

# ***CONSTRUCCIÓN MODULAR APLICADA A LA VIVIENDA UNIFAMILIAR***

[Modelo eficiente de vivienda modular Pasivhaus]

Trabajo fin de grado  
Grado en Fundamentos de la Arquitectura  
Alumno: **Juan Carlos Rodríguez-Marín Llasera**  
Tutor: **Prof. Dr. Fernando Martínez Soto**  
Fecha: **17 de junio de 2024**

# CONSTRUCCIÓN MODULAR APLICADA A LA VIVIENDA UNIFAMILIAR

[Modelo eficiente de vivienda modular Pasivhaus]

## Índice

### Tabla de contenido

<b>Índice</b> .....	<b>2</b>
<b>Índice de ilustraciones</b> .....	<b>3</b>
<b>1 ESTADO DEL ARTE:</b> .....	<b>5</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	5
1.2 LA BURBUJA INMOBILIARIA .....	5
1.3 OBJETIVOS DEL TFG .....	6
1.4 QUE ES LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	7
<b>2 CONSTRUCCIÓN MODULAR:</b> .....	<b>7</b>
2.1 QUE ES LA CONSTRUCCIÓN MODULAR .....	7
2.2 PROCESO CONSTRUCTIVO .....	8
2.3 HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN MODULAR .....	9
2.4 TIPOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN MODULAR: .....	14
2.5 OTROS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS MODULARES:.....	27
2.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES:.....	28
2.7 PASSIVHAUS: .....	31
2.8 SOLUCIONES PARALELAS:.....	38
<b>3 PROPUESTA: LA MADERA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN</b> .....	<b>40</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	40
3.2 UNIONES CON MADERA LAMINADA .....	44
3.3 TIPOS DE MADERA.....	48
3.4 PROPUESTA.....	50
3.5 CÁLCULOS .....	57
<b>4 CONCLUSIONES</b> .....	<b>61</b>
4.1 LÍNEA FUTURA .....	62
<b>5 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>63</b>

## Índice de ilustraciones

(Figura 1. Crisis inmobiliaria [Imagen de elaboración propia])	6
(Figura 2. Materiales para construcción modular [Imagen de elaboración propia])	8
(Figura 3. Fases del proceso constructivo [Imagen de elaboración propia])	9
(Figura 4. Iglesia de Santa María, Chicago 1833)	10
(Figura 5. Portable colonia cottage para emigrantes)	10
(Figura 6. Biblioteca Saint Genevieve)	11
(Figura 7. The Crystal palace)	11
(Figura 8. Edificio Monadnock)	11
(Figura 9. Edificio de hormigón por parte de Thomas Edison)	12
(Figura 10. Vivienda nº16 y nº17, Walter Gropius)	12
(Figura 11. Cronología de las primeras viviendas modulares [Imagen de elaboración propia])	14
(Figura 12. Sistemas constructivos modulares con hormigón [Imagen de elaboración propia])	16
(Figura 13. Casa Kyoto)	16
(Figura 14. Ventajas y desventajas de la construcción modular con hormigón [Imagen de elaboración propia])	17
(Figura 15. Vivienda modular con estructura de madera)	17
(Figura 16. Propiedades frente al fuego de la madera) [26]	18
(Figura 17. Imagen del entramado de madera de una vivienda)	19
(Figura 18. “Platform frame” “Ballom frame”)	20
(Figura 19. Madera CLT)	20
(Figura 20. Ventajas y desventajas de la construcción modular con madera [Imagen de elaboración propia])	22
(Figura 21. Estructura metálica modular)	22
(Figura 22. Vivienda modular con estructura metálica)	22
(Figura 23. Esquema del sistema Steel frame.)	24
(Figura 24. Ventajas y desventajas de la construcción modular con metal [Imagen de elaboración propia])	25
(Figura 25. Prototipo modular de aluminio extruido) [21].	26
(Figura 26. Construcción modular con paneles de aluminio extrusionado [Imagen de elaboración propia])	27
(Figura 27. Vivienda impresa en 3D Eindhoven)	28
(Figura 28. London Container City)	28
(Figura 29. Tabla comparativa de las construcciones modulares estudiadas [imagen de elaboración propia])	31
(Figura 30. Los pilares principales del Passivhaus [Imagen de elaboración propia])	32
(Figura 31. Torre Bolueta)	32
(Figura 32. Proceso de reciclado de materiales en edificación [Imagen de elaboración propia])	33
(Figura 33. Consumos de la construcción [Imagen de elaboración propia])	34
(Figura 34. Sostenibilidad de la madera [Imagen de elaboración propia])	35
(Figura 35. Madera de haya de Japón)	35
(Figura 35. Principios nZeb [Imagen de elaboración propia])	38
(Figura 36 Sotracs Habitatge cooperatiu) [38]	39
(Figura 37. La morada Habitatge cooperatiu)	40
(Figura 38. Glue laminated timber)	41
(Figura 39. Imagen de madera clt)	41
(Figura 40. Imagen de madera glulam)	42
(Figura 41. Imagen de madera NLT)	42
(Figura 42. Capilla de Paja, Tallín)[41]	42
(Figura 43. Piscina de la escuela Freeman) [42]	43
(Figura 44. Edificio The smile)[43]	43
(Figura 45. The voxel)[44]	43

(Figura 46. Centro Sara Kulturhus)[45]	44
(Figura 47. Tipos de uniones)	44
(Figura 48. Uniones con clavos)	45
(Figura 49. Uniones mediante pernos)	45
(Figura 50. Uniones con pasadores)	45
(Figura 51. Uniones mediante conectores)	46
(Figura 52. Uniones mediante placas dentadas)	46
(Figura 53. Herrajes singulares)	47
(Figura 54. Herrajes estándar)	47
(Figura 55. Pino Laricio)	48
(Figura 56. Tabla anejo C.1. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)	49
(Figura 57. Tabla anejo C.3. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)	49
(Figura 58. Tabla anejo D.2. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)	50
(Figura 59. Tabla Anexo E.4. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)	50
(Figura 60. Planos de la propuesta Pabellón)	51
(Figura 61. Proceso de producción de la madera) [40]	52
(Figura 62. Proceso de aserrado de la madera) [40]	53
(Figura 63. Esquema estructural de madera CLT)	54
(Figura 64. Despiece de elementos constructivos)	55
(Figura 65. Detalle de los elementos de conexión)	56
(Figura 66. Arriostrado de la Viga de CLT)	58

## **1 ESTADO DEL ARTE:**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

La Falta de vivienda es un problema creciente en nuestro país, las crisis consecutivas por las que ha atravesado España, la inflación económica, la falta de ahorro y la imposibilidad de muchos ciudadanos de comprar una casa. Hacen que el motivo principal de esta investigación sea comparar los costes económicos de la vivienda, además de agilizar los plazos y facilitar los procesos constructivos de los mismos.

Mediante estas innovadoras técnicas pretendo hacer un análisis comparativo para poder determinar cuan beneficioso es el ahorro económico según los distintos tipos de construcción prefabricada (hormigón, madera, metal, etc.), además de analizar distintos factores como la reducción de los tiempos de construcción, la eficiencia energética, además del impacto medioambiental.

El problema de la vivienda en España es un problema creciente desde hace años, es por ello que se han intentado múltiples soluciones como las viviendas de protección oficial (VPO) o establecer un límite en el coste de los alquileres, pero aun siendo parcialmente eficaces, no consiguen abordar el problema de raíz, reduciendo los costes de construcción y en algunos casos, siendo soluciones contraproducentes a la larga.

El salario medio bruto anual en España es de 25.165 euros según el INE, en el año 2020.

Por otro lado. El estándar ideal de gasto presupuestario indica que no se debería destinar más del 30% a vivienda (alquiler o pago de hipoteca) siendo 629 euros mensuales. Es por ello que, a muchos jóvenes en España, no les queda más remedio que recurrir a pisos compartidos.

A menudo emparejarse es la solución, destinando más del 40% del salario a la vivienda Según el banco de España, sin descender del 30%.

España es el cuarto país más elevado de la UE, únicamente superado por griegos, holandeses y belgas, y muy lejos de los alemanes, que dedican menos del 15% [13].

### **1.2 LA BURBUJA INMOBILIARIA**

La burbuja inmobiliaria que se originó en 2008, originada por la crisis financiera, es la más grave desde el año 1929.

Dicha crisis no afectó únicamente a España, sino que es un problema acarreado a nivel mundial, originado en Estados Unidos, por las instituciones financieras, derivado de los préstamos abusivos a los compradores de viviendas del país.

Esto originó que los valores hipotecarios inmobiliarios del país, colapsaran y generasen grandes daños a las máximas instituciones financieras del momento como Lehman Brothers, derivando el daño a las grandes instituciones financieras del resto de países.

Ante todo, esto se debe tener en cuenta uno de los precedentes más importantes que detonó la crisis actual, la derogación de la ley Glass-Steagall de E.E.U.U en 1999. Esta ley, se aprobó en 1933 precisamente para evitar lo sucedido en el año 1929, que pretendía fomentar la financiación de viviendas asequibles. El mayor problema fue la combinación de las operaciones de alto riesgo junto a las negociaciones por cuenta propia de las instituciones financieras.

Todo esto se tradujo en el rescate masivo de las instituciones financieras a nivel mundial, motivado por evitar el colapso, se generó la Ley de Estabilización Económica de los E.E.U.U en 2008, pero no se pudo frenar el desplome económico.

La situación económica desde el año 2008 no ha sido muy prospera, según el BCE el crecimiento de los fondos de inversión ha sido la industria que más ha crecido en los últimos años. [14].

Desde el año 2008 hasta el año 2021, han crecido desde los 4,5 billones de euros, hasta los 20 billones. Es decir, han pasado de representar el 42% de la economía europea a representar más del 132%.

Ellen Ryan, economista del Banco Central Europeo, afirma que el incremento del patrimonio de los fondos de inversión arriesga la economía de la zona euro. El problema surge al tener estos fondos de inversión, la capacidad de bajar la prima de riesgo del mercado, e invertirse en una crisis económica.

Por otro lado, se debe entender la forma de actuar de una gestora, cobrando una comisión del 0,5% al 2% dependiendo de la facturación, cuanto más factura, mayor es la comisión. Eso provoca que los fondos e inversores, inviertan más en los tipos de activos que más rentabilidad generan, sintiéndose obligados a mantener esa línea favorable. Este sistema se realiza primordialmente en fondos de bolsa alcista.

El problema de estos sistemas de inversión, surge cuando se desploma la racha alcista, sufriendo principalmente los inversores, que mantienen sus activos con la esperanza de recuperar su inversión.

Según el BCE, se deben adoptar ciertas medidas para evitar riesgos indeseados. Ya que los gestores individuales, no se sienten motivados para adoptar dichas medidas. La solución reside en introducir medidas “macro prudenciales” limitando el apalancamiento de los fondos, además de aumentar el nivel de liquidez mínimo, exigido a los gestores.

Garantizando así la suficiente liquidez de los fondos para atender los reembolsos, además de reducir el riesgo de los activos de los inversores [14].



(Figura 1. Crisis inmobiliaria [Imagen de elaboración propia])

### 1.3 OBJETIVOS DEL TFG

El objetivo principal de dicho trabajo de investigación, es el de realizar un recorrido analítico de los distintos tipos de construcción modular que ha existido, así como el de analizar las diferencias existentes en su construcción, según su material, modelo de prefabricación y puesta en obra.

Este trabajo de investigación no solo busca profundizar en el conocimiento técnico y práctico de la construcción modular, sino también promover su adopción como una alternativa viable y

ecológica en el sector de la construcción. Con ello, se espera además contribuir al desarrollo de soluciones habitacionales más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Paralelamente se pretende esclarecer los conceptos de prefabricación y modulación, así como las alternativas actuales, las metodologías más desarrolladas y la viabilidad de cada una.

Posteriormente, se realizará una propuesta de modulación, que consiga lidiar con los problemas actuales que encarecen la vivienda, arrastrados por la creciente burbuja inmobiliaria, que limita la posibilidad de independizarse de las nuevas generaciones.

#### **1.4 QUE ES LA VIVIENDA UNIFAMILIAR**

La vivienda unifamiliar es aquella en la que reside una única familia, a diferencia de las viviendas colectivas, estas, suelen estar adaptadas a las necesidades más específicas de los usuarios. Se puede distinguir 3 tipos principales de viviendas unifamiliares, las "Aisladas", aquellas que no limitan con ninguna otra vivienda, las "Pareadas" aquellas que limitan en el exterior con otras viviendas, pero mantienen libre el interior y las viviendas "Adosadas", aquellas que lindan junto a otras viviendas.

Por lo general, este tipo de viviendas suelen situarse en zonas alejadas de los centros urbanos, donde los usuarios brindan de una tranquilidad mayor, y por lo general de mayor espacio [17].

### **2 CONSTRUCCIÓN MODULAR:**

#### **2.1 QUE ES LA CONSTRUCCIÓN MODULAR**

La construcción o edificación modular es un sistema constructivo que permite ante todo flexibilidad y personalización de la edificación a proyectar ya que consiste en un sistema de creación y ensamble de módulos estandarizados habitables que permiten crear espacios únicos de diseño. De esta manera, una construcción modular es una solución a la situación actual de edificación masiva, a costes elevados y tiempos muy dilatados en el tiempo que impiden que se puedan personalizar hogares y espacios de trabajo o realizar viviendas más accesibles en menos tiempo.

Son edificaciones que cumplen, siempre, el Código Técnico de Edificación (CTE) por lo que no existen dudas del cumplimiento de estándares de calidad.

Los módulos prefabricados que se hacen previamente pueden estar hechos de diversos materiales, los más reconocidos son el hormigón, el acero y la madera, pero podemos encontrarnos también otros materiales peculiares como es la paja, cáñamo, adobe, etc.

La arquitectura modular es una forma de construcción sencilla, óptima, eficiente, estas características junto con el control durante el proceso de fabricación de los módulos (que se suele hacer por procesos industriales) proporciona una construcción más sostenible que la tradicional.

Si nos decantamos por una construcción modular, es importante conocer las características de sus módulos prefabricados, especialmente su proceso de montaje y producción, así como su calidad, eficiencia energética, confort y seguridad [10].

Los principales beneficios de este tipo de arquitectura modular son:

- Es una de las formas más rápidas de construir edificios en un corto periodo. Por ello, cuando hay urgencia en construir una determinada obra se suele emplear este tipo de construcción.
- Al optimizar el proceso de construcción, resultan mucho más económicas que las viviendas tradicionales.
- Como se construyen previamente los módulos mediante procesos industrializados, el

ahorro en los materiales utilizados es significativo.

- Una vez realizada la construcción modular, se pueden añadir y reemplazar elementos y permite una versatilidad y facilidad de adaptación a las necesidades de espacio.
- Como tienen un montaje y desmontaje rápido y sencillo, son edificaciones provisionales idóneas en muchos sectores.
- Incorporar energías renovables y alternativas (como son paneles fotovoltaicos y térmicos) [5].



(Figura 2. Materiales para construcción modular [Imagen de elaboración propia])

## 2.2 PROCESO CONSTRUCTIVO

Las distintas fases del proceso constructivo de la arquitectura modular, se dividen en cuatro procesos:

### 2.2.1 DISEÑO

En esta fase se ven implicados los profesionales de primera orden (arquitecto e ingeniero) para el correcto diseño y su posterior ejecución.

Para ello se acuerda previamente tanto el diseño como el presupuesto con el cliente, adecuándose a la normativa competente y las necesidades de la propia vivienda.

### 2.2.2 FABRICACIÓN DE LOS MÓDULOS

Una vez acordado y diseñado el proyecto con el cliente, se procede a la ejecución de los distintos módulos (en fábrica) que posteriormente se colocaran en la parcela con el terreno debidamente acondicionado. Tanto el proceso de fabricación de los módulos como la propia ejecución se pueden realizar de forma simultánea. Para ello es necesaria una adecuada comunicación entre la fábrica y la propia constructora.

### 2.2.3 TRANSPORTE

Una vez termina el proceso de fabricación de los distintos módulos, se procede a su transporte. Este proceso es de vital importancia que sea realizado con sumo cuidado, dado que se puede echar a perder innumerables cantidades de dinero por una incorrecta ejecución del transporte. Además, se deben cumplir con todas las medidas de seguridad para evitar accidentes de los operarios.

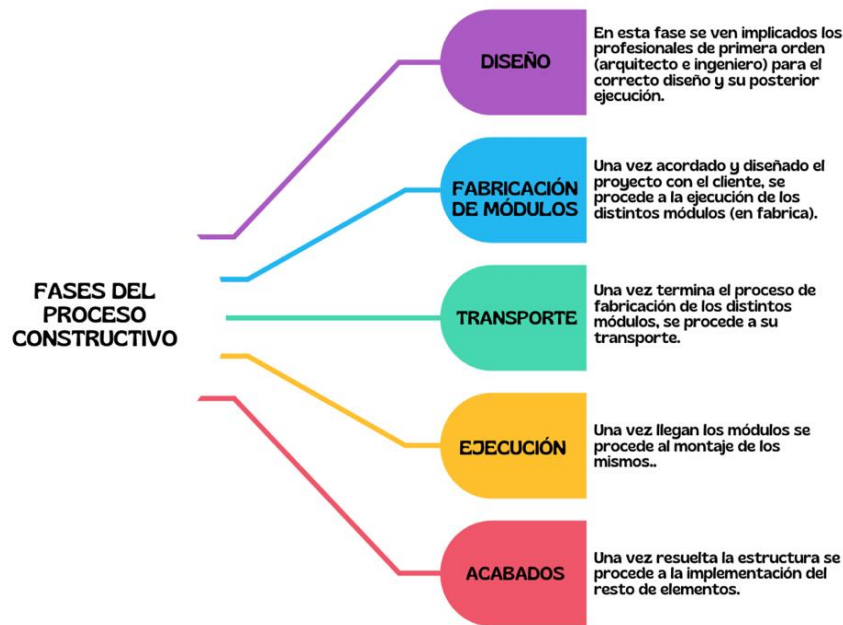
### 2.2.4 EJECUCIÓN

Una vez llegan los módulos se procede al montaje de los mismos.



El proceso no requiere de una alta complejidad, es una de las ventajas de este sistema constructivo. Aun así requiere de un análisis previo en el proyecto, para evitar fisuras de los mismos.

Aun que el proceso de ejecución no sea excesivamente complicado, requiere de personal cualificado y del cumplimiento de todas las medidas de seguridad.



(Figura 3. Fases del proceso constructivo [Imagen de elaboración propia])

### 2.3 HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN MODULAR

Si nos remontamos a los orígenes de la arquitectura modular, encontramos la primera vivienda modular del mundo, por parte de un carpintero australiano, (Herbet Maning) donde con motivo de construir viviendas para los colonos australianos, realizó la primera vivienda modular en 1833. 20 años más tarde, más del 80% de las viviendas de los Estados Unidos, eran modulares, estas viviendas tuvieron tanto éxito que después de la II Guerra mundial, numerosas empresas se lanzaron a la construcción de estas viviendas.

No obstante, los primeros datos de algún tipo de construcción modular se remontan al siglo XVI, encabezado por Leonardo da Vinci, donde se le encargó la planificación de nuevas ciudades en la región de Loire (Francia).

Su obra se componía de una fábrica central en la ciudad a partir de la cual surgían los distintos elementos que conformaban los edificios de la ciudad. Esto le permitió poder realizar diversidad de formas y elementos constructivos.

