

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA, UPC  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA, ETSAB  
MÁSTER UNIVERSITARIO EN ESTUDIOS AVANZADOS EN ARQUITECTURA-BARCELONA, MBArch  
Línea, INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA ARQUITECTURA, ITA



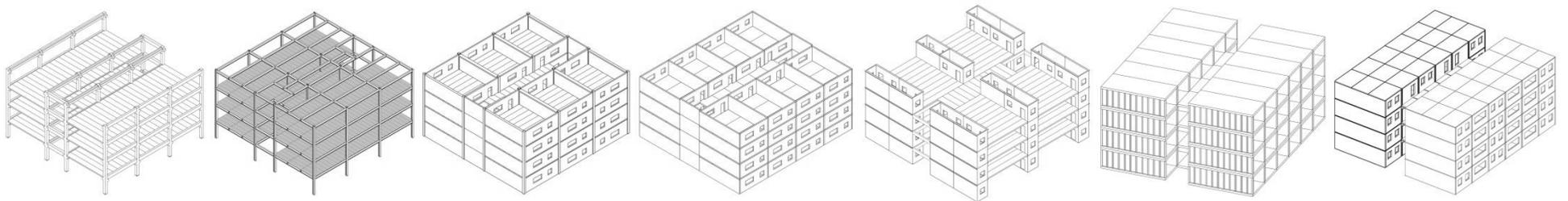
Trabajo de Fin de Máster

## ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

Tutor: **José María González**, Dr. Arquitecto

Co-Tutor: **Oriol París**, Dr. Arquitecto

Alumna MBArch: **Lizeth Rodríguez**, Arquitecta



Barcelona, julio 2019

Un especial agradecimiento a mis tutores José María González, Oriol París, al aporte y asesoría de Albert Albareda, Jorge Blasco y al Director de la línea Innovación Tecnológica en la Arquitectura, Adrián Muros.

A Dios

A mí querido AC

A mis maestros

A mi familia

A mis amigos

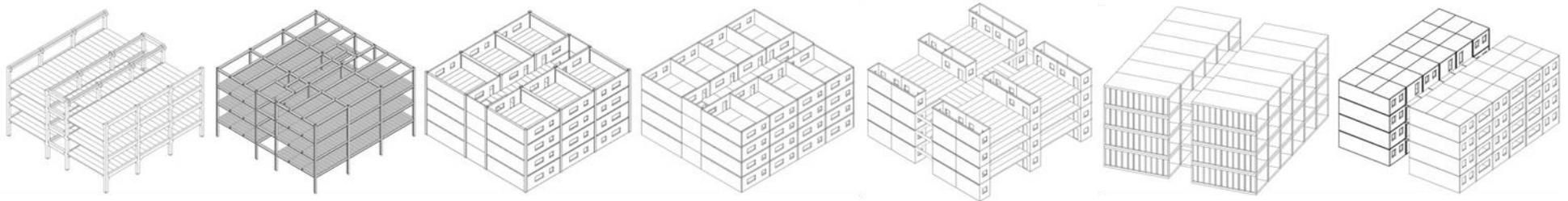
Gracias

## Contenido

.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	5
1.1. Objetivo General.....	6
1.2. Objetivos específicos .....	6
1.3. Alcances y límites .....	7
1.4. Metodología.....	7
2. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS INDUSTRIALIZADOS .....	11
2.1. Antecedentes sobre industrialización.....	11
2.2. La construcción industrializada .....	12
2.3. Fundamentos de la prefabricación industrializa .....	16
2.4. Sistema estructural resistente .....	20
2.5. Sistemas de construcción industrializados .....	21
2.6. Parámetros para selección de sistemas y casos de estudio .....	27
3. CASOS DE ESTUDIO .....	29
3.1. Caso de estudio 1 .....	31
3.2. Caso de estudio 2 .....	33
3.3. Caso de estudio 3 .....	35
3.4. Caso de estudio 4 .....	37
3.5. Criterios de desarrollo para edificio “X” .....	38
4. DESARROLLO ESTRUCTURAL DE EDIFICIO “X” .....	40
4.1. Bases y consideraciones de Predimensionado.....	41
4.2. Predimensionado sistema de pórticos de hormigón prefabricado edificio 1-P-H.....	44
4.3. Predimensionado sistema de pórticos de acero laminado edificio 2-P-A .....	49
4.4. Predimensionado sistema de muros de hormigón prefabricado edificio 3-M-H.....	54
4.5. Predimensionado sistema de muros de madera CLT edificio 4-M-M.....	58
4.6. Predimensionado sistema mixto de hormigón prefabricado (módulo semirrígido y forjado) edificio 5-MIX-H.....	62
4.7. Predimensionado sistema de módulos 3D de hormigón prefabricado edificio 6-3D-H .....	66
4.8. Predimensionado sistema de módulos 3D de madera CLT edificio 7-3D-M.....	70
5. ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL .....	75
5.1. Marco regulador y normativo .....	76
5.2. Cálculo de impactos ambientales por fabricación.....	80
5.3. Cálculo de impactos ambientales por transporte y comparación con impactos por fabricación.....	95
5.4. Análisis de recuperación de impactos .....	98
5.5. Discusión de resultados .....	113
6. CONCLUSIONES.....	120
7. IDENTIFICACIÓN DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	123
BIBLIOGRAFÍA.....	124

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL  
A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

# CAPÍTULO I



## 1. INTRODUCCIÓN

Revertir y evitar los impactos ambientales en el sector de la construcción es uno de los retos planteados en las agendas de gobernanza y esto se refleja en leyes, reglamentos, códigos, normas y manuales. El evento detonante de este fenómeno global ha sido el Protocolo de Kyoto<sup>1</sup> en el que las naciones se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, a través de estrategias enfocadas a combatir las causas de emisiones, dos de las causas del cambio climático están vinculadas a las edificaciones, una es la generación de residuos y la otra es el uso de recursos no renovables y quema de combustibles fósiles, sin mencionar otros problemas que derivan de esas causas, que afectan la productividad y la salud de los usuarios.

El paso más importante que las naciones han dado es generar instrucciones y mandatos de obligatorio cumplimiento en la evaluación y desarrollo de proyectos de edificación en todas sus etapas; diseño, planificación, construcción, rehabilitación y desmontaje. En este sentido es un deber contabilizar las potenciales emisiones en cada etapa y evaluar escenarios de potencial impacto que el proyecto pueda generar. Para este fin, se han creado herramientas y bases de datos que

---

<sup>1</sup> Es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global.

ayudan a los profesionales vinculados al sector de la edificación a generar mejores alternativas de desarrollo y a ser conscientes del impacto que generan sus decisiones de proyecto, así mismo, la industria está obligada a incorporar información sobre las emisiones de sus procesos productivos en la certificación de sus productos.

Por otra parte, en lo que respecta a la edificación, desde una visión simplificada y holística puede decirse que se compone de los siguientes sistemas: Estructura, envolvente, instalaciones, circulaciones, distribución de espacios y cada sistema requiere alternativas tecnológicas que contribuyan a disminuir las emisiones y que a la vez representen una alternativa viable para los propietarios. En este sentido, no puede haber un catálogo de soluciones únicas aplicables a todo tipo de proyecto, sino que es más importante que se establezcan parámetros para la efectiva evaluación de escenarios y que se constituya en la base fundamental de la génesis del proyecto. Es decir, el equipo de diseño debe tener la certeza que el proyecto es la solución mejor evaluada con una visión de uso futuro después de cumplir el objetivo para el que ha sido diseñado.

Para ampliar un poco más esta óptica de evaluación de escenarios se presenta a continuación el presente Trabajo de Fin de Máster desarrollado en tres fases; 1. Investigación, 2. Desarrollo y 3. Análisis. El resultado de este proceso se resume en cinco capítulos que contemplan el siguiente contenido:

En el capítulo I se presenta la metodología de trabajo, objetivos, límites y alcances.

En el capítulo II se resume brevemente el antecedente cronológico de la construcción industrializada ya que se prevé este tipo de construcción como aquella que no genera residuos e incrementa la calidad y eficiencia en la edificación. Se busca estudiar las características técnicas de los sistemas constructivos industrializados contemplando dimensiones y forma, proceso de ensamblaje, limitaciones constructivas y de diseño, de los elementos que componen cada sistema resistente. El capítulo finaliza con un resumen de los parámetros de desarrollo estructural y criterios de selección casos de estudio.

En el capítulo III se presentan 4 casos de estudio, destacando el sistema resistente y de estabilidad estructural, así como la relación entre técnicas de construcción industrializada y arquitectura como estrategia de sostenibilidad.

En el capítulo IV se desarrolla una propuesta de edificio con regularidad en planta y elevación como una visión de edificio tipológico al que se denomina edificio “X” tomando atributos de los casos de estudio analizados.

Así mismo, se desarrolla la modulación y cálculo de predimensionado para tres tipologías estructurales tomando en cuenta 3 sistemas constructivos en hormigón, acero y madera que da como

resultado 7 versiones de edificio “X”, sin llegar a detallar los elementos de conexión, pero sí destacando el sistema resistente a carga gravitatoria y de esta forma confirmar el peso de los elementos que es la base para el análisis.

En el capítulo V se desarrolla el cálculo de impacto ambiental equivalente a la energía al peso en CO<sub>2</sub> incorporados, por fabricación y transporte de los siete edificios predimensionados, así mismo, se analizan los resultados de forma comparativa y se establecen parámetros conceptuales y medibles para visualizar el potencial de recuperación de impactos, se discuten los resultados previamente a la generación de conclusiones que son presentadas como punto final.

### **1.1. Objetivo General**

Verificar la diferencia entre los impactos ambientales de siete escenarios estructurales desarrollados con sistemas de construcción industrializada, para una misma edificación, a través del cálculo y análisis comparativo.

### **1.2. Objetivos específicos**

- 1) Identificar las diferencias entre potencial de recuperación de impactos según las prestaciones de cada sistema constructivo industrializado.

- 2) Desarrollar herramientas de análisis comparativo entre sistemas constructivos para verificar la relación entre impactos ambientales y las consecuencias de la selección de un determinado sistema constructivo y estructural.
- 3) Verificar las adaptaciones que sufre un proyecto arquitectónico según el sistema constructivo y estructural seleccionado.
- 4) Reseñar cronológicamente el ámbito de la construcción industrializada.
- 5) Sentar las bases para una futura investigación.

### **1.3. Alcances y límites**

Se definen como alcances, todo el contenido que abarca el presente estudio y como límites las temáticas a las que no se ha dado cobertura.

En este sentido, dentro de los alcances puede mencionarse: Una reseña cronológica del ámbito de la construcción industrializada que la identifica como un hito histórico y tecnológico, también el desarrollo de siete escenarios estructurales para una misma edificación hipotética, tomando únicamente la carga gravitatoria como demanda estructural y considerando la sobrecarga de uso para vivienda, con la contribución de los coeficientes de seguridad prevista en códigos. Finalmente, también se analizan los impactos y el potencial de recuperación de los mismos, tomando dos premisas, una es la base de datos de índices ICE y la

segunda, retomando 3 conceptos referidos a las características del proyecto como base de la recuperación de impactos, reversibilidad, durabilidad, funcionabilidad.

Por otra parte, dentro de los límites del estudio, se mencionan los siguientes: No se ha contemplado ningún tipo de empuje lateral ni cargas accidentales para el predimensionado. No se ha realizado simulación estructural. No se ha realizado análisis económico ni temporal, a pesar que se tiene conciencia de la importancia de los temas, se estima que serán retomadas en cuenta en la futura línea de investigación en proceso de doctorado.

### **1.4. Metodología**

Se aborda una compleja y multivariable temática desde tres puntos de vista:

- a) Construcción y prefabricación industrializada
- b) Desarrollo estructural
- c) Parámetros de sostenibilidad

Para construir el hilo conductor entre las tres temáticas se formula la pregunta investigativa: ¿Cuál es el elemento vinculante entre las temáticas construcción, estructura y sostenibilidad?

Para intentar responder a esta pregunta se ha desarrollado un esquema metodológico que muestra las fases de trabajo, y su puesta en marcha cronológica (Fig. 1 y 2).

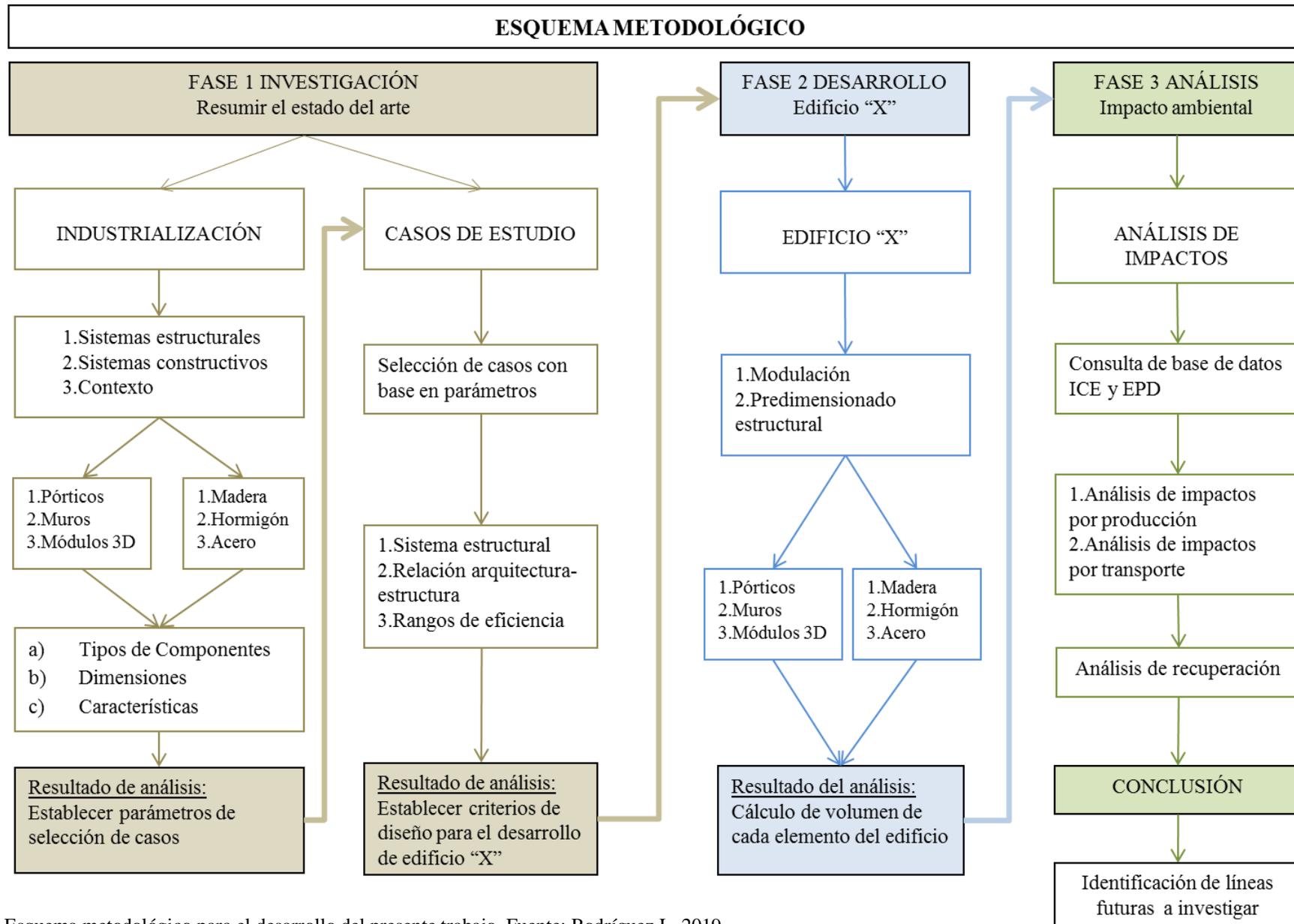


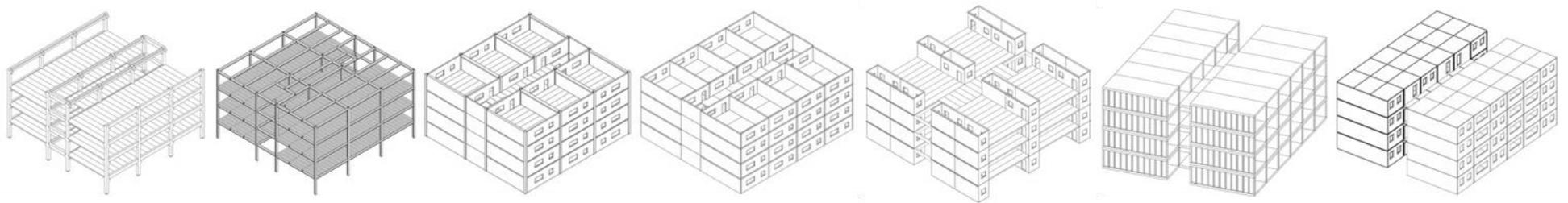
Fig. 1 Esquema metodológico para el desarrollo del presente trabajo. Fuente: Rodríguez L. 2019

Fase	Semanas	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15
FASE 1	Capítulo I: Planteamiento del problema, lineamientos para la consulta bibliográfica y técnica.	■	■													
	Capítulo II: Investigación de literatura para establecer un resumen del estado del arte.			■	■	■	■									
	Capítulo III : Casos de estudio bibliográficos como visitas de campo y entrevistas, consulta a la industria.				■	■	■									
FASE 2	Capítulo IV: Modulación y cálculo de predimensionado				■	■	■	■	■							
FASE 3	Capítulo V: Cálculo de impactos ambientales y análisis comparativo								■	■	■	■				
	Conclusiones y discusión de resultados											■	■	■		
	Presentación														■	■

Fig. 2 Esquema cronológico para el desarrollo del presente trabajo

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL  
A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

## CAPÍTULO II



## 2. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS INDUSTRIALIZADOS

### 2.1. Antecedentes sobre industrialización

La industrialización es un hito histórico originado hasta hace pocos siglos, que cambió las formas de producción y trajo consigo invenciones e innovaciones que revolucionaron la forma de vida en el mundo. Según la Real Academia de la Lengua Española RAE<sup>2</sup>, industrialización es la acción o efecto de industrializar que significa “hacer que algo sea objeto de industria”. Así mismo, la RAE, define a la industria como el conjunto de operaciones materiales ejecutadas para la obtención, transformación o transporte de uno o varios productos.

Para la transformación y transporte de estos “productos” son requeridos recursos de toda índole, por ejemplo; económicos, energéticos, talento humano, maquinaria, entre varios. Por lo tanto, la industrialización está íntimamente ligada al contexto económico-tecnológico-ambiental y es susceptible a evolucionar según el desarrollo de este contexto (Chemillier, 1980).

A lo largo de la historia, las tecnologías constructivas de la edificación han sido el resultado de la transformación de materiales en bruto por mano de obra calificada, la ayuda de la no calificada y maquinaria que funcionaba con el principio de trabajo mecánico hasta la invención de maquinaria propulsada por motores (Fernández, 1974).

---

<sup>2</sup> <http://www.rae.es/>

En contraste con este hecho, es ineludible mencionar la incidencia de la Revolución Industrial<sup>3</sup> (1760-1830) en la evolución de los procesos de producción. Sin embargo, en el caso de las tecnologías constructivas para la edificación, no fue, sino hasta la denominada Segunda Revolución Industrial (1840-1914) que surgieron las primeras edificaciones industrializadas en Europa occidental y en el norte de América, por ejemplo el primer edificio de diez plantas considerado como el primer rascacielos fue el “Home Insurance Building”, diseñado por el estadounidense William Le Baron Jenney, construido en 1885 en Chicago. Este hecho histórico dio como resultado nuevas tecnologías constructivas y un cambio de paradigma en la forma de concebir y diseñar las edificaciones, a través de la evolución de los materiales y sistemas constructivos, no obstante, la evolución no ha sido equivalente con la de otros procesos de producción, pues los procesos de producción de la edificación no evolucionaron tan rápido como los procesos de producción de los bienes de consumo y medios de transporte. Uno de los factores de esta lenta evolución se debe en parte a la diferencia entre el volumen de producción demandado que está relacionado a la obsolescencia de los bienes, por ejemplo; la diferencia del periodo de vida útil entre un vehículo y un edificio puede ser del orden de diez a uno, el primero puede durar entre 10-15 años y

---

<sup>3</sup> Proceso de transformación económica, social y tecnológica gestada en Europa Occidental entre 1760-1830 Lucas, Robert E. (2003). The Industrial Revolution Past and Future.

el segundo entre 50-100 años o más. Así mismo, la diferencia entre el carácter estático de la edificación comparada con el carácter dinámico de los medios de transporte, contribuye al incremento de la demanda de los bienes de consumo con respecto a los bienes inmuebles, como consecuencia los bienes de consumo manufacturados de forma industrializada, han convertido al mercado local a un mercado global y en contraste, el sector industrial de la edificación depende mucho no solo de la demanda local, sino que también de la demanda regional.

Según Chemillier (1980), los factores que determinan la industrialización son; el estado, el desarrollo tecnológico y el volumen de producción. Pero cabe destacar que los eventos bélicos del siglo XX fueron el promotor del mayor desarrollo tecnológico-científico y que ya en tiempos de paz, la industria hizo suyos, con el fin de mejorar y crear productos. Fueron entonces, estos procesos de producción, los que han llevado a que el capital crezca, redundado en el desarrollo de máquinas que han llevado a que la artesanía evolucione como un producto industrial (Promyslov, 2004).

## **2.2. La construcción industrializada**

En el ámbito de la edificación la maquinaria está vinculada con el tamaño de la obra por eso, no es del todo claro imaginar el proceso de producción industrializado de una edificación, al compararlo con el de un vehículo, retomando la anterior comparación entre edificio y

vehículo. Aunque un vehículo es una máquina de menor tamaño que un edificio, éste contempla subsistemas muy especializados y el diseño de cada subsistema es realizado con meticulosidad, como analogía al vehículo, en el caso del edificio, sería preciso descomponerlo en partes y diseñar cada una de sus partes para poder fabricarlas en línea de producción y no construir el edificio de forma masiva, monolítica e in situ. Para ilustrar conceptualmente de mejor manera lo que se parafrasea, en este contexto, González (2018) afirma:

“Denominamos construcción industrializada la que está formada por elementos constructivos producidos mediante la aplicación de métodos sistemáticos de diseño, planeamiento de la ejecución y control de la obra propios de la industria. En consecuencia, se sustituyen los procesos tradicionales de puesta en obra manual por otros mecanizados y automatizados.”

Para que los procesos mecanizados y automatizados sean efectivos y eficientes, es necesario echar mano de la prefabricación. Smith (2010) afirma que prefabricar significa: “Fabricar partes de un edificio en una fábrica de forma estandarizada y automatizada, de tal forma que el proceso de construcción significa ensamblar las partes en el sitio de la obra”. Este concepto vincula tanto prefabricación como la industrialización, es decir, no basta con fabricar fuera de la obra, sino que es importante que los procesos tengan un estricto control de la calidad que solo la automatización puede proveer.

Bajo una lógica de favorecer la estandarización y desarrollar la automatización, se denomina “Taylor” a la organización científica del trabajo (Chemillier, 1980) y se constituyó en una filosofía de trabajo en la industria.

La industria de la construcción ha visto un nicho de mercado en la industrialización ya que son muchas las variables que intervienen en la edificación, tales como; diseño, presupuesto, tiempo y es necesario que se produzca en las mejores condiciones que permitan la mayor calidad, a pesar de la incidencia del clima. Smith (2011) propone una ecuación para medir la eficacia y eficiencia de un proyecto de construcción:  $Calidad \times Tiempo = Alcance \times Costo$  (Quality x Time = Scope x Cost) siendo la industrialización el factor común que asegura una relación directamente proporcional entre las variables de la ecuación, ya que garantiza que la operación se optimice.

Como resultado de la industrialización del sector construcción, la reducción de tiempo y control de la calidad han sido los factores que han llevado a los promotores a optar por desarrollar edificación industrializada de forma particular según las regiones.

La construcción industrializada fue un hecho mundial. Entre los países que se consideran los promotores de este hecho y que contemplan casos de éxito en la producción del hábitat con tecnologías industrializadas pueden mencionarse: Estados Unidos, Japón, Finlandia, Dinamarca, Suecia, Gran Bretaña, Alemania, Francia, España, antigua

Unión Soviética, algunos países de Europa del este y posteriormente, de estos países fueron exportadas tecnologías e ideas a América Latina, destacando países como Brasil y Chile.

Cada nación tuvo sus propios periodos y formatos de construcción, pero entre ellos el factor común detonante de la construcción industrializada, fueron los planes de reconstrucción posterior a la segunda guerra mundial, donde la mayoría de ciudades en Europa tanto occidental como del este, debían dotar de vivienda a la población, como una estrategia de reconstrucción y cohesión social.

En este sentido, en el caso francés pueden destacarse dos periodos:

- 1945 fue el año de la exigencia de vivienda a partir del Plan de Industrialización de la vivienda, conllevó 610 operaciones, una planificación estratégica y la tipificación de elementos constructivos.
- 1967 inició con la exigencia de reducción de precios por parte de las instituciones gubernamentales subsidiarias, esta reducción se logró a través de la creación de modelos de vivienda y dio paso a la denominada industrialización abierta más estandarizada y menos especializada en 1976.

En ambos casos el gobierno exigió mejorar la calidad de la construcción e incitó a una profunda reflexión sobre las exigencias de bienestar durabilidad y flexibilidad. Con estas exigencias, la industria

fue conducida a establecer parámetros de calidad y promovió la investigación que llevaría a la innovación (Chemillier, 1980).

En Estados Unidos, las viviendas prefabricadas tipo Ballon frame de madera fue el sistema más utilizado para la vivienda unifamiliar (Fig. 3). Algunas empresas crearon catálogos con diseños a escoger por ejemplo el Aladdin “Built in a day” House catalog, 1917, imitando la forma de producir en serie por medio de una línea de ensamblaje de Henry Ford para reducir el margen de error y los desperdicios, de esta forma acortar el tiempo de ejecución de los proyectos. Pero debido a la crítica social por lo impersonal de las edificaciones es que declinó la producción y su aceptación en el mercado, así mismo, debido al modernismo y sus estilos que tuvieron auge en California (Smith, 2010).

Según Smith (2010) Una de las lecciones aprendidas de los proyectos producidos en las últimas tres décadas del siglo XX, es que el mantenimiento de los edificios durante su ciclo de vida tendría costos elevados para los propietarios, entre más compleja fuese la unidad prefabricada, considerando que muchos proyectos no fueron prefabricaciones abiertas sino muy específicas, posteriormente hubo un giro a la prefabricación abierta más estandarizada con unidades de menor tamaño para abrir un abanico de posibilidades a los diseñadores, constructores y que el mantenimiento no significase un costo excesivo.



Fig. 3 Montaje de casa en Estados Unidos con sistema tipo Ballon frame. Recuperado de Industrialización de la construcción. Chemillier P. (1980).

La Prefabricación industrializada continuó avanzando otorgando grandes prestaciones a los planes de expansión de las ciudades desde que encontró su máximo nicho después de la segunda guerra mundial a partir del plan de reconstrucción en la posguerra. Pero durante los últimos cincuenta años del siglo XX los resultados de las tecnologías constructivas industrializadas fueron duramente criticados por la falta de humanización y afectación al paisaje urbano. En los últimos quince años del siglo XXI hay una mayor proactividad del sector de la edificación en pro de revertir los efectos de la contaminación y cambio climático. A través de la implementación de estrategias de sostenibilidad en el diseño y ejecución de obras, tales como; reciclaje, control de desechos, disminuir operaciones en terrenos, crear condiciones seguras de trabajo, disminuir los impactos al ambiente por las actividades de construcción (Smith, 2011) (Fig. 4).

Después de casi dos siglos de producción y evidencia histórica se puede asegurar que la industrialización no es el resultado de la improvisación, sino, de un largo proceso de evolución tecnológica vinculada al desarrollo socio-económico sobre todo de los países del hemisferio norte, cuyo detonante ha sido la revolución industrial y el punto de inflexión lo ha marcado la postguerra y es hasta el siglo XXI que inicia un proceso acelerado de mejora continua gracias a la fabricación digital (Tablas 1 y 2).



Fig. 4 Montaje de módulos 3D en edificio de 24 plantas en Reino Unido (27 semanas)  
Recuperado de Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction.  
Smith R. (2010).

Tabla 1. Reseña histórica de la industrialización

	1830	1850	1900	1950	2000		
Demanda urgente		Colonización británica	I y II Guerras mundiales	Desastres naturales Viviendas de posguerra			
Revolución Industrial		Artesanía	Alto impacto mecanización				
Fordismo-Taylorismo		Producción en serie		Línea de ensamblaje			
Pensamiento sistémico		Comprender		Asumir	Reevaluar		
Fragmentación del trabajo		Guerra mundial		Especialización			
Costo de producción				Incremental			
Producción en masa				Enfocada en clientes			
Alta eficiencia (lean production)				Sistema de producción de Toyota			
Fabricación digital		Aeroespacial		Automóvil	Arquitectura		
BIM Building Information Modeling (planos y base de datos)				Aeroespacial	Arquitectura		
Contratos IPD, colaborativos				Riesgo compartido			
Salud-seguridad-bienestar				Litigios			
Sostenibilidad			Medio ambiente		Cambio climático		
Avances tecnológicos en materiales		Hormigón	Acero	Alum	Polímeros	Compuestos	Nano-tec.
Paradigmas arquitectónicos		Art and Crafts		Modernismo	Post-Mo	Minimalismo	
Recesión económica		1850	1900	1950	2000		

Recuperado de Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. Smith R. (2010). Traducida e interpretada por Rodríguez L.

Tabla 2. Transición histórica de la industrialización

	1850	1900	1950	2000
Industrialización				
Estandarización				
Mecanización				
Producción en masa				
Automatización				
Producción en masa personalizada				

Recuperado de Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. Smith R. (2010). Traducida por Rodríguez L.

### 2.3. Fundamentos de la prefabricación industrializada

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, en las últimas décadas del siglo XX pareciera que el proceso de construcción industrializada posterior a la postguerra se hubiese estancado, debido a la inconformidad de los usuarios entre muchos factores. Por tanto, se resumen las nuevas exigencias en la demanda de construcción industrializada:

- a) Que la construcción industrializada sea una alternativa viable para el incremento de densidad urbana y evitar la dispersión geográfica.
- b) Que la construcción industrializada responda a exigencias de condiciones óptimas en los edificios para contribuir a la eficiencia energética (Fig. 5). Esto como hecho ulterior a la actual normativa que exige cumplir una certificación energética de la edificación conseguida solo a través de estrategias de aislamiento en las paredes opacas de los edificios y propiedades da alto desempeño térmico en las paredes translucidas (Oesterle et al., 2001).
- c) Que la construcción industrializada contemple flexibilidad. Se refiere a que el usuario pueda sacar el máximo provecho del espacio habitable y prever su evolución a través del tiempo.
- d) Que la construcción industrializada contribuya a la calidad arquitectónica y adaptabilidad al paisaje y mejorar la expresión rígida de las edificaciones ya que se caracterizan por ser demasiado repetitivas (Del Águila, 2006).
- e) Que la construcción industrializada contribuya al bienestar acústico, a través de aislamiento de ruidos aéreos y de impacto.
- f) Que la construcción industrializada tenga un alto desempeño estructural ante las demandas que condicionan su diseño.

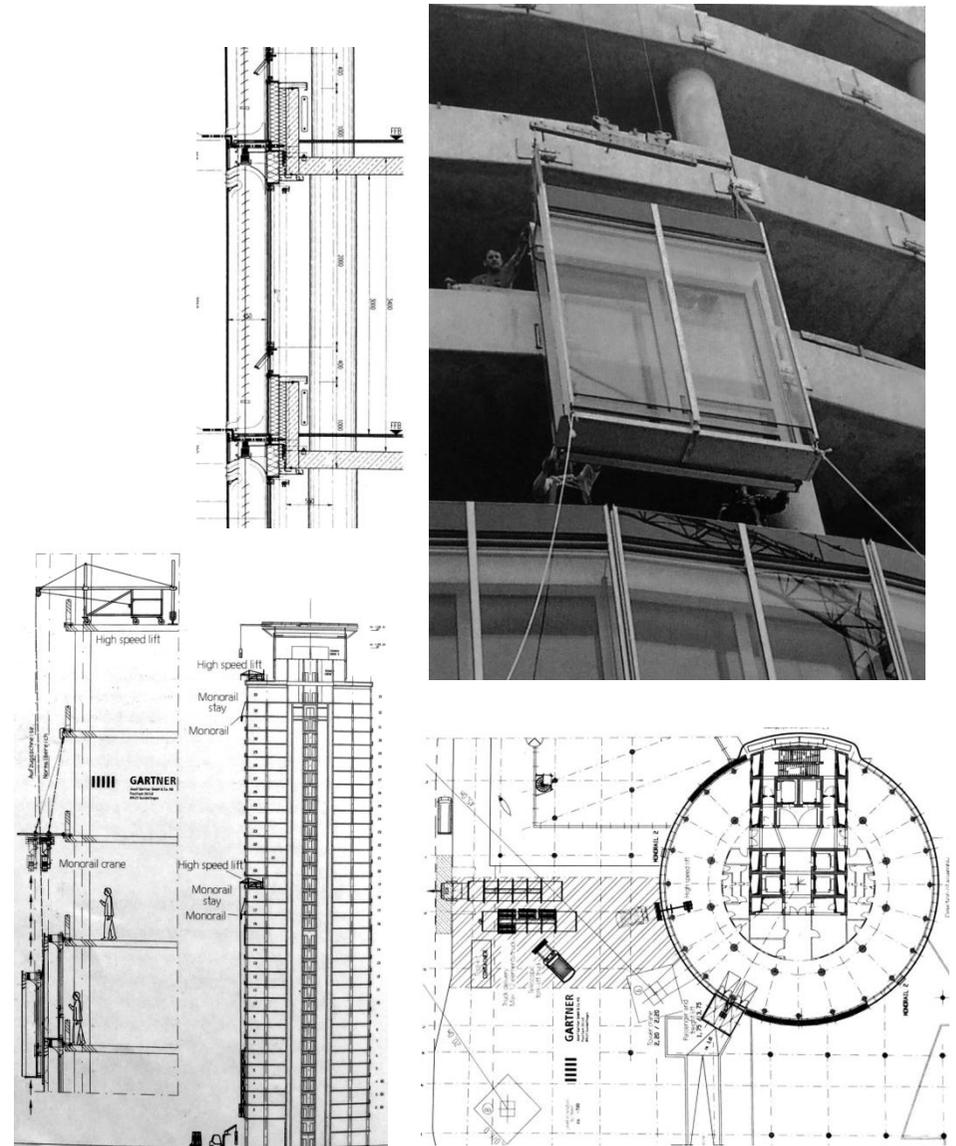


Fig. 5 Detalles de montaje de fachada con soluciones pasivas para la eficiencia energética de edificio de oficinas en Nuremberg, Alemania. Recuperado de Double-Skin Facades: Integrated Planning. Oesterle et al., (2001).

Según las condiciones de cada proyecto así será la decisión del equipo de diseño en seleccionar la tecnología constructiva adecuada, sin embargo son acotadas algunas condiciones que hacen de la construcción industrializada, una opción a los diseñadores:

- a) Tipología de proyecto: Puede ser total o parcialmente industrializado, siendo éstos de tipo estándar o especializado según la demanda del proyecto.
- b) Duración: Algunos proyectos requieren ser finalizados en tiempo record, esto implica utilizar tecnología industrializada y una programación de obras muy precisa. (Pich et al., 2008).
- c) Repetición: Resulta muy conveniente la producción industrializada cuando algún elemento se repite en el edificio o en varios edificios, aunque estos elementos sean muy complejos, la estrategia de industrializar va acompañada de un diseño muy especializado para cumplir funciones complejas con partes más sencillas (Smith, 2010).
- d) Ubicación geográfica: Si la ubicación condiciona al proyecto por restricciones de horarios o falta disponibilidad de recursos para procesos in situ, o en su defecto las condiciones del clima no son favorables a ciertos procesos, la construcción y prefabricación industrializada es una alternativa.
- e) Control de calidad y eficiencia: Debido a que la prefabricación industrializada funciona con sistemas de automatización es una

opción para el equipo de diseño, poder supervisar que el proyecto sea ejecutado de acuerdo a los planos y al contratista le es más fácil el control de calidad.

- f) Transporte: El transporte debido a la prefabricación es mayor por unidad de volumen debido a la fragmentación de los componentes.
- g) Personal: Según sea el sistema de construcción industrializada, el proceso de ensamblaje y montaje requiere trabajadores cualificados o cuadrillas dedicadas para configurar los elementos en un ambiente de mayor seguridad industrial para los trabajadores.
- h) Tiempos en etapa de diseño: como la prefabricación requiere más coordinación entre los equipos de diseño, construcción y prefabricación, el período de diseño es generalmente más largo que el de ejecución de obras y el diseñador tiene mayor control del proceso.
- i) Prestaciones del sistema: Aislamiento acústico, estanqueidad, aislamiento térmico, compatibilidad química entre elementos.

La gama de productos de la construcción industrializada se ha diversificado en los últimos 50 años, y son muchas las clasificaciones según los autores versados en el tema. Se ha realizado una fusión de varias tipologías definidas por los autores. En este sentido se identifican 3 tipos de productos según su complejidad y según la demanda a la que responden:

- 1) Componentes: Son elementos compuestos por materiales transformados para mejorar su desempeño en el edificio y con características para ser producidos en serie, tales como; tejas, ladrillos, bloques, tableros de yeso, lavabos, etc.
- 2) Elementos de un sistema: Estos elementos por su acabado más complejo aseguran una función en el edificio, tales como; forjados prefabricados, paneles de fachada (Fig. 5), bloques técnicos sanitarios, escaleras prefabricadas (Fig. 6).
- 3) Módulo: Es un volumen de dimensiones considerables que representa un segmento del edificio y asegura la totalidad de las funciones, tales como; módulos ligeros semiacabados, módulos 3D o llamadas células equipadas con las prestaciones para cumplir funciones en el edificio (Fig. 4).

Previamente a definir los elementos de los sistemas estructurales en prescindible definir los sistemas estructurales a continuación.

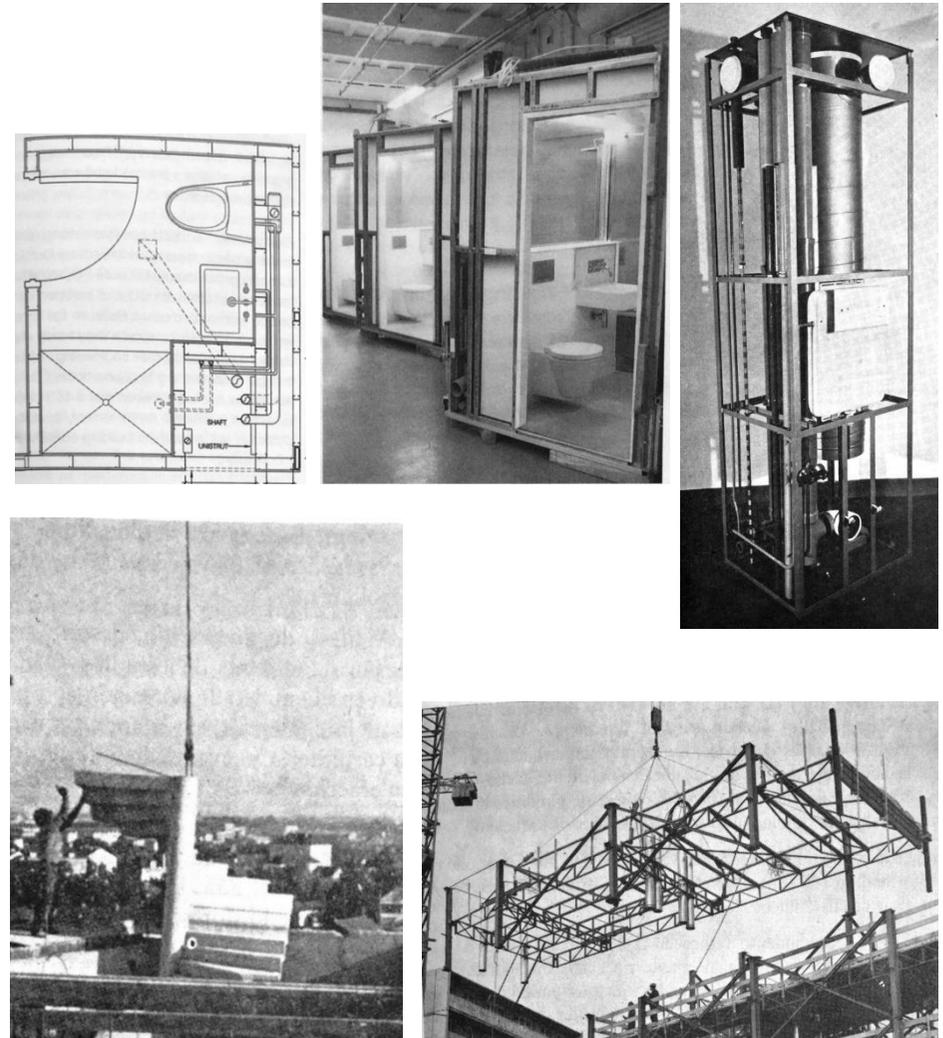


Fig. 6 En las imágenes superiores, bloques técnicos sanitarios prefabricados, en las imágenes de abajo, montaje de escalera prefabricada y sistema metálico. Recuperado de Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. Smith R. (2010) y recuperado de Industrialización de la construcción. Chemillier P. (1980).

## 2.4. Sistema estructural resistente

En términos generales un edificio debe poseer una configuración de elementos estructurales que le confiera resistencia y rigidez, tanto a cargas gravitatoria como a empujes laterales en cualquier dirección, esto se logra generalmente, proporcionando sistemas resistentes en dos direcciones (Meli, 2008).

La configuración de elementos estructurales debe permitir un flujo continuo, regular y eficiente de las fuerzas que actúan sobre este, desde el punto en que estas se generan hasta su descarga al suelo a través de las cimentaciones (Moisset, 2003).

Conviene que la estructura, tanto en planta como en altura sea; regular, simétrica y continua para evitar torsiones o vibraciones.

Los sistemas estructurales básicos según Meli (2008) son:

- a) Pórticos tridimensionales, formados por columnas y vigas en dos direcciones conectadas entre sí, diseñados para ser elementos resistentes a carga gravitatoria como a empuje lateral (Fig. 7a).
- b) Pórtico rigidizado con diagonales de contraviento o con muros en ambas direcciones ubicados como núcleo rígido o como elemento de arrostramiento en fachada. Generalmente son diseñados separando los roles, confiriendo a los pórticos resistir la carga gravitatoria y a los elementos de arriostamiento, resistir los empujes laterales (Fig. 7b).

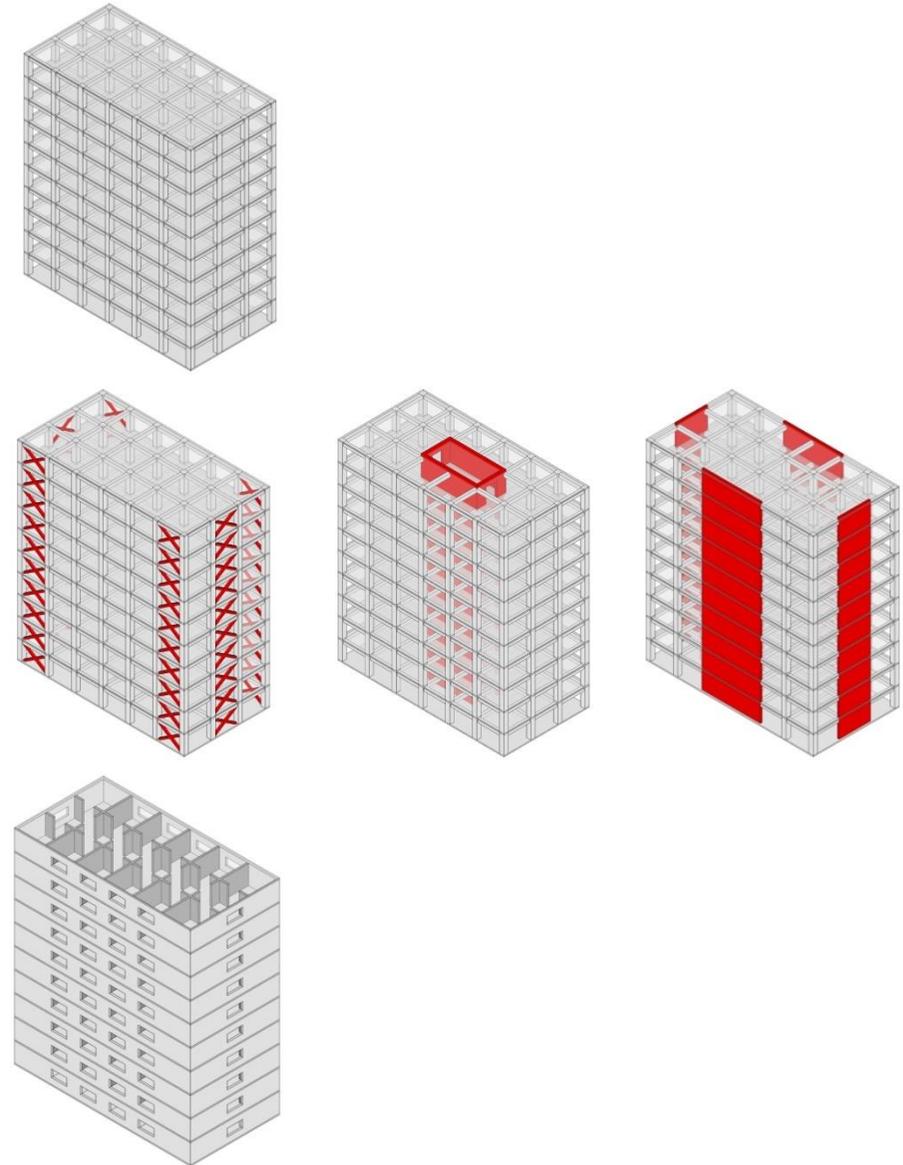


Fig. 7 Sistemas estructurales a, b y c, y en rojo los elementos estabilizadores  
Recuperado de Tecnología en Construcción, archivos. Rodríguez L. (2017)

- c) Estructura tipo “cajón” conformada por muros estructurales en ambas direcciones y elementos horizontales conectados entre sí para proporcionar continuidad, generalmente diseñados para resistir carga gravitatoria y empuje lateral (Fig. 7c).
- d) Existen variantes o combinaciones de estos sistemas y más complejas, tales como estructuras tridimensionales o módulos 3D, diseñadas para funcionar como estructura auto portante.

La unión entre elementos resistentes que conforman el sistema estructural es definida por el diseñador y es condicionada por el máximo desplazamiento permitido en códigos de diseño. De tal forma que según sea el caso, el sistema puede ser isostático o hiperestático.

El sistema isostático puede ser analizado mediante principios estáticos y al suprimir cualquiera de sus nudos puede conducir al colapso. A diferencia el sistema hiperestático requiere más elementos de los necesarios de rigidización, la supresión de uno de esos elementos no lleva al colapso pero modifica su comportamiento estático.

En todas las configuraciones estructurales antes mencionadas se distinguen los elementos resistentes verticales de apoyo y los elementos horizontales de rigidez que pueden ser vigas y forjado, este último considerado como diafragma rígido en su plano, cuya función es distribuir la los empujes horizontales generadas por efectos de inercia y

contribuye a que los elementos verticales se desplacen en la misma dirección ante el empuje.

En caso que el edificio no contemple el efecto de diafragma rígido generalmente en sistemas de forjados bidireccionales articulados, puede considerarse efectiva una capa de compresión para garantizar el monolitismo y el comportamiento uniforme.

## **2.5. Sistemas de construcción industrializados**

Previo y durante el periodo de construcción de una edificación hay varios factores que determinan la tipología de sistema de construcción industrializada sobre todo respecto al sistema estructural:

- a) Tiempo y costos de diseño: Requiere más coordinación con los equipos de construcción y prefabricación, según sea la elección de sistema, así será considerable el tiempo de esta etapa previa a la construcción y exige habilidades de trabajo integrativo e interdisciplinar y conocimientos previos.
- b) Operatividad en proceso de producción: Según el volumen y la demanda, los fabricantes requieren periodos de mantenimiento de equipos, turnos rotativos, habilidades de trabajo y costos energéticos adicionales.
- c) Tiempo: La industrialización se caracteriza por trabajar con programa de obras con garantías de calidad y alta eficiencia pero un retraso genera costos adicionales mayores.

- d) Transporte: El transporte debido a la prefabricación es mayor por unidad de volumen que por su peso, como es usual en la construcción y entre más complejo es el elemento menos se optimiza el transporte.
- e) Peso y configuración: La elevación de un elemento de construcción industrializado requiere equipos de gran magnitud y trabajadores cualificados para manejar los equipos de izado.

Los sistemas constructivos industrializados de la edificación pueden ser de tipo cerrado o abierto, ya sea en la totalidad del edificio o en alguno de los subsistemas (Albus, 2018). Se detallan ambos tipos:

- a) En el caso de los sistemas constructivos de industrialización cerrados, cada elemento es coincidente con otro, provistos de compatibilidad entre sí, para brindar una solución específica, en este caso es posible optimizar la solución integral, disminuyendo la cantidad de elementos, otorgándoles características especializadas, sin embargo puede resultar poco flexible para cambios o modificaciones.
- b) En contraste, los sistemas constructivos abiertos se caracterizan por ser estándar y brindan flexibilidad en el diseño, pero requieren de especial atención a las uniones.

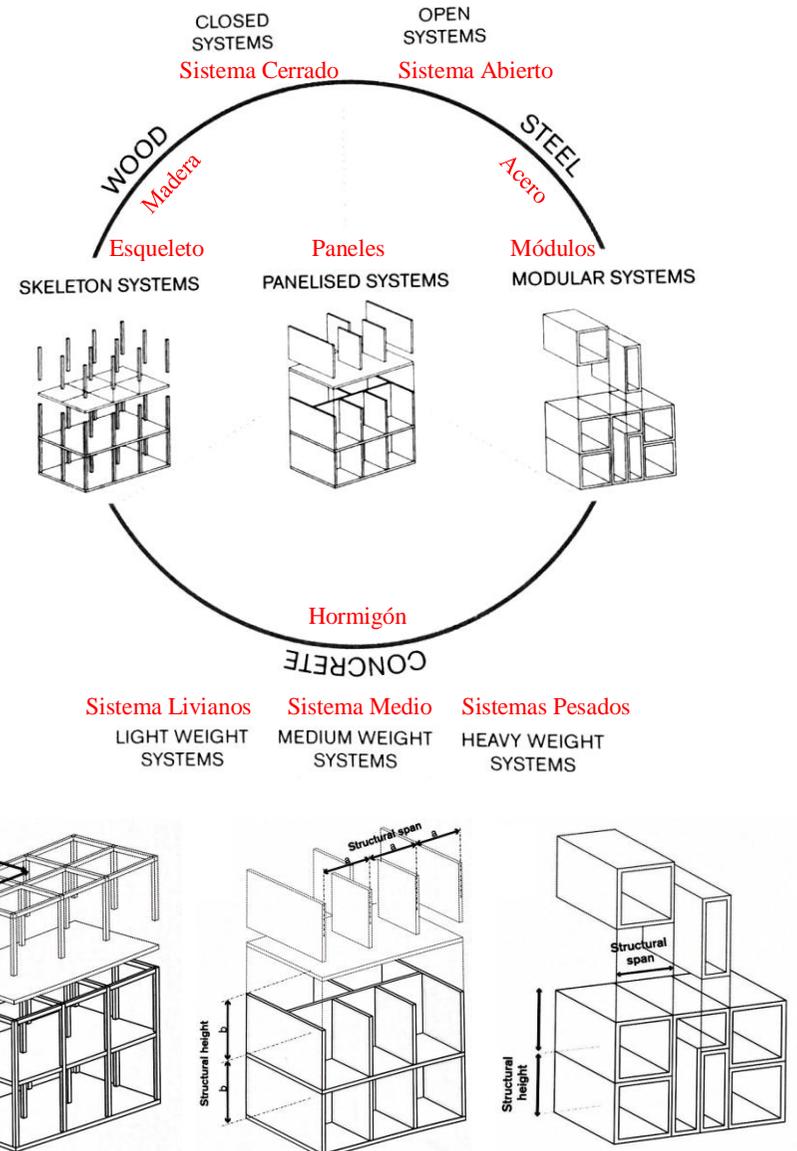


Fig. 8 Tipología de sistemas estructurales industrializados  
 Recuperado de Construction and design manual. Prefabricated housin, volume 1, Albus J. (2018)

Tomando en cuenta las tipologías de sistemas constructivos industrializados y los factores que determinan su uso, en la tabla 3 y Fig. 8, se enumeran los sistemas encontrados en el mercado europeo en la presente investigación.

