

El Sistema constructivo modular Walluminium, análisis de la envolvente hermética y termoacústica y su sistema de producción

The Walluminium modular construction system, analysis of the hermetic and thermoacoustic envelope and its production system

Carolina Meire^(*), Patricia Linhares^(**), Víctor Hermo^(***)

RESUMEN

Estudio teórico y experimental de la envolvente hermética y termoacústica de un nuevo sistema constructivo industrializado, desarrollado para la ejecución de viviendas modulares de consumo energético cercano a cero. Que complementa a la patente “Panel modular de aluminio extrusionado para la ejecución de envolventes estructurales ventiladas con captación solar”. El planteamiento desarrolla la demostración de las exigencias normativas para edificaciones residenciales, con el cumplimiento de las prestaciones termoacústicas, herméticas y de resistencia al fuego, de los elementos constructivos diseñados. Posteriormente se verifica la comprobación real del sistema mediante la ejecución de una vivienda que incorpora a su vez estrategias de la arquitectura bioclimática. El estudio concluye demostrando las cualidades intrínsecas del innovador sistema; versatilidad de diseño, transportabilidad, ligereza y facilidad de montaje, garantizando la viabilidad del mismo sin comprometer la eficiencia de su producción. Resolviendo en un único sistema constructivo integrado el cumplimiento normativo y la demanda del mercado actual.

Palabras clave: construcción modular; construcción industrializada; sistemas constructivos innovadores; construcción pasiva.

ABSTRACT

Theoretical and experimental study of the hermetic and thermoacoustic envelope of a new industrialized construction system, developed for the execution of modular homes with energy consumption close to zero. That complements the patent “Extruded aluminum modular panel for the execution of ventilated structural envelopes with solar capture”. The approach develops the demonstration of the regulatory requirements for residential buildings, with compliance with the thermo-acoustic, hermetic and fire resistance features of the designed construction elements. Subsequently, the actual verification of the system is verified through the execution of a house that incorporates strategies of bioclimatic architecture. The study concludes by demonstrating the intrinsic qualities of the innovative system; design versatility, transportability, lightness and ease of assembly, guaranteeing its viability without compromising the efficiency of its production. Resolving regulatory compliance and current market demand in a single integrated construction system.

Keywords: modular construction; industrialized construction; innovative construction systems; passive construction.

(*) Ingeniero de Edificación. Universidade da Coruña. ETS Arquitectura, 15071 A Coruña (España).

(**) Dr. Arquitecto. Profesor Contratada Interina. Universidade da Coruña. ETS Arquitectura, 15071 A Coruña (España).

(***) Dr. Arquitecto. Profesor Contratado Doctor. Universidade da Coruña. ETS Arquitectura, 15071 A Coruña (España).

Persona de contacto/Corresponding author: carolina.meire@udc.es (Carolina Meire)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8850-3168> (Carolina Meire); <https://orcid.org/0000-0002-8267-5372> (Patricia Linhares); <https://orcid.org/0000-0003-0283-0852> (Víctor Hermo).

Cómo citar este artículo/Citation: Carolina Meire, Patricia Linhares, Víctor Hermo (2023). El Sistema constructivo modular Walluminium, análisis de la envolvente hermética y termoacústica y su sistema de producción. *Informes de la Construcción*, 76(573): 6451. <https://doi.org/10.3989/ic.6451>

Copyright: © 2024 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 20/03/2023
Aceptado/Accepted: 20/12/2023
Publicado on-line/Published on-line: 26/03/2024

1. INTRODUCCIÓN

Por todos son conocidas las bondades de la construcción off site frente a la construcción convencional, proliferando una gran cantidad de empresas de construcción modular, que presentan solución al desequilibrio entre costes y prestaciones (1). La recuperación de la actividad constructora global de la última década se ha basado principalmente en la Industrialización, la gran mayoría, tratan de despuntar siguiendo alguno de los principios impulsores del mercado global: ahorro de energía y rentabilidad, limitaciones de espacio en las grandes ciudades, tendencia global a la construcción verde (2).

Por otro lado, somos conscientes de que la construcción es uno de los sectores más contaminantes, en el contexto de la Unión Europea, el sector de la edificación representa el 40% del total del consumo energético (3). Y se verá obligado a reducir drásticamente su huella ambiental en las próximas décadas (4). Es por ello que la construcción industrializada tiene la necesidad de incorporar las cuestiones medioambientales y sociales que son características de nuestro tiempo, tales como el ahorro, la eficiencia, la mejora del confort, la personalización de los productos, etc. (5) Diversas actuaciones de financiación e investigación destacan a nivel Europeo desde hace años, con la apuesta de diferentes gobiernos en el desarrollo de estándares de vivienda modular, de calidad y energéticamente eficientes (6). De cara al cumplimiento de la Directiva 2010/31/UE, los objetivos 20/20/20 y en el contexto de los nZEB (near Zero Energy Building) (3), nos obliga a replantear la construcción y diseño de los edificios (7) actuando sobre los factores más determinantes en la demanda energética y evitando soluciones únicas, que sean adaptables a diferentes condiciones tipológicas y constructivas. Sumando cada vez más importancia las estrategias pasivas de optimización energética (7, 8).

Cabe destacar, que la integración de estas estrategias es posible con una construcción flexible y adaptable, algo que tradicionalmente reunía la construcción convencional, pero a costa de la falta de certeza económica y temporal. Así como, tampoco las reúnen diversas alternativas que se están abriendo paso en el mercado de la vivienda, con un número creciente de fabricantes ofreciendo productos de CML (9) con modulación a partir de células tridimensionales prefabricadas.

Por consiguiente, la tendencia del mercado avanza firmemente hacia la construcción modular e industrializada, donde el usuario final demanda la fiabilidad en el precio, rapidez en el plazo, pero sin dejar de lado la conciencia medioambiental presente en Europa y cada vez más notable en España. Demandando una mayor eficiencia energética durante la fase de uso de la edificación y que implique a su vez, un consumo mínimo de energía y recursos en su producción (10). Diversos son los que estudios que profundizan en la metodología ACV (Análisis e ciclo de Vida) y el conocimiento de los impactos ambientales asociados a los materiales y procesos de construcción (11). Destacando en esta temática la investigación de Bucios-Sistos et al. (12) con el estudio de diferentes sistemas constructivos para conseguir edificaciones que generen un menor impacto ambiental a la atmosfera.

A su vez, los nuevos avances en construcción de la mano de la metodología BIM han demostrado que permiten una mayor definición y la mejora de la productividad tanto en la redacción del proyecto (13) como en el conjunto de las etapas del

ciclo de vida de la edificación (14, 15) permitiendo la planificación y control del proceso constructivo (16, 17) creando modelados que constan de la geometría precisa y datos necesarios para respaldar todas las actividades de construcción, fabricación e instrucciones de montaje, (18, 19), y atendiendo a su vez a criterios de sostenibilidad (20).

