

# CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EMBEBIDO DE LA EDIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS MATERIALES. CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL Y CONSTRUCCIÓN CON MADERA

## Entidades participantes:



## Autores:

- **José Francisco Traub.** Estudiante de Doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid
- **José Ramón Aira Zunzunegui.** Profesor Contratado Doctor. Escuela de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid
- **Miguel Esteban Herrero.** Profesor Titular de Universidad. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid
- **Agustín Rubio Sánchez.** Catedrático de Universidad. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid
- **Guillermo San Miguel Alfaro.** Profesor Contratado Doctor. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid
- **Raúl Mellizo Robles.** Estudiante de Doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid
- **Sergio Álvarez Gallego.** Profesor Titular de Universidad Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid

*Diciembre 2024*

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 3  |
| 1. Introducción .....   | 5  |
| 2. Material y métodos .....   | 6  |
| 2.1 Descripción del caso de estudio .....                                   | 6  |
| 2.2 Metodología.....  | 6  |
| 2.3 Escenarios de comparación .....   | 9  |
| 2.3.1. Escenario de estimación nacional .....                               | 9  |
| 2.3.2. Escenario de estimación local.....                                   | 9  |
| 2.3.3. Escenario de diseño por un calculista .....                          | 9  |
| 2.4 Medición del beneficio por la construcción con madera .....             | 10 |
| 2.4.1. Efecto directo por sustitución.....                                  | 10 |
| 2.4.2. Efecto directo por absorción.....                                    | 10 |
| 2.4.3. Efectos indirectos por reducción de la cimentación .....             | 10 |
| 3. Resultados .....   | 12 |
| 3.1 Huella de carbono de la edificación convencional .....                  | 12 |
| 3.1.1 Estimación de materiales .....  | 12 |
| 3.1.2 Cálculo de la huella de carbono .....                                 | 12 |
| 3.2 Huella de carbono de la simulación en madera: estimación nacional ..... | 14 |
| 3.3 Huella de carbono de la simulación con madera: estimación local.....    | 16 |
| 3.3.1 Efecto directo por sustitución .....                                  | 16 |
| 3.3.2 Efecto directo por absorción .....                                    | 17 |
| 3.3.3 Efectos indirectos por la reducción en la cimentación .....           | 17 |
| 3.3.4 Resumen efectos en la huella desde la estimación local .....          | 17 |
| 3.4 Escenario de diseño de construcción con madera: calculista .....        | 18 |
| 3.4.1 Estimación de materiales .....  | 18 |
| 3.4.2 Efecto directo por sustitución .....                                  | 20 |
| 3.4.3 Efecto directo por absorción .....                                    | 20 |
| 3.4.4 Efectos indirectos por la reducción en la cimentación .....           | 20 |
| 3.4.5 Resumen efectos en la huella desde el diseño del calculista.....      | 22 |
| 3.5 Comparación de resultados.....  | 23 |
| 4. Discusión .....  | 24 |
| 5. Conclusiones.....  | 26 |
| 6. Bibliografía .....   | 28 |
| 7. Anexos.....  | 29 |

## Resumen

El informe analiza la viabilidad y los beneficios de la construcción con madera como estrategia para la descarbonización del sector de la edificación. Para ello, se emplea un caso de estudio real, un edificio de 234 viviendas con 11 plantas sobre rasante y 2 plantas soterradas localizado en Valdebebas (Madrid). Se compara la huella de carbono del edificio residencial convencional construido en hormigón y acero con una simulación del mismo edificio utilizando madera, realizada por un calculista (escenario 3). En concreto se analiza la huella de carbono de los materiales de construcción, presentes en la fachada, la estructura y la cimentación. Este cálculo de huella tiene por alcance los módulos A1-A3 “cuna a puerta” (cradle-to-gate) de acuerdo a las normas de referencia UNE-EN 15978 y UNE-EN 15804.

El informe destaca tres efectos principales que contribuyen a la reducción de emisiones en la construcción con madera:

1. Efecto directo por sustitución: Reemplazar materiales convencionales como el hormigón y el acero por madera reduce las emisiones, ya que la producción de elementos de madera es menos intensiva en emisiones de carbono que la manufactura de hormigón y acero.
2. Efecto directo por absorción: La madera actúa como sumidero de carbono, absorbiendo CO<sub>2</sub> durante el crecimiento del árbol y almacenándolo en la estructura de los elementos de madera durante su vida útil.
3. Efectos indirectos por reducción de la cimentación: Las estructuras de madera son más ligeras, lo que permite reducir la cantidad de materiales necesarios para la cimentación y, por ende, las emisiones asociadas.

El estudio presenta tres escenarios de cálculo para la simulación de la construcción de edificios en madera:

1. Estimación nacional: Se basa en el análisis de tres proyectos de vivienda colectiva construidos con madera en España.
2. Estimación local: Utiliza datos de 14 edificios construidos con madera en Madrid para estimar la cantidad de madera necesaria en la simulación.
3. Diseño por un calculista: Se basa en un diseño detallado de la estructura de madera del edificio de 234 viviendas con 11 plantas sobre rasante y 2 plantas soterradas localizado en Valdebebas (Madrid), elaborado por el ingeniero José Ramón Aira Zunzunegui, utilizando software de elementos finitos y siguiendo las normas del Eurocódigo 5.

Los resultados del estudio muestran que la construcción con madera puede reducir significativamente la huella de carbono de un edificio. En el escenario de cálculo más preciso, diseñado por el calculista, la huella de carbono total se reduce a 3.952 toneladas de CO<sub>2</sub>e (reducción del 18%), con una huella de carbono biogénico de -7.193 toneladas de CO<sub>2</sub>e. Esto da como resultado una huella de carbono neta -3.241 t CO<sub>2</sub>e y una huella de carbono por superficie construida de -239 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Esto significa que el edificio se convierte en un sumidero neto de carbono, absorbiendo más CO<sub>2</sub> del que emite.

El informe concluye que la construcción con madera de origen sostenible es una alternativa viable y ambientalmente favorable para la descarbonización del sector de la construcción. Se proponen futuras líneas de trabajo para profundizar en el análisis, incluyendo la ampliación de

los límites del sistema, la aplicación de técnicas de análisis input-output, y la verificación externa del estudio.

Es importante tener en cuenta las limitaciones del estudio, que en términos generales corresponden con: (1) la simplificación en la comparación de las características técnicas del hormigón y la madera, (2) el alcance de este (A1-A3) y (3) la especificidad del caso de estudio. El informe reconoce la necesidad de más información sobre los impactos del ciclo de vida de los materiales y procesos en la construcción con madera para mejorar la precisión de los cálculos.

## 1. Introducción

La industria de la construcción junto con el ciclo de vida del entorno edificado representa aproximadamente el 40% de las emisiones globales de carbono (United Nations Environment Programme, 2020). Aunque en los últimos años se ha avanzado en la reducción de las emisiones operativas de los edificios, las emisiones incorporadas en los procesos de construcción, producción y transporte de materiales continúa siendo un desafío crítico para alcanzar sociedades y ciudades con emisiones bajas de carbono.

El empleo de madera industrializada en la construcción puede impulsar de forma decisiva la descarbonización del entorno edificado. La madera es el único material con la capacidad de realizar a gran escala las dos principales estrategias de mitigación del cambio climático (FSC España, 2023). Por un lado, la sustitución tecnológica significa la reducción del impacto ambiental al reemplazar otros materiales más intensivos en carbono. Por otro lado, la absorción en sumideros, dado que el carbono absorbido por el árbol permanece en la madera extraída y puesta en obra durante un largo plazo.