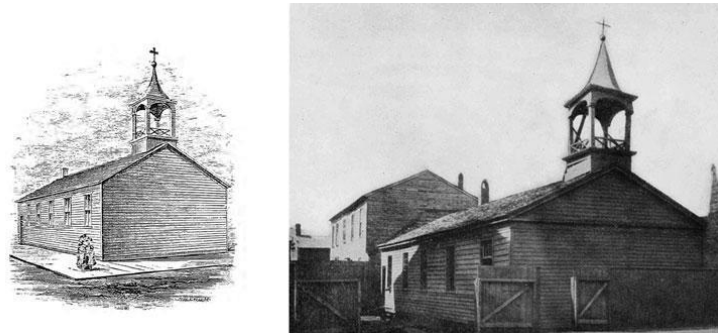
Otro ejemplo se remonta a la batalla entre Francisco I y Enrique II, donde diseñó distintos pabellones de madera para la guerra que sufría Francia contra Inglaterra.

Estos módulos se transportaban fácilmente por barco hasta su destino, donde eran montados por los propios militares, construyéndose de forma rápida y eficaz.

Así, consta además, la casa Baffin (Canadá) en 1578 donde se utilizó un sistema constructivo muy similar.

También cabe destacar la Great House 1624. Construida enteramente de madera por parte de Edward Winslow, se construyó en Inglaterra donde se transportó posteriormente a Massachusetts. También en Estados Unidos, se realizó otra construcción de madera, más

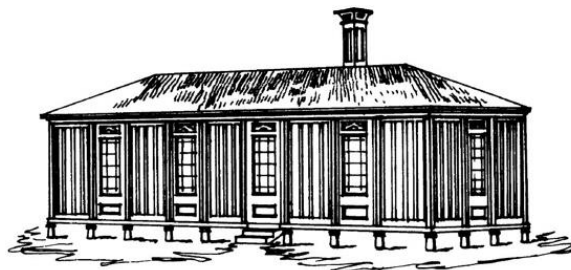
concretamente una pequeña iglesia en Chicago (Iglesia de Santa María, 1833), que se desmontó y montó hasta tres veces, a pesar de que los constructores de dicha iglesia no tuviesen demasiada fe y considerasen que se acabaría derrumbando [10].



(Figura 4. Iglesia de Santa María, Chicago 1833)

Esta iglesia se realizó mediante el conocido sistema “Ballom Frame”, el cual agilizó enormemente los procesos de construcción debido a la industrialización, además de simplificar el proceso, generando un relevo de la mano de obra cualificada, a la industria.

Según Solon Robinson, si no hubiese sido por este tipo de sistema constructivo, algunas ciudades de Estados Unidos como Chicago, no hubiesen obtenido el enorme crecimiento que tuvieron. Unos años después de la construcción de la Iglesia de Santa María, se realizó otro modelo de construcción con madera, pero esta vez en Londres. La idea, se originó por parte de John. H. Manning, el cual construyó esta vivienda para su hijo, el cual emigraba desde Londres a Australia. Esta vivienda se denominó y comercializó en Australia y Sudáfrica como “Portable colonia cottage para emigrantes” y fue el primer caso documentado de una vivienda modular [33].



(Figura 5. Portable colonia cottage para emigrantes)

Posteriormente a finales del siglo XVIII, se comenzó a experimentar con la construcción metálica, más concretamente de hierro, este tipo de construcciones se introdujeron de forma paulatina, siendo primero elementos resolutivos a problemas específicos como forjados o columnas, y más tarde, realizando la estructura completa del primer edificio de hierro del mundo, la Biblioteca de Saint Genevieve en 1851, por parte del arquitecto Henri Labrouste [34].



(Figura 6. Bibliotheca Saint Genevieve)

The Crystal Palace, fue un edificio construido para la gran exposición mundial de 1851. Este edificio de hierro fundido y cristal fue uno de los primeros edificios modulares del mundo. Se realizó en un tiempo récord, tan solo 6 meses se necesitaron para realizar su construcción. Su ubicación inicial, fue en Hyde Park (Londres), pero a los 3 años se trasladó al sur de la ciudad donde acabó incendiado en 1936 [35].



(Figura 7. The Crystal palace)

En Estados Unidos, la construcción con hierro no fue sino hasta el siglo XIX que se empezó a desarrollar. Una vez se implementó este nuevo sistema constructivo, tuvo un gran auge, y arquitectos como James Bogardus, se introdujeron de lleno este novedoso sistema constructivo.



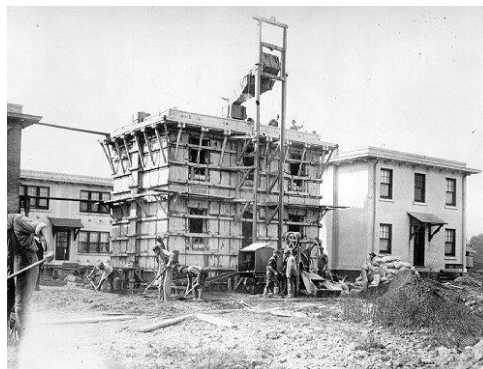
(Figura 8. Edificio Monadnock)

Bogardus, apostó por sustituir los muros de fábrica exteriores, por pilares de hierro donde apoyaban los forjados superiores. Implementando la construcción industrializada con

elementos de hierro. 25 años más tarde que la obra de Bogardus, surge el considerado como primer rascacielos del mundo, conocido como "Edificio Monadnock". Este edificio de 16 plantas construido por el arquitecto William Baron, pertenece a uno de los considerados como pioneros en la conocida como escuela de Chicago, de la cual Bogardus fue el fundador [9].

La invención del hormigón armado, es atribuido por algunos a Joseph Louis Lambot. Pero de forma muy controvertida, también es atribuido este invento al jardinero Joseph Monier, el cual descubrió la gran resistencia de la combinación del hierro con una argamasa de piedras pequeñas. Gracias a esta hazaña, en 1891 se construye el primer forjado de vigas prefabricadas de hormigón, por parte de Francois Coignet.

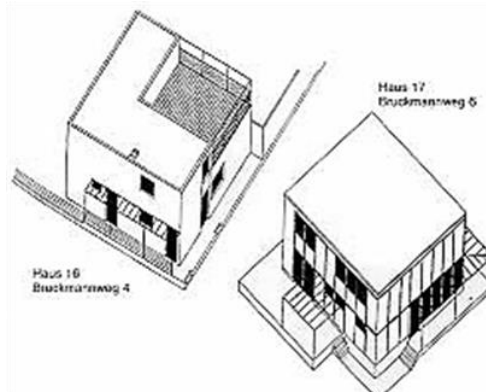
En 1908 Thomas Edison, construyó una vivienda de hormigón mediante la cual se vertía el mismo en unos moldes metálicos [36].



(Figura 9. Edificio de hormigón por parte de Thomas Edison)

No fue hasta pasados unos años, que se implementó la industrialización en la construcción con paneles de hormigón armado, debido a la gran guerra que había atravesado Europa, y a las necesidades de vivienda que surgían, se optó por una industrialización de la construcción de hormigón armado, la cual estaba preparada para hacer frente a las necesidades de la época. Se optó por realizar paneles de hormigón armado, de tal forma que mediante esta técnica de prefabricación se agilizase el proceso constructivo.

Posteriormente, arquitectos como Walter Gropius, fueron los responsables de fundar la escuela Bauhaus, la cual impulsaban a los estudiantes a explorar la novedad de los materiales y de los distintos sistemas constructivos. Entre ellos se promovía la construcción de elementos sistematizados, y de viviendas estandarizadas. En 1927 con motivo de la exposición de la vivienda en Stuttgart, Walter Gropius, realizó dos viviendas prefabricadas, concretamente las actualmente desaparecidas nº16 y nº17.



(Figura 10. Vivienda nº16 y nº17, Walter Gropius)

Estas dos viviendas prefabricadas, proponían encontrar de una manera asequible para la población, el modelo de vivienda estándar realizado en Alemania, haciendo asequible este modelo, que escapaba de la economía de la sociedad.

Elaborando su propio sistema de montaje en seco, se componía de una estructura de acero y tabiquería de paneles de corcho revestidos de mortero.

El sistema principal de acero se utilizó como eje modular al cual se le incorporaban los distintos muros de partición, carpinterías etc.

Toda la vivienda era construida de manera prefabricada, a excepción del suelo, el cual se hizo in situ. Aun que, si bien es verdad, se realizó la obra en un tiempo récord (tres meses y diez días), teniendo en cuenta que eran viviendas a partir de las cuatro habitaciones, la obra se encareció bastante debido a los materiales utilizados (acero y corcho) [11].

La Casa Wichita, realizada por Buckminster Fuller en 1944, es otro claro ejemplo de cómo la arquitectura se adapta a las necesidades de la época.

Se realizó este módulo de viviendas como solución a los problemas habitacionales de la postguerra y de las personas con menos recursos. Fue diseñada para aquellas personas del campo que no podían acceder a una vivienda. El sistema consistía en un gran mástil metálico, desde el cual colgaba un mallazo metálico, al que se le iban incorporando trozos metálicos utilizados en la construcción de los aviones Beech.

Este módulo estaba pensado para realizarse en masa, con casi cinco metros de altura, toda la ventilación se realizaba por una “cúpula superior” que cerraba la vivienda.

Frank Lloyd Wright, también hizo aportes a la Arquitectura modular, donde destaca “La casa Popeleighey”, para economizar el precio de las viviendas, decidió utilizar madera de cedro para la mayoría de los elementos de la vivienda, como tabiques y cubierta.

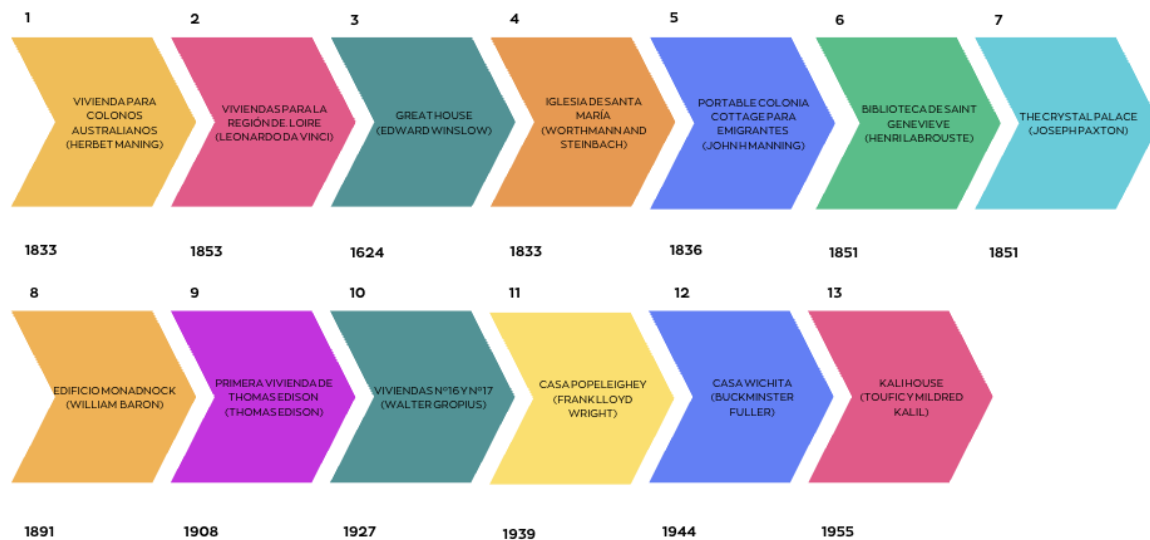
Esto le sirvió para crear modelos económicos y nuevas tipologías de viviendas, reduciendo costes al utilizar materiales locales, sin sacrificar la comodidad [12]. Además, entre 1915 y 1917, Wright pretendía recrear el sistema de construcción con madera estadounidense- se, ahorrando así mano de obra y dinero, elaboró 6 viviendas de doble altura y bungalows. Según Gyure, Wright se tomó más en serio este proyecto que ningún otro, generando una enorme cantidad de bocetos, el mismo Gyure afirma que lo que pretendía era encontrar un sistema económico de construcción.

En 1910, lanzó un discurso con el cual pretendía transmitir sus ideas de que las personas debían ser sustituidas por maquinas, generando así un descanso en la sociedad.

Según Sidney K. Robinson, profesor en la universidad de Illinois (Chicago), el proyecto de Wright de vender viviendas prefabricadas en un concesionario de coches no consiguió salir a flote, debido a la primera guerra mundial.

En 1930, se pretendió buscar un modelo de vivienda asequible para el ciudadano americano medio. Pero no sería hasta 1955 que llegaría la “Kalil House”, construida por el matrimonio Toufic y Mildred Kalil en Manches- ter (E.E.U.U.).

Kalil House, fue una vivienda que se realizaba enteramente en el taller, a excepción de la solera de hormigón y un núcleo de ladrillo, donde posteriormente se depositaba el módulo.



(Figura 11. Cronología de las primeras viviendas modulares [Imagen de elaboración propia])

## 2.4 TIPOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN MODULAR:

### 2.4.1 CONSTRUCCIÓN MODULAR CON ESTRUCTURA DE HORMIGÓN

#### - VIVIENDAS MODULARES DE PANELES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

Los paneles prefabricados de hormigón son una serie de paneles que suelen actuar de forma estructural, ensamblándose entre sí a modo de envoltorio del edificio, previamente, ensamblados en fábrica.

Existen diversos tipos de armaduras para este tipo de paneles, podemos encontrar los más tradicionales, es decir los de acero, pero también podemos encontrar una serie de sustitutos como los de fibra de vidrio (GRC), los cuales suponen una reducción del impacto medioambiental y espesor de este.

Podemos encontrar además dos tipos de paneles prefabricados, los portantes y autoportantes. Los portantes, actúan de modo estructural, transmitiendo los esfuerzos del edificio al terreno. Además de actuar a modo de cerramiento, permitiendo reducir otros elementos estructurales al ser sustituidos por estos paneles. Por otro lado, podemos encontrar los paneles autoportantes, que actúan simplemente a modo de partición exterior o interior, estando anclados a la estructura.

#### - VIVIENDAS MODULARES DE PÓRTICOS DE HORMIGÓN

A diferencia de los paneles de hormigón, los pórticos de hormigón se componen de pilares y vigas prefabricadas con hormigón armado. También los podemos encontrar ensamblados desde fábrica.

La forma más habitual de utilizar este sistema de pórticos de hormigón es mediante la colocación de paneles prefabricados de hormigón (Autoportantes). El modo de colocación de este sistema es mediante grúas, esto consigue reducir enormemente los tiempos en obra, finalizando el mismo con las uniones entre pilares y vigas. El sistema se compone de varios pilares continuos, sobre los que se apoyan las distintas vigas [5].

#### - VIVIENDAS CON SISTEMA YTONG

Es el sistema más vanguardista de todos. Se compone a través de bloques prefabricados de hormigón celular, este tipo de hormigón tiene la característica de que es muy ligero además del valor añadido sostenible que aporta.

Este tipo de material reduce considerablemente los procesos de transporte y puesta en obra, ya que no requiere de maquinaria pesada, esto se debe en su relación de volumen/peso, el cual tiene un ratio de 5/1, es decir, por cada 5m de producto, se necesita un metro de materia prima.

La principal ventaja de este sistema es que consigue unificar los elementos estructurales, aislantes térmicos/acústicos, resistencia al fuego, etc.

Una de las curiosidades de este innovador sistema es que, al tener micro huecos de aire, se comporta a su vez como aislante térmico, pero esto dependerá de la zona climática en la que nos encontremos, donde podremos utilizar este sistema constructivo como aislante único, o deberemos añadir además un aislante térmico para aquellas zonas climáticas, las cuales lo requieran.

Uno de los principales problemas de este sistema, es que presenta ciertos tóxicos en su composición, es por ello por lo que, frente a sus enormes ventajas, se debe realizar una comparativa en cuanto a si merece o no la pena el uso de estas composiciones.

Este tipo de sistema se ha utilizado en numerosas ocasiones, pero se destaca el “Life Reusing Posidonia”, una promoción de 140 viviendas de protección oficial, en Formentera, donde son pioneros en el uso de aislantes térmicos como la posidonia.

#### - MÓDULOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

Por último, encontramos los módulos prefabricados de hormigón:

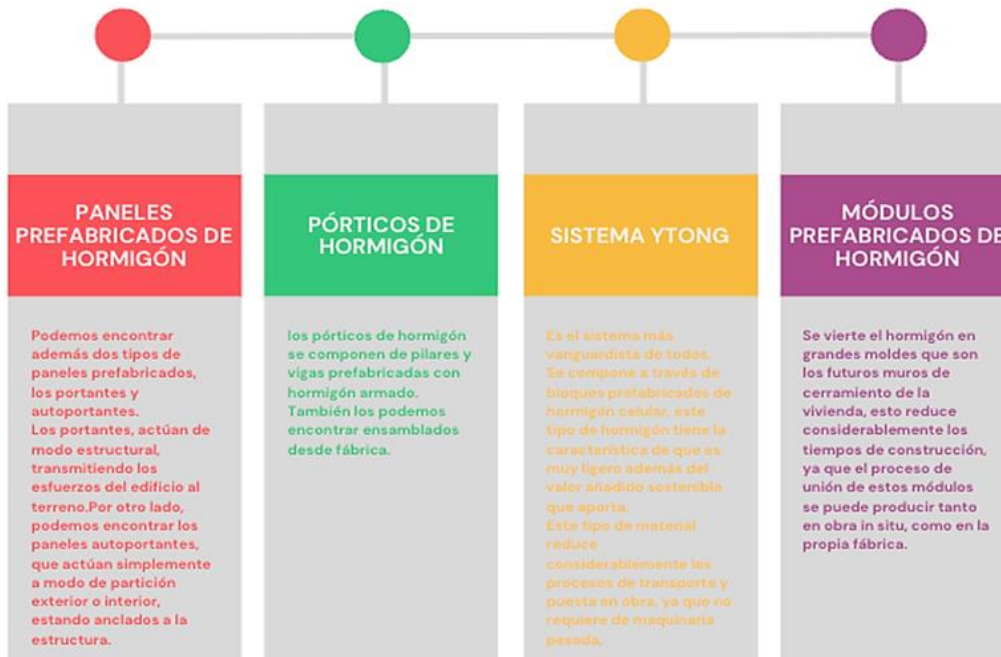
Este último proceso, se basa en la producción continua de hormigón, y fraguarlo en unas condiciones climáticas idóneas de humedad y temperatura, teniendo en cuenta que el proceso tradicional, se basa en condiciones de temperatura ambiente.

Se vierte el hormigón en grandes moldes que son los futuros muros de cerramiento de la vivienda, esto reduce considerablemente los tiempos de construcción, ya que el proceso de unión de estos módulos se puede producir tanto en obra in situ, como en la propia fábrica.

Además, una ventaja añadida frente a otros tipos de prefabricados, son las instalaciones, las cuales pueden estar ejecutadas en la propia fábrica, donde puedes incluir hasta los propios módulos de la cocina.

“Un ejemplo de este sistema es la Residencia de Estudiantes en Sant Cugat diseñada por H-Arquitectes cuya fabricación ha realizado la empresa Compact Habit.”

El principal problema de este tipo de módulos de hormigón es el transporte de este, el cual no es rentable transportarlos más allá de 500 km, además del volumen que ocupan, el cual limita las distintas cargas a transportar, ya que existen distintas dimensiones legales para su transporte.



(Figura 12. Sistemas constructivos modulares con hormigón [Imagen de elaboración propia])

**Ejemplos de viviendas prefabricadas de hormigón:**



(Figura 13. Casa Kyoto)

La Casa Kyoto es un prototipo de vivienda industrializada y sostenible que se construyó en el año 2006. Fue la primera vivienda unifamiliar de hormigón, basada en criterios de edificación sostenible y desarrollada por una industria de prefabricados con el objetivo de tener el mínimo impacto medioambiental. Su envolvente y distribución interior se estudiaron para aprovechar al máximo el calor y la luz natural. Además, cuenta con una cubierta aljibe ajardinada, paneles fotovoltaicos para producción de electricidad y paneles solares para agua caliente.

