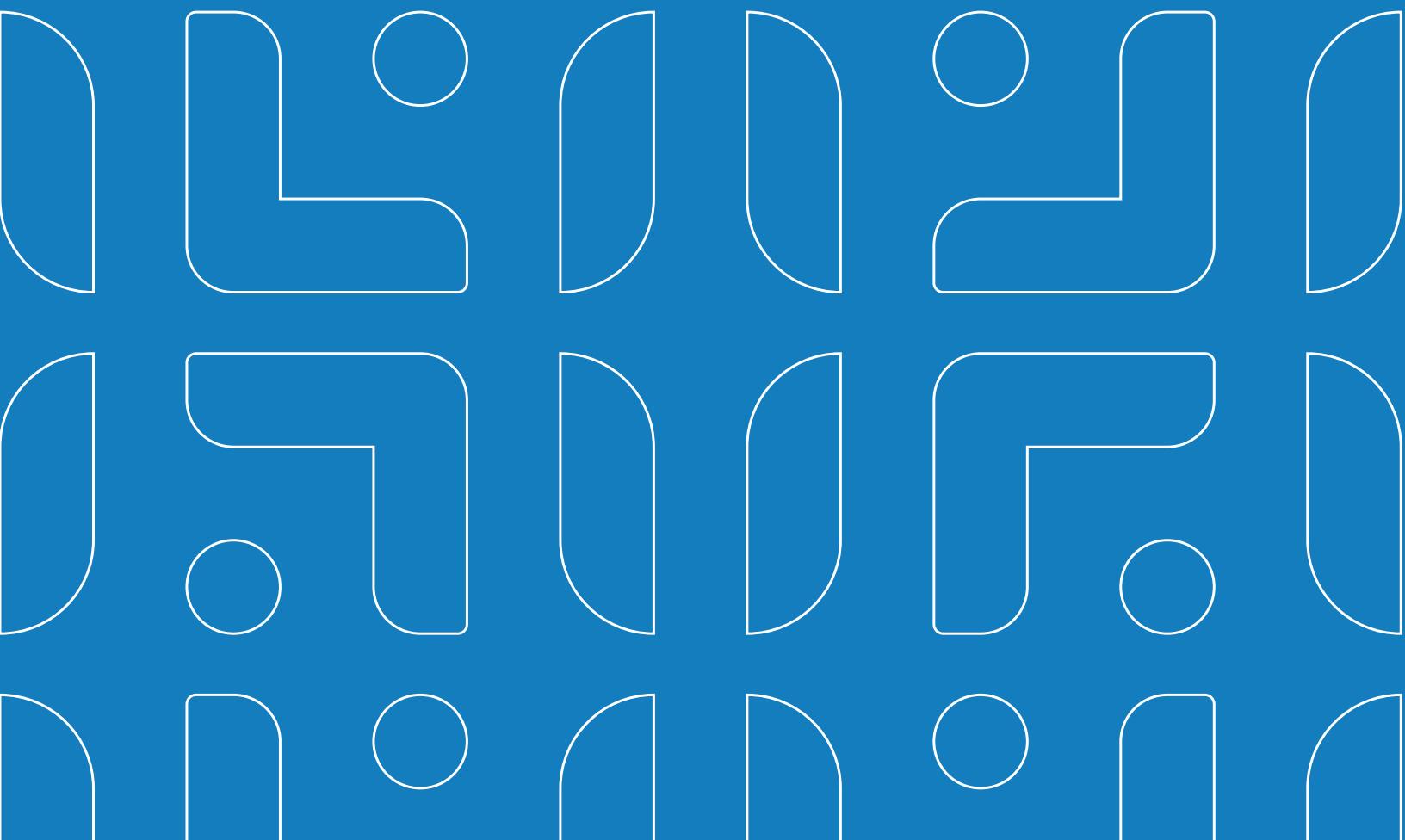


DISEÑO ESTRUCTURAL Y CONSTRUCCIÓN



Desarrollo estructural de prototipo prefabricable para topografía irregular

Structural development of prefabricated prototype for irregular topography

DOI: <https://doi.org/10.51378/ilia.vi2.9652>

L. Rodríguez

Académica, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador.

Doctora, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España

e-mail: lrrodriguez@uca.edu.sv - lizeth.rodriguez@upc.edu

Fecha de recepción: 15 de junio de 2025

Fecha de aprobación: 12 de agosto de 2025

Resumen

Se presenta el diseño y análisis estructural de un prototipo habitacional destinado a terrenos de topografía accidentada. El proceso de desarrollo del diseño ha sido concebido para permitir su construcción utilizando diversas tecnologías y sistemas constructivos en madera certificada, cumpliendo con la normativa española, dado que la propuesta fue presentada y revisada en España. Sin embargo, se ha considerado su adaptación a climas tropicales, específicamente a la región centroamericana, donde la autora originalmente conceptualizó el diseño. Se hace notar que la principal acotación en este desarrollo, es el método de cálculo de una idea arquitectónica y de cómo se logra la factibilidad técnica, a través del análisis estructural, siendo ambos ejercicios de diseño, tanto el arquitectónico como el estructural, complementarios entre sí.

Palabras clave – Adaptabilidad, modelo de cálculo, estructura, madera, prefabricación.

Abstract

This paper presents the design and structural analysis of a housing prototype intended for rugged terrain. The design development process has been conceived to allow for construction using various technologies and building systems in certified wood, complying with Spanish regulations, given that the proposal was presented and reviewed in Spain. However, its adaptation to tropical climates has been considered, specifically to the Central American region, where the author originally conceptualized the design. It should be noted that the main focus of this development is the method of calculating an archi-

tectural idea and how technical feasibility is achieved through structural analysis, with both architectural and structural design exercises complementing each other.

Keywords – Adaptability, design model, structure, timber, prefabrication, prefabrication.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente estudio es el desarrollo estructural de un anteproyecto arquitectónico, con énfasis en la revisión del cumplimiento del marco regulador especializado en madera, para verificar la factibilidad del diseño, elaborado como un trabajo final de maestría en Ingeniería Estructural en la Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña. Siendo lo más importante, la implementación de un método de revisión, análisis de diseño estructural, que pueda hacer factible un diseño arquitectónico, en este caso, considerando la Instrucción Española de obligado cumplimiento en territorio español:

1. Para el análisis estructural en madera se consulta el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Madera, CTE-DB-SE-M [1][2], que se fundamenta en los criterios y en los métodos definidos en el Eurocódigo 5.
2. Las acciones (cargas) se determinan a partir de lo establecido en Código Técnico de la Edificación Documento Básico de Seguridad Estructural [3], Acciones en la Edificación CTE-DB-SE-AE [4].
3. Para determinar parámetros de seguridad se ha considerado el Código Técnico de la Edificación Documento Básico, Seguridad en caso de Incendio, CTE-DB-SI [5].



