

**CODE 2.4.46****ESTRUCTURAS INDUSTRIALIZADAS SISMORESISTENTES INTEGRADAS EN  
MODELOS EDIFICATORIOS ENERGETICAMENTE EFICIENTES****Barrios Corpa, Jorge<sup>1</sup>; Vargas Yáñez, Antonio<sup>2</sup>; García Marín, Alberto<sup>3</sup>**

1: Área de Construcciones Arquitectónicas. E.T.S. de Arquitectura  
Universidad de Málaga  
e-mail: [jbarrios@uma.es](mailto:jbarrios@uma.es), web: <http://www.arquitecturauma.es>

2: Área de Construcciones Arquitectónicas. E.T.S. de Arquitectura  
Universidad de Málaga  
e-mail: [antoniovy@uma.es](mailto:antoniovy@uma.es), web: <http://www.arquitecturauma.es>

3: Área de Proyectos Arquitectónicos. E.T.S. de Arquitectura  
Universidad de Málaga  
e-mail: [albertogm@uma.es](mailto:albertogm@uma.es), web: <http://www.arquitecturauma.es>

**PALABRAS CLAVE:** Estructuras, sismorresistencia, industrialización, eficiencia energética

**RESUMEN**

Los terremotos representan uno de los peligros naturales con mayores daños catastróficos por las pérdidas económico-sociales que provocan, a pesar del elevado conocimiento que se tiene de los mecanismos de fallo estructural de las construcciones frente a la acción sísmica. Del análisis de los daños estructurales en las edificaciones tras la ocurrencia de un seísmo, en la mayoría de los casos estos se deben principalmente a un mal diseño sísmico del edificio. Otro reto social al que nos enfrentamos actualmente es el conseguir construcciones energéticamente eficientes que aprovechen los recursos naturales y minimicen con su diseño la demanda energética. En el presente artículo se recogen los trabajos de investigación para el proyecto de un sistema estructural industrializado sismorresistente de construcción en seco, integrado en un modelo edificatorio modular con versatilidad de usos y energéticamente eficiente por la implementación de estrategias pasivas y activas en el diseño arquitectónico.

**1. INTRODUCCIÓN**

A diario se registran en el mundo seísmos que si bien en numerosas ocasiones representan temblores de la tierra que las edificaciones resisten sin presentar daños constructivos significativos, en otros, los daños son catastróficos provocando el colapso de las estructuras con la consiguiente pérdida de vidas humanas y coste económico. En el caso español, el Instituto Geológico y Minero de España [1], estima unas pérdidas totales económicas entre 2.000 y 3.000 millones de euros para los terremotos previsibles en el periodo entre los años 2004 a 2033, en base a la sismicidad registrada durante siglo XX, cuando la actividad sísmica en España ha sido baja.

En el pasado terremoto de Lorca (2011) de magnitud 5.1 en la escala Richter, la tramitación de indemnizaciones por daños a bienes, ascendió a una cantidad superior a 80 millones de euros de los cuales, el mayor porcentaje correspondió a edificaciones residenciales, lo cual pone de manifiesto la elevada vulnerabilidad sísmica a la que todavía nos enfrentamos [2]. El conocimiento de los mecanismos de fallo estructural ante la sollicitación de acciones sísmicas es elevado, y el problema surge por la falta de integración de los criterios de diseño sísmico en la creación arquitectónica. El citado reto estructural tiene especial relevancia en el caso de la edificación industrializada, donde las estructuras prefabricadas tienen múltiples soluciones al mecanismo resistente frente a cargas

verticales, pero sin embargo, el análisis de sistemas de unión en seco resistentes frente a cargas horizontales de gran magnitud, todavía es campo de investigación.

Otro gran reto al que se enfrenta la sociedad es la necesidad de ahorro y eficiencia energética, donde el sector de la edificación representa aproximadamente el 40% del consumo de la energía final [3]. Según las directrices sobre eficiencia energética, se establece que en obra nueva a partir del 31 de diciembre de 2018 (caso de edificación pública), y a partir del 31 de diciembre de 2020 (todos los edificios), se debe conseguir lo que se define como edificios de consumo de energía casi nulo [4]. Para conseguir estos objetivos, es imprescindible la integración en el modelo arquitectónico de estrategias que mejoren el comportamiento energético del edificio, a través de soluciones pasivas y/o activas que reduzcan la demanda de energía.

