

## **OPTIMIZATION OF THE ACOUSTIC BEHAVIOR OF INDUSTRIALIZED WALLS IN ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS. ECO EFFICIENT BUILDING IN SITU EXPERIENCES.**

Guillén Guillamón, Ignacio; Fran Bretones, José María; Gómez Lozano, Vicente;  
Ramírez Hoyos, Patricio  
Universitat Politècnica de València

The recent deep crisis period for the building sector has involved some changes like the revaluation for processes of optimization for performance and the industrialization of building systems in order to reduce their economic impact and achieve a reduction in the deadlines. The Eco Efficient Building project developed at the Polytechnic University of Valencia and funded by a consortium of companies together with CDTi funds, represents an opportunity to develop and evaluate the performance of industrialized systems in real situations. In this paper the process followed in the design of façade enclosure built prototype and evaluating their performance acoustic airborne acoustic insulation is analyzed. Results of calculation models proposed by CTE-DB-HR and the results for laboratory tests and in situ measurements are compared. The results reported good correlation between calculation models and the in situ values and a dependence on the acoustic performance with the window to wall ratio.

**Keywords:** Industrialized construction; Energy Efficiency; Acoustic Insulation

## **OPTIMIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE CERRAMIENTOS INDUSTRIALIZADOS EN EDIFICIOS DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA. EXPERIENCIAS IN SITU, EDIFICACIÓN ECO EFICIENTE.**

El reciente periodo de crisis profunda en el sector de la edificación ha supuesto la puesta en valor de procesos de optimización de prestaciones así como la industrialización de sistemas constructivos con el objeto de reducir el impacto económico de los mismos en la ejecución y conseguir una reducción en los plazos de ejecución. El proyecto de Edificación Eco Eficiente desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia y financiado por el CDTi junto con un consorcio de empresas, ha supuesto una oportunidad para desarrollar y evaluar las prestaciones de sistemas industrializados en situaciones reales. En el presente trabajo se analiza el proceso seguido en el diseño de cerramiento de fachada de prototipo edificado así como la evaluación de sus prestaciones de aislamiento acústico a ruido aéreo. Se comparan resultados de los modelos de cálculo seguidos por el CTE-DB-HR y los resultados de ensayos de laboratorio y mediciones in situ. Los resultados obtenidos reportan una adecuada correlación entre los modelos de cálculo y los valores in situ así como una dependencia sobre las prestaciones acústicas del porcentaje de huecos en fachada.

**Palabras clave:** Construcción Industrializada; Eficiencia Energética; Aislamiento Acústico

Correspondencia: Ignacio Guillén Guillamón - [iguillen@fis.upv.es](mailto:iguillen@fis.upv.es)

Agradecimientos: El presente trabajo ha sido financiado conjuntamente por el Consorcio de empresas EdificaciónEcoEficiente formado por BECSA, Rockwool Peninsular, CERACASA, ATERSA y ApliCAD y el CDTi en el marco de un proyecto en cooperación. Los autores quieren agradecer a los departamentos de I+D+i de las distintas empresas involucradas el apoyo incondicional para el desarrollo del Proyecto. Especialmente Francisco Vea, Mireia Ballester e Ignacio Jurado de BECSA; a Mercedes Sánchez de Rockwool Peninsular y a Fran Raya, sin los cuales no habríamos llegado a buen puerto.