Publicamos bajo la Licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

En el proceso de diseño, la consulta de normas técnicas, brindan los lineamientos para la selección de materiales de construcción y la definición de las formas estructurales, con el fin de establecer la resistencia estructural, reducir la deformación residual, así como facilitar la demolición y la restauración, aumentando así la resiliencia estructural frente a riesgos múltiples, y en consecuencia, los métodos de diseño son una condicionante de todo proyecto arquitectónico [6]. Generalmente las normas técnicas de diseño estructural van acorde a las tecnologías constructivas y se corresponden con la industria de la construcción, siendo los países con más desarrollo industrial, aquellos que poseen un marco regulador más robusto que aquellos donde la aplicación de ciertas tecnologías aún es incipiente, tal es el caso de construcción con madera en los países centroamericanos específicamente en El Salvador [7].

Usualmente el diseño de una edificación es realizado por un equipo de profesionales de distintos saberes, superponiéndolos uno a continuación del otro y no de forma integrada, pero en el presente estudio, se ha desarrollado el proceso de diseño bajo una visión integrativa entre el arquitectónico y el estructural, considerando que los parámetros del marco normativo europeo que regula el diseño y construcción con madera, es más detallado que la Norma para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera de El Salvador adaptada de la norma americana.

Las diferencias fundamentales entre el cálculo estructural bajo normativas europeas (Eurocódigos) y americanas (por ejemplo, American Society of Civil Engineers, ASCE) radican en sus enfoques metodológicos y filosofías de diseño, tales como:

1. El Método de los Estados Límites (LS) o LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) en Europa versus el Método de Estados de Servicio (SLS) o ASD (*Allowable Stress Design*) y LRFD en EE. UU.
2. La asignación de factores de seguridad, la influencia de la duración de la carga, el uso de coeficientes de reducción de resistencia (factor de resistencia) y coeficientes de mayoración de carga (factor de carga) en el LRFD europeo, frente al uso de factores de seguridad o reducciones inherentes al factor de carga en el ASD americano.
3. El estudio se ha realizado bajo una perspectiva de la potencial implementación de un método de cálculo simplificado para estructuras articuladas

prefabricadas en madera, dado su bajo peso por superficie construida, hecho que tiende a reducir el peso sísmico, y el alto potencial de importación bajo estándares de certificación.

Así mismo, el estudio se trata del diseño de un prototipo de unidad habitacional modular con posibilidades de crecer gradualmente, que es adecuada para emplazar en topografía accidentada. El módulo prototipo base, tiene como particular característica apoyar la mayor superficie en la menor cantidad de puntos de apoyo, para ello se prevé analizar las solicitudes a las que el prototipo se vería sometido y verificar el potencial de crecimiento y ampliación con la adición de varios módulos en ambas direcciones ortogonales en planta.

La unidad habitacional puede ser edificado a partir de la agrupación de módulos y se ha desarrollado bajo el concepto de sostenibilidad, en los siguientes términos:

1. Mínimo impacto al suelo: mínima intervención de terracería.
2. Eficiencia y estandarización de proceso: minimiza los desperdicios, ya que todo el sistema es prefabricable.
3. Materiales con bajo costo energético y mínima huella de carbono en su producción: como es la madera de bosque certificado como lo indican autores [8][9].
4. Sistema estructural sismorresistente: cada módulo tiene un mecanismo de arriostramiento.

II. METODOLOGÍA

Bajo una perspectiva holística que implica la interacción entre el diseño arquitectónico, el diseño estructural, el modelo de prefabricación y montaje, y la caracterización de los materiales de construcción, es que la metodología se resume en las siguientes fases:

1. Revisión y corrección de diseño arquitectónico bajo los parámetros de los códigos de diseño estructural.
2. Predimensionado de las secciones resistentes, considerando el proceso de prefabricación.
3. Estado de cargas evaluando combinaciones según efectos de empuje lateral y cargas gravitatorias.
4. Modelo de cálculo en el que se ha considerado la estructura como semi-isostática.

5. Análisis del modelo y rectificación de dimensiones de elementos estructurales.
6. Adecuación del diseño arquitectónico previendo la ampliación de la edificación.

A. Diseño arquitectónico y modulación

La idea de un prototipo prefabricable que se ajuste a topografías irregulares, surge como una respuesta a la emergencia provocada por eventos climáticos que desencadenan inundaciones y, además, brinda una solución de adaptabilidad a todo tipo de terreno, facilitando el drenaje de las escorrentías superficiales y evitando el movimiento masivo de tierras para su emplazamiento. El hecho de ser prefabricable, facilita el transporte de los componentes, la independencia de maquinaria y mano de obra especializada, evita los desperdicios y propicia el control de la calidad en la fabricación de los componentes [10][11][12].

El diseño original creado por la autora de este artículo ganador de mención de honor en el concurso Construcción Sostenible en El Salvador (América Central), trata de un módulo en planta de 7 x 7 m apoyados sobre un pilar. A partir de este módulo y con la unión de varios módulos, la vivienda iría incrementando su tamaño gradualmente, sin embargo, al realizar en análisis estructural en España, se constató que un único módulo no es estable ante el empuje lateral, por esta razón se consideró el criterio de simetría mecánica, en módulos que pueden ser prefabricados

en múltiplos de 3 m, considerando como material a la madera maciza certificada de la industria española de baja escuadrilla (no laminada), cuya longitud comercial es de hasta 6 m en la región centroamericana. Considerando que El Salvador no posee industria de madera de bosque certificado.

A pesar de que se ha considerado el diseño con madera certificada española, se decide trabajar con elementos que no tengan tan altas prestaciones para poder adaptar el diseño a un país con poca industria de madera certificada [1]. Es así que el nuevo diseño consta de cuatro módulos estructurales arriostrados entre sí, en forma de paraguas invertido, de 6 x 6 m cada uno. Se estima que el crecimiento de la vivienda es vertical hasta un segundo nivel, tomando en cuenta que los pilotes tipo palafito, deban contemplar las cargas del nuevo nivel para su futura ampliación.

Bajo el nuevo concepto de diseño se ha calculado la vivienda de un nivel, considerando solo las cargas gravitatorias de un piso, paredes y su cubierta, para verificar si las secciones de madera maciza de no muy altas prestaciones, cumplen con la rigidez (capacidad para oponerse a la deformación, acción y deformación), y resistencia (capacidad de evitar colapso por rotura, geometría y resistencia del material) [13], de esta forma establecer un punto de partida para el cálculo del crecimiento vertical de la vivienda, como se observa en la figura 1.