El prototipo actual tiene 250 m<sup>2</sup>, distribuidos en tres plantas. Su estructura versátil permite posibles readaptaciones y personalización en distribuciones y materiales.

Los componentes de hormigón prefabricados (pilares, jácenas, paneles de fachada y placas en los forjados) permiten un montaje seguro y rápido.

Además, todos los elementos constructivos se ensamblan en obra, lo que ahorra hormigón, energía y reduce residuos.

- Ventajas de la construcción modular con hormigón:

En base al estudio “Estudio comparativo entre distintas metodologías de industrialización de la construcción de viviendas”, se establece que no es necesario incluir ningún tipo de aislante, tanto térmico como acústico, puesto que el propio módulo, actúa como dicho aislante.

Además de ofrecer una protección contra vibraciones, ya que el módulo comprende la parte



correspondiente al forjado y a la solera.

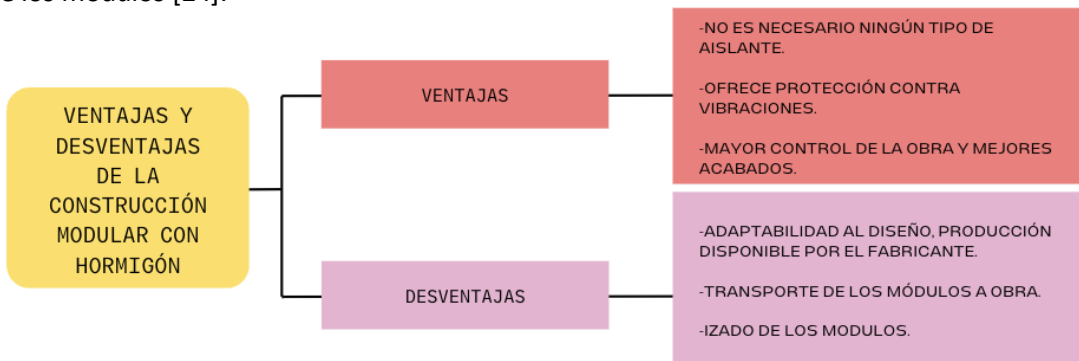
Por otro lado, se ofrece un mayor control de la obra además de garantizar mayor calidad en los acabados y menos ruido al vecindario.

- Inconvenientes de la construcción modular con hormigón:

Como primera desventaja se considera la adaptabilidad de los módulos al diseño, ya que varían en función de la gama de producción de módulos disponible por parte del fabricante. Pudiendo el proveedor realizar alguna adaptación de algún módulo en concreto, para satisfacer al cliente, pero para no registrar pérdidas económicas, el proveedor, debe disponer de una amplia demanda.

Por otro lado, una de las principales desventajas, es el sobrecoste que puede suponer el transporte de los módulos si la ubicación de la obra se realiza demasiado lejos de la fábrica.

Además de las medidas de los módulos, deben ser aptas para el transporte por carretera. Y aun este cumplir con las medidas adecuadas, se ha de corroborar la viabilidad del izado y colocación de los módulos [24].



(Figura 14. Ventajas y desventajas de la construcción modular con hormigón[ Imagen de elaboración propia])

### 2.4.2 CONSTRUCCIÓN MODULAR CON ESTRUCTURA DE MADERA

Este tipo de construcción es uno de los más antiguos de todos, dado la facilidad para darle forma al material y precio asequible, se ha hecho muy atractivo para su construcción en algunas partes del planeta, como es el caso de E.E.U.U. Donde precisamente se popularizó su uso en la aplicación en viviendas unifamiliares.

Al igual que la construcción modular de acero, la madera ofrece grandes ventajas respecto a la construcción tradicionales, tales como los costos de construcción, gracias a la gran velocidad de construcción en obra.



(Figura 15. Vivienda modular con estructura de madera)

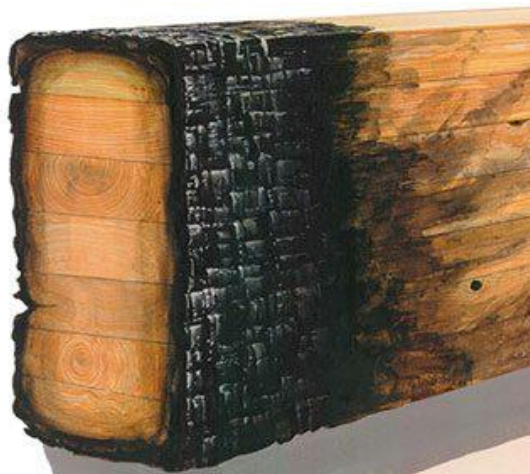
Además este material, puede ir de la mano con el uso de materia prima de forestación, lo cual permite no solo un uso responsable del material, sino que además contribuye al efecto invernadero, puesto que almacena emisiones de carbono en su interior.

También cabe destacar que no produce residuos contaminantes [25].

En los distintos países que se realiza construcción con madera (España incluido), crece anualmente la superficie forestal, de tal modo que se realiza una "Silvicultura" (proceso de plantación responsable y certificado de madera). España es el tercer país detrás de Suecia y Finlandia con mayor superficie de bosque arbolado de todo Europa.

Paralelamente, según datos del organismo del "EFFIS" (Sistema Europeo de Información de Incendios) [26], un 39,39% de los incendios forestales a nivel europeo, se realizaron en España. Es por ello por lo que es necesario realizar una silvicultura preventiva, dada la climatología española, con tal de prevenir posibles incendios.

"La madera es el único material capaz de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, posee una huella de carbono de 230 kg/tonCO<sub>2</sub> inferior al acero y al hormigón"



(Figura 16. Propiedades frente al fuego de la madera) [26]

Por otro lado, la madera es asociada generalmente, a un material altamente inflamable, pero nada más lejos de la realidad se deben conocer que este material, al estar en contacto con el fuego, genera una capa exterior carbonizada que limita la entrada de oxígeno en el interior, además de que, gracias a sus propiedades estructurales, permite garantizar las capacidades interiores del material [26].

Dentro de la construcción modular con madera, podemos distinguir tres grandes grupos:

- SISTEMAS DE ESTRUCTURAS CON ENTRAMADO DE MADERA:

Se conforma mediante módulos de paneles portantes verticales que actúan de cerramiento y horizontales que conforman el forjado. El interior de los paneles es relleno con algún material aislante.

Este tipo de sistemas se basa en el entramado de elementos constructivos de madera (postes, vigas y paneles) para conseguir como resultado paneles resistentes y duraderos.

A la hora de realizar el montaje, tanto los montantes como los travesaños, se ensamblan y se fijan en fábrica, donde se les añade posteriormente las distintas capas de protección como barreras de vapor o aislantes.

Los paneles se fabrican conformando los distintos paneles y techos de los edificios, donde normalmente se utilizan los tableros OSB en sus capas exteriores [7].



(Figura 17. Imagen del entramado de madera de una vivienda)

La ventaja principal de este tipo de paneles es su ligereza, respecto a otros sistemas constructivos como el hormigón o las construcciones de fábrica.

Estos muros entramados, son capaces de combinarse con otros materiales, dando resultado a distintos acabados exteriores. Además, ofrecen una gran flexibilidad en el diseño, debido a que pueden realizarse los distintos módulos a las necesidades de la obra.

En cuanto a sus características, de igual modo que el CLT (Cross laminated Timber) ofrece una gran ventaja como recurso sostenible, ya que la madera genera una menor cantidad de gases de efecto invernadero que otros materiales, es biodegradable y regenerativa.

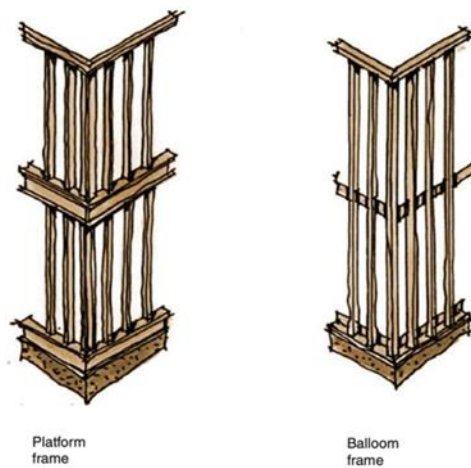
De forma contraria que el CLT, no ofrece una resistencia estructural tan grande, por lo que no se podría realizar obras de gran envergadura como con la madera contra laminada.

Al no considerarse los paneles como macizos ofrece una versatilidad para el paso de las distintas instalaciones.

Como desventajas principales, cabe destacar la limitación en altura debido a su resistencia estructural, además de su resistencia al fuego, humedad y aislamiento acústico. Que, a su vez, garantizan un menor desperdicio del material y un precio más económico en su construcción.

- **BALLOM FRAME:**

Este tipo de sistema constructivo es más antiguo que el conocido sistema de estructura metálica industrializada “Steel Frame”. Se caracteriza por tener una continuidad entre los distintos pisos de la construcción.



(Figura 18. "Platform frame" "Ballom frame")

- PLATFORM FRAME:

Su proceso constructivo se asemeja al "Ballom Frame" con la diferencia de que, en este tipo de construcción, no existe una continuidad entre pisos, puesto que es un módulo que se repite en altura. Este sistema contribuye a la facilidad constructiva, puesto que de lo contrario podría dificultarse el transporte debido a los elementos verticales [25].

El proceso constructivo, se inicia con una cimentación a base de losa de cimentación, Se ubica un zócalo, donde reposan los perfiles de madera, que darán forma a las paredes. Se suele recurrir a la utilización de vigas en "T" para los forjados.

Este proceso es muy similar a los sistemas constructivos metálicos ligeros

En su proceso constructivo, además, cabe destacar dos variantes según su montaje, de una forma modular o con el ensamblaje de piezas.

- Madera contralaminada (CLT):

La madera contra laminada o madera Cross Laminated Timber (CLT), es un tipo de construcción con madera a base de paneles. Este se conforma en base a varias capas de tabloncillos de madera, de forma perpendicular entre las capas, que se unen conjuntamente con adhesivos industriales y posteriormente se someten a un proceso de prensado en caliente, eliminando del mismo modo, el exceso de humedad.



(Figura 19. Madera CLT)

Este tipo de paneles son más resistentes respecto a otros sistemas como el entramado de madera, teniendo una gran resistencia a flexión y a compresión. De igual modo, ofrece una gran estabilidad dimensional, esto es gracias a las variaciones mínimas en sentido perpendicular y casi nulas en el sentido longitudinal.

Es un sistema ecológico y sostenible además de que su construcción requiere menos energía

que otro tipo de sistemas constructivos como el hormigón o el acero, además de que emite menos emisiones de efecto invernadero. Gracias a la innovación en los distintos tratamientos para madera, es capaz de resistir tanto la humedad como el fuego aumentando así su durabilidad.

Mediante este sistema constructivo a base de paneles, se pueden realizar todo tipo de elementos constructivos (muros, losas y techos) tanto portantes como no portantes y con las correspondientes aberturas. Además, la construcción de este sistema constructivo es bastante veloz, limpio y sencillo de ensamblar.

La ligereza del CLT es superior a otros materiales como el acero, o el hormigón lo que además de facilitar su manipulación, reduce considerablemente las dimensiones de la cimentación.

Por otro lado, y debido a las propiedades naturales de la madera, en cuanto a la resistencia al fuego, ofrece tiempos que van desde los 30 minutos, hasta las 4h, debido a que se quema primero las capas superficiales, generando una película que dificulta la combustión de las capas internas. Por otro lado, también ofrece un gran aislamiento tanto acústico como térmico.

Aunque si bien es verdad que este tipo de madera destaca principalmente por la gran cantidad de ventajas que ofrece, sobre todo en un incremento de la resistencia, respecto a otro tipo de sistemas constructivos de madera, su principal desventaja se basa en las dimensiones de los paneles, los cuales pueden dificultar su transporte a la obra, dependiendo de la localización.

- **Ventajas de la construcción modular con madera:**

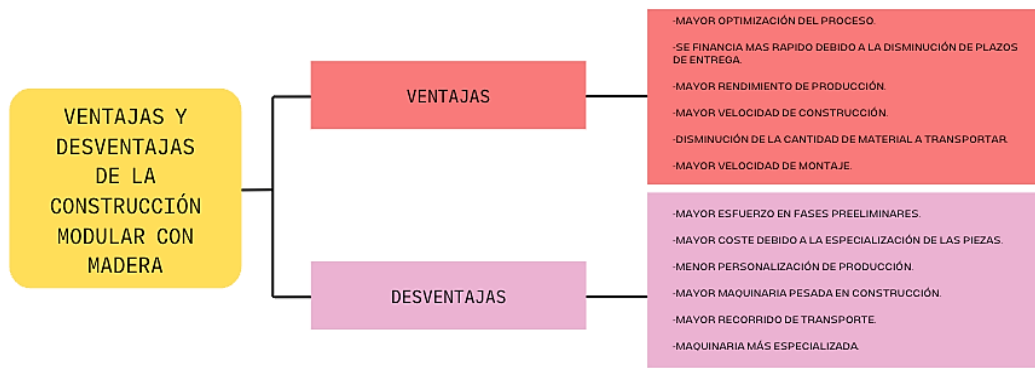
Como ventaja principal, este tipo de sistema constructivo ofrece una gran flexibilidad tanto a la hora de adaptarse al proyecto como al proceso constructivo. Además de:

- **Sostenibilidad:** la madera es un material renovable y biodegradable. Su uso contribuye a la reducción de emisiones de carbono y al aprovechamiento de recursos naturales.
- **Eficiencia energética:** las estructuras de madera ofrecen un buen aislamiento térmico, lo que ayuda a mantener una temperatura agradable en el interior. Además, la madera es un excelente regulador de humedad.
- **Rapidez de montaje:** los módulos prefabricados se ensamblan rápidamente en obra, lo que acelera el proceso de construcción. Esto es especialmente útil en proyectos con plazos ajustados.
- **Flexibilidad y adaptabilidad:** la construcción modular permite diseñar espacios versátiles y personalizables. Puedes ampliar o modificar la vivienda según tus necesidades.
- **Menor impacto ambiental:** la fabricación de módulos en taller reduce los residuos en obra y minimiza la alteración del entorno durante la construcción.

- **Desventajas de la construcción modular con madera:**

Por otro lado, el primer punto negativo de esta metodología constructiva es que a pesar de que aparentemente da la sensación de una mayor sostenibilidad, tiene que ir ligado a una previsión de cultivo para hacer frente a la demanda del material, puesto que es un material natural escaso, es cual no admite reutilización. Además se ha de considerar la lejanía de los puntos de industrialización de madera, respecto a los bosques de procedencia, ya que no se puede considerar un material con nulas emisiones de efecto invernadero.

Otro punto negativo es su resistencia frente al fuego respecto a otros materiales, el cual, ha aumentado en los últimos años, gracia a los tratamientos ignífugos y el uso de maderas laminadas [24].



(Figura 20. Ventajas y desventajas de la construcción modular con madera [Imagen de elaboración propia])

### 2.4.3 CONSTRUCCIÓN MODULAR CON ESTRUCTURA METÁLICA

Este tipo de construcciones son por lo general más resistentes. Realizadas en el taller de forma in situ, ya que se realiza de forma individual, e independiente, conformando una mayor resistencia.

Los materiales son los mismos que cuando se realizan de forma in situ en obra, es por ello por lo que, al no estar expuestos a los factores externos, son capaces de limitar el deterioro, la corrosión y el óxido. Además, este tipo de construcción es más segura para los operarios, ya que los operarios permanecen ajenos al escenario de la obra.



(Figura 21. Estructura metálica modular)



(Figura 22. Vivienda modular con estructura metálica)

#### - STEEL FRAME

El Steel frame es una técnica que se originó en EE. UU, la cual dio lugar a la posibilidad de construir rascacielos. Esta técnica se remonta a la década de 1940, aunque si bien es cierto, la construcción con acero se origina en el siglo XIX. En las últimas décadas, ha tenido un creciente auge, debido a sus ventajas en cuanto a la sostenibilidad, resistencia estructural, eficiencia energética, etc.

Esta técnica es utilizada en multitud de países, la cual utiliza perfiles de acero galvanizado para su construcción. Obtiene numerosas ventajas frente a sistemas tradicionales de construcción como la madera, o el hormigón, ya que el acero es un material más resistente y duro que los anteriores, es más reciclable, se comporta mejor en cuanto a la resistencia al fuego se refiere, también es más económico su mantenimiento, y es más ligero que otros sistemas constructivos. Por otro lado, el sistema constructivo también ofrece numerosas ventajas, ya que es un sistema que ofrece una gran velocidad de ejecución, esto se debe a que son sistemas que se conforman en frío y se atornillan en sus extremos en los perfiles denominados soleras en forma de “U”.

Por otro lado, también podemos encontrar una serie de desventajas, tales como afirman algunos expertos, que critican que aunque inicialmente el costo de este tipo de estructuras se ve bastante incrementado, este, se amortiza con el paso del tiempo, debido a su durabilidad y eficiencia energética. También requiere un mayor conocimiento por parte de los constructores, que en ocasiones puede requerir un aislamiento térmico adicional, debido a su conductividad térmica.

Los principales componentes del Steel frame, son los distintos perfiles de acero galvanizados, perforados, en forma de “C” o de “U” los cuales se unen mediante tornillos, o en su defecto, también se pueden unir mediante: placas base, conectores u otros accesorios [4].

La producción de chapas de acero se realiza en fábricas, mediante una serie de máquinas de bobinas de acero galvanizado de alta eficiencia, de las cuales se obtienen la base para luego crear los perfiles de Steel frame.

Estos perfiles, previenen la oxidación y la corrosión del acero.

El proceso constructivo, se realiza in situ, donde se conectan los distintos perfiles de acero, esto reduce considerablemente los costes de construcción. Una vez conformada la estructura, se procede a añadir los distintos revestimientos, aislamientos y acabados. Además, el acero es un material reciclable, lo que lo convierte en un sistema sostenible de construcción, una vez se pretenda dismantelar la obra.

El Steel Frame, proviene del año 1810 en el marco geográfico de Estados Unidos, donde en base a un aumento demográfico y como consecuencia de viviendas, debido a la conquista del territorio. Para dar solución a dicho problema, se recurrió al “framing” (Método de construcción, basado en la eficiencia y la velocidad del proceso).

Se recurrió a un sistema de módulos de madera, el cual se denominó como “Ballom Framing”. Este sistema constructivo se basa en una serie de listones verticales de la altura del edificio, y unas vigas por cada piso, delimitando las plantas.

Este sistema evolucionó, a lo que hoy se conoce como “Platform Frame”, el cual es exactamente como el sistema Ballom frame, con la diferencia de que los listones verticales, son de cada una de las plantas, generando así, un módulo repetible por cada planta.

En base a este sistema constructivo, y con la presente revolución industrial, surge el “Steel Frame”, el cual los elementos de la estructura pasan a ser enteramente de acero galvanizado.

Una característica principal de este sistema es la relación entre ligereza y resistencia que ofrece, y esto es gracias a la cantidad de subsistemas que interfieren en él.

Dada la eficiencia de este sistema, se consigue reducir el tiempo de obra, el residuo de materiales y en consecuencia, el coste de la misma.

El acero galvanizado del cual está compuesto se trata de una chapa de acero laminado, tanto frío como caliente, al cual se le incluye una capa por ambas caras de zinc fundido, volviéndose,

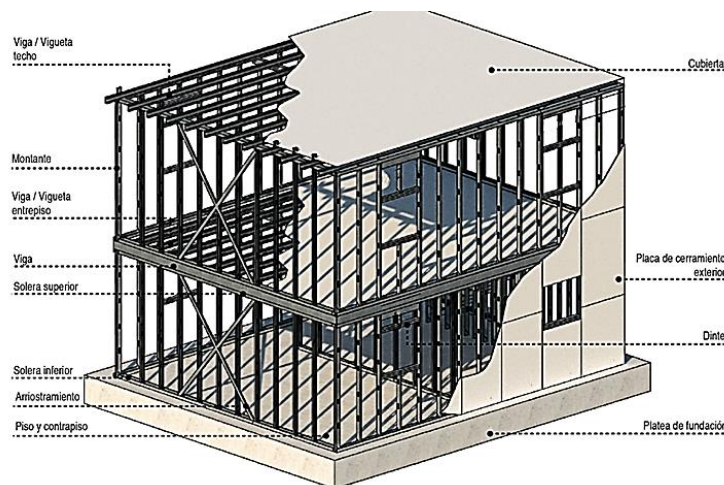
mucho más resistente a la corrosión.

