

Panel industrializado de aluminio extruido patentado para la ejecución de envolventes estructurales ventiladas con captación solar en construcciones de baja altura

Patented Industrialized extruded aluminum panel for the execution of ventilated structural envelopes with solar collection in low-rise constructions

Carolina Meire^{[ORCID](#)}

Universidade da Coruña. ETS Arquitectura, A Coruña (España).

Patricia Linhares^{[ORCID](#)}

Universidade da Coruña. ETS Arquitectura, A Coruña (España).

Víctor Hermo^{[ORCID](#)}

Universidade da Coruña. ETS Arquitectura, A Coruña (España).

Autor de contacto: carolina.meire@udc.es

RESUMEN

Este artículo describe el proceso de diseño y análisis de un sistema tipo cassette, registrado con el nombre Walluminium, que consiste en un panel de aluminio extruido para fachadas y cubiertas, que ofrece una buena relación entre industrialización y adaptabilidad. Este panel tiene tres funciones: es estructural porque forma muros de carga, es cubierta y fachada ventilada, y colector solar. Este estudio analizó los precursores del sistema, un diseño inicial probado en un prototipo de construcción, y un diseño optimizado patentado en 2020. En consecuencia, se demostró la viabilidad de la triple función del panel, que ofrece una alternativa interesante para la construcción de viviendas modulares. El sistema constructivo se ha certificado como componente Passivhaus y se está utilizando como sistema constructivo industrializado que elimina incertidumbres en la construcción de viviendas pasivas.

Palabras clave: Construcción modular ligera; sistemas constructivos innovadores; construcción en aluminio; sección de cassettes; construcción industrializada.

ABSTRACT

This article describes the design and analysis process of a cassette-type system registered under the name "walluminium." This system consists of an extruded aluminum panel for facades and roofs, offering a good balance between industrialization and adaptability. The panel serves three functions: it is structural as it forms load-bearing walls, functions as a ventilated roof and facade, and acts as a solar collector. This study analyzed the system's precursors, an initial design tested in a construction prototype, and an optimized design patented in 2020. As a result, the viability of the panel's triple function was demonstrated, providing an interesting alternative for modular housing construction. The construction system has been certified as a Passivhaus component and is being used as an industrialized construction system that eliminates uncertainties in passive house construction.

Keywords: Light modular construction; innovative construction systems; aluminium construction; cassette section; industrialized construction.

Cómo citar este artículo/Citation: Carolina Meire, Patricia Linhares, Víctor Hermo (2025). Panel industrializado de aluminio extruido patentado para la ejecución de envolventes estructurales ventiladas con captación solar en construcciones de baja altura. Informes de la Construcción, 77 (577):6667. <https://doi.org/10.3989/ic.6667>.

Copyright: © 2025 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: 10/11/2023

Aceptado/Accepted: 24/01/2025

Publicado on-line/Published on-line: 25/03/2025

1. INTRODUCCIÓN

El uso de sistemas modulares en la construcción residencial es una tendencia creciente, avalada por la abundante literatura científica publicada recientemente. Que conciernen desde; la revisión del estado del arte de las estructuras de edificación modular (1), los sistemas de construcción ligera y sus ventajas desde las perspectivas económicas y medioambientales (2), la evolución de los métodos modernos de construcción industrializada (3), el estudio de las operaciones de ensamble con precisión (4), hasta los desafíos y limitaciones asociados a este tipo de construcciones (5).

Los avances tecnológicos en la construcción residencial ofrecen varias ventajas; como el aumento de la calidad, la reducción de costes y la mejora de la eficiencia energética. La construcción modular permite realizar la mayor parte de los trabajos en taller, lo que se traduce en procesos de construcción más rápidos y seguros, mejores predicciones de las fechas de finalización, calidad superior, menos trabajadores en las obras, menos desperdicio de recursos y un menor impacto medioambiental (5). Sin embargo, la producción estandarizada puede llevar a la rigidez de diseño, y a comprometer la adaptabilidad a las particularidades de las parcelas.

La flexibilidad del diseño está relacionada con la naturaleza de un módulo, como explican Lawson et al. (2008) (6). Según Soares et al. (2017) (7), destacan tres grupos principales: de componentes lineales (stick framing), superficiales (panelized) y tridimensionales (modular). Dentro de la categoría de componentes panelized, existe un sistema de cassettes que utiliza secciones de acero en forma de "C". Resultando una alternativa innovadora a las construcciones clásicas de entramado ligero de acero (LSF) (8), que ofrece ventajas estructurales (9-11) y una buena resistencia sísmica (12). Los cassettes pueden instalarse verticalmente para formar muros de carga en construcciones de poca altura (13-14). Este estudio se centra en un panel de aluminio extruido, cuya ligereza contribuye a la facilidad de montaje (15).

La elevada conductividad térmica del aluminio permite utilizar la envolvente como fachada metálica absorbente solar. Las iniciativas de captación solar integral mediante superficies metálicas, como los paneles de muro cortina de absorción solar con tubos de calor embebidos y anillos de tubos de calor (16), o los colectores no acristalados integrados en paneles sándwich (17), buscan reducir el consumo de refrigeración y contribuir a la generación de agua caliente sanitaria. Probst y Roecker, 2007 (18) y Elguezabal et al., 2019 (17) diferencian tres tipos de sistemas: Fachada Solar (SF), Fachada Solar Térmica Activa (ASTF), y sistemas solares térmicos integrados en edificios (BISTS). Estos últimos integran la tecnología de colectores en la envolvente del edificio, además de servir como dispositivo colector de energía solar, según Lamnatou, et al. 2015 (19).