En definitiva, el sector de la construcción, debe y está evolucionando hacia la industrialización que asegure un alto estándar de calidad y sostenibilidad, en el que se enmarca esta investigación. Siendo el objetivo de este artículo: el desarrollo y diseño de un sistema específico de envolvente hermética y termoacústica que formará parte de un nuevo sistema constructivo optimizado de edificaciones modulares, acoplándose al panel modular de aluminio extrusionado, que resuelve la fachada ventilada portante, suponiendo un cambio relevante en la forma de construir e incorporando mejoras frente a la construcción convencional: facilidad de exportación y montaje por operaciones sencillas sin medios auxiliares, flexibilidad de diseño e integración tecnológica que garantice la ecoeficiencia de las edificaciones. Así como, atienda a los criterios propios de la construcción industrializada. A su vez, el objetivo general demandará la definición de objetivos específicos que lo hagan posible, como es la creación de una nueva herramienta informática de diseño, fabricación y elaboración de instrucciones de montaje, asociada al sistema constructivo modular.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente artículo, se determina a través de un proceso de diseño y validación con el estudio teórico y experimental de la envolvente con funciones hermética y termoacústicas integrante del innovador sistema constructivo modular ligero de paneles portantes. Con la verificación del cumplimiento de la normativa estatal y de las prestaciones frente a los condicionantes existentes, definiendo las características constructivas de los elementos, espesores de cada una de las capas que conforman cada componente industrializado, y resolviendo los encuentros en los puntos conflictivos. Se lleva a la práctica con la prueba de montaje de una vivienda, donde se comprueba su uso en función de los condicionantes de partida, realizando los ensayos oportunos e identificando las mejoras a implantar. Por último, se obtienen los resultados que se contrastan con los estudios más actualizados y cercanos a la temática de esta investigación, concluyendo con la confirmación de la viabilidad del sistema constructivo modular pasivo.

3. TEORÍA Y CÁLCULOS

3.1. Antecedentes

Esta investigación se inicia gracias a la ayuda del programa Neotec, Exp 00084417, Sneo 20151475, CDTI, 08th de julio de 2015, “sistema optimizado de producción de viviendas ecoeficientes”, dando lugar a la patente, “Estructura modular para la construcción de edificaciones ES2716889 B2 Proyectopía” (21) que ha sido optimizada y ha evolucionado gracias años de investigación, contando con la experiencia de la ejecución de prototipos anteriores de CML (22-24), y en particular del proyecto Revestop (25).

Tras el montaje del primer prototipo con el panel de aluminio en el proyecto experimental MARDESÍA, donde quedaron demostradas sus funciones esenciales; estructural, fachada y envolven-

te ventilada y captación solar. Surgieron las dificultades asociadas al resto de elementos constructivos carentes de modulación, viéndonos obligados a resolver encuentros y definir soluciones constructivas in situ a medida que avanzaba la obra, con una fabricación muy artesanal. Asimismo, cabe aclarar que los requisitos normativos por ser apartamentos turísticos, así como el uso estacional al que se iban a destinar, los requerimientos no eran tan exigentes como los de una vivienda unifamiliar. Tras dicho proceso era obvio que el potencial del innovador panel demandaba un sistema constructivo integral acorde a su actualización tecnológica, que garantizase la precisión durante la ejecución, capaz de aunar las ventajas de la arquitectura pasiva industrializada, ofreciendo una construcción de calidad y a que a su vez que asegurase la organización del proceso de forma automatizada, implicando tecnologías avanzadas al proceso integral de diseño, producción y fabricación. Por otro lado, destacamos recientes experiencias I+D en construcción, que han incorporado nuevos componentes constructivos y, a pesar de responder a otros objetivos, han servido para detectar una oportunidad en su adaptación. (3, 5, 6, 10, 26-31).

3.2. Diseño Sistema Walluminium

Los componentes modulares que forman parte del sistema constructivo Walluminium se diseñan y resuelven de forma rigurosa, para conseguir que las diferentes soluciones constructivas doten de flexibilidad y adaptabilidad al conjunto. No se trata de construir de forma más o menos artesanal en taller, y luego resolver tras el transporte unas juntas ajenas al sistema constructivo.

Sino que se debe basar en componentes modulares, que se puedan industrializar en taller, para ubicarse posteriormente en su posición en obra. Por lo tanto, las premisas y condicionantes de partida de los componentes modulares, son las siguientes:

Premisas: mantener la ligereza, la facilidad de montaje en obra, la estética y la economía para asegurar la viabilidad del sistema.

Condicionantes: resolver la continuidad del aislamiento en la envolvente, lograr la suficiente hermeticidad que evite las pérdidas térmicas y asegurando las prestaciones acústicas y térmicas, así como asegurar la ausencia de puentes térmicos. Siendo también de vital importancia garantizar la impermeabilización, y dominar el comportamiento higratérmico mediante barreras de vapor que eviten posibles condensaciones intersticiales en el cerramiento.

3.2.1. Descripción de los elementos constructivos

- Fachada portante (Trasdosado de cerramiento)
- Fachada hastial
- Cubierta (Trasdosado de Cubierta)
- Forjado o (solera)

Fachada portante: formada por paneles extruidos de aluminio 3mm mecanizados y lacados (F1), cámara de aire ventilada 87mm, lámina impermeable-transpirable (F2) incorpo-

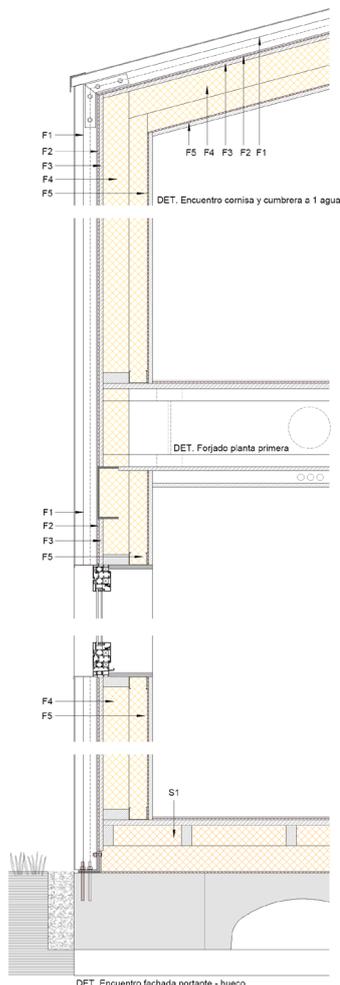


Figura 1. Det. Constructivo Encuentro fachada portante-hueco.

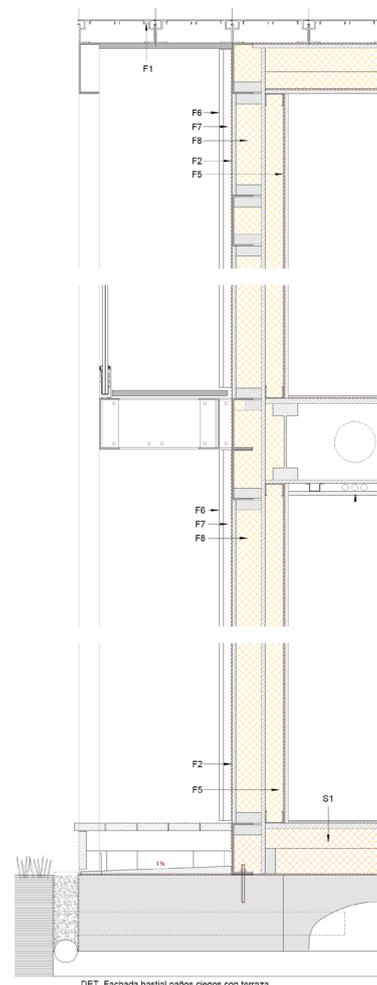


Figura 2. Det. Constructivo fachada hastial.

rada a panel formado por, tablero de virutas orientadas OSB 3 de 15mm (F3), trasdosado con aislamiento térmico de lana mineral 100mm (F4), Trasdosado autoportante interior con barrera de vapor en cara caliente del aislamiento térmico de lana de roca 70mm (F5), y tablero de acabado según planos de acabado siendo el más habitual doble placa de yeso de 12.5mm.