Tabla 3. Clasificación de tipologías constructivas según tipologías estructurales.

Sistema estructural	HORMIGÓN	ACERO	MADERA
Estructura de pórticos	Pórticos de hormigón prefabricado	Pórticos de acero laminado	Pórticos de madera laminada
Muros estructurales	Muros de hormigón prefabricado y fachadas portantes o semi-modulo portante	Paredes de carga arriostradas tipo Steel-frame	Paneles solidos de CLT y Paredes de carga arriostradas tipo Ballon-frame
Módulos 3D autoportantes	Módulos 3D de hormigón prefabricado	Módulos 3D tipo esqueleto tipo Steel-frame	Módulos 3D de CLT y módulos 3D tipo esqueleto tipo Ballon-frame

Según la Asociación Técnica Española del Pretensado ATEP, todos los sistemas de construcción tienen sus propias características, tomando en cuenta sus facetas, el diseño, las consideraciones en altura, los detalles de unión, la estabilidad, entre varias. Así mismo recomienda que las uniones entre elementos sean lo más sencilla posible y que el edificio en su conjunto sea analizado evitando hacerlo como si fuese un sistema convencional in situ y no descuidar los motivos de posible falla local.

Tabla 4. Combinación de elementos estabilizadores

Elemento estabilizador	Pórticos	Esqueleto	Muros portante	Fachada portante	Módulos
Columna en ménsula	x	x			
Conexiones resistentes a momentos	x				
Forjado como diafragma	x	x	x	x	
Arriostramientos	x	x			
Muros resistentes a esfuerzo cortante		x	x	x	
Núcleo central		x	x	x	
Bloques auto portantes					x

Recuperado de Estructuras de edificación prefabricadas. FIP-ATEP. (1996).

Según las necesidades del proyecto de edificación, cada vez es más común la tendencia a generar combinaciones entre los elementos de cada sistema, es posible hacerlo si la prefabricación industrializada es abierta y si se tienen en cuenta los elementos estabilizadores (Tabla 4). Pero merece la pena destacar que la solución final estará supeditada a la demanda estructural de cargas a la que la edificación debe responder. Otro factor que determina la combinación entre elementos prefabricados y elementos estabilizadores es la altura del edificio, en este sentido, según los edificios que serán contemplados como casos de estudio, contemplan estrategias de estabilidad según las primeras 3 filas de la tabla 4 ya que sus alturas no son mayor a cuatro plantas.

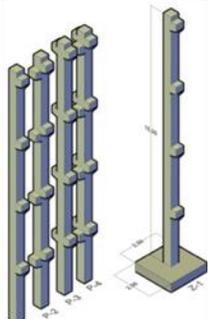
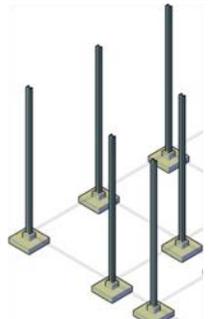
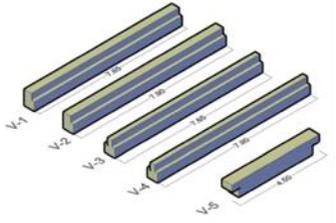
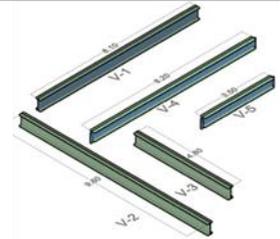
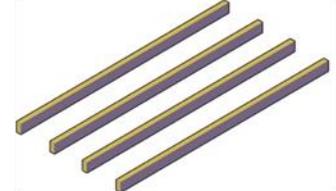
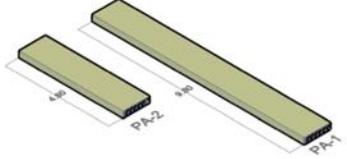
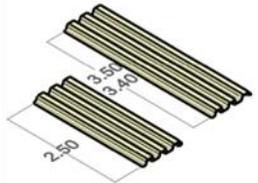
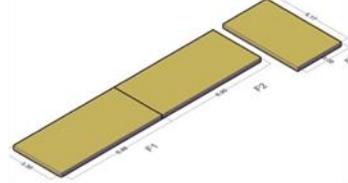
PÓRTICOS	HORMIGÓN	ACERO	MADERA
<b>Elementos resistentes verticales</b> <b>Pilares</b>			
Altura A Peso P	A= 3-15 m P= 220-1090 kg/m	A= 3-15 m P= 60-500 kg/m	A= 3-15 m P= 20-250 kg/m
<b>Elementos resistentes horizontales</b> <b>Vigas</b>			
Longitud L y Canto C Peso P	L= 4-12 m C= 0,5-1,4 m P= 400-1100 kg/m	L= 3-15 m C= 0,3-0,75 m P= 30-200 kg/m	L= 3-15 m C= 0,3-0,75 m P= 30-300 kg/m
<b>Forjados (sin hormigón in situ)</b>			
Longitud L y Canto C Peso P	L= 6-18 m C= 0,15-0,5 m P= 260-1010 kg/m2	L= 3-7 m C= 0,1-0,25 m P= 10-17 kg/m2	L= 1-6 m C= 0,1-0,24 m P= 30-120 kg/m2

Fig. 9 Sistemas estructurales de prefabricación industrializada  
Fuente: Rodríguez L. (2018)

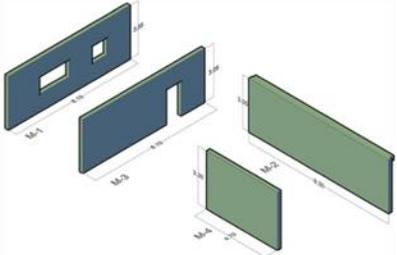
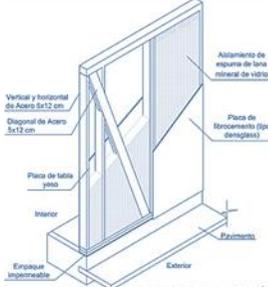
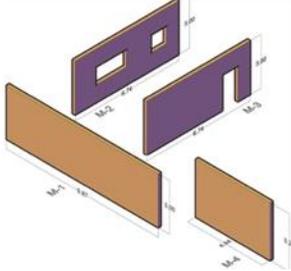
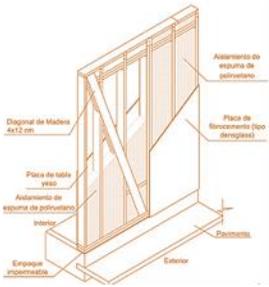
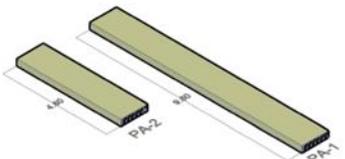
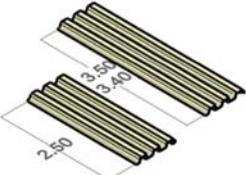
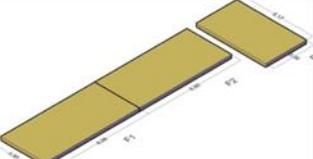
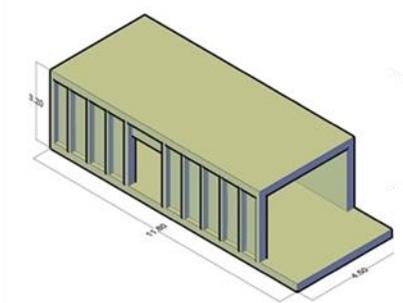
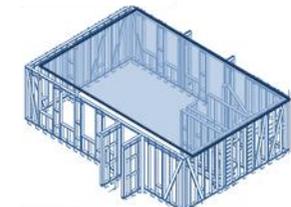
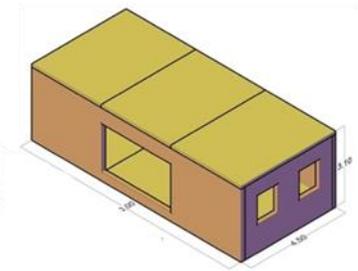
MUROS	HORMIGÓN	ACERO	MADERA	
<b>Elementos resistentes verticales</b> <b>Muros estructurales</b>				
Altura A y Longitud L Peso P	A= 3 m L= 3-15 m P= 300-1090 kg/m	A= 3 m L= 1,2-6 m P= 60-500 kg/m	A= 3,3 m L= 1-14 m P= 20-250 kg/m	A= 3 m L= 1,2-6 m P= 20-220 kg/m
<b>Forjados (sin hormigón in situ)</b>				
Longitud L y Canto C Peso P	L= 6-18 m C= 0,15-0,5 m P= 260-1010 kg/m <sup>2</sup>	L= 3-7 m C= 0,1-0,25 m P= 10-17 kg/m <sup>2</sup>	L= 1-6 m C= 0,1-0,24 m P= 30-120 kg/m <sup>2</sup>	L= 1,2-6 m C= 0,1-0,3 m P= 30-160 kg/m <sup>2</sup>

Fig. 9 Sistemas estructurales de prefabricación industrializada  
Fuente: Rodríguez L. (2018)

MÓDULOS 3D	HORMIGÓN	ACERO	MADERA
<b>Módulos 3D autoportantes</b>			
Altura A, Ancho B Longitud L Peso P	A= 3 m B= 3-4,5 m L=6-10 m P= 25-40 Tn	A= 3 m B= 3-4,5 m L=3-9 m P= 15-30 Tn	A= 3 m B= 3-4,5 m L=6-10 m P= 10-15 Tn

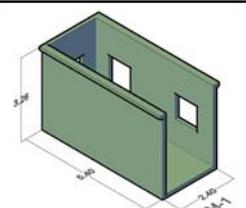
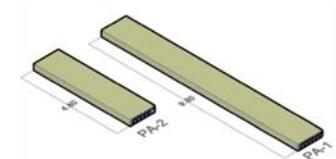
PÓRTICOS	HORMIGÓN
<b>Elementos resistentes verticales</b> <b>Fachadas portantes o módulos portantes</b>	
Altura A, Ancho B, Longitud L Peso P	A= 3,2 m B= 2,4 m L=6 m P= 5-10 Tn
<b>Forjados (sin hormigón in situ)</b>	
Longitud L y canto C Peso P	L= 6-18 m C= 0,15-0,5 m P= 260-1010 kg/m2

Fig. 9 Sistemas estructurales de prefabricación industrializada  
Fuente: Rodríguez L. (2018)

## 2.6. Parámetros para selección de sistemas y casos de estudio

Con el objetivo de seleccionar casos de estudio que contemplen sistemas estructurales de prefabricación industrializada en la figura 8 se han detallado los elementos de las tipologías de sistema estructural y serán seleccionados los sistemas sobre los cuales será realizado el estudio comparativo, a continuación se enumeran los criterios de selección de los sistemas.

1. Serán considerados al menos dos tipologías constructivas por cada sistema estructural, con las que usualmente se construye en Europa, por ejemplo, para pórticos serán elegidas al menos dos tipologías comparables según el material de la estructura resistente.
2. Serán seleccionadas tecnologías de prefabricación industrializada abierta. Esto implica que los elementos del sistema pueden ser utilizados en cualquier tipo de proyecto a pesar que sean sujetos de registro de patentes.
3. Que los componentes sean fabricados a una distancia no mayor a los 1000 km tomando como punto base la ciudad de Barcelona.

Por la complejidad del análisis es que serán seleccionadas 7 tecnologías de construcción industrializada como muestras representativas del universo de tipologías de construcción industrializada o potenciales combinaciones.

Tabla 5. Selección de tipologías constructivas según tipologías estructurales.

Sistema estructural	HORMIGÓN	ACERO	MADERA
Estructura de pórticos	Pórticos de hormigón prefabricado	Pórticos de acero laminado	
Muros estructurales	Muros de hormigón prefabricado y fachadas portantes		Muros de Paneles solidos de CLT
Módulos 3D autoportantes	Módulos 3D de hormigón prefabricado		Módulos 3D de CLT

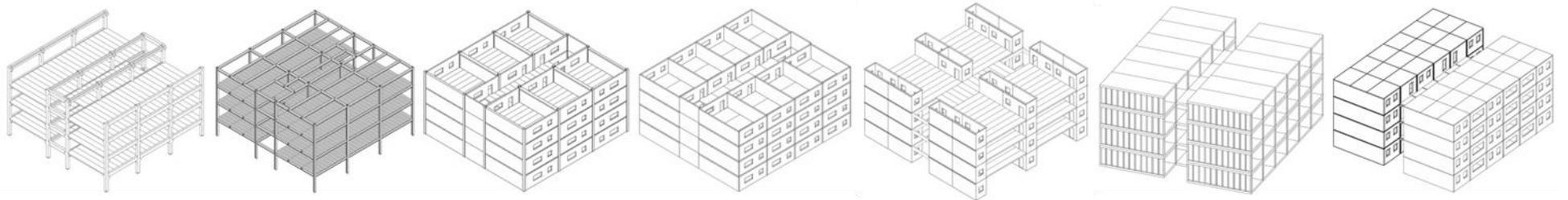
La selección de casos de estudio será con base a la tabla 5, es decir, que serán contemplados al menos un caso por cada sistema estructural y al menos un tipo de sistema constructivo según el material del sistema estructural resistente.

Hay especial interés en los casos de 4 plantas, esto con el propósito de verificar la mínima existencia de elementos estabilizadores ante empuje lateral, carga gravitatoria y contrastar este hecho con los modelos a desarrollar.

Así mismo serán presentados los casos como ejemplos de aplicación de las tecnologías que serán analizadas en los siguientes capítulos. Se ha buscado que la mayoría de casos estén en el territorio Español, sin embargo se incorpora un caso de Brasil debido a su carácter pionero en Latinoamérica.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL  
A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

# CAPÍTULO III



### 3. CASOS DE ESTUDIO

Considerando que la construcción industrializada es un hito histórico, en el que han tenido un papel relevante los diseñadores, muchos de éstos han sido arquitectos y han dejado una contribución importante al desarrollo tecnológico de la industria de la construcción y en su camino a la industrialización.

Algunos testimonios sobre su filosofía de diseño ha sido recabado por autores que han intentado reseñar el proceso de industrialización en la construcción, por ejemplo Chemillier (1980) menciona a los arquitectos franceses representantes del modernismo internacional que promovieron la prefabricación industrializada: Auguste Perret, Marcel Lods, Beaudoin y Bondianski, Jean Prove, Pol Abraham, Emile Aillaud GERIA (asociación de arquitectos industriales, que elaboró reglas de la industrialización abierta en Francia).

También menciona que Le Corbusier en 1921 escribía: *“Será preciso que las casas surjan de un bloque, fabricadas en taller con máquinas-herramienta, montadas como Ford ensambla sobre su cinta transportadora las piezas de su automóvil”*

En 1937 Le Corbusier declaraba:

*“La industrialización de la vivienda no debe orientar hacia la repetición de un tipo de edificio. Hay que tender hacia la tipificación de los elementos de la vivienda”.*

En esta misma línea que Chemillier, sobre capturar los testimonios de arquitectos con amplia experiencia en el tema y proyectos ejecutados que son un testimonio ineludible, se realizaron entrevistas a dos arquitectas diseñadoras en Barcelona y se resumen los importantes testimonios sobre lo que implica la construcción industrializada en el desarrollo de sus proyectos arquitectónicos.

En abril de 2019 se tuvo la oportunidad de conversar con la arquitecta Teresa Batlle Pagès, socia fundadora del despacho de Arquitectura; Pich Architects, junto a Felipe Pich Aguilera, que es un despacho con más de treinta años de trayectoria profesional en Europa y América, a continuación se recogen las frases que confirman la importancia de la temática analizada (Fig. 10a):

*“Desde el principio estamos pensando en la racionalidad industrial. Empezamos a empaparnos de la industria de la construcción”.*

*“Las preguntas que hacíamos a industriales previo al proceso de diseño eran: ¿Qué parámetros de inicio tienes para hacer más eficiente la construcción de lo que proyectamos? ¿Cuáles son los criterios eficientes de la industrialización?”.*

*“No estamos haciendo un proyecto y luego viendo cómo se industrializa. Nosotros proyectamos pensando en la industrialización desde cero. Industrializar no es un impedimento a la creatividad”.*

*“Y nosotros supervisamos los planos de fabricación. La obra solo es para ensamblar”.*

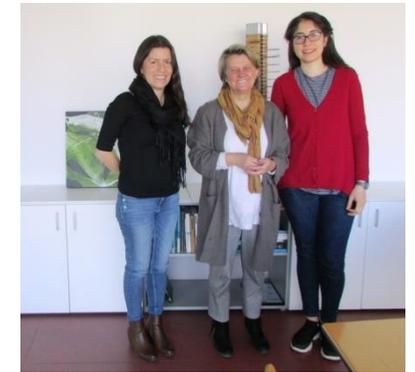
En junio de 2019 se tuvo la oportunidad de conversar con la arquitecta Cristina Gamboa Masdevall, socia de la Cooperativa de Arquitectos LACOL Arquitectura, así mismo, con Cristina se visitó el edificio de viviendas de la Cooperativa d’habitatge La Borda, a continuación se recogen las frases que confirman la importancia de la temática analizada y la opción por sistemas industrializados (Fig. 10b):

*“La valoración de la madera como el sistema industrializado, fue una decisión en términos de: Reducir el periodo de construcción con los costos asociados y también reducir el impacto ambiental”.*

*“Mucha gente nos dice; que esbeltos los pilares de hormigón en el primer nivel, porque realmente el peso que tienen encima es mucho menor y también el peso que soporta la cimentación”.*

*“Los muros como material de fachada: “Nos permitió reducir aislamiento, también redujo el hormigón del primer nivel dimensionado para resistir el peso del edificio”.*

Además de los testimonios de las arquitectas es importante poder visualizar los productos arquitectónicos y los atributos de diseñar con sistemas industrializados, para ello a continuación se presentan los 4 casos de estudio seleccionados según los criterios del capítulo 3.



a) Entrevista a Arquitecta Teresa Batlle Pagès



b) Entrevista a Arquitecta Cristina Gamboa Masdevall

Fig. 10 Entrevistas realizadas a arquitectas diseñadoras cuyas obras son el resultado de haber optado por sistemas de prefabricación industrializada en Barcelona 2019  
Fuente: Rodríguez L. (2018)

### 3.1. Caso de estudio 1

Secretaría del Centro Administrativo de Bahía (1973) en Salvador de Bahía, Brasil, diseñado por João Filgueiras Lima, “Lelé”.

En este edificio la flexibilidad espacial, la necesidad de un período corto de construcción (18 meses), la reducción del coste y la posibilidad de ampliación a futuro, llevaron a la elección de la prefabricación. A partir de aquí, la experiencia de Lelé en las técnicas de la prefabricación, lo llevó a construir su primer rascacielos, el edificio Camargo Corrêa (1974) en Brasilia (Valadares, 2013).

Requería facilidad para incrementar área construida en un futuro cercano y se logró con una arquitectura modular adosando módulos tanto en horizontal como en vertical, en el caso del eje vertical, la base debía ser sobredimensionada para prever futuro crecimiento, limitado de dos a cuatro niveles. El edificio debía ser flexible en poder adaptarle nuevas instalaciones. También es destacable que por su ubicación en un clima tropical, el edificio requería protección solar en fachadas así como brindar la posibilidad de ventilación cruzada.

El emplazamiento se resolvió elevándolo del suelo a través de pilares muy rígidos de altura variables colocadas a cada 16,5 m que sostienen a una viga hueca de 3,3 m de ancho x 2,5 m de canto, sobre la cual se engranan vigas en voladizo de 1,1 m de ancho y 2,2 m de canto. Por la gran viga hueca viajan las instalaciones. Sobre estas vigas en voladizo se apoyan las cajas portantes en la fachada que dan soporte a

tres plantas a cada 2,7 m de altura y sobre ellas, forjados de placas alveolares de 0,3 m de espesor. Los módulos caja o fachada portante 3D de 2,2 m de ancho x 2,7 m de canto 1,1 m de espesor separadas entre sí a cada 1,1 m dejando espacio para el paso de instalaciones (Fig.11).

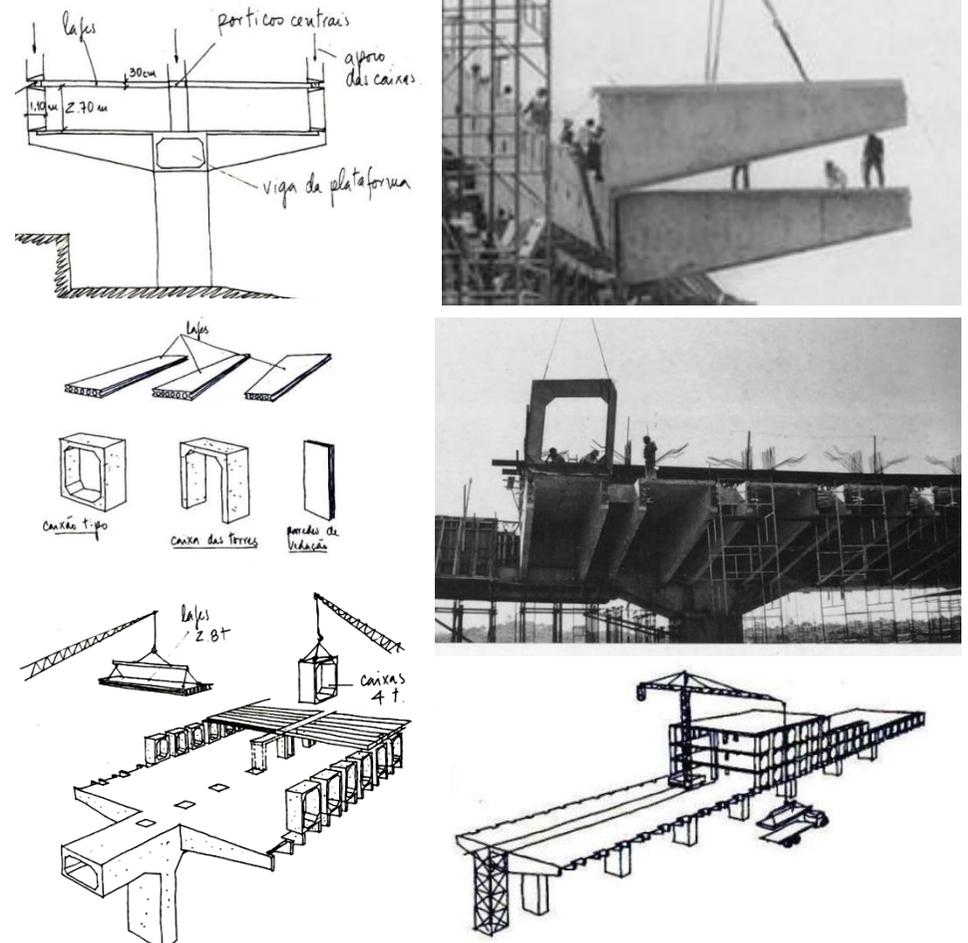


Fig. 11 Elementos del sistema y proceso de ensamblaje  
Recuperado de João Filgueiras Lima. Lelé. Instituto Lina Bo e P. M. Bardi. (2000)

Cabe resaltar los siguientes aspectos en el caso de estudio 1:

- El sistema estructural está compuesto por dos subsistemas, el primero, un grupo de pilares construidas con hormigón armado in situ, y sobre el cual apoyan vigas en voladizo acarteladas prefabricadas que conforman un nudo rígido con la viga hueca en su centro, al ser simétrico los voladizos transfieren los momentos al pilar lo que da lugar a pensar que la cimentación es un elemento masivo. Sobre este sistema monolítico apoyarán 3 plantas que constituyen el segundo subsistema con elementos de hormigón prefabricado tipo fachada portante, un eje central y forjado de placa alveolar, con el vaciado de hormigón en los intersticios entre las cajas, es rigidizada la fachada portante. (Fig. 12)
- La Relación espacio estructura da como resultado una planta muy diáfana con posibilidades múltiples para que se desarrollen actividades de oficinas y a la vez que la fachada es estructural, cumple la función de ser un elemento pasivo de protección solar.
- El tiempo de ejecución según las fuentes investigadas ha sido de 18 meses que es tiempo record para un edificio de esta envergadura.
- A pesar que la relación costo beneficio es obvia por el poco tiempo, se estima que la estructura monolítica que garantiza que el edificio esté separado del suelo, ha tenido mayor costo que las estructuras prefabricadas, tomando en cuenta que debía tener suficiente rigidez para no ser susceptible a torsión por sobrecarga de uso.

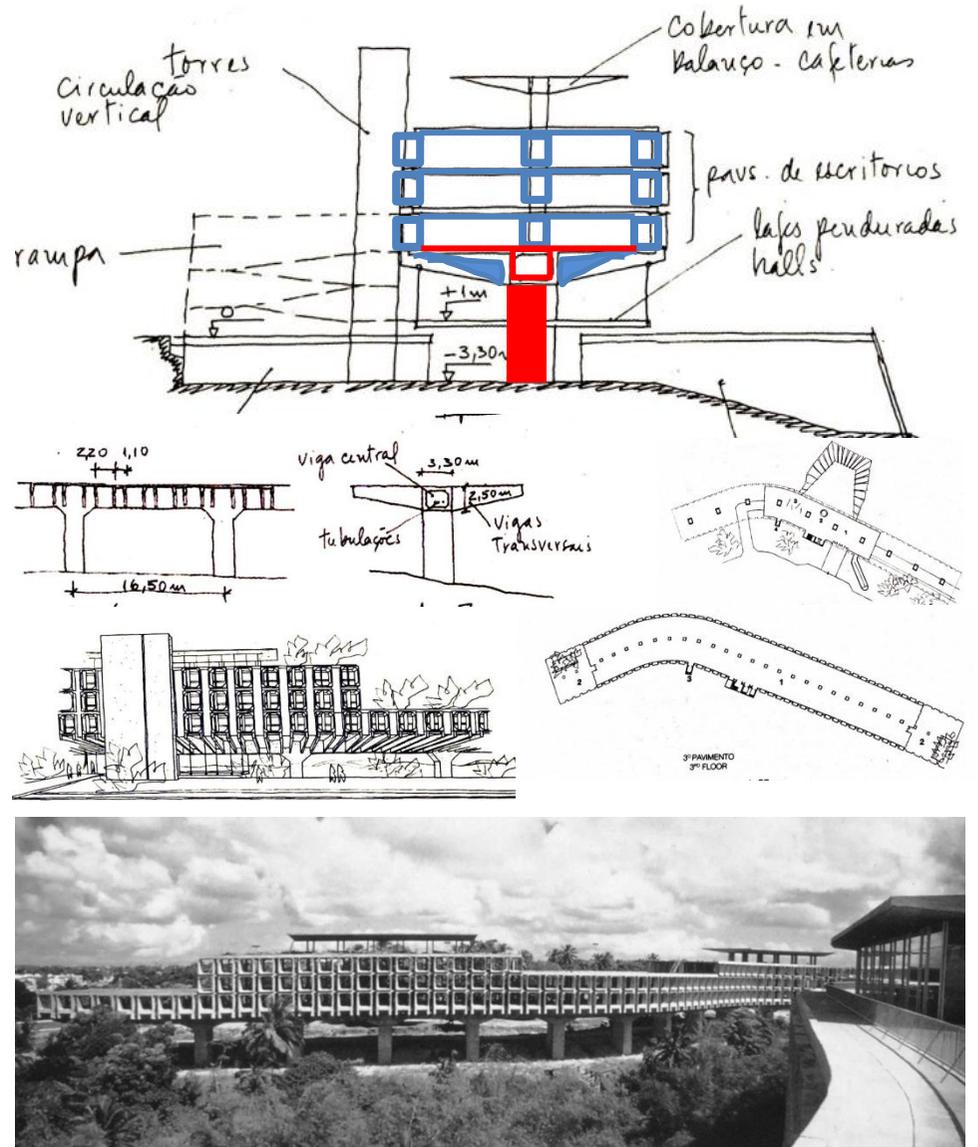


Fig. 12 En color rojo los elementos de hormigón in situ, y en azul hormigón prefabricado. Abajo, dos imágenes de fachada Recuperado de João Filgueiras Lima. Lelé. Instituto Lina Bo e P. M. Bardi. (2000)

### 3.2. Caso de estudio 2

Complejos de 112 viviendas sociales en el Barrio “El Polvorín” en Barcelona, España (2005). Diseñado por Pich Architects. El proyecto se trata de un conjunto de 8 edificios como resultado de un concurso convocado por la Dirección General de Viviendas de la Generalitat de Catalunya y es importante destacar los parámetros de inicio del proyecto; la racionalización y eficiencia en los procesos constructivos a través de, la incorporación de tecnologías constructivas industrializadas, en este caso, módulos tridimensionales, pórticos y forjado de placa alveolar de hormigón prefabricado.

El eje clave del edificio tipológico, son los apoyos verticales a base de apilar módulos 3D que albergan los servicios y que funcionarían como núcleo rígido ya que a través de la solución de uniones, el núcleo le confiere hiperestaticidad al sistema estructural que se complementa con dos ejes de pórticos de hormigón prefabricado en fachada, así mismo, la fachada es modulada con paneles de hormigón prefabricado no portantes que le confiere identidad a cada edificio del complejo (Fig. 13). Según los arquitectos Felipe Pich-Aguilera y Teresa Batlle en su artículo “La arquitectura residencial como una realidad industrial. Tres ejemplos recientes” publicado en Informes de la Construcción Vol. 60, comentan sobre la fabricación: “La clave en la fabricación de elementos industrializados está en el proyecto, todas las piezas deben haber sido diseñadas en proyecto, con sus sistemas de

apoyo, de armado. Tanto el arquitecto como el industrial desarrollan los elementos conjuntamente, el industrial tiene sus solicitudes de fabricación eficiente, el arquitecto conoce todas las prestaciones de vivienda. El industrial transmite sus cadenas de montaje, los elementos existentes y el arquitecto, con unos ciertos parámetros de partida, ajusta el proyecto e incluso dialoga para ajustar los sistemas de fabricación, a todas las solicitudes”.

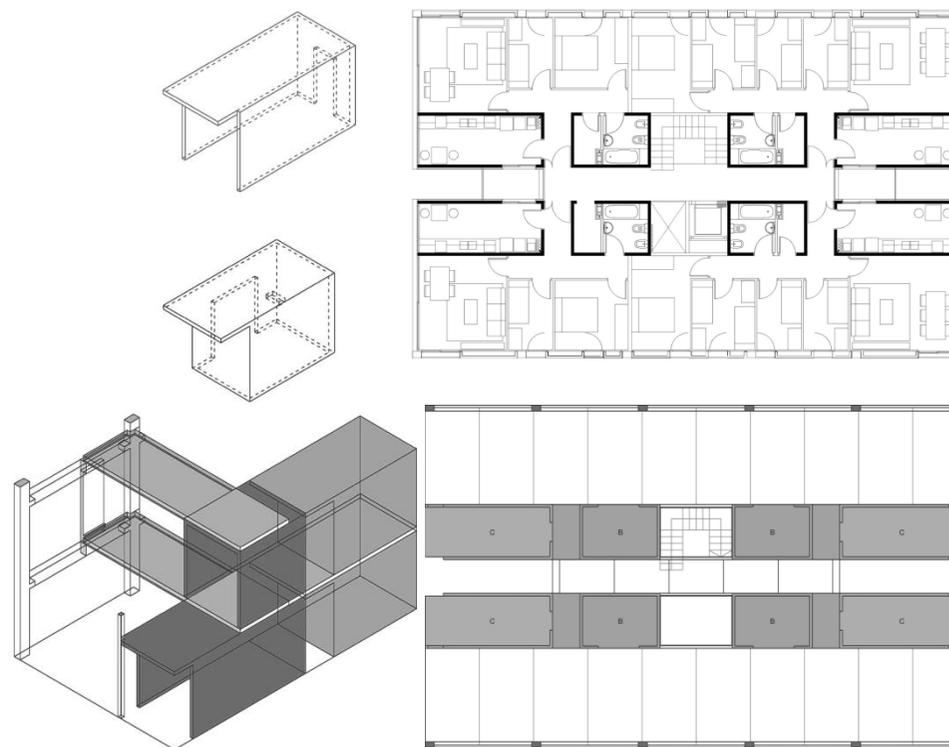


Fig. 13 Distribución en planta que muestra 4 viviendas por planta y esquema en planta e isométrico de los elementos resistentes verticales (módulos 3D y pórticos). Recuperado de Informes de la Construcción Vol. 60 (2008).

Respecto al transporte, aseguran que como parámetro de eficiencia y promoción a la industria local, la distancia máxima de la fábrica a la obra no debe exceder 150 km.

Este tipo de sistemas es considerado como sistema “seco” es decir que no requiere procesos de encofrado y minimiza los desechos generados en la obra, además supone un ahorro en la obra y el riesgo de accidentes laborales o retrasos en la obra puede ser controlado.

Por otra parte, respecto al tema de sostenibilidad, los arquitectos aseguran que los subsistemas que componen los edificios, tanto su estructura como la envolvente, tienen un alto potencial de reciclaje por la forma en que se han diseñado sus uniones.

Merece la pena destacar un valor de incremento en el cemento del 5% en los elementos de hormigón prefabricado, respecto al hormigón HA-25 (25MPa) pero el hormigón prefabricado no contempla las pérdidas del 15% del hormigón in situ.

Con la combinación de sistemas de apoyo vertical se logró construir edificios de 4 plantas siendo el sistema de estabilidad la unión entre estos elementos y el pilar en ménsula. En el caso de los pórticos, como dejan superficie sin cubrir ha sido requerido el uso de elementos de cerramientos, en la misma línea de elementos de prefabricación industrializada (Fig. 14).



Fig. 14 Imágenes de proceso de montaje y ensamblaje, en estas se destaca el izado de los módulos tridimensionales.

Recuperado de Con La Realidad/Engaged with Reality. Pich-Aguilera F. y Batlle T. (2008).

### 3.3. Caso de estudio 3

La cooperativa de viviendas La Borda es una promoción auto-organizada por sus futuros usuarios para acceder a una vivienda digna, no especulativa y que ponga en el centro su valor de uso, a través de una estructura colectiva. Ubicado en recinto industrial de Can Batlló con fachada a la trama histórica del barrio de la Bordeta Barcelona, España (2018). El edificio La Borda fue diseñado por Lacol que es una cooperativa de arquitectos.

El programa del edificio plantea 28 viviendas (40, 55 y 70 m<sup>2</sup>) y espacios comunitarios que deben permitir el hecho de habitar desde el espacio privado al espacio público para potenciar la vida comunitaria y vecinal. El objetivo del diseño ha sido generar un edificio con el menor impacto ambiental, tanto en la obra como en su vida útil, y sobre todo, conseguir el confort en las viviendas con el mínimo consumo para reducir los costes globales de acceso a la vivienda. El punto de partida reducir la demanda inicial de todos los vectores ambientales del edificio (energía, agua, materiales y residuos), especialmente a nivel energético, donde se priorizan las estrategias pasivas para conseguir el máximo aprovechamiento de los recursos existentes<sup>4</sup> (Fig. 15).

El edificio contempla una estructura portante de muros y forjados de madera CLT sobre un nivel bajo de pórticos y forjado de hormigón in situ.

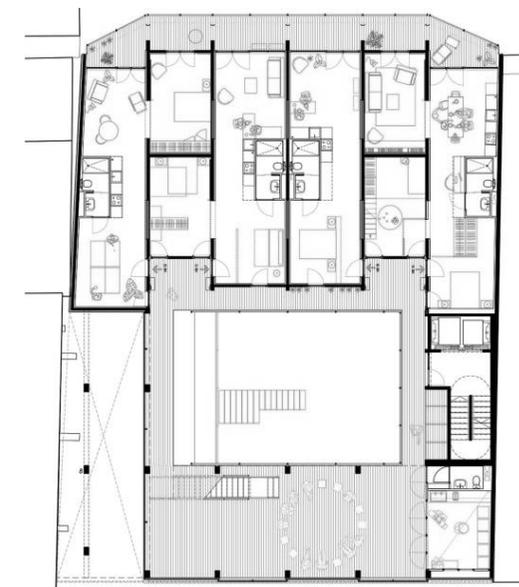


Fig. 15 Planta de segundo nivel, y sección fugada adonde se muestra el sistema resistente vertical y una imagen del proceso de diseño participativo. Recuperado de <http://www.lacol.coop/projectes/laborda/>

<sup>4</sup> <http://www.lacol.coop/projectes/laborda/>

Cabe resaltar los siguientes aspectos de caso de estudio 3:

- a) El sistema resistente vertical está conformado por muros de madera CLT cuyo fabricante procede del País Vasco en España. Son 6 niveles de muros que descansan sobre un forjado que apoya sobre pórticos de hormigón en el nivel bajo por el que se accede al edificio, que es de uso comercial y áreas comunes. En el último nivel hay una terraza, un invernadero al centro y un terrado.
- b) El sistema de muros de madera de CLT contempla valores de resistencia al fuego entre R90 y R120 en los muros del cubo de escaleras. Para la reducción del espesor que demanda la resistencia a fuego en los ejes principales de carga se ha protegido con yeso panel y material ignífugo. Los espesores de los muros son entre 16 y 30 cm así mismo, los ejes verticales son coincidentes con el sistema de pórticos y descargan verticalmente a los cimientos, es decir que no hay nivel subterráneo, esto ha reducido costos y tiempo de ejecución. Por el buen desempeño térmico de la madera, hubo una reducción en el aislamiento debido al forro por protección ignífuga.
- c) En el caso de los forjados, también son de panel de madera CLT y contemplan una capa de compresión de hormigón para efecto de dotar al forjado de mayor rigidez y que ejerza el efecto diafragma, así mismo le confiere aislamiento acústico ante impacto y aéreo. Se realizó visita al edificio en junio de 2018 (Fig. 16).



Fig. 16 Imágenes que muestran los elementos de prefabricación industrializada  
Fuente: Visita al edificio. Rodríguez L. (2018)

### 3.4. Caso de estudio 4

El edificio de 30 viviendas de protección oficial VPO dotacionales para jóvenes en Banyoles promovido por INCASOL ubicado en Girona, España diseñado por Xavier Tragant y Miguel Morte, se compone de planta baja más 3 plantas, construido con unidades modulares tridimensionales de hormigón prefabricado e industrializado, en el que cada módulo constituye una vivienda completamente equipada en la que se concentran los servicios dentro de los módulos 3D en sub núcleos húmedos y el resto de espacio queda resuelto con tabiques livianos.

El sistema modular, es prefabricado bajo un procedimiento patentado en la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos, en el que desataca el proceso de vaciado de hormigón en los planos que componen el módulo iniciando con la losa del piso, continuando con los muros verticales y finalizando con el forjado de techo logrando que la unidad sea monolítica y calculada para resistir las tensiones de izado.

La unidad modular no solo es monolítica, sino, autoportante y en este caso tiene dimensiones 4,5 m de ancho x 10 m de largo x 3,3 m de altura. Estas dimensiones rondan los límites dimensionales con los que usualmente se prefabrica la unidad, pues es condicionado por el peso y por el transporte. (Fig. 17).

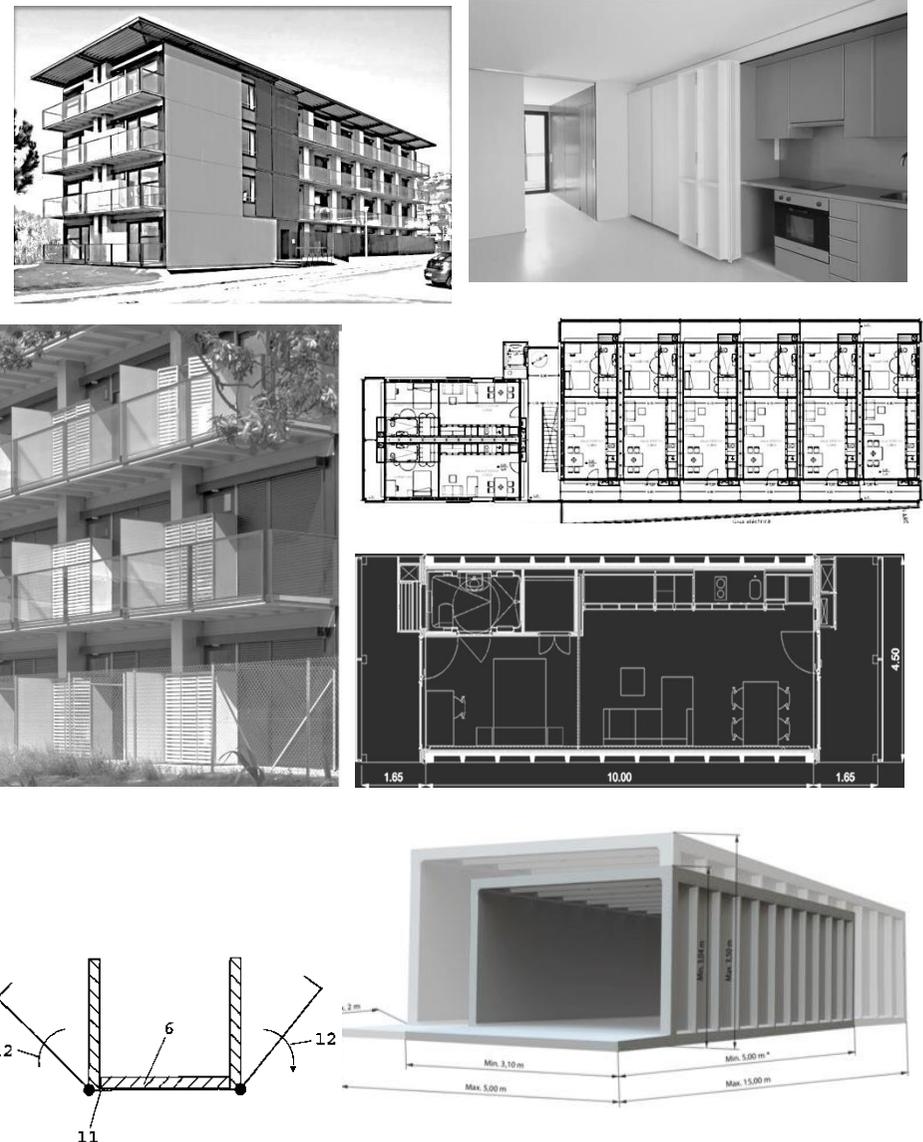


Fig. 17 Imágenes que muestran los elementos de prefabricación industrializada Recuperado de <http://www.compacthabit.com/es/>

### 3.5. Criterios de desarrollo para edificio “X”

Los casos de estudio que se han presentado en los apartados anteriores fueron seleccionados tomando en cuenta la altura promedio de 4 plantas, debido a que se considera a este tipo de edificación, de baja altura, cuya estrategia de estabilidad no requiere mayores aditamentos como es el caso de muros extra o arriostramientos, así mismo se ha tomado en cuenta que la tecnología de pórticos de hormigón prefabricado, contempla al pilar tipo “bandera” con ménsulas para 4 plantas y a partir de esa altura es conveniente optar por estrategias de estabilidad más audaces.

En cada caso de estudio, se buscó hacer énfasis en la descripción del sistema resistente, ya que de la combinación de las características enumeradas en la Fig. 9 que es el resultado de la consulta a información técnica de fabricantes e instituciones reguladoras y la información de los casos de estudio, se estima una base para el desarrollo del edificio X.

Se denomina edificio “X” al edificio representativo para el desarrollo estructural en 7 combinaciones de sistemas estructurales representativas de las tipologías mencionadas en la tabla 5 que suscribe un área de 25 m x 25 m y que potencialmente puede albergar entre 6 y 8 unidades habitacionales (viviendas) por planta con un solo núcleo de escaleras y elevador, de esta forma optimizar tanto las circulaciones

verticales como las horizontales sin contemplar la distribución en planta de las viviendas (Fig. 18).

La dimensión de 25 m responde a dividir esta cantidad entre 3, da como resultado 8,3 m que es separación óptima de los pórticos de hormigón prefabricado en el sentido perpendicular a la dirección de carga, considerando que este sistema industrializado es el más común en el territorio Español.

Otro criterio de desarrollo del edificio “X” es la simetría en planta y la regularidad tanto vertical como horizontal. En esta misma línea se ha buscado distribuir los elementos resistentes verticales de forma simétrica con el objetivo que el centro geométrico coincida con el centro de rigidez.

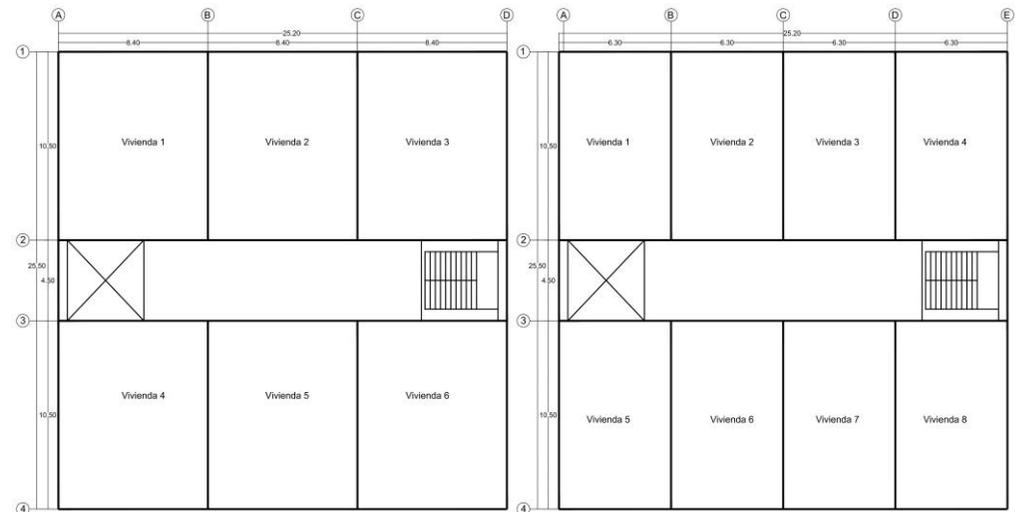
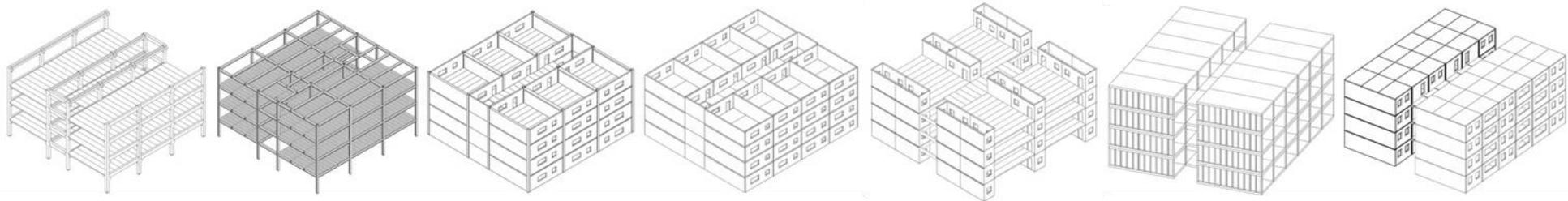


Fig. 18 Imágenes que muestran los elementos de prefabricación industrializada  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL  
A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

# CAPÍTULO IV



#### 4. DESARROLLO ESTRUCTURAL DE EDIFICIO “X”

El denominado edificio “X” es nombrado así por ser un edificio hipotético que cumple ciertas características para ser desarrollado y analizado simultáneamente en las tres combinaciones de sistemas estructurales más comunes y en diversos sistemas de construcción industrializada (Tabla 6) tal como se menciona en el apartado 3.5

Tabla 6. Elementos constructivos del sistema resistente según tipología estructural seleccionados para el análisis.

Sistema estructural	Edificio	Elementos resistentes verticales	Elementos resistentes horizontales	Forjado	Fachada no portante
PÓRTICOS	1-P-H	Pilar hormigón prefabricado	Viga hormigón prefabricada	Placa alveolar	Fachada hormigón prefabricada
	2-P-A	Pilar acero HEB	Viga acero IPE	Chapa grecada	Fachada hormigón prefabricada
MUROS	3-M-H	Muro hormigón prefabricado		Placa alveolar	
	4-M-M	Muro madera CLT		Panel CLT	
MIXTO	5-MIX-H	Módulo semi cerrado		Placa alveolar	
MÓDULOS 3D	6-3D-H	Módulo 3D hormigón prefabricado			
	7-3D-M	Módulos 3D CLT			

Con el objetivo de determinar los volúmenes del sistema resistentes para el análisis de impactos ambientales y de ciclo de vida,

se realiza un proceso preliminar de modulación estructural y un proceso de predimensionado tomando en cuenta el sistema constructivo y resistencia de materiales, para este efecto se establece el estado de cargas evaluando todos los escenarios y combinaciones según la instrucción española de obligado cumplimiento. En este caso solo se consideran las cargas gravitatorias y se desprecian los empujes laterales como un acto de simplificación para efecto de análisis y control de variables, debido a que la rigidez requerida ante empuje lateral podría ocasionar elementos de estabilidad adicionales, ajenos a los sistemas de construcción industrializada seleccionados en el presente trabajo.

Al obtener resultados del predimensionado, son consultados fichas técnicas de fabricantes industriales sobre las características de los elementos constructivos para poder hacer la selección de las secciones con las que se rectifica la modulación estructural, este es un proceso iterativo que puede resumirse así:

- Modulación estructural en planta y sección
- Predimensionado considerando cargas gravitatorias
- Consulta de fichas técnicas y selección de secciones estructurales del sistema resistente
- Rectificación de modulación
- Modelado tridimensional
- Obtención de volúmenes como base de cálculo de impactos

#### 4.1. Bases y consideraciones de Predimensionado

Para esta etapa del análisis se ha consultado la instrucción española de obligatorio cumplimiento en materia de seguridad estructural y según el Documento Básico Seguridad Estructural del Código Técnico de la Edificación CTE-DB-SE, la comprobación estructural de un edificio requiere las siguientes condiciones:

- a) Determinar las situaciones de dimensionado que resulten determinantes.
- b) Establecer las acciones a tener en cuenta y adecuadas a la estructura.
- c) Análisis estructural adoptando método de cálculo adecuado al problema.
- d) Verificación que las situaciones de dimensionado no sobrepasen los estados límites últimos ELU según las combinaciones de acciones acorde al proyecto. También se toma en cuenta el estado límite de servicio ELS para el caso de las deformaciones.

Tomando en cuenta las condiciones del CTE-DB-SE, para el presente análisis se ha realizado la siguiente simplificación para generar los sistemas estructurales que serán sujetos del análisis comparativo:

- a) Se establecen los coeficientes parciales de seguridad para acciones y materiales así como, los coeficientes de simultaneidad para las acciones.