Por otro lado, existen varios proyectos de investigación que son los predecesores directos del Panel objeto de estudio. Y que concretamente han demostrado la resistencia y estabilidad de paneles de acero y aluminio portantes para la construcción por repetición de hasta cinco plantas en top to bottom (15). En el proyecto de Cotacero (13), esto se comprueba mediante simulaciones con elementos finitos en estructuras de acero unidas por soldadura. La prueba experimental realizada en ese proyecto, que implicó la construcción de un prototipo de dos pisos, mostró que el tiempo invertido en soldadura era extremadamente alto (66% del tiempo total).

A continuación, el proyecto Reverstop (15), demostró el uso y viabilidad con estructuras atornilladas y consiguió tiempos de construcción más cortos. En ese caso, la estabilidad de la estructura recae en los paneles de borde perpendiculares a los muros portantes. Y durante el montaje, los gatos hidráulicos que soportaban la estructura actuaron como pilares que se reforzaron mediante cables tensores para evitar desplazamientos horizontales a modo de cruces de San Andrés. La unión entre los paneles era mediante un elemento elástico comprimido de EPDM, que funcionaba bien para la estanqueidad de las fachadas, pero resultó ser insuficiente para las juntas en la cubierta. Se instaló un colector solar y se probó en un módulo de aluminio otro de acero. Las temperaturas registradas en el módulo de aluminio anodizado natural durante el verano con soleamiento directo, no fueron lo suficientemente altas como para rentabilizar su instalación, proporcionando un bajo porcentaje de energía al depósito de agua caliente sanitaria.

El objeto de esta investigación, es el análisis del panel de aluminio extruido que integra la tecnología de captación solar de BISTS y que permite construir fachadas y cubiertas portantes combinando tres funciones: estructura, fachada-cubierta ventilada y captador solar, en viviendas unifamiliares de hasta dos plantas.

En definitiva, el artículo describe la evolución del principal componente del sistema de constructivo, el panel de aluminio extruido, que se evalúa desde varias perspectivas: diseño, construcción y optimización. Destacar que, gracias a el proyecto de investigación "Sistema optimizado de viviendas ecoeficientes Proyectopía del programa Neotec" (20) se inició el desarrollo de este componente, y que posteriormente reflejó la integración de las tres funciones en su patente (21).

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente artículo, se determina a través de un proceso de diseño y validación experimental del panel para su uso en construcción.

1. Se parte de un diseño inicial del panel de aluminio, concebido para una triple función: estructural, fachada y cubierta ventilada y colector solar.
2. Se lleva a cabo la primera prueba de montaje en edificación experimental "Apartamentos turísticos Mardesía".

3. A partir de la experiencia obtenida, se identifican los aspectos de mejora del sistema.
4. Se procede a la revisión de encuentros y detalles constructivos objetos de mejora, hasta conseguir el diseño optimizado definitivo, definiendo las características constructivas de los elementos, y resolviendo los encuentros en los puntos conflictivos.
5. Se verifica el cumplimiento de las prestaciones frente a los condicionantes existentes.
6. Se lleva a la práctica el diseño optimizado y definitivo mediante la construcción de diferentes edificios y en concreto 6 viviendas IGVS, donde se comprueba su uso y funcionalidad.
7. Se realizan los ensayos oportunos.
8. Obtención de la Patente.
9. 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.

En resumen, el estudio analiza la evolución del sistema constructivo, donde el panel industrializado de aluminio extruido sirve de envolvente estructural ventilada para viviendas unifamiliares de hasta dos plantas, incluyendo la captación solar. El análisis y la descripción del sistema, se organiza desde su diseño inicial hasta su forma final, considerando la viabilidad de la triple función; estructural, envolvente ventilada y colector solar. El papel que juega el Panel en las diferentes pruebas de montaje al tratarse de un sistema constructivo tan innovador, es decisivo. Puesto que el panel cambia del todo el proceso constructivo, ya que se hace a la inversa de lo convencional, desde la fachada ventilada exterior hacia el interior. Y tanto la prueba experimental como en las comprobaciones finales se utiliza el panel para validar su montaje, comprobar la viabilidad de su triple función y además optimizarlo.

1. Diseño Inicial
2. Prueba de montaje experimental
3. Identificación de mejoras
4. Diseño optimizado, construcción y ensayos
5. Patente
6. Resultados y conclusiones

3. TEORÍA Y CÁLCULOS

3.1. Diseño inicial

El panel es industrializado y fabricado por extrusión, en aleación EN AW 6005A-T6, debido a sus excelentes propiedades mecánicas (22), consta de una resistencia a la compresión superior a 15 tns, La densidad del panel es de 2800 Kg/m³, con una conductividad de 160 W/mK y un calor específico de 880 J/Kg.K. Y se rige por la norma europea EN 15088:2005 para Aluminio y aleaciones de aluminio, con aplicaciones estructurales de construcción sometidos a cargas tanto para edificación como para obra civil. Los paneles tienen unas dimensiones de 300 mm × 90 mm × 3 mm de grosor y hasta 14 m de longitud, con diversas configuraciones de los extremos en función de la ubicación y la pendiente de las cubiertas. Las perforaciones y mecanizados necesarios para el atornillado entre los paneles y los elementos auxiliares se realizan con máquinas automáticas de mecanizado de cinco ejes. Los paneles "en bruto" tienen extremos con forma recta o perpendicular a la dirección de extrusión.

Estructuralmente, el panel funciona de forma similar a un sistema tipo cassette. Las alas de cada extremo se unen al panel adyacente para conformar rigidizadores cada 300 mm. Las almas de los rigidizadores permiten utilizar pletinas en la unión entre los paneles de fachada y la cubierta, formando la envolvente del edificio. Los paneles se anclan a la cimentación utilizando otros perfiles del tipo L de aluminio extruido. Y otras piezas auxiliares similares sirven para el apoyo de los forjados interiores. Este sistema permite completar rápidamente la estructura del edificio.

