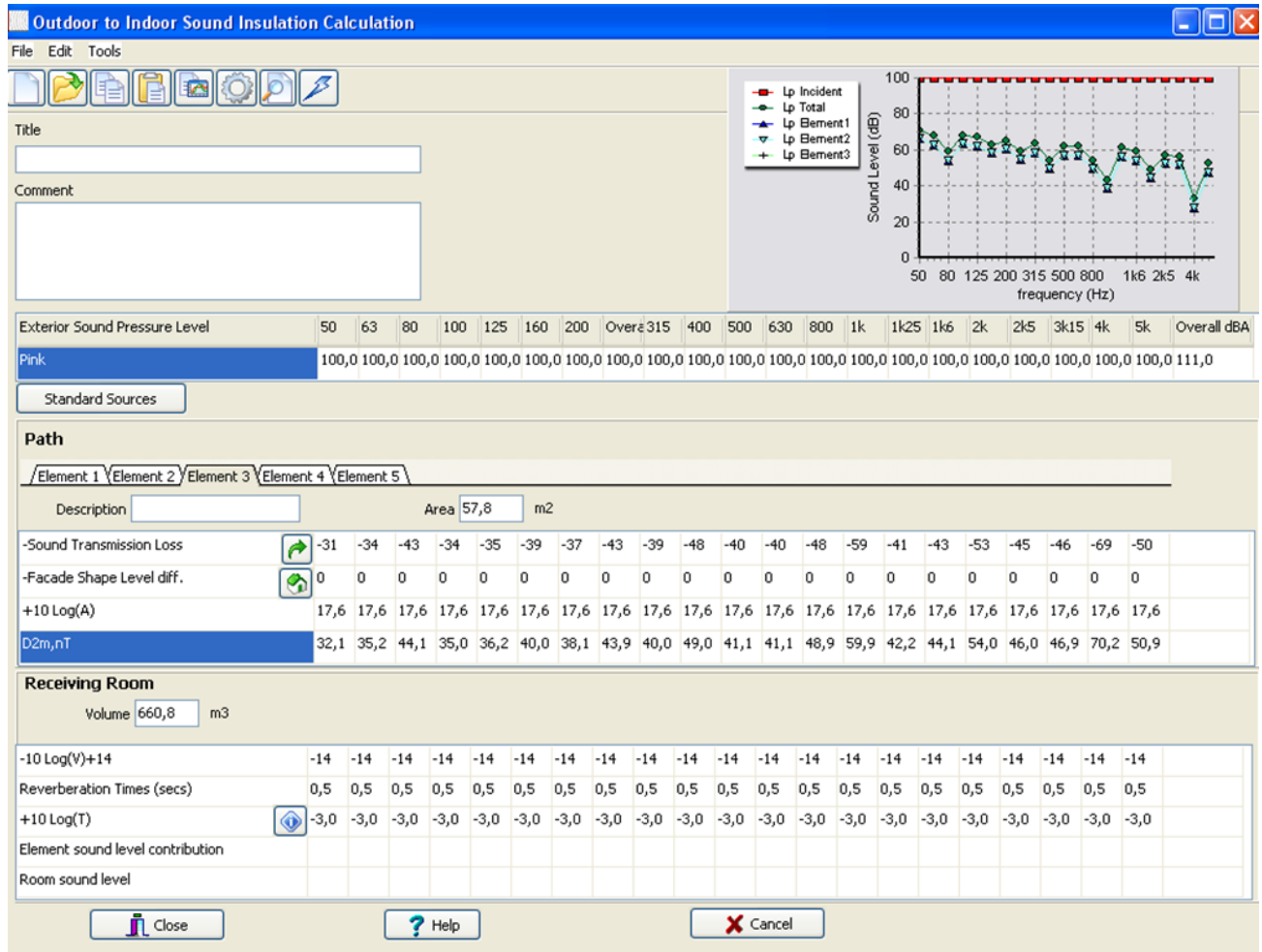


Fig.D.3 Parámetros de cálculo. Aplicación al muro base (FI) simulación INSUL 7.0 (D2)