## 1. Introducción

Con la reciente publicación de la modificación del documento básico de ahorro de energía (Ministerio de Fomento España, 2013, Orden FOM/165/2013) para la progresiva adaptación de nuestro parque edificatorio a la normativa europea de edificios de energía casi nula (Unión Europea, 2010 Directiva 2010/31), la preocupación de los técnicos involucrados en la edificación en temas relacionados con la optimización energética es creciente y en paralelo resulta la promoción del desarrollo de trabajos de investigación en este campo. Simultáneamente al desarrollo progresivo de la normativa obligatoria, los técnicos se enfrentan a peticiones de evaluaciones de la “sostenibilidad” del proyecto mediante protocolos de evaluación voluntarios como VERDE (Green Building Council España, 2016) de ámbito exclusivamente nacional, BREEAM (BRE Global Ltd, 2106) o LEED U.S.Green Building Council, 2016 de ámbito global. Estos protocolos, no tienen únicamente en cuenta aspectos energéticos exclusivamente como la certificación Passivehaus (Passive House Institute, 2016), si no que evalúan todos los aspectos que están relacionados con la sostenibilidad, como uso de energía en fase de uso, producción local de energía, energía embebida en los propios materiales y procesos de construcción, uso de materiales reciclados y reciclables, riesgos económicos para los inversores/promotores y por último calidad de ambiente interior para los usuarios. Estas consideraciones se evalúan en base a modelos de análisis de ciclo de vida simplificados. En el concepto de calidad de ambiente interior los protocolos incorporan la adecuación de las condiciones de confort interior tanto desde el punto de vista de calidad de aire interior como condiciones de iluminación y acústicas. Las condiciones acústicas, desde la perspectiva del ruido de fondo en los ambientes interiores están relacionadas con los niveles de aislamiento tanto de particiones interiores como de fachada (Hongisto et al, 2015). Por lo que las prestaciones alcanzadas sobre el confort acústico están relacionadas con las exigencias a la envolvente térmica del edificio. Esta situación se debe a que el mismo elemento constructivo debe garantizar las prestaciones correspondientes al aislamiento acústico, aislamiento térmico y estanqueidad.

El proyecto de Edificación Eco Eficiente, es un proyecto de I+D+i en cooperación financiado por el Cdti. El proyecto desarrollado desde el año 2011 por un consorcio de empresas formado por BECSA, Rockwool Peninsular, CERACASA, ATERSA y ApliCAD junto con la Universidad Politécnica de Valencia, ha permitido analizar las posibilidades reales de los edificios de energía casi nula en climas templados. La metodología del proyecto se centra en el desarrollo de prototipos de edificación que permitan reducir notablemente los plazos de construcción y aumentar la calidad de la edificación, así como la optimización de sus prestaciones y las posibilidades de internacionalización. Esta metodología ha permitido al equipo investigador poner en práctica conceptos de optimización sobre varias prestaciones.

## 2. Metodología.

La metodología propuesta en el proceso de optimización acústica para cerramientos industrializados abarca distintas fases del proyecto de investigación. El desarrollo y la secuenciación temporal con las distintas líneas de trabajo del proyecto deberán permitir la convergencia de resultados entre los modelos teóricos aplicados en fase de proyecto y las prestaciones obtenidas al final de la ejecución durante la fase de uso de las edificaciones.

Las fases afectadas por el proceso son, el desarrollo del proyecto de ejecución, la ejecución de la obra y la fase de final de obra y fase de uso. En la primera fase se trabaja en primer lugar sobre modelos teóricos para evaluar el índice de reducción sonora de las distintas soluciones consideradas durante el proceso previo de optimización energética de la envolvente. Junto con estos modelos se procede a evaluar el aislamiento a ruido aéreo del conjunto considerando los aspectos geométricos, condiciones de contorno y transmisiones

indirectas. En este proceso se introduce una nueva variable, el comportamiento de las carpinterías. Finalizados estos modelos se procede a ensayar en laboratorio el aislamiento a ruido aéreo de los cerramientos considerados de cara a la validación de modelos y a la selección definitiva de la solución a aplicar en proyecto.

En la segunda fase, la ejecución de la obra, se realiza un seguimiento exhaustivo de la misma de cara a controlar posibles desviaciones, En este proceso se incorporan ensayos acústicos de comprobación intermedios.

Finalmente, la fase más importante, el uso del edificio con los ensayos finales in-situ previos a la utilización del mismo.

La selección del prototipo de EdificaciónEcoEficiente como caso de estudio se debe por un lado al control total sobre todos los procesos de proyecto y ejecución al estar los investigadores integrados en el equipo del proyecto y por otro lado a los objetivos propios de proyecto EEE que busca la optimización de prestaciones en edificación dentro de un entorno sostenible.