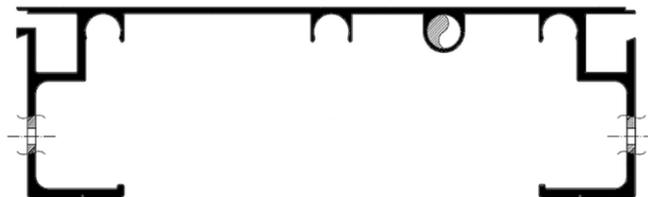


Figura 1. Sección del panel de aluminio.

La sección horizontal del panel (figura 1) es asimétrica, de modo que los bordes forman una junta estanca. La barrera exterior es una junta a media madera de aluminio de un milímetro, que proporciona un acabado liso a toda la fachada y la cubierta. Una superficie exterior lisa mejora la durabilidad y reduce la necesidad de mantenimiento, ya que disminuye los depósitos, la suciedad y los posibles daños. En esta junta no hay ningún componente elástico, por lo que puede entrar algo de agua de lluvia que fluya por la cubierta. Debajo de la junta a media madera hay una junta de cola de milano con un canal doble a cada lado. Dentro de estos canales, no hay presión del viento; por lo tanto, el agua tiende a fluir por gravedad hacia el punto más bajo, donde se drena hacia la fachada. En el punto de contacto entre los dos paneles existe una doble junta elástica de EPDM espumado.

Su función principal es permitir pequeños movimientos térmicos entre los paneles evitando ruidos. Esta junta permite un aspecto completamente plano y continuo de la envolvente del edificio y el drenaje continuo del agua, sin necesidad de elementos como canalones o tubos de desagüe (figura 2).

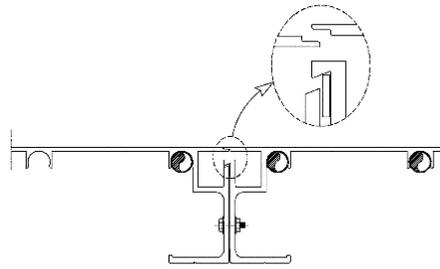


Figura 2. Junta estanca.

Los rigidizadores estructurales también se utilizan como soportes para conductos de captación solar, que pueden emplearse para agua caliente sanitaria, redistribución de temperaturas en fachada y refrigeración. También pueden utilizarse para paliar la falta de inercia térmica habitual en las construcciones modulares ligeras (17-18, 23).

El acabado del panel puede ser anodizado o lacado; en el caso del anodizado, con sello de calidad europeo Qualanod específicamente para el anodizado de aluminio con ácido sulfúrico, con espesor medio mínimo de 15 micras. Y en el acabado lacado, con sello de calidad europeo Qualicoat. Con pretratamiento dual alcalino - ácido, el cual refuerza la resistencia frente a condiciones climáticas y ambientales extremas, con un espesor medio mínimo 60 micras.

3.2. Prueba de montaje experimental e identificación de mejoras

El primer montaje de prueba consistió en cinco construcciones de poca altura con diferentes tipologías constructivas: una cubierta plana, una cubierta a dos aguas orientada al este, una cubierta a dos aguas orientada al oeste, una cubierta a dos aguas y una casa de una sola planta con dos cubiertas invertidas y dos canalones interiores (figura 3). Las esquinas se arriostraron con los mismos paneles perpendiculares a la fachada portante.

El anclaje de los paneles portantes de aluminio a la cimentación se realiza mediante perfiles "L" con varillas roscadas (figura 4).

Esto implica ciertos problemas de nivelación y dimensiones debido a las diferencias entre la exactitud y tolerancia de la losa de hormigón moldeada in situ y la fabricación industrializada de los paneles de aluminio. Esto puede solucionarse rellenando el encuentro con mortero expansivo y nivelando desde el punto más alto de la solera.

Durante el montaje se detectó inestabilidad horizontal de los muros. Reproduciendo la experiencia de un proyecto de investigación anterior, se utilizaron pilares metálicos de uso provisional para soportar las vigas de borde, que sirvieron de guía para el montaje de los paneles portantes (figura 5). Los pilares auxiliares, anclados con chapa metálica base a las soleras, permitieron mantener la estabilidad horizontal durante el montaje.

Sin embargo, esta estructura auxiliar implica el uso de una grúa, un mayor consumo de tiempo y un aumento de los costes de material. Además, no parecía conseguir la estabilidad suficiente una vez finalizado el montaje de la estructura de aluminio. Esto es debido a holguras en la tornillería y pletinas empleadas, que se rectificaban en obra para facilitar su ensamblaje. Teniendo en cuenta que en las fachadas sur no estructurales no se incluyen elementos opacos, es necesario reforzar aún más el conjunto. Por ello, se reforzó la estructura instalando marcos soldados de tubos de aluminio de 120 x 60 mm (figura 6). Además, estos marcos sirven de soportes exactos para la carpintería de aluminio que forma los marcos de las ventanas. En las fachadas orientadas al norte, el problema se resuelve mediante un entramado de madera tipo ballonframe que actúa como muro de arriostramiento (figura 7).



Figura 3. Primera prueba de montaje en edificación experimental "Mardesía".



Figura 4. Perfil "L" encuentro entre solera y fachada portante en el primer montaje experimental.



Figura 5. Montaje del prototipo con pilares metálicos auxiliares.



Figuras 6 y 7. Colocación de marcos de refuerzo de aluminio soldado en la fachada a dos aguas, y entramado de madera tipo ballonframe, que actúa como una pared de arriostramiento en la unidad 2 del prototipo.

Durante el montaje se detectaron movimientos inesperados en la intersección entre la fachada y cubierta. Esto se debe a los espacios en los taladros creados en las pletinas de conexión durante la construcción para facilitar el montaje.