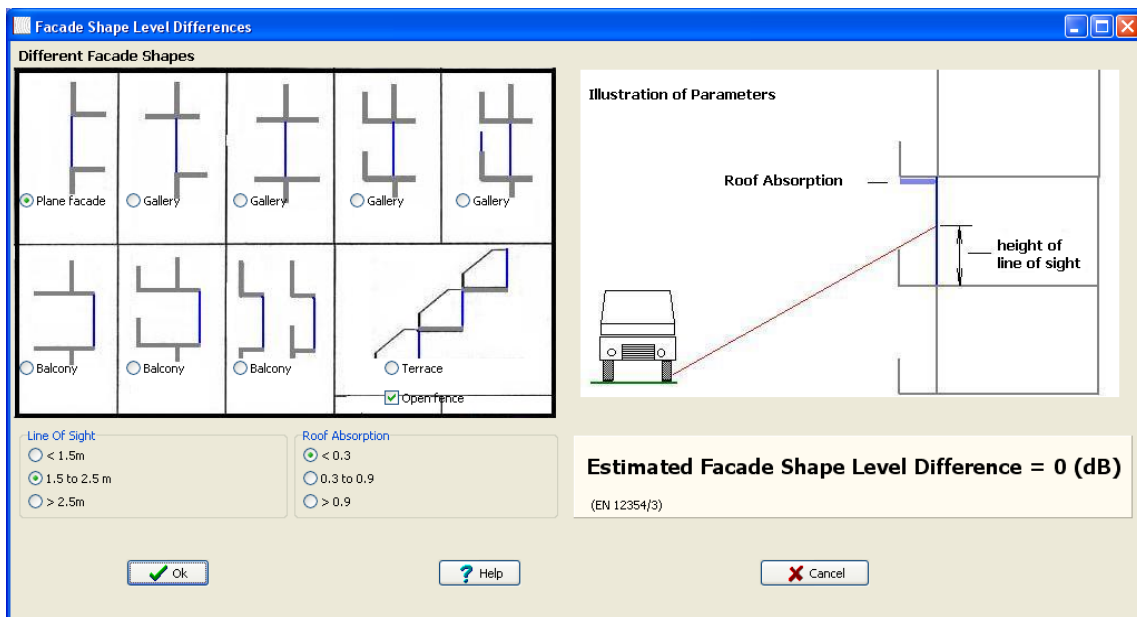


Fig.D.4 Estimación de diferencia de niveles por la forma de la fachada (D2)

3.2 Utilización del programa VA-one 2012 para la campaña de simulación

El programa de Vibro-Acústica se compone de 2 pantallas:

Browser, donde se especifica toda la información y se crea la base de datos

3D window, gráfica donde se modela

Se inicia en el menú *Browser* definiendo puntos de coordenadas en los planos x,y y z (largo, ancho y alto) luego se define en que módulo trabajar SEA, FEM, BEM

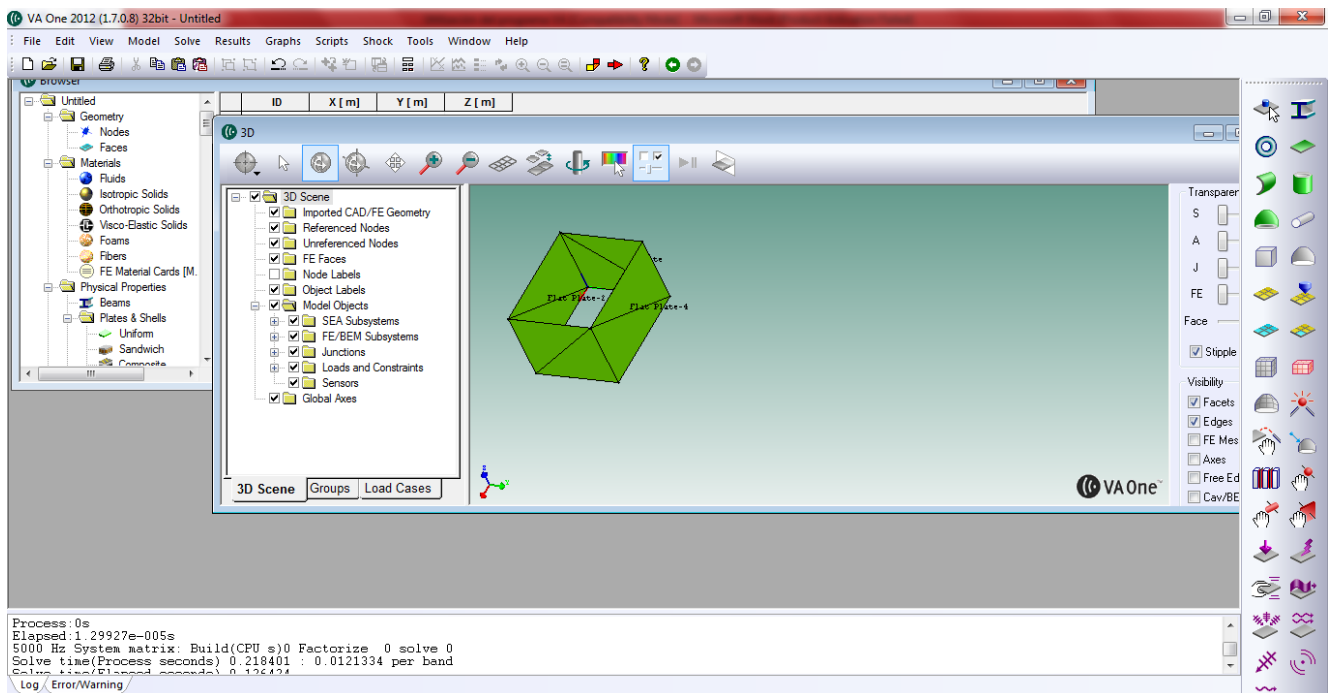


Fig.D.5 Imagen de las dos pantallas de trabajo VA-One 2012 (D3)