### **3. Estudio de Caso. Prototipo de EdificaciónEcoEficiente UPV.**

#### **3.1 Prototipo de EdificaciónEcoEficiente UPV**

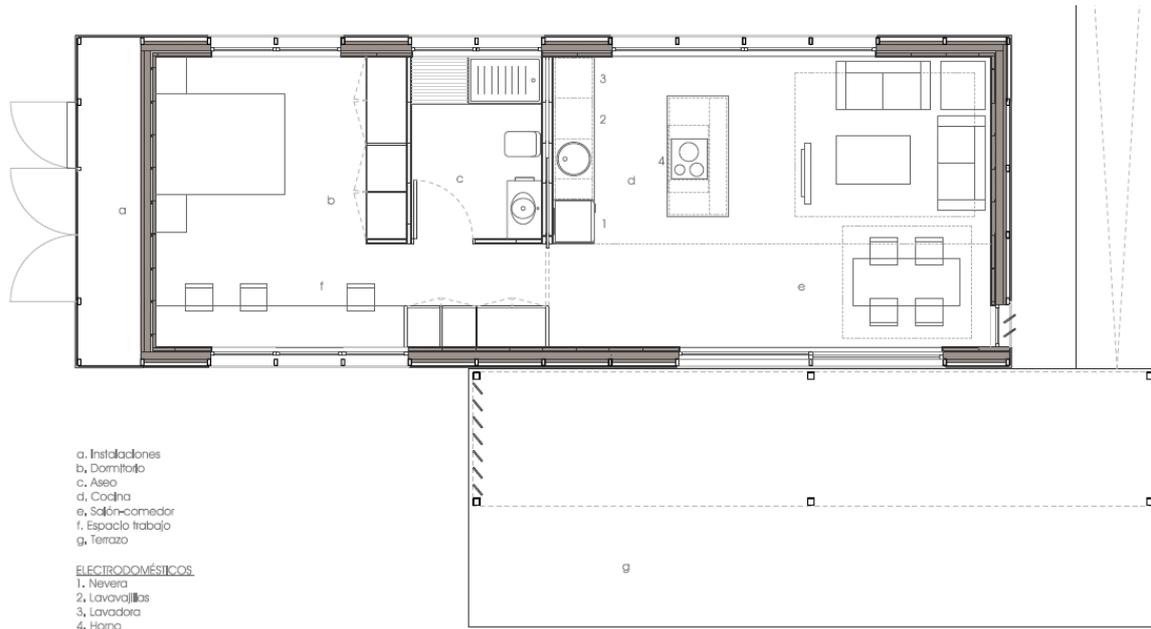
El prototipo desarrollado por la UPV conjuntamente con el consorcio de empresas es el resultado más significativo del proyecto financiado por el CDTi. El prototipo se corresponde con la propuesta de edificación para obra nueva. En el proyecto se desarrolla una segunda línea de intervención dedicada a los procesos de rehabilitación y regeneración urbana.

El prototipo ejecutado consiste en la propuesta de una vivienda unifamiliar aislada para una pareja con posibilidades para desarrollar trabajo en casa. La tipología seleccionada ha sido la que más se ajustaba a las condiciones establecidas por el Plan General de Reforma Urbana de Valencia para la ubicación ofrecida por el Vicerrectorado de Campus e Infraestructuras de la UPV dentro del Campus de Vera en Valencia.

El proyecto de investigación incorpora el estudio y desarrollo de propuestas tipológicas complementarias que permiten el desarrollo de programas más complejos y de sistemas de agregación para adaptar el prototipo a otro tipo de condicionantes urbanísticos.

El prototipo con una superficie construida de 60m<sup>2</sup> en una única planta se desarrolla con una distribución sencilla con un sistema de agrupación lineal, en la figura 1 se muestra la distribución en planta. Construido con sistemas prefabricados, la optimización del proceso constructivo permite asegurar un plazo de ejecución de tres semanas, considerando que en la cadena de suministros no hay retrasos. El cuidado proceso de diseño y la optimización pasiva de la envolvente térmica han permitido alcanzar la puntuación máxima en la certificación VERDE, siendo la primera vivienda unifamiliar certificada en proyecto y obra con el Certificado VERDE (5hojas) del GBCe.

**Figura 1: Prototipo EEE. Distribución en planta**



En la tabla 1 se representan los valores de transmitancia térmica aplicados para la envolvente térmica.