Fachada hastial: Acabado exterior de fachada hastial según planos de acabados siendo habitual acabado de madera termotratada (F6) colocada sobre rastreles de madera, con tratamiento autoclave, 30x80mm (F7) y lámina impermeable- transpirable (F2) sobre panel autoportante arriostrante formado por subestructura en madera y tablero de virutas orientadas OSB 3 de 15mm en ambas caras relleno de lana de roca de 100mm de espesor (F8), Trasdosado autoportante interior con barrera de vapor en cara caliente del aislamiento térmico de lana de roca 70mm (F5), y tablero de acabado según planos de acabado siendo el más habitual doble placa de yeso de 12.5mm.

Cubierta: Paneles extruidos de aluminio 3mm mecanizados y lacados (F1), cámara de aire ventilada 87mm, lámina impermeable- transpirable (F2), tablero de virutas orientadas OSB 3 de 15mm (F3), trasdosado con aislamiento térmico de lana mineral 100mm (F4), Trasdosado interior con barrera de vapor en cara caliente del aislamiento térmico de lana de roca 70mm (F5), y tablero de acabado según planos de acabado siendo el más habitual la placa de yeso laminado de 12.5mm

Forjado o: Base de pavimento de planta baja como soporte de pavimento de tarima flotante sobre polietileno espumado, conformado por tacos/rastreles de madera de pino con tratamiento autoclave, y tablero superior de OSB3 de 22mm y relleno de aislante térmico XPS sobre lámina anti capilaridad (S1).

Solera ventilada; de hormigón armado sobre encofrado perdido de módulos de polipropileno tipo caviti y viga de borde de 30x50cm. Incluyendo ventilación de solera, mediante tubos de PVC 110mm y remate en T. El espesor de la solera, así como su armado dependerá de las condiciones del terreno, siendo las más habituales un canto de 25+5cm de capa de compresión.

La envolvente del sistema constructivo definido en las Figuras 1 y 2, permite una continuidad total del aislamiento térmico, resolviendo en aluminio la envolvente portante exterior, con los paneles modulares de aluminio extrusionado, y conformado un trasdosado de unos 20 centímetros de aislamientos (hidráulico, termo-acústico y barrera de vapor) más el acabado interior, que genera un aislamiento continuo que evitará puentes térmicos y condensaciones. Con la intención de mejorar, por tanto, la durabilidad de los materiales y el cumplimiento de las normativas.

3.3. Sistema de producción con herramienta informática de diseño y fabricación de base BIM

La producción industrializada del sistema constructivo necesita un programa de diseño acorde a su actualización tecnológica para la posterior fase de construcción de viviendas y la elaboración de las instrucciones de montaje. Los componentes modulares del sistema constructivo se diseñan con un sistema de producción avanzado basado en un software

de modelado y construcción paramétrica (Building Information Modeling-Revit) permitiendo la generación automática de mediciones e instrucciones de montaje. Así como, la identificación de intersecciones constructivas y posibles problemas de montaje de los componentes modulares, previos a la fase de obra, logrando facilitar posteriormente un mayor grado de control de la ejecución, llevada a cabo con la máxima garantía de calidad y definiendo un diseño cuidado y preciso. Se resumen las siguientes fases del modelado arquitectónico-constructivo con la herramienta informática específica.

1. Modelización y parámetros globales que determinan la volumetría: partiendo de las tablas de parámetros globales se inicia la modelización mediante en un sistema de niveles y rejillas, que toman como base el Panel Walluminium de aluminio extrusionado, definiendo luces, desarrollos máximos y ángulos determinados de cubierta. Se definen módulos tridimensionales sencillos (Figura 3 perspectiva superior), cada uno con su parametrización independiente, de cuya unión resulta la volumetría compleja de la vivienda.
2. Parámetros compartidos y creación de las familias que componen la vivienda: a través del parámetro compartido de muros y cubiertas el programa identifica los muros (Figura 3 perspectiva inferior) que integran el cerramiento de panel y de las fachadas hastiales, volcando la información de cada uno de ellos a la tabla correspondiente. Cada una esas tablas (Figura 3 izquierda) proporcionan la información necesaria para a su fabricación y medición. Posteriormente a través de la codificación existente dentro de los 3 tipos de familias; Muros/ Cubiertas y Forjados se generarán automáticamente las descripciones de las unidades de obra y mediciones, que a su vez se vinculan con el programa específico de cálculo de presupuestos y de Análisis de ciclo de vida, permitiéndonos evaluar los impactos ambientales de los elementos constructivos definidos durante las etapas A1-A5 (fabricación-transporte y construcción).
3. Sistema de fabricación y mecanizados: con la creación y exportación de láminas parametrizadas para el recorte automatizado en fábrica. A partir de los parámetros de longitud máxima y/o ángulo de cubierta. Para esto, se generaron previamente las distintas familias de sección, alzado y detalle constructivo, por separado, para cada encuentro de fachada y de cubierta.
4. Definición de detalles constructivos: se parametrizan todos los encuentros constructivos posibles según las limitaciones definidas anteriormente, categorizados en siete tipos (cornisa, cumbreira, cumbreira a dos aguas, limahoya, cubierta con fachada a cornisa (Figura 4), cubierta con fachada a cumbreira) y se generan las órdenes de fabricación e instrucciones de montaje.

Dicha información generará automáticamente planos de despieces de la vivienda, presupuestos, entornos virtuales, archivos informáticos de lectura de las máquinas de fabricación automatizada y el manual de montaje. En líneas generales este método de organización del trabajo y producción industrializada se centra en la mejora continua y en la optimización del sistema de producción con la eliminación de desperdicios y actividades prescindibles, mediante la automatización de procesos a través de la programación, con el objetivo de agilizar los tiempos de fabricación, ejecución y montaje en obra.

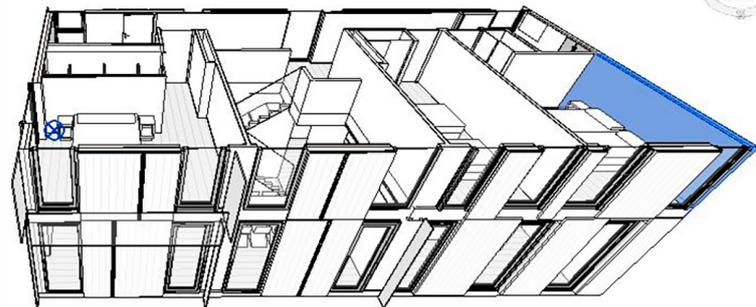
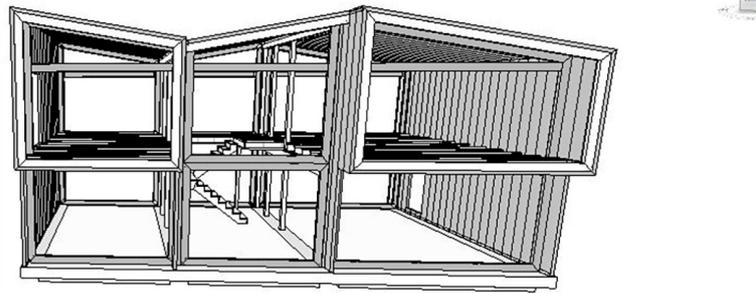
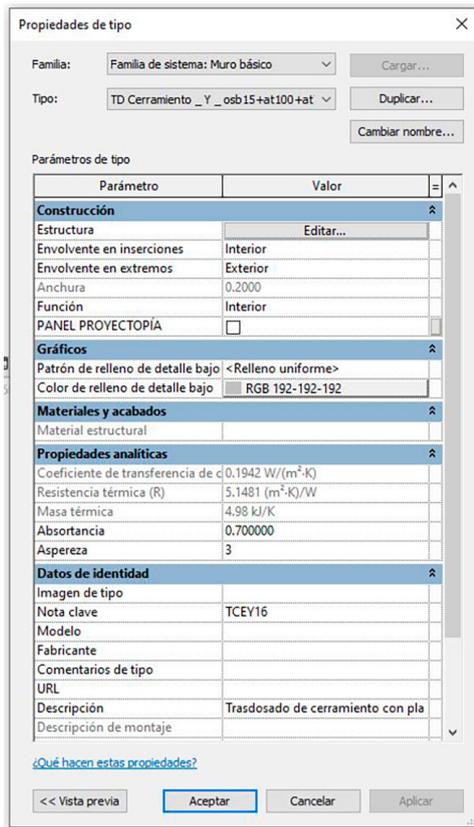


Figura 3. Parámetro compartido panel Walluminium. Capa de trasdosado de cerramiento.