Mediante dicho proceso, se componen los listones de los cuales están conformados la estructura, por lo cual, generalmente, tiene una ausencia de elementos constructivos tradicionales, como vigas y pilares.

Estos elementos y dada la esbeltez que pueden tener, han de ser estudiados para poder garantizar la estabilidad de la estructura, siendo necesario en algunas ocasiones, reforzar las uniones.

En base al artículo publicado en 2020 (Esqueleto de acero) por Daniel Quiroga, se establece una comparativa con el cuerpo humano de cómo funciona una estructura Steel frame:

- Los perfiles de acero galvanizado que conforman la estructura se corresponden con los huesos del cuerpo humano.
- Las fijaciones y flejes de la estructura se corresponden con las articulaciones y tendones.
- Los diafragmas de reagudización se corresponden con los músculos.
- Las diferentes instalaciones, ventilaciones y terminaciones del edificio, se corresponden con la piel y los mecanismos de respiración y transpiración [18].



(Figura 23. Esquema del sistema Steel frame.)

En cuanto a sus elementos podemos distinguir sus secciones, que mediante el proceso comentado anteriormente por el cual se le añade zinc a las secciones de acero conformado, obtenemos los listones que permiten conformar tanto muros como pisos y cubiertas.

Ofrecen una amplia flexibilidad de diseño puesto que son piezas modulares y estandarizadas, Pero para poder lograr un ahorro económico considerable, se deben diseñar los módulos con pocos números de listones, ya que permite un abanico más grande de módulos.

Dos de los perfiles más comunes son los tipos "C" utilizados generalmente para montantes y vigas y los perfiles tipo "U" utilizados para soleras.

- Ventajas de la construcción modular con acero galvanizado:

La ventaja principal de este tipo de sistema constructivo es la facilidad de transporte de los módulos, puesto que se puede realizar el montaje en la propia obra. Además, disminuye el riesgo de caída por parte de los operarios al izar el módulo en la obra. Posee otras ventajas como:

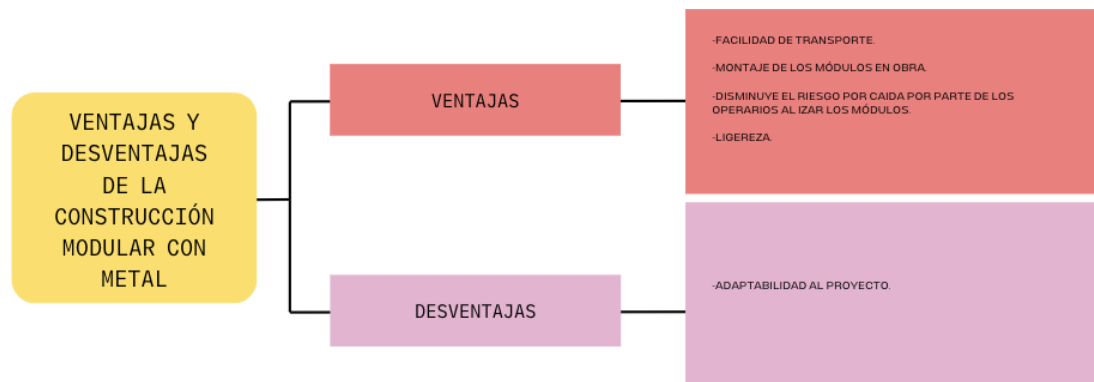
- Resistencia y durabilidad: el acero galvanizado es altamente resistente a la corrosión y al desgaste. Esto lo hace ideal para estructuras que deben soportar cargas pesadas o condiciones climáticas adversas.



- Rapidez de montaje: al igual que en otros métodos de construcción modular, los componentes de acero galvanizado se fabrican en taller y se ensamblan rápidamente en obra. Esto reduce los tiempos de construcción.
- Flexibilidad: el acero galvanizado permite diseñar estructuras versátiles y adaptables. Puedes modificar o ampliar la construcción según tus necesidades.
- Eficiencia energética: aunque el acero no tiene el mismo aislamiento térmico que la madera, se pueden incorporar materiales aislantes para mejorar la eficiencia energética.
- Estética: las estructuras de acero galvanizado pueden tener un aspecto moderno y minimalista, lo que puede ser atractivo en proyectos arquitectónicos.

➤ Desventajas de la construcción modular con acero galvanizado:

Al igual que en el resto de metodologías constructivas modulares, es difícilmente adaptable a todos los proyectos que se pretendan realizar, no obstante, es el más amoldable a las necesidades del proyecto, puesto que en fábrica, se pueden realizar modificaciones en el esqueleto del módulo, siempre y cuando las medidas sean viables para su transporte [24].



(Figura 24. Ventajas y desventajas de la construcción modular con metal [Imagen de elaboración propia])

- CONSTRUCCIÓN MODULAR CON ALUMINIO EXTRUIDO

En base al trabajo de investigación “nZEB Renovation with prefabricated Modular Panels”.

“Actualmente es posible encontrar setenta y nueve componentes certificados en la subcategoría de “sistemas constructivos”. Entre ellos, cincuenta y dos corresponden al tipo “construcción”. De los setenta y nueve sistemas constructivos certificados, ocho se producen en España y han sido certificados para clima templado-cálido. Por un lado, entre los sistemas constructivos españoles, se encuentran dos sistemas constructivos ligeros, a base de madera aplicables en paredes y cubiertas, tres sistemas constructivos ligeros de acero utilizables en muros y tres sistemas constructivos a base de elementos macizos” [21].

De los sistemas constructivos mencionados, el más efectivo es el sistema constructivo modular de aluminio extruido”. De acuerdo con el estudio, se centran en el clima templado-cálido, que es en mayor medida el clima español.

El proyecto que voy a citar en adelante, es desarrollado por la empresa “Proyectopia”, “Es el primer sistema constructivo industrializado metálico ligero para muros y cubiertas producido en España con certificado Passivhaus” [22] (Estándar de sostenibilidad para la construcción de viviendas).

Este tipo de sistema se basa en una serie de paneles de aluminio extruido, aunque es más común

la realización de este sistema estructural mediante módulos de acero conformados en frío. Ambos materiales cumplen como estructura portante, fachada ventilada y colector solar.

Se pueden clasificar en tres grupos según su método constructivo; mediante estructuras de listones, estructuras de paneles y estructuras modulares.

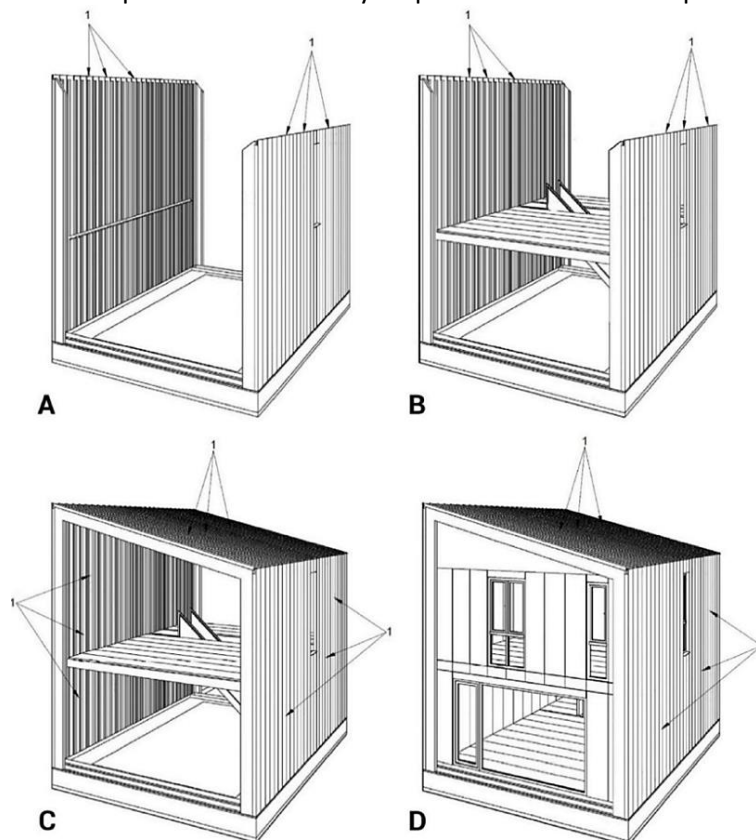
El objeto de estudio se basa en la segunda opción (estructuras con paneles de aluminio extrusionado). Dichos paneles se conforman a base de una capa de aluminio extrusionado, otra de aislamiento y madera, efectivo para edificios de baja altura.

La ventaja de los paneles prefabricados es que ofrecen una mayor ligereza para ser montados, además de en el caso de disponer dichos paneles de forma vertical, cumplen como elemento estructural, además de ser sismorresistentes.

Estos paneles estructurales ofrecen un espesor aproximado de 30cm, conformado desde la cara interior por un acabado final, una barrera de vapor, aislamiento térmico (lana mineral), un tablero de madera prensada que actúa como refuerzo estructural (OSB), una lámina impermeabilizante y la estructura a partir de listones de aluminio extruido que a su vez generan una cámara de aire ventilada.

Por otro lado, las fachadas no estructurales se conforman bajo el mismo principio, a diferencia de que, en vez de incluir los listones de aluminio estructurales, cuentan con una estructura de madera y una subestructura de perfiles de aluminio que sirve de unión con el resto de elementos como muros estructurales y forjado.

Las ventanas, se pueden realizar tanto en fachas estructurales como no estructurales, incluyendo un doble o triple acristalamiento y carpintería con rotura de puente térmico.



(Figura 25. Prototipo modular de aluminio extruido) [21].

Las vigas, realizadas de madera, son fijadas a los muros, mediante perfiles de aluminio. Los perfiles de aluminio extruidos son muy flexibles y versátiles, lo que permite su forma compleja. Se somete a tratamiento térmico para aumentar su resistencia.

El forjado superior, se realiza mediante un acabado interior, un tablero de madera prensada (OSB), y un aislamiento térmico (lana mineral).

El forjado intermedio está conformado por las vigas de madera y un tablero tanto superior como inferior de madera prensada (OSB).

Por último, la cimentación se realiza mediante una losa de hormigón, junto a perfiles prefabricados de polipropileno reciclado, incluyendo a su vez una cámara ventilada.

Bajo el forjado, se incluye una lámina de polietileno de alta densidad, un tablero de madera prensada, una lámina de vapor y una estructura de madera que incluye el aislamiento térmico [21].



(Figura 26. Construcción modular con paneles de aluminio extrusionado [Imagen de elaboración propia])

## 2.5 OTROS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS MODULARES:

### 2.5.1 CONSTRUCCIÓN MODULAR CON IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D, es uno de los métodos de construcción en donde más se ven reducidos los tiempos respecto a los métodos tradicionales, reduciendo los mismos incluso en un 70% del tiempo de producción. Además, es capaz de generar hasta un 60% menos de residuos en el lugar de la obra, donde es habitual según los métodos tradicionales generar numerosos residuos. Es por ello por lo que las distintas empresas pueden ver una reducción de costes de hasta un 80% en mano de obra.

Además, existen menos accidentes laborales con este tipo de materiales de construcción, siendo uno de los más seguros que se pueden encontrar en el mercado.

También ofrece una flexibilidad muy amplia de diseño, pudiendo generar volúmenes complejos de una forma muy asequible [6].



(Figura 27. Vivienda impresa en 3D Eindhoven)

### 2.5.2 CONSTRUCCIÓN MODULAR CON CONTAINERS

Este sistema constructivo, se basa en el reciclaje de elementos como los container marítimos (13 m<sup>2</sup>), para ofrecerles una segunda vida como vivienda.

Por otro lado, también se pueden replicar estos módulos, y aunque no existe una gran variedad de empresas en el mercado que opten por este sistema constructivo, mediante la superposición de estos módulos, se pueden llegar a crear unidades habitacionales de hasta 270 m<sup>2</sup> y dos plantas según su configuración [24].



(Figura 28. London Container City)

## 2.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES:

### 2.6.1 VENTAJAS GENERALES DE LA CONSTRUCCIÓN MODULAR

La construcción mediante módulos es considerada la construcción del futuro.

Esto es debido a la velocidad de montaje, la sencillez, el precio y su aporte a la sostenibilidad que otorga; entre todas ellas podríamos destacar 11 ventajas principales respecto a la construcción convencional.

- Velocidad:

Se reducen considerablemente los tiempos, entre ellos, los tiempos de entregas del material, no suelen llegar al año, además que la fábrica evita un acopio excesivo del mismo.

Por otro lado, el proceso de ejecución se realiza en unos cuantos días.

Aunque ciertamente este tipo de construcción se suele utilizar en viviendas unifamiliares, también podemos encontrar otros ejemplos que se salen de los márgenes como el “Hospital de Wuhan” para enfermos del COVID, que tan solo se tardaron 10 días en su construcción.

- Sencillez de montaje:

Al realizarse todos los módulos en fábrica, el proceso de ejecución se produce en cuestión de días, además de ser solo requerido unos cuantos operarios con experiencia en el sector para ejecutar la construcción.

- **Ubicación:**

Este tipo de módulos se pueden ubicar casi en cualquier parcela, incluso en aquellos lugares de difícil acceso otorgando a este tipo de arquitectura una versatilidad superior respecto a la tradicional.

- **Ahorro económico:**

Si en algo destaca este sistema constructivo, es en su gran ahorro económico, ya no solo por su eficiencia sino por el uso de materiales más económicos que en la construcción tradicional. Además de la facilidad de sustitución de uno de los paneles en caso de deterioro.

- **Versatilidad:**

Como comentábamos en uno de los puntos anteriores destaca este tipo de sistema constructivo por su facilidad de construcción en lugares inhóspitos donde no sería posible mediante construcción convencional. Además, si bien es verdad que su principal uso es en viviendas unifamiliares, se pueden utilizar para multitud de usos, ya sean hospitales, oficinas, pabellones.

- **Personalizables:**

A diferencia de la creencia de muchas personas, este tipo de construcción es ampliamente personalizable. Por ello permite la adecuación del proyecto al cliente casi a medida. Si bien es verdad, este tipo de sistema no garantiza una personalización ilimitada, ya que viene predeterminada por las dimensiones de los módulos.

Por otro lado, permite una mayor adecuación a las necesidades temporales del cliente, pudiendo retirar, ampliar y sustituir módulos de una manera sencilla.

- **Eficiencia energética:**

El poliestireno expandido es el material por excelencia utilizado en este tipo de sistemas, dada la alta eficiencia energética que otorga. Por otro lado, reduce los puentes térmicos dada su eficiencia energética. Además, tiene la misma versatilidad a la hora de utilizar incluir sistemas de ahorro energético como placas solares o térmicas.

- **Precisión:**

A diferencia de la arquitectura convencional, mediante este sistema se pueden realizar muros completamente rectos e incluir ventanas completamente alineadas.

- **Sostenibilidad:**

Este tipo de construcción utiliza materiales 100% reciclables como el poliestireno expandido. A diferencia de la construcción tradicional, la cual se obtiene de la extracción de estos materiales.

## **2.6.2 DESVENTAJAS GENERALES DE LA CONSTRUCCIÓN MODULAR**

- **Coste:**

El costo inicial de este tipo de construcción se ve incrementado, respecto a los sistemas tradicionales. Aunque bien es cierto que ofrece un ahorro en otras partidas, como la mano de obra, los tiempos de construcción, o el costo inicial de las unidades modulares prefabricadas.

- **Diseño:**

Este tipo de construcción ofrece una limitación mayor en cuanto al diseño arquitectónico, comparado con el sistema tradicional, y limitado por la geometría de los módulos, ofrece una menor personalización que otros sistemas constructivos.

- Transporte:

El transporte de dichos módulos, sobre todo en lugares remotos o de difícil acceso, puede encarecer el precio, ya que puede resultar en un desafío.

- Cualificación:

Por otro lado, el requerimiento de personal cualificado también puede encarecer el presupuesto, debido a que este tipo de módulos, aun siendo prefabricados, necesitan de un montaje posterior en obra.

- Normativa:

En cuanto a la regulación, dependiendo del lugar donde se pretenda edificar, puede resultar en permisos específicos para su construcción.

- Producción:

Al ser un producto realizado en fábrica, puede sufrir de retrasos en su producción si el proyecto es modificado o existe algún tipo de escasez de material.

- Falsas creencias:

Por otro lado, y aunque no es una desventaja en sí misma, algunas personas, tienen la concepción de que la construcción modular, tiene una calidad inferior que la construcción tradicional, alejando público potencial a este sistema constructivo.

- Ampliación:

Por último, este tipo de sistema puede no ser compatible con sistemas previos construidos, si se pretende realizar una ampliación del espacio. Este tipo de desventajas varían según los técnicos competentes, la accesibilidad del lugar y la regulación pertinente, así como de la propia intencionalidad del proyecto, es por eso por lo que se debe hacer un estudio previo de la viabilidad de este tipo de sistema.

### 2.6.3 FICHA COMPARATIVA

Tabla comparativa	Ventajas	Desventajas
Construcción modular con Hormigón:	-Aislamiento -Vibraciones -Calidad	-Adaptabilidad al proyecto -Transporte -Dificultad de izado
Construcción modular con Madera:	-Flexibilidad en proyecto	-Sostenibilidad -Resistencia al fuego
Construcción modular con Metal:	-Transporte -Riesgo -Montaje	-Adaptabilidad al proyecto
Construcción modular con 3D:	-Velocidad -Riesgo -Excedente -Adaptabilidad	-Escasez de empresas especializadas.
Construcción modular con Containers:	-Reciclaje	-Escasez de empresas especializadas.

(Figura 29. Tabla comparativa de las construcciones modulares estudiadas [imagen de elaboración propia])

## 2.7 PASSIVHAUS:

### 2.7.1 QUE ES LA CONSTRUCCIÓN PASSIVHAUS

Passivhaus es un estándar de construcción de edificios que se centra en la eficiencia energética, el confort interior y la sostenibilidad ambiental. El concepto se originó en Alemania en la década de 1990 y ha ganado reconocimiento internacional desde entonces.

Los pilares principales de edificios Passivhaus están diseñados y construidos con el objetivo de minimizar el consumo de energía para calefacción y refrigeración, utilizando principios de diseño pasivo, como el aprovechamiento de la energía solar, el aislamiento térmico de alta calidad, la hermeticidad al aire y la ventilación controlada con recuperación de calor.

Características clave:

- Reducción de demanda energética ya que las casas pasivas minimizan la necesidad de energía al máximo.
- Se considera la orientación, uso de materiales naturales y aislamiento térmico.
- Incorporan sistemas que funcionan con energía renovable, como placas solares.
- Se adapta a las necesidades del espacio y a las funciones de la casa.

- Ventilación cruzada y protección ante corrientes de aire para mantener la temperatura estable.