El estudio de un modelo edificatorio industrializado que responda adecuadamente a los dos retos anteriormente expuestos, ha dado lugar al sistema estructural sismorresistente descrito en el presente trabajo, el cual confiere al diseño arquitectónico una gran versatilidad para adoptar múltiples usos implementando soluciones energéticamente eficientes para su vida en servicio.

## **2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA EDIFICATORIO**

Se concibe un sistema edificatorio flexible que se construye como adición de elementos prefabricados modulares repetitivos. La base de diseño se basa en una arquitectura modular, cuyas claves se encuentran en el estudio pormenorizado de la célula tipo y de sus posibilidades de apilación, lo cual permite un amplio rango de usos y formas distintos. El sistema modular finalmente diseñado, es el resultado del análisis de soluciones en las que arquitectura y estructura arrancan desde el principio en estrecha relación para conseguir integrar todos los objetivos buscados con éxito.

### **2.1 Análisis de la interacción Arquitectura y Estructura**

Para alcanzar el comportamiento sismorresistente se analizaron sistemas constructivos basados en prefabricación pesada a base de paneles de hormigón, los cuales de acuerdo a su organización estructural pueden dividirse en sistemas portantes transversales, longitudinales y mixtos [5].

En los *sistemas longitudinales* los paneles se disponen a lo largo de las fachadas y en sentido paralelo a las mismas, recibiendo las cargas de los forjados transversales que apoyan sobre las fachadas. El mayor inconveniente que presenta es que, al cumplir la fachada la función portante, limita mucho la libertad para disponer aperturas y otros elementos, por lo que es un sistema poco usado actualmente. Además de ello, la flexibilidad de los espacios interiores también está bastante limitada, ya las dimensiones de los mismos se ven condicionadas por las luces que se pueden conseguir desde una fachada a otra; de este modo, la mayor aplicación de este sistema se da en viviendas unifamiliares en edificación residencial. Por el contrario, presenta ventajas en el caso de edificación industrial de una única planta y cubierta ligera, permitiendo conseguir grandes espacios diáfanos de estructura interior, y además la propia tipología hace que en fases iniciales de la construcción ya se disponga del espacio útil para poder seguir la construcción del resto de elementos constructivos del interior de la obra.

Los *sistemas transversales* son aquellos en los que los paneles portantes son perpendiculares a los paños de fachada, con lo cual se encomienda a la fachada la función aislante (acústico y térmico) y la arquitectónica. Se elimina de estos paneles externos la misión portante, que se encomienda por completo a los muros transversales; muros que tienen como función la separación de ambientes y la transmisión de cargas, con lo cual se establece un reparto racional de funciones. Finalmente, en los *sistemas mixtos o cruzados* se disponen paneles longitudinales y transversales, aquilatando al máximo las características estructurales, y por lo tanto, es un sistema económico en el que los elementos están en su máximo rendimiento, pero a su vez dan pocas posibilidades de flexibilidad de proyecto, es decir, se conforman células en las que los cuatro elementos de la retícula son portantes, con lo cual da unas construcciones sumamente rígidas.

Conforme al análisis de las posibilidades estructurales de prefabricación pesada, se optó por no emplear paneles completos de hormigón armado para la compartimentación de las estancias, sino utilizar pantallas de hormigón de gran rigidez pero de menos ancho al objeto de permitir una mayor versatilidad de usos a partir de la célula tipo, sobre las que apoyan placas de forjado de losa aligerada también de hormigón armado.

## 2.2 Dimensiones elementales de la célula tipo

El Sistema parte de un módulo base que consiste en un prisma rectangular que se construye con pantallas verticales de hormigón prefabricado en las esquinas y una losa horizontal aligerada en retícula a través de casetones de porexpan, cuyas dimensiones logran los siguientes objetivos:

- La correspondencia dimensional con estancias de vivienda, permitiendo alojar distintas configuraciones de baño + pasillo + dormitorio, baño + dormitorio principal, salón, cocina, etc.
- Las dimensiones de una plaza de garaje.
- Dimensiones adecuadas para albergar un despacho de oficina (que podrá ser cerrada o abierta) y aulas (uniendo varios módulos).
- Posibilidad de albergar elementos verticales de comunicación (ascensor y escalera).
- Dimensiones que se adapten a las máximas permitidas para el transporte por carretera.
- Adaptación a las superficies marcadas por la normativa de Vivienda de Protección Oficial española.