**Tabla 1. Transmitancias térmicas de diseño**

Cerramiento	U (W/m <sup>2</sup> K)
Fachada	0.18
Huecos	0.40
Cubierta	0.16
Solera	0.19

El cerramiento desarrollado se basa en el concepto de fachada ventilada con trasdosado interior, la innovación consiste en la sustitución de la hoja interior de ladrillo, bloque o muro de hormigón armado por un panel sándwich de 100mm de lana de roca tal y como se muestra en la imagen de la figura 2 con un modelo de un corte transversal del mismo. El revestimiento exterior de la hoja ventilada se ejecuta con Bionictile de CERACASA, un porcelánico con un revestimiento fotocatalítico que absorbe el NOx de la atmosfera.

**Figura 2: Prototipo EEE. Corte transversal de la fachada.**



Estas medidas junto con la optimización del diseño pasivo permiten la obtención de una calificación energética de A, junto con el máximo de puntuación en los criterios de la certificación VERDE de Energía y Atmosfera y Calidad de Ambiente interior.

**Figura 3: Prototipo EEE. Vista exterior.**



### 3.2 Proceso de optimización del comportamiento acústico.

El proceso de optimización del comportamiento acústico, se ha desarrollado en las distintas fases del proyecto con el objeto de obtener una adecuada retroalimentación temprana para el proceso de reingeniería de las soluciones constructivas.

Para el proceso se ha tomado como base la solución constructiva prediseñada en el proceso de optimización energética de la envolvente térmica.

En fases iniciales del proyecto se ha trabajado con modelos de estimación basados en cálculo numérico del índice de reducción sonora de las soluciones constructivas contempladas en el proyecto. Como base se ha aplicado el método desarrollado por Sharp (1978), basado en el funcionamiento del cerramiento de dos hojas.

Las variables consideradas han sido, los distintos niveles de aislamiento térmico analizados en el proyecto y la presencia de un trasdosado interior. En la tabla 2 se representan los cuatro niveles analizados.

**Tabla 2. Niveles de aislamiento térmico**

Cerramiento Tipo	Espesor de lana de roca (m)
EEE CTE	0.05
EEE CTE plus	0.10
EEE	0.15
EEE CTE PH	0.20

Los niveles de aislamiento se corresponden con el mínimo para el cumplimiento de CTE HE (Ministerio de Fomento España, 2013, Orden FOM/165/2013) para el (EEE CTE), el espesor de aislamiento óptimo para la zona climática de Valencia según el Estudio CTE Plus (CENER, 2005) para el tipo EEE CTE Plus y, finalmente las recomendaciones del standard PassiveHaus para el tipo EEE CTE PH (Passive House Institute, 2016), incorporando además un valor intermedio de 0.15m de espesor de aislamiento. De este modo se analiza la variación del índice de reducción sonora del cerramiento base desde un mínimo de espesor exigible hasta los máximos recomendados en pasos de 0.05m.

Junto con esta variable, se analiza también la influencia de un trasdosado con autoportante sobre la solución base.

En una segunda fase, con el proyecto básico del edificio planteado, se pasa a calcular el aislamiento acústico bruto normalizado de acuerdo con los modelos de cálculo que reconoce el CTE-BD-HR (Ministerio de Vivienda, España, 2007, REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre) de cara a la justificación de las exigencias mínimas de aislamiento acústico. En este caso, ya descartadas algunas soluciones constructivas, se estudia el aislamiento acústico bruto de tres zonas, la zona de noche, la zona de día y la zona de trabajo, con distintos porcentajes de hueco.

En la tercera fase, previa a la ejecución del edificio se procedió a ensayar el índice de reducción sonora de las soluciones constructivas en cámara de transmisión de acuerdo con la norma UNE-EN-ISO 140-3:2011. Los cerramientos ensayados se describen en la tabla 3. Con el objeto de comprobar posibles desviaciones con respecto a los modelos teóricos aplicados.