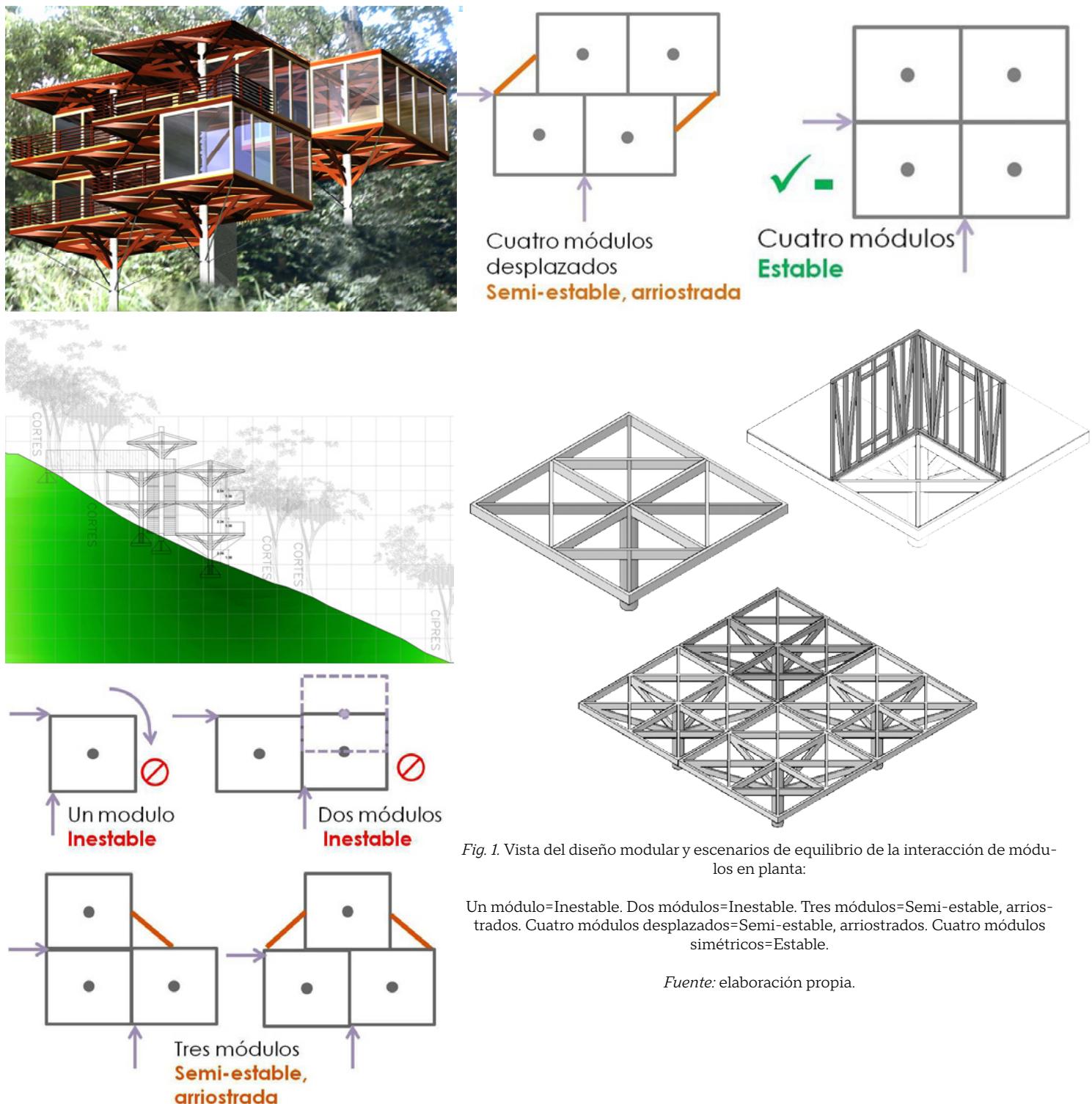


Fig. 1. Vista del diseño modular y escenarios de equilibrio de la interacción de módulos en planta:

Un módulo=Inestable. Dos módulos=Inestable. Tres módulos=Semi-estable, arriostrados. Cuatro módulos desplazados=Semi-estable, arriostrados. Cuatro módulos simétricos=Estable.

Fuente: elaboración propia.

B. Sistemas constructivos

Los componentes del sistema constructivo de acuerdo a especificaciones de la industria española son:

1. Apoyos: cuatro columnas de hormigón armado tipo HA-25 (resistencia a la compresión 25 MPa) con sujetadores metálicos para vigas, embebidos

dentro de la sección circular, arriostrados con vigas de amarre.

2. Estructura de piso: colocado en 4 módulos prefabricados de 6 x 6 m cuyas vigas primarias y secundarias son de madera aserrada clase C-30 (resistencia a la flexión 30 MPa) de sección 150 x 300 mm unidas entre sí, por medio de conectores metálicos.

3. Entrepiso: forro con panel autoportante tipo KLH de dimensiones 3 x 3 m con 25 mm de espesor.
4. Muros de carga de 3 m de longitud por 3,6 m de altura cuya estructura es de madera aserrada de sección 10 x 10 cm, el forro de los muros es panel autoportante tipo OSB/4 de dimensiones 1,2 x 2,4 m y espesor de 2,5 mm las ventanas de celosía son prefabricadas.
5. Estructura de techo: vigas primarias, secundarias y arriostramientos horizontales de madera aserrada clase C-22 (resistencia a la flexión 22 MPa) de sección 150 x 300 mm, el núcleo descansa sobre los muros.
6. Cubierta de lámina autoportante de acero curvado Fe-320 el peso es de 14,5 kg/m² protegida con resinas termoplásticas.

Con respecto a la madera, debe tenerse en cuenta que es un material ortótropo, es decir, que tiene dos o tres ejes ortogonales entre sí, por lo tanto, sus propiedades mecánicas son diferentes en las direcciones de cada uno de esos ejes. Los materiales ortótropos son entonces anisótropos, ya que sus propiedades dependen de la dirección en que son medidas. En cambio, un material isótropo tiene las mismas propiedades en todas las direcciones, como es el caso del hormigón endurecido [14]. Tanto las estructuras primarias como secundarias y los diafragmas se han previsto en madera y se describen así:

1. Estructura primaria y secundaria en piso, muros y techo: la longitud máxima de las piezas de madera suele estar limitada a 14 m en función de las posibilidades de aserrado y transporte. En el caso de la norma española UNE 56544 [15] se distinguen secciones con anchura menor o igual a 70 mm de la pequeña escuadria y de la gran escuadria anchura mayor de 70 mm, a la que se denomina Madera Estructural Gruesa MEG de hasta 300 mm. La norma define las calidades ME1, ME2 y MEG para las principales coníferas pino silvestre, pino Laricio, pino Radiata y pino Pinaster. En el añadido C en CTE-DB-SE-M [1] se incluye la relación de las normas de clasificación por calidades de la madera aserrada estructural (ver tabla 1). En este caso, se considera para el diseño, las clases C- (18, 22, 24, 27, 30) según UNE 56544 [15] para coníferas. Las tolerancias dimensionales quedan definidas en la norma UNE EN 336 [16], que establece un contenido de humedad de referencia del 20 % para definir las dimensiones nominales. Para el caso

de clima tropical, el porcentaje de humedad no debe ser mayor al 18 %.