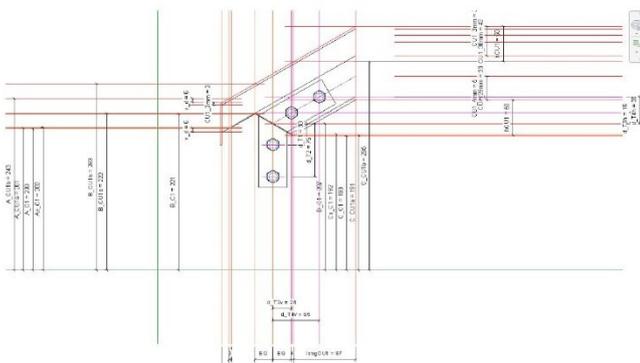


Figura 4. Encuentro Constructivo parametrizado.

3.4. Comprobación teórica CTE

Establecimiento de las exigencias a cumplir de la normativa de aplicación CTE, en función de los condicionantes. Tal y como establece el artículo 5. Condiciones generales para el cumplimiento del CTE. Para justificar que un edificio cumple las exigencias básicas podrá optarse por: Adoptar soluciones técnicas basadas en los DB o adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a los que se obtendrían por la aplicación de los DB, como ocurre en nuestro caso práctico. Para ello la normativa relativa a los elementos descritos del sistema constructivo que procede justificar su cumplimiento, es la siguiente:

3.4.1. DB-HE Ahorro de energía

La exigencia que nos afecta en el diseño del sistema constructivo Walluminium es la Exigencia básica HE 1: Condiciones

para el control de la demanda energética. La cual establece que; “Los edificios dispondrán de una envolvente térmica de características tales que limite las necesidades de energía primaria para alcanzar el bienestar térmico en función de la zona climática de su ubicación” Siendo nuestro Ámbito de aplicación los edificios de nueva construcción. Para la cuantificación de la exigencia, procede el cálculo de la transmitancia de la envolvente térmica: el cálculo de la misma seguirá el método del documento de apoyo DA DB-HE / 1 ‘Cálculo de parámetros característicos de la envolvente’. Y tal y como hemos definido previamente en las Figuras 1 y 2 de detalles arquitectónicos, los elementos constructivos se componen de las siguientes capas (Tabla 1).

Obtenemos la transmitancia térmica U de cada elemento constructivo y los comparamos con los valores máximos exigidos en la Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica, U_{lim} (W/m²K) del DBHE, determinados para la zona climática C en la que se dispondrá la construcción objeto de estudio, según la tabla del Anejo B, y en función de la provincia y altitud respecto al nivel del mar (h): ubicada en Pontevedra a una altitud de 91 m, siendo por lo tanto inferior a 350m. Y verificamos que, las transmitancias térmicas de los elementos del sistema constructivo diseñado Walluminium, se encuentran muy por debajo de los valores límites que fija la norma (Tabla 2).

3.4.2. DB-HS Salubridad

Comprobación de la limitación de condensaciones superficiales para la zona climática C. Para el cálculo nos remitimos al documento de apoyo DA DB HE 2, en su punto 4.1.1, en el que se especifica: “El método del factor de temperaturas superficiales permite limitar el riesgo de aparición de condensación”

Tabla 1. Propiedades de los materiales constituyentes de la envolvente.

Material	Espesor, e (mm)	Densidad, d (kg/m ³)	Conductividad térmica, λ (W/m·K)	Resistencia térmica, R=e/λ (m ² ·K/W)
Panel Aluminio	3	2800	160	0,0000186
Lámina transpirable impermeable tipo Tyvek (polietileno de alta densidad)	2	980	0,50	0,004
Tablero de virutas orientadas OSB3	15	< 650	0,13	0,115
Aislamiento térmico de lana mineral. 100mm	100	20	0,040	2,50
Aislamiento térmico de lana mineral. 60mm con barrera de vapor interior	61	20	0,040	1,525
Placa de yeso laminado	15	800	0,25	0,06
Poliestireno Extruído (XPS)	200	60	0,039	5,128
Lamina impermeable de polietileno	3	920	0,33	0,0091

Tabla 2. Transmitancias de los elementos constructivos.

Elemento constructivo	Rt (m ² ·K/W)	U (W/m ² K)	Ulim (W/m ² K)	Cumple
Fachada portante (Trasdosado cerramiento)	4,464	0,224	0,49	U ≤ (Um lim)
Cubierta (Trasdosado de Cubierta)	4,404	0,227	0,40	U ≤ (Uc lim)
Fachada hastial	4,549	0,219	0,49	U ≤ (Um lim)
Forjado o (solera)	5,4621	0,1831	0,70	U ≤ (Ut lim)

ciones superficiales usando un criterio simplificado, que consiste en establecer un límite máximo del 80% de humedad relativa media mensual sobre la superficie del cerramiento analizado.”

La comprobación de la limitación de condensaciones superficiales se basa en la comparación del factor de temperatura de la superficie interior fRsi y el factor de temperatura de la superficie interior mínimo fRsi,min para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero de la localidad.

Obtenemos de la tabla C.1 del apéndice C del documento de apoyo. Una Humedad relativa media de 74 % y una Temperatura media de 9,9 grados, para el mes de enero en la localidad de Pontevedra.

En los cerramientos y puentes térmicos se comprueba que el factor de temperatura de la superficie interior es superior al factor de temperatura de la superficie interior mínimo. El factor de Temperatura de la superficie interior mínimo, lo obtenemos de a partir de la tabla 1, de dicho documento de apoyo, en función de la zona climática C en invierno y de la clase higrométrica 3 o inferior para edificios de uso residencial, siendo 0,56 fRsi,min. Procedemos al cálculo del factor de temperatura de la superficie interior de los cerramientos fRsi (Tabla 3). Y se constata que cumplimos la condición siendo fRsi > fRsi,min (0,56) en todos los elementos constructivos (Tabla 3).

Además, se garantiza la ausencia de condensaciones intersticiales gracias a la incorporación de una barrera de vapor por la cara caliente del aislamiento térmico.

Tabla 3. Limitación de condensaciones superficiales de los elementos constructivos.