El montaje del panel de aluminio como fachada ventilada y cubierta ventilada no presentó ningún problema, salvo la dificultad de comprimir las juntas elásticas. La espuma EPDM de 4 mm puede comprimirse, con cierta dificultad, hasta un espesor de 1 mm. Esto provoca desfases dimensionales acumulativos en las fachadas y cubiertas. Se contempla la posibilidad de utilizar una junta estanca más fina, y un material de espuma EPDM de 2 mm que garantiza la correcta unión de los paneles y la junta coplanaria. Además, la estanqueidad de las juntas es adecuada tanto para la cubierta como para la fachada. El punto inferior de la fachada también se comporta correctamente, evacuando el agua condensada hacia el exterior.

La ventilación se produce desde el apoyo del panel en la base de la fachada hasta el encuentro entre la cornisa o cumbrera, dependiendo de la inclinación de la cubierta. La ventilación de la cubierta cumple los parámetros definidos en el DB HS del CTE, donde el Área efectiva total en m², y la superficie de la cubierta en m² reúne la siguiente condición: $A_{efectiva} = S_{cubierta} / 500$.

Se comprueba en el montaje experimental donde las edificaciones tienen unas superficies de cubierta en planta entre 36 y 70 m², y constan de una abertura de 0,02 m por la longitud de la cornisa y cumbrera de 6 m. Que en todos los casos se cumple la condición, siendo considerablemente mayor el área efectiva de ventilación real, que el mínimo exigido por normativa. Satisfaciendo el caso más desfavorable de A efectiva 0.24 > 0,14.

No obstante, se observaron posibles retornos de agua durante la evacuación del agua de lluvia en las cubiertas planas, que podrían deberse a la tensión superficial en el borde del panel de aluminio extruido. Además, la colocación de tapajuntas adosados al borde del panel presenta el riesgo de obstruir el drenaje de los canales interiores. En el prototipo, se consideró oportuno mecanizar manualmente estos canales para favorecer la evacuación, lo que ocasionó algunas dificultades de ejecución (figura 8). Este contratiempo sugiere la necesidad de revisar los detalles de la cornisa. No obstante, se ha comprobado que el prototipo funciona adecuadamente contra la humedad durante su uso continuado durante más de cuatro años.

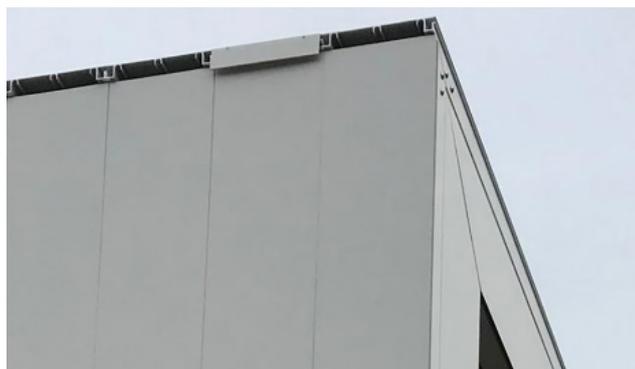


Figura 8. Chapa metálica discontinua entre la fachada y cubierta atornillada al borde del panel.

Se instalaron colectores solares (figura 9) en tres planos opacos del prototipo: la fachada este, la fachada oeste y la cubierta. El sistema utilizado (figura 10) era similar a un colector solar convencional donde la energía recibida del sol, eleva la temperatura del agua, con vistas a su aprovechamiento con un depósito de inercia. Se establecieron en circuitos independientes para poder realizar las mediciones. Las temperaturas que se alcanzan en verano en días soleados no superan los 50°C y debido al color blanco del edificio, no se alcanza una temperatura suficiente para activar la bomba que alimenta el depósito de agua caliente sanitaria. Se consideró necesario modificar el color de la fachada para conseguir la temperatura mínima requerida.



Figura 9. Tubos de polipropileno en circuito de colector solar.

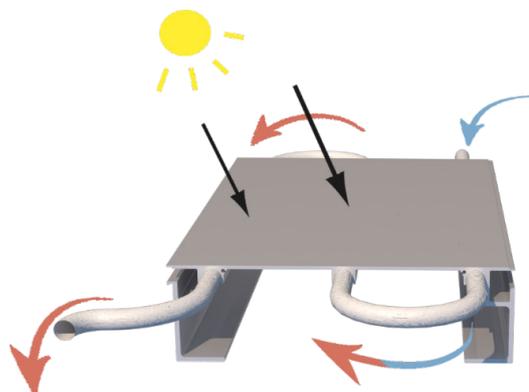


Figura 10. Esquema de funcionamiento de los colectores solares

3.3. Diseño optimizado y cumplimiento de prestaciones

Tras la identificación de los puntos de mejora, se definen los encuentros constructivos para el diseño optimizado final. En concreto de los siguientes elementos:

- Marcos estructurales en fachada hastial.
- Perfil “L” de encuentro entre solera y muros
- Pletinas de unión entre la fachada y la cubierta.
- Encuentro en cornisa entre fachada y cubierta.

Marcos estructurales en fachadas hastiales

En el diseño optimizado, se sugiere el uso de marcos estructurales permanentes formados por perfiles U200.80.6 normalizados y mecanizados en los muros no portantes, (figura 11) completados con unos marcos estéticos similares que rematan el borde vertical de los muros portantes y de la cubierta. De este modo, dicha estructura, que permite el soporte estable de las vigas de borde que sirven de replanteo para los paneles portantes, se instala en obra y forma parte del edificio final.

Suponiendo así una optimización importante en tiempos de montaje y ahorro de costes.

El sistema optimizado, compuesto por marcos estructurales, marcos estéticos y paneles de fachada y cubierta se simula mediante programa de elementos finitos y cálculo matricial. El conjunto se modela y se somete a las concargas y sobrecargas de uso propios de una vivienda unifamiliar.