- b) Son generadas las combinaciones de Estados Límite Último y Estado Límite de Servicio para las acciones.
- c) Se establecen las cargas gravitatorias: Carga permanente G y Sobrecarga de uso Q y N (no se toma en cuenta ningún empuje lateral).
- d) Se realizan los escenarios combinatorios de cargas y se selecciona la más desfavorable.
- e) Se realiza el proceso en reversa a la verificación de dimensionado con los ELU, es decir, se genera la incógnita dimensional en la ecuación que relaciona el valor de resistencia de diseño para que no sobrepase al valor de resistencia del código, según sea el sistema, hormigón, acero, madera y según los esfuerzos de los elementos: Axiales, Flexión, Cortante y Deformación (este valor se relaciona con ELS) tomando en cuenta la condición de apoyo como articulado que es una característica de los sistema industrializados.
- f) Según fabricante industrial, se seleccionan las dimensiones iguales o mayores a las de predimensionado con el que se confirma de forma preliminar la estructura.

A continuación, los coeficientes parciales de seguridad ante efecto desfavorable para las acciones y materiales, y los coeficientes de simultaneidad para las acciones (tablas 7 y 8).

Tabla 7. Coeficientes de seguridad según CTE-DB-SE

Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones	$\gamma$	
	desfavorable	servicio desfavorable
Permanente peso propio	1,35	1
Variable	1,5	1
Coeficientes de simultaneidad ( $\psi$ )		
Sobrecarga superficial de uso	$\psi_0$	
Zona residencial categoría A	0,7	
Nieve para altitudes $\leq 1000$ m	0,5	

Las ecuaciones para las combinaciones son:

Estados límites últimos ELU ( $q = 1,35G + 1,5 Q$ )

$\sum \gamma G(\text{permanente}) + \gamma Q1(\text{variable}) + \sum \psi_0 Qk(\text{variable})$

Estados límites servicio ELS ( $q = 1.0 G + 1.0 Q$ )

$\sum \gamma G(\text{permanente}) + \gamma Q1(\text{variable}) + \sum \psi_0 Qk(\text{variable})$

Tabla 8. Combinaciones según CTE-DB-SE

	Combinaciones	G	Q	N
ELU-1	$1.35 G + 1.5 Q + 1.5 \times 0.5 N + 1.5 \times 0.6 V$	1,35	1,5	0,75
ELU-2	$1.35 G + 1.5 \times 0.0 Q + 1.5 N + 1.5 \times 0.6 V$	1,35	1,05	1,5
ELU-3	$1.35 G + 1.5 \times 0.0 Q + 1.5 \times 0.5 N + 1.5 V$	1,35	1,05	0,75
ELS-1	$1.0 G + 1.0 Q + 1.0 \times 0.5 N + 1.0 \times 0.6 V$	1	1	0,5
ELS-2	$1.0 G + 1.0 \times 0.0 Q + 1.0 N + 1.0 \times 0.6 V$	1	0,7	1
ELS-3	$1.0 G + 1.0 \times 0.0 Q + 1.0 \times 0.5 N + 1.0 V$	1	0,7	0,5

Los coeficientes parciales de seguridad de materiales se han recuperado del Código Técnico de la Edificación, Documento Base: Cimientos, Acero, Madera y la Instrucción de Hormigón Estructural, en lo sucesivo nombradas así: CTE-DB-SE-C, CTE-DB-SE-A, CTE-DB-SE-M y EHE-08 (Tablas 9 y 10).

Tabla 9. Coeficientes de seguridad materiales según CTE

$\gamma_c$	$\gamma_a$	$\gamma_m$	$\gamma_r$
Hormigón	Acero	Madera CLT	Suelo
1,5	1,05	1,2	1

Tabla 10. Coeficientes de seguridad madera según CTE-DB-SE-M

Coeficiente $K_{mod}$ Madera							
Clase de servicio	Duración permanente	Duración Larga	Duración media	Duración corta	Instantánea	Ksys	kh
1 y 2	<b>0,6</b>	0,7	0,8	<b>0,9</b>	1,1	<b>1,1</b>	1,0

Merece la pena destacar que en caso de los elementos de madera ha sido considerado los factores  $K_{mod}$  según la duración de la carga por el efecto de relajación de la madera en presencia de humedad.

Las cargas variables como sobrecarga de uso y nieve se han obtenido del Código Técnico de la Edificación, Documento Base, Seguridad Estructural, Acciones en la edificación CTE-DB-SE-AE

Para efectos de cálculo se ha considerado que el edificio “X” contempla uso de vivienda y se ubica en Barcelona, de esta forma se

consideran las cargas variables para todos los sistemas a desarrollar como en la tabla 11.

Tabla 11. Cargas variables CTE-DB-SE-AE

CARGAS VARIABLES Q	
Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>
Vivienda	2,0
Cubierta accesible	1,0
Carga de Nieve en Barcelona	0,4

En este apartado se han mostrado los datos en común para los sistemas. Las cargas permanentes serán calculadas por cada uno de los sistemas predimensionados.

Los elementos a predimensionar son: Pilares, vigas, muros, forjados, cimentación aislada y continua, en el caso de los módulos 3D, e estima el espesor del envolvente vertical y horizontal del módulo, debido a que en la consulta a fabricantes, se estiman longitudes y anchos máximos de elementos, limitados por el transporte. Quedan fuera del predimensionado estructura de circulaciones verticales a menos que sea parte del sistema resistente.

En el caso de los pilares se ha buscado su comprobación de pandeo, tomando en cuenta los valores de beta según la restricción del pilar y el material (hormigón y acero).

En el caso de los muros ha de despreciarse la flexión si el espesor es la longitud entre 65 según CTE-DB-SE-M

En el caso de las cargas de elementos horizontales se ha previsto el cálculo de flecha en vigas y forjados para verificar que la deformación no exceda  $L/300$  según CTE-DB-SE. También se ha calculado el forjado de cubierta con carga de nieve y el de las planta de vivienda, tomando las dimensiones de fabricante para el caso más desfavorable.

Otra consideración es, que se asume el valor de resistencia del terreno con un valor de  $0,2 \text{ N/mm}^2$  que es un valor característico cuando no se conoce con precisión la resistencia.

En los siguientes apartados se presentan el cálculo de predimensionado sistematizado los datos en un grupo de tablas enumeradas para cada sistema.

Los grupos de tablas contemplan (Tablas de la 12 a la 18):

- Resultado de predimensionado de consulta a hojas técnicas de fabricantes
- Estado de cargas
- Combinaciones de cargas
- Cálculo de secciones predimensionadas.

## 4.2. Predimensionado sistema de pórticos de hormigón prefabricado edificio 1-P-H

Tablas 12. Grupo de tablas de predimensionado 1-P-H

Resultado predimensionado	
Elemento	Dimensiones (cm)
Pilar con ménsulas	50 x 50
Vigas T y L	50 x (40+25)
Placa alveolar + capa de compresión	25+5 x 120 x Longitud
Zapata	250 x 250 x 50

CARGA PERMANENTE G				
	Tipo de carga	Densidad característica $\rho_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	Peso/longitud (kN/m)	Peso/superficie (kN/m <sup>2</sup> )
a	Peso de forjado de losa alveolar			4,97
b	Peso de aislamiento de cubierta			1,00
c	Peso de tabiquería			1,00
d	Peso capa de compresión hormigón 5 cm	24,0		1,20
e	Peso de vigas de hormigón		6,6	
f	Peso de pilares de hormigón		5,8	
g	Peso de fachada tipo panel de hormigón			3,00
CARGAS VARIABLES Q				
	Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>		
h	Vivienda	2,0		
i	Cubierta accesible	1,0		
j	Carga de Nieve en Barcelona	0,4		

CARGAS PERMANENTES G							
Elemento de superficie	Peso/superficie hor. (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (a+b+d)	7,17	7,5	8,4	451,7	1	451,7	53,8
Forjado piso (a+c+d)	7,17	7,5	8,4	451,7	3	1355,1	53,8
Elemento longitudinal	Peso/longitud (kN/m)	altura (m)	longitud (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Viga ( e )	6,56		8,4	55,1	4	220,4	6,6
Pilar (f)	5,80	15		87,0	1	87,0	
Elemento vertical	Peso/superficie vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Altura (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	
Fachada (g)	3,00	0,12	3,75	1,4	4	5,4	
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>2119,7</b>	<b>60,3</b>
CARGAS VARIABLES Q							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (i)	1,00	7,5	8,4	63,0	1	63,0	7,5
Forjado piso (h)	2,00	7,5	8,4	126,0	3	378,0	15,0
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>441,0</b>	
CARGAS VARIABLES N							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (j)	0,40	7,5	8,4	25,2	1	25,2	3,0
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>25,2</b>	

<b>COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR PILAR</b>								
	factor G	Carga G (kN)	factor Q	Carga Q (kN)	factor N	Carga N (kN)	Sumatoria de cargas Nd (kN)	Carga desfavorable (kN)
<b>ELU 1</b>	1,35	<b>2861,54</b>	1,5	<b>661,50</b>	0,75	<b>18,90</b>	<b>3541,94</b>	<b>3541,94</b>
<b>ELU 2</b>	1,35	<b>2861,54</b>	1,05	<b>463,05</b>	1,5	<b>37,80</b>	<b>3362,39</b>	
<b>ELU 3</b>	1,35	<b>2861,54</b>	1,05	<b>463,05</b>	0,75	<b>18,90</b>	<b>3343,49</b>	
<b>COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR VIGA PISO</b>								
	factor G	Carga G (kN/m)	factor Q	Carga Q (kN/m)	factor N	Carga N (kN/m)	Sumatoria de cargas Nd (kN/m)	Carga desfavorable (kN/m)
<b>ELU 1</b>	1,35	<b>81,45</b>	1,5	<b>22,50</b>	0,75	<b>0,00</b>	<b>103,95</b>	<b>103,95</b>
<b>ELU 2</b>	1,35	<b>81,45</b>	1,05	<b>15,75</b>	1,5	<b>0,00</b>	<b>97,20</b>	
<b>ELU 3</b>	1,35	<b>81,45</b>	1,05	<b>15,75</b>	0,75	<b>0,00</b>	<b>97,20</b>	
<b>ELS 1</b>	1	<b>60,34</b>	1	<b>15,00</b>	1	<b>0,00</b>	<b>75,34</b>	<b>75,34</b>
<b>ELS 2</b>	1	<b>60,34</b>	0,7	<b>10,50</b>	1	<b>0,00</b>	<b>70,84</b>	
<b>ELS 3</b>	1	<b>60,34</b>	0,7	<b>10,50</b>	0,5	<b>0,00</b>	<b>70,84</b>	
<b>COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR VIGA CUBIERTA (omitida)</b>								
	factor G	Carga G (kN/m)	factor Q	Carga Q (kN/m)	factor N	Carga N (kN/m)	Sumatoria de cargas Nd (kN/m)	Carga desfavorable (kN/m)
<b>ELU 1</b>	1,35	<b>81,45</b>	1,5	<b>11,25</b>	0,75	<b>2,25</b>	<b>94,95</b>	<b>94,95</b>
<b>ELU 2</b>	1,35	<b>81,45</b>	1,05	<b>7,88</b>	1,5	<b>4,50</b>	<b>93,83</b>	
<b>ELU 3</b>	1,35	<b>81,45</b>	1,05	<b>7,88</b>	0,75	<b>2,25</b>	<b>91,58</b>	

PREDIMENSIONADO DE PILAR A COMPRESIÓN $f_{c,d} = N_d/A$										
PILAR	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	<b>b (mm)</b>				
		3541,94	1,5	30	20,00	177096,78	<b>421</b>			
COMPROBACIÓN DE ESBELTEZ MECÁNICA $l = Lk/i < 35$										
a (m)	b (m)	Área (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	i (m)	L(m)	$\beta$	Lk= L b(m)	$l=Lk/i$		
<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	0,25	0,0052	0,1	3,75	1,5	5,6	<b>38,97</b>		
PREDIMENSIONADO DE VIGAS A FLEXIÓN SIMPLE $f_{c,d} = M_d/W$										
VIGA	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/10$ (kNm)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{c,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	<b>h (mm)</b>	
	103,95	8,4	733,49	1,5	30	20,00	36674353,80	500,00	<b>663</b>	
PREDIMENSIONADO DE VIGAS POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$										
VIGA	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	Constante=2,5(5/384)	$I = Cte * q * L^4 / E \delta_{total}$	<b><math>h = (12 * I / a) / 1/3</math> (mm)</b>		
	75,34	8400,0	30000,0	500,00	28,00	0,03	14534946562,50	<b>659,27</b>		
PREDIMENSIONAMIENTO VIGAS A CORTANTE $V_{plrd} = A_v f_{cd} / \sqrt{3}$										
VIGA	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$V = ql/2$ (kN)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	a (mm)	<b>h (mm)</b>	
	103,95	8,4	436,60	1,5	20	13,33	56715,93	500,00	<b>113,43</b>	
PREDIMENSIONADO DE FORJADO DE PLACA ALVEOLAR A FLEXIÓN SIMPLE $f_{c,d} = M_d/W$										
FORJADO	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/8$ (kNm)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{c,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	<b>h (mm)</b>	
	18,82	9,8	225,88	1	30	30,00	7529295,90	1200,00	<b>194</b>	
PREDIMENSIONADO DE FORJADO POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$										
FORJADO	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	Constante=2,5(5/384)	$I = Cte * q * L^4 / E \delta_{total}$	<b><math>h = (12 * I / a) / 1/3</math> (mm)</b>		
	18,82	9800,0	30000,0	1200,00	32,67	0,03	5764617173,44	<b>354</b>		
PREDIMENSIONADO DE ZAPATA A COMPRESIÓN $f_{adm} = N_d/A$										
ZAPATA	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$\gamma_c$	$F_{adm}$ k asumida (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área planta (mm <sup>2</sup> )	<b>lado en planta a (mm)</b>	canto $h = a \cdot b/4$ (mm)	<b>canto mínimo h=500mm</b>	vuelo $v=2h$	<b>lado a= 2v+b</b>
	3541,94	1	0,2	0,20	1770967,80	<b>1331</b>	332,57	<b>500</b>	1000,00	<b>2500</b>

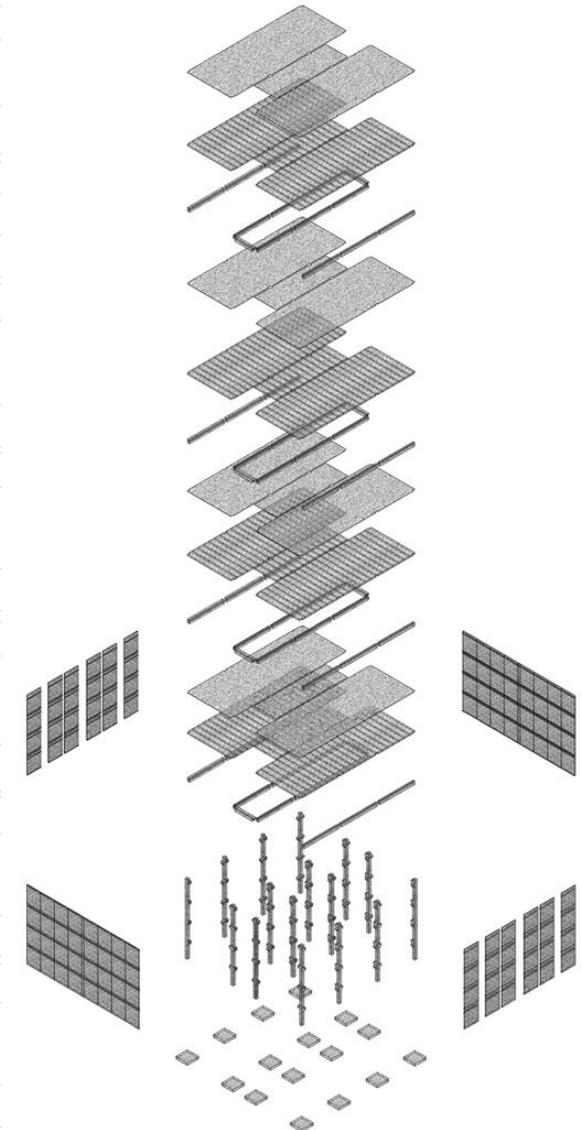


Fig. 19 Izado y ensamblaje edificio 1-P-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

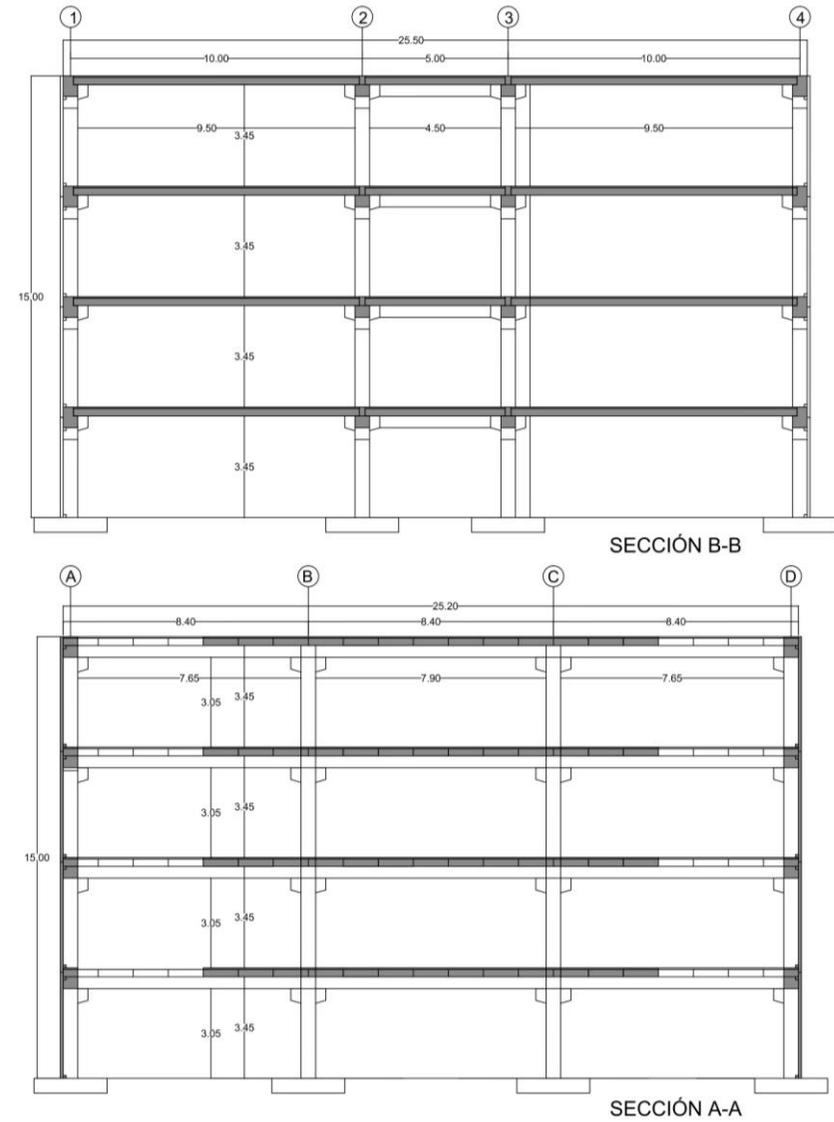
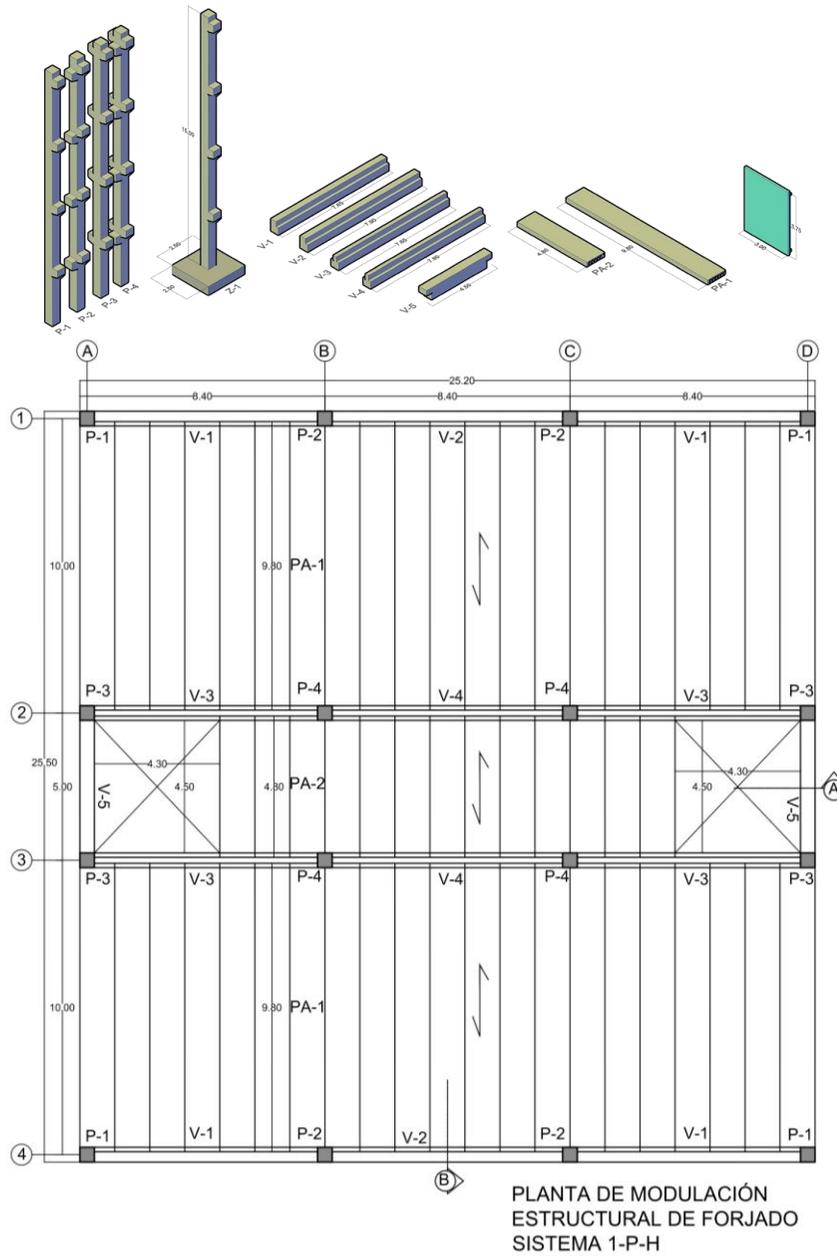


Fig. 20 Modulación en planta y sección edificio 1-P-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

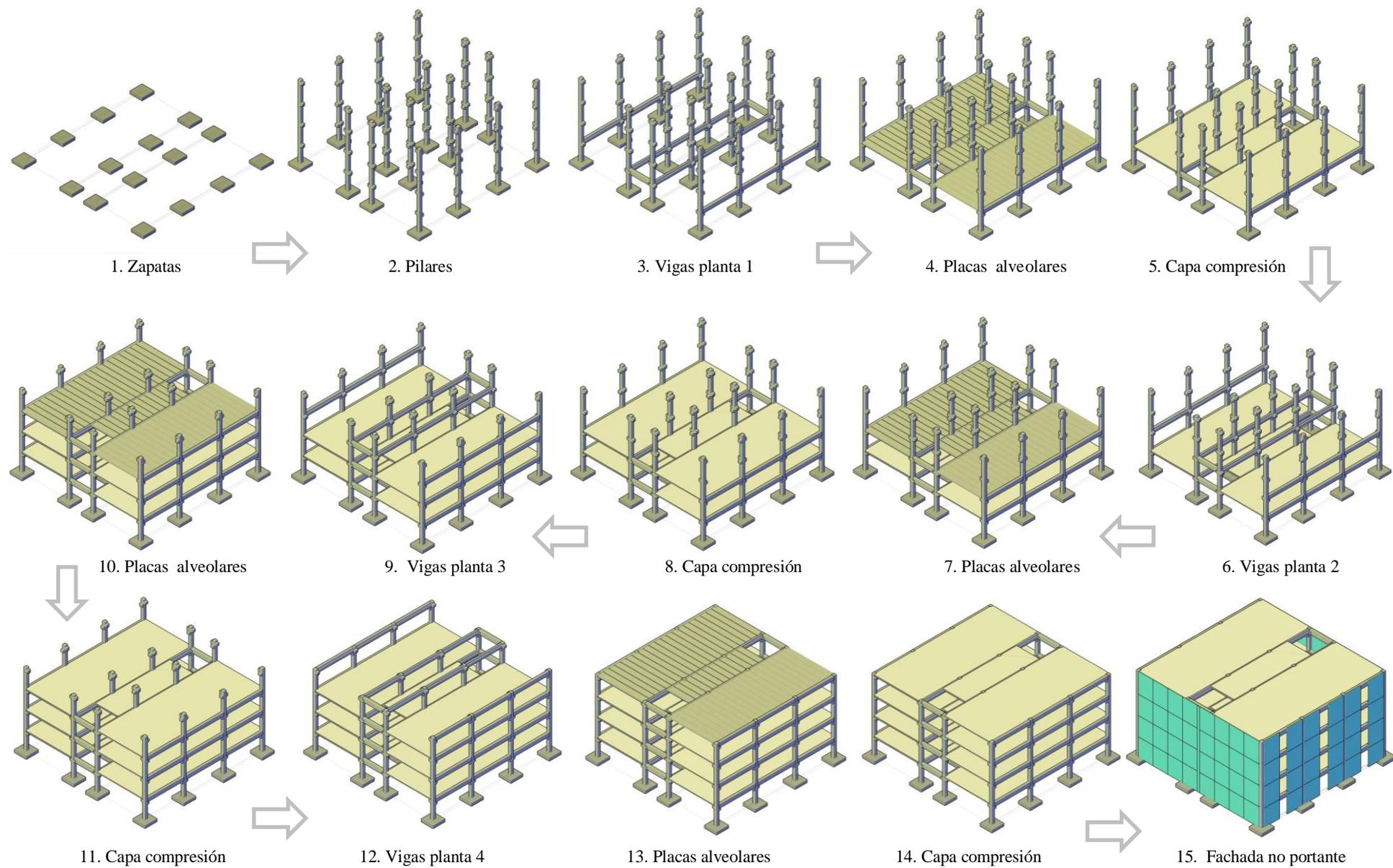


Fig. 21 Proceso de ensamblaje edificio 1-P-H Fuente: Rodríguez L. (2019)

### 4.3. Predimensionado sistema de pórticos de acero laminado edificio 2-P-A

Tablas 13. Grupo de tablas de predimensionado 2-P-A

Resultado predimensionado	
Elemento	Dimensiones (cm)
Pilar HEB 400	30 x 40
Vigas IPE 500	20 x 50
Chapa grecada y capa de compresión	14 x 88 x 0.08
Zapata	240 x 240 x 50

CARGA PERMANENTE G				
	Tipo de carga	Densidad característica $\rho_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	Peso/longitud (kN/m)	Peso/superficie (kN/m <sup>2</sup> )
a	Peso de forjado de chapa colaborante metálica MT-76 de 0,8 mm			0,10
b	Peso de aislamiento de cubierta			1,00
c	Peso de tabiquería			1,00
d	Peso capa de compresión hormigón 14 cm	24,0		3,36
e	Peso de vigas de acero IPE 600		0,9	
f	Peso de pilares de acero HEB400		1,6	
g	Peso de fachada liviana de panel de yeso			1,00
CARGAS VARIABLES Q				
	Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>		
h	Vivienda	2,0		
i	Cubierta accesible	1,0		
j	Carga de Nieve en Barcelona	0,4		

CARGAS PERMANENTES G							
Elemento de superficie	Peso/superficie hor. (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (a+b+d)	4,46	8,4	7,5	281,0	1	281,0	37,5
Forjado piso (a+c+d)	4,46	8,4	7,5	281,0	3	842,9	37,5
Elemento longitudinal	Peso/ longitud (kN/m)	altura (m)	longitud (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Viga ( e )	0,90		8,4	7,6	4	30,2	0,9
Pilar ( f )	1,55	3,75		5,81	4	23,3	
Elemento vertical	Peso/superficie vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Altura (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	
Fachada ( g )	1,00	0,12	3,75	0,5	4	1,8	
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>1179,2</b>	<b>38,4</b>
CARGAS VARIABLES Q							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (i)	1,00	8,4	7,5	63,0	1	63,0	8,4
Forjado piso (h)	2,00	8,4	7,5	126,0	3	378,0	16,8
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>441,0</b>	
CARGAS VARIABLES N							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (j)	0,40	8,4	7,5	25,2	1	25,2	3,4
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>25,2</b>	

COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR PILAR								
	factor G	Carga G (kN)	factor Q	Carga Q (kN)	factor N	Carga N (kN)	Sumatoria de cargas Nd (kN)	Carga desfavorable (kN)
ELU 1	1,35	1591,93	1,5	661,50	0,75	18,90	2272,33	2272,33
ELU 2	1,35	1591,93	1,05	463,05	1,5	37,80	2092,78	
ELU 3	1,35	1591,93	1,05	463,05	0,75	18,90	2073,88	

COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR VIGA PISO								
	factor G	Carga G (kN/m)	factor Q	Carga Q (kN/m)	factor N	Carga N (kN/m)	Sumatoria de cargas Nd (kN/m)	Carga desfavorable (kN/m)
ELU 1	1,35	51,79	1,5	25,20	0,75	0,00	76,99	76,99
ELU 2	1,35	51,79	1,05	17,64	1,5	0,00	69,43	
ELU 3	1,35	51,79	1,05	17,64	0,75	0,00	69,43	
ELS 1	1	38,36	1	16,80	1	0,00	55,16	55,16
ELS 2	1	38,36	0,7	11,76	1	0,00	50,12	
ELS 3	1	38,36	0,7	11,76	0,5	0,00	50,12	

COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR VIGA CUBIERTA (omitida)								
	factor G	Carga G (kN/m)	factor Q	Carga Q (kN/m)	factor N	Carga N (kN/m)	Sumatoria de cargas Nd (kN/m)	Carga desfavorable (kN/m)
ELU 1	1,35	51,79	1,5	12,60	0,75	2,52	66,91	66,91
ELU 2	1,35	51,79	1,05	8,82	1,5	5,04	65,65	
ELU 3	1,35	51,79	1,05	8,82	0,75	2,52	63,13	

PREDIMENSIONADO DE PILAR A COMPRESIÓN $f_{y,d} = N_d/A$						
PILAR HEB-400	Carga concentrada Nd (kN)	$\gamma_{mo}$	Fyk (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>y,d</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )
	2272,33	1,05	275	261,90	8676,18	87

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2] \quad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \lambda^2}} \text{ siendo } \chi \leq 1.0$$

COMPROBACIÓN DE ESBELTEZ MECÁNICA $I = L_k/i < 35$																			
PILAR HEB-400	Carga concentrada Nd (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	i (cm)	L (cm)	$\beta$	L <sub>k</sub> = L b (m)	I = L <sub>k</sub> /i	(cp=a) a	E (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_{mo}$	Fyk (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>y,d</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E*I = [I]° E/fy	lad	$\phi$	$\chi$	Carga concentrada Nbrd (kN)	Nd < Nbrd	
	2272,33	197,8	17,08	375,00	0,7	262,5	15,37	0,20	210000,0	1,05	275	261,90	86,81	0,18	0,51	1,00	5205,17	CUMPLE	

PREDIMENSIONADO DE VIGAS A FLEXIÓN SIMPLE $f_{y,d} = M_d/W$										
VIGA IPE-500 1	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/10$ (kNm)	$\gamma_{mo}$	$F_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{y,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{y,d}$ (mm <sup>3</sup> )	W (cm <sup>3</sup> )		
	42,77	10,0	427,73	1,05	275	261,90	1633150,91	1633,15		
PREDIMENSIONADO DE VIGAS POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$										
VIGA IPE-500 1	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	Constante=2,5(5/384)	$I = C_{te} * q * L^4 / E \delta_{total}$	h=(12*I/a)/1/3 (mm)		
	30,65	10000,0	210000,0	200,00	33,33	0,03	1425161210,32	414,54		
PREDIMENSIONAMIENTO VIGAS A CORTANTE $V_{plrd} = A_v f_{y,d} / \sqrt{3}$										
VIGA IPE-500 1	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	V= ql/2 (kN)	$\gamma_{mo}$	$F_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{y,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )		
	42,77	10,0	213,87	1,05	275	261,90	1414,35	14,14		
PREDIMENSIONADO DE VIGAS A FLEXIÓN SIMPLE $f_{c,d} = M_d/W$										
VIGA IPE-500 2	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/10$ (kNm)	$\gamma_{mo}$	$F_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{y,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{y,d}$ (mm <sup>3</sup> )	W (cm <sup>3</sup> )		
	38,50	8,4	271,63	1,05	275	261,90	1037116,15	1037,12		
PREDIMENSIONADO DE VIGAS POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/250$										
VIGA IPE-500 2	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	Constante=2,5(5/384)	$I = C_{te} * q * L^4 / E \delta_{total}$	h=(12*I/a)/1/3 (mm)		
	27,58	8400,0	210000,0	200,00	28,00	0,03	760228875,00	336,90		
PREDIMENSIONADO DE FORJADO COLABORANTE A FLEXIÓN SIMPLE $f_{y,d} = M_d/W$										
FORJADO	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/8$ (kNm)	$\gamma_{mo}$	$F_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{y,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{y,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	h (mm)	
	31,75	8,4	280,07	1,05	275	261,90	1069356,56	800,00	90	
PREDIMENSIONADO DE FORJADO POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$										
FORJADO	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	Constante=2,5(5/384)	$I = C_{te} * q * L^4 / E \delta_{total}$	h=(12*I/a)/1/3 (mm)		
	31,75	3400,0	210000,0	880,00	11,33	0,03	58038321,79	88,40		
PREDIMENSIONADO DE ZAPATA A COMPRESIÓN $f_{adm} = N_d/A$										
ZAPATA	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$\gamma_c$	$F_{adm}$ k asumida (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área planta (mm <sup>2</sup> )	lado en planta a (mm)	canto h = a-b/4 (mm)	canto mínimo h=500mm	vuelo v=2h	lado a= 2v+b
	2272,33	1	0,2	0,20	1136166,75	1066	258,82	500	1000,00	2400

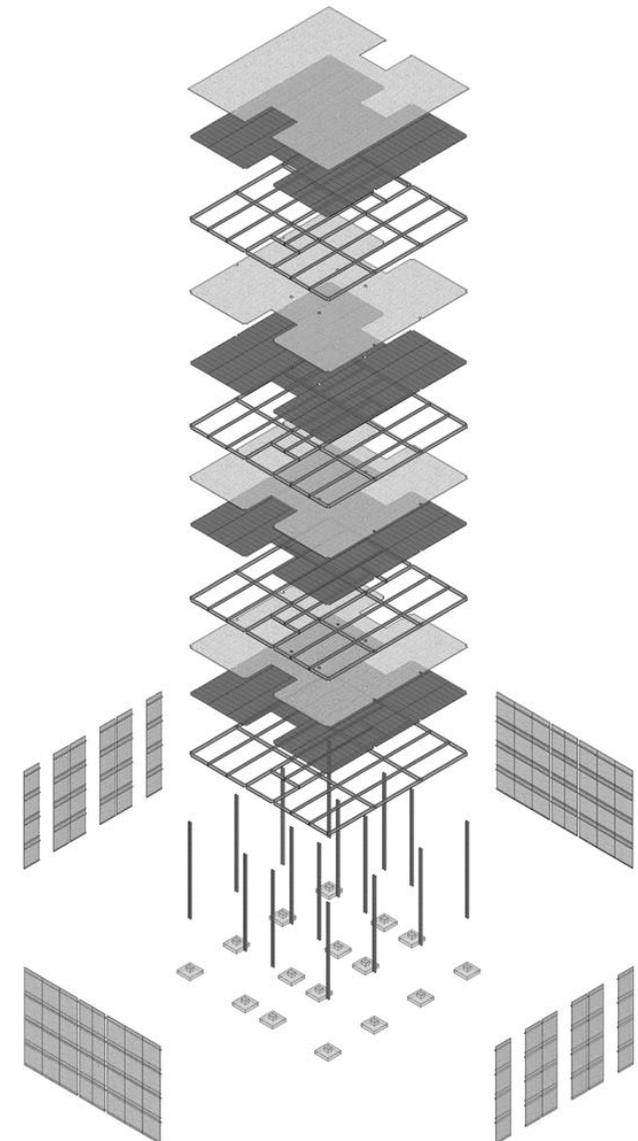
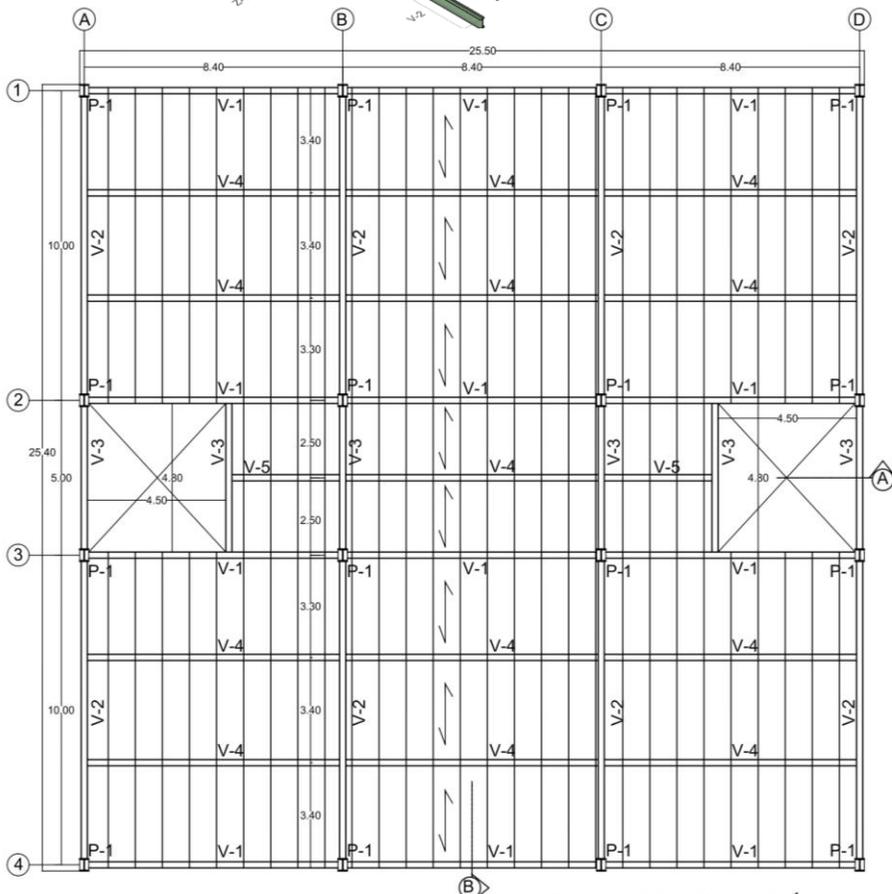
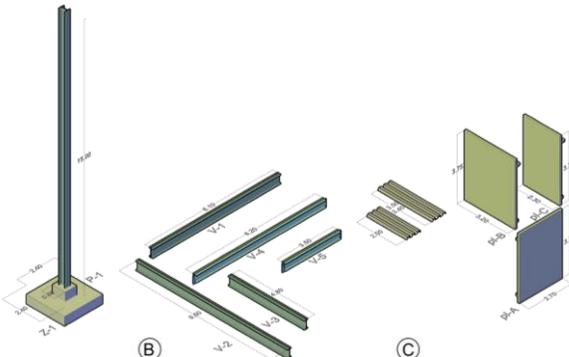
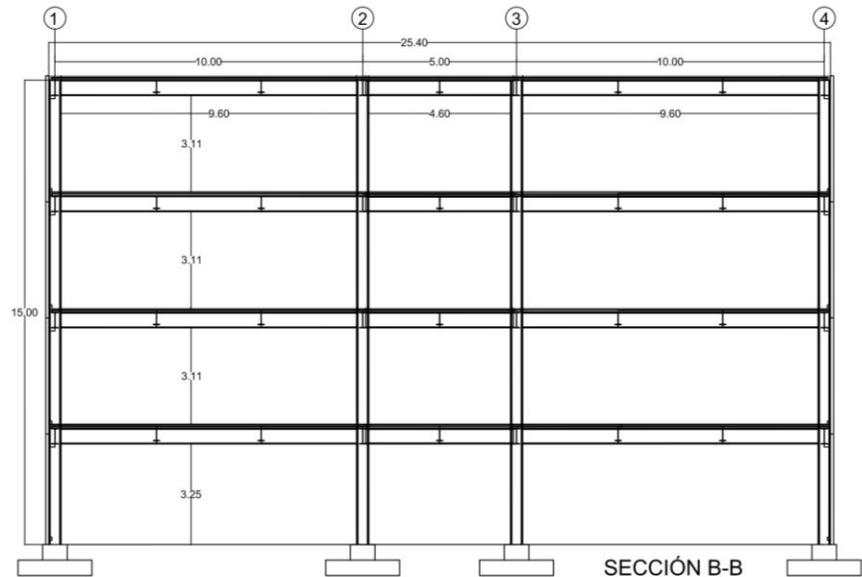


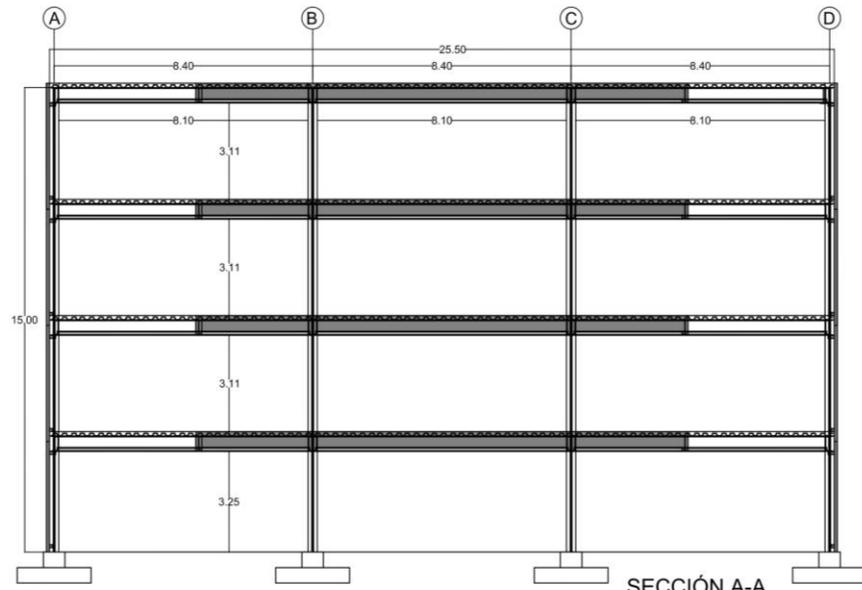
Fig. 22 Izado y ensamblaje edificio 2-P-A  
Fuente: Rodríguez L. (2019)



PLANTA DE MODULACIÓN  
ESTRUCTURAL DE FORJADO  
SISTEMA 2-P-A



SECCIÓN B-B



SECCIÓN A-A

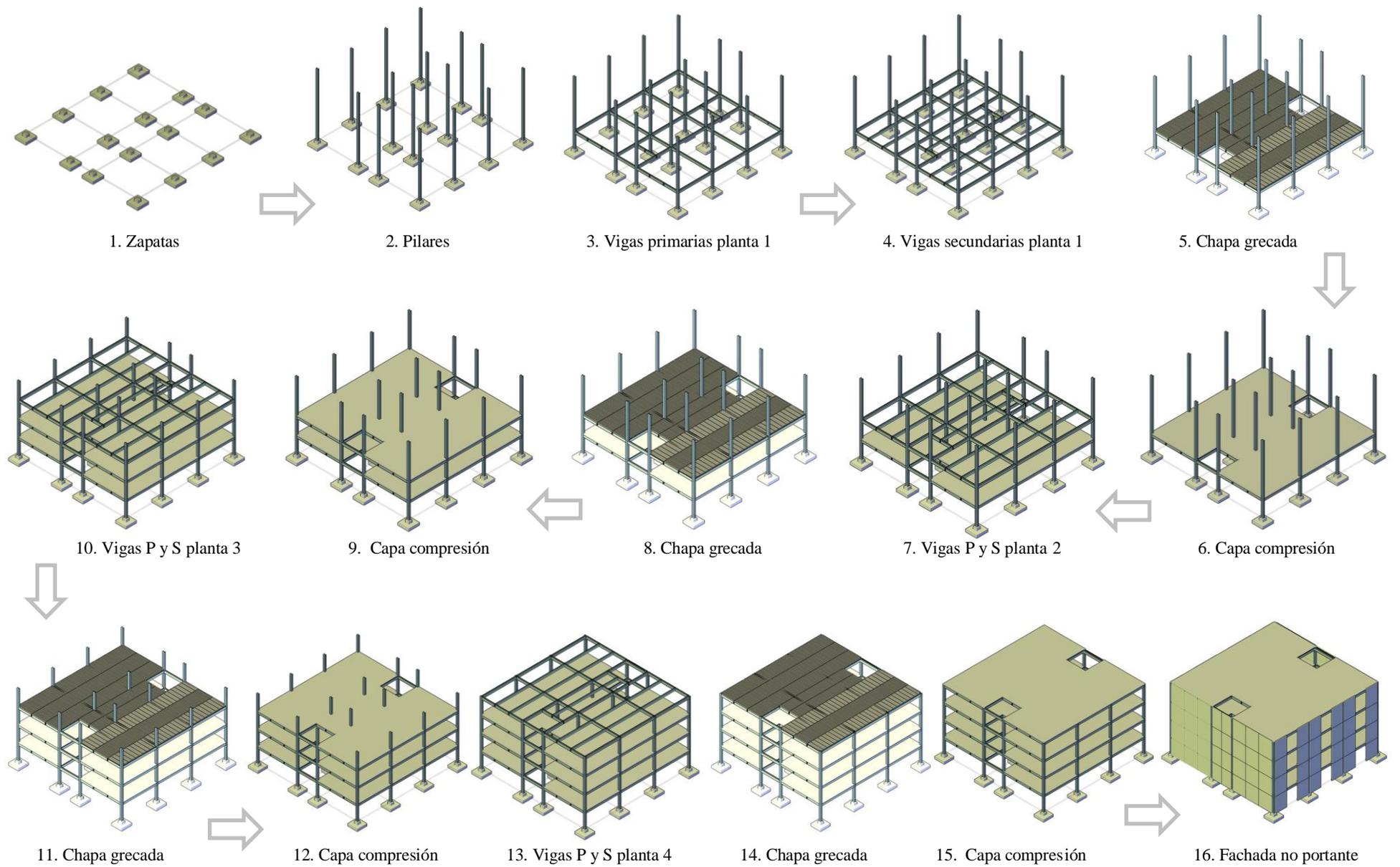


Fig. 24 Proceso de ensamblaje edificio 2-P-A Fuente: Rodríguez L. (2019)

#### 4.4. Predimensionado sistema de muros de hormigón prefabricado edificio 3-M-H

Tablas 14. Grupo de tablas de predimensionado 3-M-H

Resultado predimensionado	
Elemento	Dimensiones (cm)
Muro de hormigón prefabricado	20 x 300 x Longitud
Placa alveolar + capa de compresión	25+5 x 12 x Longitud
Zapata corrida	140 x 80 x Longitud

CARGA PERMANENTE G				
	Tipo de carga	Densidad característica $\rho_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	Peso/longitud (kN/m)	Peso/superficie (kN/m <sup>2</sup> )
a	Peso de forjado de losa alveolar			4,97
b	Peso de aislamiento de cubierta			1,00
c	Peso de tabiquería			1,00
d	Peso capa de compresión hormigón 5 cm	24,0		1,20
e	Peso de vigas			
f	Peso de muros portantes			3,00
g	Peso de fachada			
CARGAS VARIABLES Q				
	Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>		
h	Vivienda	2,0		
i	Cubierta accesible	1,0		
j	Carga de Nieve en Barcelona	0,4		

CARGAS PERMANENTES G							
Elemento de superficie	Peso/superficie hor. (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (a+b+d)	7,17	8,5	9,6	585,1	1	585,1	60,9
Forjado piso (a+c+d)	7,17	8,5	9,6	585,1	3	1755,2	60,9
Elemento longitudinal	Peso/ longitud (kN/m <sup>2</sup> )	altura (m)	espesor (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Viga ( e )							
Muro (f)	3,00	3,25	0,2	2,0	4	7,8	
Elemento vertical	Peso/superficie vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Altura (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	
Fachada (g)							
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>2348,1</b>	<b>60,9</b>
CARGAS VARIABLES Q							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (i)	1,00	8,5	9,6	81,6	1	81,6	8,5
Forjado piso (h)	2,00	8,5	9,6	163,2	3	489,6	17,0
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>571,2</b>	
CARGAS VARIABLES N							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (j)	0,40	8,5	9,6	32,6	1	32,6	3,4
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>32,6</b>	

COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR MURO								
	factor G	Carga G (kN)	factor Q	Carga Q (kN)	factor N	Carga N (kN)	Sumatoria de cargas Nd (kN)	Carga desfavorable (kN)
ELU 1	1,35	3169,92	1,5	856,80	0,75	24,48	4051,20	4051,20
ELU 2	1,35	3169,92	1,05	599,76	1,5	48,96	3818,64	
ELU 3	1,35	3169,92	1,05	599,76	0,75	24,48	3794,16	

PREDIMENSIONADO DE MURO DE HORMIGÓN A COMPRESIÓN $f_{c,d} = N_d/A$								
MURO H	Carga concentrada Nd (kN)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	L (mm)	espesor e (mm)	$e = h/16$ (mm)
	4051,20	1,5	30	20,00	202559,94	1200	169	203,13

PREDIMENSIONADO DE FORJADO DE PLACA ALVEOLAR A FLEXIÓN SIMPLE $f_{c,d} = M_d/W$									
FORJADO	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/8$ (kNm)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{c,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	h (mm)
	15,22	8,5	137,41	1,5	30	20,00	6870704,06	1200	185

PREDIMENSIONADO DE FORJADO POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$									
FORJADO	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	Constante = 2,5(5/384)	$I = Cte * q * L^4 / E \delta_{total}$	$h = (12 * I / a) / 1/3$ (mm)	
	15,22	8500,0	30000,0	1200,00	28,33	0,03	3041717944,34	285	

PREDIMENSIONADO DE ZAPATA CORRIDA A COMPRESIÓN $f_{adm} = N_d/A$								
ZAPATA CORRIDA	Carga concentrada Nd (kN)	$\gamma_c$	Fadm k asumida (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área sección (mm <sup>2</sup> )	canto mínimo h=600mm	ancho a (mm) para L=1,0	
	4051,20	1	0,2	0,20	1350399,60	800	1350,40	

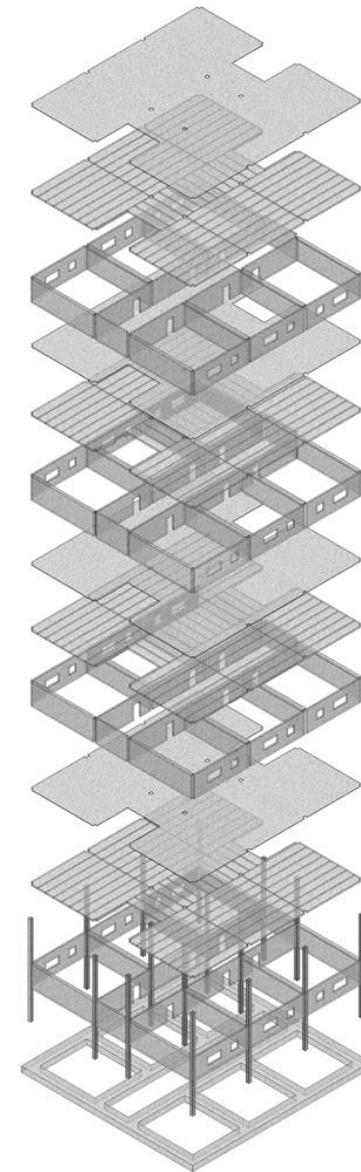


Fig. 25 Izado y ensamblaje edificio 3-M-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