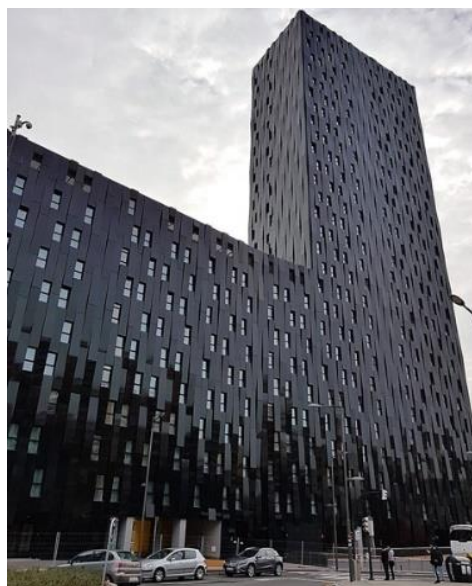
(Figura 30. Los pilares principales del Passivhaus [Imagen de elaboración propia])

Un edificio certificado como Passivhaus debe cumplir con estándares específicos de consumo energético y confort interior, demostrando así su alta eficiencia y su capacidad para mantener condiciones interiores saludables y confortables para los ocupantes.

La contaminación ambiental de las viviendas, suponen un 20% del total. Por ello no se puede culpar únicamente a las industrias ni a los automóviles.

EL sistema passivhaus propone construir con gran aislamiento térmico, control de puentes térmicos, y la máxima calidad del aire interior. Además de aprovechar la propia energía solar para climatizar.

Esto supondría una reducción del consumo en España en un 60 % aproximadamente (sobre las construcciones convencionales). El primer edificio certificado bajo passivhaus, fue en 2009, “Assyce-Ecoholística en Granada”.



(Figura 31. Torre Bolueta)



Además, el primer rascacielos del mundo de 88 metros de altura, con el mismo galardón “la torre bolueta” se encuentra en la ciudad de Bilbao [21].

En los hogares españoles, podemos encontrar distintos tipos de calderas como las de carbón o gasóleo que son muy contaminantes, es por ello que se fomenta desde el gobierno el cambio a otro tipo de calderas más eficientes como las de condensación.

Las bases de este modelo constructivo se inician con la ventilación, permitiendo que fluctúe el aire fresco dentro de la vivienda y la recuperación del calor del aire expulsado.

Por ello es importante tener en cuenta los puentes térmicos, los expertos estiman que el aire filtrado en el interior de la vivienda es equivalente a una ventana de 1 x 1,5 metros.

Por otro lado, es importante el tipo de vidrio utilizado, preferiblemente el uso de un vidrio de triple o doble acristalamiento en su defecto.

La reducción en el consumo respecto a las viviendas tradicionales del passivhaus, es de un 70%, además, ese porcentaje residual, se puede suplir mediante energías renovables, por ejemplo, con placas solares térmicas, encargadas exclusivamente de las necesidades de calefacción y refrigeración [19].

### 2.7.2 SOSTENIBILIDAD

Cada vez se habla más de la conocida como “construcción ecológica” o “eco”. Podemos verlo reflejado en numerosos sectores de nuestra sociedad, alimentación, textil, automovilismo, y como no, en la construcción. Esta nueva moda que aborda nuestra sociedad se debe, en parte, a la consciencia de la limitación de nuestros recursos fósiles. Es por ello que cada vez somos más conscientes del uso de nuestros recursos como el agua.

“La condición de sostenibilidad, desde el punto de vista físico, se define como el cierre de los ciclos materiales, alcanzándose este en un sistema determinado cuando no existen flujos de residuos sino que los recursos se reciclan constantemente” [23].



(Figura 32. Proceso de reciclado de materiales en edificación [Imagen de elaboración propia])

Concretamente la construcción supone el 40% del consumo de energía a nivel mundial, además del 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, es responsable del 50% de todos los materiales extraídos, del 30% del consumo de agua y del 35% del total de los residuos que se generan.

Por todo ello, la construcción es un gran responsable del impacto ambiental que está sufriendo el planeta [20].



(Figura 33. Consumos de la construcción [Imagen de elaboración propia])

La construcción convencional de edificios en el ámbito local, alcanza tal como se determina en esta investigación, una tasa de reciclaje de un 10% de los recursos empleados” [23].

A todo ello se le suma a España el récord mundial con casi el 10% de las infracciones medioambientales mundiales, según datos del BREEAM, con 30 expedientes abiertos en el año 2017.

Además, la Unión Europea, marcó el año 2020 como fecha límite para la nueva normativa de consumo energético casi nulo.

Para ello la construcción modular supone un gran apoyo para conseguir este objetivo, debido a: Que el proceso constructivo se realiza en una fábrica, pudiendo así ahorrar no solo energéticamente sino además en una gran infinidad de recursos.

Al no trabajar in situ, este ahorro se ve reflejado en los excedentes que suponen un gran impacto medioambiental.

Al tratarse de módulos, en caso de necesitar una reforma, no es necesario demoler la obra previa, sino que es capaz de reubicar los módulos posteriormente a la finalización de la misma.

El aislamiento térmico, también juega un papel importante, ya que solemos aislar por encima de lo que marca la normativa, esto nos permite tener un mayor ahorro tanto climático como acústico.

También en este tipo de sistemas de construcción modular, se utilizan sistemas de recuperación de recursos, además de utilizar energías renovables para su fabricación.

Por otro lado, también se utilizan materiales reciclables, sostenibles y no contaminantes, pudiendo así reciclar un 60% del material utilizado.

De acuerdo con las reflexiones de la tesis doctoral [23], se establece que:

“Las viviendas que se construyen de forma tradicional, el cierre de ciclos, podría no superar el 10%, en cambio, si se apuesta por estrategias ambientales definitivas, podría superar el 90%. Y siempre serán viviendas de alquiler o de protección oficial. Termina estas reflexiones personales diciendo que encuentra trascendental el debate sobre las estrategias paliativas y definitivas.”

Frente a la sostenibilidad la madera es el material que menos emisiones emite, esto es debido a que es un material regenerativo, que no se agota, pero si bien es cierto para ello se deben adoptar medidas adecuadas. Su cultivo, beneficia el medio ambiente puesto que la madera absorbe el CO<sub>2</sub> y no vuelve a ser expulsado hasta que se quema dicha madera. Su beneficio frente otro tipo de construcciones es que reduce a la mitad las emisiones de efecto invernadero. Sus residuos se basan en el serrín y virutas de maderas que son biodegradables y no contaminan,

además de que se pueden reciclar múltiples veces.

Por otro lado, permite multitud de opciones sin limitar el diseño. El problema de la construcción con madera es la deforestación, árboles que en algunos casos tardan más de una década en crecer.



(Figura 34. Sostenibilidad de la madera [Imagen de elaboración propia])

Es por ello que existe una técnica de cultivo japonesa llamada “Daisugi”, que se realiza desde el siglo XIV. Es una técnica similar a la poda apical que se utiliza en los bonsáis, que permite talar troncos largos de alta calidad, sin nudos, casi un 50% más flexible y el doble de resistente, sin necesidad de la tala de árboles.

Principalmente se utiliza madera de cedro, realizándole una poda cada 2 años, conservando únicamente las ramas superiores, dando lugar a nuevas ramas. Este método es básicamente hacer crecer arboles a partir de un árbol madre, se pueden llegar a hacer crecer hasta 100 árboles para talar y puede llegar a durar 200-300 años hasta agotarse el recurso. También se trasladó esta técnica a Europa, pero a diferencia de Japón, se realizó con madera de haya y roble.



(Figura 35. Madera de haya de Japón)

### 2.7.3 NORMATIVA REFERENTE A LA SOSTENIBILIDAD

En España, la normativa referente a la sostenibilidad se rige por el Código Técnico de la Edificación (CTE), en donde se establecen los estándares que deben cumplir los edificios en cuanto a calidad de estos se refiere, tales como la eficiencia energética, seguridad, protección frente el medio ambiente etc.

En cuanto a las viviendas unifamiliares, se pueden destacar ciertos apartados como:

- El DB-HE (Documento Básico de Ahorro de Energía). Este documento, marca las pautas referentes a la eficiencia energética, tales como las instalaciones de climatización y refrigeración, ventilación, energías renovables, la envolvente térmica etc.
- El BD-HS (Documento básico de Salubridad). Este documento, se centra en las condiciones de salubridad de los usuarios, tales como la ventilación.
- El DB-HR (Documento Básico de Protección frente al Ruido) [39], donde se rige la normativa promoviendo espacios acústicos saludables y dictaminando la protección

contra el ruido necesaria.

- El Documento Básico DB-PRL-RCD (Gestión de Residuos) [37], donde se recogen los diferentes aspectos relacionados con el tratamiento de sobrantes en la construcción y demolición de edificios, tales como la posterior gestión de estos.

Además en España, se recogen distintas acreditaciones referentes a la eficiencia energética de las viviendas, como los sellos de eficiencia energética (A,B,C,D,E), las certificaciones LEED, y el estándar Passivhaus. Además de la normativa anterior, se ha de tener en cuenta otro tipo de normativas locales, que sean de obligado cumplimiento, para garantizar el estándar de eficiencia energética.

#### **2.7.4 PRINCIPIOS NZEB**

“Se espera que la reducción del consumo energético de los edificios se consiga en parte cumpliendo varios requisitos de la política de edificios de *consumo energético bajo o casi nulo* (nZEB). La mejora de la eficiencia energética de los edificios ofrece un enorme potencial de ahorro energético, ya que la sustitución anual del parque existente es sólo del 1-2%” [25].

Este tipo de políticas nZEB requieren una serie de consideraciones importantes, mediante las cuales se podrá garantizar los estándares de consumo energético, entre ellos se encuentran:

- **EFICIENCIA ENERGÉTICA:** Los edificios que hayan sido renovados, deberán cumplir con una alta eficiencia en el uso de la energía para las distintas instalaciones (calefacción, refrigeración, iluminación, etc.)
- **AISLAMIENTO TÉRMICO:** Para garantizar este aspecto, los distintos módulos, deberán cumplir con un excelente aislamiento que cumpla no solo las pérdidas caloríficas en invierno y las ganancias en verano, sino además, la hermeticidad de los sellados entre los distintos módulos.

Para ello, algunos materiales comunes son la lana mineral, la espuma de poliuretano o celulosa tratada. Estos materiales deben obtener una alta resistencia térmica, conocida como (R-value). Además estos distintos aislamientos, deben considerar un espesor adecuado, que variará según la zona geográfica en la que se ubique.

Por otro lado, el aislamiento debe ser continuo, sin interrupciones debido a encuentros de materiales o elementos estructurales, así como evitar los puentes térmicos.

El sellado también ha de ser efectivo en todas las juntas y uniones, así como evitar fugas de aire y utilizar selladoras o cintas que garanticen unos estándares de calidad.

También se debe hacer énfasis en los cerramientos como las ventanas, las cuales son puntos críticos en cuanto a pérdidas caloríficas se refieren. Una buena opción son las ventanas de triple acristalamiento con cámaras de aire o argón y marcos de baja emisividad.

Finalmente para garantizar la efectividad de los distintos aspectos mencionados, se procederá a realizar pruebas de estanqueidad, como el “Blower door test” donde se puedan detectar fugas de aire.

- **ESTANQUEIDAD DEL AIRE:**

El sellado entre los distintos módulos, es crucial para garantizar las fugas de aire del edificio, que, a su vez, contribuyen a la eficiencia energética del mismo. Para ello se debe realizar un sellado de las juntas minucioso, de todos los aspectos que comprometan la estanqueidad del aire, como: puertas, ventanas, tuberías, cables, y uniones entre los distintos materiales. Además

este tipo de sellados, son elementos sensibles que necesitan de un correcto mantenimiento.

- **VENTILACIÓN CONTROLADA:**

Una buena solución para evitar las pérdidas de calor, son los recuperadores de calor, ya que este tipo de edificios tiene una hermeticidad bastante elevada, lo que les obliga a tener un sistema de ventilación controlado. Pudiendo ser utilizado algún sistema de ventilación mecánico.

Entre ellos podemos encontrar diversos tipos como la ventilación mecánica controlada con recuperación de calor (VMC), este tipo de sistemas, extraen el aire viciado, de las áreas húmedas, y los intercambia por aire del exterior, utilizando un sistema de intercambio de calor en el proceso. Por otro lado el sistema (VDF) aplica el mismo principio pero con una doble recuperación de calor.

Además podemos encontrar sistemas algo más convencionales que los anteriores como la ventilación natural controlada, la cual aprovecha la circulación natural del aire pero modifica su dirección o cantidad en función de la necesidad.

- **SISTEMAS DE ENERGÍA RENOVABLE:**

Para llegar a cumplir los requisitos de energía casi nula, será preciso la incorporación en el proyecto de distintos sistemas captadores de energía, tales como paneles de captación solar/térmica.

Se puede optar por distintos métodos según cual sea la finalidad, los paneles fotovoltaicos, son capaces de generar electricidad a partir de la captación de luz solar.

Por otro lado si nuestra intención es generar calor, tenemos distintos sistemas como los colectores solares térmicos, bombas de calor geotérmica, bombas de calor aire-aire o aire-agua y sistemas de biomasa.

- **MONITOREO Y CONTROL:**

Para garantizar y controlar el cumplimiento de los distintos aspectos energéticos, se deben incluir sistemas de monitoreos automáticos que sean capaces de medir la captación y el consumo energético del edificio, de forma individual y colectiva, además de sistemas que sean capaces de regular automáticamente, distintos aspectos como la iluminación o la temperatura de este.

Así como la posibilidad de incluir sistemas de gestión energética que sean capaces de analizar la información respecto al consumo y la producción de dicha energía.

El monitoreo remoto, también puede ser una solución acertada a la hora de controlar la edificación ya que permite al usuario, recibir alertas en base a las anomalías climáticas que se produzcan, y la toma de decisiones acertadas. También cabe destacar la educación del ocupante respecto a las prácticas eficientes respecto al uso energético del edificio, pudiendo mantener el confort mientras se minimiza el consumo energético. Un buen aliado en este caso es el uso de termostatos programables.

- **DURABILIDAD Y MANTENIMIENTO:**

Los materiales deben ser de la mayor calidad para poder garantizar su durabilidad, así como los sistemas constructivos, que reduzcan su mantenimiento.

- **CONSIDERACIONES DE DISEÑO:**

Así como el resto de aspectos, también es importante tener en cuenta la ubicación y geometría del edificio para poder facilitar posteriormente la correcta ejecución del resto de aspectos.

- **NORMATIVA:**

Sobre el resto de aspectos anteriores, se tendrán en cuenta los aspectos respecto a la normativa

local o nacional que verifique el cumplimiento del edificio.



(Figura 35. Principios nZeb [Imagen de elaboración propia])

## 2.8 SOLUCIONES PARALELAS:

### 2.8.1. COOPERATIVAS DE VIVIENDAS

Las cooperativas de viviendas se conforman por un grupo de personas, que tienen como objetivo común acceder a una vivienda, al mejor precio posible, sin sacrificar las calidades constructivas. Esto es posible ya que los propios socios de la cooperativa son a su vez los promotores de las viviendas, ahorrándose así el beneficio del promotor.

Este tipo de cooperativas son sin ánimo de lucro, pero deben registrarse por la legislación de la comunidad autónoma donde se desarrollen. Concretamente en España, se rige por la ley 27/1999, donde se establecen las obligaciones y derechos de los socios [15].

También podemos encontrar el modelo de las Cooperativas en cesión de uso, las cuales se empezaron a desarrollar en España entorno al año 2011. Un modelo desarrollado principalmente en países del norte de Europa y Canadá.

Las principales diferencias respecto a las cooperativas tradicionales (de propiedad privada), es que las viviendas únicamente se puede transmitir el derecho de uso, pero nunca se podrán vender o alquilar.

Se debería depositar una cuantía económica inicial, con el fin de suplir los problemas del edificio en caso de ser necesario como una reforma.

Por otro lado, se debería abonar recurrentemente un importe para cubrir los servicios básicos como el agua y la luz, esto dependerá de cada promoción pues estas pueden contar con áreas comunes como zonas de lavado, salas de ocio etc [8].

En el caso de Chile, este tipo de cooperativas han jugado un papel importante en el desarrollo inmobiliario, estableciendo un sistema de subsidios habitacionales, que se ajusta a la normativa arquitectónica y urbanística, donde se suele abocar por el ahorro del desembolso inicial, además del crédito hipotecario.

Las bases de las decisiones han de ser democráticas, priorizando el fin común por encima del capital. Este tipo de actuación se lleva a cabo mediante una asamblea general de socios, que toman activamente sus decisiones mediante acuerdos por votación.

Este tipo de construcción obliga a realizar un desembolso previo entorno a un 20%-30% del coste de la obra total, admitiendo una variación entorno al 2%. Tampoco se podrá recuperar el dinero invertido en gastos de la cooperativa, pero si se permitirá abandonar la cooperativa.

A nivel fiscal en España, surgen ciertos beneficios entorno a este método cooperativo, las cantidades invertidas por los socios son desgravables en su declaración anual de la renta. Además, algunos actos jurídicos, no necesitan del pago a Hacienda, puesto que están exentos. Además, este tipo de construcción es famoso por sus beneficios económicos. Principalmente obtienen numerosos beneficios de los bancos para su financiación, reduciendo la aportación económica inicial. Paralelamente el precio se ve muy reducido pues se elimina la comisión de las promotoras, la cual pasa a ser la propia cooperativa, siendo el importe para pagar, el propio desarrollo de la promoción.

Además, se ven beneficiadas por la adecuación de los pagos de los distintos socios de la promoción, permitiendo una mayor flexibilidad en el desarrollo y precio de las viviendas [16].

Un gran ejemplo de este tipo de cooperativas en España, es “Lacol” (LA COMUNAL ESPAI COOPERATIU) , ubicada en la ciudad de Barcelona, es un claro ejemplo de cómo se pueden realizar viviendas asequibles, mediante la participación y la vida sostenible. Compuesto por 13 socios y colaborando con numerosos técnicos y profesionales, dan resultado a proyectos como:



(Figura 36 Sotrac Habitatge cooperatiu) [38]

Sotrac Cooperativa de Vivienda es una cooperativa que se dedica a la construcción de viviendas cooperativas. Es una cooperativa de vivienda ubicada en Cataluña, España. Forma parte del movimiento de vivienda cooperativa en cesión de uso, un modelo alternativo de acceso a la vivienda que se ha ido extendiendo en los últimos años en diversas regiones, especialmente en Cataluña.

Su proyecto se basa en el edificio que albergará a los miembros de la cooperativa, con 38 viviendas que se distribuirán entre 40 y 80 m<sup>2</sup>. Esta iniciativa es una evolución de los proyectos cooperativos iniciados en los últimos años en todo el país.

En lugar de comprar o alquilar una vivienda de forma tradicional, los miembros de la cooperativa adquieren el derecho a utilizar una vivienda por un período de tiempo prolongado. La propiedad del inmueble sigue siendo de la cooperativa.



(Figura 37. La morada Habitatge cooperatiu)

### 3 PROPUESTA: LA MADERA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

La madera obtiene múltiples ventajas frente a otros materiales como el hormigón o el acero. Esto es debido en parte a su ligereza, la cual es 16 veces más ligera que el acero y 5 veces más ligera que el hormigón. Implicando que las fuerzas laterales que se generan en base a la acción sísmica, sean inferiores.

Por otro lado, su rigidez longitudinal, es 20 veces inferior al acero y la mitad que el hormigón. No obstante, su rigidez específica es similar a la del acero y el doble que el hormigón, es por ello que las construcciones con madera acostumbran a ser más flexibles en comparativa al hormigón y el acero.

Si analizamos en profundidad este material, se observa como el coeficiente de difusión de humedad es ampliamente superior al del hormigón. Además de ser un material capaz de soltar humedad si el ambiente es muy seco y por el caso contrario absorberlo. Esta capacidad de retener y soltar humedad influye en su capacidad mecánica, además de poder proliferar hongos en la misma.