La revisión de la literatura científica sobre el cambio climático y la construcción con madera<sup>1</sup> muestran que los primeros artículos a inicios de los 2000, justo con la puesta en marcha del Protocolo de Kioto y el Comercio Europeo de Derechos de Emisión. Durante la década de 2006 a 2016 se publicó a un ritmo constante de 4 artículos al año. Sin embargo, a partir de 2017 se inicia un crecimiento exponencial que se estabiliza en los años 2022 a 2024 (en curso).

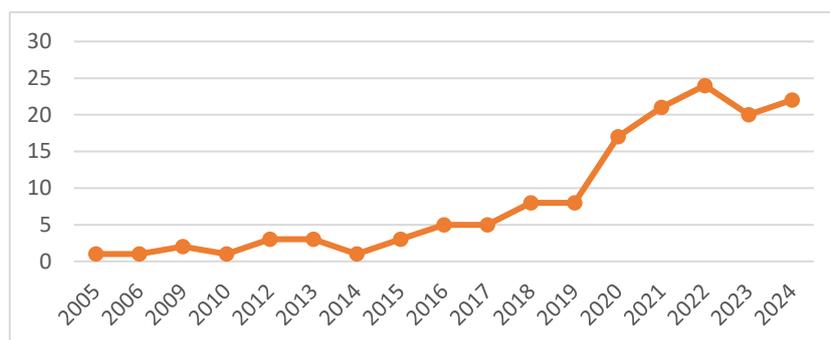


Figura 1. Evolución de los artículos científicos sobre cambio climático y construcción en madera.

El **objetivo de este informe es doble**. En primer lugar, **conocer y cuantificar los beneficios de la construcción con madera analizando para ello un caso de estudio real** que ilustre estos beneficios junto con su viabilidad técnica. En segundo lugar, **trabajar desde un enfoque multidisciplinar que integre conocimientos de diferentes Escuelas de Ingeniería** de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Para la materialización de estos trabajos se firmó el acuerdo de colaboración el 10 de octubre de 2023 entre la Fundación Gómez-Pintado, y Sergio Álvarez Gallego, Investigador Principal designado por la Universidad Politécnica de Madrid.

<sup>1</sup> Búsqueda realizada en la base de datos “Clarivate Analytics Web of Science (WoS)” con contenido: “climate change” y “timber” y “wood” y “construction” y “building”.

## 2. Material y métodos

### 2.1 Descripción del caso de estudio

El caso de estudio real seleccionado es el edificio ubicado en Madrid, calle Félix Candela 6 del barrio de Valdebebas, distrito de Hortaleza, promovido por Vía Ágora. Se trata de una edificación residencial de 11 plantas sobre rasante y dos plantas soterradas, que alberga 234 viviendas, 263 plazas de garaje, 234 trasteros, además de zonas comunes en planta baja y una piscina. Una singularidad del edificio es el uso de una fachada industrializada con estructura de madera fabricada con tecnología *Lignum Tech*.

Este caso real proporciona un contexto adecuado para examinar la integración de la madera en un proyecto de gran envergadura y su impacto tanto en el diseño y construcción como en aspectos de sostenibilidad y eficiencia energética.



Figura 2. Edificio Valdebebas BTR. Fuente: Memoria general del proyecto.

### 2.2 Metodología

La caracterización de los beneficios de la construcción con madera se realiza por medio de la medición de la huella de carbono (UNE-EN ISO 14067). La huella de carbono representa el conjunto de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero que se producen como consecuencia de una actividad (Álvarez, 2021). Para la evaluación de la huella de carbono se aplica la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con las correspondientes 4 etapas: (1) definición de objetivos y alcance, (2) inventario del ciclo de vida, (3) evaluación de impacto del ciclo de vida y (4) interpretación.

Para asegurar la precisión y consistencia se han utilizado como referencia las normas UNE-EN 15978 y UNE-EN 15804<sup>2</sup>, ambas enfocadas en la sostenibilidad en la construcción. La norma UNE-EN 15978 proporciona un marco detallado para la evaluación del desempeño ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida, mientras que la UNE-EN 15804 define las reglas de producto específicas para los materiales de construcción. Estas normas han sido fundamentales para estructurar el análisis y garantizar que los resultados sean comparables y alineados con los estándares internacionales de sostenibilidad en el sector.

La evaluación de beneficios se debe realizar por medio de la comparación de la huella de carbono de la edificación construida (edificio convencional realizado con hormigón y acero) y la huella de carbono de la edificación en madera de origen sostenible con las mismas características. Además, esta evaluación asume la sustituibilidad de materiales de construcción (convencionales y biogénicos) en función de sus propiedades técnicas, como las propiedades mecánicas, la durabilidad, el tiempo de vida útil de los materiales y otros criterios técnicos que aseguren el cumplimiento de los requisitos funcionales y normativos del edificio.

A continuación, se describe la metodología aplicada para las 4 etapas del ACV:

#### 1. Definición de objetivos y alcance

El enfoque de ACV permite evaluar el impacto ambiental de cada etapa del ciclo de vida del edificio, desde la extracción y procesamiento de los materiales hasta su puesta en obra, construcción, uso, mantenimiento y fin de vida de la edificación. Los límites del sistema analizado en el presente informe incluyen las materias primas principales utilizadas en los capítulos constructivos descritos como “Fachada”, “Estructura” y “Cimentación”. Es decir, se centra en las emisiones asociadas a la producción de acero, hormigón y madera utilizados en la construcción de los distintos escenarios analizados.

Dado el cumplimiento de las normativas UNE-EN 15978 y UNE-EN 15804, se incluyen las emisiones de los siguientes tres módulos, correspondientes a la etapa de producción de los materiales de construcción, de alcance de “cuna a puerta” (cradle-to-gate):

- A1 (Extracción de Materias Primas): Emisiones generadas durante la extracción y procesamiento de las materias primas requeridas para fabricar los materiales de construcción.
- A2 (Transporte): Emisiones asociadas al transporte de estas materias primas desde los lugares de extracción hasta las instalaciones de producción del material.
- A3 (Fabricación): Emisiones producidas en el proceso de fabricación de los materiales de construcción que se emplearán en el edificio.

Al limitar el análisis a estos módulos, el informe se focaliza en el impacto ambiental inicial de los materiales antes de su llegada al sitio de construcción, permitiendo una comparación directa del impacto de los materiales convencionales frente a los de madera en términos de emisiones incorporadas en las primeras fases del ciclo de vida del edificio.

Se han excluido del alcance de este estudio los procesos de transporte de los materiales al lugar de construcción (módulo A4), la energía necesaria para las actividades de construcción del edificio (módulo A5), la etapa de uso del edificio (B1-B7) y la etapa de fin de vida del edificio (módulos C1-C4). Sin embargo, cabe destacar que, de haberse considerado estos módulos, los

---

<sup>2</sup> Norma ISO 15804:2012+A2:2020

resultados del análisis habrían mostrado aún mayores beneficios de la construcción con madera en comparación con la construcción convencional. Esto se debe al menor peso de los materiales utilizados en la construcción con madera, lo que reduce las emisiones asociadas al transporte; al menor tiempo requerido para el proceso constructivo, disminuyendo la energía utilizada; y a una mayor tasa de recuperación y reciclaje de los residuos generados, que contribuye a una gestión más eficiente y sostenible de los materiales.