Se le aplican las condiciones de viento en zona expuesta según DBSE del CTE. En estas condiciones, el límite elástico del material no es alcanzado por la estructura, no suponiendo un problema a efectos de resistencia. Los desplazamientos resultantes, principal problema en el caso del aluminio debido a su módulo de Young, también entran dentro de los límites aceptables (desplome total:1/500 de la altura del edificio). Las deformaciones previstas para el conjunto con paneles opacos de al menos 1,2 m en la fachada sur se mantienen por debajo de 10 mm de desplome total con una altura de 7m. (figura 12). Se cumplen así los límites establecidos en el Código Técnico de la Edificación $1/700 < 1/500$ (límite CTE).

Este tipo de estructura es especialmente resistente a la acción sísmica. Se han realizado cálculos específicos para una zona de alta actividad sísmica, considerando la aceleración de base en la roca $Z=0,40g$ y para un tipo de suelo con $N_{sp} \geq 15$. Se verificó el cumplimiento de la estructura en



Figura 11. Marcos estructurales.

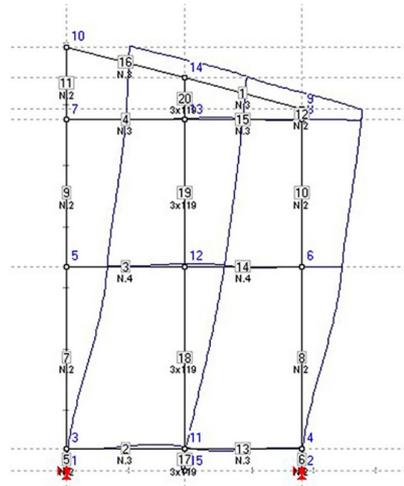


Figura 12. Análisis matricial de sistemas estructurales planos (Aplicación X v.8.6.16 [09.2008]).

presencia de este fenómeno, confirmando resistencia y desplazamientos (figura 13). A cada frecuencia propia de vibración de la estructura le corresponden un modo de vibración y una amplitud de la misma. Al multiplicar ambas se obtiene la contribución de ese modo a los esfuerzos y desplazamientos en la estructura.

Perfil “L” de encuentro entre solera y muros

El encuentro entre la solera de hormigón y la estructura de aluminio se realiza a partir de perfiles de aluminio extruido en forma de L como base para la instalación de los muros de carga, y perfiles en forma de U como base para la instalación de las fachadas no portantes (figura 14). En primer lugar, se completa con el montaje de los marcos estructurales y entre ellos las vigas de borde. Dichas vigas de borde sirven para el apoyo y replanteo de los paneles portantes, montaje del forjado y trabajo desde la primera planta para instalación de la cubierta. Una vez la estructura esté completa, dichas vigas de borde trabajarán ya tal y como está previsto para la transmisión de cargas desde los forjados hasta los muros portantes.

Pletinas de unión entre la fachada y cubierta

Se corrige el diseño de las pletinas de unión entre fachada y cubierta. Para evitar el problema de la holgura detectada en la prueba de montaje del prototipo, se rediseñan las pletinas para separar más los taladros entre sí y así reducir la holgura y el giro en dichas uniones. (figura 15).

Encuentro en cornisa entre fachada y cubierta

El problema detectado en el montaje inicial de prueba puso de manifiesto la necesidad de revisar el detalle de la cornisa, planteando un remate continuo de chapa plegada en el encuentro de cornisa entre fachada y cubierta (figura 16). Y a su vez se mejora el detalle para el caso de cubiertas con muy poca pendiente, ya que se planteaba el riesgo del retorno del agua por tensión superficial en el desagüe de los canales ocultos. Para evitarlo, se modifica el detalle constructivo con el objetivo de prolongar el vuelo de dichos canales.

Colectores solares

Se han establecido varias alternativas para mejorar el diseño inicial de los colectores solares. Se ha optado por calentar el agua de alimentación directamente antes de que entre en el depósito de agua caliente sanitaria. De este modo, la temperatura del agua de alimentación puede aumentar con respecto a la del agua sanitaria. El sistema se probó con una válvula de agua de tres vías que permitía el paso del agua a través de la fachada en función de la temperatura exterior. A temperaturas bajo cero, el agua permanecía en circulación para evitar su congelación. Además, el circuito está integrado en parte de la fachada pintada de negro del edificio para mejorar su eficacia.

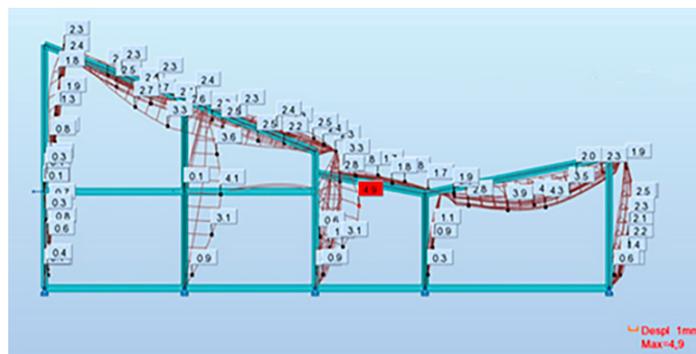


Figura 13. Resultados, movimientos horizontales debidos al sismo.



Figura 14. Encuentro entre solera y cerramiento Ls80*8, varillas roscadas y tuercas a ambos lados



Figura 15. Detalle de los nuevos diseños de pletina para la unión de fachada y cubierta.



Figura 16. Encuentro de cornisa, con remate de chapa continuo

3.4. Construcción con diseño definitivo

El diseño optimizado definitivo se lleva a la práctica mediante la construcción de seis viviendas modulares de promoción pública en España, (figura 17) contratadas por la Consellería de Medio Ambiente, Territorio y Vivienda de la Junta de Galicia, mediante un concurso público para proyecto y obra.