Tabla 1.: Propiedades asociadas a clase resistente de madera aserrada

Propiedades / clases resistentes	C-22	C-30
Resistencia en N/mm²		
Flexión	22	30
Tracción paralela	13	18
Tracción perpendicular	0,4	0,4
Compresión paralela	20	23
Compresión perpendicular	2,4	2,7
Cortante	3,8	4
Rigidez en kN/mm²		
Módulo de elasticidad paralelo medio	10	12
Módulo de elasticidad perpendicular medio	0,33	0,4
Módulo trasversal medio	0,63	0,75
Densidad en kg/m³		
Densidad característica	340	380
Densidad media	410	460

Fuente: CTE-DB-SE-M

2. Diafragma en piso: considerando el capítulo 10 de CTE-DB-SE-M en el art. 10.4.1 Diafragmas de forjados y cubiertas. Respecto al análisis simplificado de diafragmas simplemente apoyados solicitados por una carga uniformemente repartida, siempre que se cumplan las condiciones siguientes:

- a. La luz L varía entre 2b y 6b, siendo b el ancho del diafragma.
- b. El fallo del diafragma es debido a los medios de fijación y no a los tableros.
- c. Las características técnicas de los paneles de madera microlaminados son:
- d. La longitud máxima de los paneles: 16,5 m por anchura de 3,0 m.
- e. Espesores estándar son entre 57 - 300 mm.
- f. La estabilidad dimensional de los paneles es: 0,2 mm por % de humedad.

- g. La protección contra incendios / carbonización tasa de un panel KLH es de 0,76 mm / min si varias capas queman.
- h. La masa de un panel de madera KLH es de 480 a 500 kg/m³.

3. Diafragmas en muros: tablero tipo OBS (Oriented Strand Board): considerando el capítulo 10 de CTE-DB-SE-M en el art. 10.4.2 Diafragmas de Muros. Para garantizar el efecto diafragma vertical (arriostramiento-rigidez) los tableros deben ir unidos en todo su perímetro al entramado de madera, mediante elementos mecánicos de fijación. Para aplicaciones estructurales se recomienda un peso específico 550 kg/m³ la resistencia al descuadre, Fv, Rd, de un muro diafragma, solicitado por una fuerza horizontal Fk puede determinarse por el procedimiento simplificado si se cumplen las siguientes condiciones:

- La separación entre los elementos de fijación es constante a lo largo del perímetro de cada tablero.
- El ancho bi de cada panel es igual o superior a h/4. Siendo: bi y h longitud y altura, respectivamente del panel.

En CTE-DB-SE-M añadido E.3 Tableros en el que se establecen los valores de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad asociados a los tipos de tableros y al ambiente en el que se utilizan (ver tabla 2). Los ambientes se corresponden con:

- Ambiente seco: clase de servicio 1 y clase de uso 1.
- Ambiente húmedo: clase de servicio 2 y clase de uso 1.c)
- Ambiente exterior: exposición a la intemperie clases de uso 1, 2 y 3. Se selecciona clase 2 de servicio.

Tabla 2. Propiedades tableros de alta prestaciones obs/4

Propiedades	18 > t nominal <25
Resistencia en N/mm ²	
Flexión paralela	21
Flexión perpendicular	11,4
Tracción paralela	10,9
Tracción perpendicular	8,0
Compresión paralela	17,0
Compresión perpendicular	13,7
Cortante en el grueso	6,9
Cortante en el plano	1,1

Rigidez en N/mm ²	
Flexión paralela	6780
Flexión perpendicular	2680
Tracción paralela	4300
Tracción perpendicular	3200
Compresión paralela	4300
Compresión perpendicular	3200
A cortante en el grueso	1090
A cortante en el plano	60
Densidad en kg/m ³	
Densidad característica	550

Fuente: CTE-DB-SE-M.

III. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y DIMENSIONADO

Para el sistema constructivo de madera el empuje por sismo no representa mayor problema a alturas de dos plantas, por ser liviano y de bajo peso sísmico, comparado con el hormigón. No obstante, en el caso del viento, el empuje genera desplazamiento en los nudos articulados. Razón por la que se ha considerado el viento y la humedad de la ciudad de Barcelona que es ciudad costera y ventosa, por medio de factor Kmod que es un coeficiente que modifica la resistencia de la madera para tener en cuenta el efecto de la duración de la carga y la humedad ambiental.

Se han fijado los criterios CTE-DB-SE-M [1], en el capítulo 2; factores de corrección de la resistencia, siendo estos:

- Sistema de distribución de carga Ksys = 1,2 para elementos laminados.
- Factor de corrección Kh = 1,0 que las piezas sometidas a flexión tienen un canto de 300 mm para madera maciza.
- En la clase de servicio 2, expuestas al ambiente exterior (donde se considera la intemperie).
- Según la norma artículo 2.2.3 el valor Xd, de una propiedad del material (resistencia) se define como:

$$Xd = Kmod (Kx/\gamma_m)$$

Xk: valor característico de la propiedad del material.

γ_m : coeficiente parcial de seguridad.

kmod: factor de modificación.

5. Si una combinación de acciones incluye acciones (cargas) pertenecientes a diferentes clases de duración, el factor kmod debe elegirse como el correspondiente a la acción de más corta duración. En este caso las cargas tienen las siguientes duraciones:

Carga permanente G: duración permanente, más de 10 años.

Sobrecarga de uso Q: duración media de una semana a 6 meses.

Carga de Nieve N: duración corta, localidades < 1000 m.

Carga de Viento V: duración corta, localidades < 1000 m.

6. Coeficientes parciales de seguridad γ_m para el material en situaciones persistentes y transitorias: madera maciza $\gamma_m=1,30$ y madera microlaminada, tablero contrachapado, tablero de virutas orientadas $\gamma_m=1,20$.
7. El factor de fluencia en función de la clase de servicio, que en este caso es clase 2, para madera maciza es $k_{def} = 0,8$.