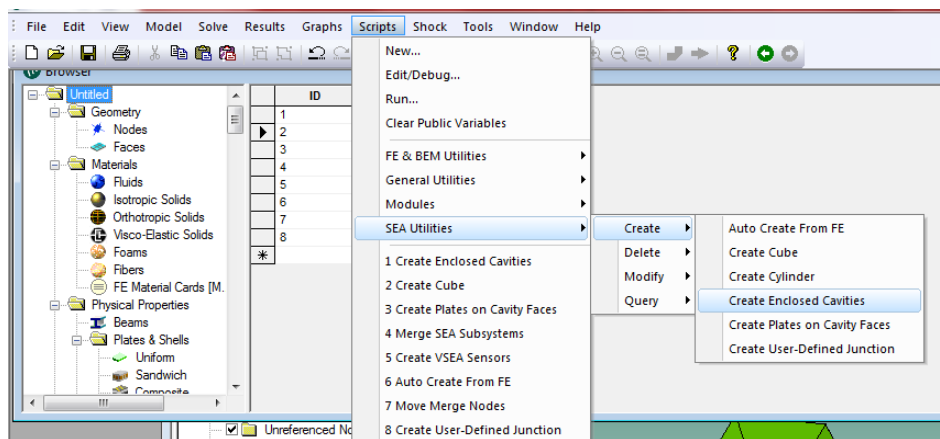


Fig.D.6 Creación de una cámara cerrada. Tipo la de un laboratorio en el módulo SEA (D3)

Se definen el tipo de planos que va a contener la cámara y de los elementos a medir con la asignación de materiales

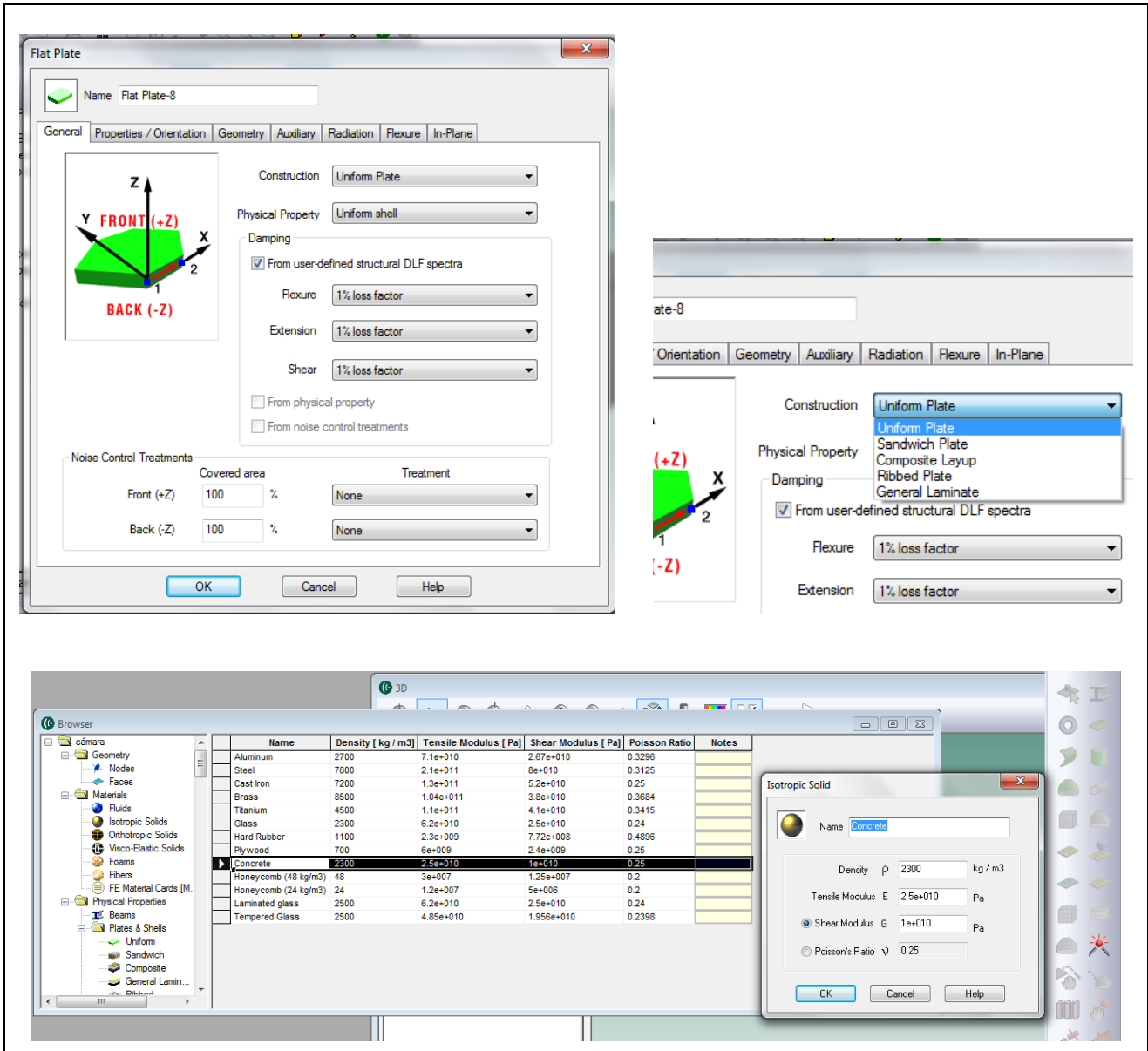


Fig.D.7 Asignación de parámetros de un plano y selección de materiales (D3)

El programa tiene una asignación del rango de frecuencias de 20Hz a 20KHz. Donde se puede definir el rango de frecuencias en le que se quiere trabajar. Así mismo el tipo de campo sonoro, para las simulaciones siempre se utilizó un campo difuso.