## 2. Análisis de inventario del ciclo de vida

Para la elaboración del inventario se ha optado por la metodología de Análisis de Procesos, técnica más ampliamente utilizada en los estudios de ACV que describen las unidades de entrada al sistema en unidades físicas. Estas técnicas de elaboración y evaluación del inventario se pueden complementar con técnica de Análisis de Input-Output que permite evaluar entradas en unidades económicas. Sin embargo, esta técnica no ha sido implementada para el presente estudio.

Las fuentes de información consultadas para la elaboración de los inventarios han sido las cantidades y tipos de materiales descritos en:

- Archivo Presto: Se han consultado los Capítulos 4, 5 y 6 del archivo, correspondientes a Cimentación, Estructura y Fachadas. Partidas de cantidad de material utilizado. Se excluye el concepto de “mano de obra”.
- CYPE Ingenieros, S.A.<sup>3</sup>: Se han consultado en esta base de datos abierta las partidas del archivo Presto que no entregan el material total utilizado de acero u hormigón.
- Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM): Información de cantidad de madera utilizada (m<sup>3</sup>) y superficie construida (m<sup>2</sup>) en 14 edificios construidos en la Comunidad de Madrid entre los años 2015 y 2024.

## 3. Evaluación de impacto del ciclo de vida

La evaluación del inventario se ha realizado mediante los factores de emisión que han cumplido con los mejores criterios de representación geográfica, temporal y tecnológica. En este sentido, los factores de emisión fueron seleccionados de bases de datos reconocidas a nivel internacional y de declaraciones ambientales de producto (DAP) que más se acercan a los materiales utilizados en los escenarios analizados. Para todos los casos se han empleado los factores que describen el potencial de calentamiento global a 100 años (GWP100) definido por el IPCC (Assessment Report 6).

A continuación, se describen las bases de datos de factores de emisión utilizadas:

- Declaraciones ambientales de producto (Lignum Tech 2022, CLT de Finsa 2023, MLE de Moretti 2024, DAP sectorial de hormigón ANEFHOP 2023)
- Industrial Design & Engineering Materials Database 2023 (IDEMAT)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

---

<sup>3</sup><https://info.cype.com/es/software/generador-de-precios/>

## 2.3 Escenarios de comparación

La estimación del edificio en madera se ha realizado en función de diferentes hipótesis y trabajos de simulación que se han denominado escenarios. A continuación, se describen los 3 escenarios sobre los que se ha trabajado.

### 2.3.1. Escenario de estimación nacional

En el primer escenario se analizan tres casos de estudio publicados en el Informe 2023–2024 de Mass Madera. Estos tres proyectos de vivienda colectiva y urbana construidos con estructura de madera, establecen una comparativa de las emisiones de carbono centrándose en la estructura, responsable del 34% de las emisiones del edificio. Para su análisis, se ha utilizado el software de cálculo One Click LCA que reemplaza el material estructural de madera por hormigón y acero.

### 2.3.2. Escenario de estimación local

El segundo escenario realiza una estimación de la huella de carbono empleando los datos de 14 edificios construidos con madera entre los años 2015 y 2024, ubicados en la ciudad de Madrid y visados por el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Esta información proporciona una base de referencia más amplia y contextualizada.

### 2.3.3. Escenario de diseño por un calculista

Este tercer escenario se basa en un diseño detallado de una estructura de madera elaborado por un calculista especializado. Al utilizar un diseño estructural optimizado y específico para el mismo edificio con madera, este escenario permite una evaluación más precisa y realista de la huella de carbono. Para ello se ha utilizado el software de elementos finitos Dlubal RFEM (v.5.3531). La comprobación de la estructura se realizó siguiendo las bases de cálculo recogidas en la versión española del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995:2016). Las acciones se tomaron del Código Técnico de la Edificación, concretamente del CTE-DB-SE-AE.

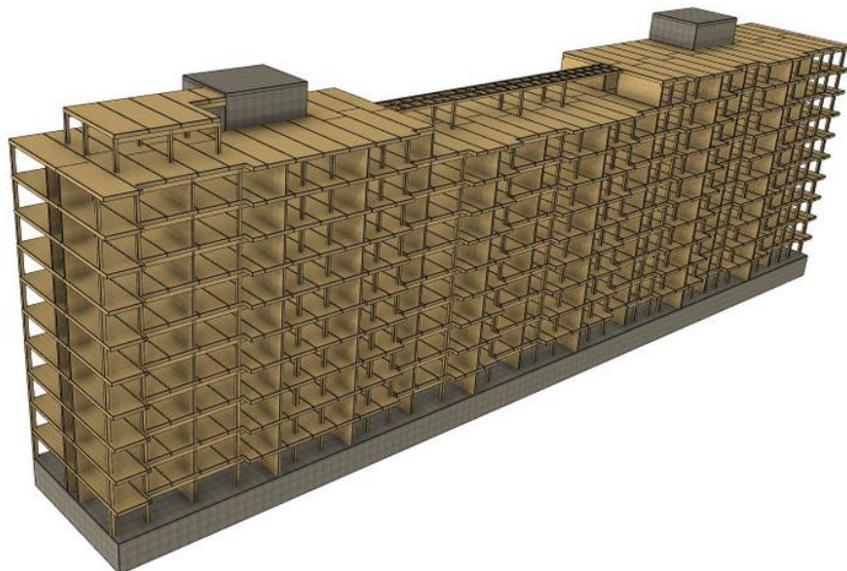


Figura 3. Modelo 3D del edificio (Cadwork v.30) del diseño en madera de calculista. Fuente: propia.

## 2.4 Medición del beneficio por la construcción con madera

En el análisis de los beneficios por la construcción con madera se consideran tres efectos clave que contribuyen a la reducción de emisiones en comparación con los métodos constructivos convencionales. Estos tres efectos permiten una evaluación integral de los beneficios ambientales de la construcción con madera, demostrando su potencial para contribuir a la descarbonización de la edificación.

### 2.4.1. Efecto directo por sustitución

Este efecto se refiere a la disminución de emisiones que resulta de reemplazar materiales de construcción convencionales, como el hormigón y el acero, por madera. La producción de elementos de madera, al ser menos intensiva en carbono, genera menores emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con la fabricación y procesamiento de materiales convencionales, logrando así una reducción directa en la huella de carbono del edificio.

### 2.4.2. Efecto directo por absorción

La madera actúa como un sumidero de carbono natural, ya que los árboles absorben CO<sub>2</sub> de la atmósfera durante su crecimiento y lo almacenan en su estructura en forma de materia orgánica. El cálculo de la cantidad de carbono almacenado en la madera utilizada en la construcción se ha realizado de dos formas: (1) utilizando los factores de emisión obtenidos en las Declaraciones Ambientales de Producto, correspondiente al indicador “Potencial de calentamiento global – biogénico” y (2) utilizando el método de cálculo indicado en la Norma EN 16449:2014, la cual establece los métodos específicos para estimar el contenido de carbono en productos de madera. Este efecto permite que la madera incorporada en la edificación retenga carbono de manera estable durante la vida útil del edificio, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono global del proyecto.