La comprobación estructural del edificio requiere: a) determinar las situaciones de dimensionado que resulten determinantes; b) establecer las acciones (cargas) que deben tenerse en cuenta y los modelos adecuados para la estructura; c) realizar el análisis estructural, adoptando métodos de cálculo adecuados a cada problema; d) verificar que, para situaciones de dimensionado correspondientes, no se sobrepasan los estados límite, que son aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguna de los requisitos estructurales, en este sentido se pueden mencionar dos tipos de estados límite: Estado Límite Último (ELU) y Estado Límite de Servicio (ELS).

Los estados límite últimos son los que, de ser superados, producen una puesta fuera de servicio del edificio, el colapso total o parcial del mismo. Los estados límite de servicio son los que, de ser superados, afectan al confort y al bienestar de los usuarios. Por lo tanto, la combinación de acciones según los estados límites genera la siguiente simultaneidad de cargas según Código Técnico, Seguridad Estructural CTE-DB-SE [3] (ver tabla 3 y tabla 4):

1. Estados Límites Últimos $q= 1,35 G + 1,5 Q$

$$\sum \gamma G \text{ (permanente)} + \gamma Q_1 \text{ (variable)} + \sum \gamma \psi Q_k \text{ (variable)}$$

2. Estados Límites Servicio $q= 1,0 G + 1,0 Q$
 $\sum \gamma G \text{ (permanente)} + \gamma \psi_1 Q_1 \text{ (variable)} + \sum \gamma \psi_2 Q_k \text{ (variable)}$

Tabla 3.: Cálculo de acciones (cargas)

Combinación	G	Q	N	V
ELU 1	1,35	1,5	0,75	0,9
ELU 2	1,35	1,05	1,5	0,9
ELU 3	1,35	1,05	0,75	1,5
ELS 1	1	0,5	1	1
ELS 2	1	0,3	0,2	1
ELS 3	1	0,3	1	0,5

Fuente: CTE-DB-SE.

Empuje lateral de viento para muros en Barcelona $V= qb \times Ce \times Csp$.

$$V= 0,5 \times 2,3 \times 0,8 = 0,92 \text{ kN/m}^2.$$

qb (coeficiente de presión dinámica del viento) = 0,5 kN/m^2 .

Ce (coeficiente de expansión en función de altura).

Para zona accidentada III, altura de 9 m: $Ce=2,3$ Csp (coeficiente de presión o succión): Dato de norma: presión 0,8 y succión 0,8 (según el añadido D3 para muros verticales) $h/d= 3,6/6,0 = 0,6$.

Tabla 4. Simultaneidad de acciones (cargas)

Combinación de carga para estructura de entrepiso base	Carga desfavorable kN/m^2
ELU-1	10,35
ELS-1	6,35
Combinación de carga para diafragma de entrepiso base	Carga desfavorable kN/m^2
ELU-1	8,81
ELS-1	5,21
Combinación de carga para muros	Carga desfavorable kN/m^2
ELU-3	5,12
ELS-1	3,58

Combinación de carga para estructura para cubierta	Carga desfavorable kN/m ²
ELU-3	4,75
ELS-1	3,31

Fuente: elaboración propia.

A. Modelo de cálculo

Se ha estimado una carga por unidad de superficie en todo el forjado (entrepiso), y se reparte entre

cada uno de los cuatro elementos resistentes vigas que conforma el módulo, y para repartir esta carga sobre cada viga se multiplica por una longitud tributaria.

Los diagramas expresan como se reparte la carga en cada uno de las cuatro vigas en cada módulo, identificados como V-1, V-2, V-3, V-4 y sus longitudes tributarias, así como la longitud del elemento. También se ha considerado el sistema como bidireccional y estáticamente determinada (ver figura 2).

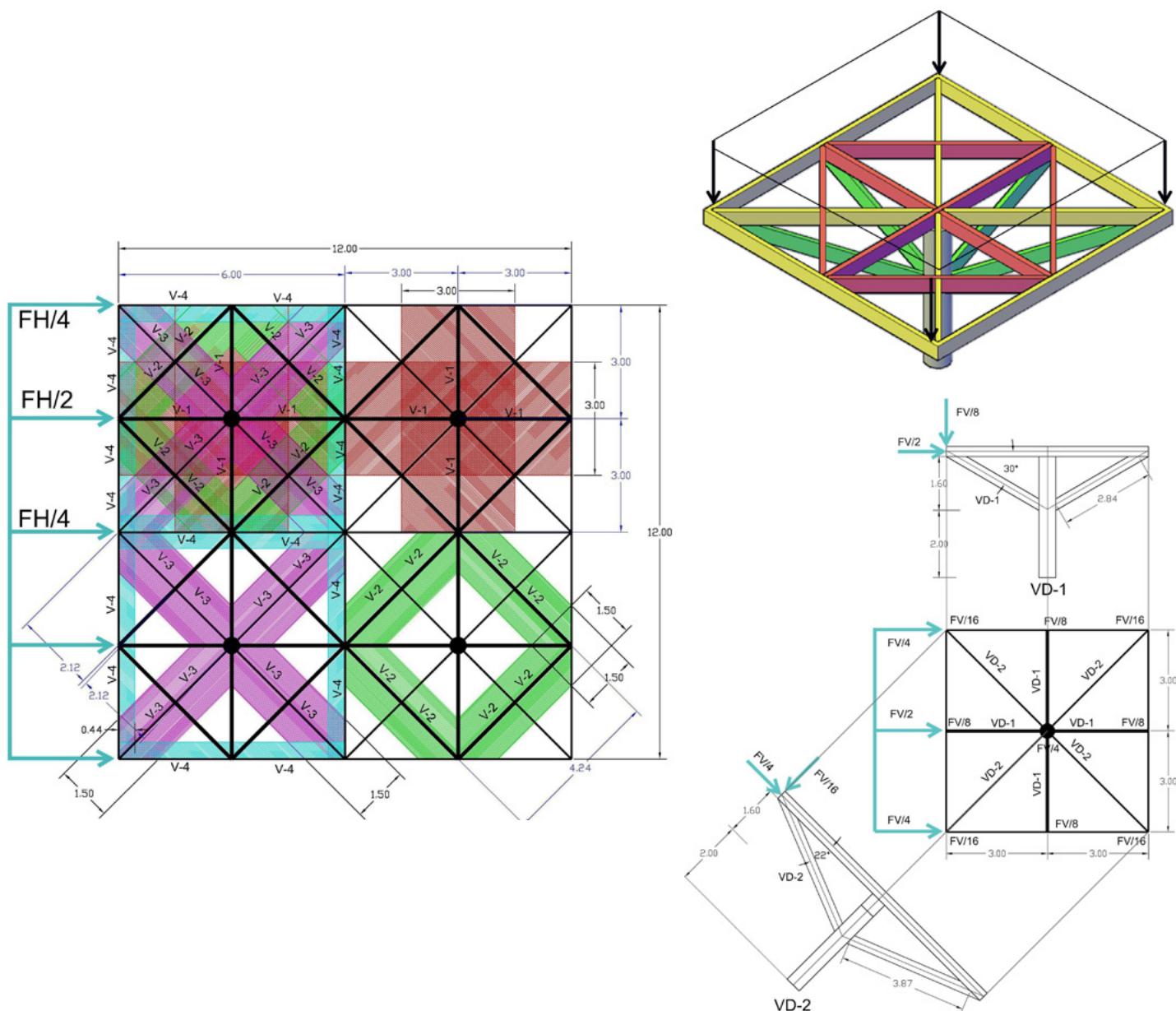


Fig. 2. Isométrico de módulo de cálculo (distribución de las cargas en los elementos resistentes).