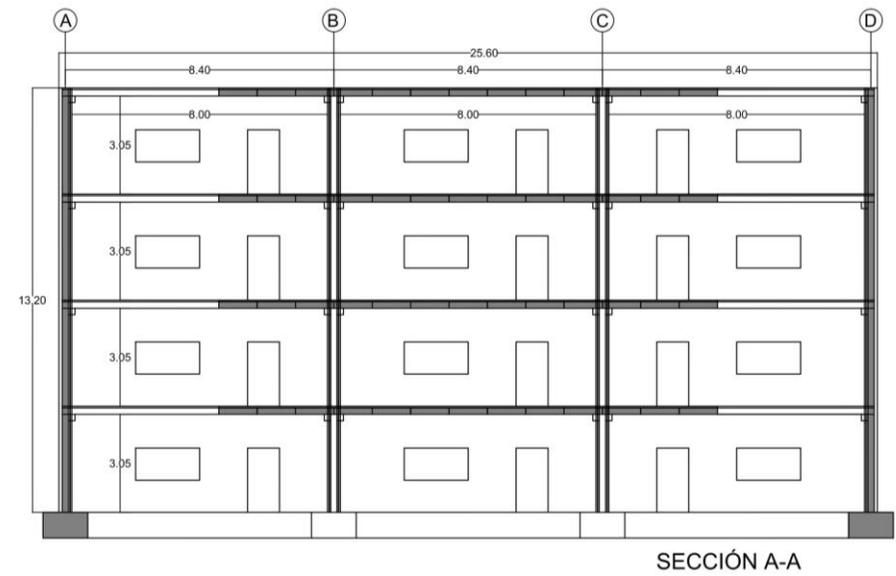
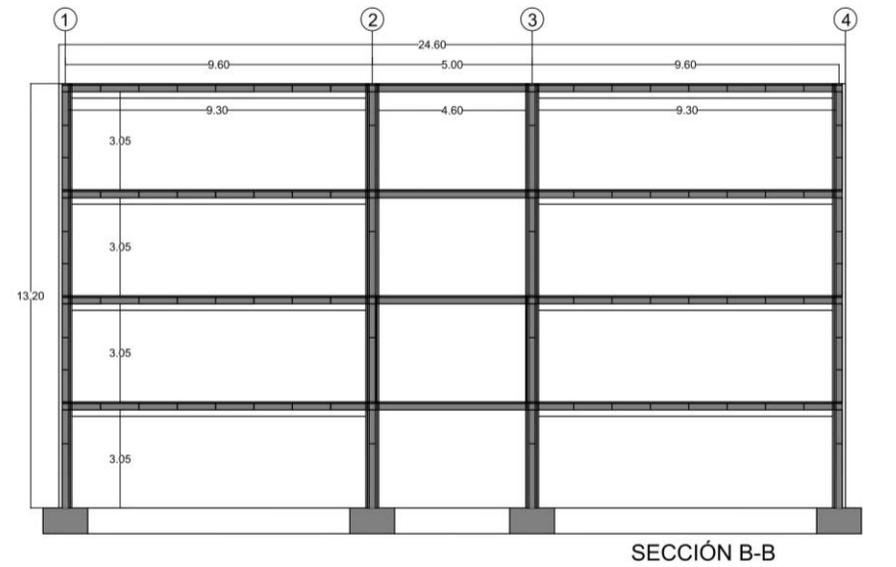
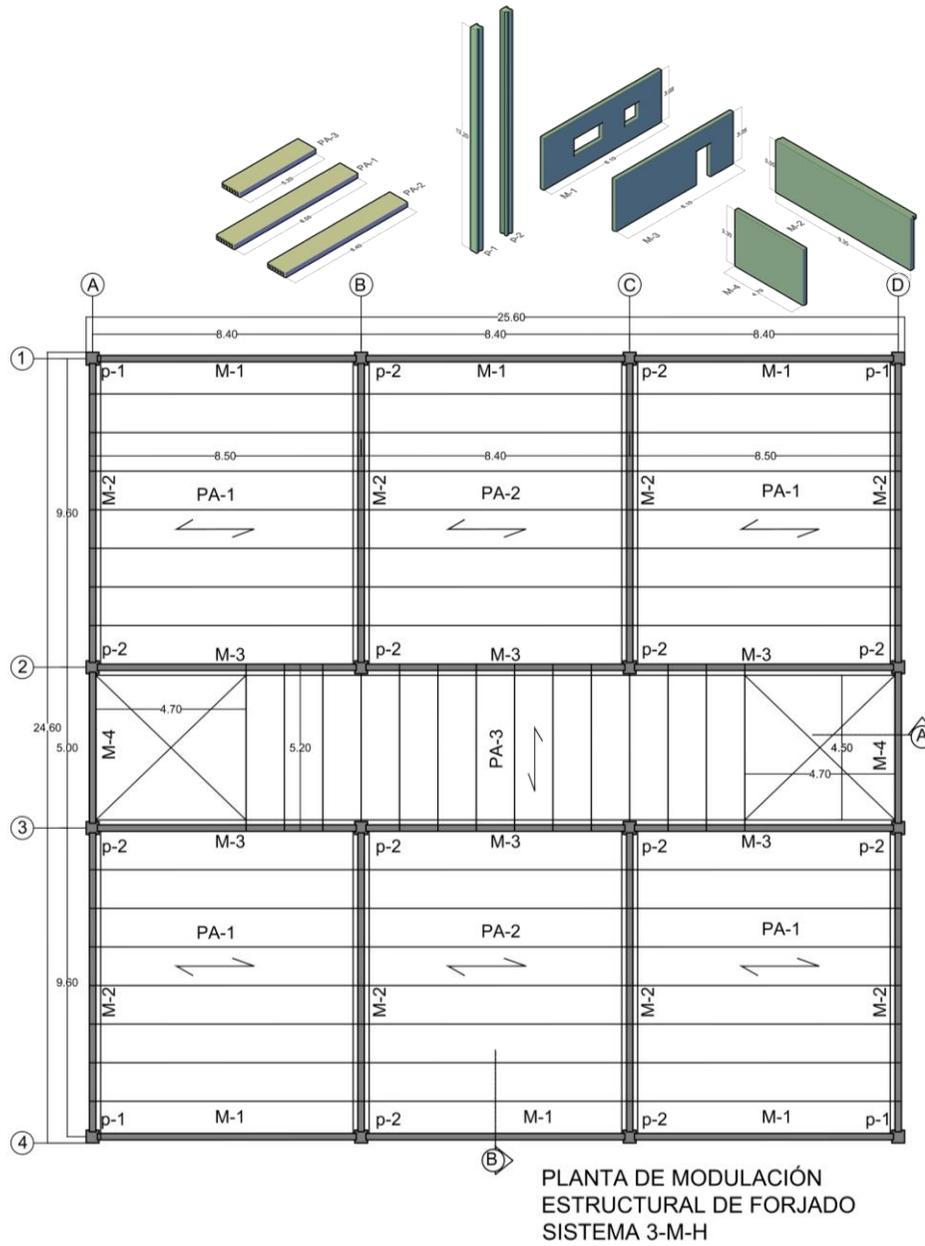


Fig. 26 Modulación en planta y sección edificio 3-M-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

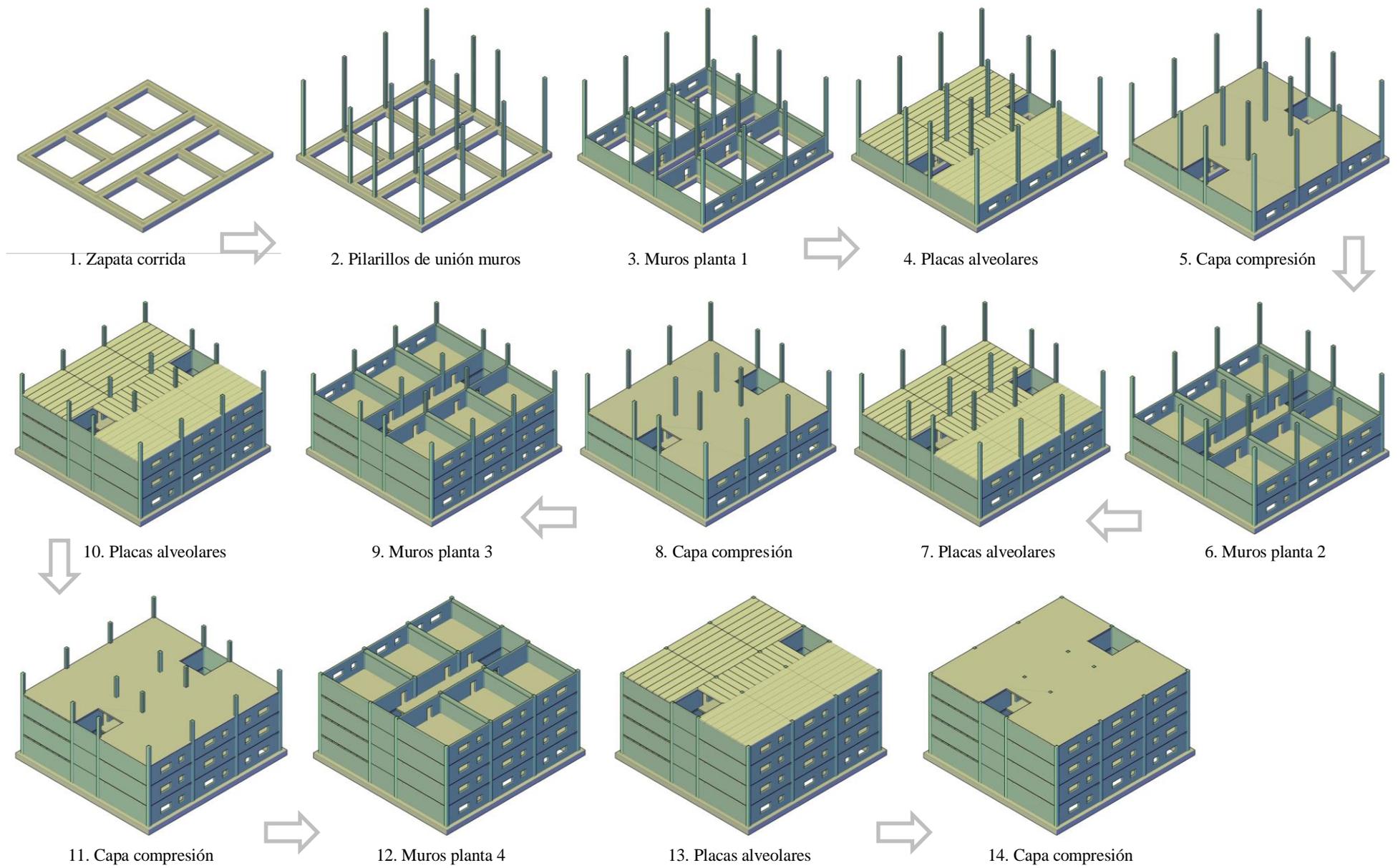


Fig. 27 Proceso de ensamblaje edificio 3-M-HFuente: Rodríguez L. (2019)

#### 4.5. Predimensionado sistema de muros de madera CLT

##### edificio 4-M-M

Tablas 15. Grupo de tablas de predimensionado 4-M-M

Resultado predimensionado	
Elemento	Dimensiones (cm)
Muro de madera CLT	16.5 x 300 x Longitud
Paneles de forjado de madera CLT	22.5 x 330 x Longitud
Zapata corrida	120 x 60 x Longitud

CARGA PERMANENTE G				
	Tipo de carga	Densidad característica $\rho_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	Peso/longitud (kN/m)	Peso/superficie (kN/m <sup>2</sup> )
a	Peso de panel de forjado 22,5cm	5,5		1,65
b	Peso de aislamiento de cubierta			1,00
c	Peso de tabiquería			1,00
d	Peso capa de compresión hormigón 5 cm			
e	Peso de vigas			
f	Peso de muros portantes	5,5		1,65
g	Peso de fachada			
CARGAS VARIABLES Q				
	Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>		
h	Vivienda	2,0		
i	Cubierta accesible	1,0		
j	Carga de Nieve en Barcelona	0,4		

CARGAS PERMANENTES G							
Elemento de superficie	Peso/superficie hor. (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (a+b+d)	2,65	6,9	9,9	181,0	1	181,0	18,3
Forjado piso (a+c+d)	2,65	6,9	9,9	181,0	3	543,1	18,3
Elemento longitudinal	Peso/ longitud (kN/m <sup>2</sup> )	altura (m)	longitud (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Viga ( e )							
Muro (f)	1,65	3	9,9	49,0	4	196,0	
Elemento vertical	Peso/superficie e vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Altura (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	
Fachada (g)							
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>920,1</b>	<b>18,3</b>
CARGAS VARIABLES Q							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (i)	1,00	6,9	9,9	68,3	1	68,3	<b>6,9</b>
Forjado piso (h)	2,00	6,9	9,9	136,6	3	409,9	<b>13,8</b>
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>478,2</b>	
CARGAS VARIABLES N							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (j)	0,40	6,9	9,9	27,3	1	27,3	<b>2,8</b>
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>27,3</b>	

COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR MURO								
	factor G	Carga G (kN)	factor Q	Carga Q (kN)	factor N	Carga N (kN)	Sumatoria de cargas Nd (kN)	Carga desfavorable (kN)
ELU 1	1,35	1242,14	1,5	717,26	0,75	20,49	1979,89	1979,89
ELU 2	1,35	1242,14	1,05	502,08	1,5	40,99	1785,21	
ELU 3	1,35	1242,14	1,05	502,08	0,75	20,49	1764,71	

PREDIMENSIONADO DE MURO DE MADERA A COMPRESIÓN $f_{m,d} = N_d/A$ para Duracion corta											
MURO CLT	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$k_{sys}$	$k_h$	$k_{mod}$	$\gamma_m$	$F_{mk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	L (mm)	espesor (mm)	espesor $e=L/65$ (mm)
	1979,89	1,1	1,0	0,9	1,2	24	19,80	99994,50	1000	100,0	152,31

PREDIMENSIONADO DE MURO DE MADERA A COMPRESIÓN $f_{m,d} = N_d/A$ para Duracion permanente											
MURO CLT	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$k_{sys}$	$k_h$	$k_{mod}$	$\gamma_m$	$F_{mk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	L (mm)	espesor (mm)	espesor $e=L/65$ (mm)
	1979,89	1	1,0	0,6	1,2	24	12,00	164990,93	1000	165,0	152,31

PREDIMENSIONADO DEL PANEL CLT A FLEXIÓN SIMPLE $f_{m,d} = M_d/W$													
FORJADO CLT	Carga distribuida $q$ (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/8$ (kNm)	$\gamma_c$	$k_{sys}$	$k_h$	$k_{mod}$	$\gamma_m$	$F_{mk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{m,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	h (mm)
	7,89	6,9	37,58	1,5	1,1	1,0	0,6	1,2	24	13,20	2846861,59	1200,00	119

PREDIMENSIONADO DE FORJADO POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$											
FORJADO CLT	Carga distribuida $q$ (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	Constante=2,5(5/384)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	$K_{def}$	$\psi_2$	$(1 + K_{def} \psi_2)$	$I = C_{te} q L^4 / E \delta_{total}$	h=(12*I/a)/1/3 (mm)
	7,89	6900,0	11600,0	1200,00	0,03	23,00	0,8	1	1,8	2182887878,00	264

PREDIMENSIONADO DE ZAPATA CORRIDA A COMPRESIÓN $f_{adm} = N_d/A$								
ZAPATA CORRIDA	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$\gamma_c$	$F_{adm}$ asumida (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área sección (mm <sup>2</sup> )	canto mínimo h=600mm	ancho a (mm) para L=1,0	vuelo $v=2h$
	1979,89	1	0,2	0,20	989945,55	600	989,95	1200,00

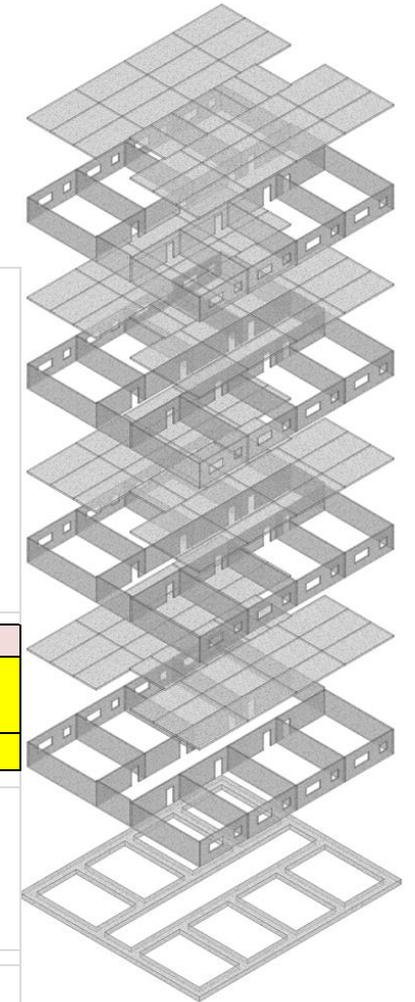
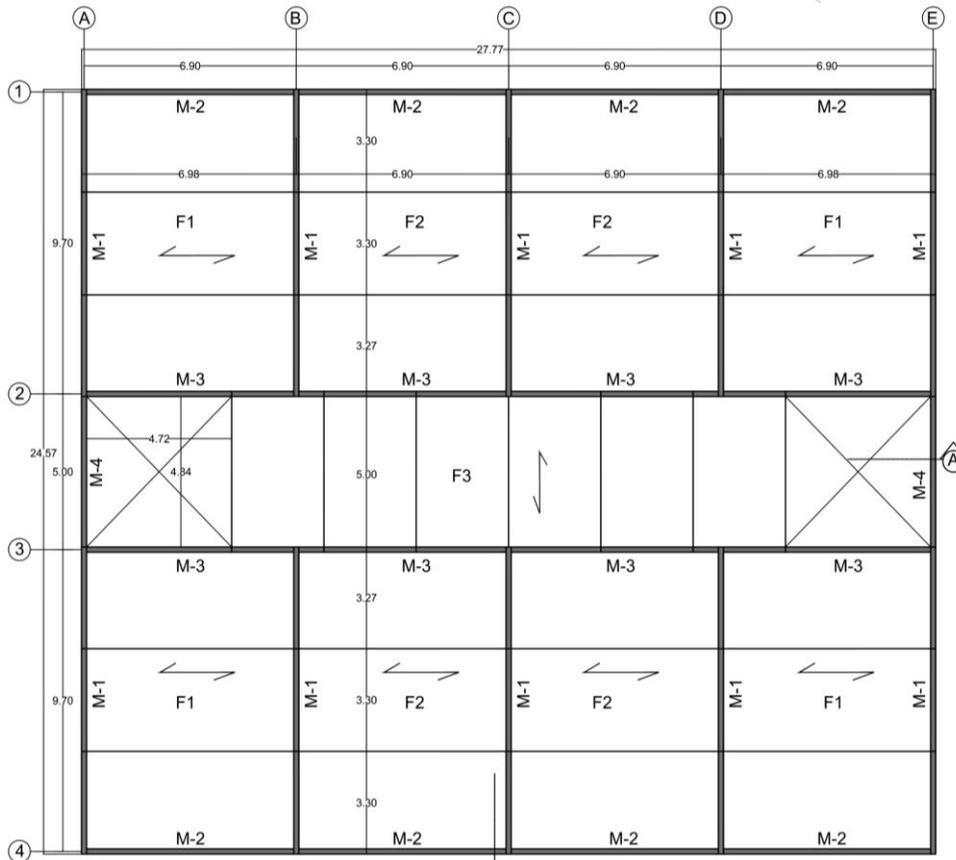
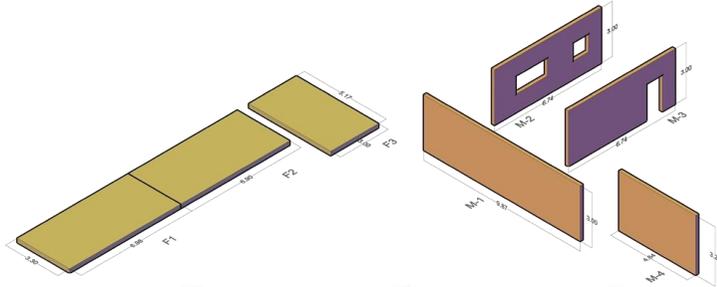
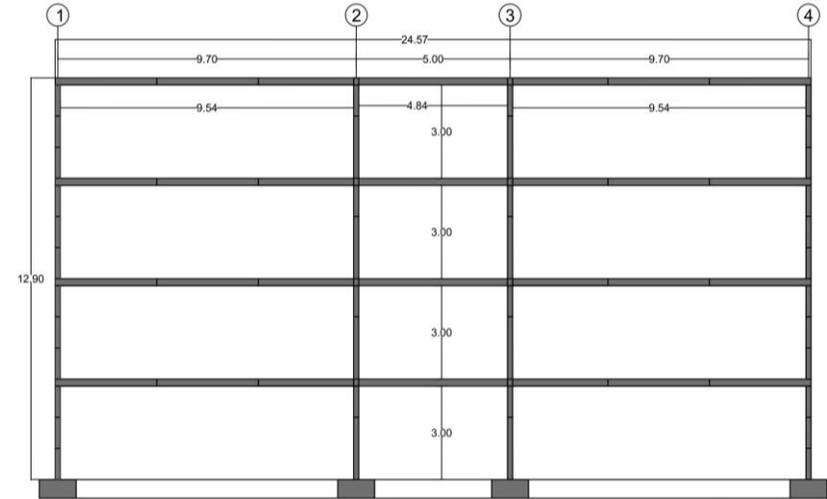


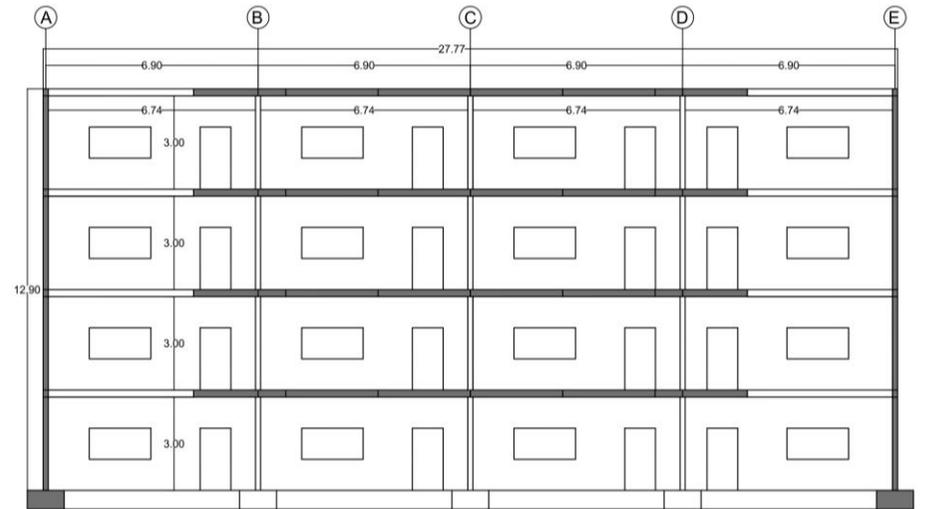
Fig. 28 Izado y ensamblaje edificio 4-M-M  
Fuente: Rodríguez L. (2019)



PLANTA DE MODULACIÓN  
ESTRUCTURAL DE FORJADO  
SISTEMA 4-M-M



SECCIÓN B-B



SECCIÓN A-A

FUENTE: RODRÍGUEZ L. (2019)

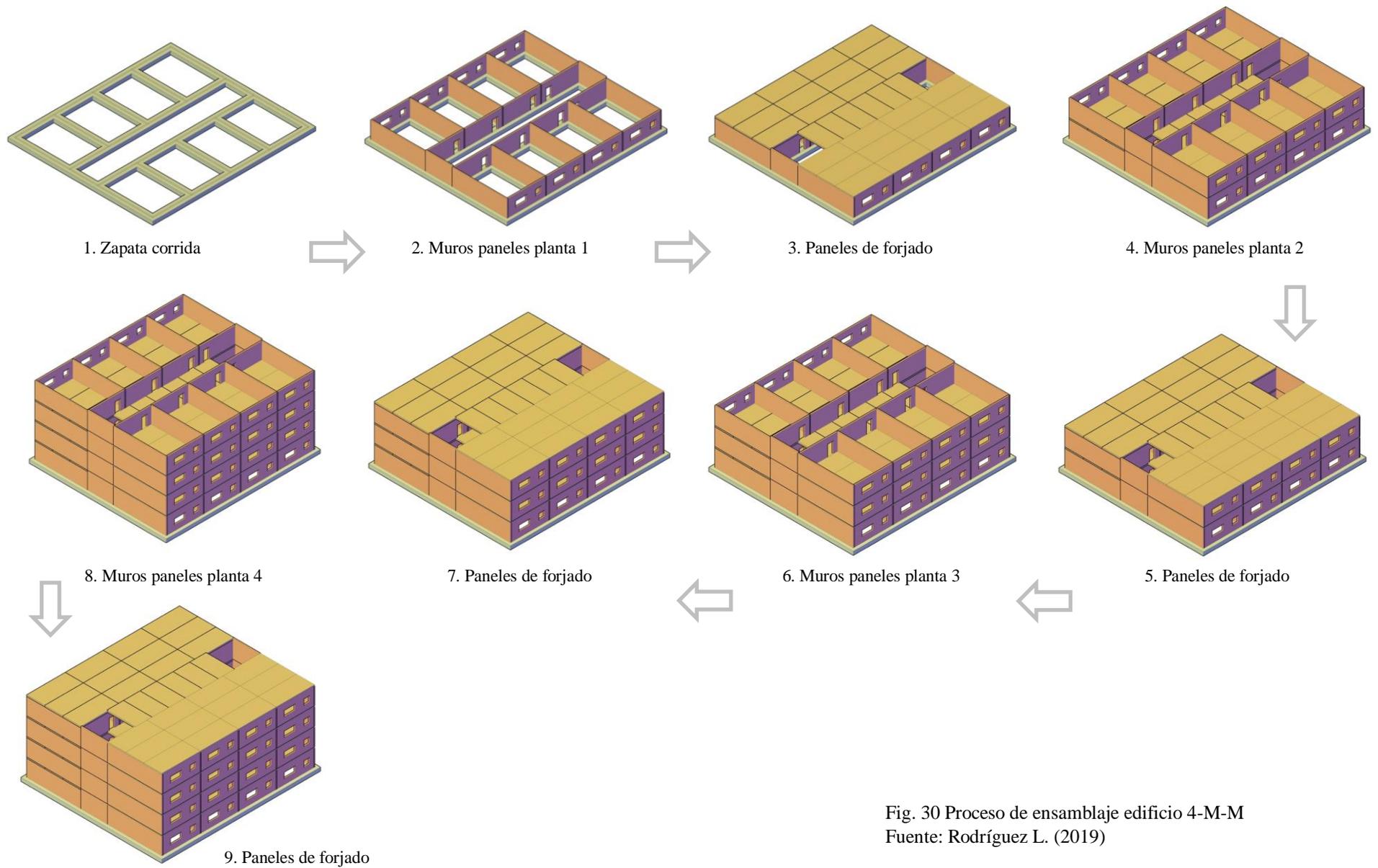


Fig. 30 Proceso de ensamblaje edificio 4-M-M  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

#### 4.6. Predimensionado sistema mixto de hormigón prefabricado

##### (módulo semirrígido y forjado) edificio 5-MIX-H

Tablas 16. Grupo de tablas de predimensionado 5-MIX-H

Resultado predimensionado	
Elemento	Dimensiones (cm)
Módulo 3D semirrígido	240 x 326 x 572
Placa alveolar + capa de compresión	25+5 x 120 x Longitud
Pavimento	30 x Superficie

CARGA PERMANENTE G				
	Tipo de carga	Densidad característica $\rho_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	Peso/longitud (kN/m)	Peso/superficie (kN/m <sup>2</sup> )
a	Peso de panel de forjado 22,5cm	5,5		1,65
b	Peso de aislamiento de cubierta			1,00
c	Peso de tabiquería			1,00
d	Peso capa de compresión hormigón 5 cm			
e	Peso de vigas			
f	Peso de muros portantes	5,5		1,65
g	Peso de fachada			
CARGAS VARIABLES Q				
	Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>		
h	Vivienda	2,0		
i	Cubierta accesible	1,0		
j	Carga de Nieve en Barcelona	0,4		

CARGAS PERMANENTES G							
Elemento de superficie	Peso/superficie hor. (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (a+b+d)	7,17	8,5	9,6	585,1	1	585,1	60,9
Forjado piso (a+c+d)	7,17	8,5	9,6	585,1	3	1755,2	60,9
Elemento longitudinal	Peso/ longitud (kN/m <sup>2</sup> )	altura (m)	espesor (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Viga ( e )							
Muro (f)	3,00	3,25	0,2	2,0	4	7,8	
Elemento vertical	Peso/superficie e vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Altura (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	
Fachada (g)							
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>2348,1</b>	<b>60,9</b>
CARGAS VARIABLES Q							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (i)	1,00	8,5	9,6	81,6	1	81,6	8,5
Forjado piso (h)	2,00	8,5	9,6	163,2	3	489,6	17,0
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>571,2</b>	
CARGAS VARIABLES N							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (j)	0,40	8,5	9,6	32,6	1	32,6	3,4
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>32,6</b>	

Nota: La carga de módulos es equivalente a la de muros

PREDIMENSIONADO DE FORJADO DE PLACA ALVEOLAR A FLEXIÓN SIMPLE $f_{c,d} = M_d/W$									
<b>FORJADO H 3D</b>	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/8$ (kNm)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{c,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	<b>h (mm)</b>
	15,22	9,2	160,98	1,5	30	20,00	8048946,60	1200,00	<b>201</b>
PREDIMENSIONADO DE FORJADO POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$									
<b>FORJADO</b>	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	Constante=2,5(5/384)	$I = Cte \cdot q \cdot L^4 / E \delta_{total}$	<b><math>h = (12 \cdot I / a) / 3</math> (mm)</b>	
	15,22	9200,0	30000,0	1200,00	30,67	0,03	3856786912,50	<b>309</b>	

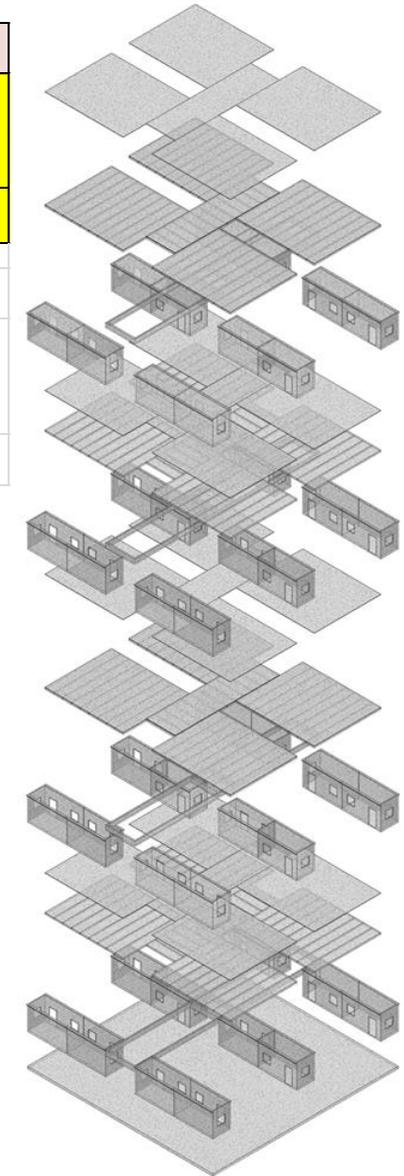
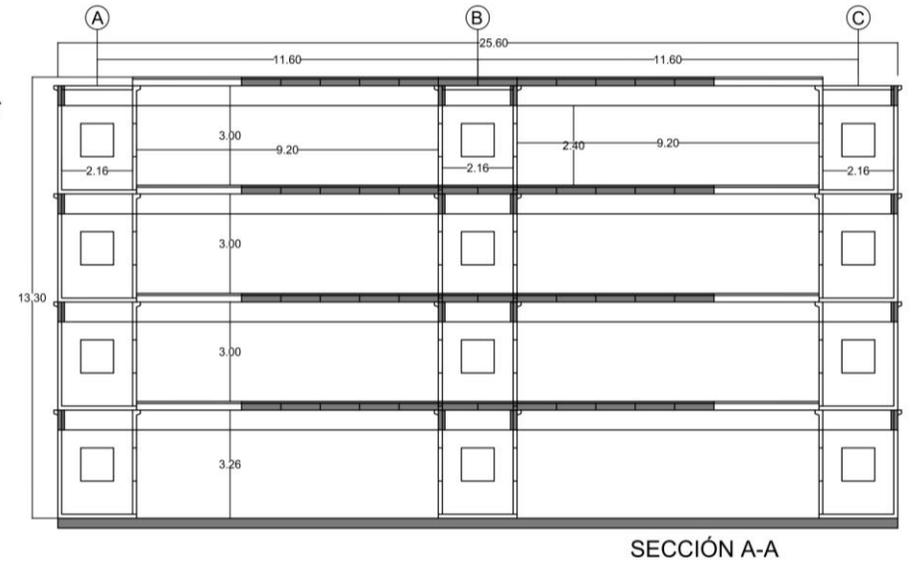
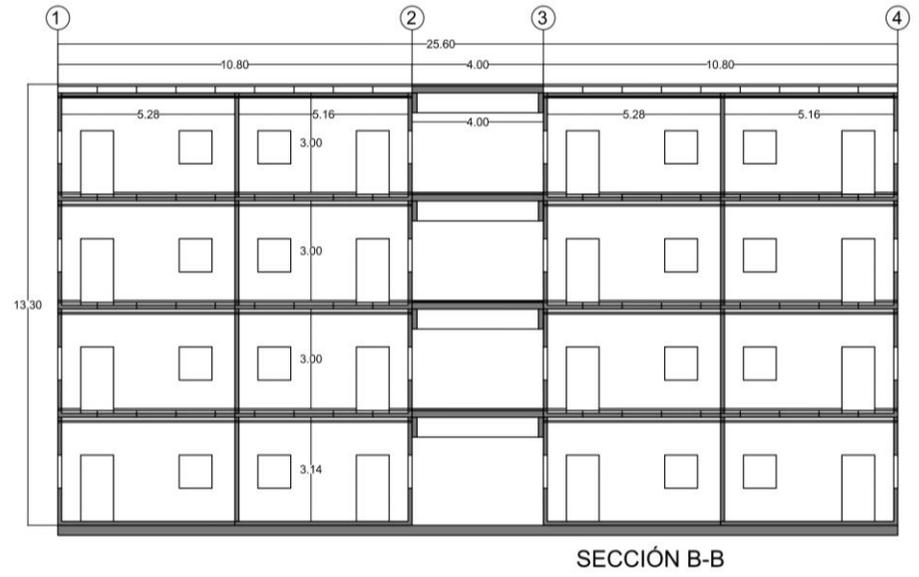
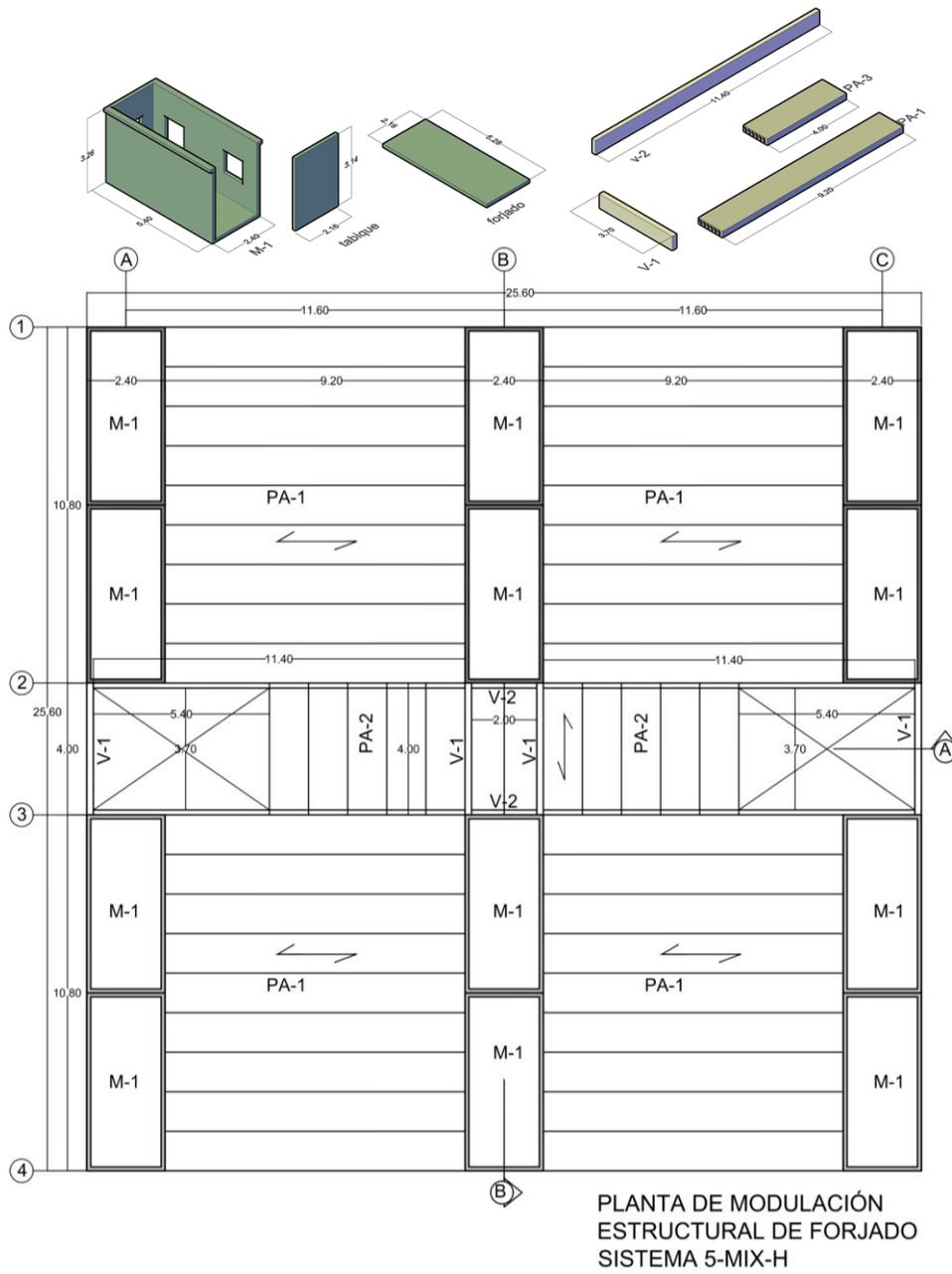


Fig. 31 Izado y ensamblaje edificio 5-MIX-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)



Fuente: RODRIGUEZ L. (2019)

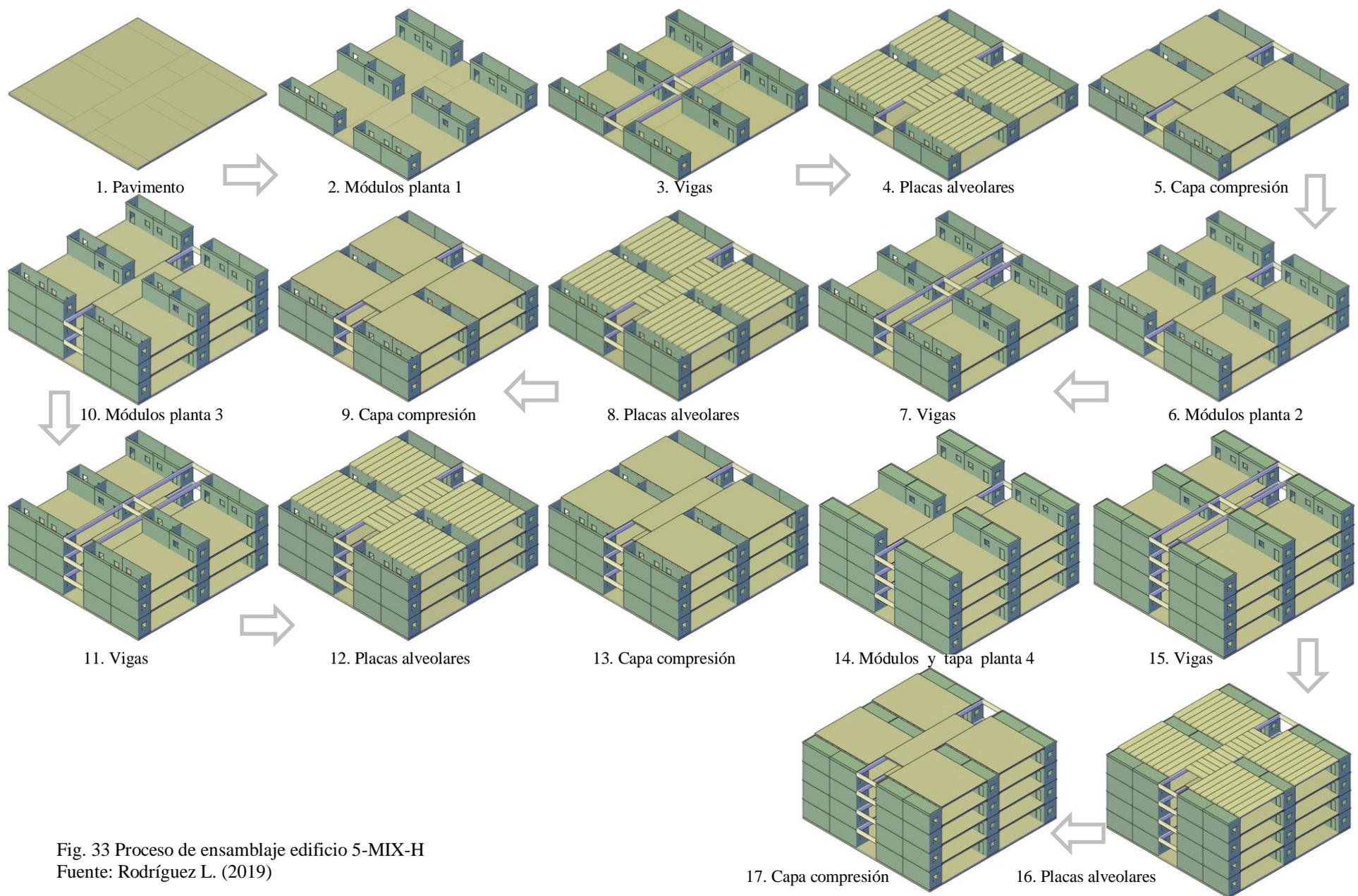


Fig. 33 Proceso de ensamblaje edificio 5-MIX-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

#### 4.7. Predimensionado sistema de módulos 3D de hormigón prefabricado edificio 6-3D-H

Tablas 17. Grupo de tablas de predimensionado 6-3D-H

Resultado predimensionado	
Elemento	Dimensiones (cm)
Módulo 3D	450 x 350 x 1000
Espesor paredes y tapa	12 + 15 nervios y 15
Pavimento	40 x Superficie

CARGA PERMANENTE G				
	Tipo de carga	Densidad característica $\rho_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	Peso/longitud (kN/m)	Peso/superficie (kN/m <sup>2</sup> )
a	Peso de forjado			4,00
b	Peso de aislamiento de cubierta			
c	Peso de tabiquería			
d	Peso capa de compresión hormigón 5 cm			
e	Peso de vigas			
f	Peso de muros portantes			6,00
g	Peso de fachada			

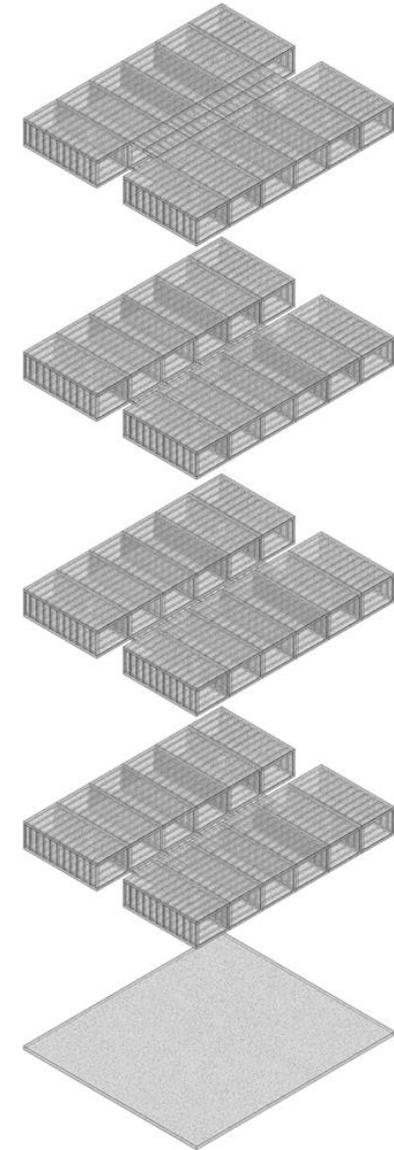
CARGAS VARIABLES Q		
	Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>
h	Vivienda	2,0
i	Cubierta accesible	1,0
j	Carga de Nieve en Barcelona	0,4

CARGAS PERMANENTES G							
Elemento de superficie	Peso/superficie hor. (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (a+b+d)	4,00	4,5	10	180,0	1	180,0	18,0
Forjado piso (a+c+d)	4,00	4,5	10	180,0	3	540,0	18,0
Elemento longitudinal	Peso/ longitud (kN/m <sup>2</sup> )	altura (m)	espesor (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Viga ( e )							
Muro (f)	6,00	4,50	0,2	5,4	4	21,6	
Elemento vertical	Peso/superficie vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Altura (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Fachada (g)							
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>741,6</b>	<b>18,0</b>

CARGAS VARIABLES Q							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (i)	1,00	4,5	10	45,0	1	45,0	4,5
Forjado piso (h)	2,00	4,5	10	90,0	3	270,0	9,0
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>315,0</b>	

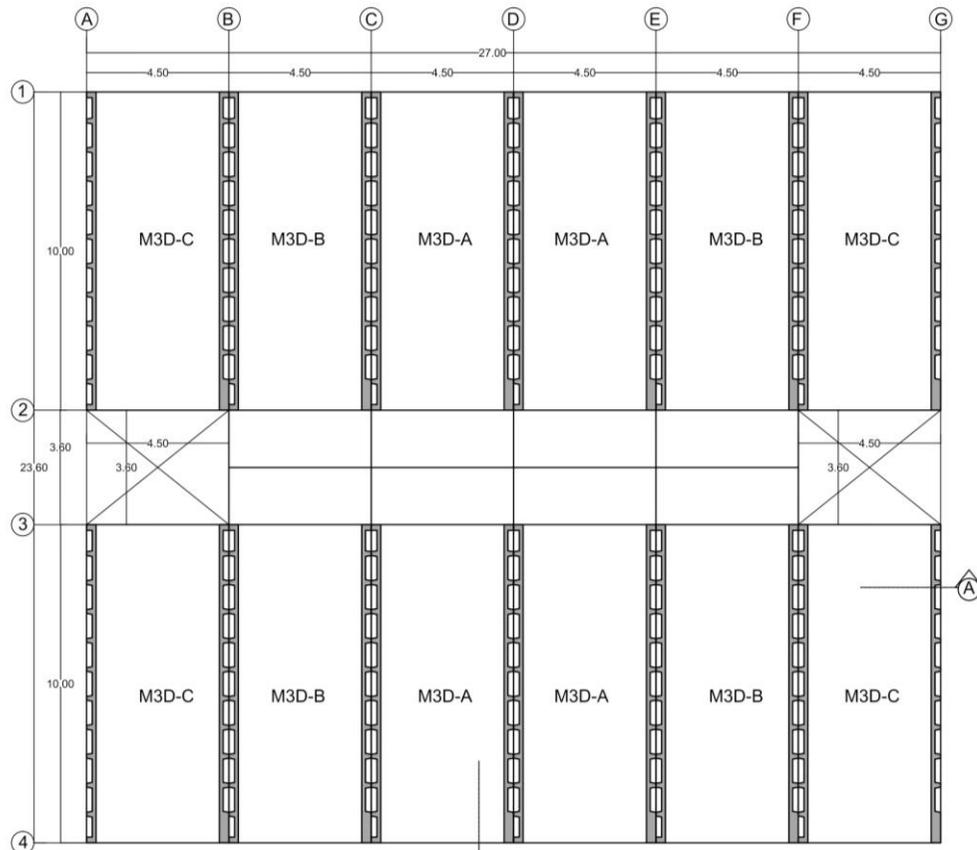
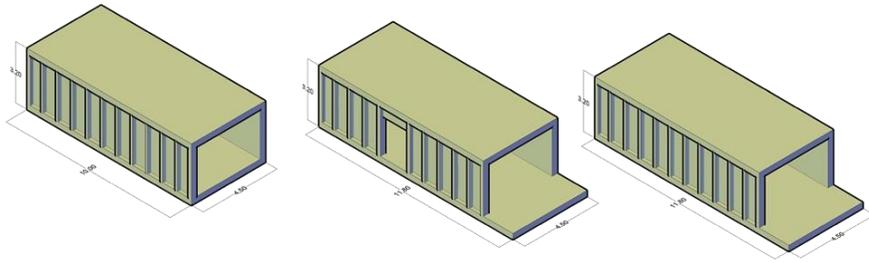
CARGAS VARIABLES N							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (j)	0,40	4,5	10	18,0	1	18,0	1,8
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>18,0</b>	

COMBINACIÓN DE CARGA PARA PREDIMENSIONAR MURO								
	factor G	Carga G (kN)	factor Q	Carga Q (kN)	factor N	Carga N (kN)	Sumatoria de cargas Nd (kN)	Carga desfavorable (kN)
ELU 1	1,35	1001,16	1,5	472,50	0,75	13,50	1487,16	1487,16
ELU 2	1,35	1001,16	1,05	330,75	1,5	27,00	1358,91	
ELU 3	1,35	1001,16	1,05	330,75	0,75	13,50	1345,41	



PREDIMENSIONADO DE MURO DE HORMIGÓN A COMPRESIÓN $f_{c,d} = N_d/A$									
PAREDES	Carga concentrada Nd (kN)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	L (mm)	espesor e (mm)	$e = h/16$ (mm)	
	1487,16	1,5	20	13,33	111537,00	1000	112	281,25	
PREDIMENSIONADO DE FORJADO A FLEXIÓN SIMPLE $f_{c,d} = M_d/W$									
TAPA	Carga distribuida q (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/8$ (kNm)	$\gamma_c$	Fck (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{c,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	h (mm)
	15,12	4,5	38,27	1,5	20	13,33	2870437,50	1000	131

Fig. 34 Izado y ensamblaje edificio 6-3D-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)