Elemento constructivo	U (W/m ² K)	fRsi	Cumple
Fachada portante	0,224	0,94	fRsi > fRsi,min
Cubierta	0,227	0,94	fRsi > fRsi,min
Fachada hastial	0,219	0,95	fRsi > fRsi,min
Forjado o	0,1831	0,95	fRsi > fRsi,min

3.4.3. DB-HR Protección contra el ruido

El objetivo es satisfacer las exigencias del CTE en lo referente a la protección frente al ruido y para ello debemos: “alcanzar los valores límite de aislamiento acústico a ruido aéreo y no superar los valores límite de nivel de presión de ruido de impactos que se establecen en el apartado 2.1” Seguimos el procedimiento de verificación de Protección frente al ruido procedente del exterior para los elementos constructivos interiores de separación, así como las fachadas, las cubiertas, las medianerías y los suelos en contacto con el aire exterior:

Cumpliremos la condición si el aislamiento acústico a ruido aéreo, D2m, nT, Atr, entre un recinto protegido y el exterior no será menor que los valores indicados en la tabla 2.1 “Valores de aislamiento acústico a ruido aéreo”, en función del uso del edificio y de los valores del índice de ruido día, Ld, definido en el Anexo I del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, de la zona donde se ubica el edificio. Para ello tomamos el valor del índice de ruido día Ld 60 dBA, por no disponer de datos oficiales, y cogemos como referencia el territorio con predominio de suelo de uso residencial. Por lo tanto, se esta-

blece, que debemos superar el valor exigible de aislamiento acústico ponderado A, para ruido aéreo de 30 dBA.

Determinamos el aislamiento acústico de proyecto del trasdosado mediante equivalencia a una solución semejante. Tomamos como referencia la solución del catálogo de elementos constructivos del CTE (32) perteneciente a la opción de Fachada de entramado estructural de madera, con cámara de aire ventilada, con código F15.3. Que establece un valor de 42 dBA el índice global de reducción acústica, ponderado A, para un ruido exterior dominante de automóviles o de aeronaves. Cumpliendo así la condición exigida en el DB HR al ser superior a 30 dBA.

3.4.4. DB-SI Seguridad en caso de incendio

El objetivo del requisito básico ‘Seguridad en caso de incendio’ que el Código Técnico de la Edificación define en su artículo 11 consiste en “reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento”.

Para satisfacer este objetivo, el sistema constructivo modular pasivo objeto deberá satisfacer la exigencia básica SI6. Resistencia al fuego de la estructura.

Se considera que la resistencia al fuego de un elemento estructural principal del edificio (incluidos forjados, vigas y soportes), es suficiente si: Alcanza la clase indicada en la tabla 3.1 “Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales” que representa el tiempo en minutos de resistencia ante la acción representada por la curva normalizada tiempo temperatura. Siendo en nuestro caso de aplicación, una vivienda unifamiliar aislada de altura inferior a 15 m. Exigiéndose el cumplimiento de R30.

En nuestro sistema constructivo objeto de estudio, la estructura portante se sitúa hacia el exterior de la edificación quedando toda la estructura protegida con entramado autoportante de madera y falso techo de yeso laminado hacia el interior que aporta una resistencia al conjunto estructural mayor de R30 necesario para vivienda unifamiliar, y ventilados tanto por su cara exterior como por su cara interior.

En cuanto a la resistencia al fuego de los elementos de aluminio revestidos con productos de protección con marcado CE, los valores de protección que éstos aportan son los avalados por dicho marcado. Con respecto a los forjados de madera, hay que tener en cuenta que la resistencia estructural necesaria de servicio se cumple con el uso de las vigas, mientras que la necesidad del OSB 22 dispuesto en su parte interior solo es necesario como arriostramiento. Por lo tanto, podemos asimilar dicho tablero como un elemento de protección frente al fuego para las vigas, durante el tiempo estimado para su carbonización. Según la Tabla de tiempos de carbonización de los paneles de protección de la Guía de construir con madera (CcM). Documento de aplicación del CTE (33), la solución de tablero de OSB de 22mm + PYL de 10 implican un tiempo superior a 30min, cumpliendo con lo exigido en el DB SI para dicho forjado. En el caso de la estructura de aluminio estaría protegida por el acabado interior (Tablero de yeso de 15 mm + 160mm lana mineral + tablero OSB 15mm), superando igualmente dicha exigencia.

4. PRUEBA DE MONTAJE VIVIENDA MODULAR PONTEVEDRA ACG

4.1. Descripción de la edificación

El edificio proyectado corresponde a la tipología de vivienda unifamiliar aislada, compuesto de dos plantas sobre rasante (Figura 5). El proyecto se plantea a partir de dos criterios de diseño primordiales: la integración en el entorno y la sostenibilidad.

Integración en el entorno: La parcela, de forma irregular, presenta el acceso desde el Norte y se abre entre el sur y el oeste a las vistas del extremo de la ría de Pontevedra. A ambos lados, otras construcciones colonizan el territorio. El volumen global de la edificación se organiza en una pieza que sigue la orientación Este-Oeste para el mayor aprovechamiento solar, se respeta la rasante de la parcela, buscando el máximo aprovechamiento del terreno y generando el mínimo impacto del relieve natural. El programa organiza la vivienda en un módulo compuesto por dos plantas; en la planta baja se encuentran los espacios servidores (acceso - lavadero - aseo) y la zona de día (salón-comedor-cocina-habitación) y en la planta primera la zona de noche (dormitorios y baños).

Sostenibilidad: Atendiendo a los criterios de sostenibilidad de la arquitectura bioclimática y construcciones de consumo energético cercano a 0, en el diseño de la vivienda se han tenido en cuenta los índices microclimáticos, siendo el más severo la termicidad estival, el cual se encuentra ligado a las estrategias arquitectónicas de protección solar y ventilación natural. La siguiente Tabla 4 recoge los valores de los índices microclimáticos analizados, en una escala de 1 valor mínimo a 6 máximo, donde se han empleado los datos recogidos por el Instituto Gallego de Vivienda y Suelo (IGVS).

Se establece, por tanto, una mayor superficie de parte acristalada en la fachada Sur, buscando las vistas y la optimización de las ganancias solares para mejorar el confort de la vivienda. No obstante, se proyectan aleros de dimensiones estudiadas que favorecen la radiación solar en invierno y evitan un soleamiento excesivo en verano. Por otro lado, se definen las instalaciones más eficientes apropiadas a las condiciones climáticas del entorno, con un sistema de renovación de aire y acondicionamiento ambiental, formado por un sistema de ventilación mecánica con recuperador de calor y control de humedad higrotérmico. Incorporando una bomba de calor aerotérmica con distribución por conductos de aire. Además, se garantizan las mínimas fluctuaciones térmicas, gracias a los elevados espesores de los aislamientos (20 cm), la ausencia de puentes térmicos y la hermeticidad de la envolvente.

4.2. Descripción de la secuencia de montaje del sistema constructivo Walluminium

El proceso del montaje (Figura 6, de izquierda a derecha y de arriba a abajo) se inicia con el replanteo y posterior colocación de los perfiles de cimentación, en concreto perfiles normalizados L80x8. El siguiente paso, es la colocación de los marcos estructurales en planta baja, con perfiles normalizados U200.80.6 mecanizados en las fachadas transversales. A continuación, se instalarán los paneles de modulares de aluminio extrusionado en las fachadas portantes estructurales y se prosigue con la colocación las vigas y pilares de la estructura de madera, posteriormente se procede con la colocación de las vigas de OSB HB97 300 del forjado. Para



Figura 5. Plantas arquitectónicas vivienda Pontevedra ACG.