El cálculo se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{CO_2} = \frac{44}{12} \times cf \times \frac{\rho_{\omega} \times V_{\omega}}{1 + \omega}$$

Donde:

$P_{CO_2}$  es el carbono biogénico en forma de dióxido de carbono contenido en la madera (expresado en kg CO<sub>2</sub>)

$cf$  es la fracción de carbono de la biomasa (valor por defecto de 50%)

$\omega$  es el contenido de humedad del producto (%)

$\rho_{\omega}$  es la densidad de la biomasa, a dicho contenido de humedad (kg/m<sup>3</sup>)

$V_{\omega}$  es el volumen del producto, a dicho contenido de humedad (m<sup>3</sup>)

### 2.4.3. Efectos indirectos por reducción de la cimentación

Las estructuras de madera suelen ser más ligeras que las construidas con materiales convencionales, lo que puede disminuir significativamente las necesidades de cimentación del edificio. Este efecto indirecto reduce tanto la cantidad de materiales necesarios para la cimentación como las emisiones asociadas a su producción y transporte, sumando una reducción adicional en la huella de carbono total del proyecto.



### 3. Resultados

#### 3.1 Huella de carbono de la edificación convencional

##### 3.1.1 Estimación de materiales

En la siguiente tabla se presentan la cantidad de material utilizado en el capítulo 4 “Cimentación”, capítulo 5 “Estructura” y capítulo 6 “Fachadas” analizados en este informe. Esta información procede del proyecto de ejecución del edificio de referencia y construido con un sistema estructural convencional.

Tabla 1. Estimación de materiales para la edificación convencional.

| Material             | Unidad         | Capítulo 4<br>Cimentación | Capítulo 5<br>Estructura | Capítulo 6<br>Fachadas | Total   |
|----------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|---------|
| Acero                | kg             | 249.767                   | 428.538                  | 94                     | 678.400 |
| Hormigón             | m <sup>3</sup> | 1.789                     | 4.979                    |                        | 6.768   |
| Hormigón armado      | m <sup>3</sup> | 1.897                     | 799                      | 39                     | 2.735   |
| Madera               | kg             |                           |                          | 258.467                | 258.467 |
| Cemento-madera       | kg             |                           |                          | 225.508                | 225.508 |
| Plástico             | kg             |                           |                          | 8.326                  | 8.326   |
| Lana de roca         | kg             |                           |                          | 62.709                 | 62.709  |
| Acero/aluminio       | kg             |                           |                          | 13.964                 | 13.964  |
| Panel fachada ligera | m <sup>2</sup> |                           |                          | 1.346                  | 1.346   |

##### 3.1.2 Cálculo de la huella de carbono

En la siguiente tabla se presentan las emisiones asociadas a cada uno de los materiales utilizados en la construcción del edificio dentro del capítulo 4 “Cimentación”, capítulo 5 “Estructura” y capítulo 6 “Fachadas”. Los valores se presentan en kilogramos de CO<sub>2</sub>e. Los factores de emisión se encuentran en el apartado 7. Anexos.

Tabla 2. Huella de carbono de la edificación convencional por material utilizado (kg CO<sub>2</sub>e).

| Material             | Capítulo 4<br>Cimentación | Capítulo 5<br>Estructura | Capítulo 6<br>Fachadas | Total            |
|----------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|------------------|
| Acero                | 586.953                   | 1.007.065                | 221                    | 1.594.240        |
| Hormigón             | 488.520                   | 1.359.150                |                        | 1.847.669        |
| Hormigón armado      | 719.153                   | 303.089                  | 14.802                 | 1.037.044        |
| Panel fachada ligera |                           |                          | 5.978                  | 5.978            |
| Fachada Lignum Tech  |                           |                          | 326.986                | 326.986          |
| <b>Total</b>         | <b>1.794.626</b>          | <b>2.669.304</b>         | <b>347.988</b>         | <b>4.811.917</b> |

Dentro de los capítulos analizados, la huella de carbono de los materiales de construcción se presenta en la Figura 4. En primer lugar, el hormigón, que representa el 60% de las emisiones asociadas a materiales (suma de 38% y 22%). En segundo lugar, el acero con el 33% de las emisiones. Los demás materiales analizados en estos capítulos representan menos del 7% de las emisiones asociadas a materiales.

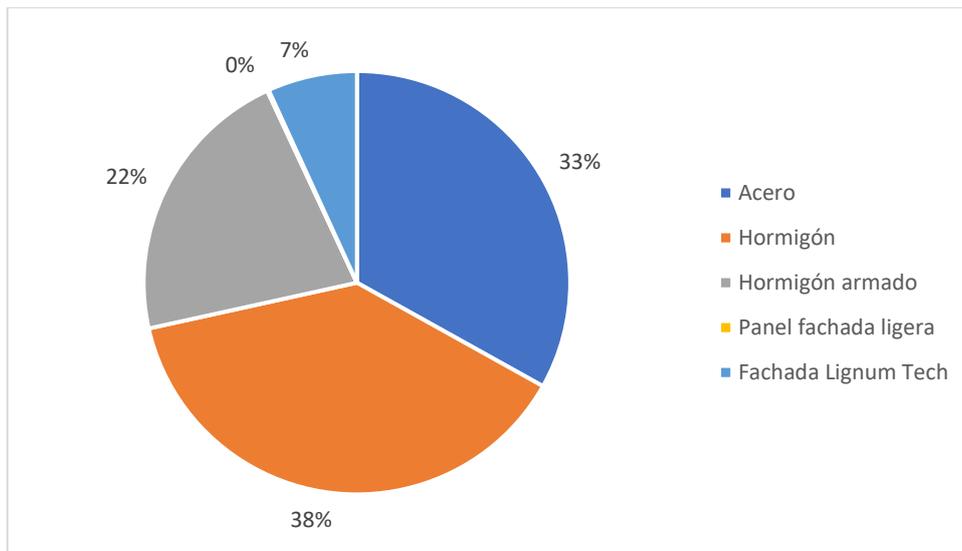


Figura 4. Proporción de emisiones asociadas a materiales de construcción. Fuente: propia.

Con respecto a los capítulos analizados, en primer lugar, está el capítulo 5 correspondiente a la estructura del edificio con el 56% de las emisiones. En segundo lugar, el capítulo 4 de la cimentación con el 37% del total. En tercer lugar, el capítulo 6 correspondiente a la fachada con el 7% de las emisiones totales provenientes de los materiales de la construcción.

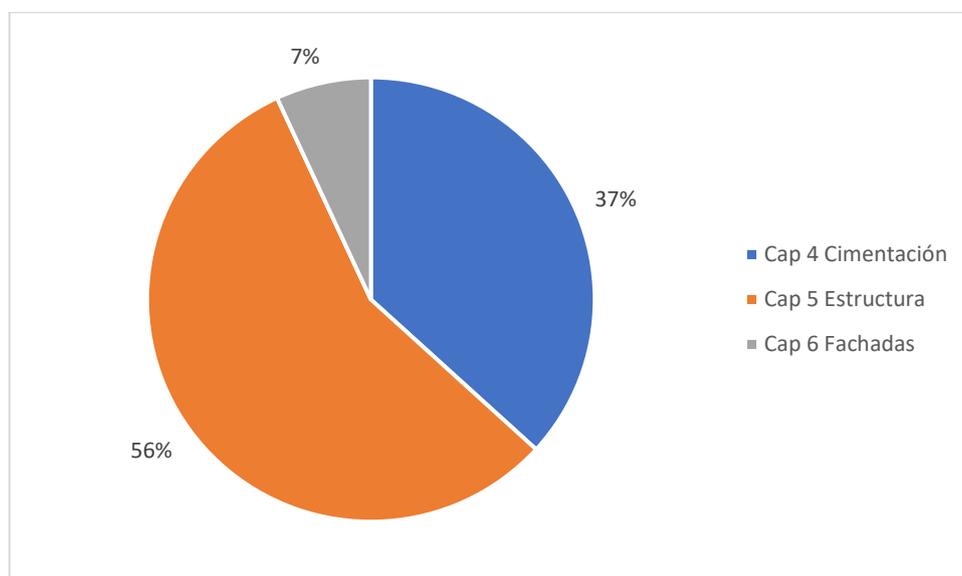


Figura 5. Huella de carbono según capítulo de construcción. Fuente: propia.