Figura 17. Viviendas modulares con el diseño optimizado

3.5. Ensayos

Ensayo de estanqueidad al agua

Se han realizado pruebas de estanqueidad en diferentes fachadas y cubiertas. El método de prueba consiste en proyectar una cantidad de agua durante un tiempo máximo de treinta minutos (30') sobre la envolvente, es decir, el conjunto de fachadas - carpintería - cubiertas, y comprobar la existencia de filtraciones hacia el interior. Los aspersores tenían una boquilla cónica con un ángulo de proyección de 60°, de modo que el agua caía uniformemente sobre toda la superficie del elemento sometido a ensayo. Se utilizaron cuatro aspersores en una sola línea. La distancia entre cada uno de los aspersores y la superficie es de aproximadamente 0,50m, con una presión de trabajo de 2 bares y un caudal de 262 L. Los resultados de las pruebas fueron satisfactorios, comprobándose que tras 30min de prueba y un periodo de espera posterior de 60min, no se observaron filtraciones.

Ensayo de captación solar

Con respecto a los colectores solares, se realizaron pruebas en dos fachadas con diferentes tonalidades (Prueba 01 Fachada negra y Prueba 02 Fachada blanca), según las siguientes condiciones: el área de estudio de la superficie del colector era de aproximadamente 12m², con una temperatura ambiente de 36°C, y temperatura de suministro de agua de 16°C (en la ciudad de Orense en junio). El fabricante del sistema de agua caliente sanitaria determina que la temperatura ideal del depósito de agua se sitúa entre 45-65°C. Los resultados del ensayo fueron satisfactorios en ambos casos, aumentando la temperatura de salida del agua del colector. Concretamente, al verificar las diferencias en la temperatura del agua: para el Ensayo 01, hubo un aumento de 8,5°C (con respecto a su entrada en el tanque) y en el Ensayo 02, hubo un aumento de 1,2°C (con respecto a su entrada en el tanque).

3.6. Obtención de la Patente

"Estructura modular para la construcción de edificios", con número ES2716889 B2. El panel de aluminio extruido permite la ejecución de fachadas y cubiertas portantes, y cumple con la triple función; estructural, fachada ventilada y colector solar. En la integración de las tres funciones radica su innovación, garantizando la simplificación del proceso constructivo, y así se refleja en las reivindicaciones de su patente (21).

Esta patente clasifica la invención con los términos E (construcciones fijas), E04 (edificios), E04F (trabajos relacionados con acabados de edificios, es decir, escaleras, suelos), E04C (elementos estructurales, materiales de construcción), F24 (calefacción, placas decocción, ventilación), o F24D (sistemas de calefacción para viviendas residenciales u otros lugares, es decir, sistemas de calefacción central). La figura 18 muestra en vista 3D un edificio de poca altura formado por el ensamblaje de paneles de aluminio extruido con el diseño optimizado definitivo.

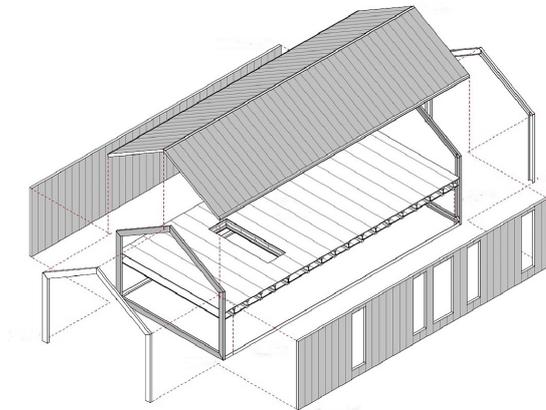


Figura 18. Vista 3D de los elementos estructurales que forman el diseño optimizado

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estructural

En general, se considera que las estructuras son sensibles al viento si la frecuencia es inferior a 1 Hz y la relación de esbeltez es superior a cinco, (24-26). Por lo tanto, el análisis estático es apropiado para edificios de menos de 50 m de altura (24).

Es difícil comparar las respuestas estructurales de varios sistemas de construcción bajo cargas de viento porque las cargas laterales de viento son soportadas y transferidas usando elementos de arriostramiento y/o revestimiento de muros y luego son transportadas a los cimientos (27-28).

El denominador común de todas las publicaciones de referencia es la importancia de las conexiones entre los componentes, concretamente los refuerzos laterales o muros de cortante, que se utilizan para conseguir la estabilidad lateral de una estructura (29-30). En el caso del muro de aluminio extruido de este estudio, los refuerzos laterales fueron absorbidos por el marco estructural y un panel opaco rígido compuesto por doble tablero de OSB con rastreles formando un sándwich.

Lawson et al. (28) estudiaron el comportamiento de la fachada de una construcción modular de una planta calculada con elementos finitos, sometida a una carga de viento de diseño de 0,86 kN/m², correspondiente a una localización en las Midlands de Inglaterra. Se obtuvo una deflexión horizontal total de 4,8 mm por debajo del límite de servicio. Lawson exploró el comportamiento de revestimientos con diferentes materiales. El panel revestido de madera contrachapada mostró un buen comportamiento, con un aumento de la carga de diseño del 95% en comparación con el panel revestido de cartón yeso.

En el sistema estudiado en este artículo, la carga de viento de diseño es de 0,46 kN/m², definida por el Código Técnico de la Edificación de la provincia de Pontevedra. En el peor de los casos, es decir, una construcción de dos plantas con un único vano, la longitud del panel opaco (en este caso, de tablero de virutas orientadas) debe ser de 1,20 m para obtener deformaciones inferiores a 10 mm, que es el límite establecido por la normativa nacional. Por lo tanto, la seguridad de la estructura se demostró en el peor escenario descrito por la normativa y para la solución formal menos estable.

4.2. Envoltente ventilada

Los resultados de la prueba de estanqueidad confirman que la versión optimizada del sistema funciona adecuadamente como cubierta y fachada ventiladas. El sistema obtuvo excelentes resultados en la prueba, demostrando que tras 30 min de prueba y un periodo de espera adicional de 60', había un 0% de filtraciones al interior.