Con todos estos condicionantes se diseña un módulo básico con unas dimensiones de 7,30 x 2,86 x 3,30 m. En la siguiente imagen se muestra los usos principales aplicados a vivienda:

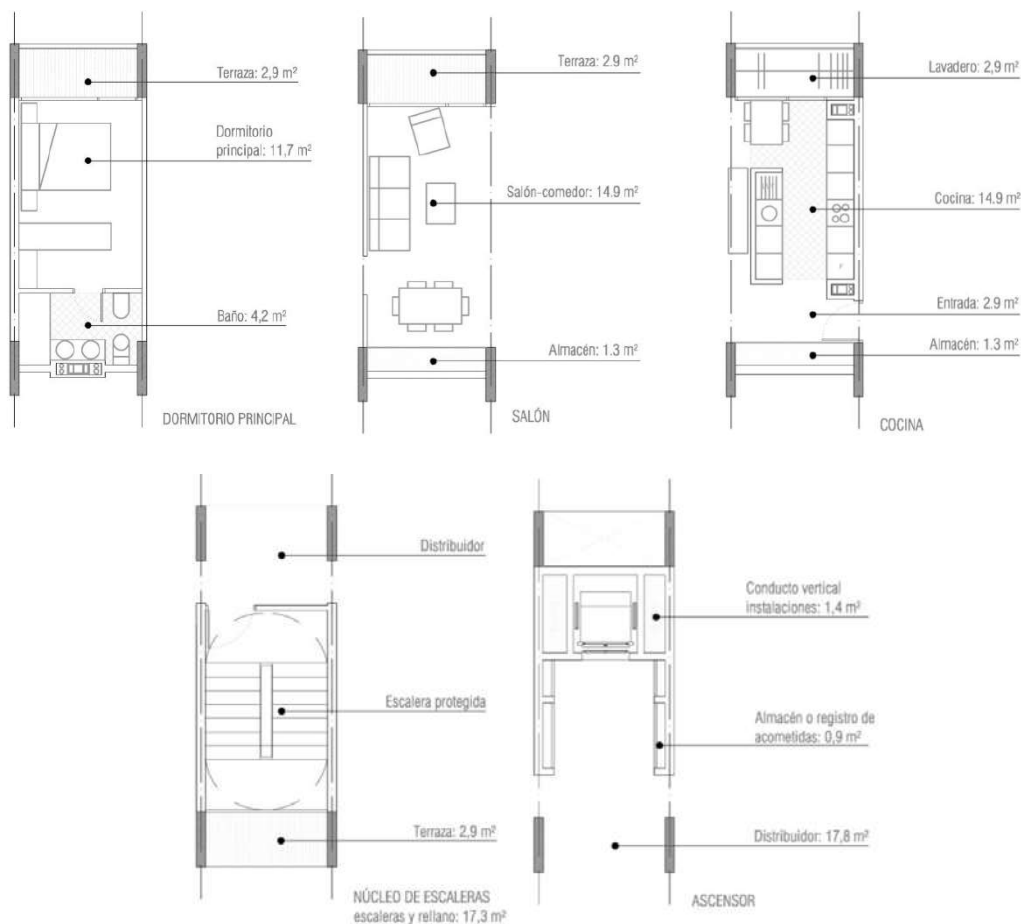


Figura 1: Distribución de usos de la célula tipo

Como se indicó anteriormente, el apilamiento de la célula tanto en sentido vertical como en horizontal permite abordar múltiples usos (p.ej. oficinas, escolar, vivienda,...) y dimensiones y geometrías de edificio (Figura 2).