PLANTA DE MODULACIÓN  
ESTRUCTURAL DE FORJADO  
SISTEMA 6-3D-H

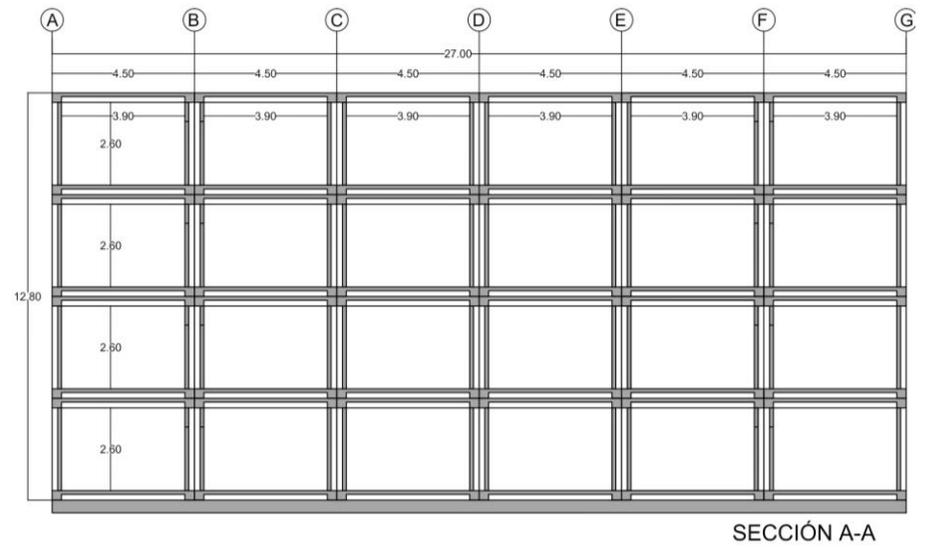
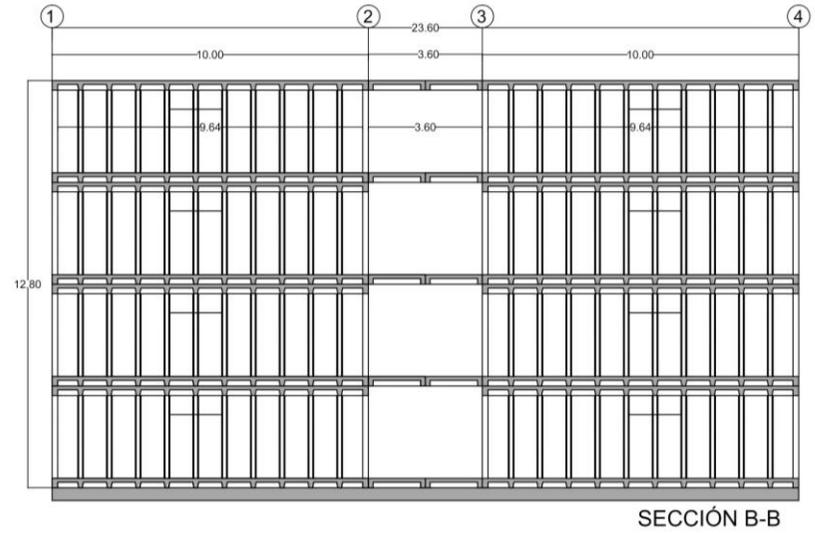


Fig. 35 Modulación en planta y sección edificio 6-3D-H  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

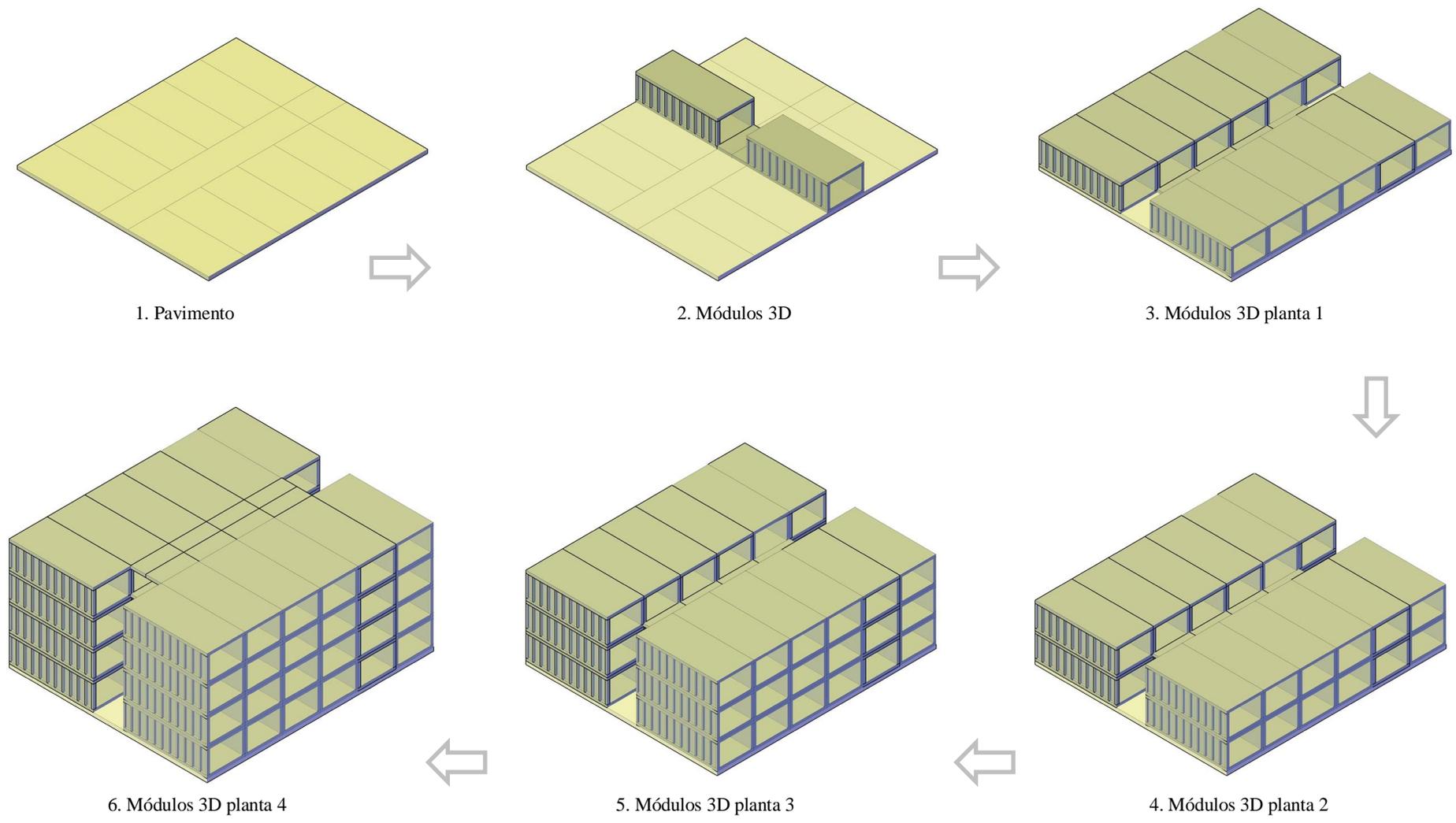


Fig. 36 Proceso de ensamblaje edificio 6-3D-H  
 Fuente: Rodríguez L. (2019)

#### 4.8. Predimensionado sistema de módulos 3D de madera CLT

##### edificio 7-3D-M

Tablas 18. Grupo de tablas de predimensionado 7-3D-M

Resultado predimensionado	
Elemento	Dimensiones (cm)
Módulo 3D de madera CLT	450 x 300 x 1000
Espesor paredes y tapa de madera CLT	16.5 y 18
Losa de fundación	30 x Superficie

CARGA PERMANENTE G				
	Tipo de carga	Densidad característica $\rho_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	Peso/ longitud (kN/m)	Peso/superficie (kN/m <sup>2</sup> )
a	Peso de panel de forjado 12 cm	5,5		1,65
b	Peso de aislamiento de cubierta			0,50
c	Peso de tabiquería			0,60
d	Peso capa de compresión hormigón 5 cm			
e	Peso de vigas			
f	Peso de muros portantes	5,5		1,65
g	Peso de fachada			

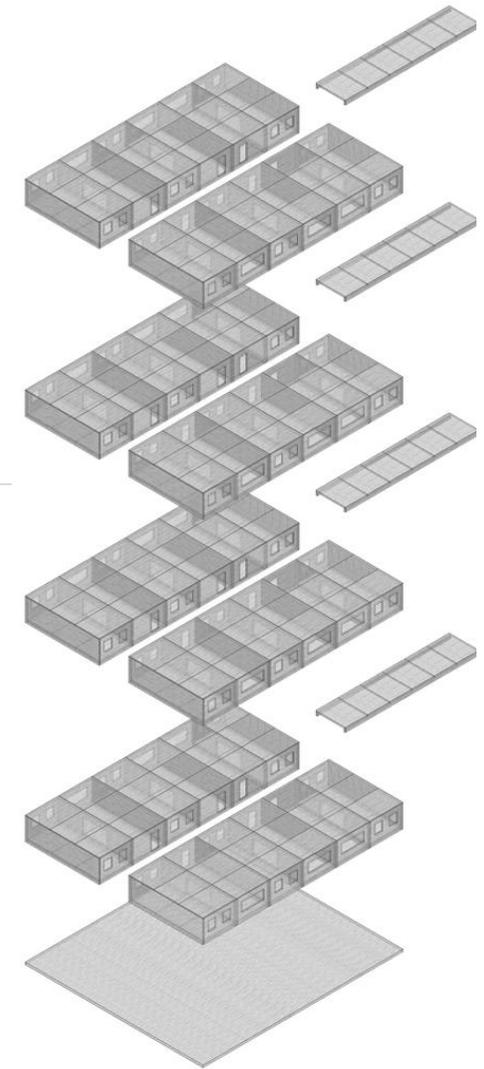
CARGAS VARIABLES Q		
	Sobre carga de Uso	kN/m <sup>2</sup>
h	Vivienda	2,0
i	Cubierta accesible	1,0
j	Carga de Nieve en Barcelona	0,4

CARGAS PERMANENTES G							
Elemento de superficie	Peso/superficie hor. (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (a+b+d)	2,15	4,5	10	96,8	1	96,8	9,7
Forjado piso (a+c+d)	2,25	4,5	10	101,3	3	303,8	10,1
Elemento longitudinal	Peso/ longitud (kN/m <sup>2</sup> )	altura (m)	longitud (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Viga ( e )							
Muro (f)	1,65	3,1	10	51,2	4	204,6	
Elemento vertical	Peso/superficie vertical (kN/m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Altura (m)	Carga Concentrada (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	
Fachada (g)							
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>605,1</b>	<b>10,1</b>

CARGAS VARIABLES Q							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (i)	1,00	4,5	10	45,0	1	45,0	4,5
Forjado piso (h)	2,00	4,5	10	90,0	3	270,0	9,0
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>315,0</b>	

CARGAS VARIABLES N							
Elemento	Carga repartida (kN/m <sup>2</sup> )	Lado paralelo-carga (m)	Lado perpendicular-carga (m)	Carga Concentrada Nd (kN)	Numero de pisos	Carga concentrada Nd (kN)	Carga distribuida qd (kN/m)
Forjado cubierta (j)	0,40	4,5	10	18,0	1	18,0	1,8
<b>Total carga concentrada desfavorable</b>						<b>18,0</b>	

Fig. 37 Izado y ensamblaje edificio 7-3D-M  
Fuente: Rodríguez L. (2019)



PREDIMENSIONADO DE MURO DE MADERA A COMPRESIÓN $f_{m,d} = N_d/A$ para Duracion corta													
MURO	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$k_{sys}$	$k_h$	$k_{mod}$	$\gamma_m$	$F_{mk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	L (mm)	espesor (mm)	espesor $e=L/65$ (mm)		
	1302,89	1,1	1,0	0,9	1,2	24	19,80	65802,27	1000	65,8	153,85		
PREDIMENSIONADO DE MURO DE MADERA A COMPRESIÓN $f_{m,d} = N_d/A$ para Duracion permanente													
MURO	Carga concentrada $N_d$ (kN)	$k_{sys}$	$k_h$	$k_{mod}$	$\gamma_m$	$F_{mk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	L (mm)	espesor (mm)	espesor $e=L/65$ (mm)		
	1302,89	1	1,0	0,6	1,2	24	12,00	108573,75	1000	108,6	153,85		
PREDIMENSIONADO DE FORJADO POR FLECHA $\delta_t = \delta_{ins} + \delta_{dif} = 2,5 \delta_{ins} = L/300$													
FORJADO CLT	Carga distribuida $q$ (kN/m)	L elemento (mm)	E (N/mm <sup>2</sup> )	a (mm)	Constante=2,5(5/384)	$\delta_{total}$ (L/300) (mm)	$K_{def}$	$\psi_2$	$(1 + K_{def} \psi_2)$	$I = C_{te} \cdot q \cdot L^4 / E \delta_{total}$	$h = (12 \cdot I / a) / 3$ (mm)		
	7,25	4500,0	11600,0	1200,00	0,03	15,00	0,8	1	1,8	555799286,94	168		
PREDIMENSIONADO DEL PANEL CLT A FLEXIÓN SIMPLE $f_{m,d} = M_d/W$													
FORJADO CLT	Carga distribuida $q$ (kN/m)	L elemento (m)	$M_d = ql^2/8$ (kNm)	$\gamma_c$	$k_{sys}$	$k_h$	$k_{mod}$	$\gamma_m$	$F_{mk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W = M_d / f_{m,d}$ (mm <sup>3</sup> )	a (mm)	h (mm)
	7,25	4,5	18,34	1,5	1,1	1,0	0,6	1,2	24	13,20	1389311,08	1200,00	83

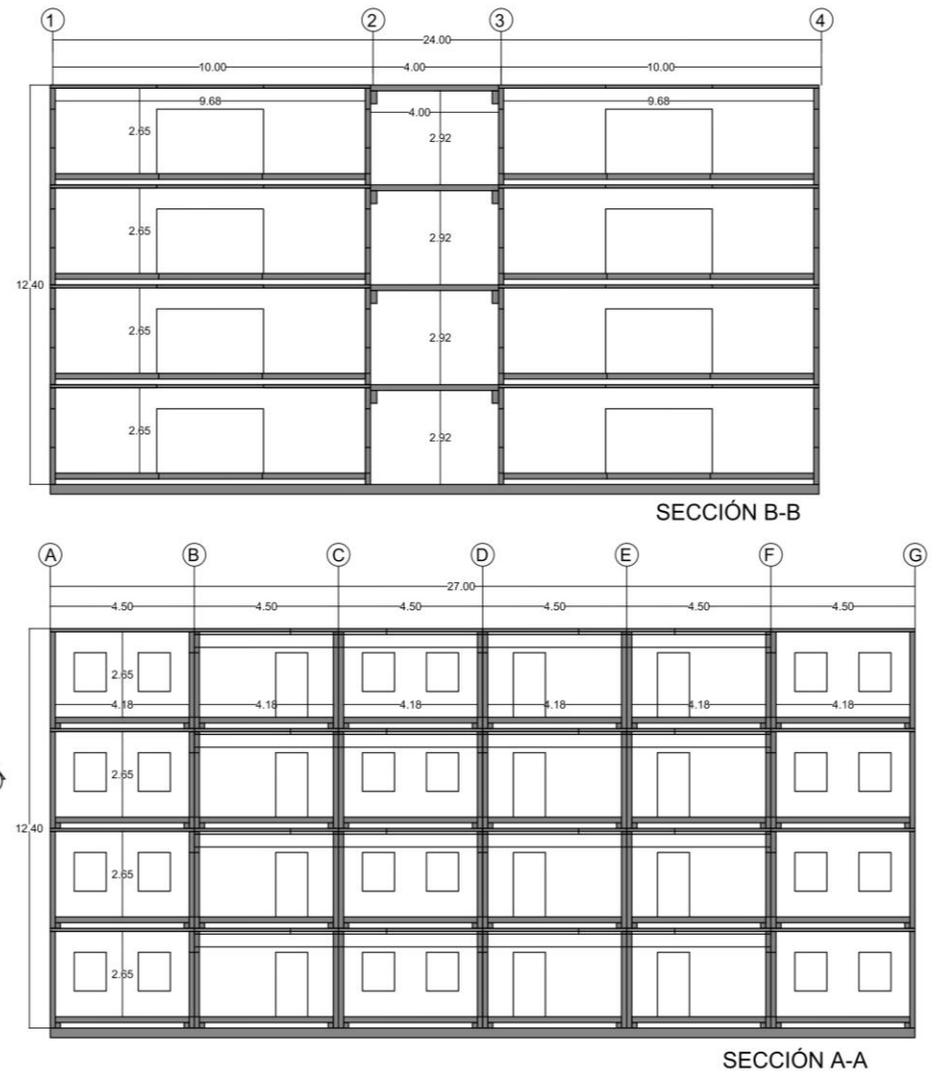
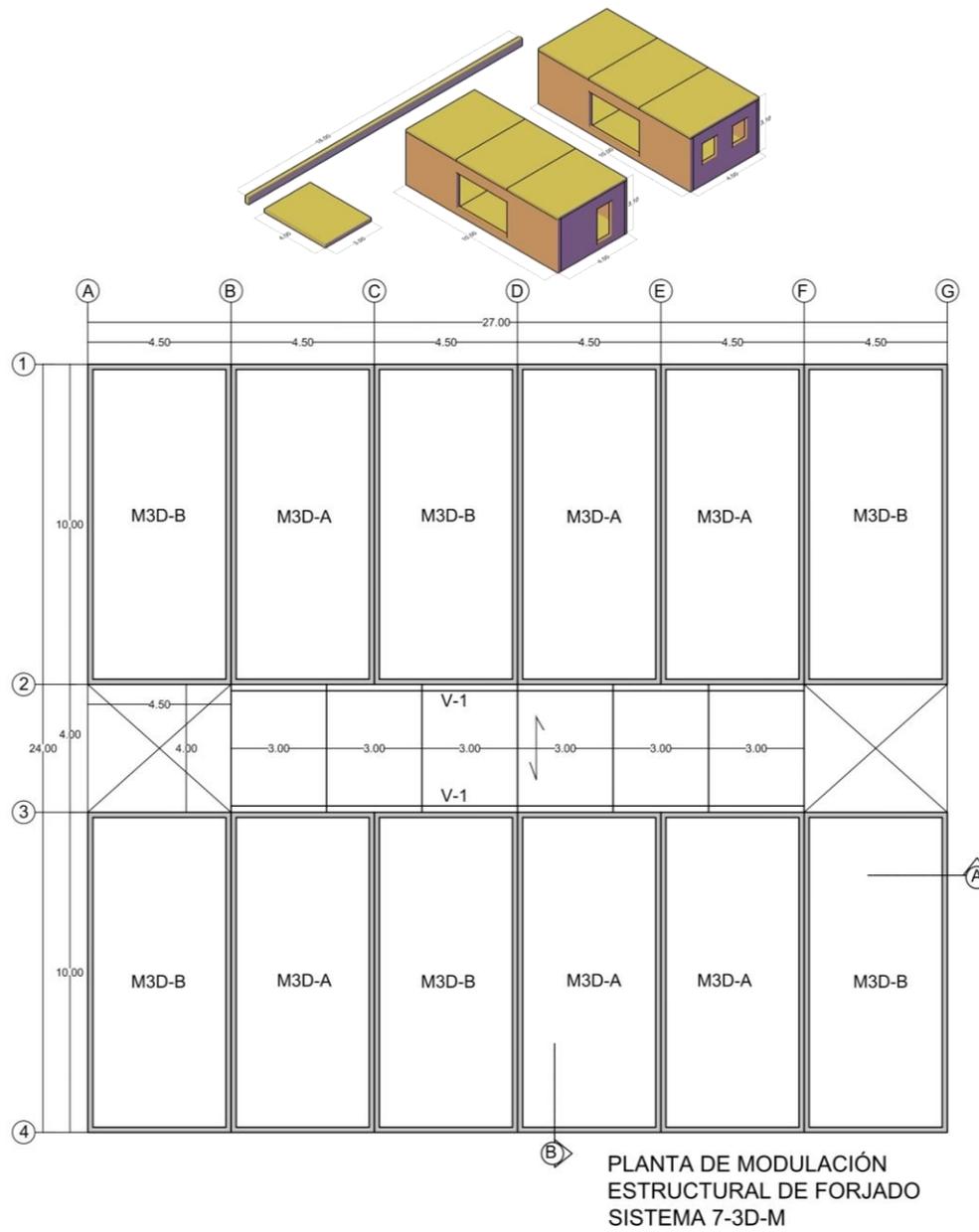


Fig. 38 Modulación en planta y sección edificio 7-3D-M  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

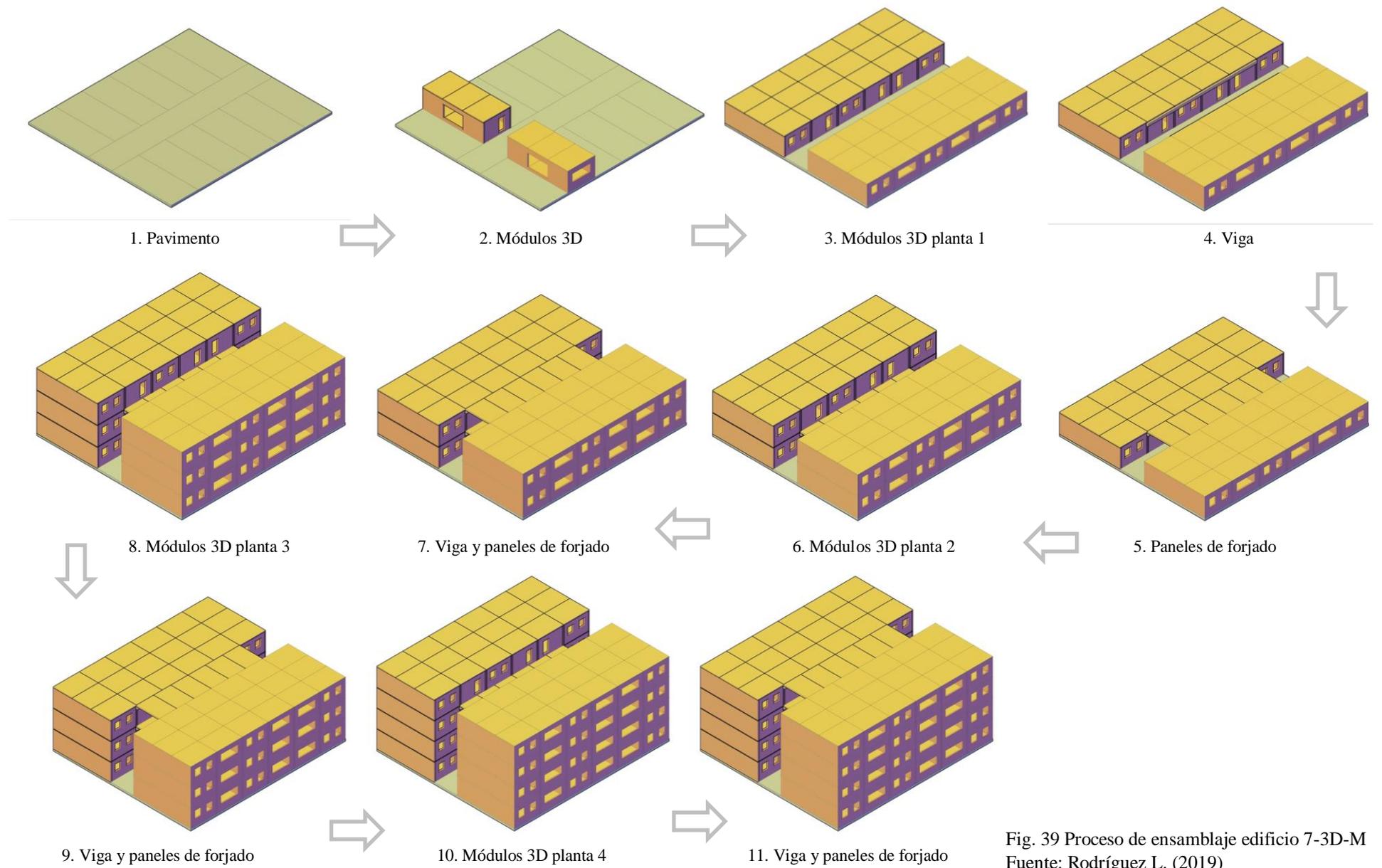
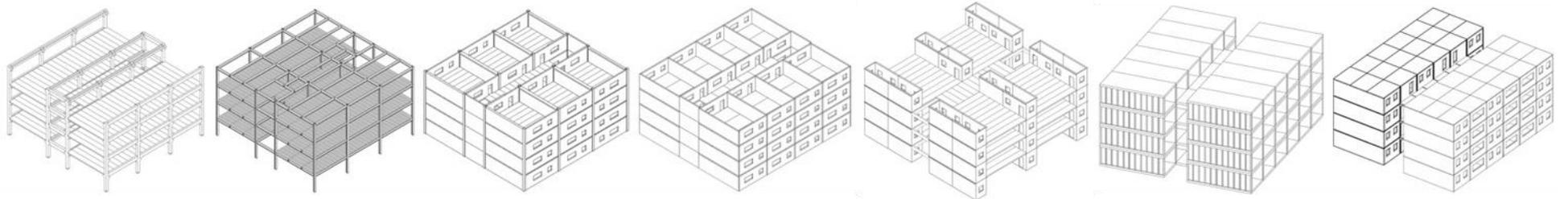


Fig. 39 Proceso de ensamblaje edificio 7-3D-M  
Fuente: Rodríguez L. (2019)

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL  
A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

# CAPÍTULO V



## 5. ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

Según SETAC World Council (2002), por sus siglas en inglés, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Sociedad de Toxicología Ambiental y Química) indica que el análisis de ciclo de vida ACV es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad y prevé las siguientes funciones:

- a) Identifica y cuantifica el uso de materia, energía y los vertidos al entorno.
- b) Determina el impacto que el uso de recursos y los vertidos que producen en el medio ambiente.
- c) Lleva a la práctica estrategias de mejora ambiental.

Un ACV incluye el ciclo completo de un producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de:

- a) Extracción, y procesado de materias primas.
- b) Producción, transporte y distribución.
- c) Uso reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición de residuos.

La SETAC indica que antes de iniciar un ACV debe definirse el marco o alcance del análisis, comprobar si se tienen datos suficientes de todo el proceso que se requiere analizar y finalmente definir qué tipo de ACV es:

- Gate to Gate (puerta a puerta): Desde los procesos en fábrica a la cadena de suministro.
- Cradle to Gate (cuna a puerta): Desde el origen de materias primas hasta la puerta de fábrica.
- Cradle to Grave (cuna a tumba): Todas las operaciones desde el origen de materias primas incluida fase de uso hasta la disposición final como desecho.
- Cradle to Cradle (cuna a cuna): Ciclo completo incluyendo la siguiente vida útil de los productos.

Según la SETAC las principales categorías de impacto ambiental son: Calentamiento Global, Consumo de Recursos Energéticos, Reducción de la Capa de Ozono, Eutrofización, Acidificación (Tabla 9).

Uno de los indicadores de impacto que por definición está vinculado a la industria de la construcción es el consumo de recursos energéticos sobre todo, en la transformación de materias primas a nuevos productos para la edificación. Así como es el suministro de éstos a la obra. Merece la pena destacar que el impacto está asociado a la matriz energética del lugar de operaciones, esto varía según el país y su fuentes de energía, por tanto se estima que los impactos pueden variar de una situación territorial a otra y las condiciones propicias para la industria.

Tabla 19. Impactos ambientales según SETAC

Categoría de impacto ambiental		Unidad	Factor de caracterización
Calentamiento Global	Fenomeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmosfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas	kg.Eq CO2	Potencial de Calentamiento Global (PCG)
Consumo de Recursos Energéticos	Energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado.	MJ	Cantidad Consumida
Reducción de la Capa de Ozono	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a la radiación solar ultravioleta de la capa de ozono atmosférica.	kg. Eq. CFC-11	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (PAO)
Eutrofización	Crecimiento excesivo de la población de algas originado por enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.	kg. Eq. De NO3	Potencial de Eutrofización (PE)
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.	kg. Eq SO2	Potencial de Acidificación (PA)
Consumo de Materias Primas	Consumo de materiales extraídos de la naturaleza	Tm	Cantidad Consumida

Sin embargo, instituciones como Carbon Trust ayudan a mejorar el rendimiento energético de la industria a través de certificar la implementación de la norma ISO 50001 e implementar programas de mejora continua con garantía de la gestión de Carbono.

Por otra parte el Potencial de Calentamiento Global a través de las emisiones de CO2 está vinculado a la producción y al funcionamiento de las edificaciones. Dado que la energía consumida tiene un factor de conversión a potencial de emisión de CO2, es que se considera este indicador tan relevante como en el cantidad de energía consumida.

### 5.1. Marco regulador y normativo

En tema de sostenibilidad las escalas de regulación van del ámbito internacional, regional y local, en este sentido en el ámbito internacional el Sistema Internacional EPD es un programa global regido por Naciones Unidas, para las declaraciones ambientales tipo III que operan de acuerdo con la norma ISO 14025. A través de un sistema para verificar y registrar las EPD y mantener una biblioteca de EPD y PCR disponibles al público. Merece la pena destacar que para los productos de construcción en Europa, el programa se alinea adicionalmente con la norma europea EN 15804.

Un EPD por sus siglas en inglés Environmental Product Declaration es la declaración ambiental de productos que presentan

información transparente, verificada y comparable sobre el impacto ambiental de los productos en el ciclo de vida.

Por otra parte, en el ámbito regional, la Unión Europea contempla para el territorio dentro de la unión, la norma UNE-EN 15804:2012+A1:2013 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products. Esta norma rige los parámetros de sostenibilidad en la construcción e indica las bases para la declaración ambiental de producto (DAP) y las reglas de categoría de producto de la construcción. A través de AENOR, España contempla la versión traducida al castellano publicada en 2014.

Un DAP incluye reglas para el cálculo de inventario y evaluación del impacto del ciclo de vida. La norma UNE tiene fundamento en el grupo de normas EN ISO 14025:2010 e ISO 15686-1, 2, 7 y 8 así como ISO 21930:2007. En este sentido un EPD es un DAP.

Un DAP cubre todas las etapas del ciclo de vida (cuna a tumba) en módulos de información: A1-A3 (etapa de producto) A4-A5 (etapa de proceso de construcción), B1-B5 B6-B7(etapa de uso), C1-C4 (etapa de fin de vida) y D (beneficios y cargas más allá del sistema). Para cumplir con la norma UNE en el espacio de la Unión Europea, solo es obligatorio declarar A1, A2, y A3. En la tabla 20 se resumen las etapas del ciclo de vida de un producto según UNE-EN 15804.

Tabla 20. Etapas del ciclo de vida de un producto

<b>Etapas de producto</b>	
A-1	Extracción y procesado de materias primas(incluye reciclaje)
A-2	Transporte al fabricante
A-3	Fabricación
<b>Etapas de proceso de construcción</b>	
A-4	Transporte a la obra
A-5	Instalación en el edificio
<b>Etapas de uso, relacionado con estructura del edificio</b>	
B-1	Uso del producto instalado
B-2	Mantenimiento
B-3	Reparación
B-4	Sustitución
B-5	Rehabilitación
<b>Etapas de uso, relacionado con funcionamiento del edificio</b>	
B-6	Uso de energía en servicio
B-7	Uso de agua en servicio
<b>Etapas de fin de vida</b>	
C-1	Deconstrucción, demolición
C-2	Transporte hasta disposición final de residuos
C-3	Tratamiento de residuos, recuperación reutilización y/o reciclaje
<b>Beneficios o cargas más allá del sistema</b>	
D	Potencial de reutilización y/o reciclaje, beneficios netos

En un ámbito más local la Comunidad Autónoma de Cataluña a través de la Generalidad de Cataluña, publica la Legislación Consolidada BOE-A-2017-11001 Boletín Oficial del Estado, en septiembre de 2017. En su preámbulo, el documento destaca que la Unión Europea ha asumido históricamente el papel de liderazgo en las políticas sobre eficiencia energética y cambio climático marcando

directrices que conlleven a reducir las emisiones de efecto invernadero en el horizonte 2020 con relación a 1990. Dado que estas emisiones corresponden a sectores como el transporte, la vivienda, los residuos, la agricultura y ganadería, el Gobierno Catalán establece objetivos territorializados que facilitan la gobernanza multinivel para reducir las emisiones y ha sido una meta fundamental desde 2005, año que entró en vigor el protocolo de Kyoto.

Uno de los objetivos de esta normativa es promover la economía circular que demanda la eficiencia en el uso de los recursos para alcanzar un alto nivel de sostenibilidad mediante el ecodiseño, la prevención y minimización de generación de residuos, la reutilización y reciclaje de materiales y productos frente a la utilización de materias primas vírgenes.

La legislación BOE demanda instrumentos de planificación y programación tales como; la evaluación sistemática de los impactos observados y previstos del cambio climático sobre los sectores socioeconómicos y productivos. Así mismo, establece en el artículo 11 punto 2, que los nuevos proyectos deben incluir en el informe de impacto ambiental una evaluación de adaptación a los efectos del cambio climático de acuerdo con los escenarios más probables.

Con respecto a los residuos en el artículo 22 demanda que se contemple el reciclaje y la valoración energética, así como, la

valorización de residuos para favorecer la creación de economía circular, en contraste con la disposición final de residuos.

En consonancia con el marco regulador europeo el BOE demanda en el artículo 56, que debe incorporarse una evaluación de la huella de carbono a los productos y materiales para la construcción comercializados en Cataluña y productos industriales.

En un ámbito más pragmático, la Comisión Europea en 2017 publica un informe de la serie Ciencia al servicio de la política (Science for Policy) a través del Centro Común de Investigación<sup>5</sup> denominado Level(s) que es el marco común de la UE de indicadores básicos de sostenibilidad para edificios residenciales y de oficinas. En el informe se identifica en qué fase de un proyecto de construcción puede ser utilizado. Éstas son:

- a) Fase de diseño, basada en cálculos, simulaciones, y escenarios.
- b) Fase de ejecución, basada en los planos según construcción, las especificaciones y el seguimiento.
- c) Fase de finalización, basada en la puesta en servicio y a realización de pruebas.
- d) Fase de funcionamiento, basada en el comportamiento medido y la satisfacción de los ocupantes.

---

<sup>5</sup> JRC Science Hub (Plataforma Científica del CCI)  
<https://ec.europa.eu/jrc>

Según la fase en la se encuentre el proyecto se obtendrán por estimación y medición los siguientes datos:

Consumos, emisiones, costos, para los materiales de construcción y elementos compuestos.

Level(s) contempla en el apartado 3.2.2 la evaluación comparativa del comportamiento entre edificios funcionalmente equivalentes, determinando parámetros de ciclo de vida como entrada, claves para los cálculos y posteriores análisis.

Cabe resaltar que en la fase de diseño y planteamiento de escenarios, debe tenerse en cuenta la vida útil y durabilidad de los componentes del edificio con especial énfasis en estructura y fachada, así mismo debe preverse la futura adaptación del edificio a cambios y necesidades de los ocupantes. Más importante aún es abordar escenarios de reutilización, reciclabilidad y potencial de recuperación de los componentes del edificio.

Un reto importante planteado en este informe es que durante la fase de diseño, la comparación entre edificios puede ser compleja, pues la diversidad de materiales de construcción comúnmente utilizados en la Unión Europea diverge en los cálculos de sus impactos según la industria. Pero sin lugar a duda, solo conociendo los valores de los impactos ambientales, pueden conocerse los potenciales de recuperación y evitar que los impactos se trasladen al ciclo de vida.

William McDonough y Michael Braungart mencionan en su famoso libro “Cradle to Cradle” que la eco-efectividad y la Revolución industrial son estrategias para que el diseño de nuevos productos este en mayor consonancia con la biodiversidad y que desde su concepción estén diseñados para que tengan prevista su vida futura, su siguientes usos, con énfasis en la economía circular y que en vez de reciclaje no se ha realice supra o infra ciclaje.

## 5.2. Cálculo de impactos ambientales por fabricación

El sujeto de análisis es el edificio “X” en sus 7 versiones, y para realizar los escenarios comparativos de impactos ambientales es requerido que la fuente de datos sea homogénea y representativa, en este caso se ha tomado como línea base, los datos de la Universidad de Bath del Reino Unido, pero se han contrastado con los datos de las siguientes fuentes que son nutridas por los reportes de la industria y merece la pena destacar que no todos los materiales buscado se encuentran accesibles en cada fuente de consulta.

- Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña – ITeC
- The International EPD System
- ECO Platform EPD e la Unión Europea
- Declaraciones Global EPD AENOR
- Programa DAPconstrucción, Agenda de la Construcción Sostenible

Se establece como línea base, los datos de Inventory of Carbon and Energy (ICE) Versión 2.0 producido por Prof. Geoff Hammond and Craig Jones en enero 2011, del Department of Mechanical Engineering, University of Bath, United Kingdom, bajo el programa de Carbon Vision Buildign Program de Carbon Trust (Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Bath del Reino Unido).

Esta base de datos es de acceso abierta, no depende de los reportes de la industria sino de un instituto de investigación y tiene una serie de consideraciones a tomar en cuenta:

- La mayoría de los datos se han convertido a CO<sub>2</sub>e que captura más que solo dióxido de carbono (metano, PFC, etc.)
- Hay un cambio de cálculo para el carbono incorporado de los productos de madera. El almacenamiento de carbono biogénico y el secuestro de carbono aún se excluyen de los datos. Sin embargo, los nuevos datos separan las emisiones de dióxido de carbono emitidas por los combustibles fósiles y las de la quema de combustible de biomasa (es decir, la tala de árboles).
- Los datos sobre el cemento se han alineado con los datos de la Asociación Británica de Cemento.
- Bath ha trabajado con el centro de concreto para revisar el modelo de cemento, mortero y concreto de ICE. Hay nuevos datos específicos del Reino Unido para prefabricados de hormigón.

Los límites dentro de la base de datos de ICE son “cradle to gate”. Sin embargo, incluso dentro de estos límites hay muchas variaciones posibles que afectan los límites absolutos del estudio. Los límites ideales se enumeran a continuación:

- Energía suministrada, toda la energía suministrada se convierte en equivalente de energía primaria.

- Método predeterminado de energía primaria, que se remonta a la "cuna".
- Energía renovable incluida.
- Las materias primas derivadas de los combustibles fósiles se incluyen en la evaluación, pero se identifican por separado.
- Emisiones de dióxido de carbono relacionadas con el combustible, se incluyen todas las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con el combustible que son atribuibles al producto.
- Proceso de emisiones de dióxido de carbono Incluido; por ejemplo, se cuentan las emisiones de CO2 de la calcinación de piedra caliza en la fabricación de Clinker de cemento.
- Transporte Incluido dentro de los límites especificados, es decir, típicamente “cradle to gate”.

Se presentan a continuación los datos de la línea base de la Universidad de Bath y se hace énfasis en el dato de madera que al contrastarlo con las de otras fuentes consultadas, diverge por mucho, esto debido a que la base de datos de Bath no ha considerado el secuestro de carbono de la madera que tiende a ser negativo, por lo tanto no refleja el impacto del material y se decidió tomar el de las otras fuentes de consulta (Tablas 21 y 22).

Tabla 21. Datos de línea base

		DENSIDADES CTE		INVENTORY OF CARBON AND ENERGY (ICE) SUMMARY BATH		
MATERIAL		CTE	Kg/m3	MATERIALS	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg
HORMIGÓN	Hormigón in situ		2.200	28/35 MPa	0,82	0,11
	Hormigón reforzado	Hormigones (pag. 17 pdf)	2.400	Reinforced RC 25/30 MPa (with 110 kg per m3 concrete) (0.78 + 1.04 * 1.1)MJ/kg (0.106 + 0.072 * 1.1)kgCO2/kg	1.92	0.185
HORMIGÓN PREFABRICADO	Hormigón reforzado prefabricado	Hormigones (pag. 17 pdf)	2.200	Precast RC 40/50 with reinforcement (with 80kg per m <sup>3</sup> ) (1.50 + 1.04 * 0.8)MJ/kg (0.171 + 0.072 * 0.8)kgCO2/kg	2.33	0.229
	Hormigón reforzado prefabricado placa alveolar sin capa de compresión	Hormigones (pag. 31 pdf)	1.400	Precast RC 40/50 with reinforcement (with 80kg per m <sup>3</sup> ) (1.50 + 1.04 * 0.8)MJ/kg (0.171 + 0.072 * 0.8)kgCO2/kg	2.33	0.229
ACERO	Acero laminado	Acero (pag. 15 pdf)	7.800	Section- UK (EU) Average Recycled Content	21,50	1,42
	Acero doblado en frío	Asumida con un porcentaje menor	7.400	Coil (Sheet), Galvanised - UK (EU) Average Recycled Content	22,60	1,45
	Acero de refuerzo en barra	Acero (pag. 15 pdf)	7.800	Bar & rod - UK (EU) Average Recycled Content	17,40	1,31
MADERA	Madera CLT	Conífera, pesada (Pag. 16 pdf)	550	Laminated Veneer Lumber (0.31fos+0.32bio)	9,50	0,63

Recuperados de University of Bath, United Kindom

Tabla 22. Comparación entre datos de diversas fuentes de consulta.

		DENSIDADES CTE		INVENTORY OF CARBON AND ENERGY (ICE) SUMMARY BATH			ITEC			EPD INTERNATIONAL SYSTEM			EPD ECO-PLATAFORM UNIÓN EUROPEA			EPD AENOR			EPD DAPcons		
MATERIAL		CTE	Kg/m3	MATERIALS	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg	MATERIAL	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg	MATERIAL	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg	MATERIAL	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg	MATERIAL	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg	MATERIAL	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg
HORMIGÓN	Hormigón in situ		2.200	28/35 MPa	0,82	0,11	HA-35/P/10/IIIa in situ	0,65	0,12	Para 1m3 de hormigón * 2200=2200kg	0,65	0,12									
	Hormigón reforzado	Hormigones (pag. 17 pdf)	2.400	Reinforced RC 25/30 MPa (with 110 kg per m3 concrete) (0.78 + 1.04 * 1.1)MJ/kg (0.106 + 0.072 * 1.1)kgCO2/kg	1.92	0.185															
HORMIGÓN PREFABRICADO	Hormigón reforzado prefabricado	Hormigones (pag. 17 pdf)	2.200	Precast RC 40/50 with reinforcement (with 80kg per m3) (1.50 + 1.04 * 0.8)MJ/kg (0.171 + 0.072 * 0.8)kgCO2/kg	2.33	0.229	HA-35/P/10/IIIa 'prefabricado'	2,16	0,19	Pieza 0,4*0,4*17,5= 2,8m3 * 2200 = 6160	3,42	0,32									
	Hormigón reforzado prefabricado placa alveolar sin capa de compresión	Hormigones (pag. 31 pdf)	1.400	Precast RC 40/50 with reinforcement (with 80kg per m3) (1.50 + 1.04 * 0.8)MJ/kg (0.171 + 0.072 * 0.8)kgCO2/kg	2.33	0.229				Para pieza de 0,13 m3 * 2200 = 286 kg	2,47	0,55									
ACERO	Acero laminado	Acero (pag. 15 pdf)	7.800	Section- UK (EU) Average Recycled Content	21,50	1,42		41,50	4,00	para 1 Ton=1000kg (energia primaria no renovable)	21,01	0,82				para 1 Ton=1000kg (energia primaria no renovable)	19,60	0,51	para 1 Ton=1000kg (energia primaria no renovable)	18,10	
	Acero doblado en frio	Asumida con un porcentaje menor	7.400	Coil (Sheet, Galvanised - UK (EU) Average Recycled Content	22,60	1,45	Perfilera acero plegada en frio (0,7 y 1mm espesor)	40,00	3,00	para 1 Ton=1000kg (energia primaria no renovable)	41,60	1,51									
	Acero de refuerzo en barra	Acero (pag. 15 pdf)	7.800	Bar & rod - UK (EU) Average Recycled Content	17,40	1,31		36,75	2,96	para 1 Ton=1000kg (energia primaria no renovable)	9,48	0,63				para 1 Ton=1000kg (energia primaria no renovable)	8,75	0,55	para 1 Ton=1000kg (energia primaria no renovable)	9,00	
MADERA	Madera CLT	Conifera, pesada (Pag. 16 pdf)	550	Laminated Veneer Lumber (0.31fos+0.32bio)	9,50	0,63		3,63	0,25	Para 1m3 de panel estructural CLT densidad 550 kg/m3 igual 236,42 kg CO2 y 3353,38 MJ	6,10	-1,25	Para 1m3 de panel estructural CLT densidad 550 kg/m3	2,58	-1,20						

Se presenta a continuación el proceso de cálculo de impactos denominados EE (Embodied Energy) y EC (Embodied Carbon) que es la Energía y CO2 incorporado para cada uno de los elementos constructivos que conforman los 7 edificios de cuatro plantas analizados en las tres tipologías estructurales, pórticos, muros y módulos 3D, de construcción industrializada; hormigón, acero, madera. (Tabla 23, Figuras 40 y 41).

Tabla 23. Resumen de las características de los 7 edificios analizados

edificio	SISTEMA	Área planta (m2)	Nª plantas	Área edificada (m2)	Peso edificio (Tn)	Peso (Tn/m2)
1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	642,60	4	2570,40	1726,27	672
2-P-A	Pórticos de acero	647,70	4	2590,80	1430,24	552
3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	619,76	4	2479,04	2391,89	965
4-M-M	Muros de madera CLT	682,05	4	2728,20	898,50	329
5-MIX-H	Módulo 3D de hormigón y forjado prefabricado	655,36	4	2621,44	1810,06	690
6-3D-H	Módulo 3D de hormigón prefabricado	637,20	4	2548,80	3174,27	1245
7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	648,00	4	2592,00	1135,54	438

A continuación se presenta en detalle el cálculo de impactos con base en el volumen derivado del predimensionado estructural para cada uno de los 7 edificios. (Tablas de la 24 a la 30) (Figuras de la 42 a la 48).