Los resultados se obtienen en niveles de presión sonora L1 y L2 y el cálculo de valores de reultados se realiza aparte. Si es en diferencia de niveles o en índice de reducción sonora por ejemplo.

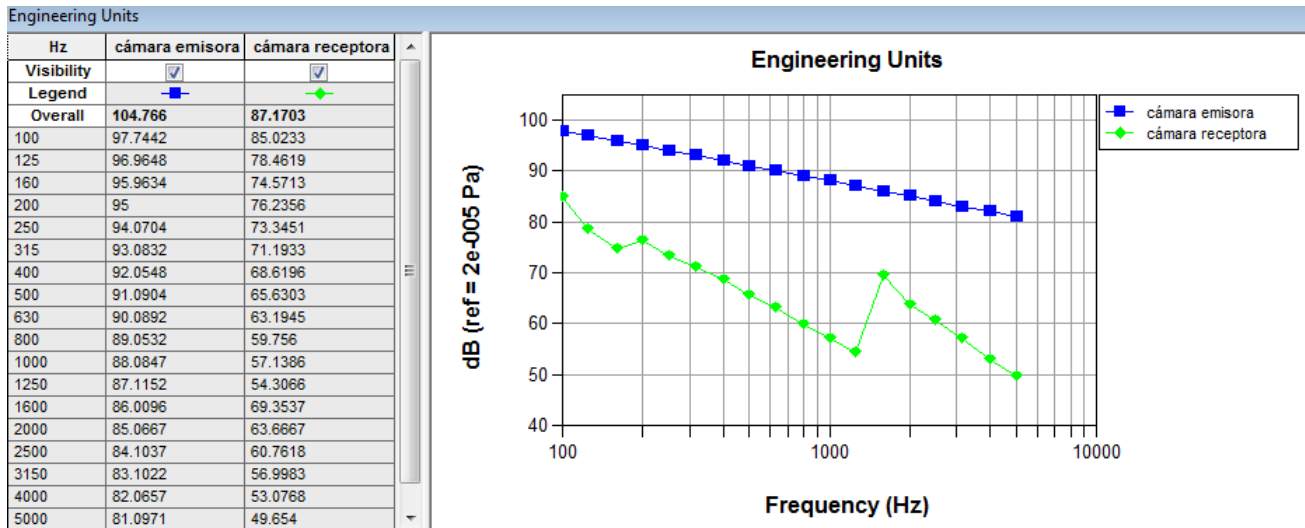


Fig.D.8 Visualización de valores de resultado. Niveles de presión sonora de la cámara emisora y receptora del modelo en VA-one 2012 (D3)

Obtención de niveles de presión sonora en el rango de frecuencias 100 a 5000Hz:

La fórmula utilizada para hallar el índice de reducción acústica de los diferentes modelos es:

$$R = L1 - L2 + 10 \log \frac{S}{A} \text{ dB}$$

Donde:

Eq. 18: (DA.4)

L1 = nivel de presión sonora medio del local emisor

L2 = nivel de presión sonora medio en el local receptor

S = área de la superficie interior de la muestra de ensayo (una de las hojas) 19.78m²

A = área del local receptor por la absorción constante 132.512m² con un 1% de absorción del local.

3.2.1 Análisis de obtención de datos a través de (SEA) en Va-one 2012 para la simulación de los prototipos de (FLV)

La simulación del sistema (FLV) se ha obtenido mediante el método (SEA) que como se describe anteriormente tiene mejor aplicación y ventajas a altas frecuencias también debe seguir unos requisitos de cumplimiento para su funcionamiento.

A nivel físico en la simulación (FLV) Fa d=110 se crean los subsistemas: 1)cámara emisora, 2)cámara intermedia, 3)muro base de hormigón, 4)hoja exterior de cement board, 5)perfil metálico de cerramiento inferior de la cámara, 6)perfil metálico de cerramiento superior y 7)la cámara receptora, sin embargo el

comportamiento modal en los tipos de onda “flexure”, “extension” y “shear” define un subsistema por onda de cada uno de los elementos físicos que tienen asignación de material (Tabla C.1).

Para la comprobación de los subsistemas creados con el cumplimiento de los requisitos de funcionamiento (SEA), como número de modos por frecuencia (mínimo de 3 a 7) y el valor de pérdidas por acoplamiento “*coupling loss factor*” ($\eta_{21} \ll \eta_2$ y $\eta_{21} \ll \eta_1$). Se obtiene la siguiente tabla de valores del número de modos proporcionados por el programa VA-one en la información de los subsistemas.