Tabla 4. Valores bioclimáticos

Índices microclimáticos	Valor	Estrategia asociada
Continentalidad Cuantifica la amplitud térmica estacional. (Tmax - Tmin) (°C)	2 (<11.24)	Incorporación de mecanismos de adaptación a dos situaciones diferentes.
Diurnidad Cuantifica la variabilidad térmica diaria. (Tcmax - Tcmin) * 10 (°C)	4 (12.0 – 13.28)	Inercia térmica de la edificación, suficiente para minimizar las fluctuaciones térmicas.
Intensidad del viento Determina las pérdidas por infiltración y el potencial de ventilación natural.	2 (4 – 8)	Hermeticidad de la envolvente con elementos de control y diseño de volumen.
Radiación solar Capacidad de captación de energía del sol. (Media diaria kWh/m²)	2 (3.55 – 3.77)	Orientación de vivienda, huecos y cubierta para obtener la radiación más adecuada en cada estación del año.
Termicidad invernal Pondera la intensidad de frío. (T + Mf + mf) *10 (°C)	1 (>308)	Compacidad de la edificación. Aislamiento de la envolvente. % huecos máx sur, bajo E-O, mín norte.
Termicidad estival Ponderar la intensidad de calor. (T + Mc + mc)* 10 (°C)	6 (>535)	Protección solar. Ventilación natural en proporciones adecuadas.

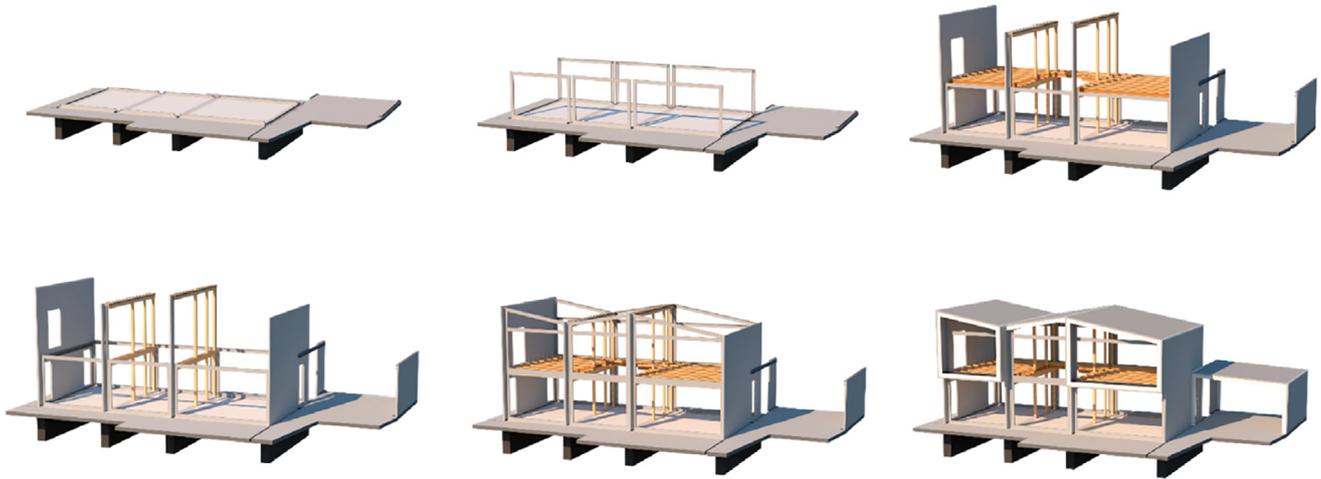


Figura 6. Esquema de montaje 3D vivienda Pontevedra ACG.

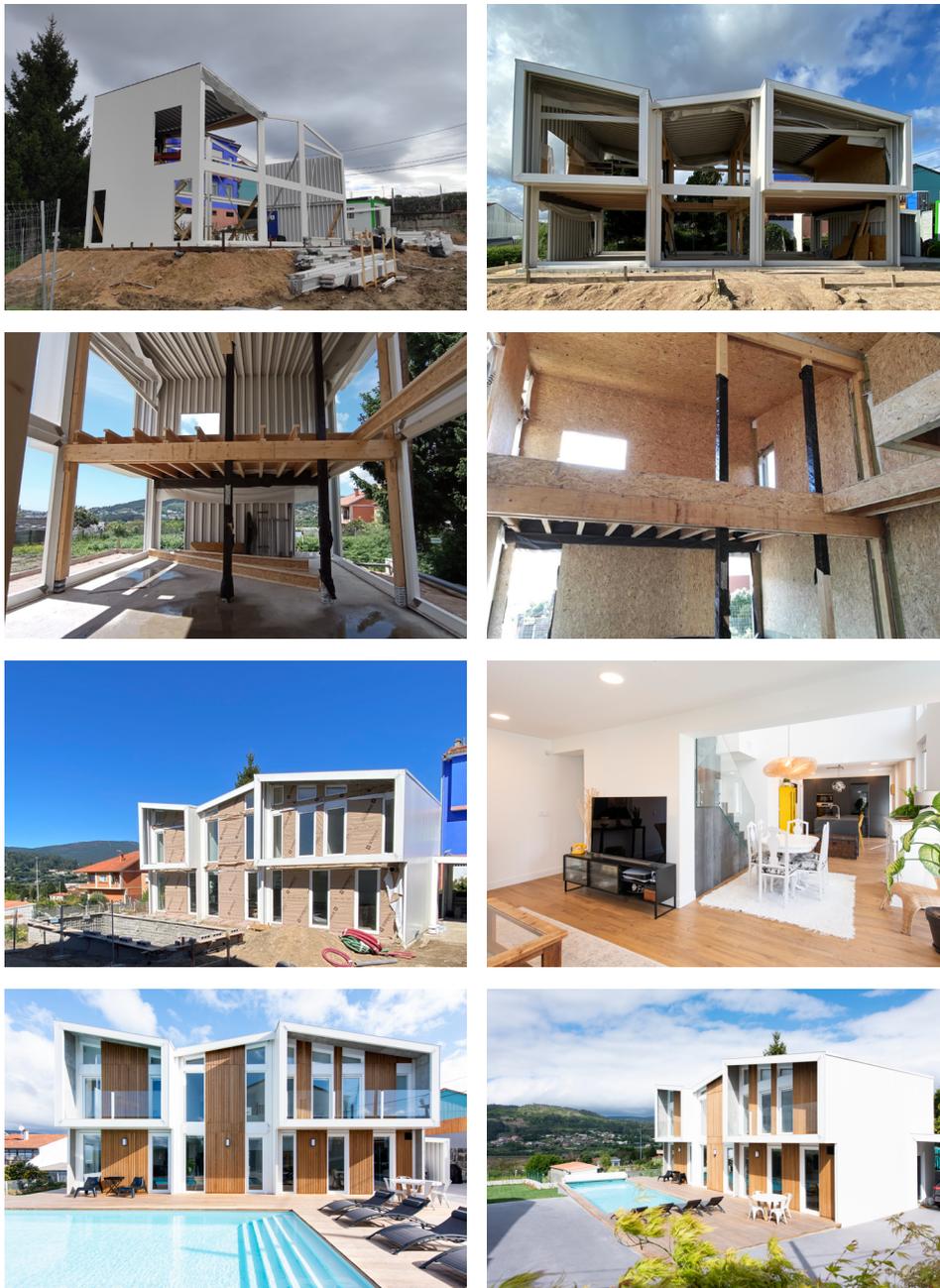


Figura 7. Reportaje fotográfico de la construcción de la Vivienda Pontevedra ACG.

servirnos de ellas con el montaje de los marcos estructurales de planta alta y en la colocación de los paneles de cubierta. Rematando la instalación, estableciendo el montaje de cargaderos y balcones.