**Tabla 3. Cerramientos ensayados en laboratorio**

Cerramiento Tipo	Descripción
EEElab aéreo 002	Panel sándwich de 100mm de lana de roca
EEElab aéreo 003	Panel sándwich de 100mm de lana de roca + trasdosado autoportante de placa de yeso laminado
EEElab aéreo 004	Panel sándwich de 100mm de lana de roca + trasdosado autoportante de placa de yeso laminado relleno con lana de roca

Finalmente, la cuarta fase, acometida una vez finalizada la ejecución del prototipo supone la comprobación in-situ de los valores calculados del aislamiento acústico bruto a ruido aéreo de acuerdo con el modelo reconocido por el CTE-DB-HR (Ministerio de Vivienda, España, 2007, REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre), de cara a justificar el cumplimiento de la normativa. Para la medición del aislamiento a ruido aéreo se han seguido las consideraciones recogidas en la norma UNE-EN ISO 16283-1:2014 y UNE EN ISO 140-5:2011 y para las mediciones del tiempo de reverberación las consideraciones recogidas en la norma UNE EN ISO 3382:2010. En la tabla 4 se describen los ensayos realizados en las distintas zonas del edificio.

**Tabla 4. Cerramientos ensayados en in situ**

Recinto	Nº Ensayo	Fachada
Zona día	EEE aéreo 001	Sur
	EEE aéreo 002	Este
	EEE aéreo 003	Norte
Zona estudio	EEE aéreo 004	Sur
Zona Noche	EEE aéreo 005	Oeste
	EEE aéreo 006	Norte

#### 4. Resultados.

En esta sección se exponen los resultados obtenidos durante el proceso de descrito con anterioridad, organizándose en cuatro fases.

#### 4.1 Fase inicial. Modelos teóricos

En esta primera fase, sobre el cerramiento prediseñado se evalúa el índice de reducción sonora de las distintas soluciones según los modelos teóricos reconocidos, para la evaluación de la influencia del trasdosado que toma en consideración lo especificado a tal efecto en el documento del catálogo de elementos constructivos de CTE (Instituto Eduardo Torroja, 2008) en la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos

**Tabla 5. Índice de reducción sonora teórico. Valores Globales**

Cerramiento Tipo	Espesor de lana de roca (m)	$R_w+C_{tr}$ (Sharp)	$R_w+C_{tr}$ (Sharp + Trasdoso)
EEE CTE	0.05	31dB	47dB
EEE CTE plus	0.10	33dB	49dB
EEE	0.15	34dB	50dB
EEE CTE PH	0.20	35dB	51dB

De los resultados anteriores se puede reseñar que espesores por encima de 100mm en el interior del panel no aportan una mejora significativa al comportamiento acústico del cerramiento. Los escenarios entre el estudio CTE plus y el estándar PassiveHaus aportan unas prestaciones acústicas suficientes para el sector residencial. La metodología para mejorar el comportamiento de estas fachadas consiste en la sustitución de las chapas metálicas, con un comportamiento acústico limitado por sistemas basados en placas de yeso, de acuerdo con Uris et al. (2008)O bien la incorporación de un doble panel sándwich transformando el cerramiento doble por un cerramiento triple.

Se puede apreciar también que la incorporación del trasdosado interior con base de placa de yeso laminado e independiente del elemento estructural resulta necesario para alcanzar valores habituales de cerramientos de dos hojas situados en el entorno de los 50dB.

#### 4.2 Fase II. Evaluación del aislamiento acústico bruto de las distintas zonas en proyecto.

En esta segunda fase se ha procedido a evaluar el aislamiento acústico bruto de las tres zonas del edificio según el CTE-DB-HR (Ministerio de Vivienda, España, 2007, REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre) de cara al análisis y justificación de las exigencias mínimas a cumplir en función de la zona de ruido.

Dada la implantación del prototipo dentro del Campus de la UPV, el nivel  $L_d$  es inferior a 60dBA por lo que la exigencia para las fachadas del prototipo será de 30dBA.

Los porcentajes de hueco calculados para cada zona varía entre un 12,20% del dormitorio hasta un 54,6% de la zona de día.

La solución constructiva para los huecos, en esta fase ya estaba definida, venia dada por la optimización energética consistente en una carpintería oscilobatiente de aluminio con rotura de puente térmico y un acristalamiento triple 4/16/4/16/4. Para los modelos se ha tomado el valor de referencia del catálogo de elementos constructivos del CTE (Instituto Eduardo Torroja, 2008) para una carpintería equivalente con un vidrio inferior, con una  $R_{a,Tr}$  de 32dBA.

En la tabla 6 se presenta los resultados de los modelos para cada uno de los tres cerramientos considerados, el cerramiento con un panel de 150mm de lana mineral no se ha considerado por presentar muy pocas diferencias con los tipos superiores e inferiores.