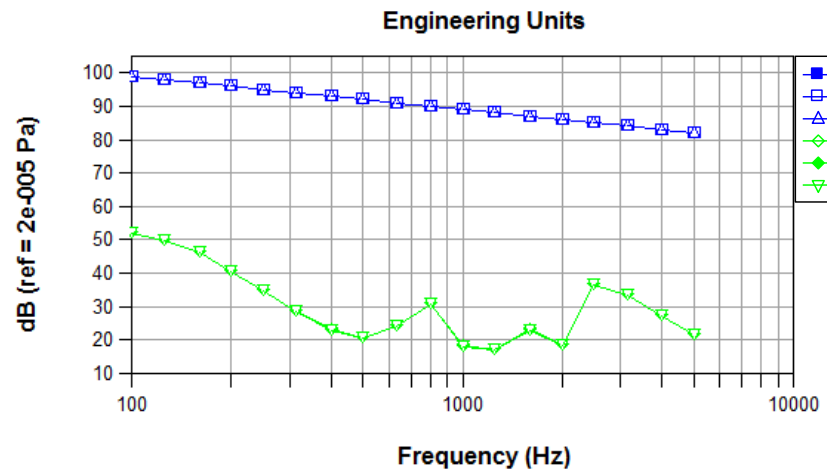
Banda 1/3 (octavas) Hz		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
SUBSISTEMAS	1 Cámara emisora	12.6	22.8	44.2	81.0	152.2	292.1	574.0	1093.2	2157.4	4284.8	8341.5	16247.1	33080.9	64851.6	126591.0	252274.0	510263.0	1000210.0
	2 Cámara intermedia	1.7	2.7	4.4	7.0	11.3	18.6	31.6	52.9	92.2	162.9	287.6	513.5	961.6	1766.6	3261.9	6192.1	12012.6	22800.7
	3F F muro base de hormigón	1.2	1.5	1.9	2.4	3.0	3.8	4.8	5.9	7.5	9.5	11.9	15.0	18.9	23.8	29.9	37.7	47.5	59.7
	3S S muro base de hormigón	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.2	1.9	3.0	4.7	7.5	11.8	18.9	29.8	46.8	74.3	118.8	186.8
	3E E muro base de hormigón	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.0	1.7	2.6	4.1	6.6	10.4	16.4	26.0	41.6	65.4
	4F F hoja ext. Cement Board	28.0	35.4	45.2	56.2	70.8	89.1	112.3	140.4	178.2	223.4	282.0	355.2	445.6	562.8	706.8	891.1	1121.9	1411.2
	4S S hoja ext. Cement Board	0.2	0.3	0.4	0.6	1.0	1.6	2.6	4.1	6.5	10.3	16.3	25.6	41.1	65.0	102.0	162.0	259.0	407.2
	4E E hoja ext. Cement Board	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.4	2.3	3.6	5.7	9.0	14.4	22.7	35.7	56.7	90.6	142.5
	5F F perfil metálico inferior	6.2	7.8	10.0	12.4	15.6	19.6	24.7	30.9	39.3	49.2	62.1	78.3	98.2	124.0	155.7	196.3	247.1	310.9
	5S S perfil metálico inferior	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.2	1.9
	5E E perfil metálico inferior	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.6
	6F F perfil metálico superior	6.2	7.8	10.0	12.4	15.6	19.6	24.7	30.9	39.3	49.2	62.1	78.3	98.2	124.0	155.7	196.3	247.1	310.9
	6S S perfil metálico superior	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.2	1.9
	6E E perfil metálico superior	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.6
	7 Cámara receptora	11.7	21.3	41.1	75.4	141.4	271.3	532.7	1013.8	1999.7	3970.1	7726.3	15045.2	30626.9	60031.2	117167.0	233468.0	472183.0	925505.0

Tabla D. 1 Comprobación del número de modos de cada subsistema. Análisis por frecuencias en cada tipo de onda, las casillas en color indican que no se cumple el mínimo (3-7) (D3)

En la tabla se observa que el no cumplimiento de los subsistemas con el número mínimo se da en el rango bajas frecuencias especialmente y en algunos modos en todas las frecuencias por ejemplo para los perfiles metálicos.

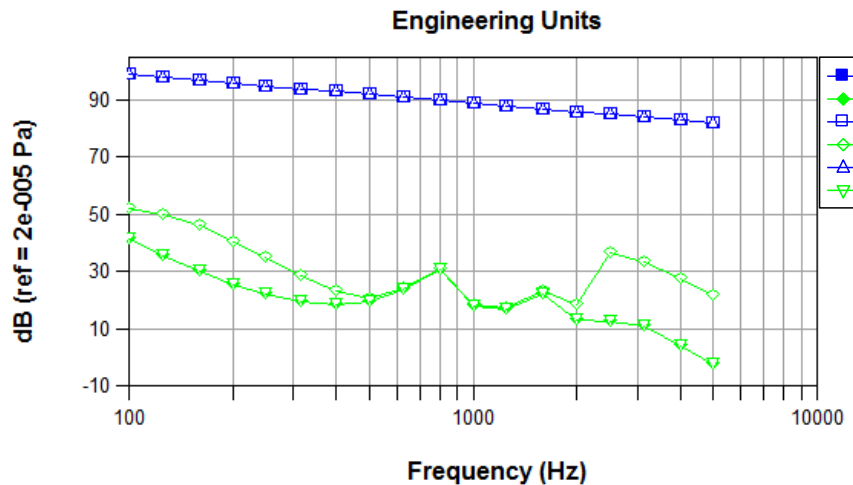
El comportamiento de aislamiento en (SEA) depende de los tipos de onda, las ondas de flexión “*flexure*” son las que más influyen cuando los elementos físicos son independientes y no hay transmisión por flancos, si no se aplican las ondas *extension* y *shear* no hay cambios aparentes. (Graph D.1 y D.2)