Fuente: elaboración propia

B. Comprobación de la sección propuesta para la estructura de forjado (piso) por resistencia al fuego

Según el Código Técnico, Seguridad en caso de Incendio (CTE DB SI) [5] en el añadido E, la resistencia al fuego de las estructuras de madera, en el apartado E2, se plantea el método de la sección reducida: para poder dimensionar la sección, se debe conocerse cuál será su profundidad eficaz de carbonización en caso de que se produzca un incendio de 30 minutos como mínimo (ver tabla 5).

$$\text{def} = \text{dchar,n} + k_0 * d_0.$$

d_0 de valor igual a 7 mm.

k_0 de valor igual a 1 para un tiempo t mayor o igual a 20 minutos.

dchar,n profundidad carbonizada nominal de cálculo.

$$\text{dchar,n} = \beta n t.$$

βn velocidad de carbonización nominal.

t ; tiempo de exposición al fuego.

Tabla 5. Cálculo de resistencia al fuego (cargas)

Do (valor dado)	7	mm
Ko (valor dado para un incendio R60)	1	
Kfi (madera maciza)	1,25	
Kmod (para incendio)	1	
βn (velocidad de carbonización coníferas)	0,7	mm/min
t (tiempo de incendio)	45	min
dchar (profundidad carbonizada)	31,5	mm
dcf (profundidad eficaz de carbonización)	38,5	mm

h propuesta	300	mm
b propuesta	150	mm
Secciones reducidas		
h reducida	268,5	mm
b reducida	118,5	mm
Modulo elástico de la sección reducida		
Wx	1423821,9	mm ³
Wy	628390,7	mm ³
Inercia		
Ix	337500000	mm ⁴
Iy	84375000	mm ⁴

Fuente: elaboración propia.

C. Cálculo estructural y comprobaciones resistentes

Las comprobaciones se harán con base en lo establecido en CTE DB SE-M [1], capítulo 6 y las consideraciones tomadas en cuenta en los apartados 9, 10, 11.

Considerando:

$$\text{Módulo de sección: } W=b*h^2/6$$

$$\text{Momento } M=ql^2/8$$

$$\text{Cortante } V=ql/2$$

$$\sigma_{m,d}=M/W$$

Carga repartida que le transmite el tablero (diáfragma) a la estructura de vigas.

Valores de Kmod favorable y el más desfavorable según la combinación de carga considerando para duración permanente un valor de 0,6 y para duración corta un valor de 0,9.

A continuación, se presentan resultados de la verificación de resistencias de los elementos más solicitados y menos favorables, siendo así, que cada uno cumple con la norma (ver tabla 6).

Tabla 6. Cálculo estructural y comprobaciones

ELU en vigas en plano horizontal (datos de Viga V-1).	
Tracción uniforme paralela a la fibra C-30. Según artículo 6.1.2.	$\sigma_{t,0,d} = 0,13 \text{ N/mm}^2 \leq f_{t,0,d} = 9,97 \text{ N/mm}^2$
Tracción uniforme perpendicular a la fibra C-30. Según artículo 6.1.3.	$\sigma_{t,90,d} = 0,13 \text{ N/mm}^2 \leq f_{t,90,d}$ madera maciza = 0,2 N/mm ²
Compresión uniforme paralela a la fibra C-30. Según artículo 6.1.4.	$\sigma_{c,0,d} = 0,13 \text{ N/mm}^2 \leq f_{c,0,d} = 12,74 \text{ N/mm}^2$
Compresión uniforme perpendicular a la fibra C-30. Según artículo 6.1.5.	$\sigma_{c,90,d} = 0,13 \text{ N/mm}^2 \leq k_{c,90} * f_{c,90,d} = 2,24 \text{ N/mm}^2$
Flexión Simple C-30. Según artículo 6.1.6.	$\sigma_{m,d} = 13,89 \text{ N/mm}^2 \leq f_{m,d} = 16,62 \text{ N/mm}^2$
Cortante C-30. Según artículo 6.1.8.	$\tau_d = 0,39 \text{ N/mm}^2 \leq f_{v,d} = 2,22 \text{ N/mm}^2$
ELS en vigas en plano horizontal (datos de Viga V-1).	
Deformación diferida C-30. Según artículo 7.1 la componente diferida de un desplazamiento.	$\delta_{dif} = \delta_{ini} \cdot \psi_2 \cdot k_{def} = 0,03 \text{ mm}$
ELU envigas en plano vertical (diagonales de compresión Viga Vd-1).	
Compresión uniforme paralela a la fibra C-30. Según artículo 6.1.4	$\sigma_{c,0,d} = 0,27 \text{ N/mm}^2 \leq f_{c,0,d} = 12,74 \text{ N/mm}^2$
Compresión uniforme perpendicular a la fibra C-30. Según artículo 6.1.5	$\sigma_{c,90,d} = 0,27 \text{ N/mm}^2 \leq k_{c,90} * f_{c,90,d} = 2,24 \text{ N/mm}^2$
Flexión Simple C-30. Según artículo 6.1.6.	$\sigma_{m,d} = 4,07 \text{ N/mm}^2 \leq f_{m,d} = 16,62 \text{ N/mm}^2$
ELS en vigas en plano vertical (diagonales de compresión).	
Deformación diferida C-30. Según artículo 7.1 la componente diferida de un desplazamiento.	$\delta_{dif} = \delta_{ini} \cdot \psi_2 \cdot k_{def} = 0,02 \text{ mm}$
ELU en panel de entrepiso.	
Flexión Simple KLH.	$\sigma_{m,d} = 0,41 \text{ N/mm}^2 \leq f_{m,d} = 11,63 \text{ N/mm}^2$
ELS en vigas en plano vertical.	
Deformación diferida.	KLH = 0,06 mm
ELU en vigas en plano horizontal.	
Flexión Simple C-22. Según artículo 6.1.6.	$\sigma_{m,d} = 6,38 \text{ N/mm}^2 \leq f_{m,d} = 12,18 \text{ N/mm}^2$
Resistencia en muros de carga.	
La resistencia al descuadre, F _{v,Rd} , de un muro diafragma que consta de varios paneles con tablero fijado al entramado.	$F_{v,Rd} = 1,62 \text{ N/mm}^2 \leq \Sigma F_{i,v,Rd} = 11,63 \text{ N/mm}^2$
Resistencia de sección de columna de hormigón armado HA-25 (25 MPa = 250 kg/cm²)	
Según la norma EHE-08: se obtendrá la fuerza axial requerida para verificar la sección circular de 500 mm de diámetro y 3,6 m de altura. durabilidad de hasta 20 años, según EHE-08 cap. 6.	$\sigma_{t,0,d} = 1,49 \text{ N/mm}^2 \leq f_{t,d} = 16,67 \text{ N/mm}^2$
Uniones	
Uniones según capítulo 8.3 sin embargo queda fuera del objetivo de este trabajo, por lo tanto, solo se consideran unos parámetros para estimar el número de pernos. Los conectores metálicos galvanizados se estipulan para las uniones. Según especificación de fabricante a revisar en futuro desarrollo.	
Para el detalle de viga y pilar se utilizarán dos placas de acero y pernos pasadores.	
La unión no transmite momento, únicamente para evitar el corrimiento lateral de la viga sobre el pilar, así como para transmitir el cortante al pilar.	
Para determinar el espesor de los pernos, se diseñará las uniones como tipo clavija en cortadura doble.	
Para Cortadura doble.	
d = 14 Diámetro del elemento de sujeción (mm). t1 = 50 Espesor de placas laterales (mm). t2 = 75 Espesor de pieza central (mm). $\rho_k = 480$ Densidad característica de la madera (Kg/m ³). $k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,56$ Valor para (conífera). $\alpha_1 = 90^\circ \quad \alpha_2 = 0^\circ$ Ángulo entre el esfuerzo y la dirección de la fibra.	