Finalmente, el valor de la huella emitida por la producción y compra de los materiales de construcción es de 4.812 t CO<sub>2</sub>e.

a) Absorciones

En los materiales de los capítulos analizados se ha identificado que el sistema constructivo de la fachada Lignum Tech incorpora un porcentaje de material biogénico (madera). De acuerdo con la Declaración Ambiental de Producto es posible calcular la absorción del carbono almacenado en la madera. A partir de los m<sup>2</sup> de fachada industrializada Lignum Tech incorporados al proyecto (8.673,38 m<sup>2</sup>), se calcula que la absorción de CO<sub>2</sub>e alcanza las 866 t.

b) Huella neta

A partir de las emisiones y absorciones de los materiales de construcción utilizados en los capítulos analizados en este estudio se obtiene lo siguiente:

$$\text{Huella neta (t CO}_2\text{e)} = \text{emisiones} + \text{absorciones} = 4.812 \text{ t CO}_2\text{e} - 866 \text{ t CO}_2\text{e}$$

Finalmente, la huella neta del escenario de edificación convencional es de 3.946 t CO<sub>2</sub>e. Así, se obtiene un valor de huella de carbono por superficie construida: 291 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> construido.

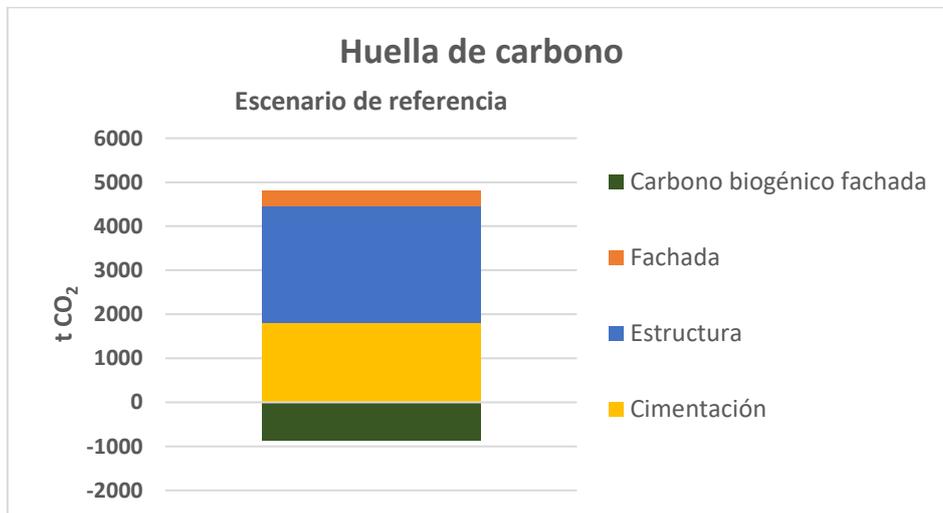


Figura 6. Huella de carbono edificación convencional.

### 3.2 Huella de carbono de la simulación en madera: estimación nacional

Un aspecto fundamental para medir el impacto efectivo del uso de madera maciza en edificación en España es el análisis comparativo de las emisiones de carbono. Esto se ilustra en el Informe 2023-2024 de MASS MADERA mediante tres proyectos de vivienda colectiva y urbana construidos con estructura de madera. Se establece una comparativa de las emisiones de carbono centrándose en la estructura, responsable del 34% de las emisiones del edificio. Utilizando el software de cálculo One Click LCA que reemplaza el material estructural de madera por hormigón y acero, se demuestra cómo las emisiones son superiores en un 155% en el primer caso (hormigón) y un 213% para en el segundo (acero).

Los proyectos a evaluar fueron: “Our Shelves Houses” (Madrid, 2015) de 995 m<sup>2</sup> de superficie, “La Borda” (Barcelona, 2018) de 3.071 m<sup>2</sup> de superficie y “Terrazas para la Vida” (Barcelona, 2024) de 3.759 m<sup>2</sup> de superficie construida.

El análisis abarca los escenarios A1, A2 y A3 (cradle-to-gate) y aborda los impactos medioambientales de un material o producto a la salida de fábrica y listo para ser enviado a

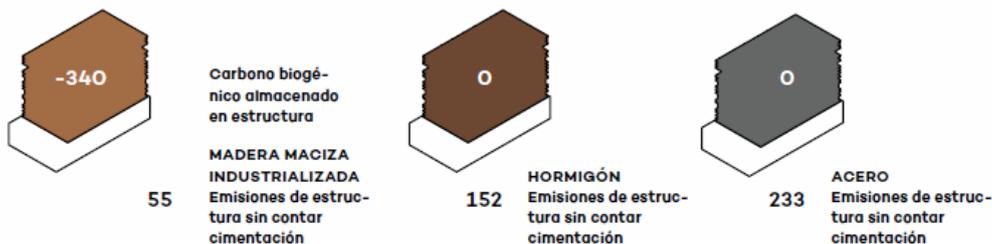
obra, incluyendo la extracción de materias primas a fábrica y las emisiones de fabricación. Además, este análisis se complementa con una comparación de emisiones entre los edificios de madera maciza industrializada y dos edificios equivalentes, construidos uno con hormigón armado y el otro con acero.

Los parámetros utilizados para el escenario del edificio análogo para los casos de hormigón armado constan de una distancia máxima entre columnas de 7,5 m. Los forjados intermedios son losas de hormigón in situ C25/30 con bloques huecos cerámicos, de 340 mm de canto. Las columnas son in situ, 400 × 400 mm, C30/37. De igual manera consta de un muro portante de hormigón armado de 300 mm, al igual que vigas de hormigón in situ, 300 × 400 mm, C30/37.

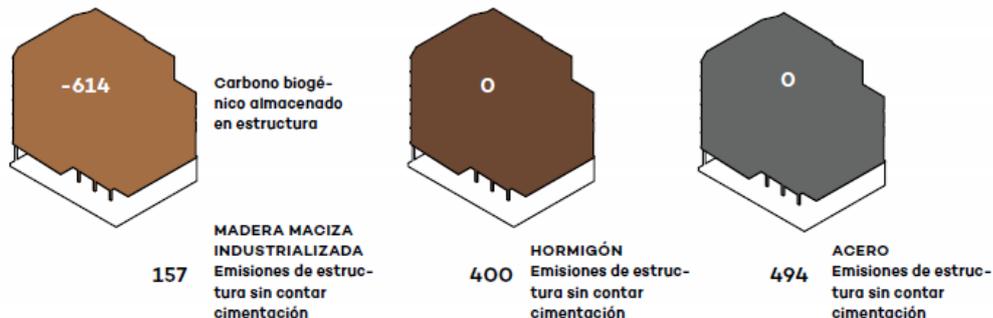
El escenario de un edificio con una estructura portante de acero asume una distancia máxima entre soportes de 9 m. Los forjados intermedios se componen de un forjado mixto acero-hormigón, 150 mm de canto, C 30/37, excluyendo el marco estructural. Columnas de acero, UC 254 × 254 × 73, S355. Arriostramiento de acero contra el viento, en forma de X, por metros cuadrados de superficie de pared exterior, SHS100 × 12,5. Piezas de conexión de acero para la estructura. Vigas de acero, UB 406 × 178 × 60, S355. Vigas secundarias de acero, UB 305 × 127 × 37, S355.