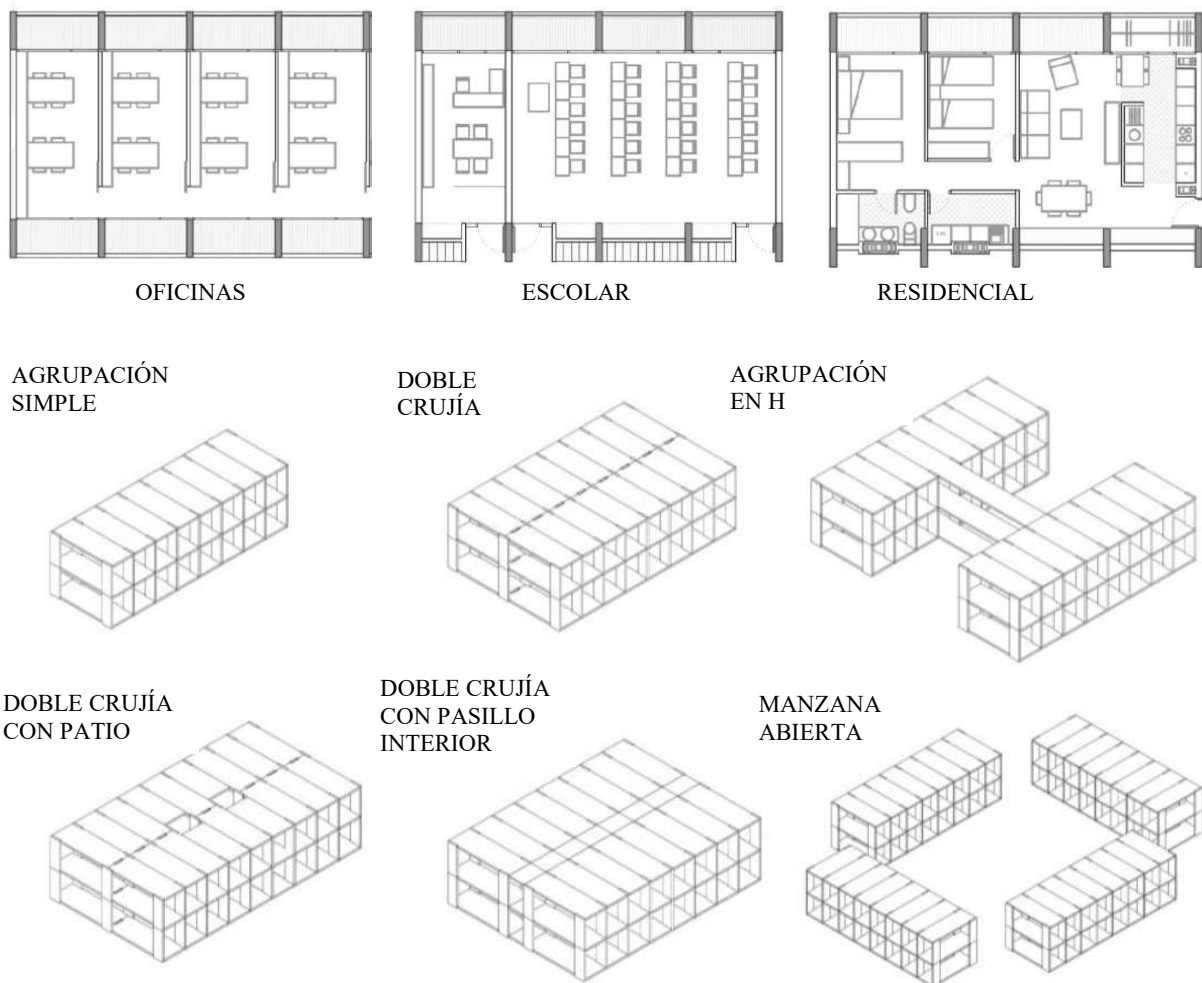


Figura 2: Posibilidades de usos y apilamiento de la célula tipo

### 2.3 Descripción del sistema estructural

La estructura de la célula tipo está compuesta por cuatro pantallas de hormigón de 1,20 m de ancho y 0,20 m de espesor situadas en las esquinas del prisma rectangular, sobre las que apoyan los forjados de losa de hormigón aligerada, los cuales se enrasan interiormente con las pantallas. El canto total de los forjados previsto para las cargas habituales en vivienda conforme a la normativa española, se establece en 20 cm. Para la formalización de los apoyos, en las pantallas de hormigón se dejan embebidos unos tubos rectangulares huecos metálicos de sección normalizada, en cuyo interior se disponen otros tubos de sección ligeramente inferior y que sirven para el apoyo de las placas prefabricadas de forjado. En las losas de hormigón armado de los forjados se dejan embutidas en los extremos unas placas metálicas de acero con sus correspondientes barras de anclaje.

Las uniones entre los elementos se ejecutan en seco mediante soldadura, evitando así la necesidad de tiempos de espera en el proceso constructivo para el fraguado del hormigón, ya sea por el hormigonado in situ de los nudos de unión o de la capa de compresión.

Las dimensiones de las pantallas y los forjados se diseñan asimismo, teniendo en cuenta el condicionante del transporte tanto desde el punto de vista geométrico (para evitar que se trate de un transporte especial), así como del peso total. El tipo de hormigón empleado en las pantallas y en los forjados es HA-30/B/15 y HA-30/B/20 respectivamente, mientras que el acero es el mismo en todos los elementos B 500SD. El tipo de ambiente dependerá de las condiciones finales de exposición en las que se encuentre el elemento, y así la dosificación del hormigón y el recubrimiento de las armaduras.