Fuente: elaboración propia.

D. Simulación estructural de modelo simplificado

El programa WinEva [17] está destinado al cálculo de las deformaciones elásticas y de los esfuerzos producidos en una estructura de barras, sometida a unas determinadas acciones. Esta estructura de barras tendrá las siguientes características obligatorias:

- Todas las barras serán rectas y de sección constante.
- Cada barra será de un solo material, aunque en una misma estructura podrá haber barras de diferentes materiales, hasta un máximo de diez.
- Todas las barras estarán situadas en un mismo plano.
- Todas las acciones que actúen sobre esta estructura estarán contenidas en el mismo plano.

El campo de aplicación de este programa puede ser tan amplio como lo sea la capacidad de abstracción del usuario delante de una estructura real, sea plana o tridimensional, de barras o de otro tipo de elementos. Ha sido necesario representar y discretizar la estructura real en un conjunto de elementos lineales o barras. Estas barras, que habrían de coincidir con los ejes baricéntricos de las piezas que representan, se conectarán a través de los puntos extremos o nudos.

Utilizando el software WinEva V08 con licencia © Copyright: Ramon Sastre i Sastre, 2019 Universitat Politècnica Catalunya, se realizó una modelación en dos dimensiones para verificar la respuesta de la estructura en el plano en el que actúa un empuje lateral, mayor al considerado por viento, las cargas gravitatorias equivalentes al segundo nivel del edificio y de esta forma, obtener los valores de cortante y momento con los que se comprueba que las secciones estructurales cumplen los valores de resistencia (ver figura 3).

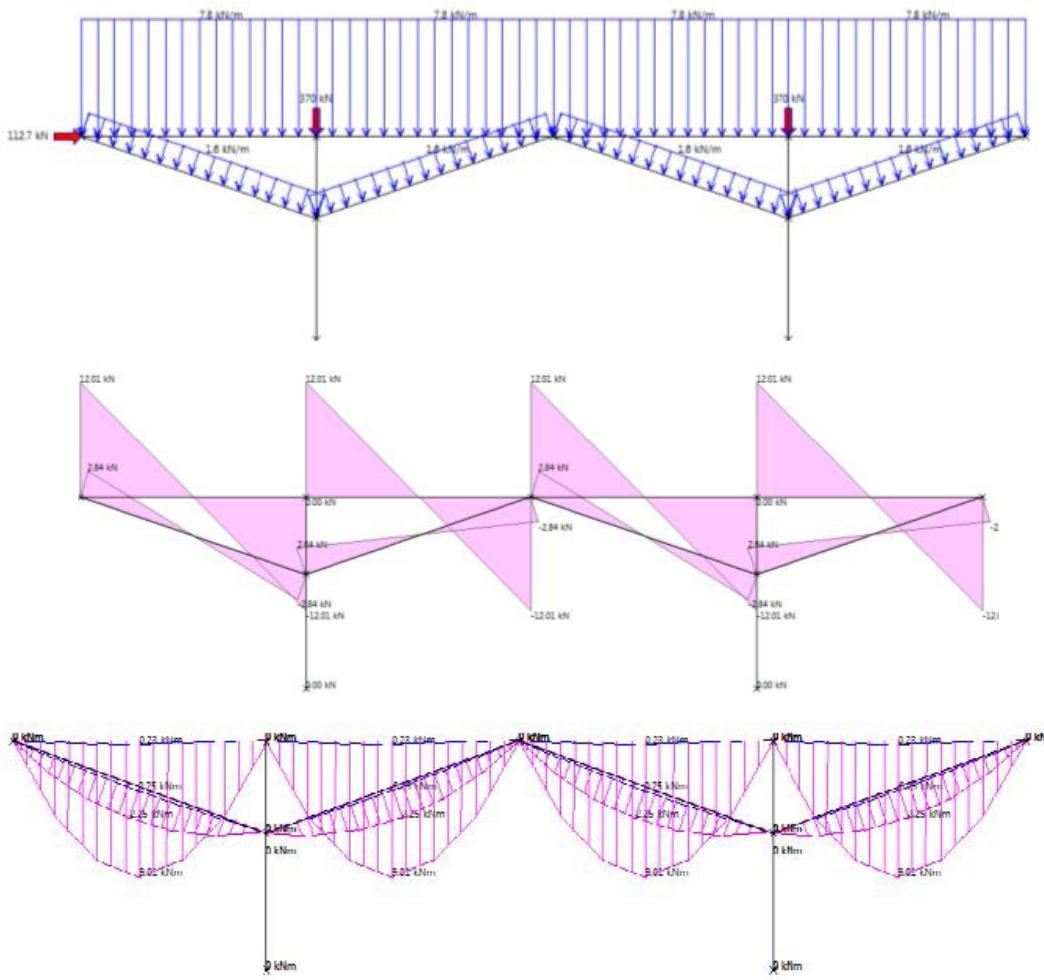


Fig. 3. Simulación de sección estructural.