3.2.2 Análisis del *coupling loss factor* del sistema para comprobar los requisitos (SEA)



Graph D. 1 Comportamiento de los diferentes tipos de onda del modelo de (FVL) sin conexiones.
Tipo de onda: “flexure”, “extension”, “shear” y “torsion” en niveles de presión sonora (L1 — y L2, —◇—
“flexure”, —◇— “extension” —▽— “shear”) de (FLV) Fa d=110 sin conexión de perfiles (D3)

Cuando hay conexiones a través de elementos físicos, por lo que hay transmisión por flancos, todos los tipos de onda influyen en el comportamiento de aislamiento. En la gráfica se muestra la diferencia entre los tipos de onda, el que más varía es el de flexión.



Graph D. 2 Comportamiento de los diferentes tipos de onda del modelo (FVL) con conexiones.
Tipos de onda: “flexure”, “extension”, “shear” y “torsion” en niveles de presión sonora (L1 — y L2 —◇—
“flexure”, —◇— “extension” —▽— “shear”) de (FLV) Fa d=110 conexión de perfil superior e inferior (D3)

En el caso de los planos (muro base 20cm de hormigón y hoja exterior Aquapanel cement board) existen 3 afectaciones direccionales de propagación de la onda *bending*, *longitudinal* y *transverse* en el programa se expresan como *flexure*, *extensión* y *shear*, la de flexión *bending* ó *flexure* es la más

importante en la radiación del sonido, si se quita la afectación de de las otras dos no influyen tanto en los resultados por lo que se puede trabajar solo con la de flexión. (Robert J. M. Craik 1996 *Sound transmission through buildings using Statistical Energy Analysis*)

En la opción “SEA matrix” en la pestaña “results” del menú principal se puede ver el funcionamiento de conexión y afectación entre los diferentes subsistemas de pérdidas de energía en cada frecuencia.

	Emisora	Receptora	Cavity	Muro base 20cm de hormigón-E	Muro base 20cm de hormigón-S	Muro base 20cm de hormigón-F	Hoja exterior Aquapanel cement board-E	Hoja exterior Aquapanel cement board-S	Hoja exterior Aquapanel cement board-F	Power
Emisora	0.01512969	-6.020252e-01	-1.974233e-00	0	0	0	-1.762171e-01	0	0	0.01540196
Receptora	-6.020252e-01	0.0005166073	-2.529003e-00	0	0	0	-3.450316e-00	0	0	0
Cavity	-1.974233e-00	-2.529003e-00	3.730003e-005	0	0	0	-1.181258e-00	0	0	0
Muro base 20cm de hormigón-E	0	0	0	0.0001652681	-0.0001517687	0	0	0	0	0
Muro base 20cm de hormigón-S	0	0	0	-0.0001517687	0.0001903412	0	0	0	0	0
Muro base 20cm de hormigón-F	0	0	0	0	0	0.0001233628	-6.965197e-01	0	0	0
Hoja exterior Aquapanel cement board-E	-1.762171e-01	-3.450316e-00	-1.181258e-00	0	0	-6.965197e-01	0.0001543654	-0.0001322022	0	0
Hoja exterior Aquapanel cement board-S	0	0	0	0	0	0	-0.0001322022	0.000151917	0	0
Hoja exterior Aquapanel cement board-F	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003480312	0

Tabla D. 2 Relación de matriz SEA. Ejemplo de aportaciones y pérdidas de energía entre los diferentes subsistemas creados, relación a la frecuencia 500Hz (D3)

$$\begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \eta_{1n} & -\eta_{21} & -\eta_{31} & \dots & -\eta_{N1} \\ -\eta_{12} & \sum_{n=1}^N \eta_{2n} & -\eta_{32} & & \\ -\eta_{13} & -\eta_{23} & \sum_{n=1}^N \eta_{3n} & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ -\eta_{1N} & & & & \sum_{n=1}^N \eta_{Nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_{in(1)}}{\omega} \\ \frac{W_{in(2)}}{\omega} \\ \frac{W_{in(3)}}{\omega} \\ \vdots \\ \frac{W_{in(N)}}{\omega} \end{bmatrix}$$

$\omega =$ Angular frequency $\omega = 2 \pi f$ (radians/s), angular velocity (radians/s)

$[\eta](E) = \left\{ \frac{W_{in}}{\omega} \right\}$ simplificación de la ecuación SEA donde $[\eta]$ es el cuadro de la matriz de los factores de pérdida, $\{E\}$ es la columna matriz para la energía y

$\left\{ \frac{W_{in}}{\omega} \right\}$ es la columna matriz de de la energía introducida “input terms”

Fig.D.9 Ecuación solución de la matriz (SEA) (DA.2)

3.2.3 Herramienta (NCT) de VA-one 2012

“*Noise Control Treatment*” es un tratamiento que se puede aplicar a un elemento en este caso una hoja y funciona adheriendo otras capas, incluidas capas de aire para simular el comportamiento de absorción y aislamiento de varias capas añadidas donde a cada una se le asigna un material y valores de espesor y factor de pérdidas, la propiedades acústicas de las capas se computarizan con las del elemento al que se adhieren. Esta opción también se utiliza cuando se tiene una cámara y se añade una capa al interior como por ejemplo un material absorbente.