Estudios similares fueron realizados por Arce-Recatalá 2020 (31), en los que ensayó la estanqueidad al agua en tres Mock-ups con tres tipos diferentes de fachadas ventiladas en condiciones de ensayo en laboratorio. Los resultados mostraron que aproximadamente el 25% del agua pulverizada se había infiltrado en la cavidad y menos del 0,5% del agua pulverizada pudo alcanzar la barrera resistente al agua. Estos datos se determinaron en función de las dimensiones de las juntas.

Otro estudio realizado por la FVVFH (Asociación de Materiales y Componentes para Fachadas Ventiladas (Fachverband für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. (FVVFH)) informó que el 16,6% del agua pulverizada se infiltró en la cámara de aire y el 0,4% alcanzó la superficie exterior de la capa de aislamiento térmico (32).

4.3. Colector solar

Los resultados obtenidos con el colector solar de la fachada negra muestran una variación diaria de temperatura en el depósito de agua de 12,2°C durante el verano. Algunos estudios sobre colectores integrados en edificios muestran mejores resultados, como el de Liu et al. (33), que analizaron un colector solar de doble función capaz de proporcionar calentamiento de agua en estaciones cálidas con variaciones de temperatura en el depósito de agua de 16,5°C. en el día típico de verano. La eficacia de este sistema puede ser menor que la de un colector solar convencional; sin embargo, tiene la ventaja de una mayor disponibilidad de superficie y de integración arquitectónica, ya que toda la cubierta y dos fachadas de cada edificación pueden utilizarse como colectores solares.

Como en nuestro caso, el color del panel tiene un claro impacto en la eficiencia del colector, destacando los estudios sobre colectores solares integrados para el calentamiento de agua de Anderson et al. (34) que demostraron que los colectores negros pueden proporcionar el 78% de la carga de calentamiento de agua, mientras que los blancos pueden proporcionar aproximadamente el 25%. Sin embargo, otros colores distintos del negro, que pueden ofrecer mayores oportunidades de integración arquitectónica, y proporcionar porcentajes elevados de carga de calentamiento: gris 75%, verde 68% y rojo 58%.

5. CONCLUSIONES

Este artículo describe un sistema que cumple tres funciones: estructural, envolvente ventilada y colector solar. El panel es de aluminio extruido, lo que supone una novedad con respecto al estado de la técnica, basado principalmente en el acero. El análisis y la experiencia en la construcción de viviendas ofrecen buenos resultados para la construcción de envolventes de edificios.

En cuanto a la resistencia y estabilidad para uso residencial estándar con exposición al viento según el Código Técnico de la Edificación, el panel cumple su función estructural. Cumpliendo los límites establecidos por la normativa a deformación horizontal, incluso para la solución formal menos estable, y tan solo estableciendo la dimensión mínima del panel opaco en fachadas transversales en 1,20 m.

También se ha comprobado que presenta un buen comportamiento frente a la actividad sísmica, como demuestran los cálculos realizados en zonas de alto riesgo sísmico. Por lo tanto, es viable diseñar una estructura adecuada utilizando el sistema constructivo propuesto. Tanto es así, que se ha llevado a cabo la ejecución de una vivienda piloto en Quito, Ecuador.

Se garantiza la función de fachada y cubierta ventilada, tal y como lo demostraron los resultados de las pruebas de estanqueidad, con un 0% de infiltraciones al interior.

El sistema de colectores solares funcionó correctamente en fachadas negras recibiendo el depósito de ACS un aporte extra, durante el verano, no obstante, como se observó en los resultados de los ensayos, el grado de eficacia de este sistema es aproximadamente un 26% inferior a la de un colector solar convencional.

Futuras líneas de investigación: se plantean diversos objetivos; el uso de paneles en edificios de más de dos plantas, una solución para cubiertas planas que evite la condensación, así como, otras opciones para la redistribución del calor en la fachada, abordando su función como captador solar o redistribuidor térmico. También sería interesante explorar la posibilidad de utilizar el panel como refrigerante en climas extremadamente cálidos. Así como, abordar el análisis de la envolvente hermética y termoacústica y su sistema de producción (35) y las singularidades de la dirección de obra de este tipo de construcciones off site (36).

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer el apoyo del Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) en esta investigación. Del mismo modo, los cálculos realizados por el profesor Juan Pérez Valcárcel han sido una referencia valiosa para el estudio. Agradecemos su consideración en nuestro trabajo.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran que el Panel Industrializado de Aluminio Extruido y el sistema constructivo analizado en esta investigación han sido implementados por la empresa Proyectopía, en la cual han trabajado los tres investigadores. La propiedad intelectual de la patente pertenece a Víctor Hermo. Asimismo, los/as autores/as garantizan que no han modificado ni alterado los resultados para beneficiar los intereses de la empresa.

FUENTES DE FINANCIACIÓN

Este trabajo se desarrolló a partir de la investigación "Sistema optimizado para la producción de viviendas ecoeficientes Proyectopía e-Home", que fue subvencionada con un programa Neotec, Exp 00 0844 17, Sneo 20 15 14 75, CDTI, 08 de julio de 2015

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Carolina Meire: Conceptualización, Metodología, Investigación, Validación, Visualización, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición.

Patricia Linhares: Adquisición de fondos, Supervisión, Administración del proyecto.

Víctor Hermo: Adquisición de fondos, Supervisión, Investigación, Recursos.