### OUR SHELVES HOUSES

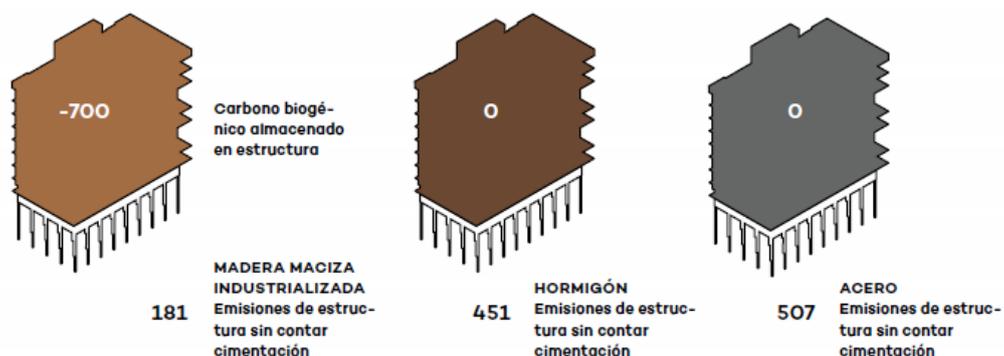
Emisiones medidas en Tn CO<sub>2</sub>e



### LA BORDA



### TERRAZAS PARA LA VIDA



De acuerdo con este análisis, la estimación de la huella de carbono de la estructura para una construcción con madera se reduciría un 35% en comparación con la construcción convencional de hormigón armado.

### 3.3 Huella de carbono de la simulación con madera: estimación local

#### 3.3.1 Efecto directo por sustitución

En primer lugar, se necesita estimar la cantidad de madera que se utilizaría en un diseño de un edificio de similares características. Para ello, se han empleado datos de 14 edificios construidos con madera ubicados en la ciudad de Madrid y visados por el Colegio de Arquitectos de Madrid. En la siguiente figura se presenta una correlación entre la cantidad de madera utilizada y la superficie construida del edificio.

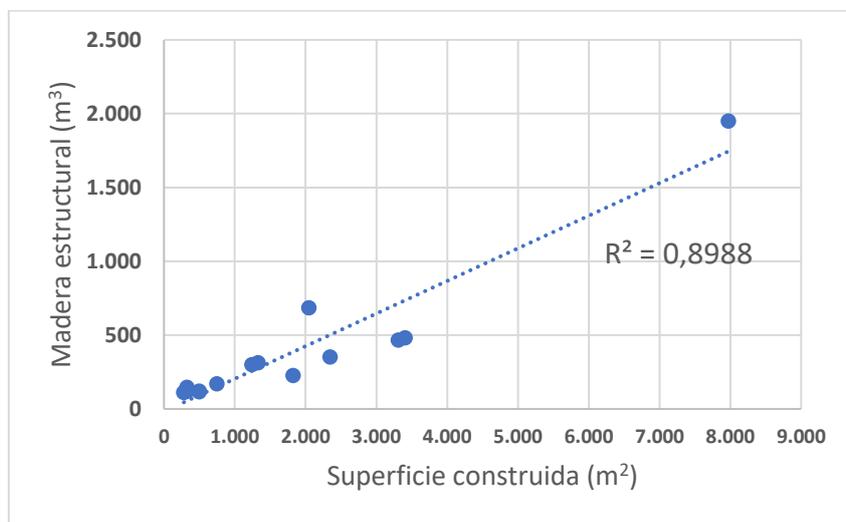


Figura 8. Distribución según variables de superficie construida y madera estructural. Fuente: Elaboración propia.

A partir de este estudio, se han obtenido distintos factores según las categorías de edificios analizados. Estos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Factores calculados de cantidad de madera por unidad de superficie.

|  |       |
|--|-------|
| Factor promedio (m³/m²)                | 0,251 |
| Factor edificios residenciales (m³/m²) | 0,208 |
| Factor edificios 3+ plantas (m³/m²)    | 0,229 |
| Factor edificios 5+ plantas (m³/m²)    | 0,239 |

Para el presente estudio se han utilizado como referencia los datos de edificios de 5 plantas o más: 0,239 m³/m². A partir de este factor, se obtienen 3.238 m³ de madera para la nueva estructura del edificio de referencia. Con una densidad de CLT de 515 kg/m³ (DAP Finsa 2023) se obtienen 1.667.570 kg de madera.

Adicionalmente, se ha estimado que la cantidad de herrajes utilizados en las uniones de la nueva estructura alcanza el 10% del total del peso de la estructura, lo que corresponde a 166.757 kg de acero.

Así, se obtiene una huella de carbono de 1.132,9 t CO<sub>2</sub>e, que se compone del siguiente resultado:

Tabla 4. Huella de carbono estructura desde la estimación local.

|   |                |
|---|----------------|
| Huella de carbono estructura madera CLT (t CO <sub>2</sub> e) | 741,1          |
| Huella de carbono herrajes (t CO <sub>2</sub> e)              | 391,9          |
| <b>Huella de carbono total estructura (t CO<sub>2</sub>e)</b> | <b>1.132,9</b> |

Finalmente, el efecto directo por sustitución es de -1.536 t CO<sub>2</sub>e, valor que proviene de la resta de la huella de la estructura de la construcción convencional y de la huella de la estructura recién estimada. Esta es una disminución del 60% sobre el escenario de construcción convencional.

### 3.3.2 Efecto directo por absorción

A partir de la ecuación descrita en la metodología de acuerdo a la Norma EN 16449:2014, es posible calcular las absorciones de la madera de la nueva estructura. Se utilizan los siguientes valores:

- $\omega$  contenido de humedad del producto: 12%
- $\rho_{\omega}$  densidad de la biomasa, a dicho contenido de humedad: 515 kg/m<sup>3</sup>
- $V_{\omega}$  volumen del producto, a dicho contenido de humedad: 3.238 m<sup>3</sup>

Finalmente, las absorciones durante el ciclo de vida de la madera de la nueva estructura corresponden a -2.730 t CO<sub>2</sub>e.

### 3.3.3 Efectos indirectos por la reducción en la cimentación

De acuerdo con el estudio de Mass Madera (2023), la construcción con madera permite reducir el hormigón de la cimentación entre un 50 y 75% debido a la reducción en el peso del edificio.

En este estudio se ha optado por disminuir la cimentación en un 22%, debido a que gran parte de la cimentación del diseño original está asociada a la urbanización alrededor del edificio y a la contención del terreno. Así se obtienen emisiones generadas por los materiales de la nueva cimentación de 1.400 t CO<sub>2</sub>e que corresponde a una disminución del 22% sobre el escenario de construcción convencional.