Por otro lado, la madera es buen competitivo económico del acero y el hormigón, los tablonés de madera aserrada cuestan entorno a un 30% más que el costo del hormigón, al cual se le debería sumar el costo de los armados. Por otro lado, se reduce aproximadamente la mitad el coste por kilogramo si lo comparamos con el acero. Dentro de los distintos tipos de productos de madera para edificación que podemos encontrar, destacan el CLT Y EL GLT:

- GLT (Glued Laminated Timber): este tipo de madera se compone de listones de maderas encolados entre si mediante adhesivos en una misma dirección, donde posteriormente se someten a presión, este proceso puede perdurar entre 2 días y una semana. Como



resultado podemos obtener distintas clases resistentes que se utilizan tanto como elementos horizontales (vigas), como elementos verticales (pilares).



(Figura 38. Glue laminated timber)

- CLT (Cross laminated Timber) El proceso de creación de estos paneles es similar al del GLT, con la diferencia que se someten los listones encolados en ambas direcciones, generando una capa perpendicular a la anterior, el número de capas ha de ser impar (3,5,7).



(Figura 39. Imagen de madera clt)

Del mismo modo que el GLT se pueden disponer como sistemas constructivos horizontales o verticales, pero estos paneles de tamaño mayor que el GLT, no actúan como pilares o vigas, sino como muros o forjados. Del mismo modo, dado su tamaño, se necesita de una prensa de dimensiones mayores para realizar el conformado en frío, el cual tiene una duración de 2 horas. En ambos casos, el tipo de madera utilizada es el mismo, maderas blancas.

En el estudio comparativo que se realiza en el artículo publicado por "María Gasga Alonso" por parte de la universidad Politécnica de Madrid, se establece que:

Tras analizar los comportamientos de dichos materiales frente a compresión en columnas de GLT y CLT, utilizando los mismos materiales (Madera de cicuta y adhesivo PUR):

Inicialmente, las muestras de GLT tuvieron modos de rotura simples, frente a los modos de rotura del CLT, los cuales fueron más complejos.

La resistencia a compresión de la madera GLT fue superior que la del CLT, pero, por otro lado, el CLT, presentó una mejora tanto en la ductilidad, como en la absorción de la energía, esto presenta una mejora en las conexiones de los elementos verticales de la madera CLT.

Por último, la longitud de las muestras no tuvo un efecto significativo [28].

Otro tipo de madera que podemos encontrar es el conocido como GLULAM (Glue laminated timber). Este tipo de madera surgió a finales del siglo XIX, fabricado con distintos tipos de coníferas como abetos, pinos, cedros o alerces.



(Figura 40. Imagen de madera glulam)

La fabricación de este tipo de madera laminada, se crea a partir de encolar con adhesivos industriales, las distintas piezas que forman el listón.

Se puede llegar a conformar tanto pilares como vigas y cerchas.

Se debe tener en cuenta la colocación de las vigas de glulam, deben ir de forma perpendicular a la cara larga de las láminas.

Otro tipo de variedades de madera es el conocido como NLT, el cual, a diferencia de los anteriores, no se unen los listones encolándolos, sino a base de clavos.



(Figura 41. Imagen de madera NLT)

Los tipos de maderas más utilizadas son los abetos Douglas y el SPF. Este tipo de paneles, acostumbran a utilizarse en paneles de muros, techos, y pisos. Aunque también se pueden utilizar para huecos.

#### Proyectos con madera CLT:

El proyecto de la capilla de paja de Tallín, construido en la capital de Letonia, se basa en la construcción de una capilla conformada por fardos de paja y arcos de madera CLT [29].



(Figura 42. Capilla de Paja, Tallín)[41]

La piscina de Freeman, es un ejemplo de la adaptabilidad de la madera a las distintas condiciones climáticas como la humedad. Su ubicación se encuentra en el antiguo emplazamiento de un

edificio destruido debido a un incendio. Es por ello que aunque la madera contralaminada CLT, es altamente inflamable, obtiene una resistencia al fuego de REI 90, ello mantiene durante 90 minutos la capacidad de carga suficiente del edificio [29].



(Figura 43. Piscina de la escuela Freeman) [42]

El proyecto “the smile” realizado por Alison Brooks Architects, se trata de una estructura de tulipas laminadas en el emplazamiento del Colegio de Arte de Chelsea Rootstein Hopkins Parade. Su construcción se basa en una viga curvada en ambos extremos [29].



(Figura 44. Edificio The smile)[43]

The voxel, es un proyecto que surge desde el confinamiento, por parte de los estudiantes del Master en edificios Ecológicos Avanzados y Biocidades (MAEBB) del instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC). Dicho proyecto, surge como respuesta a la crisis sanitaria mundial del año 2019 [29].



(Figura 45. The voxel)[44]

El Centro Saura Kulturhus, inaugurado en el año 2016, se convirtió en uno de los más altos del mundo contando con 20 plantas. Ubicado en Suecia, se obtuvo la madera de los bosques boreales regionales. Además se apoya en sistemas passivhaus, lo cual contribuye a reducir la huella de carbono [29].



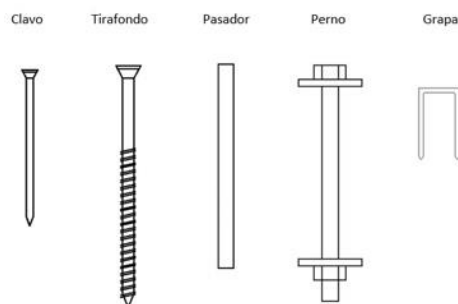
(Figura 46. Centro Sara Kulturhus)[45]

### 3.2 UNIONES CON MADERA LAMINADA

Dentro de los distintos tipos de uniones para madera, podemos distinguir entre uniones mecánicas y uniones mediante herraje.

#### 3.2.1 UNIONES MECÁNICAS

Este tipo de uniones, funcionan ejerciendo un esfuerzo de aplastamiento contra las distintas piezas de madera, se puede realizar una subdivisión entre las “clavijas” donde existe un herraje que atraviesa la pieza de madera y las denominadas uniones de superficie, mediante las cuales se produce un esfuerzo de aplastamiento de las piezas, esto conlleva que se pueda ejercer una mayor carga sobre las piezas [30].

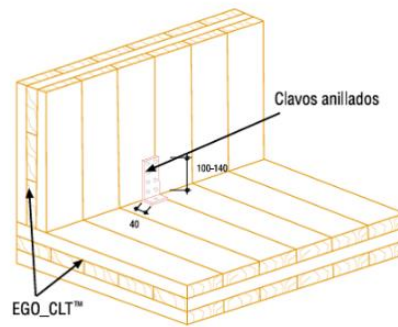


(Figura 47. Tipos de uniones)

#### UNIONES TIPO CLAVIJA

##### - CLAVOS

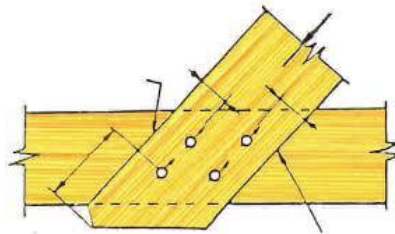
Es el tipo de unión más sencillo, por lo general, se utilizan para elementos de pequeñas dimensiones, o para fijar los herrajes. Dependiendo del uso que se le vaya a destinar al clavo, variarán sus características [30].



(Figura 48. Uniones con clavos)

- PERNOS

Este tipo de uniones, sirven tanto para fijar secciones de madera, como para fijar herrajes. Se debe garantizar su protección frente a la corrosión, para ello, lo mas efectivo es el galvanizado en caliente [30].



(Figura 49. Uniones mediante pernos)

- PASADORES

Los pasadores se acostumbran a realizar en listones de madera laminada, a la cual se le realiza un orificio inferior en diámetro al del pasador, para que a la hora de introducirlo, quede lo más ajustado posible en donde los dos extremos, quedan totalmente biselados.

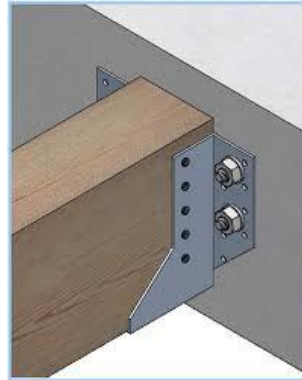


(Figura 50. Uniones con pasadores)

UNIONES MECÁNICAS DE SUPERFICIE

- CONECTORES

Este tipo de unión se produce mediante el aplastamiento del soporte metálico con la madera, en donde se introduce un pasador entre las dos maderas, para evitar los desplazamientos. Podemos encontrar: Conectores de anillo o dentados [30].



(Figura 51. Uniones mediante conectores)

- CONECTORES DE ANILLO

Lo que se busca con este tipo de conectores, es evitar los desplazamientos laterales, es por ello que se realiza introduciendo un aro metálico en ambas piezas de madera.

- CONECTORES DENTADOS

Son aquellos que, a diferencia de los conectores de anillo, si que contribuyen a la resistencia a cortante de la unión. Su ensamblado, se realiza en taller mediante unas prensas hidráulicas, las cuales se introducen a presión en las piezas, fijando la unión. Puede ser de diversa morfología, aunque lo más es común son las piezas redondas.

- PLACAS DENTADAS

Su uso más común es en cerchas de madera, también se utiliza en piezas de madera de la misma sección. Se trata de una serie de placas de morfología rectangular, a las que en fábrica se les extruye una serie de dientes perpendiculares.



(Figura 52. Uniones mediante placas dentadas)

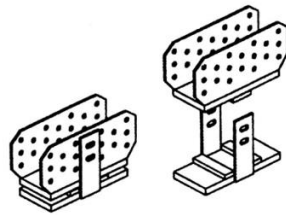
### 3.2.2 UNIONES MEDIANTE HERRAJES

Este tipo de unión, es una evolución de las uniones tipo clavija, las cuales son capaces de soportar una carga superior. Esto quiere decir que el aplastamiento de la madera es menor.

- HERRAJES SINGULARES

Este tipo de uniones, ofrecen una gran flexibilidad, pero se han de tener en cuenta distintas especificaciones a la hora de usar estos conectores.

Se deberá evitar fijar el herraje a lo ancho de toda la pieza favoreciendo los cambios dimensionales de la madera. La pieza deberá evitar trabajar en tracción perpendicular a la fibra. Debe existir una holgura entre el herraje y la madera. Tanto la madera como los herrajes, deben estar protegidos de la exposición a la humedad [30].



(Figura 53. Herrajes singulares)

#### - HERRAJES ESTÁNDAR

Son los mas utilizados, eficaces y económicos que se suelen utilizar. Se puede considerar que en determinadas situaciones este tipo de herrajes pueden sustituir a las soluciones clásicas, ya que ofrece varias ventajas como que el coste de la mano de obra es menor, o que dado que estos herrajes se someten distintas pruebas de resistencia, se conocen sus capacidades mecánicas [30].



(Figura 54. Herrajes estándar)

La propuesta se compone de 4 módulos de viviendas, donde se busca la necesidad de uso de distintos módulos para poder abordar una colección lo más completa posible. En su primer módulo (Vivienda tipo 1) se plantea la necesidad de distintos módulos de fachada planos y de esquina, además de la tabiquería correspondiente y el uso de módulo de forjado.

Por otro lado, se presentará la necesidad inminente de uso de módulos de instalaciones y de ventanas en todos y cada uno de los módulos.

Los siguientes módulos tipo (vivienda tipo 2,3 y 4) se plantean en su versión más básica, atendiendo a las necesidades diferenciadoras de la vivienda tipo 1, es por ello por lo que se plantean módulos de vivienda con cierta angulación poco común. Buscando la complejidad de los módulos y el otorgar abastecimiento de todas las necesidades.

A continuación, se presenta la colección completa de módulos propuesta, Se proponen distintos tipos de módulos de fachada en función de su altura y anchura, además de distintos módulos de ventana, tabiquería y algunos módulos obligatorios como el de instalaciones.

Por último, se plantea una tabla gráfica a modo de apoyo visual, donde se pueda identificar rápidamente el uso (o no de los módulos en cada una de las tipologías de vivienda.

### 3.3 TIPOS DE MADERA

En España existe una superficie forestal que cubre aproximadamente la mitad de la superficie del país. No obstante, el porcentaje que supone a la economía española, este tipo de labor, es extremadamente baja (2%).

Existen numerosos tipos de masas forestales, según la climatología (fría, templada o cálida). En el primer caso, destacan los abetos y pinos silvestres, en el segundo, las hayas y los robles y en el tercero podemos encontrar, encinas, pinos piñoneros y pinos carrascos.

Si se divide según su propiedad, las distintas masas forestales del país, se concluye que el 65% pertenece a propietarios de orden privado, el 31% a entidades públicas y el 4% al estado y comunidades autónomas.

Según los criterios de sostenibilidad de nuestro país, únicamente se corta menos de la madera que crece, evitando así la deforestación. De igual modo, el 75% de la oferta de la madera en España, proviene de la cornisa cantábrica, la cual supone un 20% de la oferta total de madera española. Esto se debe en gran medida al número de plantaciones de crecimiento rápido que existen en esta comunidad.

Para poder hacer frente a las necesidades de madera estructural, debimos importar casi el 50% de la madera que se utilizó en el año 2002, siendo en su mayoría, maderas coníferas y frondosas [31].

Actualmente la madera laminada es el tipo de madera que mayor uso estructural obtiene, donde podemos clasificarlos como dúos o tríos que garantizan los estándares españoles, además de ofrecer cualidades similares a la madera aserrada, pero con mayores garantías de industrialización. Este tipo de madera contra laminada ofrece una amplia garantía de posibilidades desde hace escasos años.

Algunos tipos de maderas como el pino radiata del País Vasco, o el eucalipto rojo de Galicia o el pino Piñonero de Andalucía, se pretenden reencaminar su utilización.

Recientemente se han estado realizando experimentos con este tipo de madera para uso estructural, donde se ha buscado la manera de poder realizar madera contra laminada con este tipo de origen.

En cuanto a los tableros, también se ha pretendido realizar distintos derivados, donde se pusieron a prueba sus propiedades mecánicas.

Cabe destacar un producto español, basado en tecnología de virutas fabricado con madera de chopo, obteniendo unas buenas prestaciones mecánicas para su utilización en clase de servicio 1 y 2.

Los paneles sándwich, en general y en el caso de España, los fabricamos con productos derivados de la madera, se han visto frecuentemente afectados por los marcadores del CE, se trata de un producto muy extendido y con múltiples variantes.

Por lo general la madera aserrada en nuestro país, ofrece una calidad media, no obstante, cabe destacar el pino laricio, el cual es capaz de alcanzar las resistencias más altas en cuanto a la madera se refiere de toda Europa [31].



(Figura 55. Pino Laricio)



Los tipos de clasificaciones de la madera, se basan en distintos elementos como cantidad de nudos, fendas, gemas, anillos, etc.

Según su *capacidad resistente*, las maderas se pueden dividir de diversas formas según el país donde se encuentren.

La madera al ser un producto natural, y que puede variar en función de la especie y sus condiciones, es necesario realizar un proceso de homologación. Que asegure y garantice sus propiedades.

Para garantizar estas cualidades resistentes, será necesario realizar ciertas pruebas tanto de compresión como de flexión y densidad de la misma.

Por otro lado, según el anejo “C” del código estructural de la madera, se establecen la siguiente clasificación, según los distintos tipos de madera y normativa, entre los cuales se encuentra la madera de pino laricio [32].

**Tabla C.1. Asignación de clase resistente para diferentes especies arbóreas y procedencias según normas de clasificación.**

Norma	Especie (Procedencia)	Clase resistente									
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	D35	D40
UNE 56544:2011	Pino silvestre (España)	-	-	ME-2	MEG	-	ME-1	-	-	-	-
	Pino pinaster (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	
	Pino insignis (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	
	Pino laricio (España)	-	-	ME-2	MEG	-	ME-1	-	-	-	
NF B 52.001-4	Abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	
	Falso abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	
	Pino oregón (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	-	-	-	
	Pino pinaster (Francia)	-	-	ST-III	-	ST-II	-	-	-	-	
DIN 4074	Abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	
	Falso abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	
	Pino silvestre (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	
INSTA 142	Abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	
	Falso abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	
	Pino silvestre (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	
BS 4978	Abeto (Reino Unido)	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	
	Pino silvestre (Reino Unido)	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	
BS 5756	Iroko (África)	-	-	-	-	-	-	-	-	HS	
	Jarra (Australia)	-	-	-	-	-	-	-	-	HS	
	Teca (África y Asia SE)	-	-	-	-	-	-	-	-	HS	

(Figura 56. Tabla anejo C.1. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)

En dicha madera se establecen las clases resistentes para la madera de pino laricio C18-ME-2 y C22-MEG [32].

**Tabla C.3. Especies arbóreas, citadas en la Tabla C.1.**

Especie arbórea	Nombre botánico	Procedencia
Abeto	<i>Abies alba</i> . Mill.	Austria
		Europa:C,N,E y NE
		Francia
		Holanda
		Reino Unido
Chopo	<i>Populus sp.</i>	España
Falso abeto	<i>Picea abies</i> Karst.	Francia
		Europa:C,N,E y NE
Iroko	<i>Milicia excelsa y regia</i>	África
Jarra	<i>Eucalyptus marginata</i> sm.	Australia
Pino insignis	<i>Pinus radiata</i> D. Don.	España
Pino laricio	<i>Pinus nigra</i> Arnold.	España
Pino Oregón	<i>Pseudotsuga menziesii</i> Fr.	Canadá
		EE.UU
		Francia
Pino pinaster	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	España
		Francia
Pino silvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Austria
		España
		Europa:C,N,E y NE
		Holanda
		Reino Unido
Teca	<i>Tectona grandis</i> L.	África
		Asia SE

(Figura 57. Tabla anejo C.3. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)

El pino laricio, también es conocido como “Pinus nigra Arnold” [32].

**Tabla D.2 Correspondencias conocidas entre Clases Resistentes de madera laminada encolada y de madera aserrada**

Madera laminada encolada homogénea	Clases resistentes		
	GL24h	GL28h	GL32h
- Todas las láminas	C24	C30	C40
Madera laminada encolada combinada	GL24c	GL28c	GL32c
- Láminas externas <sup>(1)</sup>	C24	C30	C40
- Láminas internas	C18	C24	C30

(1) Los requisitos se aplican al sexto del canto extremo de cada lado con un mínimo de 2 láminas.

(Figura 58. Tabla anejo D.2. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)

Según la tabla “D2” del anejo “D” del código estructural de la madera, se establece que la clase resistente equivalente para maderas con clase “C18”, equivale a la clase “GL24c”.

**Tabla E.4 Madera laminada encolada combinada.**  
**Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente**

Propiedades		Clase Resistente			
		GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
<b>Resistencia (característica), en N/mm<sup>2</sup></b>					
- Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
- Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
- Tracción perpendicular.	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
- Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26,5	29
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7	3,0	3,3
- Cortante	$f_{v,g,k}$	2,2	2,7	3,2	3,8
<b>Rigidez, en kN/mm<sup>2</sup></b>					
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	11,6	12,6	13,7	14,7
- Módulo de elasticidad paralelo 5 <sup>o</sup> -percentil	$E_{0,g,k}$	9,4	10,2	11,1	11,9
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	0,32	0,39	0,42	0,46
- Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	0,59	0,72	0,78	0,85
<b>Densidad, en kg/m<sup>3</sup></b>					
- Densidad característica	$\rho_{a,k}$	350	380	410	430

(Figura 59. Tabla Anexo E.4. Documento Básico de seguridad estructural de la madera. DB SE-M)

En la tabla “E.4” del anejo “E” del código estructural de la madera, se obtienen los valores para las resistencias de la clase resistente de madera encolada combinada GL24c [32].

### 3.4 PROPUESTA

En base a las conclusiones obtenidas, así como a los criterios de selección (ahorro económico, facilidad de montaje, sostenibilidad, ahorro en los tiempos de producción etc.) se plantea la construcción modular de paneles de CLT del proyecto “Pabellón”. Así como la comprobación de cálculo de la viga y el pilar mas desfavorable.