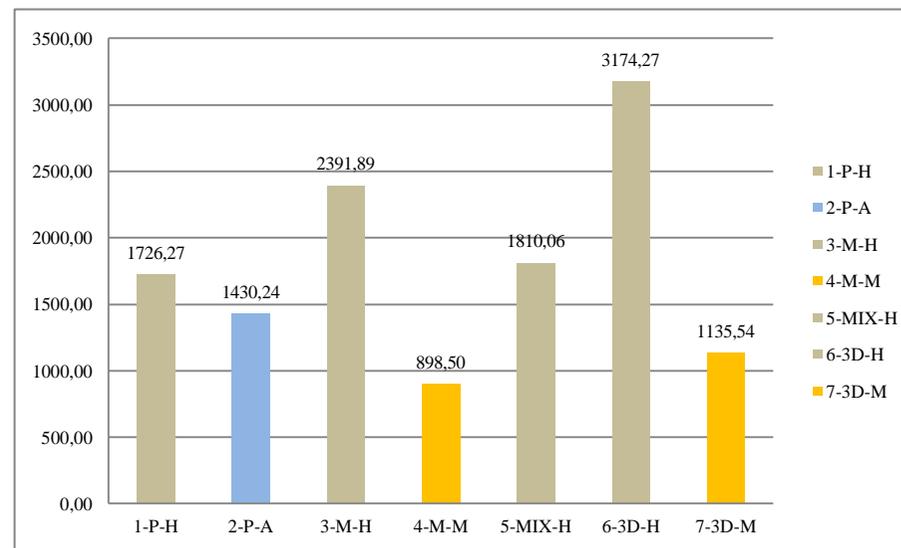


Fig. 40 Peso del edificio en Toneladas (Tn)

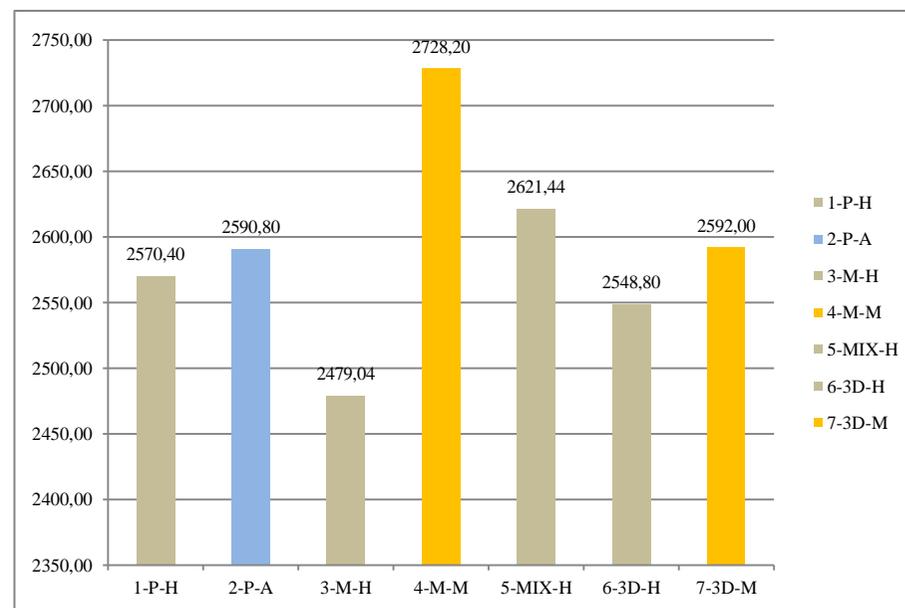


Fig. 41 Área edificada (m2)

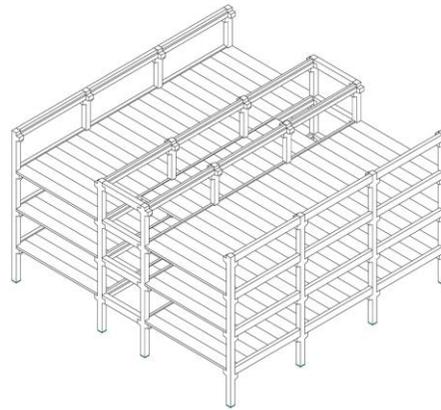


Fig. 42 Porcentaje de impacto por elemento edificio 1-P-H (%)

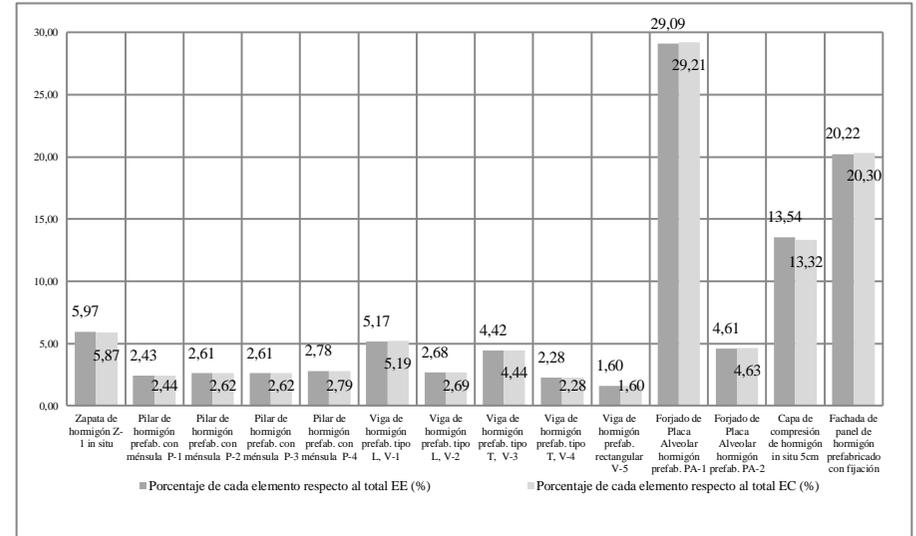


Tabla 24. Impactos ambientales en edificio 1-P-H

IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 1-P-H PÓRTICOS DE HORMIGÓN PREFABRICADO																					
Tipo de elemento	Nº	ELEMENTOS DEL SISTEMA 1-P-H	DIMENSIONES					PESO					FACTORES ICE			IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total EE (%)	Porcentaje de cada elemento respecto al total EC (%)		
			Lado a (m)	Lado b (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Longitud o altura (m)	Volumen nominal simplificado (m <sup>3</sup> )	Volumen AutoCAD (m <sup>3</sup> )	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso de 1 elemento (kg)	Cantidad de elementos por piso	Número de pisos	Peso por elemento (kg)	Peso por tipo (Tn)	Material	EE(MJ/kg)	EC (kgCO <sub>2</sub> /kg)			EE (MJ)	EC (KgCO <sub>2</sub> )
Fundación	1	Zapata de hormigón Z-1 in situ	2,5	2,5	6,25	0,50	3,13	3,13	2.400,00	7.500,00	16,0	1,0	120.000,00	120,00	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	230.400,00	22.200,00	5,97	5,87
Elementos resistentes verticales	2	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-1	0,5	0,5	0,25	15,00	3,75	4,38	2.300,00	10.074,00	4,00	1,00	40.296,00	172,78	Precast RC 40/50	2,33	0,229	93.889,68	9.227,78	2,43	2,44
	3	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-2	0,5	0,5	0,25	15,00	3,75	4,70	2.300,00	10.798,50	4,00	1,00	43.194,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	100.642,02	9.891,43	2,61	2,62
	4	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-3	0,5	0,5	0,25	15,00	3,75	4,70	2.300,00	10.798,50	4,00	1,00	43.194,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	100.642,02	9.891,43	2,61	2,62
	5	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-4	0,5	0,5	0,25	15,00	3,75	5,01	2.300,00	11.523,00	4,00	1,00	46.092,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	107.394,36	10.555,07	2,78	2,79
Elementos resistentes horizontales	6	Viga de hormigón prefab. tipo L, V-1	0,5	0,7	0,35	7,65	2,68	2,33	2.300,00	5.359,00	4,00	4,00	85.744,00	267,54	Precast RC 40/50	2,33	0,229	199.783,52	19.635,38	5,17	5,19
	7	Viga de hormigón prefab. tipo L, V-2	0,5	0,7	0,35	7,90	2,77	2,41	2.300,00	5.543,00	2,00	4,00	44.344,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	103.321,52	10.154,78	2,68	2,69
	8	Viga de hormigón prefab. tipo T, V-3	0,5	0,7	0,35	7,65	2,68	1,99	2.300,00	4.577,00	4,00	4,00	73.232,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	170.630,56	16.770,13	4,42	4,44
	9	Viga de hormigón prefab. tipo T, V-4	0,5	0,7	0,35	7,90	2,77	2,05	2.300,00	4.715,00	2,00	4,00	37.720,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	87.887,60	8.637,88	2,28	2,28
	10	Viga de hormigón prefab. rectangular V-5	0,5	0,7	0,35	4,50	1,58	1,44	2.300,00	3.312,00	2,00	4,00	26.496,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	61.735,68	6.067,58	1,60	1,60
Forjado	11	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-1	1,2	0,25	0,30	9,80	2,94	2,05	1.400,00	2.870,00	42,00	4,00	482.160,00	558,60	Precast RC 40/50	2,33	0,229	1.123.432,80	110.414,64	29,09	29,21
	12	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-2	1,2	0,25	0,30	4,80	1,44	1,05	1.400,00	1.470,00	13,00	4,00	76.440,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	178.105,20	17.504,76	4,61	4,63
Monolitismo	13	Capa de compresión de hormigón in situ 5cm			567,30	0,05	28,37	28,36	2.400,00	68.064,00	1,00	4,00	272.256,00	272,26	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	522.731,52	50.367,36	13,54	13,32
Fachada	14	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación	0,1	3,0	0,30	3,75	1,13	1,19	2.200,00	2.618,00	32,00	4,00	335.104,00	335,10	Precast RC 40/50	2,33	0,229	780.792,32	76.738,82	20,22	20,30
1	Área de planta (m <sup>2</sup> )		642,60	pisos		4,0	Área edificio (m <sup>2</sup> )		2570,40	Total peso de edificio (kg)			1.726.272,00	1.726,27	Total Impactos edificio			3.861.388,80	378.057,02	100,00	100,00
	Total peso de edificio (Toneladas)												1.726,27		Impacto por m <sup>2</sup>			1502,25	147,08		

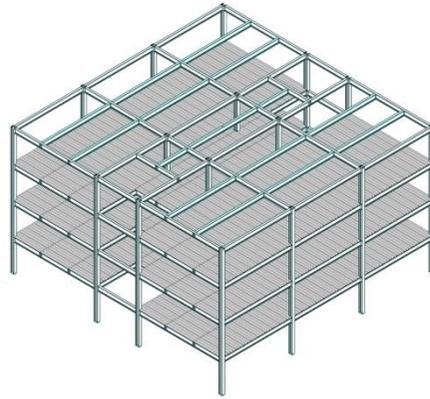


Fig. 43 Porcentaje de impacto por elemento edificio 2-P-A (%)

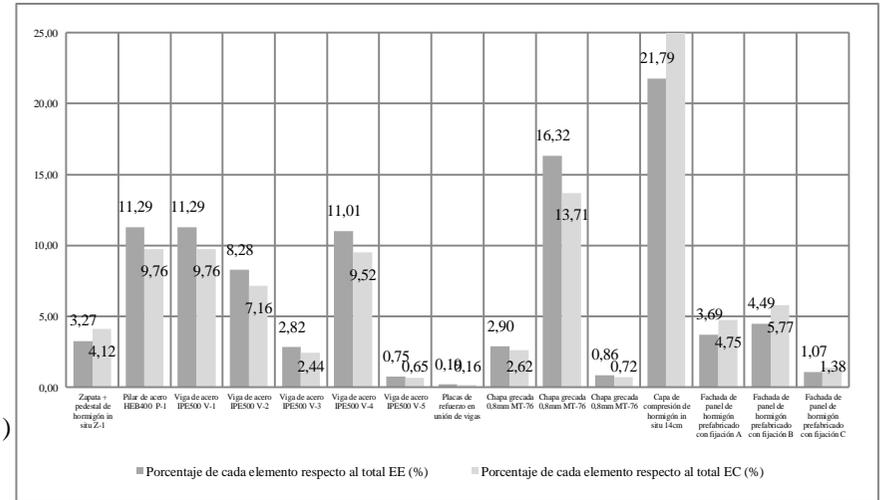


Tabla 25. Impactos ambientales en edificio 2-P-A

IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 2-P-A PÓRTICOS DE ACERO																					
Tipo de elemento	Nº	ELEMENTOS DEL SISTEMA 2-P-A	DIMENSIONES					PESO					FACTORES ICE			IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total EE (%)	Porcentaje de cada elemento respecto al total EC (%)		
			Lado a (m)	Lado b (m)	Área (m2)	Longitud o altura (m)	Volumen nominal simplificado (m3)	Volumen AutoCAD (m3)	Densidad (Kg/m3)	Peso de 1 elemento (kg)	Cantidad de elementos por piso	Número de pisos	Peso total (kg)	Peso (Tn)	Material	EE (MJ/kg)	EC (kgCO2/kg)			EE (MJ)	EC (Kg CO2)
Cimentación	1	Zapata + pedestal de hormigón in situ Z-1	2,4	2,4	5,76	0,60	3,46	3,16	2.400,00	7.584,00	16,0	1,0	121.344,00	121,34	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,920	0,185	232.980,48	22.448,64	3,27	4,12
Elementos resistentes verticales	2	Pilar de acero HEB400 P-1	0,3	0,4	0,12	15,00	1,80	0,30	7.800,00	2.340,00	16,00	1,00	37.440,00	37,44	Acero laminado (section)	21,50	1,420	804.960,00	53.164,80	11,29	9,76
Elementos resistentes horizontales	3	Viga de acero IPE500 V-1	0,2	0,5	0,10	8,10	0,81	0,10	7.800,00	780,00	12,00	4,00	37.440,00	113,88	Acero laminado (section)	21,50	1,420	804.960,00	53.164,80	11,29	9,76
	4	Viga de acero IPE500 V-2	0,2	0,5	0,10	9,60	0,96	0,11	7.800,00	858,00	8,00	4,00	27.456,00		Acero laminado (section)	21,50	1,420	590.304,00	38.987,52	8,28	7,16
	5	Viga de acero IPE500 V-3	0,2	0,5	0,10	4,80	0,48	0,05	7.800,00	390,00	6,00	4,00	9.360,00		Acero laminado (section)	21,50	1,420	201.240,00	13.291,20	2,82	2,44
	6	Viga de acero IPE500 V-4	0,2	0,4	0,08	8,20	0,66	0,09	7.800,00	702,00	13,00	4,00	36.504,00		Acero laminado (section)	21,50	1,420	784.836,00	51.835,68	11,01	9,52
	7	Viga de acero IPE500 V-5	0,2	0,4	0,08	3,50	0,28	0,04	7.800,00	312,00	2,00	4,00	2.496,00		Acero laminado (section)	21,50	1,420	53.664,00	3.544,32	0,75	0,65
	8	Placas de refuerzo en unión de vigas					0,02	0,02	7.800,00	156,00	1,00	4,00	624,00		Acero laminado (section)	21,50	1,420	13.416,00	886,08	0,19	0,16
Forjado	9	Chapa grecada 0,8mm MT-76	0,88	0,0008	0,001	3,40	0,002	0,0032	7.400,00	23,68	116,00	4,00	10.987,52	65,19	Chapa grecada (sheet)	18,80	1,300	206.565,38	14.283,78	2,90	2,62
	10	Chapa grecada 0,8mm MT-76	0,88	0,0008	0,00	3,30	0,00	0,0300	7.400,00	222,00	58,00	4,00	51.504,00		Chapa grecada (sheet)	22,60	1,450	1.163.990,40	74.680,80	16,32	13,71
	11	Chapa grecada 0,8mm MT-76	0,88	0,0008	0,00	2,50	0,00	0,0024	7.400,00	17,760	38,00	4,00	2.699,52		Chapa grecada (sheet)	22,60	1,450	61.009,15	3.914,30	0,86	0,72
Monolitismo	12	Capa de compresión de hormigón in situ 14cm			602,22	0,14	84,31	84,31	2.400,00	202.344,00	1,00	4,00	809.376,00	809,38	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	1.554.001,92	149.734,56	21,79	27,49
Fachada	13	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación A	0,1	2,7	0,27	3,75	1,01	1,07	2.200,00	2.354,00	12,00	4,00	112.992,00	283,01	Precast RC 40/50	2,33	0,229	263.271,36	25.875,17	3,69	4,75
	14	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación B	0,1	3,2	0,32	3,75	1,20	1,30	2.200,00	2.860,00	12,00	4,00	137.280,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	319.862,40	31.437,12	4,49	5,77
	15	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación C	0,1	2,3	0,23	3,75	0,86	0,93	2.200,00	2.046,00	4,00	4,00	32.736,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	76.274,88	7.496,54	1,07	1,38
2	Área de planta (m2)		647,70	pisos	4,0	Área edificio (m2)	2590,80		Total peso de edificio (kg)				1.430.239,04	1.430,24	Total Impactos edificio			7.131.335,97	544.745,31	100,00	100,00
							Total peso de edificio (Toneladas)				1.430,24	Impacto por m2			2752,56	210,26					

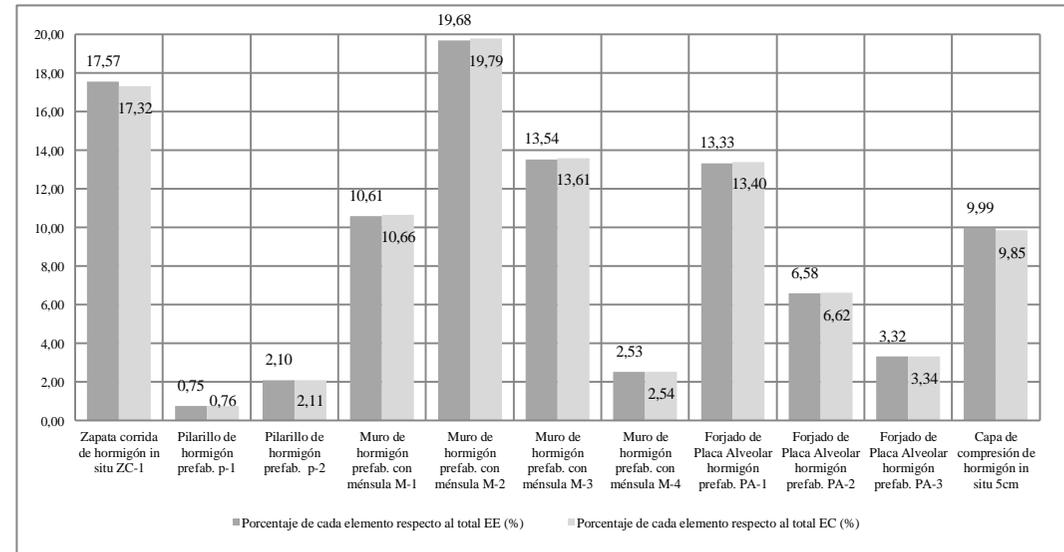
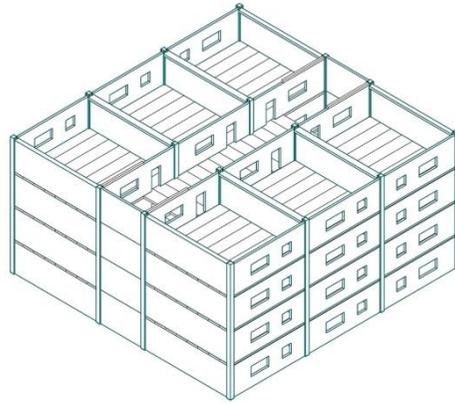


Tabla 26. Impactos ambientales en edificio 3-M-H

Fig. 44 Porcentaje de impacto por elemento edificio 3-M-H (%)

IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 3-M-H MUROS DE HORMIGÓN PREFABRICADO																					
Tipo de elemento	Nº	ELEMENTOS DEL SISTEMA 3-M-H	DIMENSIONES					PESO						FACTORES ICE			IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total EE (%)	Porcentaje de cada elemento respecto al total EC (%)	
			Lado a (m)	Lado b (m)	Área (m2)	Longitud o altura (m)	Volumen nominal simplificado (m3)	Volumen AutoCAD (m3)	Densidad (Kg/m3)	Peso de 1 elemento (kg)	Cantidad de elementos por piso	Número de pisos	Peso total (kg)	Peso (Tn)	Material	EE (MJ/kg)	EC (kgCO2/kg)	EE (MJ)			EC (KgCO2)
Cimentación	1	Zapata corrida de hormigón in situ ZC-1	1,4	0,8	1,12	183,92	205,99	200,70	2.400,00	481.680,00	1,0	1,0	481.680,00	481,68	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	924.825,60	89.110,80	17,57	17,32
Elementos resistentes verticales	2	Pilarillo de hormigón prefab. p-1	0,4	0,4	0,16	13,20	2,11	1,85	2.300,00	4.255,00	4,00	1,00	17.020,00	1.111,45	Precast RC 40/50	2,33	0,229	39.656,60	3.897,58	0,75	0,76
	3	Pilarillo de hormigón prefab. p-2	0,4	0,4	0,16	13,20	2,11	1,72	2.300,00	3.956,00	12,00	1,00	47.472,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	110.609,76	10.871,09	2,10	2,11
	4	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-1	0,2	8,1	1,62	3,05	4,94	4,34	2.300,00	9.982,00	6,00	4,00	239.568,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	558.193,44	54.861,07	10,61	10,66
	5	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-2	0,2	9,3	1,86	3,05	5,67	6,04	2.300,00	13.892,00	8,00	4,00	444.544,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	1.035.787,52	101.800,58	19,68	19,79
	6	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-3	0,2	8,1	1,62	3,05	4,94	5,54	2.300,00	12.742,00	6,00	4,00	305.808,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	712.532,64	70.030,03	13,54	13,61
	7	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-4	0,2	4,7	0,94	3,30	3,10	3,10	2.300,00	7.130,00	2,00	4,00	57.040,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	132.903,20	13.062,16	2,53	2,54
	Forjado	8	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-1	1,2	0,25	0,30	8,50	2,55	1,68	1.400,00	2.352,00	32,00	4,00		301.056,00	524,78	Precast RC 40/50	2,33	0,229	701.460,48	68.941,82
9		Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-2	1,2	0,25	0,30	8,40	2,52	1,66	1.400,00	2.324,00	16,00	4,00	148.736,00	Precast RC 40/50	2,33		0,229	346.554,88	34.060,54	6,58	6,62
10		Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-3	1,2	0,25	0,30	5,20	1,56	1,03	1.400,00	1.442,00	13,00	4,00	74.984,00	Precast RC 40/50	2,33		0,229	174.712,72	17.171,34	3,32	3,34
Monolitismo	11	Capa de compresión de hormigón in situ 5cm			551,72	0,05	27,59	28,54	2.400,00	68.496,00	1,00	4,00	273.984,00	273,98	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	526.049,28	50.687,04	9,99	9,85
3	Área de planta (m2)		619,76	pisos		4,0	Área edificio (m2)		2479,04	Total peso de edificio (kg)			2.391.892,00	2.391,89	Total Impactos edificio			5.263.286,12	514.494,05	100,00	100,00
	Total peso de edificio (Toneladas)									2.391,89	Impacto por m2				2123,11	207,54					

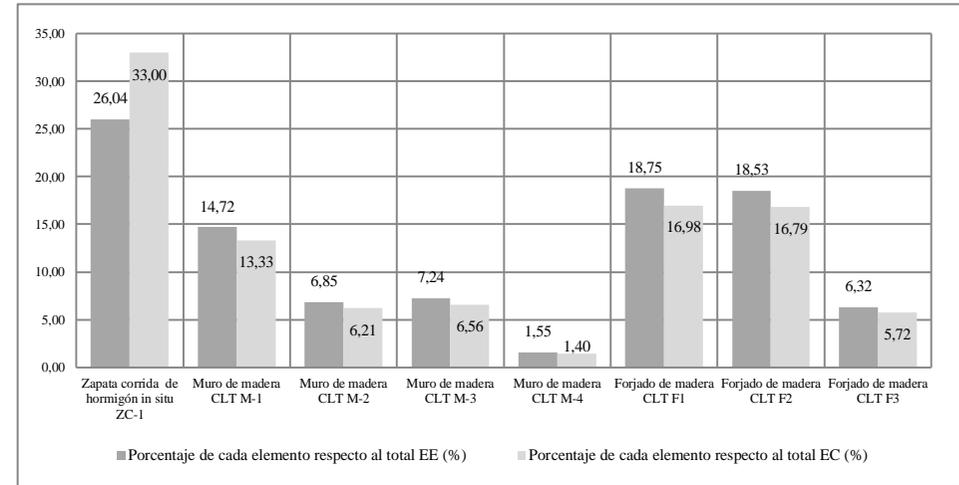
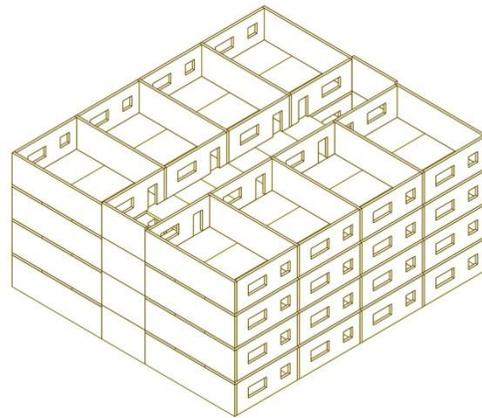


Tabla 27. Impactos ambientales en edificio 4-M-M

Fig. 45 Porcentaje de impacto por elemento edificio 4-M-M (%)

4 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 4-M-M MUROS DE MADERA CLT																					
Tipo de elemento	Nº	ELEMENTOS DEL SISTEMA 4-M-M	DIMENSIONES					PESO						FACTORES ICE			IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total EE (%)	Porcentaje de cada elemento respecto al total EC (%)	
			Lado a (m)	Lado b (m)	Área (m2)	Longitud o altura (m)	Volumen nominal simplificado (m3)	Volumen AutoCAD (m3)	Densidad (Kg/m3)	Peso de 1 elemento (kg)	Cantidad de elementos por piso	Número de pisos	Peso total (kg)	Peso (Tn)	Material	EE (MJ/kg)	EC (kgCO2/kg)	EE (MJ)			EC (KgCO2)
Fundación	1	Zapata corrida de hormigón in situ ZC-1	1,2	0,6	0,72	216,76	156,07	149,61	2.400,00	359.064,00	1,0	1,0	359.064,00	359,06	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	689.402,88	66.426,84	26,04	33,00
Elementos resistentes verticales	2	Muro de madera CLT M-1	0,165	9,87	1,63	3,00	4,89	4,88	550,00	2.684,00	10,00	4,00	107.360,00	221,45	Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	389.716,80	26.840,00	14,72	13,33
	3	Muro de madera CLT M-2	0,165	7,64	1,26	3,00	3,78	2,84	550,00	1.562,00	8,00	4,00	49.984,00		Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	181.441,92	12.496,00	6,85	6,21
	4	Muro de madera CLT M-3	0,165	6,7	1,11	3,00	3,34	3,00	550,00	1.650,00	8,00	4,00	52.800,00		Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	191.664,00	13.200,00	7,24	6,56
	5	Muro de madera CLT M-4	0,165	4,8	0,80	3,23	2,58	2,57	550,00	1.413,50	2,00	4,00	11.308,00		Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	41.048,04	2.827,00	1,55	1,40
Forjado	6	Forjado de madera CLT F1	6,98	3,3	23,03	0,225	5,18	5,18	550,00	2.849,00	12,00	4,00	136.752,00	317,99	Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	496.409,76	34.188,00	18,75	16,98
	7	Forjado de madera CLT F2	6,9	3,3	22,77	0,225	5,12	5,12	550,00	2.816,00	12,00	4,00	135.168,00		Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	490.659,84	33.792,00	18,53	16,79
	8	Forjado de madera CLT F3	3,00	5,17	15,51	0,225	3,49	3,49	550,00	1.919,50	6,00	4,00	46.068,00		Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	167.226,84	11.517,00	6,32	5,72
4	Área de planta (m2)		682,05	pisos	4,0	Área edificio (m2)	2728,20	Total peso de edificio (kg)		898.504,00		898,50	Total Impactos edificio			2.647.570,08	201.286,84	100,00	100,00		
	Total peso de edificio (Toneladas)		898,50		Impacto por m2		970,45	73,78													

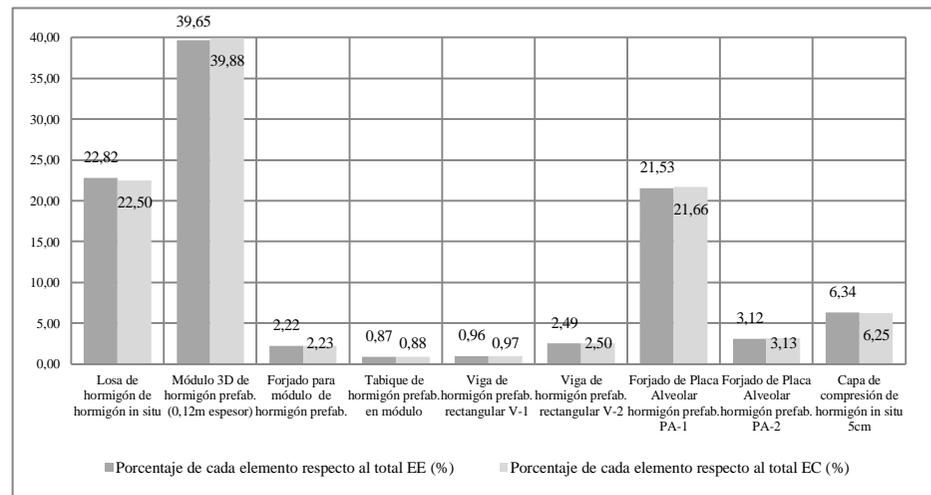
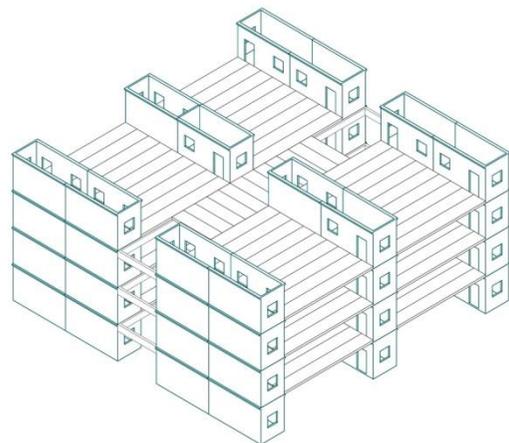


Tabla 28. Impactos ambientales en edificio 5-MIX-H

Fig. 46 Porcentaje de impacto por elemento edificio 5-MIX-H (%)

5 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 5-MIXTO-H MÓDULO 3D DE HORMIGÓN Y FORJADO PREFABRICADO																					
Tipo de elemento	Nº	ELEMENTOS DEL SISTEMA 5-MIX-H	DIMENSIONES						PESO						FACTORES ICE			IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total EE (%)	Porcentaje de cada elemento respecto al total EC (%)
			Lado a (m)	Lado b (m)	Área (m2)	Longitud o altura (m)	Volumen nominal simplificado (m3)	Volumen AutoCAD (m3)	Densidad (Kg/m3)	Peso de 1 elemento (kg)	Cantidad de elementos por piso	Número de pisos	Peso total (kg)	Peso (Tn)	Material	EE(MJ/kg)	EC (kgCO2/kg)	EE (MJ)	EC (KgCO2)		
Cimentación	1	Losa de hormigón de hormigón in situ			655,36	0,30	196,61	196,61	2.400,00	471.864,00	1,0	1,0	471.864,00	471,86	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	905.978,88	87.294,84	22,82	22,50
Elementos resistentes verticales	2	Módulo 3D de hormigón prefab. (0,12m espesor)	2,4	5,4	12,96	3,26	42,25	6,12	2.300,00	14.076,00	12,00	4,00	675.648,00	728,36	Precast RC 40/50	2,33	0,229	1.574.259,84	154.723,39	39,65	39,88
	3	Forjado para módulo de hormigón prefab.	2,2	0,12	0,26	5,28	1,37	1,37	2.300,00	3.151,00	12,00	1,00	37.812,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	88.101,96	8.658,95	2,22	2,23
	4	Tabique de hormigón prefab. en módulo	0,12	2,2	0,26	3,14	0,81	0,81	2.300,00	1.863,00	2,00	4,00	14.904,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	34.726,32	3.413,02	0,87	0,88
Elementos resistentes horizontales	5	Viga de hormigón prefab. rectangular V-1	0,2	0,6	0,12	16,00	1,92	1,78	2.300,00	4.094,00	1,00	4,00	16.376,00	58,79	Precast RC 40/50	2,33	0,229	38.156,08	3.750,10	0,96	0,97
	6	Viga de hormigón prefab. rectangular V-2	0,15	0,6	0,09	45,60	4,10	4,61	2.300,00	10.603,00	1,00	4,00	42.412,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	98.819,96	9.712,35	2,49	2,50
Forjado	7	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-1	1,2	0,25	0,30	9,20	2,76	1,82	1.400,00	2.548,00	36,00	4,00	366.912,00	420,00	Precast RC 40/50	2,33	0,229	854.904,96	84.022,85	21,53	21,66
	8	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-2	1,2	0,25	0,30	4,00	1,20	0,79	1.400,00	1.106,00	12,00	4,00	53.088,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	123.695,04	12.157,15	3,12	3,13
Monolitismo	9	Capa de compresión de hormigón in situ 5cm			455,04	0,03	13,65	13,65	2.400,00	32.760,00	1,00	4,00	131.040,00	131,04	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	251.596,80	24.242,40	6,34	6,25
5	Área de planta (m2)		655,36	pisos		4,0	Área edificio (m2)		2621,44	Total peso de edificio (kg)			1.810.056,00	1.810,06	Total Impactos edificio			3.970.239,84	387.975,05	100,00	100,00
	Total peso de edificio (Toneladas)												1.810,06		Impacto por m2			1514,53	148,00		

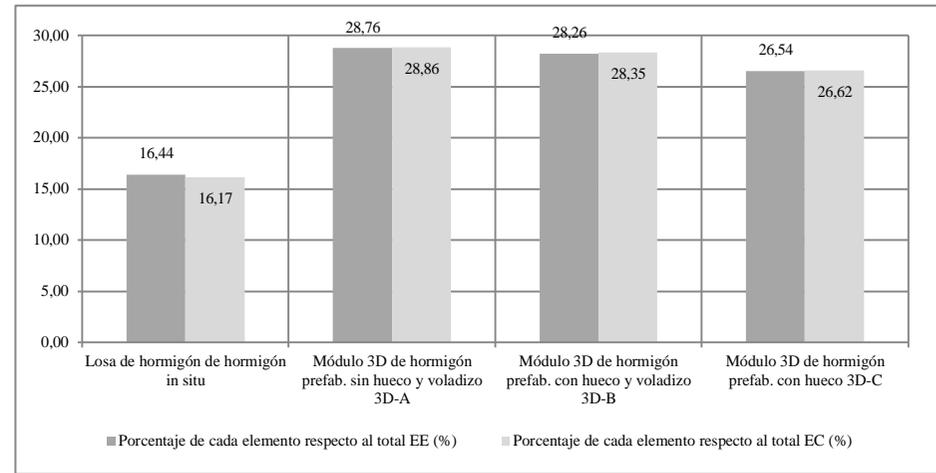
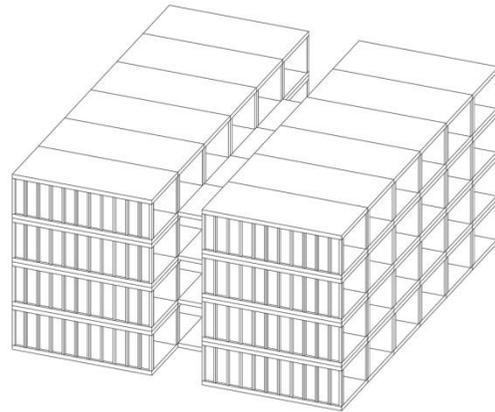


Tabla 29. Impactos ambientales en edificio 6-3D-H

Fig. 47 Porcentaje de impacto por elemento edificio 6-3D-H (%)

6 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 6-3D-H MÓDULO 3D DE HORMIGÓN PREFABRICADO																					
Tipo de elemento	Nº	ELEMENTOS DEL SISTEMA 6-3D-H	DIMENSIONES					PESO						FACTORES ICE			IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total EE (%)	Porcentaje de cada elemento respecto al total EC (%)	
			Lado a (m)	Lado b (m)	Área (m2)	Longitud o altura (m)	Volumen nominal simplificado (m3)	Volumen AutoCAD (m3)	Densidad (Kg/m3)	Peso de 1 elemento (kg)	Cantidad de elementos por piso	Número de pisos	Peso total (kg)	Peso (Tn)	Material	EE(MJ/kg)	EC (kgCO2/kg)	EE(MJ)			EC (KgCO2)
Cimentación	1	Losa de hormigón de hormigón in situ			637,20	0,40	254,88	254,88	2.400,00	611.712,00	1,0	1,0	611.712,00	611,71	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,92	0,185	1.174.487,04	113.166,72	16,44	16,17
Elementos resistentes, vertical, horizontal y forjado	2	Módulo 3D de hormigón prefab. sin hueco y voladizo 3D-A	4,5	11,8	53,10	3,20	169,92	25,06	2.200,00	55.132,00	4,00	4,00	882.112,00	2.562,56	Precast RC 40/50	2,33	0,229	2.055.320,96	202.003,65	28,76	28,86
	3	Módulo 3D de hormigón prefab. con hueco y voladizo 3D-B	4,5	11,8	53,10	3,20	169,92	24,62	2.200,00	54.164,00	4,00	4,00	866.624,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	2.019.233,92	198.456,90	28,26	28,35
	4	Módulo 3D de hormigón prefab. con hueco 3D-C	4,5	10,0	45,00	3,20	144,00	23,12	2.200,00	50.864,00	4,00	4,00	813.824,00		Precast RC 40/50	2,33	0,229	1.896.209,92	186.365,70	26,54	26,62
6	Área de planta (m2)		637,20	pisos	4,0	Área edificio (m2)	2548,80	Total peso de edificio (kg)				3.174.272,00	3.174,27	Total Impactos edificio			7.145.251,84	699.992,96	100,00	100,00	
	Total peso de edificio (Toneladas)						3.174,27	Impacto por m2			2803,38	274,64									

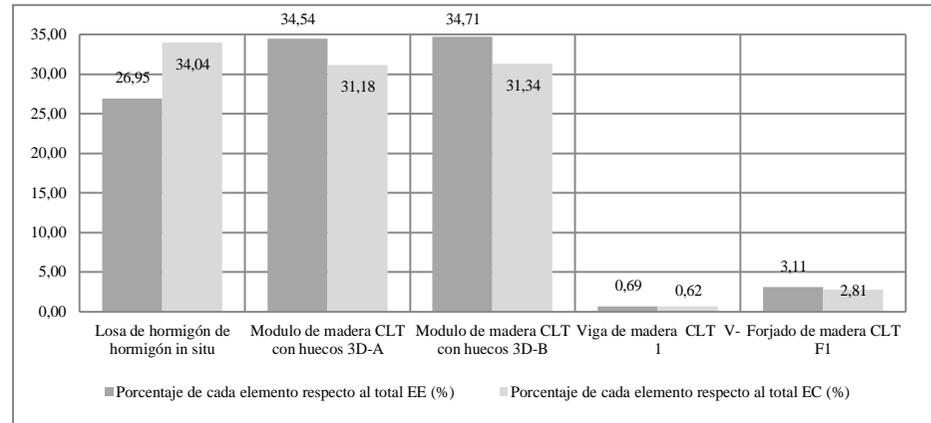
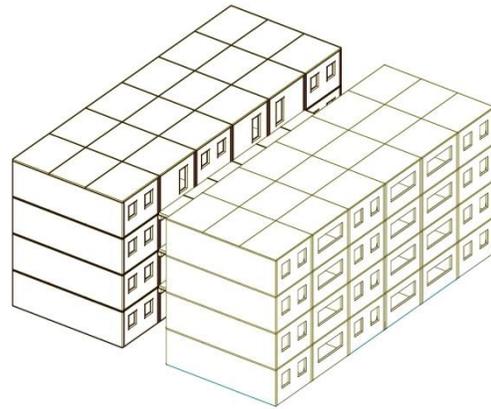


Tabla 30. Impactos ambientales en edificio 7-3D-M

Fig. 48 Porcentaje de impacto por elemento edificio 7-3D-M (%)

7 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 7-3D-M MÓDULO 3D DE MADERA CLT																					
Tipo de elemento	Nº	ELEMENTOS DEL SISTEMA 7-3D-M	DIMENSIONES					PESO						FACTORES ICE			IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total EE(%)	Porcentaje de cada elemento respecto al total EC(%)	
			Lado a (m)	Lado b (m)	Área (m2)	Longitud o altura (m)	Volumen nominal simplificado (m3)	Volumen AutoCAD (m3)	Densidad (Kg/m3)	Peso de 1 elemento (kg)	Cantidad de elementos por piso	Número de pisos	Peso total (kg)	Peso (Tn)	Material	EE (MJ/kg)	EC (kg CO2/kg)	EE (MJ)			EC (Kg CO2)
Cimentación	1	Losa de hormigón de hormigón in situ			648,00	0,30	194,40	194,40	2.400,00	466.560,00	1,0	1,0	466.560,00	466,56	Reinforced RC 25/30 Mpa	1,920	0,185	895.795,20	86.313,60	26,95	34,04
Elementos resistentes, vertical, horizontal y forjado	2	Modulo de madera CLT con huecos 3D-A	4,5	10,0	45,00	3,10	139,50	23,96	550,00	13.178,00	6,00	4,00	316.272,00	634,13	Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	1.148.067,36	79.068,00	34,54	31,18
	3	Modulo de madera CLT con huecos 3D-B	4,5	10,0	45,00	3,10	139,50	24,08	550,00	13.244,00	6,00	4,00	317.856,00		Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	1.153.817,28	79.464,00	34,71	31,34
Elementos resistentes horizontales	4	Viga de madera CLT V-1	0,2	0,4	0,08	36,00	2,88	2,88	550,00	1.584,00	1,00	4,00	6.336,00	6,34	Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	22.999,68	1.584,00	0,69	0,62
Forjado	5	Forjado de madera CLT F1	3,0	4,0	12,00	0,18	2,16	2,16	550,00	1.188,00	6,00	4,00	28.512,00	28,51	Laminated Veneer Lumber	3,63	0,25	103.498,56	7.128,00	3,11	2,81
7	Área de planta (m2)		648,00	pisos	4,0	Área edificio (m2)	2592,00	Total peso de edificio (kg)				1.135.536,00	1.135,54	Total Impactos edificio			3.324.178,08	253.557,60	100,00	100,00	
	Total peso de edificio (Toneladas)						1.135,54	Impacto por m2			1282,48	97,82									

Tabla 31. Resumen de Impactos de Fabricación

RESUMEN DE IMPACTOS FABRICACIÓN											
	edificio	SISTEMA	ÁREA PLANTA (m2)	Nº PLANTAS	ÁREA EDIFICADA (m2)	PESO EDIFICIO (Tn)	PESO (Tn/m2)	EE (MJ)	EE (MJ/m2)	EC (KgCO2)	EC (KgCO2/m2)
1	1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	642,60	4	2570,40	1726,27	672	3.861.388,80	1502	378.057,02	147
2	2-P-A	Pórticos de acero	647,70	4	2590,80	1430,24	552	7.131.335,97	2753	544.745,31	210
3	3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	619,76	4	2479,04	2391,89	965	5.263.286,12	2123	514.494,05	208
4	4-M-M	Muros de madera CLT	682,05	4	2728,20	898,50	329	2.647.570,08	970	201.286,84	74
5	5-MIX-H	Módulo 3D de hormigón y forjado prefabricado	655,36	4	2621,44	1810,06	690	3.970.239,84	1515	387.975,05	148
6	6-3D-H	Módulo 3D de hormigón prefabricado	637,20	4	2548,80	3174,27	1245	7.145.251,84	2803	699.992,96	275
7	7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	648,00	4	2592,00	1135,54	438	3.324.178,08	1282	253.557,60	98

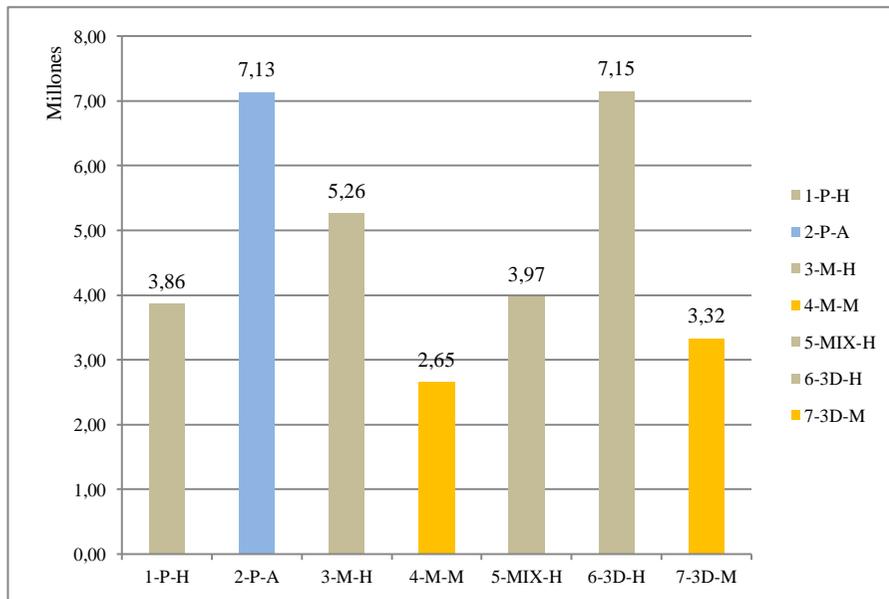


Fig. 49 Gráfico EE (MJ)

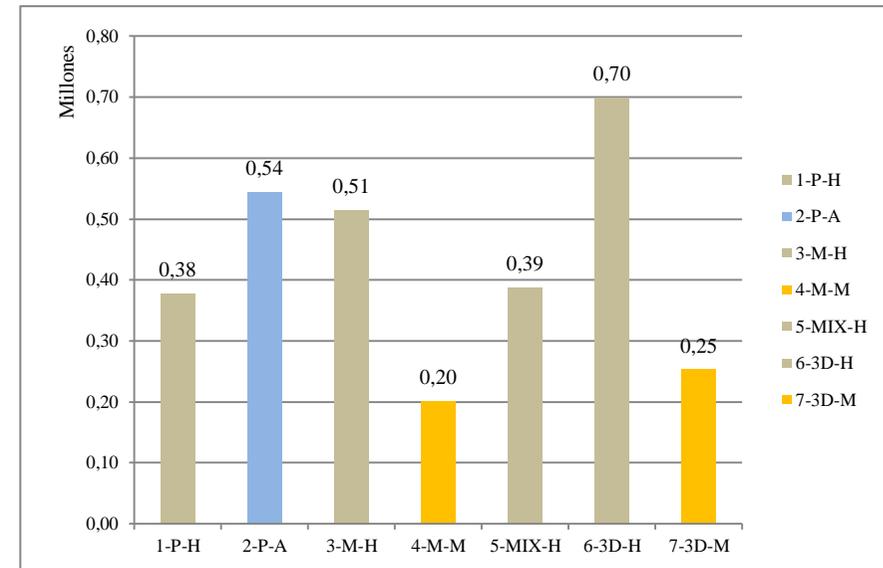


Fig. 50 Gráfico EC (kgCO2)

En la tabla 31 se resumen los impactos ambientales EE y EC para cada uno de los 7 edificios analizados, en las figuras 49 y 50 se presentan en millones los valores EE y EC.

Puede observarse en las figuras 51 y 52 que la gráfica de doble eje deja en evidencia que los edificios cuyo impacto es alto con relación a su peso representan una opción de alto impacto ambiental, es el caso del edificio de pórticos de acero 2-P-A

Para verificar cual es el elementos que más incide en la generación de impactos dentro de los edificios se presentan la tabla 32 y las figuras 54, 55. La ganancia de impactos está relacionada con el peso de los elementos y el valor ICE por eso se presenta la comparación en peso de los elementos en valores de porcentaje.

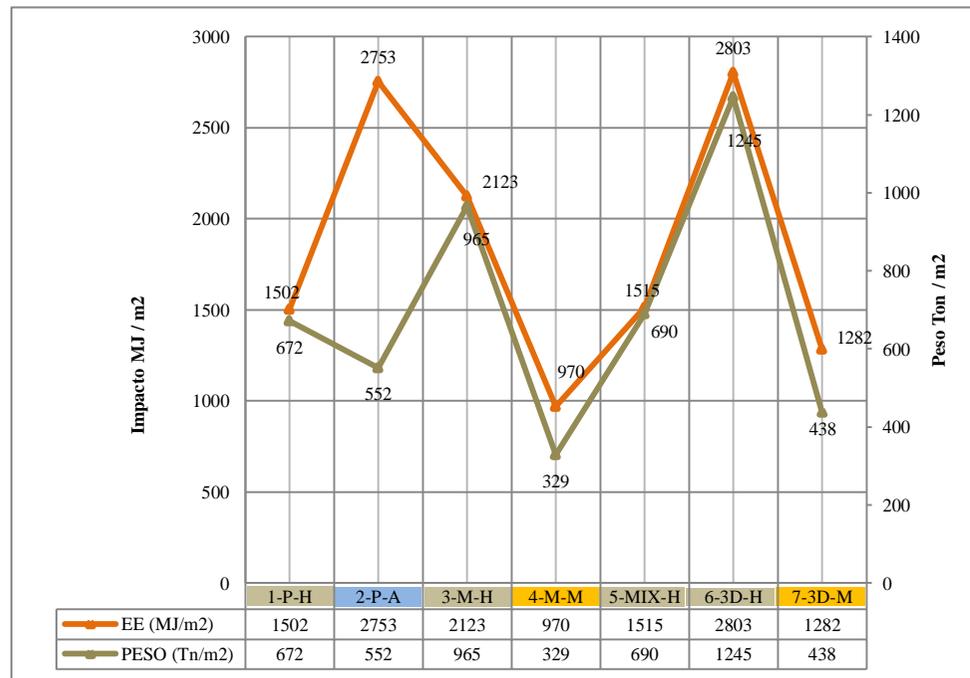


Fig. 51 Gráfico Relación entre (Tn/m2) y (MJ/m2)

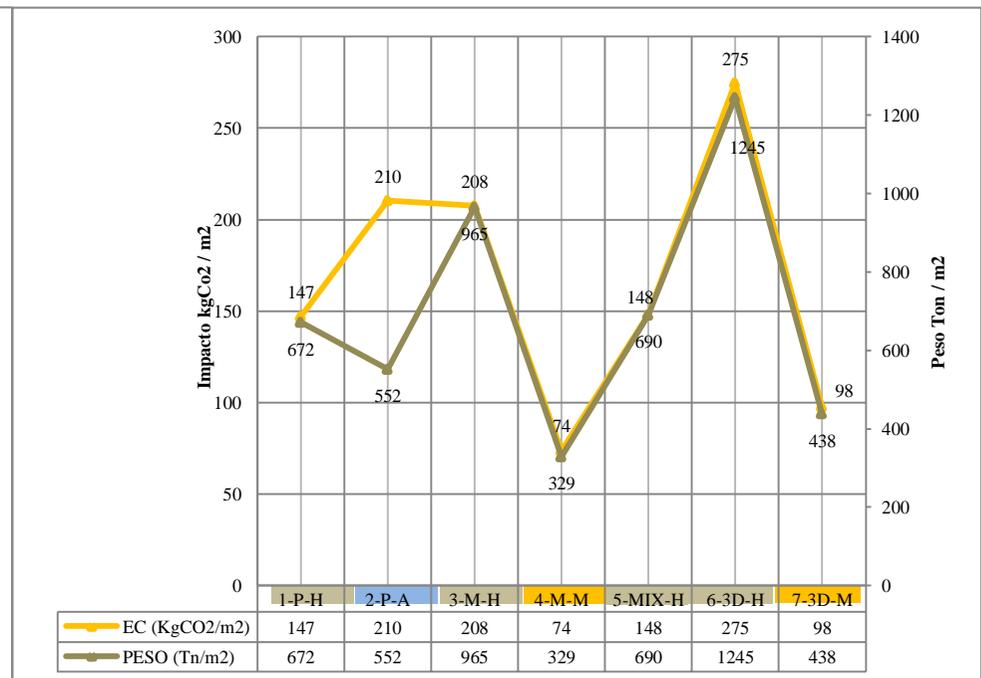


Fig. 52 Gráfico Relación entre (Tn/m2) y (kgCO2/m2)

Tabla 32. Resumen de Porcentajes de peso e impactos por cada elemento del sistema

PORCENTAJE DE PESO E IMPACTOS POR ELEMENTOS DEL SISTEMA																										
Elementos del Sistema			Cimentación				Elementos resistentes verticales				Elementos resistentes horizontales				Forjado				Monolitismo				Fachada			
edificio	SISTEMA		Cimentación peso (Tn)	Cimentación peso (%)	Cimentación EE (%)	Cimentación EC (%)	Verticales peso (Tn)	Verticales peso (%)	Verticales EE (%)	Verticales EC (%)	Horizontales peso (Tn)	Horizontales peso (%)	Horizontales EE (%)	Horizontales EC (%)	Forjado peso (Tn)	Forjado peso (%)	Forjado EE (%)	Forjado EC (%)	Monolitismo peso (Tn)	Monolitismo peso (%)	Monolitismo EE (%)	Monolitismo EC (%)	Fachada peso (Tn)	Fachada peso (%)	Fachada EE (%)	Fachada EC (%)
1	1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	120,00	7	6	6	172,78	10	10	10	267,54	15	16	16	558,60	32	34	34	272,26	16	14	13	335,10	19	20	20
2	2-P-A	Pórticos de acero	121,34	8	3	4	37,44	3	11	10	113,88	8	34	30	65,19	5	20	17	809,38	57	22	27	283,01	20	9	12
3	3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	481,68	20	18	17	1.111,45	46	49	49					524,78	22	23	23	273,98	11	10	10				
4	4-M-M	Muros de madera CLT	359,06	40	26	33	221,45	25	30	28					317,99	35	44	39								
5	5-MIX-H	Módulo 3D de hormigón y forjado prefabricado	471,86	26	23	23	728,36	40	43	43	58,79	3	3	3	420,00	23	25	25	131,04	7	6	6				
6	6-3D-H	Módulo 3D de hormigón prefabricado	611,71	19	16	16	2.562,56	81	84	84																
7	7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	466,56	41	27	34	634,13	56	69	63	6,34	1	1	1	28,51	3	3	3								

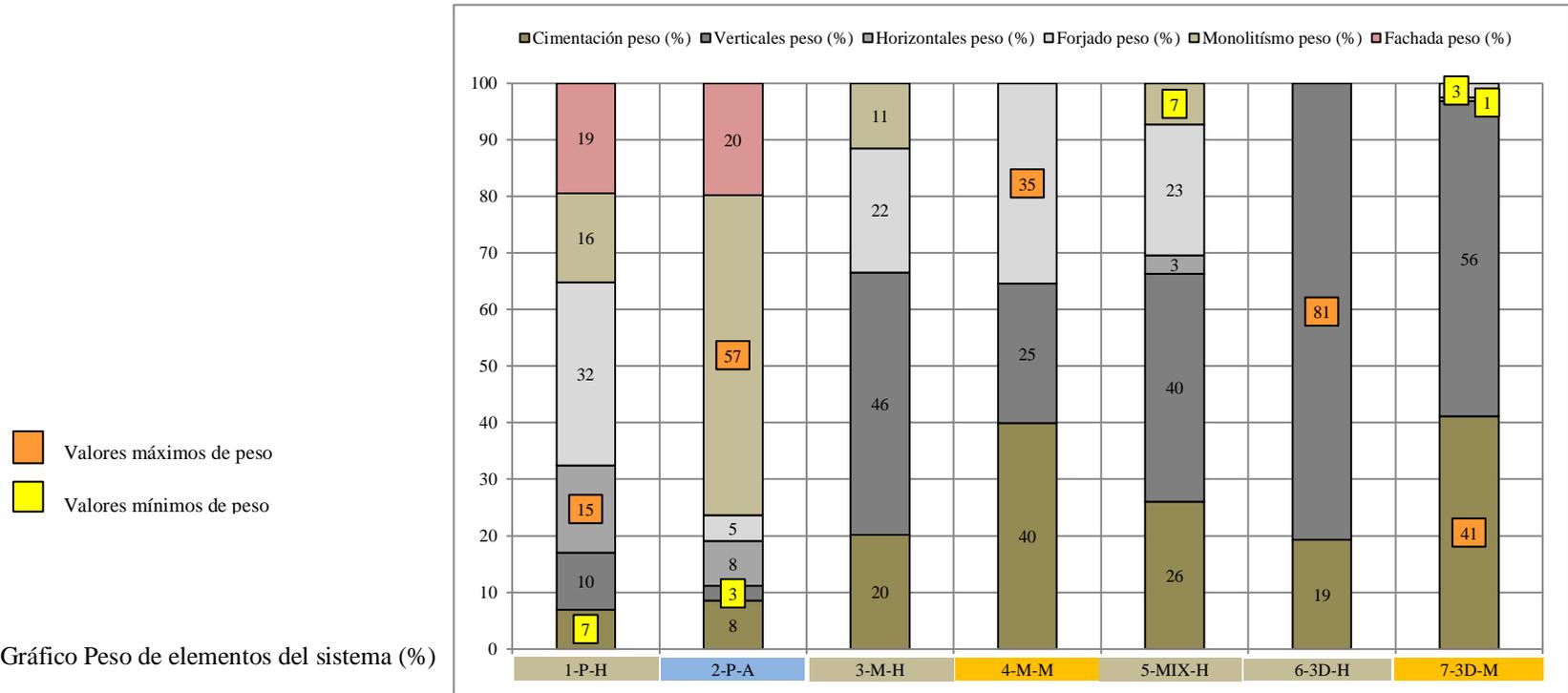


Fig. 53 Gráfico Peso de elementos del sistema (%)

o

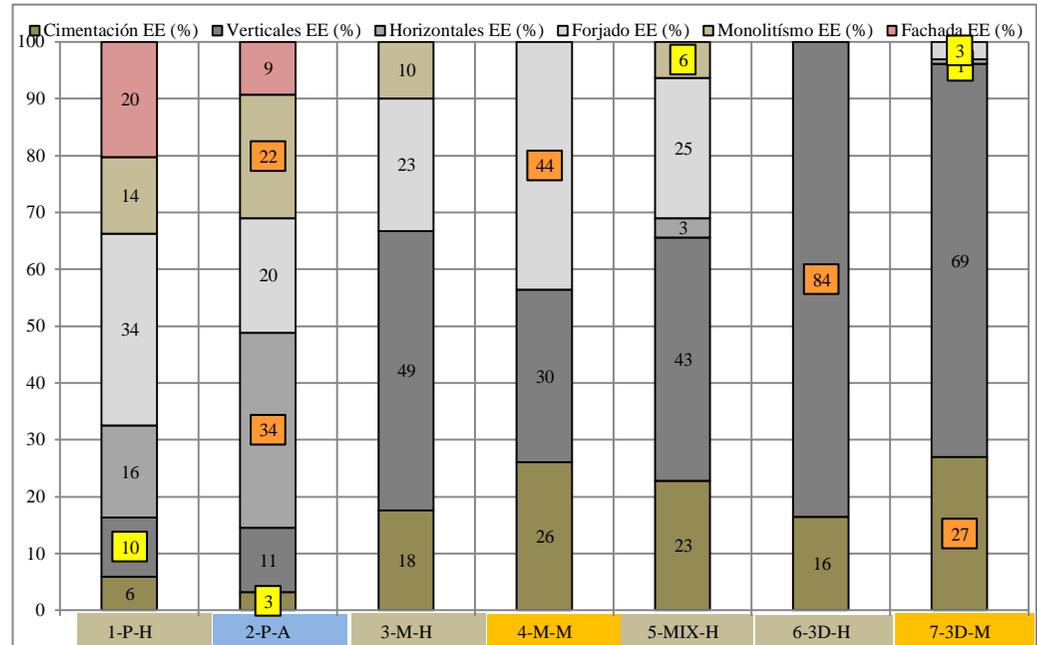


Fig. 54 Gráfico EE de elementos del sistema (%)

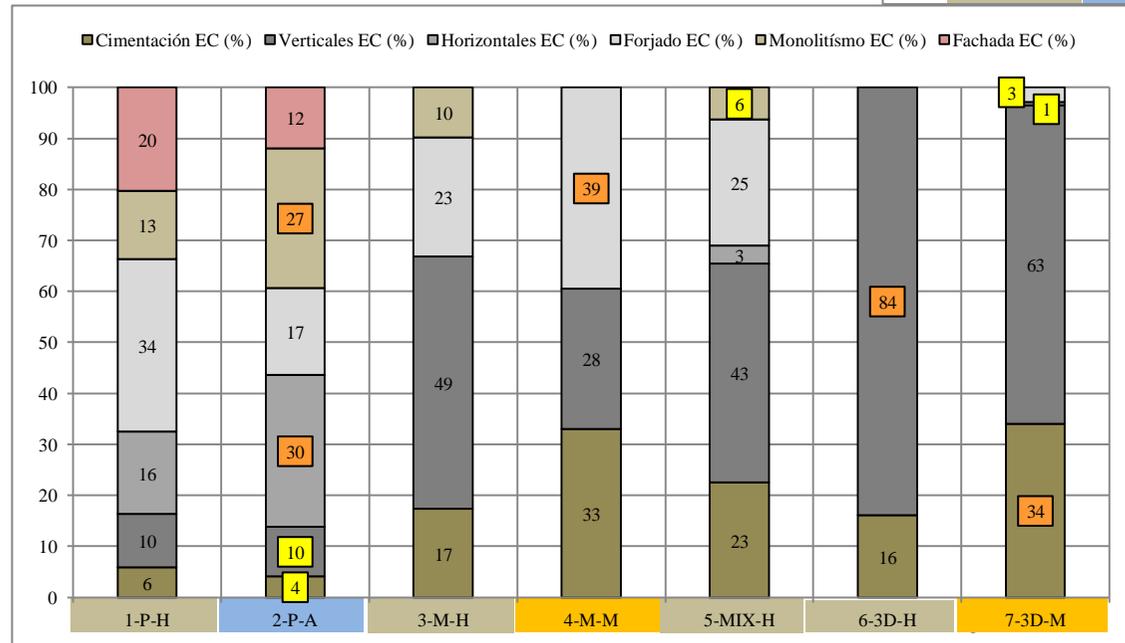


Fig. 55 Gráfico EC de elementos del sistema (%)

■ Valores máximos de impactos  
■ Valores mínimos de impactos

### 5.3. Cálculo de impactos ambientales por transporte y comparación con impactos por fabricación

Los impactos por transporte de la fábrica a la obra, son estimados para un valor de impacto según el tipo de transporte, en este caso se ha tomado como muestra un vehículo de 14 toneladas para la mezcladora de hormigón in situ, y un vehículo de 40 toneladas para los elementos de construcción prefabricada e industrializada. Este dato se toma de la consulta a 3 de las empresas fabricantes en Cataluña. El valor de impacto ambiental está dotado según el tipo de transporte, en este sentido, para el vehículo de 14 toneladas el impacto es de 0,0022 MJ/kg.km y para el de 40 toneladas es de 0,0008 MJ/kg.km (París, 2019).