REFERENCIAS

- (1) Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., & Bi, K. (2018). Structural response of modular buildings—an overview. *Journal of building engineering*, 16, 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.008>
- (2) Roque, E., Oliveira, R., Almeida, R. M., Vicente, R., & Figueiredo, A. (2020). Lightweight and prefabricated construction as a path to energy efficient buildings: Thermal design and execution challenges. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 19(1), 1-32. <https://doi.org/10.1504/IJESD.2020.105465>
- (3) Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., García, J., & Yepes, V. (2023). A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning. *Journal of Building Engineering*, 73, 106725 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106725>
- (4) Kasperzyk, C., Kim, M. K., & Brilakis, I. (2017). Automated re-prefabrication system for buildings using robotics. *Automation in Construction*, 83, 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.002>
- (5) Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T. D., Manalo, A., & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings-A state-of-the-art review. *Engineering structures*, 183, 883-893. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061>
- (6) Lawson, R. M., Ogden, R. G., Pedreschi, R., & Popo-Ola, S. O. (2008). Developments of cold-formed steel sections in composite applications for residential buildings. *Advances in structural engineering*, 11(6), 651-660. <https://doi.org/10.1260/136943308787543603>
- (7) Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J. J., & Da Silva, L. S. (2017). Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 194-209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- (8) Kaitila, O. (2007). Web crippling of thin-walled cold formed steel cassettes. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(6), 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.08.011>
- (9) 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.
- (10) Davies, J. M. (2006). Light gauge steel cassette wall construction—theory and practice. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(11), 1077-1086. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.028>
- (11) Lendvai, A., & Joó, A. L. (2020). Improvement of stressed skin design procedure based on experimental and numerical simulations. *Journal of Constructional Steel Research*, 168, 105874. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105874>
- (12) Belal, M. F., Serror, M. H., Mourad, S. A., & Saadawy, M. M. E. (2020). Numerical study of seismic behavior of light-gauge cold-formed steel stud walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 174, 106307. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106307>
- (13) Juan Pérez-Valcárcel, V. Hermo, J. Rodríguez-Cheda. (2013) A New Building System: Structural Aspects of CotaCeroSystem, Structures and Architecture: New Concepts, Applications and Challenges. (n.d.). <https://doi.org/10.1201/b15267>
- (14) Hermo, V. (2011). Sistema constructivo industrializado in situ COTaCERO: transferencia tecnológica: construcción de depósitos-ejecución de viviendas en altura mediante paneles portantes de acero. (Tesis doctoral): University of A Coruña.
- (15) 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>
- (16) Liu, W., & Chow, T. T. (2020). Experimental and numerical analysis of solar-absorbing metallic façade panel with embedded heat-pipe-array. *Applied Energy*, 265, 114736. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114736>
- (17) Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J. M., & Chica, J. A. (2020). CFD model-based analysis and experimental assessment of key design parameters for an integrated unglazed metallic thermal collector façade. *Renewable Energy*, 146, 1766-1780. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.151>
- (18) Probst, M. M., & Roecker, C. (2007). Towards an improved architectural quality of building integrated solar thermal systems (BIST). *Solar energy*, 81(9), 1104-1116. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.02.009>
- (19) Lamnatou, C., Mondol, J. D., Chemisana, D., & Maurer, C. (2015). Modelling and simulation of Building-Integrated solar thermal systems: Behaviour of the system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.024>
- (20) Sistema optimizado de producción de viviendas ecoeficientes Proyectopia e-Home. Neotec Exp 00084417 Sneo 20151475 (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial 08 de Julio de 2015).
- (21) V. Hermo, Estructura modular para la construcción de edificaciones, Spanish patent., ES 2 716 889 B2 OE PM 2015, n.d.
- (22) Siwowski, T. W. (2009). Structural behaviour of aluminium bridge deck panels. *Engineering structures*, 31(7), 1349-1353. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.002>
- (23) 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.jobe.2021.102580>
- (24) Lawson, R. M., Ogden, R. G., Pedreschi, R., & Popo Ola, S. O. (2005). Pre-fabricated Systems in housing using light steel and modular construction. *Steel Structures*, 5, 477-48.
- (25) Mendis, P., Ngo, T., Haritos, N., Hira, A., Samali, B., & Cheung, J. (2007). Wind loading on tall buildings. *Electronic Journal of Structural Engineering*. <http://hdl.handle.net/10453/5822>
- (26) Holmes, J. D., Kwok, K. C., & Ginger, J. D. (2012). Wind Loading Handbook for Australia and New Zealand: background to AS/NZS1170. 2 wind actions. *Australasian Wind Engineering Society*.
- (27) Annan, C. D., Youssef, M. A., & El Naggar, M. H. (2008). Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/13632460802212576>
- (28) Lawson, R., Ogden, R., Pedreschi, R., Grubb, P. J., & Ola, S. P. (2005). Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction. *Transport*, 35(15), 15.
- (29) Ramaji, I. J., & Memari, A. M. (2013, February). Identification of structural issues in design and construction of multi-story modular buildings. In Proceedings of the 1st residential building design and construction conference (pp. 294-303).
- (30) Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R. (2012). Application of modular construction in high-rise buildings. *Journal of architectural engineering*, 18(2), 148-154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000057)
- (31) Arce-Recatalá, M., García-Morales, S., & Van den Bossche, N. (2020). Quantifying wind-driven rain intrusion: a comparative study on the water management features of different types of rear-ventilated façade systems. In 12th Nordic Symposium on Building Physics (NSB) (Vol. 172). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017223007>
- (32) FVHF, FVHF (2015). Retrieved from:., (2015). <http://www.fvfh.de/facade/VHFSYSTEM/Merkmale.php>
- (33) W. Liu, T.-T. Chow, Experimental and numerical analysis of solar-absorbing metallic facade panel with embedded heat-pipe-array, *Applied Energy*. 265 (2020) 114736. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114736>
- (34) Anderson, T. N., Duke, M., & Carson, J. K. (2010). The effect of colour on the thermal performance of building integrated solar collectors. *Solar energy materials and solar cells*, 94(2), 350-354. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.10.012>
- (35) Meire, C., Liñares, P., & Hermo, V. (2024). 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.64>
- (36) Meire Montaña, C., Linhares, P. ., & Hermo Sánchez, V. . (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>