4.3. Identificación de mejoras

En general las mejoras detectadas en los elementos constructivos que definen el sistema tras la prueba de montaje de la vivienda Pontevedra ACG (Figura 7) van de la mano de sacar un mayor partido al potencial, del que ya goza el sistema, del grado de industrialización.

- Configuración de un panel de suelo modular registrable para facilitar el paso de las instalaciones en cuartos húmedos.
- Incorporación de lámina impermeable y traspirable que envuelve toda la envolvente estructural con el siguiente elemento de trasdosado.
- Optimización del pre montaje en taller de los paneles de fachada hastial con la incorporación de la lámina impermeable y traspirable.
- Instalación previa de refuerzos en la sub estructura de placas de yeso laminado de los trasdosados, donde estén proyectados lavabos, tomas de Tv y muebles altos de cocina, que deban ir suspendidos.
- Ejecución previa en taller de los pasos para el trazado instalaciones de clima y ventilación en Forjado intermedio de vigas de OSB.
- Creación de un falso techo, con absorbente acústico y espacio para paso de instalaciones en el forjado intermedio. En el que, a su vez, se dejará la previsión de la ubicación de los puntos de iluminación s/ planos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respecto a la eficiencia de la edificación; Los valores para la transmitancia de nuestra envolvente se sitúan en el rango entre 0,18-y 0,227, algo superiores a los valores que resultaron de los estudios de F. J. Terrados-Cepeda et al. (5) en la envolvente del prototipo de la solar decathlon Europe 2012, donde determinaron entre (0,12-0,20 W/m²K, en función del elemento, cubierta o cerramiento exterior) considerada una envolvente de diseño con una transmitancia térmica muy baja. Sin embargo, nuestros valores de transmitancia de fachada portante y fachada hastial son considerablemente inferiores, en la comparativa con un sistema convencional equivalente, como es la fachada de entramado estructural de madera, con cámara de aire ventilada del catálogo de soluciones técnicas del CTE (32) con un valor de transmitancia térmica de 0,386 W/m²K. Cabe destacar que los resultados de transmitancia térmica de los elementos del sistema constructivo Walluminium se encuentran muy por debajo de los valores límites exigidos por normativa.

A su vez, se ha procedido al cálculo de la demanda energética anual por superficie útil de la edificación, para la comprobación del cumplimiento del DB HE1 Limitación de la demanda energética. Obteniendo destacables resultados: En concreto, obteniendo un valor para la demanda energética de calefacción de la edificación de 16.4 kWh/ (m²-año) siendo menor a la demanda de calefacción límite de 25.7 kWh/ (m²-año). Y un valor de 7.5 kWh/(m²-año) para la demanda de refrigeración, siendo exactamente la mitad que la demanda de refrigeración límite. Señalamos que dichos valores, están en

disposición de encajar con los estándares térmicos más restrictivos a nivel internacional, como es el caso del estándar Passivhaus que establece una demanda de en 15 kwh/ m²-año Gantolier, 2010 (34).

Además, podemos corroborar que la Construcción Modular Ligera (CML), puede ser energéticamente eficiente, habiendo demostrado en este artículo, la viabilidad tecnológica-industrial que supone la combinación tal y como perseguía Sánchez González, 2016 (3) en su investigación. Se ha demostrado la certidumbre del cumplimiento normativo en el ámbito de la edificación residencial, aportando mejoras sustanciales a algunas de ellas al igual que argumentó V. Gómez Jáuregui, 2009 en su estudio (26) y conclusión similar a la establecida por Tudela, E.A. 2016 (29) en la investigación de su panel técnico.

Se garantiza la versatilidad con el sistema constructivo objeto de estudio, garantizando edificaciones no repetitivas. Característica similar a la que detallan García Alvarado et al. 2021 (35) con la variedad de configuraciones arquitectónicas. A mayores, contamos con la posibilidad de elección de diferentes acabados de elevada calidad como en el sistema desarrollado por V. Gómez Jáuregui, 2009. (26)

La herramienta informática desarrollada, asociada al sistema constructivo consiguió que la información sobre los elementos modulares en cada etapa se recopilase en tiempo real, con las ventajas que ello conlleva. De forma parecida a la definida en la literatura X. Yin et al. (1) con la Planificación logística habilitada para BIM, describiendo una cadena de suministro típica para un proyecto OSC (off-site construction)

A mayores, se ha realizado una primera revisión del Análisis de ciclo de vida, en las fases A1 a A5, mediante la vinculación del sistema de producción paramétrica desarrollado con los componentes modulares del sistema constructivo, con un software de ACV, que nos ha permitido conocer las emisiones de CO₂ equivalente en los procesos de fabricación, transporte y su puesta en obra. Obteniendo conclusiones determinantes acerca de los componentes sobre los que debemos actuar y mejorar. Indicando que las mayores emisiones de Kg de CO₂ equivalente corresponden a la solera ventilada de hormigón. Resultados similares arroja la investigación, aunque más completa y detallada, de Bucio-Sistos et al (12), en la que se especifica los sistemas de construcción convencional, y en concreto los ejecutados en hormigón cuentan con unos indicadores de mayor impacto ambiental frente a los sistemas de construcción modular.

6. CONCLUSIONES

Ha sido viable diseñar un sistema hermético y termoacústico ad hoc para completar la fachada portante resuelta mediante el panel modular Walluminium, se ha verificado el cumplimiento de las exigencias normativas, y se ha demostrado su aplicación desde el punto de vista funcional, llevando a cabo la ejecución de una vivienda constituida por un sistema constructivo integral. Se ha conseguido la modulación de casi todos los componentes, creando un sistema constructivo ligero, formado por piezas cuya geometría y peso es menor a 20Kg, garantizando la adaptabilidad formal de las soluciones, la facilidad de transporte y el ágil montaje. No obstante, somos conscientes de que el potencial de optimización e industrialización de los elementos no modulares es considerable, en concreto nos ha condicionado el acabado de placas de yeso

laminar en los trasdosados. Y debemos incorporar una solución modular como sistema de apoyo para prescindir de la cimentación tradicional, y que a su vez genere un menor impacto ambiental.

Se ha conseguido el aumento de la productividad y automatización de la información en la fase de diseño a través del software creado explícitamente para este sistema constructivo, lo que permitió, tras la fase de modelado, que en fábrica se pudiesen conocer en tiempo real las unidades y medidas de todas las piezas necesarias para la construcción.

Se ha verificado la idoneidad de los sistemas pasivos y activos de alta tecnología que han permitido que el consumo energético de la edificación sea cercano a 0. Gracias a su vez, a la flexibilidad de adaptación del sistema constructivo y sus componentes a las necesidades del contexto microclimático.

En la actualidad, cabe destacar que se han ejecutado más de 30 nuevas construcciones ecoeficientes en la geografía gallega con el sistema constructivo Walluminium descrito en esta investigación.

Futuras líneas de investigación: la certificación Passivhaus del sistema. Y el Método para la dirección de obra de CML que asegure la eficacia y productividad de la fase de ejecución (36).

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) su apoyo. Al CDTI por la ayuda del programa Neotec para proyectos de desarrollo tecnológico I+D+I en el que se inició esta investigación. A la empresa Proyectopía por su imprescindible colaboración.