Se han determinado rangos de distancias, en este sentido, de 100 km para el transporte de hormigón a ser vaciado in situ como un parámetro excedido adrede para poderlo comparar, ya que el suministro generalmente no excede 25 km. Sin embargo para las distancias de los elementos de prefabricación industrializada se han tomado según sondeo de la ubicación de la industria en España, siendo 200 km para elementos de pórticos y muros de hormigón, de 600 km para las estructuras de acero, 800 km para los muros de CLT y de 1000 para los módulos 3D de madera, pero en el caso de módulo 3D de hormigón se ha tomado de 200 pues la industria es cercana a Barcelona adonde podría ubicarse hipotéticamente el edificio “X” (Tabla 33 y Fig. 56).

Tabla 33. Resumen de impactos por transporte de los elementos del sistema constructivo por edificio

IMPACTOS POR TRANSPORTE																					
Elementos del Sistema			Cimentación		Elementos resistentes verticales			Elementos resistentes horizontales			Forjado		Monolitismo		Fachada			TOTALES			
			Distancia	Road 14 Tn (MJ/kg*km)	Distancia	Road 40 Tn (MJ/kg*k m)	Distancia	Road 40 Tn (MJ/kg*km)	Distancia	Road 40 Tn (MJ/kg*km)	Distancia	Road 40 Tn (MJ/kg*km)	Distancia	Road 14 Tn (MJ/kg*km)	Distancia	Road 40 Tn (MJ/kg*km)	Distancia				Road 40 Tn (MJ/kg*km)
			100,00	0,0022																	
edificio	SISTEMA	Cimentación n peso (Tn)	EErode 14 (MJ)	Verticales peso (Tn)	(km)	EErode 40 (MJ)	Horizontales peso (Tn)	(km)	EErode 40 (MJ)	Forjado peso (Tn)	(km)	EErode 40 (MJ)	Monolitismo peso (Tn)	EErode 14 (MJ)	Fachada peso (Tn)	(km)	EErode 40 (MJ)	Peso (Tn)	EE (MJ)	EE transporte (MJ/m2)	
1	1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	120,00	1.885,71	172,78	200,00	691,10	267,54	200,00	1.070,14	558,60	200,00	2.234,40	272,26	4.278,31	335,10	200,00	1.340,42	1.726	11.500,09	18
2	2-P-A	Pórticos de acero	121,34	1.906,83	37,44	600,00	449,28	113,88	600,00	1.366,56	65,19	600,00	782,29	809,38	12.718,77	283,01	200,00	1.132,03	1.430	18.355,76	28
3	3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	481,68	7.569,26	1.111,45	200,00	4.445,81				524,78	200,00	2.099,10	273,98	4.305,46				2.392	18.419,63	30
4	4-M-M	Muros de madera CLT	359,06	5.642,43	221,45	800,00	3.543,23				317,99	800,00	5.087,81						899	14.273,47	21
5	5-MIX-H	Módulo 3D de hormigón y forjado prefabricado	471,86	7.415,01	728,36	200,00	2.913,46	58,79	200,00	235,15	420,00	200,00	1.680,00	131,04	2.059,20				1.810	14.302,81	22
6	6-3D-H	Módulo 3D de hormigón prefabricado	611,71	9.612,62	2.562,56	100,00	5.125,12												3.174	14.737,74	23
7	7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	466,56	7.331,66	634,13	1.000,00	12.682,56	6,34	1.000,00	126,72	28,51	1.000,00	570,24						1.136	20.711,18	32

En la tabla 34 se presentan los impactos por transporte y fabricación así como la relación comparativa entre ambos, siendo de hasta 121 veces mayor el impacto por fabricación que el de transporte (Fig. 58) aun para el edificio 6-3D-H, el que más pesa. En el caso de los sistemas de madera, la diferencia entre los impactos es menos debido a que el impacto de fabricación es considerablemente menor gracias a la relación de bajo peso y resistencia. La figura 57 muestra la relación entre peso e impacto por transporte.

RELACIÓN ENTRE IMPACTOS					
	edificio	SISTEMA	EE fabricación (MJ/m2)	EE transporte (MJ/m2)	EE fabricación/EE transporte
1	1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	1502	18	84
2	2-P-A	Pórticos de acero	2753	28	97
3	3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	2123	30	71
4	4-M-M	Muros de madera CLT	970	21	46
5	5-MIX-H	Módulo 3d de hormigón y forjado prefabricado	1515	22	69
6	6-3D-H	Módulo 3d de hormigón prefabricado	2803	23	121
7	7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	1282	32	40

Tabla 34. Resumen de impactos por transporte y por fabricación

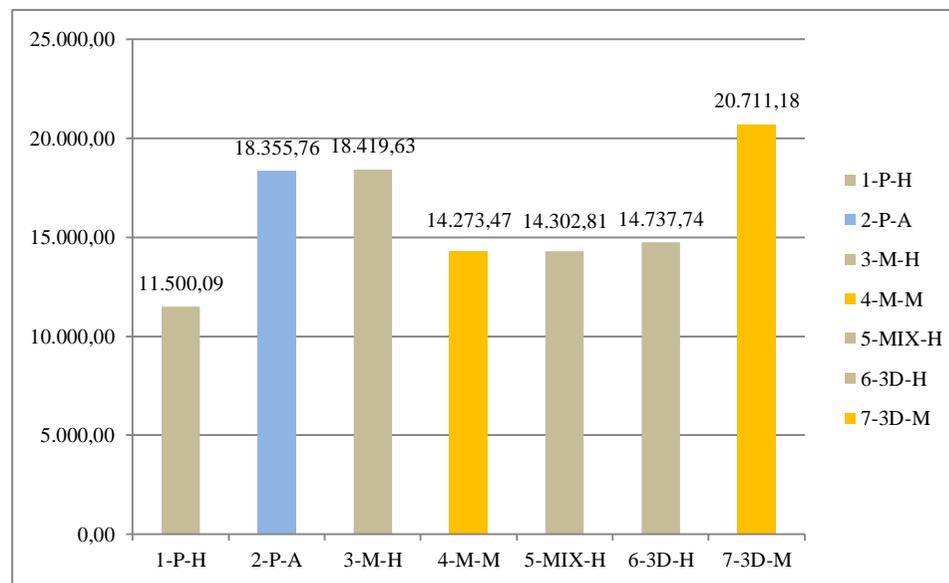


Fig. 56 Gráfico EE transporte (MJ)

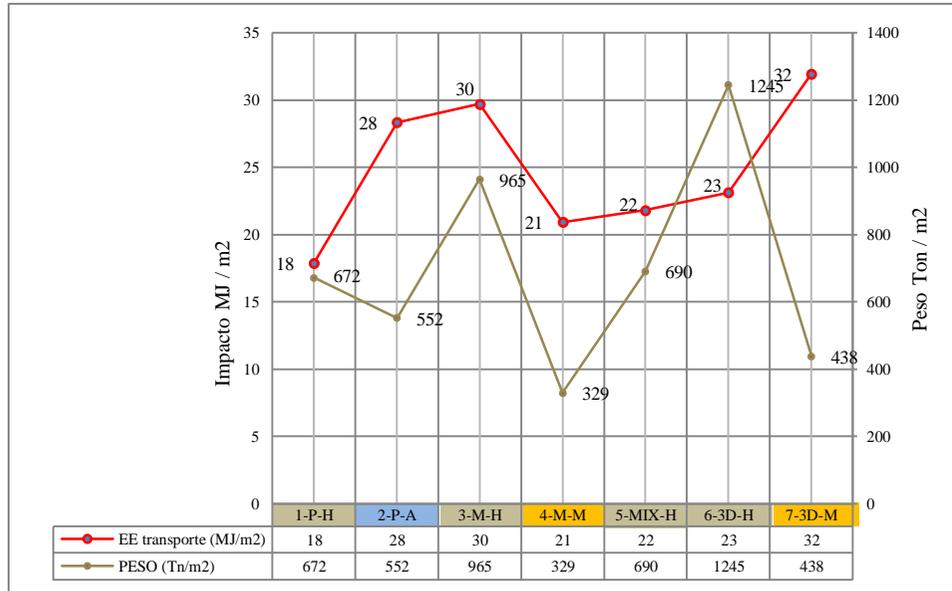


Fig. 57 Gráfico relación entre EE transporte (MJ/m²) y peso (Tn/m²)

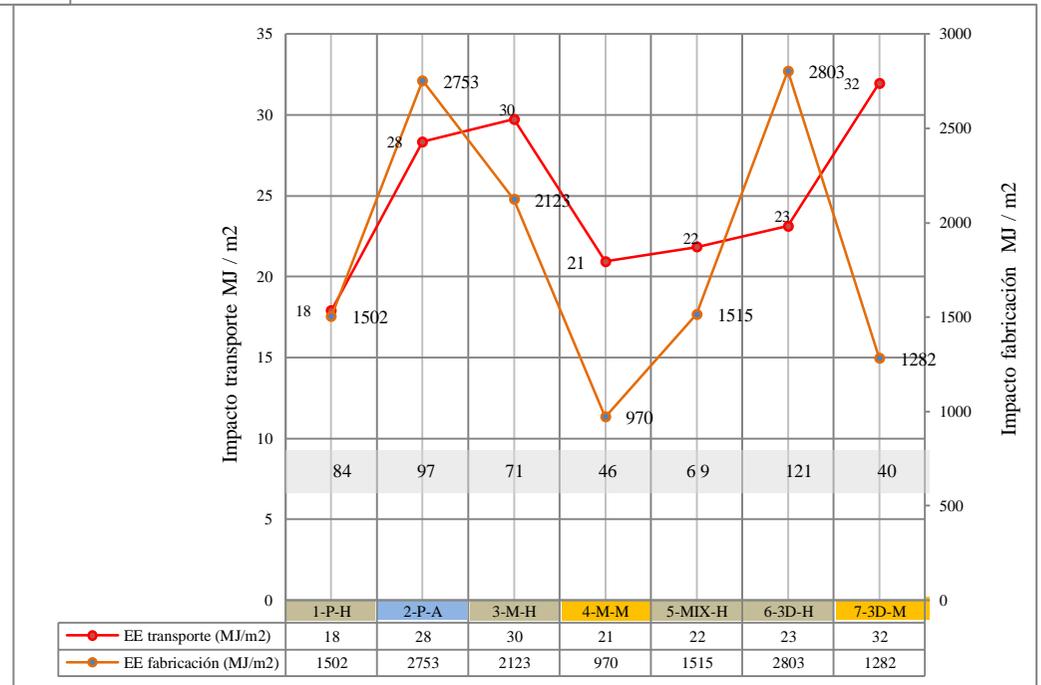


Fig. 58 Gráfico relación entre EE transporte (MJ/m²) y EE fabricación (MJ/m²)

#### 5.4. Análisis de recuperación de impactos

A continuación se presente el análisis de recuperación de impactos, aplicando 3 conceptos:

- a) **Reversibilidad:** Desde el punto de vista físico es la capacidad de un objeto para volver a su estado original. Este concepto se aplicará a la recuperación de impactos como la capacidad de los elementos de construcción industrializada de mantener su función estructural en caso de ser desmontado y tener que ser ensamblado nuevamente, para una segunda vida útil. La valoración de recuperación de impactos en el análisis se pondera a través de cinco porcentajes 10, 25, 50, 75, 90 por ciento, siendo 10% un bajo potencial de reversibilidad que es aplicado al hormigón in situ y el 90% es aplicado a aquellos elementos con un alto potencial de reversibilidad, a los que se estima, no pierden su capacidad resistente debido al tipo de unión generalmente articulado usual en las estructuras de prefabricación industrializada. Por tanto, a mayor porcentaje, mayor recuperación de impacto por reversibilidad (Fig. 60 y 61) (Tablas de la 35 a la 42).
- b) **Durabilidad:** Es una cualidad de la calidad de un material, se refiere al tiempo que permanece cumpliendo sus funciones sin perder sus atributos para lo que ha sido diseñado. Para que la durabilidad se mantenga en el tiempo en las estructuras, el Código Técnico de la Edificación CTE recomienda que el mantenimiento sea dado al

menos cada 10 años. En este sentido se ha optado por hacer una valoración de 0 a 10 años siendo correlativo con el porcentaje de 0 a 100 por ciento. Por tanto cuanto mayor es el período de mantenimiento en cantidad de años, mayor es la recuperación de impactos por durabilidad, ya que en cada etapa de mantenimiento, según las condiciones a las que se vea expuesta el edificio, así será requerido el consumo de recursos, siendo los más desfavorables los sistemas de madera, ya que con la humedad pierden capacidad resistente, por tanto su periodo es más corto (Fig. 62 y 63) (Tabla 43).

- c) **Funcionabilidad:** Utilidad práctica de un elemento, en un edificio la funcionabilidad puede ser sinónimo de área útil, destinada a la función para la que ha sido creado, es decir los espacios servidos, y con cierta reserva pueden ser clasificados como espacios funcionales las áreas destinadas a circulación y accesos, quedando fuera de esta clasificación el área de estructuras. Por tanto, para cada edificio se ha obtenido el porcentaje que representa el área útil de la planta del edificio, es decir, solo el área de viviendas y este es el porcentaje que se valora como recuperación, siendo el mayor porcentaje de área, la mayor recuperación de impactos. Este parámetro también se considera como parámetro de eficiencia estructural (Fig. 59, 64 y 65) (Tabla 44).

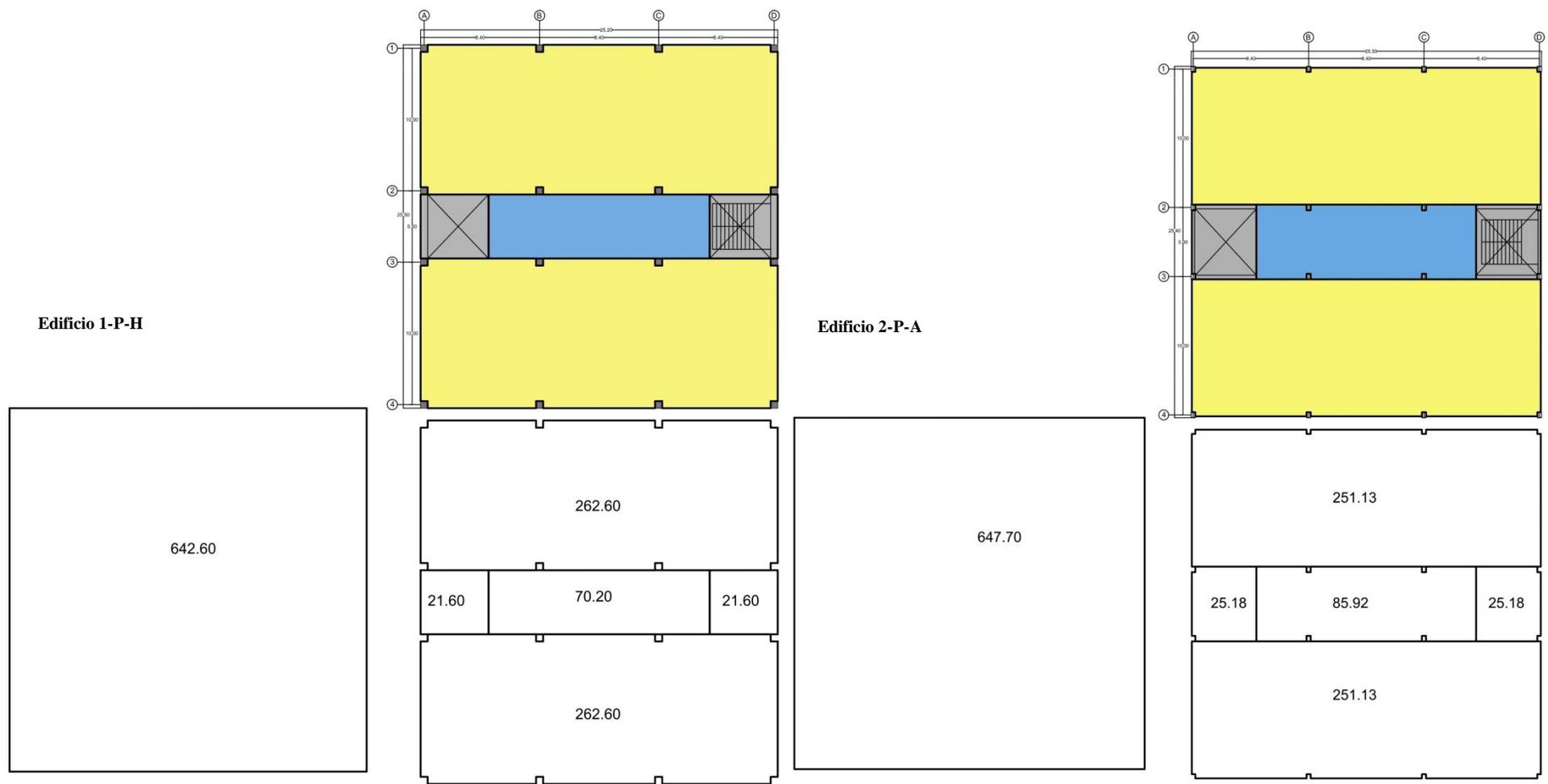
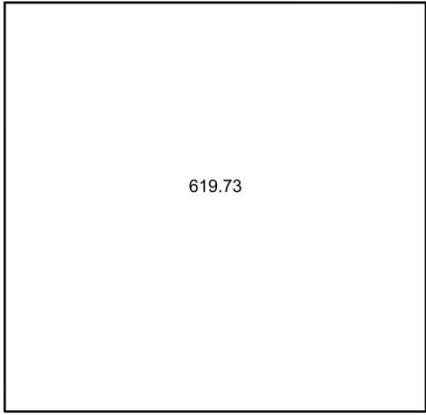
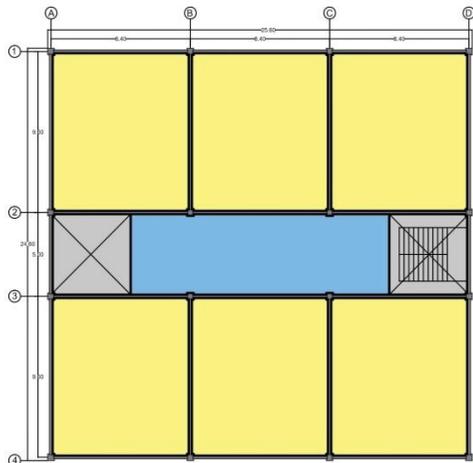


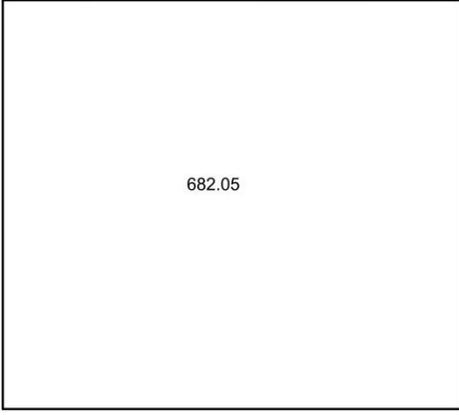
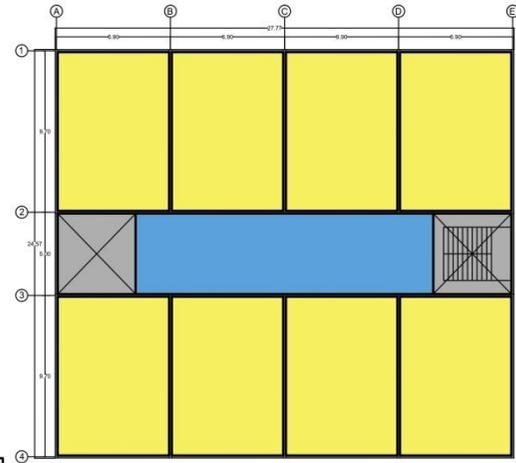
Fig. 59 Plantas de distribución de áreas: área útil (amarillo), área circulación horizontal (azul) y área circulaciones verticales (gris)

**Edificio 3-M-H**



77.04	77.04	77.04
22.54	74.72	22.54
77.04	77.04	77.04

**Edificio 4-M-M**



64.22	64.22	64.22	64.22
22.80	87.03	22.80	
64.22	64.22	64.22	64.22

Fig. 59 Plantas de distribución de áreas: área útil (amarillo), área circulación horizontal (azul) y área circulations verticales (gris)



Fig. 59 Plantas de distribución de áreas: área útil (amarillo), área circulación horizontal (azul) y área circulaciones verticales (gris)

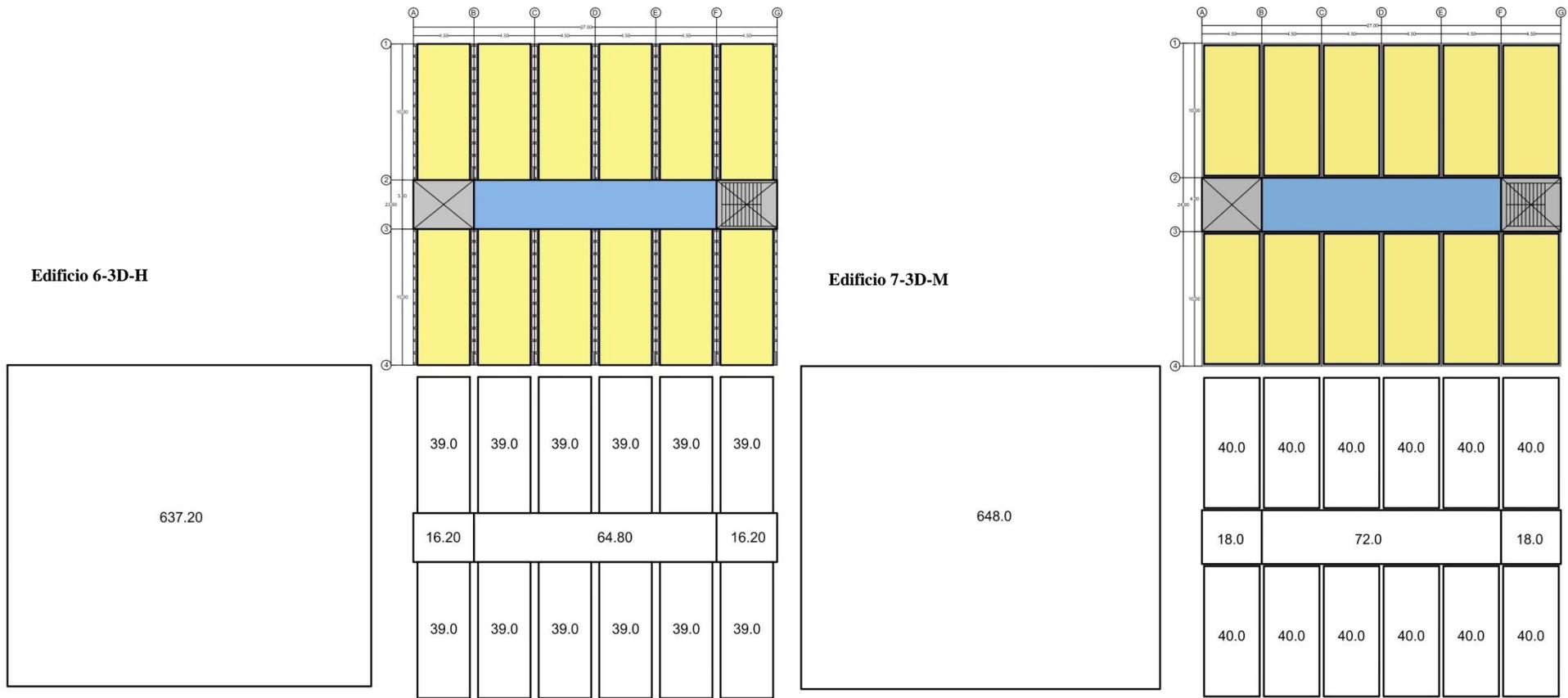


Fig. 59 Plantas de distribución de áreas: área útil (amarillo), área circulación horizontal (azul) y área circulaciones verticales (gris)

Con respecto a la reversibilidad es un concepto que no es previsible en el corto plazo para un edificio, considerando que según el CTE el diseño de un edificio debe ser para una vida útil de 50 años. Esta condición imprime una exigencia de rigidez y solidez en los edificios, sin embargo las dinámicas actuales de ciudad están evolucionando y la flexibilidad en las edificaciones es exigida con mayor ahínco. Una estrategia para prever la flexibilidad para demanda futura del edificio, es que sea diseñado tomando en cuenta su reversibilidad y para que sea reversible debe haber sido durable y haber mantenido su capacidad resistente. En este sentido, si el edificio tiene componentes más especializados, su reversibilidad estará comprometida ya que el desmontaje será más complejo.

Como ejemplo concreto de característica reversible que puede estar asociada a la capacidad de ser reciclable se menciona el siguiente caso: Desde 1998 el Instituto de preservación y modernización de edificios de la Universidad Técnica de Berlín (Institute for Preservation and Modernisation of Buildings at the Technical University of Berlin) estudia la reutilización de elementos derivados de la demolición de construcciones, especialmente de aquellos edificios que fueron contruidos con sistemas prefabricados como una estrategia para la optimización de recursos dada las dinámicas del mercado inmobiliario. A partir de 2003, se realizó un proyecto piloto para optimizar el método de reciclaje de la construcción con componentes prefabricados

destinados a incorporarlos en nuevas viviendas. La investigación se centró en la construcción e ingeniería estructural.

El proyecto consistió en evaluar las ventajas ecológicas del reciclaje frente a las nuevas construcciones, tomando en cuenta que la parte práctica del proyecto piloto consistió en una demolición controlada y planificada, cortando piezas de muros y forjados de edificios de mediana altura para ser incorporados en la construcción de nuevos prototipos de vivienda de baja altura.

Los investigadores alemanes encontraron que forjados y muros de hormigón prefabricado demostraron un alto potencial de reciclaje. Estas piezas de construcción comprendieron el 42% de la materia prima para la nueva construcción. Esta cantidad de materiales reciclados, teóricamente disponibles, es diezmado por daños durante del desmontaje y transporte, limpieza y cortes durante tratamiento. Al final, solo el 38% de la recuperación ha sido reutilizable.

Entre las conclusiones de la investigación figuran; que las construcciones prefabricadas de hormigón son ideales y un prerequisite para la reutilización y reciclaje, debido a la poca pérdida de capacidad resistente, así mismo la incorporación de elementos reciclados en nuevas edificaciones representa hasta un ahorro el 26% en los costos, siempre y cuando haya una etapa de planificación.

Tabla 35. Recuperación de impactos por Reversibilidad edificio 1-P-H

IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 1-P-H PÓRTICOS DE HORMIGÓN PREFABRICADO							
1	ELEMENTOS DEL SISTEMA 1-P-H	IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total (%)	REVERSIBILIDAD		
		EE (MJ)	EC (KgCO <sub>2</sub> )		Coefficiente reversibilidad	EE recuperada (MJ)	EC recuperado (KgCO <sub>2</sub> )
1	Zapata de hormigón Z-1 in situ	230.400,00	22.200,00	5,97	0,1	-23.040,00	-2.220,00
2	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-1	93.889,68	9.227,78	2,43	0,75	-70.417,26	-6.920,84
3	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-2	100.642,02	9.891,43	2,61	0,75	-75.481,52	-7.418,57
4	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-3	100.642,02	9.891,43	2,61	0,75	-75.481,52	-7.418,57
5	Pilar de hormigón prefab. con ménsula P-4	107.394,36	10.555,07	2,78	0,75	-80.545,77	-7.916,30
6	Viga de hormigón prefab. tipo L, V-1	199.783,52	19.635,38	5,17	0,75	-149.837,64	-14.726,53
7	Viga de hormigón prefab. tipo L, V-2	103.321,52	10.154,78	2,68	0,75	-77.491,14	-7.616,08
8	Viga de hormigón prefab. tipo T, V-3	170.630,56	16.770,13	4,42	0,75	-127.972,92	-12.577,60
9	Viga de hormigón prefab. tipo T, V-4	87.887,60	8.637,88	2,28	0,75	-65.915,70	-6.478,41
10	Viga de hormigón prefab. rectangular V-5	61.735,68	6.067,58	1,60	0,75	-46.301,76	-4.550,69
11	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-1	1.123.432,80	110.414,64	29,09	0,25	-280.858,20	-27.603,66
12	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-2	178.105,20	17.504,76	4,61	0,25	-44.526,30	-4.376,19
13	Capa de compresión de hormigón in situ 5cm	522.731,52	50.367,36	13,54	0,1	-52.273,15	-5.036,74
14	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación	780.792,32	76.738,82	20,22	0,75	-585.594,24	-57.554,11
<b>Total Impactos edificio</b>		<b>3.861.388,80</b>	<b>378.057,02</b>	<b>100,00</b>	<b>Reversible</b>	<b>-1.755.737,11</b>	<b>-172.414,28</b>
					<b>Reducción (%)</b>	<b>45,5</b>	<b>45,6</b>

Tabla 36. Recuperación de impactos por Reversibilidad edificio 2-P-A

2 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 2-P-A PÓRTICOS DE ACERO							
	ELEMENTOS DEL SISTEMA 2-P-A	IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total (%)	REVERSIBILIDAD		
		EE (MJ)	EC (KgCO2)		Coefficiente reversibilidad	EE recuperada (MJ)	EC recuperado (KgCO2)
1	Zapata + pedestal de hormigón in situ Z-1	232.980,48	22.448,64	3,27	0,1	-23.298,05	-2.244,86
2	Pilar de acero HEB400 P-1	804.960,00	53.164,80	11,29	0,75	-603.720,00	-39.873,60
3	Viga de acero IPE500 V-1	804.960,00	53.164,80	11,29	0,75	-603.720,00	-39.873,60
4	Viga de acero IPE500 V-2	590.304,00	38.987,52	8,28	0,75	-442.728,00	-29.240,64
5	Viga de acero IPE500 V-3	201.240,00	13.291,20	2,82	0,75	-150.930,00	-9.968,40
6	Viga de acero IPE500 V-4	784.836,00	51.835,68	11,01	0,75	-588.627,00	-38.876,76
7	Viga de acero IPE500 V-5	53.664,00	3.544,32	0,75	0,75	-40.248,00	-2.658,24
8	Placas de refuerzo en unión de vigas	13.416,00	886,08	0,19	0,75	-10.062,00	-664,56
9	Chapa grecada 0,8mm MT-76	206.565,38	14.283,78	2,90	0,25	-51.641,34	-3.570,94
10	Chapa grecada 0,8mm MT-76	1.163.990,40	74.680,80	16,32	0,25	-290.997,60	-18.670,20
11	Chapa grecada 0,8mm MT-76	61.009,15	3.914,30	0,86	0,25	-15.252,29	-978,58
12	Capa de compresión de hormigón in situ 14cm	1.554.001,92	149.734,56	21,79	0,1	-155.400,19	-14.973,46
13	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación A	263.271,36	25.875,17	3,69	0,75	-197.453,52	-19.406,38
14	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación B	319.862,40	31.437,12	4,49	0,75	-239.896,80	-23.577,84
15	Fachada de panel de hormigón prefabricado con fijación C	76.274,88	7.496,54	1,07	0,75	-57.206,16	-5.622,41
<b>Total Impactos edificio</b>		<b>7.131.335,97</b>	<b>544.745,31</b>	<b>100,00</b>	<b>Reversible</b>	<b>-3.471.180,95</b>	<b>-250.200,46</b>
				<b>Reducción (%)</b>	<b>48,7</b>	<b>45,9</b>	

Tabla 37. Recuperación de impactos por Reversibilidad edificio 3-M-H

3 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 3-M-H MUROS DE HORMIGÓN PREFABRICADO							
	ELEMENTOS DEL SISTEMA 3-M-H	IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total (%)	REVERSIBILIDAD		
		EE (MJ)	EC (KgCO2)		Coefficiente reversibilidad	EE recuperada (MJ)	EC recuperado (KgCO2)
1	Zapata corrida de hormigón in situ ZC-1	924.825,60	89.110,80	17,57	0,1	-92.482,56	-8.911,08
2	Pilarillo de hormigón prefab. p-1	39.656,60	3.897,58	0,75	0,75	-29.742,45	-2.923,19
3	Pilarillo de hormigón prefab. p-2	110.609,76	10.871,09	2,10	0,75	-82.957,32	-8.153,32
4	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-1	558.193,44	54.861,07	10,61	0,75	-418.645,08	-41.145,80
5	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-2	1.035.787,52	101.800,58	19,68	0,75	-776.840,64	-76.350,43
6	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-3	712.532,64	70.030,03	13,54	0,75	-534.399,48	-52.522,52
7	Muro de hormigón prefab. con ménsula M-4	132.903,20	13.062,16	2,53	0,75	-99.677,40	-9.796,62
8	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-1	701.460,48	68.941,82	13,33	0,75	-526.095,36	-51.706,37
9	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-2	346.554,88	34.060,54	6,58	0,25	-86.638,72	-8.515,14
10	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-3	174.712,72	17.171,34	3,32	0,25	-43.678,18	-4.292,83
11	Capa de compresión de hormigón in situ 5cm	526.049,28	50.687,04	9,99	0,1	-52.604,93	-5.068,70
<b>Total Impactos edificio</b>		<b>5.263.286,12</b>	<b>514.494,05</b>	<b>100,00</b>	<b>Reversible</b>	<b>-2.743.762,12</b>	<b>-269.386,00</b>
				<b>Reducción (%)</b>	<b>52,1</b>	<b>52,4</b>	

Tabla 38. Recuperación de impactos por Reversibilidad edificio 4-M-M

4 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 4-M-M MUROS DE MADERA CLT							
	ELEMENTOS DEL SISTEMA 4-M-M	IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total (%)	REVERSIBILIDAD		
		EE (MJ)	EC (KgCO2)		Coefficiente reversibilidad	EE recuperada (MJ)	EC recuperado (KgCO2)
1	Zapata corrida de hormigón in situ ZC-1	689.402,88	66.426,84	26,04	0,1	-68.940,29	-6.642,68
2	Muro de madera CLT M-1	389.716,80	26.840,00	14,72	0,75	-292.287,60	-20.130,00
3	Muro de madera CLT M-2	181.441,92	12.496,00	6,85	0,75	-136.081,44	-9.372,00
4	Muro de madera CLT M-3	191.664,00	13.200,00	7,24	0,75	-143.748,00	-9.900,00
5	Muro de madera CLT M-4	41.048,04	2.827,00	1,55	0,75	-30.786,03	-2.120,25
6	Forjado de madera CLT F1	496.409,76	34.188,00	18,75	0,75	-372.307,32	-25.641,00
7	Forjado de madera CLT F2	490.659,84	33.792,00	18,53	0,75	-367.994,88	-25.344,00
8	Forjado de madera CLT F3	167.226,84	11.517,00	6,32	0,75	-125.420,13	-8.637,75
<b>Total Impactos edificio</b>		<b>2.647.570,08</b>	<b>201.286,84</b>	<b>100,00</b>	<b>Reversible</b>	<b>-1.537.565,69</b>	<b>-107.787,68</b>
				<b>Reducción (%)</b>	<b>58,1</b>	<b>53,5</b>	

Tabla 39. Recuperación de impactos por Reversibilidad edificio 5-MIX-H

5 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 5-MIXTO-H MÓDULO 3D DE HORMIGÓN Y FORJADO PREFABRICADO							
	ELEMENTOS DEL SISTEMA 5-MIX-H	IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total (%)	REVERSIBILIDAD		
		EE (MJ)	EC (KgCO2)		Coefficiente reversibilidad	EE recuperada (MJ)	EC recuperado (KgCO2)
1	Losa de hormigón de hormigón in situ	905.978,88	87.294,84	22,82	0,1	-90.597,89	-8.729,48
2	Módulo 3D de hormigón prefab. (0,12m espesor)	1.574.259,84	154.723,39	39,65	0,75	-1.180.694,88	-116.042,54
3	Forjado para módulo de hormigón prefab.	88.101,96	8.658,95	2,22	0,75	-66.076,47	-6.494,21
4	Tabique de hormigón prefab. en módulo	34.726,32	3.413,02	0,87	0,75	-26.044,74	-2.559,76
5	Viga de hormigón prefab. rectangular V-1	38.156,08	3.750,10	0,60	0,75	-28.617,06	-2.812,58
6	Viga de hormigón prefab. rectangular V-2	98.819,96	9.712,35	2,49	0,75	-74.114,97	-7.284,26
7	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-1	854.904,96	84.022,85	21,53	0,25	-213.726,24	-21.005,71
8	Forjado de Placa Alveolar hormigón prefab. PA-2	123.695,04	12.157,15	3,12	0,25	-30.923,76	-3.039,29
9	Capa de compresión de hormigón in situ 5cm	251.596,80	24.242,40	6,34	0,1	-25.159,68	-2.424,24
<b>Total Impactos edificio</b>		<b>3.970.239,84</b>	<b>387.975,05</b>	<b>99,64</b>	<b>Reversible</b>	<b>-1.735.955,69</b>	<b>-170.392,08</b>
				<b>Reducción (%)</b>	<b>43,7</b>	<b>43,9</b>	

Tabla 40. Recuperación de impactos por Reversibilidad edificio 6-3D-H

6 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 6-3D-H MÓDULO 3D DE HORMIGÓN PREFABRICADO							
	ELEMENTOS DEL SISTEMA 6-3D-H	IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total (%)	REVERSIBILIDAD		
		EE (MJ)	EC (KgCO2)		Coefficiente reversibilidad	EE recuperada (MJ)	EC recuperado (KgCO2)
1	Losa de hormigón de hormigón in situ	1.174.487,04	113.166,72	16,44	0,1	-117.448,70	-11.316,67
2	Módulo 3D de hormigón prefab. sin hueco y voladizo 3D-A	2.055.320,96	202.003,65	28,76	0,9	-1.849.788,86	-181.803,28
3	Módulo 3D de hormigón prefab. con hueco y voladizo 3D-B	2.019.233,92	198.456,90	28,26	0,9	-1.817.310,53	-178.611,21
4	Módulo 3D de hormigón prefab. con hueco 3D-C	1.896.209,92	186.365,70	26,54	0,9	-1.706.588,93	-167.729,13
<b>Total Impactos edificio</b>		<b>7.145.251,84</b>	<b>699.992,96</b>	<b>100,00</b>	<b>Reversible</b>	<b>-5.491.137,02</b>	<b>-539.460,29</b>
					<b>Reducción (%)</b>	<b>76,9</b>	<b>77,1</b>

Tabla 41. Recuperación de impactos por Reversibilidad edificio 7-3D-M

7 IMPACTOS AMBIENTALES EDIFICIO 7-3D-M MÓDULO 3D DE MADERA CLT							
	ELEMENTOS DEL SISTEMA 7-3D-M	IMPACTOS		Porcentaje de cada elemento respecto al total (%)	REVERSIBILIDAD		
		EE (MJ)	EC (KgCO2)		Coefficiente reversibilidad	EE recuperada (MJ)	EC recuperado (KgCO2)
1	Losa de hormigón de hormigón in situ	895.795,20	86.313,60	26,95	0,1	-89.579,52	-8.631,36
2	Modulo de madera CLT con huecos 3D-A	1.148.067,36	79.068,00	34,54	0,9	-1.033.260,62	-71.161,20
3	Modulo de madera CLT con huecos 3D-B	1.153.817,28	79.464,00	34,71	0,9	-1.038.435,55	-71.517,60
4	Viga de madera CLT V-1	22.999,68	1.584,00	0,69	0,75	-17.249,76	-1.188,00
5	Forjado de madera CLT F1	103.498,56	7.128,00	3,11	0,75	-77.623,92	-5.346,00
<b>Total Impactos edificio</b>		<b>3.324.178,08</b>	<b>253.557,60</b>	<b>100,00</b>	<b>Reversible</b>	<b>-2.256.149,38</b>	<b>-157.844,16</b>
					<b>Reducción (%)</b>	<b>67,9</b>	<b>62,3</b>

Tabla 42. Resumen de recuperación de impactos por Reversibilidad

RESUMEN REVERSIBILIDAD								
	edificio	SISTEMA	EE (MJ)	EC (KgCO2)	EE recuperada (MJ)	Recuperación (%)	EC recuperado (KgCO2)	Recuperación (%)
1	1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	3.861.388,80	378.057,02	-1.755.737,11	45	-172.414,28	46
2	2-P-A	Pórticos de acero	7.131.335,97	544.745,31	-3.471.180,95	49	-172.414,28	46
3	3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	5.263.286,12	514.494,05	-2.743.762,12	52	-269.386,00	52
4	4-M-M	Muros de madera CLT	2.647.570,08	201.286,84	-1.537.565,69	58	-107.787,68	54
5	5-MIX-H	Módulo 3d de hormigón y forjado prefabricado	3.970.239,84	387.975,05	-1.735.955,69	44	-170.392,08	44
6	6-3D-H	Módulo 3d de hormigón prefabricado	7.145.251,84	699.992,96	-5.491.137,02	77	-539.460,29	77
7	7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	3.324.178,08	253.557,60	-2.256.149,38	68	-157.844,16	62

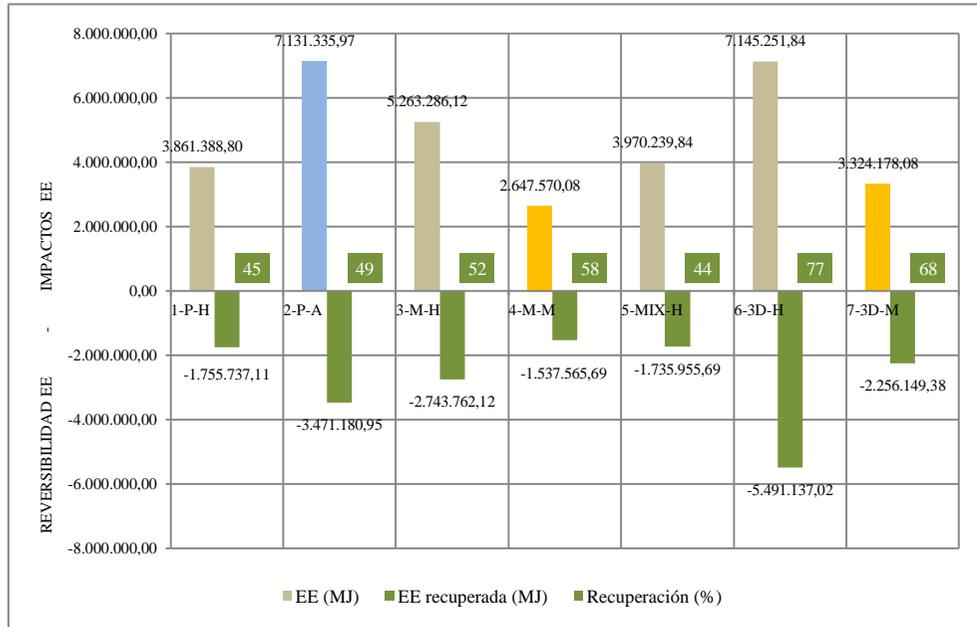


Fig. 60 Reversibilidad EE (MJ)

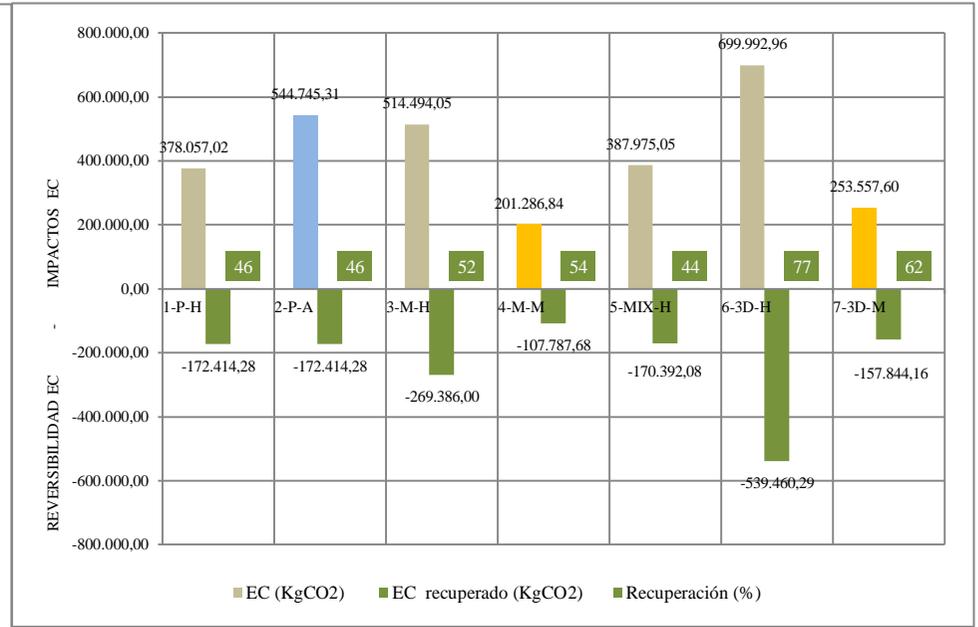


Fig. 61 Reversibilidad EC (kgCO2)

Tabla 43. Resumen de recuperación de impactos por Durabilidad

RESUMEN DURABILIDAD										
	edificio	SISTEMA	EE (MJ)	EC (KgCO2)	Mantenimiento (años)	Coefficiente de Durabilidad	EE recuperada (MJ)	Recuperación (%)	EC eliminado (KgCO2)	Recuperación (%)
1	1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	3.861.388,80	378.057,02	8	0,8	-3.089.111,04	80	-302.445,62	80
2	2-P-A	Pórticos de acero	7.131.335,97	544.745,31	5	0,5	-3.565.667,98	50	-272.372,66	50
3	3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	5.263.286,12	514.494,05	9	0,8	-4.210.628,90	80	-411.595,24	80
4	4-M-M	Muros de madera CLT	2.647.570,08	201.286,84	3	0,3	-794.271,02	30	-60.386,05	30
5	5-MIX-H	Módulo 3d de hormigón y forjado prefabricado	3.970.239,84	387.975,05	9	0,9	-3.573.215,86	90	-349.177,54	90
6	6-3D-H	Módulo 3d de hormigón prefabricado	7.145.251,84	699.992,96	10	0,95	-6.787.989,25	95	-664.993,31	95
7	7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	3.324.178,08	253.557,60	5	0,5	-1.662.089,04	50	-126.778,80	50