**Tabla 6. Resultados por zona del modelo de cálculo CTE-DB-HR**

Descripción	$R_{a,Tr}$	$R_{a,Tr}(\text{Hueco})$	%Hueco	$D_{2m,nT,Atr}$
<b>Zona día</b>				
EEE- CTE	47			37
EEE- CTE Plus	49	32	54,6	37
EEE- PH	51			37
<b>Zona Estudio</b>				
EEE- CTE	47			34
EEE- CTE Plus	49	32	28,57	34
EEE- PH	51			35
<b>Zona de Dormitorio</b>				
EEE- CTE	47			37
EEE- CTE Plus	49	32	12,20	37
EEE- PH	51			38

Los resultados ponen de manifiesto, el efecto del porcentaje de hueco sobre el aislamiento global de una fachada como variable determinante. Del mismo modo se puede apreciar el efecto del volumen del local receptor ya que en el caso de la zona de estudio al tener un volumen inferior a la zona de día los valores de aislamiento acústico son más bajos aún con una relación hueco macizo más favorable.

Por otra parte, se puede resaltar el hecho que a partir de un valor de índice de reducción sonora de la parte ciega, no se consiguen mejoras significativas en el aislamiento global.

En todos los casos, los valores de aislamiento proyectados cumplen con los requisitos establecidos para la zona de ruido en la que se sitúa la edificación, situándose por encima de los 4 dBA de diferencia con el mínimo exigido por la normativa para la obtención de la puntuación correspondiente al confort acústico en la certificación VERDE.

#### **4.3 Fase III. Ensayos de aislamiento a ruido aéreo en laboratorio.**

El objetivo de esta fase de ensayos es evaluar la convergencia de los modelos numéricos de estimación del índice de reducción sonora de los cerramientos con los resultados de los ensayos en laboratorio. En la tabla 7 se representan los valores obtenidos para los cerramientos ensayados y la comparativa con la previsiones de los modelos

Los ensayos se realizaron en las cámaras de transmisión del Laboratorio de Acústica Arquitectónica del Centro de Tecnologías Físicas de la Universidad Politécnica de Valencia según la norma UNE-EN-ISO 140-3:2011

**Tabla 7. Convergencia modelo/ensayo para el índice de reducción sonora en laboratorio**

Cerramiento Tipo	Ensayo $D_{nT,W}(C;Ctr)$ dB	Modelo Rw+Ctr dB
EEElab aéreo 002	30(-3;-4)	33
EEElab aéreo 003	38(-1;-6)	49
EEElab aéreo 004	53(-2;-8)	51

Las diferencias entre la previsiones y el comportamiento real de las soluciones constructivas con valores entre 7 dB y 2dB se deben a que los modelos teóricos consideran las dos hojas de chapa de acero desolidarizadas por la lana de roca y en la realidad al tener la lana un densidad superior a la prevista la hojas de chapa no son independientes reduciéndose el aislamiento. Esta pérdida de aislamiento se minimiza con la presencia de los trasdosados autoportantes. Este resultado muestra la importancia de la desolidarización de las estructuras, demostrado por Uris et al (2008). Por otra parte un porcentaje de las pérdidas se pueden relacionar con el efecto del efecto de rigidización del borde de los paneles en los encuentros con los cerramientos de las cámaras.

Los valores obtenidos en los ensayos en laboratorio permiten asegurar que en los modelos de cálculo del aislamiento acústico entre el exterior y el interior las diferencias no supondrán un incumplimiento de las exigencias de la normativa.

#### 4.4 Fase IV. Comprobación in situ.

Finalmente, una vez ejecutado el edificio, se realizan los ensayos de aislamiento a ruido aéreo in situ con el objetivo de comprobar las posibles desviaciones con respecto a todas las consideraciones del proyecto e intentar explicar las causas de las mismas.

Los ensayos se realizaron el 8 de abril de 2014, en la figura 3 se puede apreciar parte de dispositivo de medición.

**Figura 4: Dispositivo Experimental. Interior / exterior**



Siguiendo este procedimiento de medida se han evaluado los aislamientos a ruido aéreo del dormitorio y de la zona de día en las cuatro fachadas. Con un total de seis aislamientos evaluados, tres para cada uno de los recintos.