El armado de las pantallas dispone sendas mallas de armadura en ambas caras del elemento, formadas por barras longitudinales aproximadamente uniformemente distribuidas en el ancho de la pantalla y armaduras transversales formando estribos cerrados que abrazan a la armadura vertical. Hay una distribución uniforme de estribos en altura compuesta por estribos cerrados distanciados 20 cm y otra familia de estribos intermedia a la anterior, formada por estribos cerrados que abrazan la armadura vertical de los extremos de la pantalla también con una separación de 20 cm. De esta manera, se genera una separación vertical entre estribos de 10 cm. Adicionalmente, en las zonas de las uniones verticales entre tramos sucesivos de pantallas y en las zonas donde se colocan los dispositivos de apoyo de los forjados en las pantallas, se duplican los estribos dejando una separación de 5 cm entre ellos. El diámetro de las armaduras verticales se obtiene de acuerdo a los esfuerzos p<sub>s</sub>ísimos obtenidos en la modelización del edificio objeto de estudio. Para el esquema de trabajo de las pantallas funcionando como grandes ménsulas empotradas en la cimentación, el sistema propuesto permite optimizar la cuantía de armadura de las pantallas, pudiendo disminuir el diámetro de las armaduras en los distintos tramos de las pantallas según sea necesario por el cálculo.

La placa de forjado tiene unas dimensiones máximas de 7,30 m de largo y 2,86 m de ancho, aligerada mediante casetones perdidos de porexpan cuadrados de 50 x 50 cm de lado y 10 cm de espesor, formando una retícula de nervios de 16 cm de ancho, e intereje de 66 cm. El canto total del forjado es de 20 cm con 10 cm de capa de compresión. Perimetralmente se eliminan los aligeramientos dejando la placa de forjado maciza para garantizar los esfuerzos en las uniones del forjado en las pantallas, y entre los forjados contiguos.