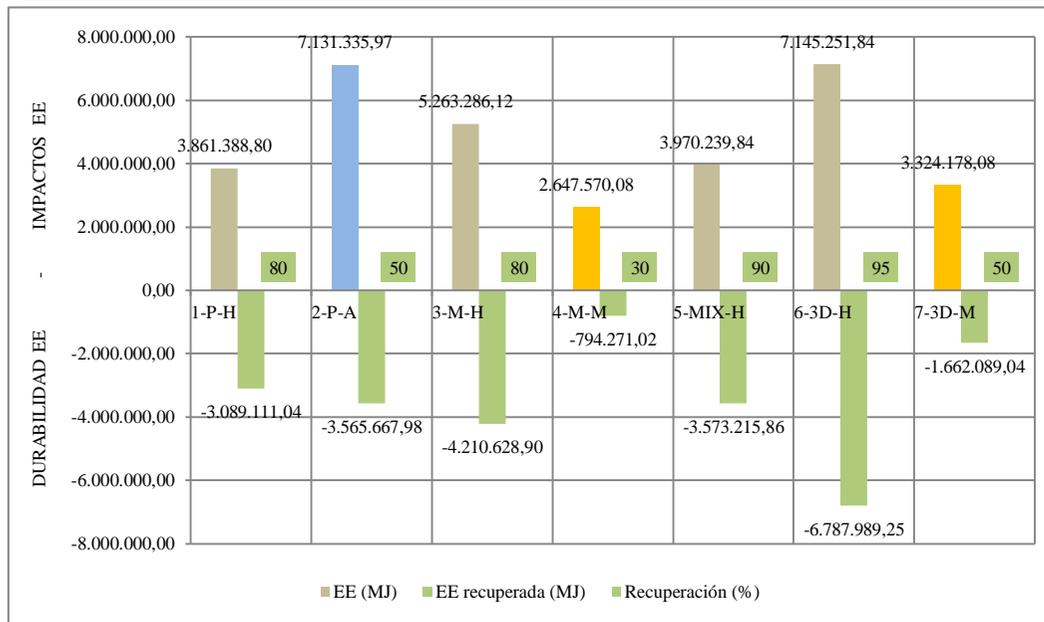


Fig. 62 Durabilidad EE (MJ)

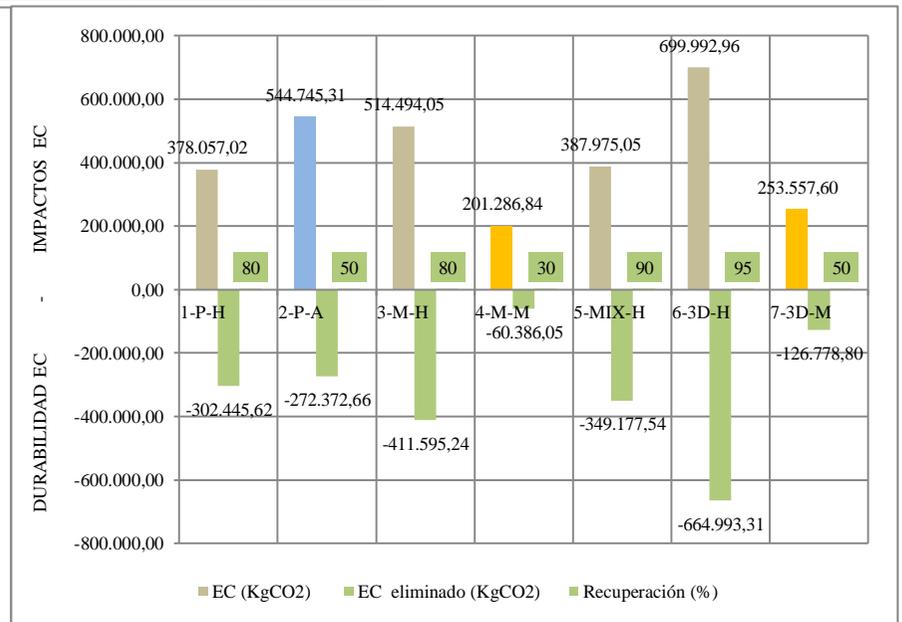


Fig. 63 Durabilidad EC (kgCO2)

Tabla 44. Resumen de recuperación de impactos por Funcionabilidad

RESUMEN FUNCIONABILIDAD																
	edificio	SISTEMA	EE (MJ)	EC (KgCO2)	ÁREA PLANTA (m2)	ÁREA VIVIENDA (m2)	Porcentaje entre área vivienda y área planta	ÁREA CIRCULACION HORIZONTAL (m2)	ÁREA CIRCULACION VERTICAL (m2)	Porcentaje entre circulación y área planta	Porcentaje área útil	Coefficiente de funcionabilidad	EE recuperada (MJ)	Recuperación (%)	EC eliminado (KgCO2)	Recuperación (%)
1	1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	3.861.388,80	378.057,02	642,60	525,20	81,73	70,20	43,2	17,65	99,24	0,99	-3.832.202,19	99	-375.199,45	99
2	2-P-A	Pórticos de acero	7.131.335,97	544.745,31	647,70	502,26	77,55	85,92	50,36	21,04	98,21	0,98	-7.003.607,22	98	-534.988,43	98
3	3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	5.263.286,12	514.494,05	619,76	462,24	74,58	74,72	45,08	19,33	92,46	0,92	-4.866.192,05	92	-475.677,52	92
4	4-M-M	Muros de madera CLT	2.647.570,08	201.286,84	682,05	513,76	75,33	87,03	45,6	19,45	93,51	0,94	-2.475.730,05	94	-188.222,36	94
5	5-MIX-H	Módulo 3d de hormigón y forjado prefabricado	3.970.239,84	387.975,05	655,36	531,24	81,06	57,60	44,8	15,63	96,07	0,96	-3.814.290,75	96	-372.735,58	96
6	6-3D-H	Módulo 3d de hormigón prefabricado	7.145.251,84	699.992,96	637,20	468,00	73,45	64,80	32,4	15,25	86,67	0,87	-6.192.551,59	87	-606.660,57	87
7	7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	3.324.178,08	253.557,60	648,00	480,00	74,07	72,00	36,0	16,67	88,89	0,89	-2.954.824,96	89	-225.384,53	89

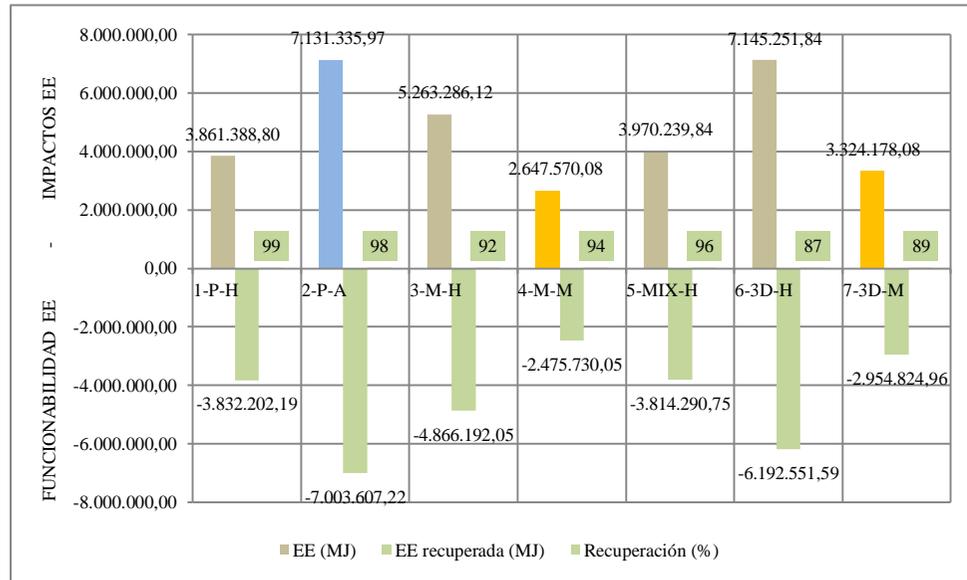


Fig. 64 Funcionabilidad EE (MJ)

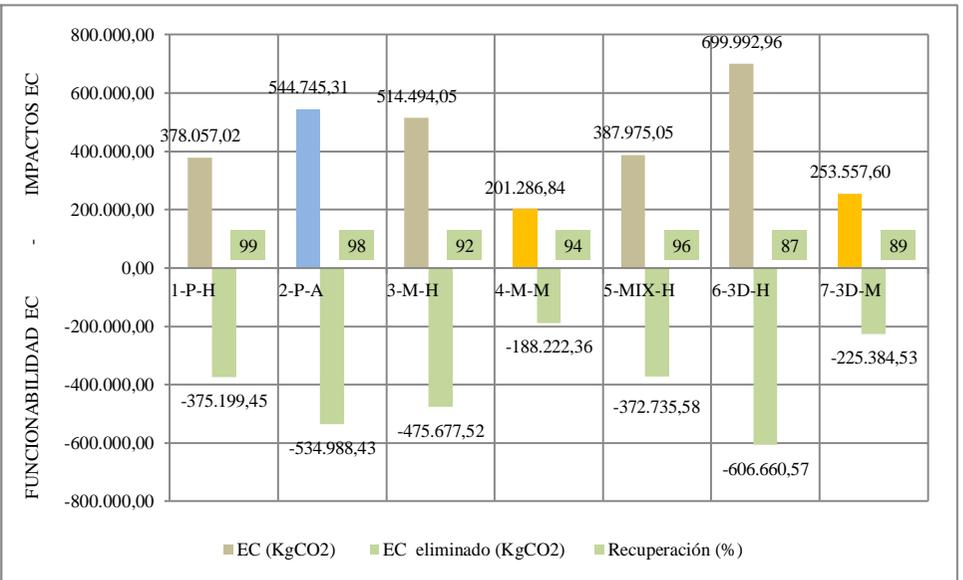


Fig. 65 Funcionabilidad EC (kgCO2)

## 5.5. Discusión de resultados

Se presenta a continuación, el resultado del análisis comparativo de la recuperación de impactos aplicando los 3 conceptos de reversibilidad, durabilidad y funcionabilidad. En las figuras 66 y 67 se ha compilado la recuperación para cada edificio dejando en evidencia que el que mayor recuperación contempla es el edificio 6-3D-H de módulos de hormigón prefabricado que aunque es el de mayor impacto ambiental por su peso y monolitismo, son esas mismas cualidades las que le hacen recuperar impactos por reversibilidad y durabilidad, pero es el que menos recupera por funcionabilidad, dada la redundancia estructural en sus muros, la flexibilidad en planta es mermada.

En contraste, el edificio que menos recupera impactos es el 4-M-M de muros portantes de madera CLT, sobre todo por durabilidad, ya que se estima que sin una debida protección ante la intemperie la integridad de la estructura se vería comprometida sobre todo con respecto a su resistencia.

Otro aspecto relevante de notar es la baja recuperación del sistema 5-MIX-H por reversibilidad, debido a la geometría en U de los módulos semirrígidos que requieren de la capa de compresión para ser rigidizados y un desmontaje de esta capa, comprometería el módulo. Pero en contraste el edificio 1-P-H es el de mayor recuperación por funcionalidad pues contempla mayor área útil con respecto a la estructura (Tabla 45).

Tabla 45. Resumen comparativo de recuperación de impactos

RESUMEN DE RECUPERACIÓN DE IMPACTOS																	
SISTEMAS		IMPACTOS				REVERSIBILIDAD				DURABILIDAD				FUNCIONABILIDAD			
edificio	SISTEMA	EE (MJ)	REPRESENTATIVIDAD SISTEMA (%)	EC (KgCO2)	Representatividad (%)	EE recuperada REVERSIBILIDAD (MJ)	EE REVERSIBILIDAD (%)	EC eliminado (KgCO2)	EC REVERSIBILIDAD (%)	EE recuperada DURABILIDAD (MJ)	EE DURABILIDAD (%)	EC eliminado (KgCO2)	EC DURABILIDAD (%)	EE recuperada FUNCIONABILIDAD (MJ)	EE FUNCIONABILIDAD (%)	EC eliminado (KgCO2)	EC FUNCIONABILIDAD (%)
1	1-P-H	3.861.388,80	12	378.057,02	13	-1.755.737,11	45	-172.414,28	46	-3.089.111,04	80	-302.445,62	80	-3.832.202,19	99	-375.199,45	99
2	2-P-A	7.131.335,97	21	544.745,31	18	-3.471.180,95	49	-172.414,28	46	-3.565.667,98	50	-272.372,66	50	-7.003.607,22	98	-534.988,43	98
3	3-M-H	5.263.286,12	16	514.494,05	17	-2.743.762,12	52	-269.386,00	52	-4.210.628,90	80	-411.595,24	80	-4.866.192,05	92	-475.677,52	92
4	4-M-M	2.647.570,08	8	201.286,84	7	-1.537.565,69	58	-107.787,68	54	-794.271,02	30	-60.386,05	30	-2.475.730,05	94	-188.222,36	94
5	5-MIX-H	3.970.239,84	12	387.975,05	13	-1.735.955,69	44	-170.392,08	44	-3.573.215,86	90	-349.177,54	90	-3.814.290,75	96	-372.735,58	96
6	6-3D-H	7.145.251,84	21	699.992,96	23	-5.491.137,02	77	-539.460,29	77	-6.787.989,25	95	-664.993,31	95	-6.192.551,59	87	-606.660,57	87
7	7-3D-M	3.324.178,08	10	253.557,60	9	-2.256.149,38	68	-157.844,16	62	-1.662.089,04	50	-126.778,80	50	-2.954.824,96	89	-225.384,53	89
TOTAL UNIVERSO ANALIZADO		33.343.250,73	100,00	2.980.108,84	100,00												

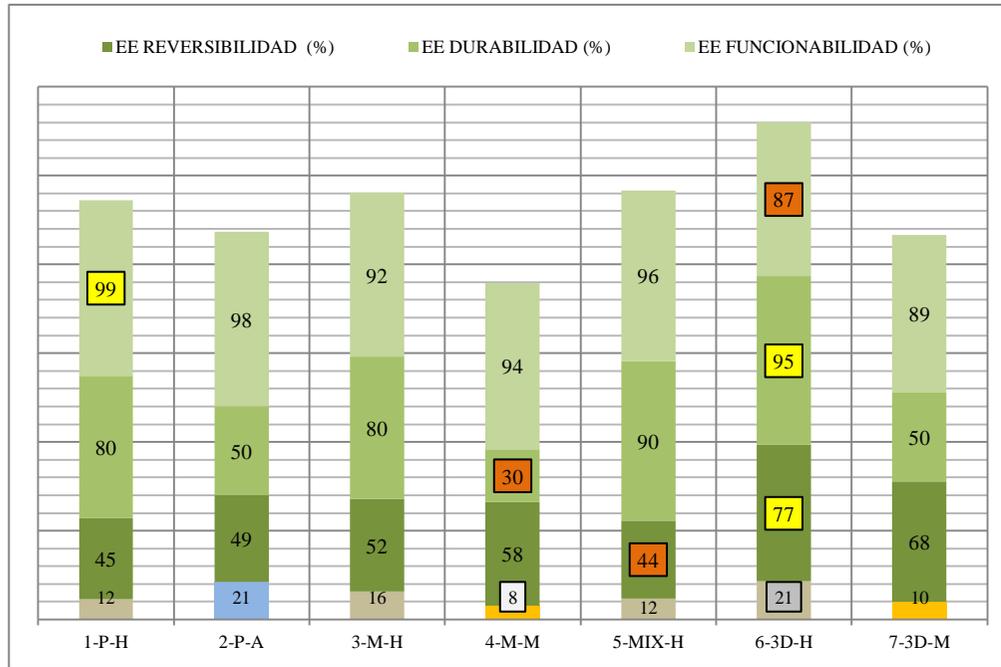


Fig. 66 Análisis comparativo de recuperación EE (%)

- Valores máximos de recuperación
- Valores mínimos de recuperación
- Valor mínimo impacto
- Valor máximo impacto

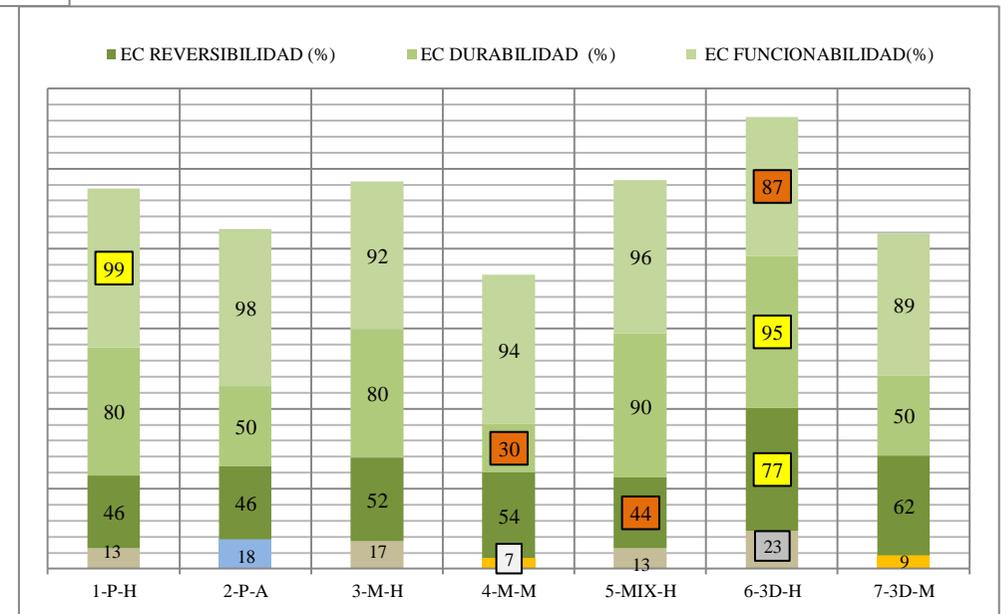


Fig. 67 Análisis comparativo de recuperación EC (%)

Se ha utilizado la metodología de matriz de correlación de análisis multivariable que no es paramétrica sino que es descriptiva, se ha considerado como herramienta de análisis pues lo que se busca es saber la relación que existe entre los impactos por superficie entre los 7 edificios.

Para obtener la relación entre los 7 edificios, la metodología exige que el eje de las ordenadas sea el dividendo y el eje de las abscisas sea el divisor. De esta forma la diagonal da como resultado la unidad pues el dividendo y el divisor es la misma cantidad.

Debajo de la diagonal las operaciones se invierten y es el reflejo de la nube de datos sobre la diagonal (Tabla 46 y 47).

Para efecto de análisis se ha transpuesto la matriz y se ha invertido la operación siendo las abscisas el dividendo y las ordenadas el divisor. Esto con el objetivo de visualizar la relación de mayor a menor y no a la inversa, por ejemplo: Se sabe que la relación entre 4 y 2 puede ser del doble o de la mitad, la relación es la misma pero expresada de dos formas, tal como; 4 es el doble de 2 o bien, 2 es la mitad de 4, la relación es cualitativa. Para efecto del presente análisis se ha considerado más descriptiva la relación del mayor con respecto al menor, citando el ejemplo, 4 es el doble de 2 (Tablas 48 y 49).

Con respecto al análisis se presentan dos resultados; el primero, es la cantidad de impactos por superficie construida en relación al promedio de los 7 edificios, y es notable que los sistemas de madera,

los edificios 4-M-M y 7-3D-M están por debajo del promedio en una relación de 1,7 veces su valor, bajo el promedio, en contraste el acero y módulo 3D de hormigón de los edificios 2-P-A y 6-3D-H son 1,5 veces mayores que el promedio (Figuras 68 y 69).

Por otra parte, el segundo resultado es la relación que hay entre los edificios tomando como base igual a 1, el edificio de pórticos de hormigón, que merece la pena destacar, es la tecnología de prefabricación industrializada más utilizada en España, siendo la relación entre impactos por superficie construida con respecto al edificio de pórticos de hormigón 1-P-H, de aproximadamente el doble la del acero del edificio 2-P-A y los módulos 3D de hormigón del edificio 6-3D-H.

En contraste los edificios con sistemas de madera CLT tanto de muros como de módulo 3D, 4-M-M y 7-3D-M tienen una relación de aproximadamente un tercio menor al edificio 1-P-H.

Son equiparables al edificio 1-P-H, los edificios de sistema de muros de hormigón prefabricado y el denominado sistema mixto 3-M-H y 5-MIX-H respectivamente. (Figuras 70 y 71).

Tabla 46. Matriz de correlación entre EE de edificios

MATRIZ DE CORRELACIÓN EE									
		N	1	2	3	4	5	6	7
		edificio	1-P-H	2-P-A	3-M-H	4-M-M	5-MIX-H	6-3D-H	7-3D-M
N	edificio	EE (MJ/m <sup>2</sup> )	1502	2753	2123	970	1515	2803	1282
1	1-P-H	1502	1,0	0,5	0,7	1,5	1,0	0,5	1,2
2	2-P-A	2753	0,5	1,0	1,3	2,8	1,8	1,0	2,1
3	3-M-H	2123	0,7	1,3	1,0	2,2	1,4	0,8	1,7
4	4-M-M	970	1,5	2,8	2,2	1,0	0,6	0,3	0,8
5	5-MIX-H	1515	1,0	1,8	1,4	0,6	1,0	0,5	1,2
6	6-3D-H	2803	0,5	1,0	0,8	0,3	0,5	1,0	2,2
7	7-3D-M	1282	1,2	2,1	1,7	0,8	1,2	2,2	1,0
Promedio		1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850
Porcentaje respecto al promedio			81	149	115	52	82	152	69

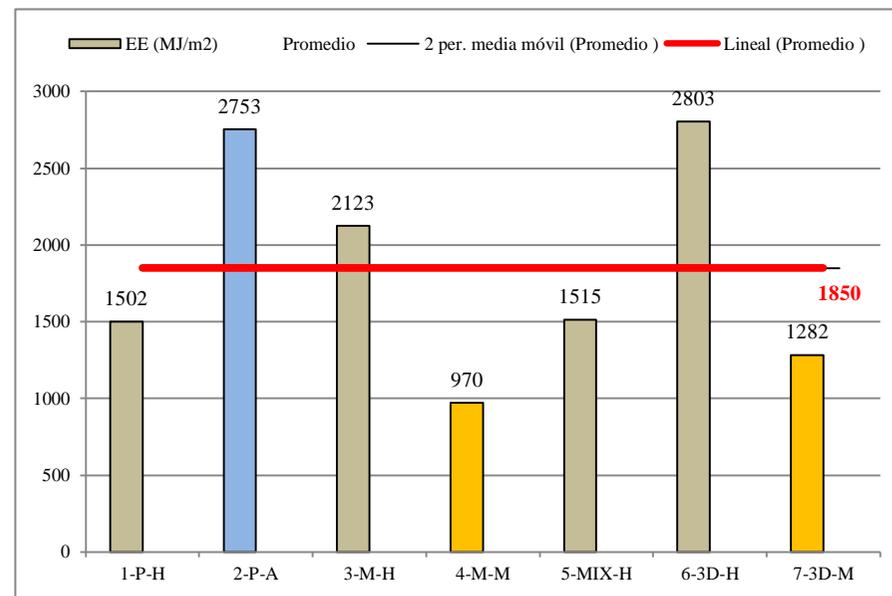


Fig. 68 Relación respecto al promedio EE (%)

Tabla 47. Matriz de correlación entre EC de edificios

MATRIZ DE CORRELACIÓN EC									
		N	1	2	3	4	5	6	7
		edificio	1-P-H	2-P-A	3-M-H	4-M-M	5-MIX-H	6-3D-H	7-3D-M
N	edificio	EC (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	147,08	210,26	207,54	73,78	148,00	274,64	97,82
1	1-P-H	147	1,0	0,7	0,7	2,0	1,0	0,5	1,5
2	2-P-A	210	0,7	1,0	1,0	2,8	1,4	0,8	2,1
3	3-M-H	208	0,7	1,0	1,0	2,8	1,4	0,8	2,1
4	4-M-M	74	2,0	2,8	2,8	1,0	0,5	0,3	0,8
5	5-MIX-H	148	1,0	1,4	1,4	0,5	1,0	0,5	1,5
6	6-3D-H	275	0,5	0,8	0,8	0,3	0,5	1,0	2,8
7	7-3D-M	98	1,5	2,1	2,1	0,8	1,5	2,8	1,0
Promedio		166	166	166	166	166	166	166	166
Porcentaje respecto al promedio			89	127	125	45	89	166	59

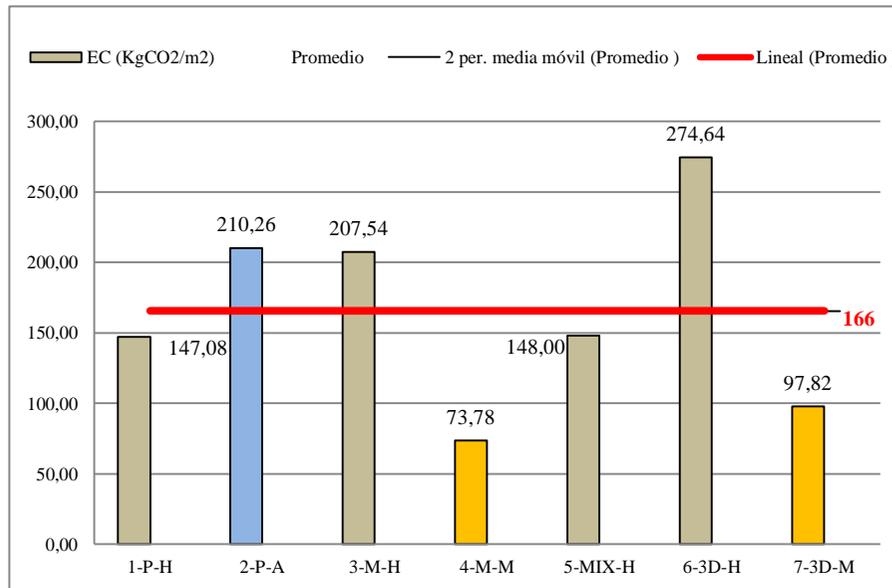


Fig. 69 Relación respecto al promedio EC (%)

Tabla 48. Relación entre EE de edificios

INTERPRETACIÓN DE MATRIZ DE CORRELACIÓN EE									
		N	1	2	3	4	5	6	7
		edificio	1-P-H	2-P-A	3-M-H	4-M-M	5-MIX-H	6-3D-H	7-3D-M
N	edificio	EE (MJ/m2)	1502	2753	2123	970	1515	2803	1282
1	1-P-H	1502	1,0	1,8	1,4	0,6	1,0	1,9	0,9
2	2-P-A	2753	1,8	1,0	0,8	0,4	0,6	1,0	0,5
3	3-M-H	2123	1,4	0,8	1,0	0,5	0,7	1,3	0,6
4	4-M-M	970	0,6	0,4	0,5	1,0	1,6	2,9	1,3
5	5-MIX-H	1515	1,0	0,6	0,7	1,6	1,0	1,9	0,8
6	6-3D-H	2803	1,9	1,0	1,3	2,9	1,9	1,0	0,5
7	7-3D-M	1282	0,9	0,5	0,6	1,3	0,8	0,5	1,0
Promedio		1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850
Porcentaje respecto al promedio			81	149	115	52	82	152	69

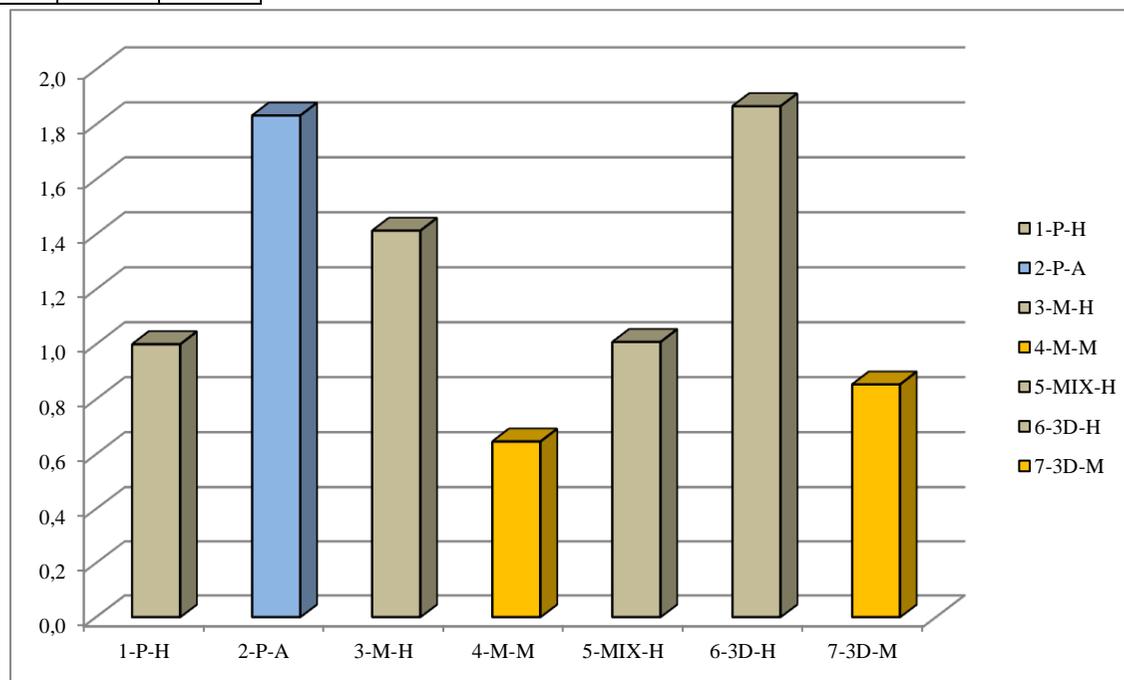


Fig. 70 Relación entre EE de edificios

Tabla 49. Relación entre EC de edificios

INTERPRETACIÓN DE MATRIZ DE CORRELACIÓN EC									
		N	1	2	3	4	5	6	7
		edificio	1-P-H	2-P-A	3-M-H	4-M-M	5-MIX-H	6-3D-H	7-3D-M
N	edificio	EC (KgCO2/m2)	147,08	210,26	207,54	73,78	148,00	274,64	97,82
1	1-P-H	147	1,0	1,4	1,4	0,5	1,0	1,9	0,7
2	2-P-A	210	1,4	1,0	1,0	0,4	0,7	1,3	0,5
3	3-M-H	208	1,4	1,0	1,0	0,4	0,7	1,3	0,5
4	4-M-M	74	0,5	0,4	0,4	1,0	2,0	3,7	1,3
5	5-MIX-H	148	1,0	0,7	0,7	2,0	1,0	1,9	0,7
6	6-3D-H	275	1,9	1,3	1,3	3,7	1,9	1,0	0,4
7	7-3D-M	98	0,7	0,5	0,5	1,3	0,7	0,4	1,0
Promedio		166	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850
Porcentaje respecto al promedio			8	11	11	4	8	15	5

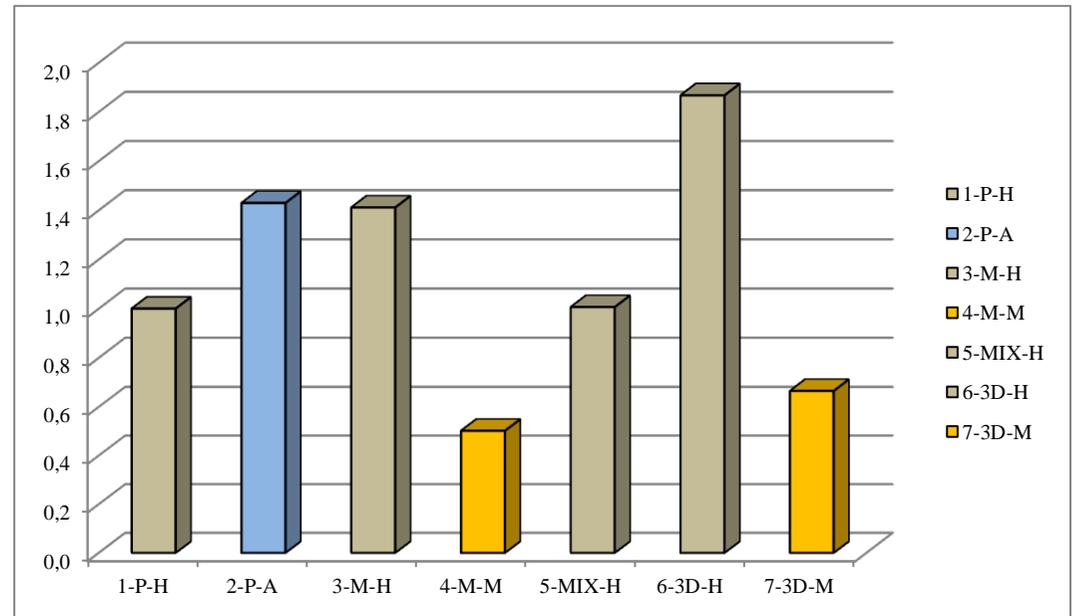
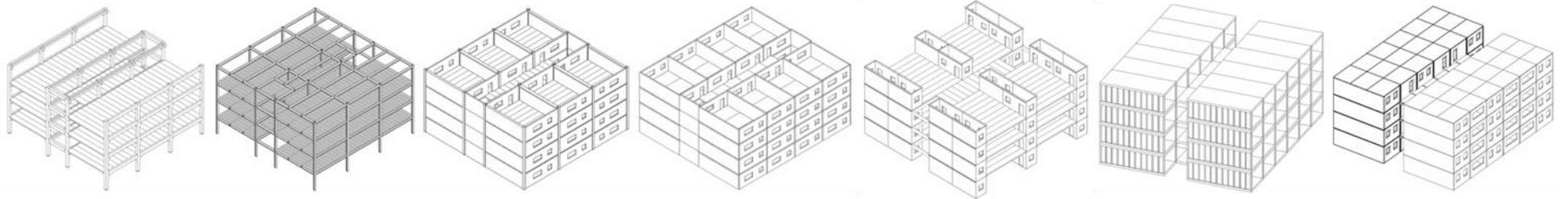


Fig. 71 Relación entre EC de edificios

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL  
A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

# CONCLUSIONES



## 6. CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones a las que ha llegado el presente estudio en sus 3 fases: Investigación, desarrollo y análisis.

Con respecto a la fase de investigación se concluye:

- 1) La construcción industrializada ha venido evolucionando hace casi un siglo, sin embargo, aún no es asequible a todos los sectores ni en todos los países, pero son destacables los esfuerzos de las promociones de vivienda que potencian la construcción industrializada como estrategia de optimización de recursos y desarrollo e innovación tecnológica, a pesar que son pocos los despachos de arquitectura que asumen el reto y la responsabilidad de integrar esta tecnología en su proceso de diseño a través de la conformación de equipos de diseño interdisciplinarios e integrados entre industria y diseñadores. Por ejemplo, los casos de estudio presentados en el presente trabajo.
- 2) No hay sistemas mejores ni peores, sino que la selección de un sistema de construcción industrializada se torna en la mejor opción por dos factores: El primero, el tiempo de ejecución de la obra y el segundo, la facilidad de transporte desde las instalaciones de fabricación a la obra. Aunque este segundo factor no ha sido determinante para proyectos en España, a pesar de haber más de mil

kilómetros entre centros de fabricación y puesta en obra, lo que ha llevado a los diseñadores y al promotor, a optar por esta tecnología es el factor tiempo, de hecho, este factor ha sido el que llevó a los gobiernos a impulsar estas tecnologías en tiempo de postguerra.

- 3) Las opciones de sistemas constructivos de prefabricación industrializada para elementos estructurales se tornan más eficientes en tanto contemplen de forma integrada estructura y envolvente, sin embargo, el factor eficiencia energética está de por medio y los impactos ambientales pueden variar según la estrategia de aislamiento. No obstante al ser el envolvente también elemento resistente, requiere mayor rigidez y este parámetro está asociado a un incremento en su peso, razón de más para no juzgar como mejor o peor a un sistema constructivo sobre otro, sino que en la evaluación de sistemas debe tomarse en cuenta, todas las características para cumplir su función y su posible uso futuro.

Con respecto a la fase de desarrollo se concluye que:

- 4) El ejercicio de haber modulado y predimensionado un mismo edificio al que se denominó edificio “X” simultáneamente en 7 combinaciones de sistemas estructurales y constructivos, deja una lección aprendida sobre la diferencia y modificaciones que debe sufrir el espacio cuando se pasa de un sistema a otro, por ejemplo, el área requiere un mayor incremento al pasar de pórticos a módulos

3D, para lograr optimizar la relación área útil vs. área de estructura, también los huecos para circulaciones verticales se ven condicionados según las separaciones de los elementos portantes y la separación de los forjados. Esto con el objetivo de sacar mayor provecho a las dimensiones que los fabricantes sugieren y no convertir a los elementos de prefabricación abierta en un sistema cerrado muy especializado que conlleve a ir en contra de la estandarización y eficiencia, sin que esto vaya en detrimento de coartar la creatividad en el diseño, pero en este contexto, se entiende creatividad a la implementación con eficacia y eficiencia la construcción industrializada en el proceso de diseño, tomando el tiempo suficiente para conocer los límites y alcances de las tecnologías constructivas antes de la generación del proyecto arquitectónico.

5) El anteproyecto estructural y predimensionado ante carga gravitatoria, son una muestra representativa para una evaluación y toma de decisión en las etapas tempranas de un proyecto, pero para la etapa decisiva es requerido todo el escenario demandante de la estructura, tal es el caso de los empujes laterales que llevan al equipo de diseño a incorporar elementos de estabilidad en el edificio, generalmente estos elementos son especializados y no son de prefabricación industrializada, son requeridos en edificaciones no solo según la carga demandante, sino la altura, la geometría en

planta, y la relación de esbeltez del edificio, lo que conlleva a considerar sistemas híbridos entre fabricación industrializada abierta y cerrada o entre sistemas prefabricados y sistemas in situ.

Con respecto a la fase de análisis se concluye que:

- 6) La relación de los factores ICE que valoran el impacto ambiental de un material en una determinada etapa del ciclo de vida no son representativos del impacto de una edificio, por ejemplo; el factor ICE del acero laminado es de 21,5 MJ/kg contra el de hormigón prefabricado RC 40-50 MPa que es de 2,33 MJ/kg siendo el del acero 9 veces mayor que el de hormigón, sin embargo, en la relación entre impactos ambientales de los edificios hay una relación de 2 a 1 del acero respecto al hormigón en MJ/m<sup>2</sup>. Así mismo, la relación entre factores ICE de madera CLT es igual a 3,63 MJ/kg y el hormigón prefabricado es de 1,5 veces menor al de la madera en MJ/m<sup>2</sup>, sin embargo la relación entre impactos de los edificios de hormigón es 2 veces mayor el hormigón que la madera, por lo tanto el factor ICE no es indicador de superioridad en impactos, hasta que se realiza la evaluación según las características del edificio.
- 7) En la relación de impactos por fabricación y transporte, la fabricación supera hasta 75 veces más en promedio al transporte, evaluando distancias de hasta 1000 km con edificios que pesan hasta 3000 toneladas. Por lo tanto el impacto por transporte es un

indicador medio de impacto ambiental con respecto a proceso de fabricación.

- 8) El transporte está íntimamente ligado a la distancia como al peso de los elementos transportados, sin embargo, en el caso de los módulos 3D de hormigón el impacto es menor considerando que su peso es el mayor de todos a diferencia del resto de sistemas, esto se debe a que la distancia que se ha considerado es cercana al sitio de obras, lo que comprueba que al optar por tecnología pesada debe hacerse a corta distancia en este caso se ha considerado 200 km, aunque por otra parte la relación bajo peso, bajo impacto en transporte, es evidente para el caso de los edificios de madera, sobre todo en el caso de los muros, ya que en el caso de la módulos 3D de madera, el volumen es sinónimo de impacto mayor al peso, pues al transportar la unidad 3D es más aire que masa de material la que se transporta.
- 9) En torno a la recuperación de impactos por reversibilidad, los elementos menos especializados y menos frágiles, en sentido opuesto a cualidades como monolitismo y robustez son susceptibles de ser reversibles hasta un 50 por ciento más que las que son muy especializadas. Es el caso de los pórticos contra los módulos 3D, sin embargo entre tecnologías de prefabricación industrializada de hormigón y madera, si el hormigón no cuenta con capa de monolitismo que unifique los elementos resiste más de un

desmontaje que el caso de la madera que puede sufrir fendas o haber bajado sus resistencia por humedad en el tiempo, que es el caso opuesto al hormigón, que gana resistencia con el tiempo.

- 10) En torno a la recuperación de impactos por durabilidad, se estima que es un parámetro ligado a la capacidad resistente de los elementos estructurales y a su ciclo de vida. Este aspecto presenta retos interesantes en las filosofías de diseño, pues entre más hiperestática sea una estructura menos reversible es, por tanto el reto consiste en diseñar el edificio con elementos de sacrificio para que otros puedan ser recuperados y reutilizados.
- 11) En torno a la recuperación por funcionabilidad el caso más emblemático es el de pórticos de acero, pues los impactos son considerables, pero dadas sus características mecánicas, es el sistema estructural que permite mayor flexibilidad en el diseño y una planta más diáfana.

## **7. IDENTIFICACIÓN DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Se ha realizado un ejercicio que establece las bases para continuar las labores de investigación, desarrollo y análisis en las siguientes temáticas:

- a) Análisis comparativo de estructuras que responden a demanda gravitatoria y a empujes horizontales, en primera instancia el viento y en segunda instancia el sismo.
- b) Análisis comparativo entre impactos de edificios de baja altura como el realizado en el presente análisis y mediana altura hasta 10 pisos por ejemplo.
- c) Análisis comparativo entre impactos por incorporación de sistemas de prefabricación industrializada para el incremento de densidad habitacional en edificaciones existentes.
- d) Análisis de recuperación de impactos por reducción de tiempo en obra.
- e) Análisis de recuperación de impactos por reciclabilidad.
- f) Evaluación de escenarios de sistemas híbridos.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros

1. Albus, J. (2018). Construction and design manual. Prefabricated housin. Volume 1. Technologies and Methods. Berlin, Germany: DOM Publishers.
2. Bazán, E., Meli R. (2003). Diseño Sísmico de Edificios. México: Limusa.
3. Chemillier, P. Traducido por Bonaventura Bassegoda i Musté. (1980). Industrialización de la construcción. Barcelona, España: Reverte, Editores Técnicos Asociados.
4. Cisneros, A. Rodríguez, L. (2006). Tecnología en Construcción.. El Salvador: UCA Editores.
5. Del Águila, A. (2006). Industrialización de la Edificación de Viviendas. Tomo 1: Sistemas. Madrid, España: Maireia Libros.
6. Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M. y Donatello, S. Level(s): El marco común de la UE de indicadores básicos de sostenibilidad para edificios residenciales y de oficinas. Partes 1 y 2, EUR 28899EN, Comisión Europea, Luxemburgo, 2017, ISBN 978-92-79-76914-6, doi 10.2760/827838, JRC109285.
7. Dörries, C. (2016). Container and modular buildings: construction and design manual. Berlin, Germany: DOM Publishers.
8. Fernández, F. (1974). Prefabricación- Teoría y Práctica Vol. 2 Industrialización de la Construcción en USA. Barcelona, España: ETA.
9. FIP-ATEP. (1996). Estructuras de edificación prefabricadas. Madrid, España: Asociación Técnica Española del Pretensado. ATEP.
10. González, J. M. (2018). Dels elements de construcció i el projecte Comentaris sobre 18 casos d'estudi. Barcelona, España: Iniciativa Digital Politècnica.
11. Green, M., Taggart, J. (2017). Tall wood buildings: design, construction and performance. Basilea, Suiza: Basel: Birkhäuser.
12. Instituto Lina Bo e P. M. Bardi. (2000). João Filgueiras Lima. Lelé. Lisboa, Portugal: Editorial Blau.
13. Mcdonough, W., Braungart, M. (2002). Cradle to cradle. New York, USA: Dura book.
14. Meli, R. (2008). Diseño Estructural. México: Limusa Grupo Noriega.
15. Meuser, P. (2018). Construction and design manual. Prefabricated housin. Volume 2. Buildings and Typologies. Berlin, Germany: DOM Publisher.
16. Moisset, D. (2003). Intuición y Razonamiento en el Diseño Estructural. Bogotá Colombia: Escala, fondo editorial.

17. Oesterle, E., Lieb, R-D., Lutz, M., Heusler, W. (2001). Double-Skin Facades: Integrated Planning. Munich, Germany: Prestel Publishing.
18. PCI. (2007). Architectural Precast Concrete, Third Edition. Chicago, United States of America USA: Precast/Prestressed Concrete Institute .
19. Pich-Aguilera, F., Batlle, T. (2008). Con La Realidad/Engaged with Reality. Barcelona, España: Actar/birkhauser, ACTAR.
20. Promyslov, V. (2004). Moscow in Construction: Industrialized Methods of Building. United States: University Press of the Pacific.
21. Proyecto EnerBuiLCA Life Cycle Assessment for Energy Efficiency in Buildings. European Union. (2012). Manual explicativo del análisis de ciclo de vida aplicado al sector de la edificación. Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos CIRCE. España
22. Smith, R. (2010). Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. New Jersey, United States: John Wiley y Sons Publishers.
23. Ayuntamiento de Barcelona, Instituto Municipal de la Vivienda y Rehabilitación de Barcelona. (Enero 2019). flexibilidad y la igualdad de género en la vivienda. Qüestions d'Habitatge, Flexibilidad y la igualdad de género en la vivienda, N°22, 10-53.
24. Asam, C. (2007). Recycling prefabricated concrete components a contribution to sustainable construction. 2018, de Research in Architectural Engineering Series, Improving the quality of existing urban building envelopes. Structures. IOS Press, Delft University Press, Volume 4, Sitio web. <https://es.scribd.com/document/199243285/Quality-of-existing-buildings>.
25. Freedman, S. (1999). Loadbearing Architectural Precast Concrete Wall Panels. PCI Journal, I, 92-115.
26. Caballero, A., París, O., Bordonada, R. (2016). Análisis del impacto ambiental de dos sistemas estructurales porticados y la definición de su unidad funcional análisis del impacto ambiental de dos sistemas estructurales porticados y la definición de su unidad funcional. 2019, de Departament de Tecnologia de l'Arquitectura - Ponències/Comunicacions de congressos. UPC Commons. Sitio web: <http://hdl.handle.net/2117/116781>
27. Caballero, A., París, O. (2016). El potencial de reutilización de los sistemas constructivos como factor determinante en el análisis del ciclo de vida de los edificios. 2019, de Departament de Tecnologia de l'Arquitectura - Ponències/Comunicacions de congressos. UPC Commons. Sitio web: <http://hdl.handle.net/2117/116779>

### **Artículos y Revistas**

23. Ayuntamiento de Barcelona, Instituto Municipal de la Vivienda y Rehabilitación de Barcelona. (Enero 2019). flexibilidad y la

### **Tesis Doctoral**

28. París, O. (2014). La "cientalización" de los sistemas industrializados de fachada. Una estrategia de producción para la "cientalización" de la forma de los componentes planos de hormigón. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. URI: <http://hdl.handle.net/2117/94894>

### **Tesinas**

29. Joa, G. (2014). Módulos tridimensionales basados en el estudio de sólidos: Exploración geométrica y de factores característicos de diseño de los sólidos posiblemente aplicables a los módulos tridimensionales prefabricados. Proyecto Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. URI: <http://hdl.handle.net/2099.1/22461>
30. Copf, I. (2011). Industrialización de vivienda plurifamiliar en altura, EEUU 1950-1970. Proyecto Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. URI: <http://hdl.handle.net/2099.1/13985>
31. González, J. (2016). Sistemas constructivos industrializados a partir del aluminio: Propuesta de un prototipo para las promociones La Casa por el Tejado. Proyecto Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

32. Patino, A. (2013). Estudio comparativo de los procesos de fabricación y montaje de tres sistemas industrializados en madera: en grandes, medianas y cortas luces. Proyecto Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. URI: <http://hdl.handle.net/2099.1/1962>
33. Valadares, F. (2013). As caixas en las fachadas de Lelé. Proyecto Final de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. URI: <http://hdl.handle.net/2099.1/20106>

### **Patentes**

34. Borne, S., Clarke, C., Becker, J. (2007). EE.UU. Patente N°. US 7,292,908 B2. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Systems and methods for manufacturing customized prefabricated buildings including arbitrarily modularizing building specification without using any pre-defined modules
35. Smith D. (1982). EE.UU. Patente N°. US 4,342,177. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Prefabricated steel frame building construction components and methods
36. Tragant, J., Morte, M. (2014). EE.UU. Patente N°. US008652379B2. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Method and system for manufacturing hollow reinforced concrete module elements and element obtained therefrom

### **Marco Legal y regulador**

37. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación, CTE-DB-SE-AE. (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
38. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acero, CTE-DB-SE-A. (2007). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
39. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Cimientos, CTE-DB-SE-C. (2007). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
40. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, CTE-DB-SE. (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
41. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Madera, CTE-DB-SE-M. (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
42. Ley 16/2017 del Cambio Climático. DOGC N° 7426, BOE N°234 Legislación Consolidada referencia BOE-A-2017-11001. (2017). Comunidad Autónoma de Cataluña
43. Ley 9/2017 de Contratos del Sector Público. DOGC N° 12902, Boletín Oficial del Estado BOE N°272 Legislación Consolidada referencia BOE-A-2017-12902. (2017).
44. Norma UNE-EN 15804:2012+A1. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. (2014). Norma Española versión de Norma Europea UNE-EN 15804:2012. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. España.
45. Norma UNE-EN 15978. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios, método de cálculo. Norma Española versión de Norma Europea EN 15978:2011. (2012) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. España.
46. Reglamento (UE) N° 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea. Condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción.(2011). Parlamento Europeo.

### **Cátedras**

47. Blasco, J., Ortí A. (2019). Materials estructurals avançats i innovadors. Mbarch.ETSAB-UPC Barcelona, España
48. González, J.M. (2019). Tècniques i sistemes de construcció industrialitzada. Mbarch.ETSAB-UPC Barcelona, España
49. París, O. (2018). Arquitectura medio ambiente y tecnología. Mbarch.ETSAB-UPC Barcelona, España

50. Vertical living in timber: How to design for the 21st century. (2018). Roca Galery, Barcelona, España.

### **Entrevistas**

51. Arquitecta Teresa Batlle Pagès, socia fundadora del despacho de Arquitectura; Pich Architects. (2019). Barcelona, España

52. Arquitecta Cristina Gamboa Masdevall, socia de la Cooperativa de Arquitectos LACOL Arquitectura. (2019). Barcelona, España.

### **Páginas web**

53. <https://www.picharchitects.com/>

54. <http://www.laborda.coop/es/proyecto/arquitectura/>

55. <http://www.lacol.coop/projectes/laborda/>

56. <https://www.environdec.com/EPD-Search/>

57. <https://www.eco-platform.org/list-of-all-eco-epd.html>

58. <https://www.aenor.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto/>

59. <http://www.csostenible.net/dapcons/>

60. <http://www.rae.es/>

### **Catálogos técnicos industria**

61. <https://www.prefabricatspujol.com/es/>

62. <http://www.compacthabit.com/es/>

63. <http://www.prefabricadosalve.com/>

64. <https://www.hiansa.com/es>

65. <https://ds.arcelormittal.com/iberia/prontuario/language/ES>

66. <https://www.tecnyconta.es/>

67. <https://www.tragsa.es/>

68. <https://egoin.com/>

69. <http://www.sebastia.eu/>

70. <https://www.storaenso.com/>

71. <https://www.kodumaja.ee/en>

72. <https://www.codigotecnico.org/>

73. <https://www.en-standard.eu/>

## ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