REFERENCIAS

- (1) Yin, X., Liu, H., Chen, Y., Al-Hussein, M. (2019). Building information modelling for off-site construction: Review and future directions. *Automation in Construction*, 101, 72-91. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.010>.
- (2) Díaz Piloñeta, M., Ortega Fernandez, F., Díaz Suárez, A., Alvarez Cabal, V. (2018). Presente y futuro de la construcción modular.
- (3) Sánchez González, J.C. (2016). *Construcción modular ligera energéticamente eficiente* (Tesis Doctoral, Arquitectura). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.40342>.
- (4) Richner, P., Heer, P., Largo, R., Marchesi, E., Zimmermann, M. (2017). NEST-A platform for the acceleration of innovation in buildings. *Informes de la Construcción*, 69(548), e222. <https://doi.org/10.3989/id.55380>.
- (5) Terrados Cepeda, F.J., Baco Castro, M.L., Moreno-Rangel, D. (2015). Patio 2.12: Vivienda prefabricada, sostenible, autosuficiente y energéticamente eficiente. Participación en la competición Solar Decathlon Europe 2012. *Informes de la Construcción*, 67(538), 1-11. <https://doi.org/10.3989/ic.13.138>.
- (6) Salas, J., Oteiza, I. (2009). Estrategias divergentes de industrialización abierta para una edificación pretenciosamente sostenible. *Informes de la Construcción*, 61(513), 11-31. <https://doi.org/10.3989/ic.08.050>.
- (7) Suárez, R., Frago, J. (2016). Estrategias pasivas de optimización energética de la vivienda social en clima mediterráneo. *Informes de la Construcción*, 68(541), 1-12. <https://doi.org/10.3989/ic.15.050>.
- (8) Linhares, P., Hermo, V., Meire, C. (2021). Environmental design guidelines for residential NZEBs with liner tray construction. *Journal of Building Engineering*, 42, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102580>.
- (9) Roebuck, S. Primera mitad del s. XX, 1900 a 1945: Propuestas y sistemas industrializados, primeros ejemplos de construcción modular ligera.
- (10) Saiz Sanchez, P. (2015). *La casa industrializada: seis propuestas para este milenio* (Tesis Doctoral, Arquitectura). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.40341>.
- (11) Bribián, I.Z., Capilla, A.V., Usón, A.A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>.
- (12) Bucio-Sistos, C., López-Sosa, L.B., Morales-Máximo, M. (2022). Análisis multiparamétrico de tres sistemas constructivos considerando indicadores de sustentabilidad: ambientales, económicos y energético-funcionales. *Informes de la Construcción*, 74(567), e461-e461. <https://doi.org/10.3989/ic.87813>.
- (13) Uriz, A.L., Sanz, C., Sánchez, B. (2019). Aplicación de un modelo Lean-BIM para la mejora de la productividad en redacción de proyectos de edificación. *Informes de la Construcción*, 71(556), e313-e313. <https://doi.org/10.3989/ic.67222>.
- (14) Tenorio Ríos, J.A., Sotorriño Ortega, G. (2019). Edificios de vivienda industrializados. La transformación digital. https://www.rilem.net/global/gene/link.php?doc_link=/media/event/2019103400_congreso-conpat-2019.pdf.
- (15) Faghirinejadfard, A., Mahdiyar, A., Marsono, A.K., Mohandes, S.R., Omrany, H., Tabatabaee, S., Tap, M.M. (2016). Economic comparison of industrialized building system and conventional construction system using building information modeling. *Jurnal Teknologi*, 78(1). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.4056>.
- (16) Trejo Carvajal, N.A. (2018). Estudio de impacto del uso de la metodología BIM en la planificación y control de proyectos de ingeniería y construcción.
- (17) Zhang, J., Long, Y., Lv, S., Xiang, Y. (2016). BIM-enabled modular and industrialized construction in China. *Procedia engineering*, 145, 1456-1461. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.183>.
- (18) Mojica Arboleda, A., Valencia Rivera, D.F. (2012). Implementación de las metodologías BIM como herramienta para la planificación y control del proceso constructivo de una edificación en Bogotá.
- (19) He, R., Li, M., Gan, V.J., Ma, J. (2021). BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123505>.
- (20) Domínguez García, J.M. Implantación del sistema BIM a la industrialización abierta bajo criterios de sostenibilidad.
- (21) Hermo, V. (2015). Estructura modular para la construcción de edificaciones, Spanish patent., ES 2 716 889 B2 OE PM 2015, n.d.

- (22) Hermo, V. (2011). Sistema constructivo industrializado in situ COTaCERO: transferencia tecnológica: construcción de depósitos-ejecución de viviendas en altura mediante paneles portantes de acero.
- (23) Valcárcel, J.P., Hermo, V., Cheda, J.B.R. (2013). Un nuevo sistema constructivo: Aspectos estructurales del sistema COTaCERO. En *Estructuras y Arquitectura* (pp. 1097-1104). <https://doi.org/10.1201/b15267-149>.
- (24) Rodríguez Cheda, J.B., Pérez-Valcárcel, J., Hermo, V. (2011). Método para construir edificaciones de varias plantas mediante paneles portantes ligeros desde el nivel del terreno. *Spanish Patent, 2370438*.
- (25) Pérez-Valcárcel, J., Muñoz-Vidal, M., Hermo, V. (2020). Construcción izada: Condicionantes estructurales del sistema REVERSTOP. *Informes de la Construcción, 72*(559), e355-e355. <https://doi.org/10.3989/ic.72993>.
- (26) Gómez Jáuregui, V. (2009) Habidite: viviendas modulares industrializadas, *Informes de la Construcción, 61*(513), 33-46. <https://doi.org/10.3989/ic.08.035>.
- (27) Nollens, A.F.B. (2021). Sistema prefabricado de ecofachada termoaislante para el mejoramiento de viviendas sociales construidas en la zona árida centro oeste de Argentina. *Informes de la Construcción, 73*(561), e377-e377. <https://doi.org/10.3989/ic.74740>.
- (28) Muñiz Gómez, S., Mosquera-Rey, E., Corral, A. (2022). Construcción de una vivienda de madera con el sistema UBUILD. *Informes de la Construcción, 74*(565), e428. <https://doi.org/10.3989/ic.87025>.
- (29) Tudela, E.A. (2016). *Las instalaciones como condicionante del diseño arquitectónico: panel técnico Reverstop* (Tesis Doctoral, Universidade da Coruña).
- (30) Xu, L.D., Xu, E. L., L. Li, (2018) Industry 4.0: state of the art and future trends, *International Journal of Production Research*, vol. 56, n.º 8, pp. 2941-2962, <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.
- (31) Ovando Vacarezza, G. (2015). *Criterios técnicos del proyecto con módulos tridimensionales ligeros: las casas del Solar Decathlon 2005 y 2007* (Tesis Doctoral, Arquitectura) <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.40687>.
- (32) Catálogo de elementos constructivos del CTE. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. Ministerio de Fomento, (2010, Marzo).
- (33) Guía de construir con madera (CcM). Documento de aplicación del CTE. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. 2010.
- (34) Gantioler, G. (2010). Manual para la certificación “Estándar Passivhaus”. Certificado Estándar Passivhaus Dr. *Wolfgang Feist. Versión del, 23*.
- (35) García-Alvarado, R., Rojas-Wilckens, I., Vargas-Mosqueda, M. (2021). Análisis de la Modulación Arquitectónica en Edificaciones Menores de CLT; estudio de casos. *Informes de la Construcción, 73*(562), e387-e387. <https://doi.org/10.3989/ic.77708>.
- (36) Carolina Meire, Patricia Linhares, Víctor Hermo (2023). Método para la dirección de obra de viviendas modulares pasivas. *Informes de la Construcción, 75*(572), e520. <https://doi.org/10.3989/ic.6452>.