En la tabla 8 se representan los resultados de los ensayos in situ con respecto a la exigencia de la normativa y comparándolos con las previsiones de los modelos de cálculo de la fase II.

**Tabla 8. Comparativa Cerramientos ensayados in situ**

Recinto	Nº Ensayo	Fachada	Ensayo in Situ D <sub>2m,n Atr</sub> (dBA)	Modelo Fase II D <sub>2m,n Atr</sub> (dBA)
Zona día	EEE aéreo 001	Sur	27,8	37
	EEE aéreo 002	Este	33,6	37
	EEE aéreo 003	Norte	39,5	37
Zona estudio	EEE aéreo 004	Sur	33,4	34
Zona Noche	EEE aéreo 005	Oeste	42,5	37
	EEE aéreo 006	Norte	40,3	37
<b>Exigencia CTE DB-HR</b>				<b>30 (-3)</b>

En todos los casos los valores obtenidos se sitúan por encima de la exigencia de la normativa, menos en el caso de la zona de día, en la que el resultado se sitúa en el margen de tolerancia que acepta el CTE-DB-HR para las comprobaciones in situ de 3 dBA según las condiciones sobre control de la obra terminada reflejadas en CTE-DB-HR (Ministerio de Vivienda, España, 2007, REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre).

En los resultados se puede apreciar una mayor convergencia entre los resultados teóricos e experimentales en las fachadas con menor superficie acristalada, esta diferencia se puede imputar a dos causas, con resultados similares a los obtenidos por González et al. (2009) y el los estudios previos de Pedersen, DB (1999). Por un lado la presencia de infiltraciones, tal y como se describe su efecto por parte de Uris et al. (2004) y por otro lado el efecto de la frecuencia de resonancia del vidrio de 4mm, penalizando en comportamiento global de la fachada con resultados similares a los mostrados por Rodríguez et al. (2008).

## 5 Conclusiones.

A nivel global, el Proyecto de EdificaciónEcoEficiente ha supuesto una oportunidad única de trabajo en equipo de distintos técnicos, investigadores y las propias empresas para lograr conjuntamente la mejora significativa y cuantificable de la edificación en nuestro ámbito. Se ha creado un ecosistema de trabajo colaborativo para la mejora de los distintos procesos involucrados en la edificación con el objetivo de lograr edificios más eficientes, más respetuosos con el Medio Ambiente y más económicos, del cual van surgiendo nuevos proyectos de investigación.

A nivel de optimización del comportamiento acústico de cerramientos industrializados la metodología propuesta se ha mostrado eficaz, al permitir la obtención de una

retroalimentación en fases tempranas del proyecto con el objeto de corregir las posibles desviaciones.

Sobre los modelos teóricos para la estimación del índice de reducción sonora, presentan limitaciones basadas en la idealización de las soluciones. En el caso de los cerramientos industrializados estudiados en el presente trabajo, estas limitaciones se centran en la no desolidarización de las dos chapas de acero del panel y la densidad de la lana mineral superior a la deseable por motivos técnicos del proceso de laminación del panel. Esto pone de manifiesto la necesidad de contar con un buen catálogo de soluciones constructivas, lo bastante amplio como para cubrir la mayoría de soluciones. Y en el caso de tratarse de soluciones específicas más que recurrir a modelos teóricos, que en fases iniciales de proyecto pueden valer, antes de definir el proyecto de ejecución es necesario el ensayo en cámara de transmisión de la solución constructiva diseñada.

Sobre los modelos teóricos para la estimación del aislamiento a ruido aéreo entre el exterior y el interior, los resultados tienen una convergencia mayor en la medida que los índices de reducción sonora que se utilizan son reales y no teóricos. Las situaciones en que los modelos de cálculo se alejan de los resultados obtenidos con los ensayos in situ, son aquellas en las que el porcentaje de hueco está por encima de 50%, predominando el comportamiento de la ventana frente al ciego y afectando en una mayor medida las infiltraciones.