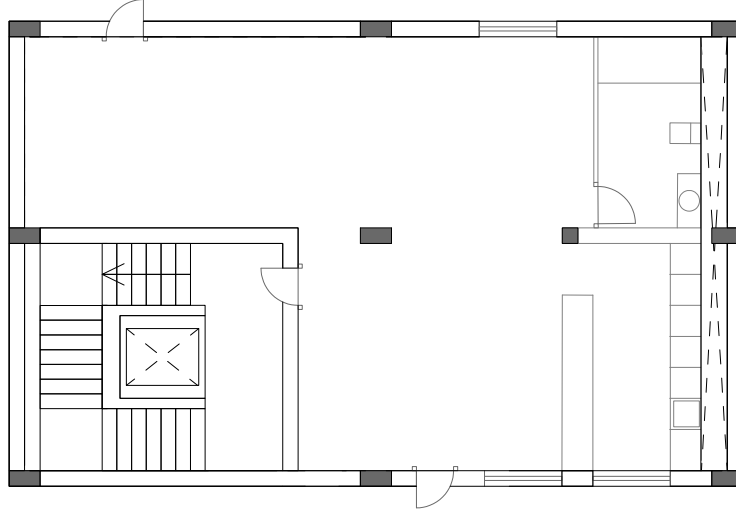
Se selecciona la madera de Pino laricio, la cual tiene una clase resistente C18 para madera aserrada [Figura 56], que obtiene una correspondencia a la madera laminada encolada GL24c [Figura 58] la cual es utilizada como objeto de estudio.

El proyecto está compuesto por dos plantas (planta primera y planta baja), entre las cuales se encuentran distintos usos, así como una zona de exposición, zona de bar/cafetería, zona de co-working y zona de hospedaje.

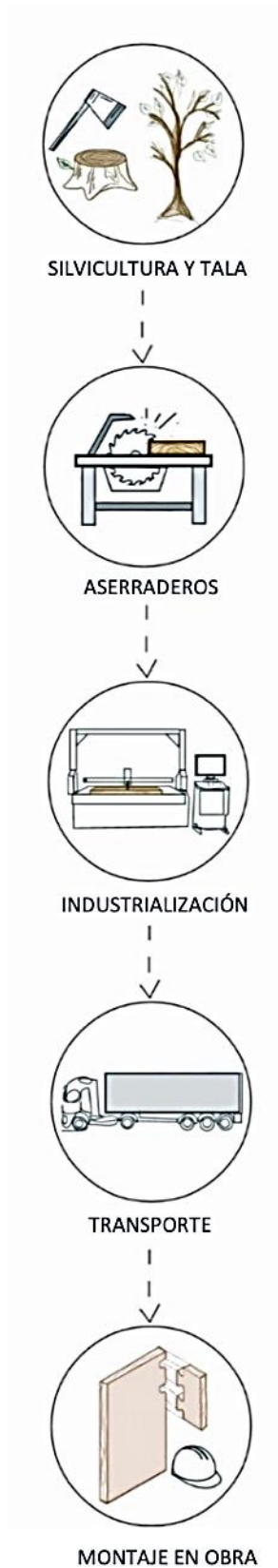
PLANTA BAJA



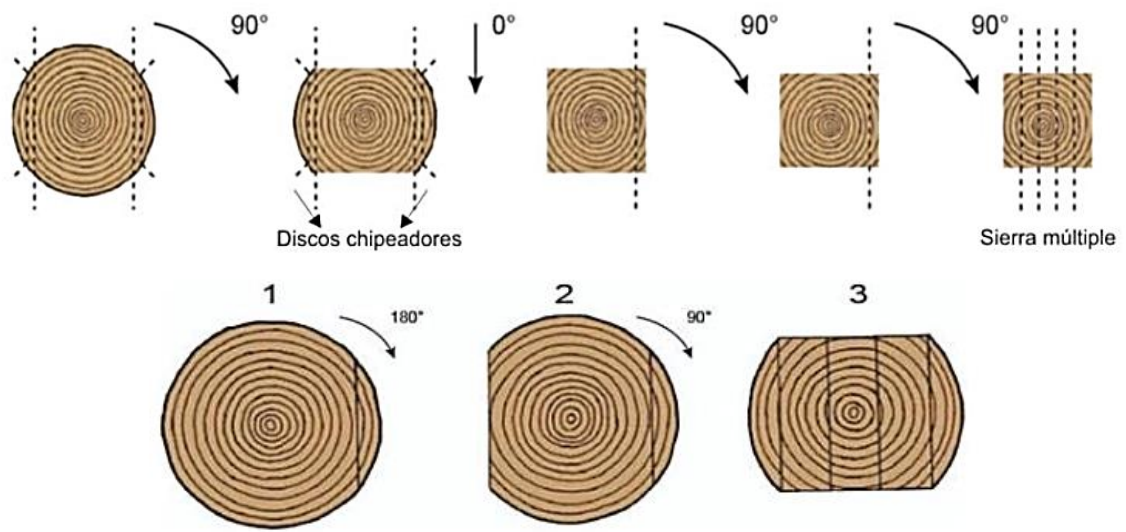
PLANTA PRIMERA



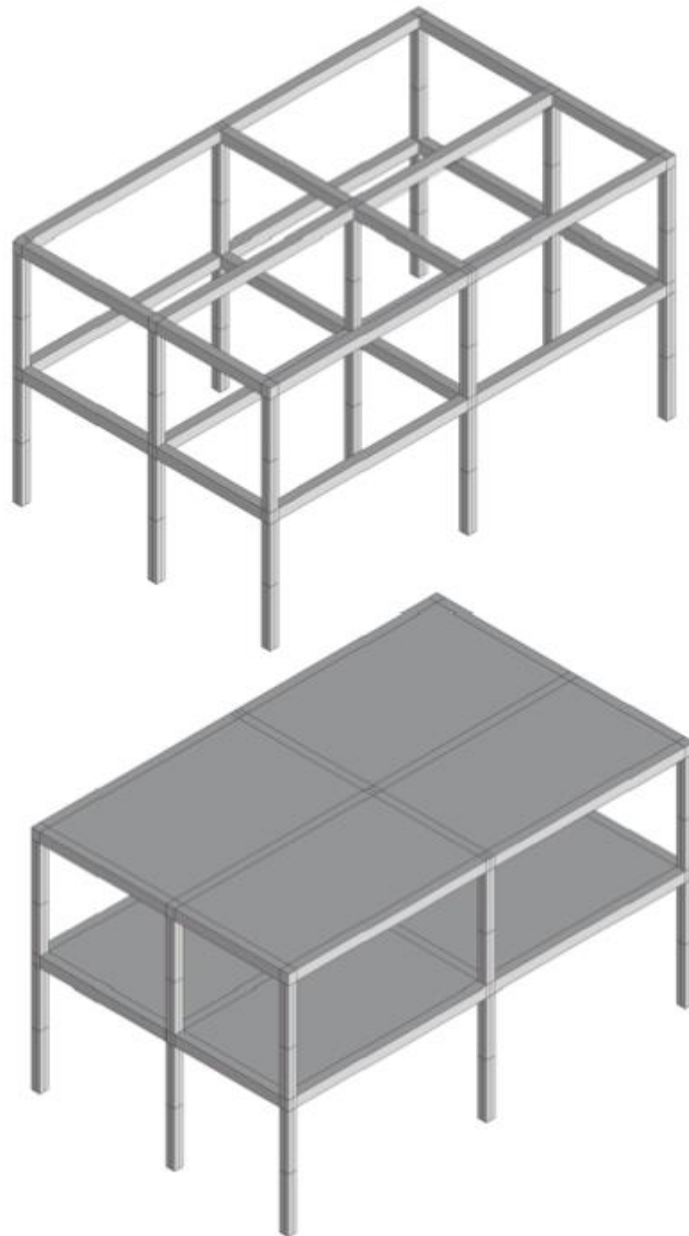
(Figura 60. Planos de la propuesta Pabellón)



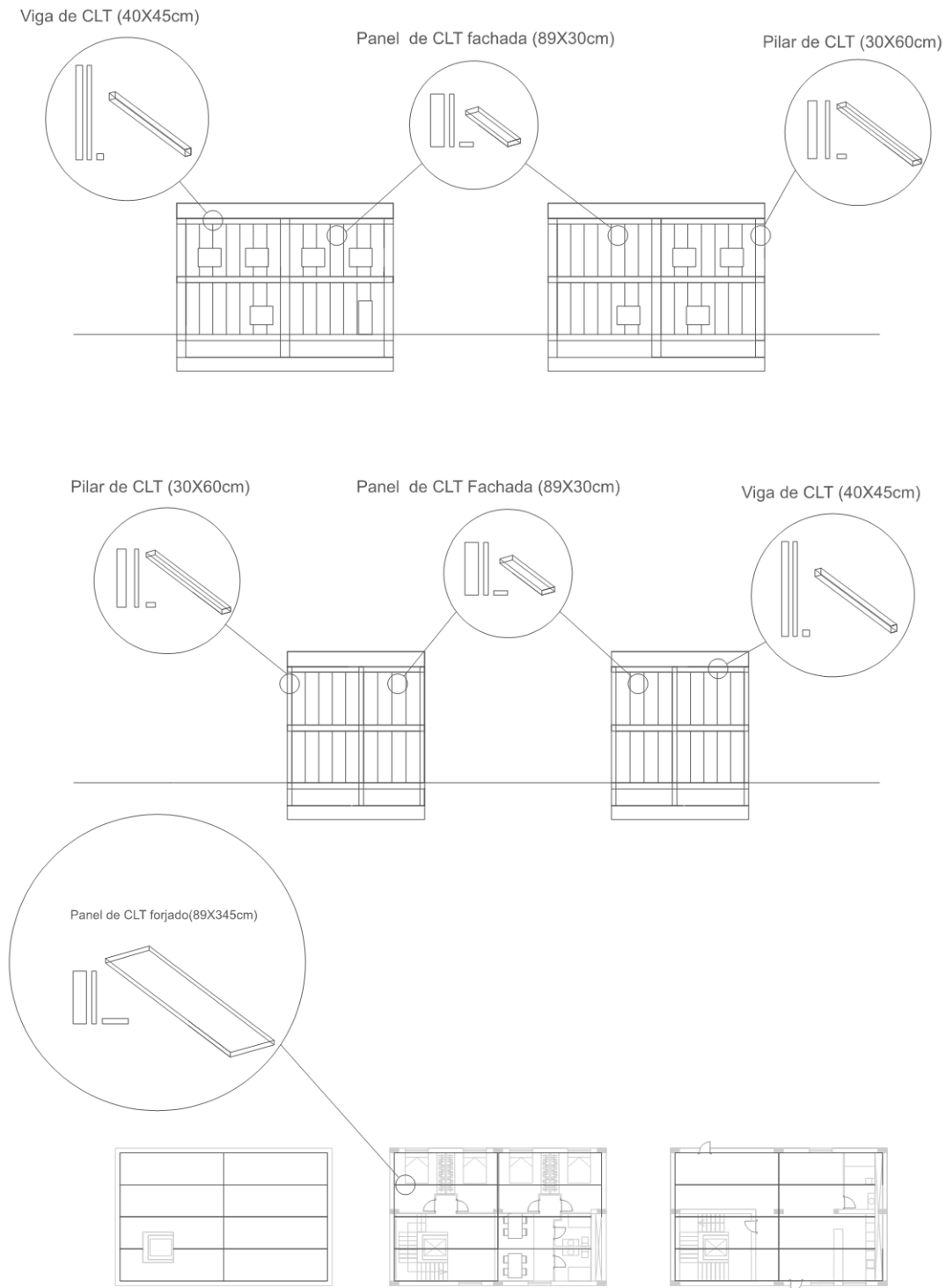
(Figura 61. Proceso de producción de la madera) [40]



(Figura 62. Proceso de aserrado de la madera) [40]



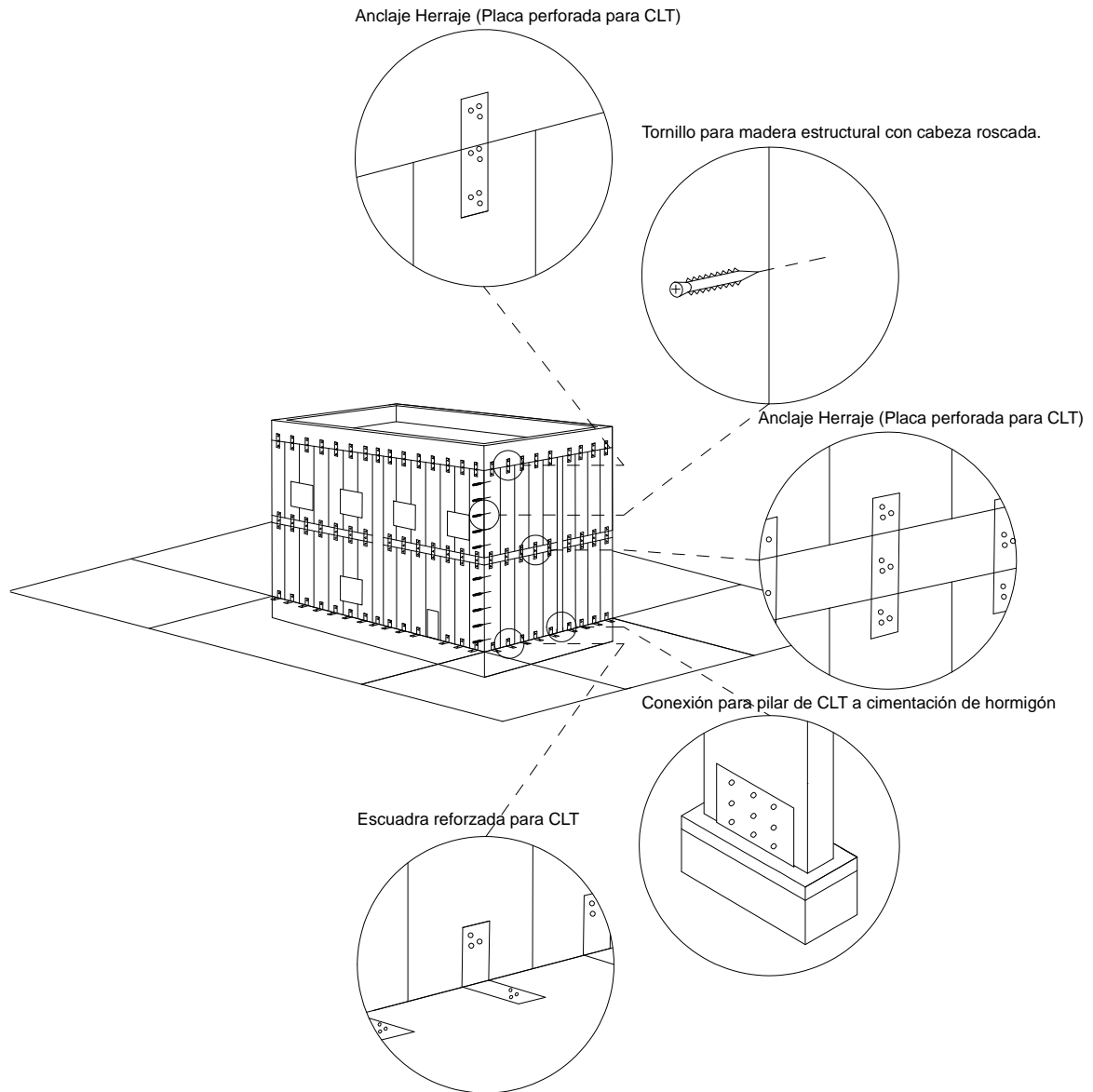
(Figura 63. Esquema estructural de madera CLT)



(Figura 64. Despiece de elementos constructivos)

Tanto los elementos estructurales (Vigas, pilares y forjados) como la fachada, se realizan mediante paneles de CLT con clase resistente GI24c.

Las distintas uniones, se realizan mediante uniones mecánicas, o herrajes, ya sean: pernos, conectores, herrajes singulares o estándar.



(Figura 65. Detalle de los elementos de conexión)



### 3.5 CÁLCULOS

Se realiza la comprobación de cálculo tanto del pilar como de la viga mas desfavorable (Interior).

#### 3.5.1 CÁLCULO DE VIGA CLT:

DATOS INICIALES:

-Clase resistente: Madera Gl24c

-Clase de servicio: 1

-Longitud: 6,8 m

-Entrevigado de tablero contrachapado (Tabla E.5 CTE DB SE-M):  $600 \text{ kg/m}^3$  e: 20 mm

PESO PROPIO:

-Tablero:  $600 \times 0,02$ :  $0,12 \text{ kn/m}^2$

-Acabados:  $1 \text{ kn/m}^2$

-Vigueta:  $300 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 350 \text{ kg/m}^3$  (Tabla E.4 CTE DB SE-M):  $0,36 \text{ kn/m}$

Total:  $(0,12+1) \times 435 \text{ mm} + 0,36$ :  $0,847 \text{ kn/m}$

SOBRECARGA DE USO:

$5 \text{ kn/m}^2$  (Tabla 3.1 DBSE AE)  $\times 435$ :  $3,4 \text{ kn/m}$

FLEXIÓN CON CARGA PERMANENTE:

$$M_d = \gamma \times \frac{q \times l^2}{8} = 1,35 \times \frac{0,847 \times 6,8^2}{8} = 6,6 \text{ kn/m}$$

$$W = \frac{300 \times 350^2}{6} = 6.125.000 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{md} = \frac{M_d}{W} = \frac{6.600.000}{6.125.000} = 1,077 \text{ Mpa}$$

$$F_{md} = K_{mod}^3 \times K_h^1 \times \frac{F_{mk}}{\gamma_m}^2 =$$

$$0,6 \times 1,1 \frac{24}{1,25} = 12,67 \text{ Mpa}$$

FLEXIÓN CON CARGA TOTAL:

$$M_d = 1,35 \times \frac{0,847 \times 6,8^2}{8} + 1,5 \times \frac{2,175 \times 6,8^2}{8} = 6,6 + 18,85 = 25,45 \text{ kn/m}$$

$$\sigma_{md} = \frac{M_d}{W} = \frac{25.450.000}{6.125.000} = 4,155 \text{ Mpa}$$

$$F_{md} = 0,7 \times 1,1 \times \frac{24}{1,25} = 14,78 \text{ Mpa}$$

CORTANTE:

<sup>1</sup> Tabla 2.1 CTE DB SE-Madera

<sup>2</sup> Tabla 2.3. CTE DB SE-Madera

$$V_d = \gamma \times \frac{q \times l}{2} = 1,35 \times \frac{0,847 \times 6,8}{2} + 1,5 \times \frac{2,175 \times 6,8}{2} = 11,275 \text{ kn}$$