Finalmente, el efecto indirecto por reducción en la cimentación es de -395 t CO<sub>2</sub>e, valor proveniente de la resta entre la huella de la cimentación de la construcción convencional y la huella de la cimentación recién estimada

### 3.3.4 Resumen efectos en la huella desde la estimación local

De esta forma, se obtienen los siguientes valores de los efectos en la huella de carbono del edificio por la construcción con madera:

- Efecto sustitución: -1.536 t CO<sub>2</sub>e
- Efecto absorción: -2.730 t CO<sub>2</sub>e
- Efecto reducción en cimentación: -395 t CO<sub>2</sub>e
- Efecto total de mitigación por la construcción con madera: -4.661 t CO<sub>2</sub>e

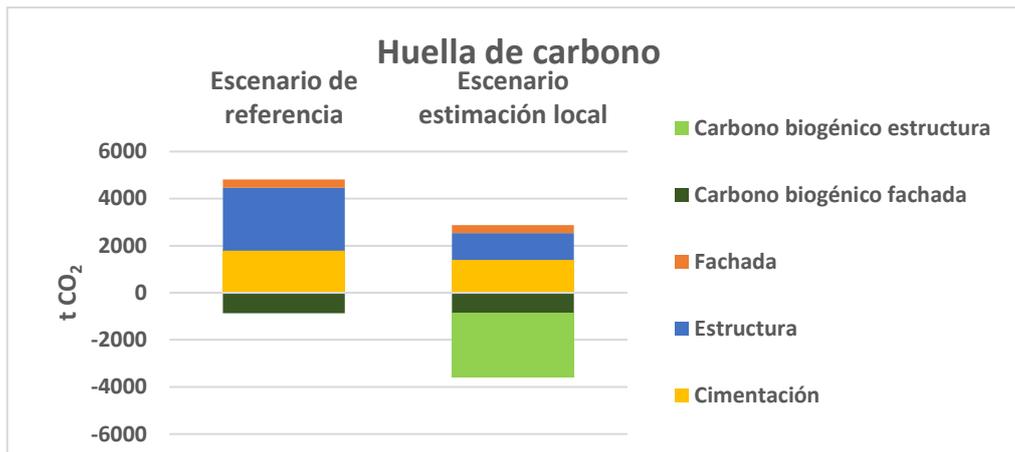


Figura 9. Huella de carbono de la simulación con madera desde la estimación local

A continuación, se muestran los valores finales de la huella de carbono del edificio en el escenario de estimación local, considerando estructura, cimentación y fachada.

- Huella de carbono total: 2.881 toneladas de CO<sub>2</sub>e.
- Huella de carbono biogénico: -3.596 toneladas de CO<sub>2</sub>e capturadas gracias al uso de madera.
- Huella de carbono neto: -715 toneladas de CO<sub>2</sub>e neto (balance total de emisiones de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta la captura de carbono biogénico)

Finalmente, se obtiene un valor de huella de carbono por superficie construida: -53 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> construido.

### 3.4 Escenario de diseño de construcción con madera: calculista

Este tercer escenario se basa en un diseño detallado de una estructura de madera elaborado por José Ramón Aira, calculista especializado. Al utilizar un diseño estructural optimizado y específico para un edificio de madera, este escenario permite una evaluación más precisa y realista de la huella de carbono que los dos escenarios anteriores.

El nuevo diseño está basado en una solución mixta, con 2 núcleos de hormigón desde el suelo hasta la cubierta que aprovechan la caja de escaleras y ascensores. La estructura de los forjados y de los muros entre viviendas y pasillo central están contruidos con tablero contralaminado (CLT). Cuenta con pilares y jácenas de madera laminada encolada (MLE) ubicados en la zona de la envolvente para apoyar los tableros del forjado.

La comprobación de la estructura se realizó siguiendo las bases de cálculo recogidas en la versión española del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995:2016). Las acciones se tomaron del Código Técnico de la Edificación, concretamente del CTE-DB-SE-AE. Todos los elementos de madera se encuentran en el interior del edificio que se corresponde con una clase de servicio 1.

#### 3.4.1 Estimación de materiales

A continuación, se describen las secciones resultantes:

- Pilares plantas 1-2-3 y 4: MLE de sección 320x320 mm y clase resistente GL24h.
- Pilares plantas 5-6 y 7: MLE de sección 280x280 mm y clase resistente GL24h.
- Pilares plantas 8-9 y Ático: MLE de sección 240x240 mm y clase resistente GL24h.
- Vigas: MLE de sección 240x400 mm y clase resistente GL24h.

- Forjados: CLT de espesor 340 mm (80-60-60-60-80) formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal siguiendo la máxima luz de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas coincide con la dirección longitudinal del tablero.
- Muros plantas 1-2-3 y 4: CLT de espesor 240 mm (60-40-40-40-60) formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal paralela al suelo, de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas es perpendicular a la dirección longitudinal del tablero.
- Muros plantas 5-6 y 7: CLT de espesor 200 mm (40-40-40-40-40) formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal paralela al suelo, de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas es perpendicular a la dirección longitudinal del tablero.
- Muros plantas 8-9 y Ático: CLT de espesor 160 mm (40-20-40-20-40) formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal paralela al suelo de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas es perpendicular a la dirección longitudinal del tablero.

De acuerdo con esta configuración, a continuación se resume la cantidad de materiales empleados en el modelo:

a) Cantidad de madera

*Tabla 5. Madera utilizada en el diseño.*

| Material | Bruto (m <sup>3</sup> ) | Neto (m <sup>3</sup> ) | Pérdida |
|----------|-------------------------|------------------------|---------|
| CLT      | 11.313,28               | 7.563,96               | 33,14%  |
| MLE      | 317,26                  | 292,50                 | 7,80%   |
| Total    | 11.630,54               | 7.856,46               | 32,45%  |

Se considera: Tablero contralaminado (CLT) con todas las láminas de clase resistente C24 acorde con la norma UNE-EN 338:20216. Fabricante: Xilonor (Finsa). Madera Laminada Encolada (MLE) de clase resistente GL24h acorde con la norma UNE-EN 14080:2013.

Considerando una densidad del CLT de 515 kg/m<sup>3</sup> y de la MLE de 420 de kg/m<sup>3</sup>, se obtiene un peso de la madera de 4.018.289,4 kg.

b) Cantidad de acero para herrajes:

*Tabla 6. Acero utilizado en el diseño.*

| Unidades | Peso acero (kg) |
|----------|-----------------|
| 490.051  | 23.606,90       |

Se ha considerado una densidad del acero para los herrajes de 8.000 kg/m<sup>3</sup>. Como resultado, el peso de la cantidad de herrajes corresponde a un 0,6% de la estructura de madera.

c) Cantidad de hormigón y acero para los núcleos:

Se ha considerado una densidad de hormigón de 2.400 kg/m<sup>3</sup>, y una cantidad de acero necesaria de 80 kg/m<sup>3</sup> para la construcción de hormigón armado. Así, se obtienen las siguientes cantidades:

Tabla 7. Detalle del hormigón y acero de la estructura.

| Material         | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Peso (kg)    |
|------------------|---------------------------|--------------|
| Hormigón núcleos | 672,61                    | 1.614.264,00 |
| Acero núcleos    | -                         | 53.808,80    |

Finalmente, se obtiene el peso total de la estructura de solución mixta:

Tabla 8. Detalle de materiales utilizados en el diseño.

| Material                     | Peso (kg)           |
|------------------------------|---------------------|
| Madera estructura            | 4.018.289,40        |
| Acero herrajes               | 23.606,90           |
| Hormigón núcleos             | 1.614.264,00        |
| Acero núcleos                | 53.808,80           |
| <b>Total peso estructura</b> | <b>5.709.969,10</b> |

### 3.4.2 Efecto directo por sustitución

Del total de materiales presentados en el punto anterior, se obtienen los siguientes resultados de emisiones por producción y compra de materiales para la solución mixta.