Los resultados obtenidos en el proceso de investigación desarrollado ponen de manifiesto la necesidad de los ensayos de aislamiento acústico in-situ, reconocidos por la normativa, pero no obligatorios. Ahora bien, si en lugar de ser unos ensayos de comprobación final una vez ejecutada la obra los incorporamos en distintas fases de la ejecución, pueden aportar información temprana sobre fallos de aislamiento o defecto en la parte más débil las carpinterías y poder solucionarlos a tiempo.

A nivel del prototipo desarrollado, las prestaciones acústicas alcanzadas se sitúan por encima de los valores exigidos por la normativa así como por el protocolo de certificación VERDE, alcanzándose en este caso el máximo de puntuación, para las condiciones del ambiente interior.

La tipología y características de los cerramientos ciegos de fachada hacia los que nos dirigimos con el concepto de los “edificios de energía casi nula” son suficientes para garantizar un adecuado confort acústico en el interior y un nivel de aislamiento necesario para que el aislamiento global de la fachada dependa únicamente de las características de la carpintería y los acristalamientos.

En el caso particular del prototipo, si se modificase el emplazamiento de la vivienda la composición de los vidrios se debería de modificar para reducir el efecto coincidencia y aumentar el aislamiento a ruido aéreo de tráfico rodado. Esta modificación de la composición del vidrio consistiría en la hoja exterior de vidrio de 4 mm sustituirla por un acristalamiento laminar mínimo de 6+6mm. En el caso de situar el emplazamiento en una zona ruidosa con niveles por encima de 70 dBA de  $L_d$ , habría que modificar las carpinterías instalando un sistema con doble carpintería.

Como futuras líneas de trabajo en el caso de cerramientos industrializados y fachadas ventiladas se puede estudiar el efecto de la presencia en la cámara ventilada exterior de

materiales que tengan un comportamiento conjunto de aislamiento térmico y absorción acústica frente a otros materiales con una absorción acústica muy reducida.

## 6. Referencias.

BRE Global Ltd. Obtenido 22 de marzo de 2016 de <http://www.breeam.com/>

CENER (2005). El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en viviendas mediante el incremento del aislamiento España (2005-2012)

España, 2013. Ministerio de Fomento, Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.

España, 2007 Ministerio de Vivienda, REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

González, J., García, L., Machimbarrena, M., Tarrero, A., Martín, M. (2009). Análisis comparativo de valores de aislamiento acústico calculados según CTE y medidos in situ. *Arte y Cemento*. 77-88

Green Building Council España. Obtenido 22 de marzo de 2016 de <http://www.gbce.es/es/pagina/verde-ne>

Hongisto Valtteri, Mäkilä Maria & Suokas Maija. (2015) Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – The effect of wall construction. *Building and Environment*, 85, 309-320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.010>

Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (2008) Catalogo de Elementos Constructivos del CTE.

Passive House Institute. Obtenido 22 de Marzo de 2016 de [http://www.passiv.de/en/01\\_passivehouseinstitute/01\\_passivehouseinstitute.htm](http://www.passiv.de/en/01_passivehouseinstitute/01_passivehouseinstitute.htm)

Pedersen, DB. (1999) Evaluation of EN 12354 part 1 and 2 for Nordic dwelling houses. *Building Acoustics*. 6(3/4), 259-268.

Rodríguez, F.J., de la Puente, J., Díaz, C. (2008). Las fachadas y su protección frente al ruido exterior. En Dossat 2000, *Guía Acústica de la Construcción*. (pp. 269-295) Madrid

Sharp, B. H., (1978) Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements, *Noise Control Engineering*. 11(2), 53–63.

UNE-EN-ISO 140-3:2011 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción.

UNE-EN ISO 16283-1:2015 Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. (ISO 16283-1:2014).

UNE EN ISO 3382:2010 Acústica. Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos. (ISO 3382:1997).

Unión Europea, 2010 DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios.

Uris, A., Bravo, J., Gomez Lozano, V., Llinares, J., Estellés, H. (2004) Experimental sound insulation performance of double frame partitions with slits. *Applied Acoustics*. 65, 421-430.

Uris, A., Bravo, J., Gomez Lozano, V., Guillén, I., Llinares, J. (2008) Experimental sound insulation performance of double frame partitions with slits. *Applied Acoustics*. 69, 918-924.

U.S. Green Building Council. Obtenido 22 de marzo de 2016 de <http://www.usgbc.org/leed>