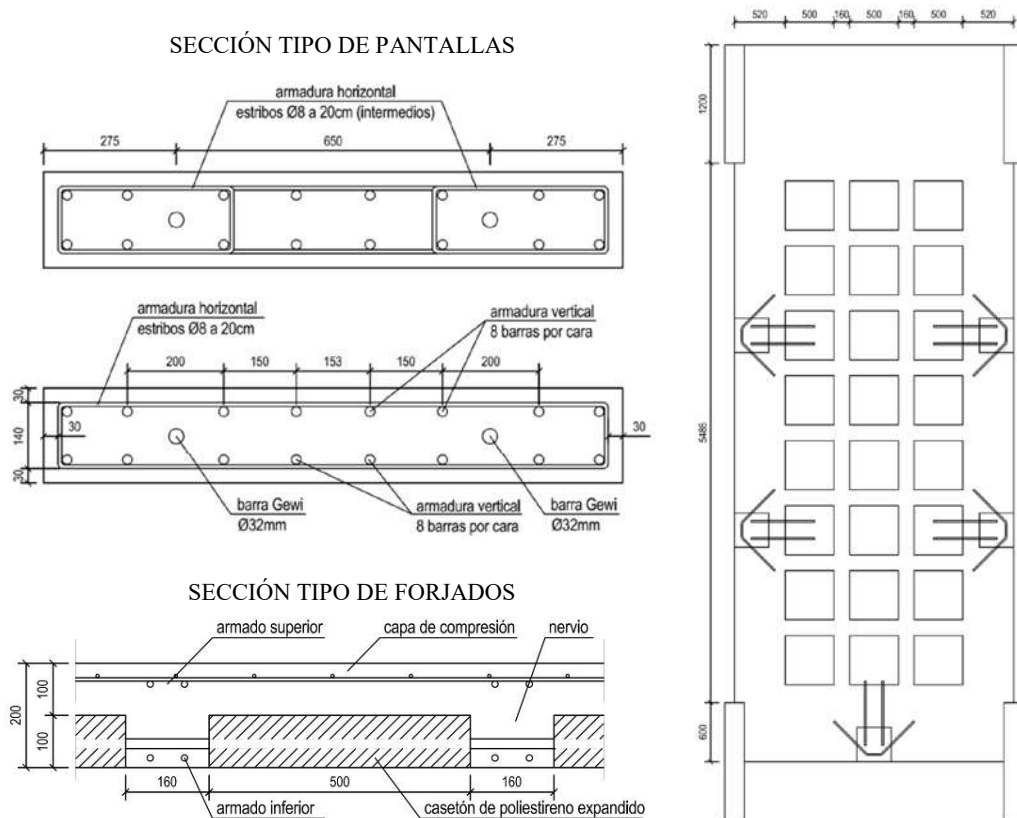


Figura 3: Esquema general de pantallas y forjados

### 3. CRITERIOS DE DISEÑO SISMICO APLICADOS AL SISTEMA ESTRUCTURAL INDUSTRIALIZADO

Los mecanismos de fallo estructural por los terremotos es un campo altamente conocido, y en la mayoría de los casos donde las consecuencias han sido más catastróficas, esto se ha debido a que la edificación tenía una mal diseño sísmico. En este sentido, el sistema estructural sismorresistente desarrollado, cumple con los principios básicos frente a la respuesta sísmica e incorpora los criterios de diseño definidos en la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 [6].

#### 3.1 Aspectos generales del diseño sísmico

A continuación se enumeran algunas de las principales reglas de diseño sísmico que cumple el modelo de edificación desarrollado:

- Simetría en planta y alzado
- Rigidez estructural equivalente entre plantas consecutivas
- Uniformidad de cargas en las distintas plantas

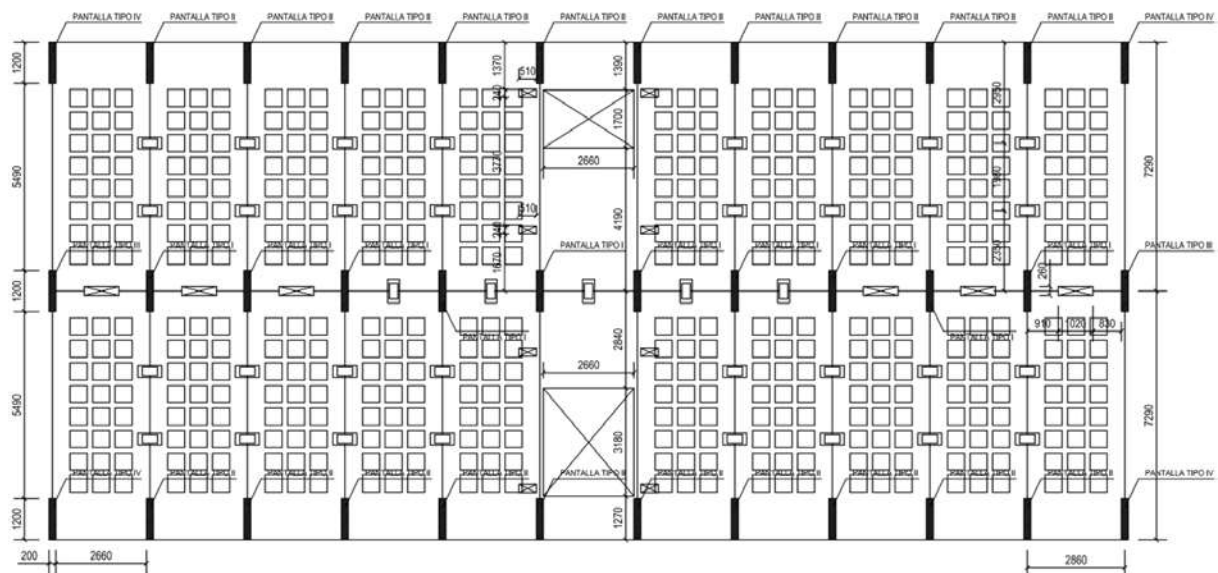


Figura 4: Planta general de estructura

#### 3.2 Diseño de la unión entre forjados. Efecto diafragma

El comportamiento estructural global de la edificación depende de las uniones diseñadas y de ahí su gran importancia. La función principal es la transmisión de esfuerzos a través de la unión, consiguiendo la interacción entre los elementos conectados asegurando el comportamiento de subsistemas resistentes como la movilización del efecto diafragma del forjado, o la transferencia de esfuerzos en los muros de cortante para la estabilización frente a las fuerzas horizontales.