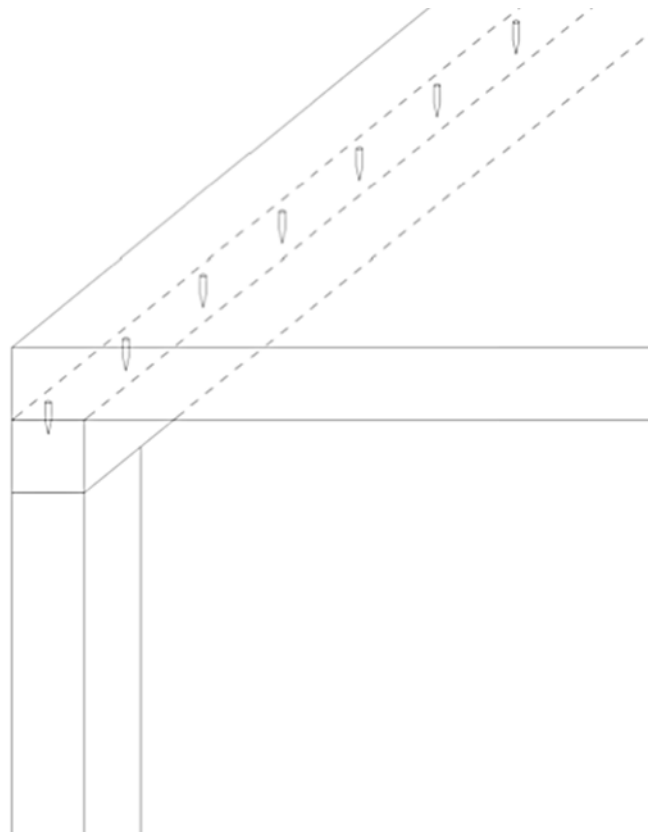
$$T_d = 1,5 \times \frac{V_d}{B \times K_{cr} \times h} = 1,5 \times \frac{11,275}{300 \times 0,67 \times 350} = 0,24 \text{ Mpa}$$

$$K_{cr} = 0,67^3$$

$$F_{vd} = K_{mod} \times \frac{F_{vk}}{\gamma_m} = 0,7 \times \frac{2,2}{1,25} = 1,232 \text{ Mpa}$$

$$I_{az} = \frac{T_d}{F_{vd}} = \frac{0,24}{1,232} = 0,19 = 19\%$$

$$I_a = \frac{\sigma_{md}}{F_{md}} = \frac{4,155}{14,78} = 0,28 = 28\%$$



(Figura 66. Arriostrado de la Viga de CLT)

#### VUELCO LATERAL:

>> No es necesaria la comprobación frente a vuelco lateral en la viga, porque la viga está arriostrada al forjado mediante conector.

$$L_{ef} = \beta_v \times L = 0,95 \times 6,8 = 6,46 \text{ m}$$

$$C_e = \sqrt{\frac{L_{ef} \times h}{b^2}} = \sqrt{\frac{6460 \times 350}{300^2}} = 5,01$$

<sup>3</sup> Punto 6.1.8 CTE DB SE-Madera

<sup>4</sup> Tabla E.4 CTE DB SE- Madera

<sup>5</sup> tabla 6.3 CTE DB SE-Madera

$$\lambda_{rel} = 1,15 \times C_e \times \sqrt{\frac{F_{mk}}{E_0 k}} = 1,15 \times 5,01 \times \sqrt{\frac{24}{9400}} = 0,29$$

$$E_0 k^4$$

$$K_{cr} t^5 = 1$$

$$\lambda_{av} = \frac{\sigma_{md}}{K_{cr} \times F_{md}} = \frac{4,155}{1 \times 14,78} = 28\%$$

### 3.5.2 CÁLCULO DEL PILAR CLT:

#### DATOS INICIALES:

- Madera GL24c
- Clase de servicio 1
- Longitud: 3,8 m
- sección: 30x30 cm

#### PREVISIÓN DE CARGAS:

##### Cargas permanentes:

$$\text{Peso Propio pilar} = 3,5 \times 3,8 \times 0,3 \times 0,3 = 1,19 \text{ KN}$$

$$\text{Peso Propio Viga}^1 = 3,5 \times 6,8 \times 0,3 \times 0,3 = 2,49 \text{ KN}$$

$$\text{Peso Propio Viga}^2 = 3,5 \times 2,1 \times 0,3 \times 0,3 = 0,77 \text{ KN}$$

$$\text{PP Viga}^1 + \text{PP Viga}^2 = 3,26 \text{ KN}$$

$$\text{Peso Propio Forjado} = 5,5 \times 0,3 = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{AT Vigas} = (2,1 \times 0,3) + (6,8 \times 0,3) = 2,67 \text{ m}^2$$

$$\text{AT Forjado} = (6,8 \times 2,1) - 2,67 - 0,3^2 = 11,52 \text{ m}^2$$

$$\text{Forjado P1} = 1,65 + (1 \times 0,8) = 3,45 \text{ Kn/m}^2$$

##### CARGAS PERMANENTES:

$$\text{GC} = (1,5 \times 14,30) + (1,65 \times 11,52) = 40,45 \text{ KN}$$

$$\text{GP1} = 40,45 + (1,19) + 3,26 = 44,91 \text{ KN}$$

$$\text{GPB} = (3,45 \times 11,52) + 3,26 + 1,19 = 44,19 \text{ KN}$$

$$\text{GP1} + \text{GPB} = 89,1 \text{ KN}$$

##### SOBRECARGAS:

$$\text{Q2} = 1 \times 14,30 = 14,3 \text{ KN}$$

$$\text{Q1} = 3 \times 14,30 = 42,9 \text{ KN}$$

$$\text{Q1} + \text{Q2} = 57,2 \text{ KN}$$

$$\text{Axil de cargas permanentes} = 89,1 \text{ KN}$$

$$\text{Axil de sobrecargas} = 57,2 \text{ KN}$$

$$\sigma_{0d} = \frac{Nd}{A} = \frac{1,35 \times 89,100 + 1,5 \times 57,200}{300 \times 300} = 2,28 \text{ Mpa}$$

$$F_{cd} = k_{mod} \times \frac{F_{c0k}}{\lambda m} = 0,7 \times \frac{24}{1,25} = 10,56 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \frac{Lk}{i} = \frac{\beta v \times l}{\sqrt{\frac{l}{A}}} = \frac{1 \times 3800}{\sqrt{\frac{1}{\frac{1}{12} \times 300 \times 300^2}}} = 43,87$$

$$\gamma_{rel} = \frac{\gamma}{\pi} \times \sqrt{\frac{Fc0k}{E0k}} = \frac{43,87}{\pi} \times \sqrt{\frac{24}{9400}} = 0,7$$

$$K_v = 0,5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel} l^2) = 0,5 (1 + 0,1 (0,7 - 0,3) + 0,7^2) = 1,01$$

$$\chi_c = \frac{1}{K_v + \sqrt{K_v^2 - \lambda_{rel} l^2}} = \frac{1}{1,01 + \sqrt{1,01^2 - 0,7^2}} = 0,57$$

$$\frac{\sigma c0d}{\chi_c \times Fc0d} = \frac{2,28}{0,57 \times 10,56} = 0,37 \rightarrow 37\%$$

## 4 CONCLUSIONES

Si bien es cierto, a lo largo de la historia se ha pretendido innovar en numerosas ocasiones en cuanto a la edificación se refiere, aprovechándose de la producción en serie/prefabricación. Y aunque anteriormente la opción más habitual era el uso de la madera en la construcción, debido a su versatilidad y amplia producción de recursos, actualmente existen amplias gamas de materiales a utilizar en la producción de viviendas modulares.

Cabe mencionar que, tras el estudio de los distintos materiales, se imposibilitó la toma de decisiones frente al mejor material de construcción. Puesto que, muchos de ellos pueden ofrecer características similares, además de que, la selección del material idóneo para la construcción de una vivienda, irá fijado por distintos condicionantes tales como:

la ubicación geográfica de la vivienda, la distancia de la vivienda respecto a la fábrica suministradora, la geometría de la edificación o el riesgo a la hora de realizar el izado de los módulos.

En este trabajo de investigación, se centra el foco en tres materiales principales de construcción (hormigón pretensado, madera y metales).

Si bien es cierto que el hormigón prefabricado es uno de los materiales más utilizados en la construcción, y ello podría dar la sensación de ser un buen aliado en cuanto a la construcción modular se refiere, ofrece una gran desventaja, y es, la necesidad de realizar los distintos módulos, ya sean: paneles, pórticos o elementos estructurales directamente en fábrica.

Ello limita tanto el transporte de los distintos paneles como de sus dimensiones, pudiendo ser una característica decisiva a la hora de decantarse por este tipo de sistema constructivo. Además, es uno de los sistemas modulares más inseguros, ya que en el proceso de izado de los distintos elementos y dado su peso, puede generar accidentes a los operarios.

Tanto el acero galvanizado como el aluminio extrusionado, (estructura metálica) son buenas opciones en cuanto a la construcción modular se refieren, son capaces de soportar grandes cargas y ofrecen un bajo peso. Además, y a diferencia del hormigón pretensado, se realiza el montaje de los paneles en la propia obra, lo cual supone una ventaja en cuanto al transporte se refiere, además de ofrecer una gama más amplia de módulos que el hormigón pretensado, dada la amplia cantidad de modelos que se pueden realizar.

Otros condicionantes, más enfocados al objetivo del trabajo (análisis de la construcción modular), serían la rapidez de ejecución, la sostenibilidad, etc.

La madera, ofrece características similares a la estructura metálica, tanto de combinación de distintos módulos, como de transporte del mismo o facilidad del izado. No obstante, la capacidad resistente de la madera, dista en gran medida de la capacidad portante del acero, con lo cual, la construcción metálica, permite generar modelos estructurales de mayor altura.

Es por ello que el uso de distintas combinaciones de maderas específicas como el CLT, GLT, GLULAM, etc son capaces de ofrecer una resistencia estructural superior, llegando incluso a poder realizar edificios de numerosas plantas.

Además, la madera es el material de construcción que menos huella de carbono deja tras su proceso constructivo, y si bien es cierto que promueve la deforestación de los bosques, si se plantean alternativas sostenibles como la forestación y un uso controlado tanto en la producción de la madera como en su reutilización, podría cumplir con creces los estándares de passivhaus y nZEB.

Tras analizar los distintos tipos de madera que se pueden utilizar en la construcción modular, destaca por sus propiedades resistentes el conocido como Pino Laricio o pinus nigra Arnold.

Este pino autóctono del territorio Español, ofrece una resistencia superior a las clases resistentes de la madera aserrada, además de ser una de las maderas más resistentes de toda Europa.

Según el código estructural de la madera (DB SE-M), existe una equivalencia, entre la clase resistente madera aserrada y madera laminada encolada para dicho pino. Ofreciendo así una ventana para la comprobación de las secciones de los elementos estructurales más representativos de la propuesta.

Los resultados obtenidos, se establecen en una estructura de pilares con dimensiones de 30x30cm, vigas de 30x35cm y forjados de 30cm de madera CLT (Cross Laminated Timber) con una clase resistente GL24c, obtenida del Pino Laricio.

Por otro lado, en cuanto a las uniones, se realizarán en su gran mayoría con uniones mecánicas y uniones de herrajes. En el caso de la unión de los pilares y las vigas, se realizarán con elementos mecánicos como pasadores o conectores que además contribuyen a evitar el vuelco lateral. Por otro lado las uniones de los distintos paneles tanto longitudinales como perpendiculares, se realizan mediante herrajes.

#### **4.1 LÍNEA FUTURA**

Tras la investigación realizada, se plantea la continuidad de estudio en cuanto a una mayor profundidad de la materia.

Se plantea la posibilidad de realizar las comprobaciones necesarias de forma teórica o en laboratorio, para poder definir un sistema de madera estructural (completo o parcial), donde se definan unas capacidades resistentes superiores a las citadas. Mediante combinación con otro tipo de maderas, materiales o sistemas de prefabricado.

También se deja abierta la posibilidad de una mayor definición de las distintas uniones, realizando las comprobaciones necesarias tanto del material, la madera y las cargas a soportar.

Por otro lado y pudiendo ser analizado el panorama Español en profundidad, en base a la cultura de la producción de madera para sistemas estructurales, y pudiendo definir una aproximación de las necesidades del sector de la producción, del sector de la construcción y las necesidades de preservar el espacio arbóreo de la nación.

Realizar un desglose comparativo de los distintos ahorros o incrementos del presupuesto que se puedan producir en contraposición a un sistema de construcción común en el territorio Español, podría suponer un incentivo para muchos profesionales al interesarse por la vanguardia de los sistemas constructivos modulares estudiados. Así como un análisis detallado de la reducción de la huella de carbono.

Por último, sería de sumo interés, realizar un análisis comparativo estructural de la solución adoptada con un sistema clásico de construcción, en donde se establezcan de forma detallada los distintos incrementos o reducciones de las capacidades resistentes.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tipos de construcciones modulares de Algeco | ALGECO. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.algeco.es/tipos-de-construcciones-modulares-de-algeco>
- [2] Estudio de Arquitectura Sostenible en Barcelona | Slow Studio. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.slowstudio.es/>
- [3] Forpol Estructuras, S.L. → Prefabricados de hormigón del 2024. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.forpol.es/>
- [4] Estructuras modulares metálicas - Domingo Serna. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://domingoserna.com/estructuras-modulares-metalicas/>
- [5] Mejores Tipos de Construcción Modular en Hormigón 2024. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.casasprefabricadas24.com/tipos-de-construccion-modular-en-hormigon/>
- [6] Construcción Modular // Fabricantes y distribuidores // 3DMODULAR. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.3dmodular.es/>
- [7] Woodville – Arquitectura modular sostenible. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.bewoodville.com/>
- [8] ¿Qué es una cooperativa de viviendas? ¿Cuáles son las ventajas? (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.vivus.es/blog/que-es-una-cooperativa-de-viviendas>
- [9] BBC, & BBC. (n.d.). Crystal Palace: A History. Www.Bbc.Co.Uk. Retrieved February 19, 2024, from [http://www.bbc.co.uk/london/content/articles/2004/07/27/history\\_feature.shtml](http://www.bbc.co.uk/london/content/articles/2004/07/27/history_feature.shtml)
- [10] Prefabricación - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://es.wikipedia.org/wiki/Prefabricaci%C3%B3n>
- [11] Dos casas prefabricadas en la Colonia Weissenhof. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from [https://www.urbipedia.org/hoja/Dos\\_casas\\_prefabricadas\\_en\\_la\\_Colonia\\_Weissenhof](https://www.urbipedia.org/hoja/Dos_casas_prefabricadas_en_la_Colonia_Weissenhof)
- [12] Wright was right | Cronotopos Arquitectura. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.cronotopos.es/evolucion-casas-prefabricadas/>
- [13] Burbuja Inmobiliaria de 2008 ¿Cómo fue? | Pibank. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.pibank.es/que-fue-burbuja-inmobiliaria-espana/>
- [14] MIGUEL MORENO MENDIETA. (2022). El BCE alerta de que los fondos de inversión pueden agudizar las crisis. cinco días.
- [15] qué es una cooperativa de viviendas. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://grupodomo.com/que-es-una-cooperativa-de-viviendas/>
- [16] ¿Qué es una cooperativa de viviendas? ¿Cuáles son las ventajas? (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.vivus.es/blog/que-es-una-cooperativa-de-viviendas>
- [17] ¿Qué es una vivienda unifamiliar? | Realía. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.realia.es/inmopedia/que-es-vivienda-unifamiliar>
- [18] Steel framing - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from [https://es.wikipedia.org/wiki/Steel\\_framing](https://es.wikipedia.org/wiki/Steel_framing)
- [19] Programa de fomento de la mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad en viviendas | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.mitma.gob.es/arquitectura-vivienda-y-suelo/programas-de-ayudas-a-la-vivienda/programa-de-fomento-de-eficiencia-energetica-y-sostenibilidad-en-viviendas>
- [20] Pihelo, P., Kalamees, T., & Kuusk, K. (2017). nZEB Renovation with Prefabricated Modular Panels. Energy Procedia, 132, 1006–1011. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.708>
- [21] Yakimchuk, T., Linhares, P., & Hermo, V. (2023). Evaluation of a modular construction system in accordance with the Passivhaus standard for components. Journal of Building Engineering, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107234>
- [22] Proyectopía - Viviendas modulares a medida de alta calidad. (n.d.). Retrieved February 19, 2024, from <https://www.pfroyectopia.com/>
- [23] LA SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA LA CONSTRUCCIÓN MODULAR LIGERA APLICADA A LA VIVIENDA TESIS DOCTORAL. (2009). <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93448>
- [24] Gómez Muñoz, D. (2008). Estudio comparativo entre distintas metodologías de construcción industrializada de viviendas. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5636>
- [25] Vol. 2 Núm. 3-4 (2019): La versatilidad de la madera | Estructuras. (n.d.). Retrieved March 2, 2024, from TFG Juan Carlos Rodríguez-Marín Llasera UEC Grado en Fundamentos de la Arquitectura Curso 2023/2024

<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/estructuras/issue/view/2020>

[26] Sanz-Magallón Delhaize, I. (2023). El proceso de industrialización en edificios construidos en madera.

<https://oa.upm.es/72637/>

[28] Gasca Alonso, M. M. (2021). Sistemas de entramado de madera: construcción con CLT.

<https://oa.upm.es/67728/>

[29] Schweigler, M., Akter, S. T., Sabaa, S., & Bader, T. K. (2022). An experimental study of the stiffness and strength of cross-laminated timber wall-to-floor connections under compression perpendicular to the grain. *Engineering Structures*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114850>

[30] Orradre, G., & Aginco, T. (2003). Uniones en estructuras de madera laminada. *Re. Revista de Edificación*, 33, 60–69. <https://doi.org/10.15581/020.33.34784>

[31] Hermoso, E., Fernández-Golfín, J. I., & Díez, R. (2002). Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For*, 11(2).

[https://www.researchgate.net/publication/233884257\\_Madera\\_estructural\\_de\\_pino\\_silvestre\\_caracterizacion\\_mecanica](https://www.researchgate.net/publication/233884257_Madera_estructural_de_pino_silvestre_caracterizacion_mecanica)

[32] Ministerio de Fomento Documento Básico SE-M Seguridad estructural Madera. (2019).

<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-M.pdf>

[33] Historia - Old St. Mary's Chicago. (n.d.). Retrieved June 6, 2024, from

<https://oldstmarys.com/history/>

[34] Marina de los Estados Unidos: Quonset Huts: The Manning Portable Colonial Cottage (1833). (n.d.). Retrieved June 6, 2024

<https://quonset-hut.blogspot.com/2012/12/the-manning-portable-colonial-cottage.html>

[35] Accueil · Bibliothèque numérique. (n.d.). Genovefa.Bsq.Univ-Paris3.Fr. Retrieved June 6, 2024, from

<https://genovefa.bsq.univ-paris3.fr/s/genovefa/page/accueil>

[36] Monadnock Building - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved June 6, 2024, from

[https://es.wikipedia.org/wiki/Monadnock\\_Building](https://es.wikipedia.org/wiki/Monadnock_Building)

[37] "Documento Básico PRL-RCD - Fundación Laboral de la Construcción."

<https://www.lineaprevencion.com/uploads/lineaprevencion/contenidos/files/arch5dfb475c98dd7.pdf>.

[38] "Sotrac Cooperativa d'Habitatge."

<http://sotrac.org/>.

[39] Básico, D. H. (2019). MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA Protección frente al ruido.

<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HR/DBHR>

[40] Sanz-Magallón Delhaize, I. (2023). El proceso de industrialización en edificios construidos en madera.

<https://oa.upm.es/72637/>

[41] Capilla de paja / Kollektiv | ArchDaily en Español. (n.d.). Retrieved June 11, 2024, from

<https://www.archdaily.cl/cl/993849/capilla-de-paja-kollektiv>

[42] Piscina de la escuela Freeman / Hawkins\Brown | ArchDaily en Español. (n.d.). Retrieved June 11, 2024, from

<https://www.archdaily.cl/cl/887474/piscina-de-la-escuela-freeman-hawkins-brown>

[43] THE SMILE #Arquitecturademadera - Madera y Construcción. (n.d.). Retrieved June 11, 2024, from

<https://maderayconstruccion.com/the-smile-arquitecturademadera/>

[44] The Voxel – Una cabaña de cuarentena / Valldaura Labs | ArchDaily en Español. (n.d.). Retrieved June 11, 2024, from

<https://www.archdaily.cl/cl/958365/the-voxel-nil-una-cabana-de-cuarentena-valldaura-labs>

[45] Detalle: Estructura CLT del Centro Cultural Sara, Skellefteå | Archello. (n.d.). Retrieved June 11, 2024, from

<https://archello.com/es/news/detalle-estructura-clt-del-centro-cultural-sara-skelleftea>