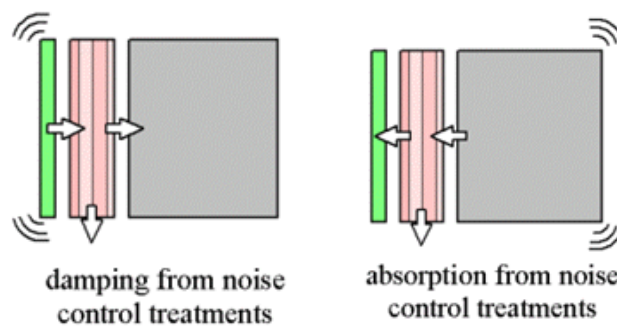


Fig.D.10 Funcionamiento de un (NCT) (DA.5)

3.2.4 Características de los materiales utilizados en las simulaciones con VA-one 2012

Datos usados en el programa VA-one para la simulación del muro de hormigón de 20cm		
Densidad ρ	Módulo de elasticidad E	Loss factor η
2500 kg/m ³ (kg muro/espesor)	2.5e+0.10 (tomado de la base de datos VA-one)	Variable (tomado de una publicación sobre comportamiento del hormigón)

Tabla D. 3 Características del muro de hormigón de 20cm (D')

Datos usados en el programa VA-one para la simulación de la hoja exterior de paneles cement board		
Densidad ρ	Módulo de elasticidad E	Loss factor η
1150 kg/m ³ (características Aquapanel)	1.5e+0.10 (tomado del catálogo euronit)	Del 1% (estimado para una placa de características similares)

Tabla D. 4 Características de la placa (CB) (D')

De los sistemas autoportantes:

Material cartón yeso		Material aluminio para los perfiles laterales	
espesor m =	0.019	espesor m =	0.0006
masa kg/m ² =	16.15	masa kg/m ² =	1.62
densidad ρ =	850	densidad ρ =	2700
loss factor =	0.03	loss factor =	0.1
módulo de elasticidad E =	3.60E+09	módulo de elasticidad E =	7.10E+10

Material absorbente lana mineral (en VA-one se toma como "foam")	
espesor m =	0.046
masa kg/m ² =	2.76
densidad ρ =	60
loss factor =	0.1
módulo de elasticidad E =	4.00E+04

Tabla D. 5 Especificaciones de los materiales utilizados. Valores introducidos en el programa VA-one 2012 (D')

3.2.5 Definición física del modelo de apertura del entramado autoportante en VA-one 2012

Para llegar a simular la localización de las aberturas del modelo en el caso del sistema autoportante, se diseñó un método en que la cámara emisora tuviese contacto directo con los cantos horizontales de la pared doble de placas de yeso:

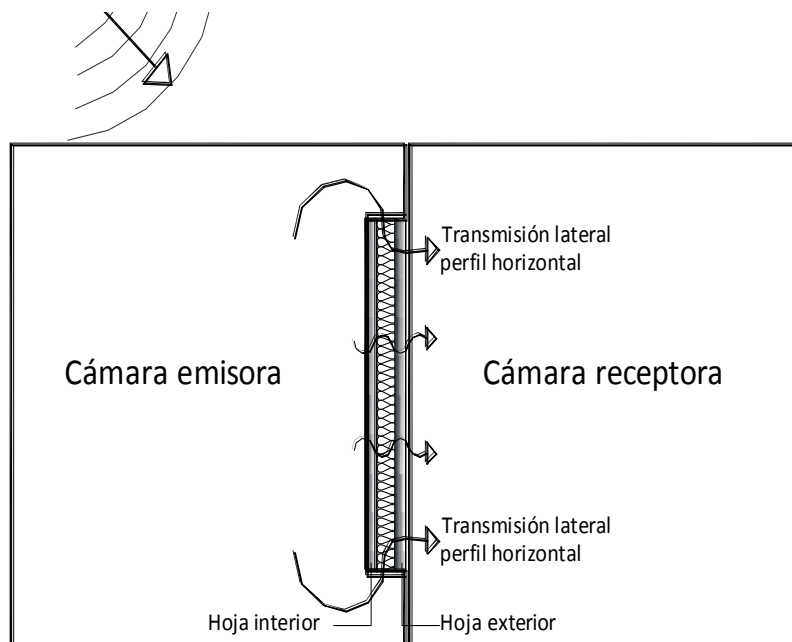


Fig.D.11 Sección de creación de las cámaras para la simulación. Creación de modelo para la simulación de los ensayos de laboratorio teniendo en cuenta las transmisiones laterales. Cerramiento doble de placas de yeso con una cámara intermedia rellena de material absorbente (D)

En las siguientes gráficas se observan las cámaras creadas para la simulación del modelo de sistemas autoportantes. La cámara de la izquierda es la cámara emisora con la aplicación de la fuente sonora y a la derecha la cámara receptora, en medio el modelo de paredes dobles con la asignación de materiales.