Se define la colocación de dos puntos de conexión en los lados longitudinales de las placas, y también una conexión transversal entre placas situada en la unión en contacto, correspondiente a la alineación de las pantallas centrales. Estas uniones tienen dos misiones principales; por un lado conferir el *efecto diafragma* al forjado para llevar las cargas debidas a las fuerzas horizontales hasta las pantallas, y por el otro, evitar el *tecleo vertical entre placas* consecutivas. La conexión entre los forjados se realiza a base de chapas metálicas previamente ejecutadas junto con el hormigonado de las placas de forjados, que posteriormente se unen en obra por medio de chapas metálicas soldadas en continuidad.

### 3.3 Diseño de la unión entre pantallas. Efecto ménsula

La unión entre tramos de pantallas en sentido vertical se realiza mediante una junta machihembrada para mejorar la resistencia a esfuerzo cortante y la colocación de placas metálicas soldadas en obra en las caras frontales y laterales de la pantalla. Estas chapas se sueldan sobre otras que se encuentran previamente colocadas en la pantalla de manera rehundida para conseguir superficies de terminación planas en las pantallas. Se prevé la ejecución de tramos de pantallas que contienen más de un nivel de forjado, situando la ubicación de la junta aproximadamente en la zona central en altura entre dos forjados con lo que se consigue reducir notablemente los esfuerzos de flexión en la unión y además proporcionar un punto de trabajo más cómodo para los operarios mejorando el rendimiento.

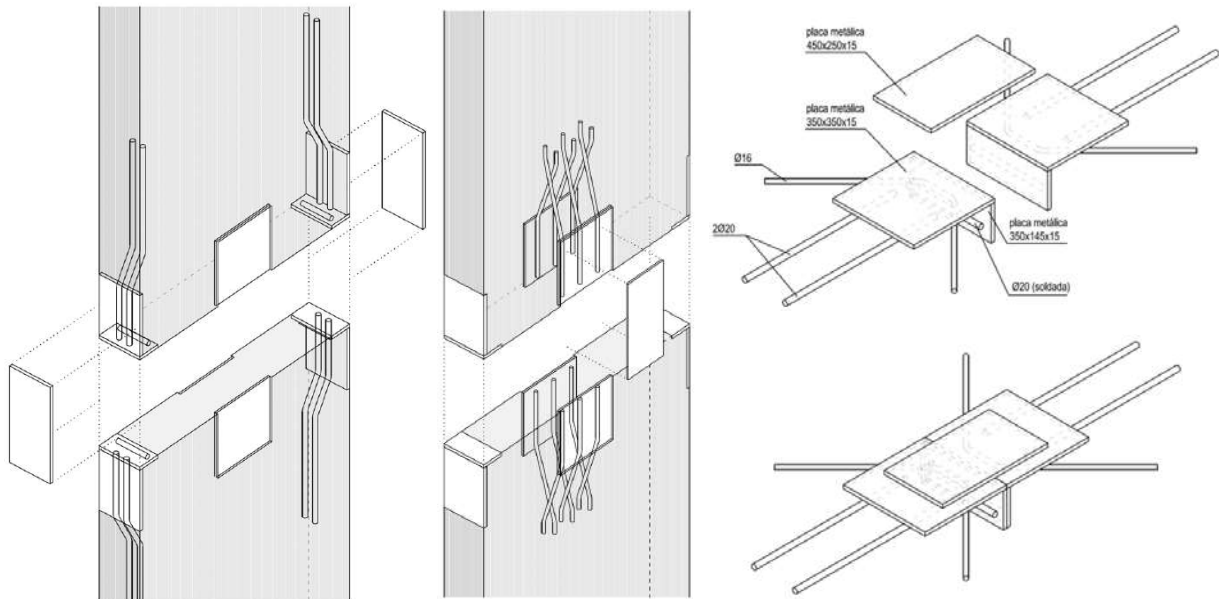


Figura 5: Esquemas de unión pantalla-pantalla y forjado-forjado

## 4. INTEGRACIÓN DE MEDIDAS ENERGETICAMENTE EFICIENTES EN EL MODELO EDIFICATORIO

Desde el diseño arquitectónico del modelo edificatorio se han tenido en cuenta aspectos medioambientales y de eficiencia energética, por lo que, en algunos casos, cumplirá directamente con los requerimientos de sostenibilidad y en otros casos, dejará prevista la posibilidad de incorporar elementos que den respuesta a dichas necesidades. A continuación se desglosan algunas de estas medidas, tanto activas como pasivas:

- Ventilación de las viviendas por medio de chimenea solar.
- Mejora del comportamiento térmico de la cubierta mediante el uso de una pérgola y una cubierta ajardinada.
- Enfriamiento del aire por movimientos convectivos en la cámara de la fachada transventilada.
- Sistemas de reciclaje de aguas pluviales, grises y negras.