Fuente: elaboración propia con WinEva [17]

IV. CONCLUSIONES

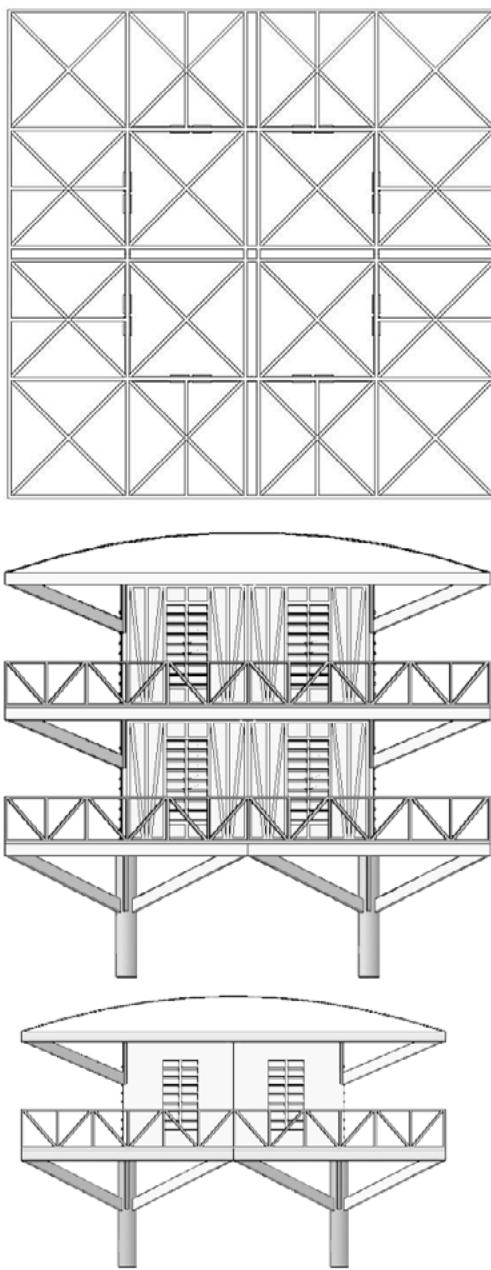


Fig. 4. Proceso de crecimiento.

Fuente: elaboración propia

Las conclusiones son de múltiples dimensiones, concernientes al diseño arquitectónico y a la revisión y verificación del cumplimiento de un estándar para la definición de las secciones de elementos resistentes:

1. El análisis estructural es un medio efectivo para sustentar y corregir el diseño arquitectónico de un prototipo prefabricable.

2. Una estrategia para garantizar la estabilidad de la estructura, es la triangulación en todos los planos, tanto en el horizontal como en vertical, garantizando el arriostramiento y la efectiva transmisión de cargas (ver figura 4).
3. Por los resultados favorables de los cálculos, se prevé el crecimiento de la vivienda de forma vertical hasta un segundo nivel, guardando la simetría en la distribución de muros (ver figura 4).
4. Las secciones propuestas C-22 y C-30 cumplen todos los requerimientos de resistencia y rigidez para lo que están siendo solicitadas en el diseño, sin embargo, se puede verificar si es posible disminuir sección y peso de la estructura en caso de ser un solo nivel.
5. El desempeño de la madera, depende mucho de las medidas de protección contra los agentes que le atacan tal es el caso del fuego y la humedad, ante el fuego se ha diseñado para un incendio de 45 minutos, considerando que el uso es habitacional y que la norma establece un mínimo de 30 minutos, es posible la reducción de sección que redundaría en la optimización en el uso del material.
6. Es posible adaptar el modelo de cálculo a las latitudes de América Central.

V. RECONOCIMIENTOS

La autora agradece las contribuciones de los profesores Dr. Ing. Francesc López Almansa y Arq. Fernando Purroy Narvaiza, por su asesoría en la versión original este documento y agradece la inducción de Dr. Arq. Albert Albareda i Valls y Arq. Jorge Blasco. Un especial agradecimiento al Arq. Arturo Cisneros por su inducción en diseño y construcción en madera.

VI. REFERENCIAS

- [1] G. de E. Ministerio de Fomento, "CTE-DB-SE-M Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Madera." 2009.
- [2] The European Union Per Regulation 305/2011, "Eurocode 5: Design of timber structures. European Standard," 2011.
- [3] G. de E. Ministerio de Fomento, "CTE-DB-SE Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural." 2009.

- [4] G. de E. Ministerio de Fomento, "CTE-DB-SE-AE Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación." 2009.
- [5] G. de E. Ministerio de Fomento, "CTE-DB-SI Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Seguridad en caso de Incendio." 2010.
- [6] H. Hao, K. Bi, W. Chen, T. M. Pham, and J. Li, "Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures," *Eng. Struct.*, vol. 277, p. 115477, 2023.
- [7] M. de O. Públicas, *Norma para el Diseño y Construcción de estructuras de madera*. 1994.
- [8] L. Gustavsson, K. Pingoud, and R. Sathre, "Carbon Dioxide Balance of Wood Substitution: Comparing Concrete- and Wood-Framed Buildings," *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, vol. 11, no. 3, pp. 667-691, 2006.
- [9] L. Rodríguez, J. González, O. París-Viviana, and A. Muros, "Embodied Energy and Embodied Carbon in Different Industrialized Structural Systems Scenarios of a Prototype Building," *ACE Archit. City Environ.*, vol. 16, no. 47, Nov. 2021.
- [10] J. Albus, *Prefabrication and automated processes in residential construction*. Berlin: DOM publishers, 2017.
- [11] J. Albus and P. Meuser, *Prefabricated housing: construction and design manual*. Berlin: DOM publishers, 2018.
- [12] C. M. Hill, "Prefabrication, and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry Smart Market Report." McGraw Hill Construction, New York, 2011.
- [13] Meli R., *Diseño Estructural, segunda edición*, 2º. México: Limusa, 2002.
- [14] T. C. Ting, *Anisotropic elasticity: theory and applications*. New York: Oxford University Press, 1996.
- [15] A. E. de N. y C. AENOR, "Norma UNE 56544:2022 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural." 2022.
- [16] A. E. de N. y C. AENOR, "UNE-EN 336:2014 Madera estructural. Medidas y tolerancias." 2014.
- [17] R. Sastre i Sastre, "WinEva," *WinEva © Copyright*, 2022. [Online]. Available: <https://wineva.upc.edu/esp/InformacionGeneral.php..>