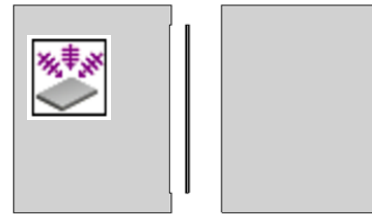
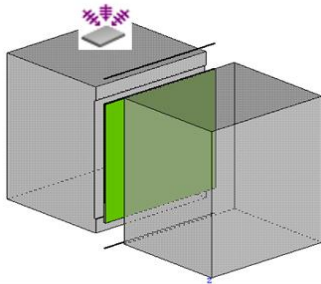


Fig.D.12 Vista isométrica del modelo de simulación. Cámara emisora, cerramiento doble y cámara receptora (D3)

Fig.D.13 Vista en sección del modelo. Cámara emisora (Izq)+doble hoja+Cámara receptora (Der.) (D3)

Definición de las aperturas de la cámara para el modelo:

Aberturas a través de una de las hojas						
19.78	100 %	4.60 m largo total de la muestra de ensayo				
m²	x	m²		largo	alto	h/2
	100	19.78	100 %	4.6	4.3	-
	90	17.8020	90 %	4.6	3.87	1.935
	10	1.9780	10 %	4.6	0.43	0.215
	1	0.19780	1 %	4.6	0.043	0.0215

Aberturas lateral horizontal perfiles inferior y superior espesor de cámara 46mm						
0.2116	100 %	4.60 m corresponde al largo total de la muestra de ensayo				
m²	x	m²		largo	alto	hx2
	100	0.2116	100 %	4.6	0.046	0.092
	90	0.19	90 %	4.6	0.0414	0.0828
	10	0.02	10 %	4.6	0.0046	0.0092
	1	0.0021	1 %	4.6	0.00046	0.00092
	50	0.1058	50 %	4.6	0.023	0.046
	25	0.0529	25 %	4.6	0.0115	0.023

Aberturas lateral horizontal perfiles inferior y superior espesor de cámara 70mm						
0.322	100 %	4.60 m corresponde al largo total de la muestra de ensayo				
m²	x	m²		largo	alto	hx2
	100	0.322	100 %	4.6	0.07	0.14
	90	0.29	90 %	4.6	0.063	0.126
	10	0.03	10 %	4.6	0.007	0.014
	1	0.0032	1 %	4.6	0.0007	0.0014
	50	0.1610	50 %	4.6	0.035	0.07
	25	0.0529	25 %	4.6	0.0115	0.023

Tabla D. 6 Definición de las aperturas para el modelo de entramado autoportante. (D)

Fuentes y referencias Anexo D

DA.1: Higini, Arau. ABC de la Acústica Arquitectónica. 1999

DA.2: Hopkins, Carl. Sound Insulation. 2007

DA.3: UNE-EN 140-5 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Mediciones in-situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y fachadas 1998 y 1999.

DA.4: UNE-EN 12354-3 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra ruido del exterior. 2001.

DA.5: Manual VA-One 2012

DC.1: Curso de prevención y control de la contaminación acústica. Capítulo 2 El aislamiento acústico. Universidad de Vigo. http://webs.uvigo.es/gcastro/PFC/Capitulo_dos_b.htm (consultada en Abril de 2014)

D: Elaboración propia Andrea Niampira Daza.

D': Realización propia en base a otros recursos.

D2: Cálculos realizados en el programa INSUL 7.0

D3: Cálculos realizados en el programa VA-One 2012

Listado de figuras Anexo D

Fig.D. 1 Comportamiento ley de masas. (DC.1)	385
Fig.D.2 Cálculo del muro base (FI) de ETSAV. (D2)	389
Fig.D.3 Parámetros de cálculo. (D2)	390
Fig.D.4 Estimación de diferencia de niveles por la forma de la fachada. (D2)	390
Fig.D.5 Imagen de las dos pantallas de trabajo VA-One 2012. (D3)	391
Fig.D.6 Creación de una cámara cerrada. (D3)	391
Fig.D.7 Asignación de parámetros de un plano y selección de materiales. (D3)	392
Fig.D.8 Visualización de valores de resultado. (D')	393
Fig.D.9 Ecuación solución de la matriz (SEA). (DA.2)	396
Fig.D.10 Funcionamiento de un (NCT). (DA.5)	397
Fig.D.11 Sección de creación de las cámaras para la simulación. (D)	398
Fig.D.12 Vista isométrica del modelo de simulación. (D3)	399
Fig.D.13 Vista en sección del modelo. (D3)	399

Listado de tablas Anexo D

Tabla D. 1 Comprobación del número de modos de cada subsistema. (D3)	394
Tabla D. 2 Relación de matriz SEA.(D3)	396
Tabla D. 3 Características del muro de hormigón de 20cm. (D')	397
Tabla D. 4 Características de la placa (CB) (D')	397
Tabla D. 5 Especificaciones de los materiales utilizados. (D')	398
Tabla D. 6 Definición de las aperturas para el modelo de entramado autoportante. (D)	399

Listado de gráficas Anexo D

Graph D. 1 Comportamiento de los diferentes tipos de onda del modelo de (FVL) sin conexiones. (D3) .	395
Graph D. 2 Comportamiento de los diferentes tipos de onda del modelo (FVL) con conexiones. (D3)	395