Entre las distintas estrategias diseñadas se propone la descripción de la fachada. Exteriormente se coloca una estructura formando pequeñas terrazas aportando beneficios bioclimáticos. Teniendo en cuenta los diferentes climas en los que puede construirse este modelo se ha llegado a un sistema adaptable, que puede funcionar en climas tanto cálidos como fríos

*Fachada invernadero para climas fríos:* En invierno gracias al sistema de protección de lamas orientables, permite pasar la radiación del exterior, haciendo que el aire del interior de la terraza eleve su temperatura. Este colchón térmico transmite el calor al interior, a través de la ventana de paso al

interior de la vivienda. A su vez, la baja conductividad del terreno de la cubierta ajardinada permite almacenar el calor generado en el interior de la vivienda.

*Sistema de sombreado para climas cálidos:* En la cara exterior del espacio destinado a terraza puede instalarse elementos de sombreado que, en climas cálidos, consigan mantener el interior de la vivienda a una temperatura inferior a la exterior. Se diseña una envolvente modular de paneles de las lamas orientables de madera o de captadores fotovoltaicos que permiten regular la radiación solar. Asimismo, también el sistema envolvente prevé la posibilidad de añadir paneles vegetales de hoja caduca.

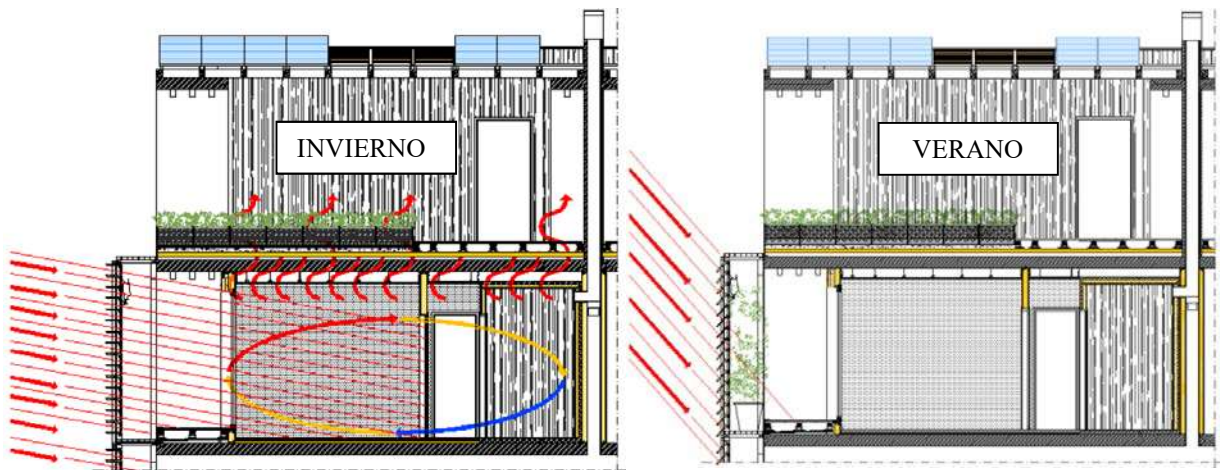


Figura 6: Esquemas de funcionamiento invierno-verano de fachada industrializada de lamas

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos realizados han sido desarrollados en el Marco del Proyecto “Investigación sobre Edificación Sismorresistente Energeticamente Eficiente e Inteligente en su Ciclo de Vida” financiado a través del Programa FEDER-INNTERCONECTA. Consorcio de empresas: Construcciones Sando S.A., Construcciones Vera, S.A., IELCO, S.L., Mesurex Aeronautics División, S.L.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ferrer, M. et al. Análisis del Impacto de los Riesgos Geológicos en España. Evaluación de pérdidas por terremotos e inundaciones en el periodo 1987-2001 y estimación para el periodo 2004-2033. Instituto Geológico y Minero de España. 2004.
- [2] Novena nota informativa sobre la actuación con motivo del terremoto de Lorca. Consorcio de Compensación de Seguros de España. 2004.
- [3] Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de los edificios. 2002.
- [4] Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de los edificios. 2010.
- [5] Construcción Modular en Hormigón. <http://www.hilc.es>
- [6] Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 2002.