- Huella de carbono estructura madera (CLT y MLE): 1.814,93 t CO<sub>2</sub>e.
- Huella de carbono acero para núcleos y herrajes: 181,93 t CO<sub>2</sub>e.
- Huella de carbono hormigón núcleos: 207,30 t CO<sub>2</sub>e.
- Huella de carbono total estructura: 2.204,16 t CO<sub>2</sub>e.

Finalmente, la huella emitida por producción y compra de materiales para construir la nueva estructura de solución mixta es de 2.204,16 t CO<sub>2</sub>e, que corresponde a una reducción del 17,4% de las emisiones asociadas a la estructura original. Esto representa un efecto directo por sustitución de -465 t CO<sub>2</sub>e.

### 3.4.3 Efecto directo por absorción

A partir de los factores de emisión obtenidos de las Declaraciones Ambientales de Producto de los materiales de madera es posible calcular las absorciones debidas a la madera de la nueva estructura. Se utilizan los siguientes valores:

- Potencial de calentamiento global – biogénico CLT: -817 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> de madera.
- Potencial de calentamiento global – biogénico MLE: -503 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> de madera.

Finalmente, las absorciones durante el ciclo de vida de la madera de la nueva estructura corresponden a -6.327 t CO<sub>2</sub>e.

### 3.4.4 Efectos indirectos por la reducción en la cimentación

En primer lugar se debe calcular la reducción del peso de la estructura frente al escenario de edificación convencional.

Si se considera una densidad del hormigón de 2.400 kg/m<sup>3</sup>, se obtiene que el peso de la estructura original es de 14.295.738 kg, mientras que el peso de la estructura de madera es

5.709.969,10 kg. Por tanto, la reducción del peso del nuevo diseño sobre la estructura original (edificación convencional) es de un 60%.

A continuación es necesario realizar un análisis de la estructura de la cimentación para calcular cuánto se puede reducir como consecuencia de la reducción del peso de la nueva estructura. .

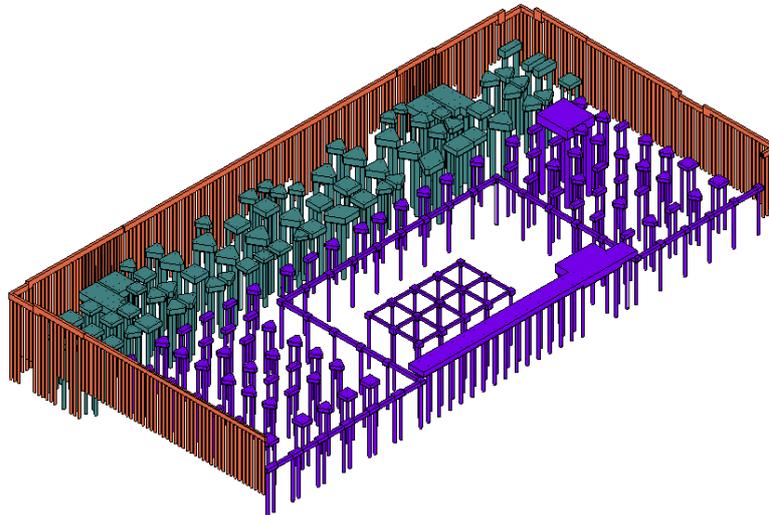


Figura 10. Diagrama 3D de elementos de cimentación del proyecto de Valdebebas. Fuente: Vía Ágora.

En la figura anterior, la estructura en color naranja representa la obra para la contención del terreno, y la estructura en color morado representa el soporte de la zona urbanizada. Ninguna de estas dos se ve afectada por la reducción del peso del edificio. La estructura en color verde corresponde a los pilares y encepados para soporte del edificio, por lo que es la parte de la cimentación realmente afectada por la reducción del peso. Desde el modelo en formato nativo, archivos Revit y en IFC es posible calcular las cantidades asociadas a la estructura de la cimentación con posibilidad de reducción.

Tabla 9. Detalle con los materiales utilizados en la cimentación de la estructura convencional.

| Estructura cimentación original | Hormigón (m <sup>3</sup> ) | Acero (kg)        |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Pilares planta baja             | 98,10                      | 11.772,52         |
| Planta sótano -1                | 56,61                      | 6.792,84          |
| Planta sótano -2                | 56,61                      | 6.792,84          |
| Pilotes y encepados             | 1.817,50                   | 218.100,45        |
| <b>Total</b>                    | <b>2.028,82</b>            | <b>243.458,65</b> |

De estos valores, se obtiene que la parte de la cimentación del diseño original que puede reducirse debido al nuevo peso de la estructura es de un 55% del total.

Asumiendo que el material necesario para la cimentación se reduce en igual proporción que el peso de la estructura (60%), como resultado, la reducción total de las emisiones asociadas a la cimentación disminuye un 22% (resultado de la multiplicación 60%\*55%).

De esta manera se obtiene una huella emitida en la cimentación de 1.400 t CO<sub>2</sub>e lo que corresponde un efecto indirecto de -395 t CO<sub>2</sub>e.

### 3.4.5 Resumen efectos en la huella desde el diseño del calculista

Finalmente, se obtienen los siguientes valores de los efectos en la huella de carbono del edificio por la construcción con madera:

- Efecto sustitución: -465 t CO<sub>2</sub>e
- Efecto absorción: -6.327 t CO<sub>2</sub>e
- Efecto reducción en cimentación: -395 t CO<sub>2</sub>e

Efecto total de mitigación por la construcción con madera: -7.187 t CO<sub>2</sub>e

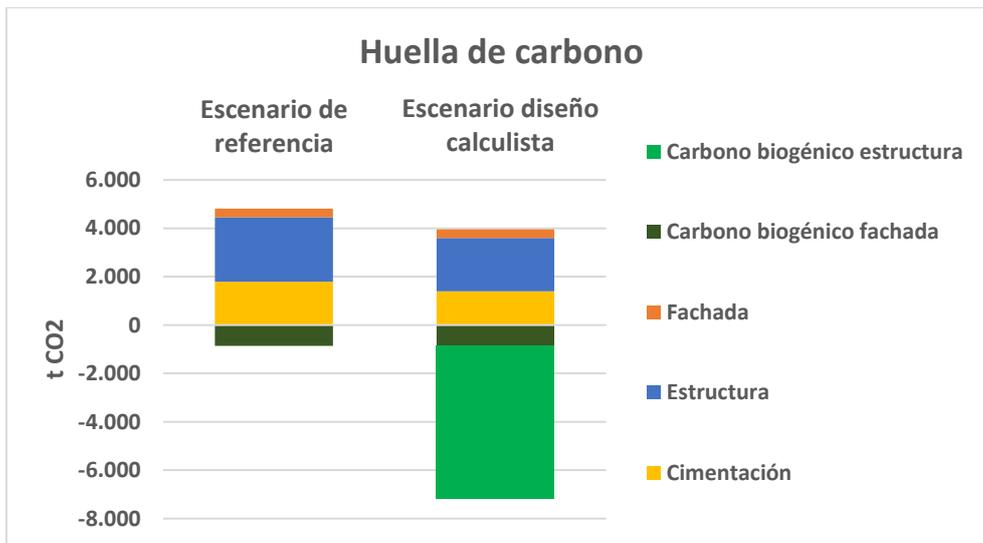


Figura 11. Huella de carbono de la simulación en madera desde diseño de calculista.

A continuación, se muestran los valores finales de la huella de carbono del edificio diseñado por el calculista, considerando estructura, cimentación y fachada.

- Huella de carbono total: 3.952 toneladas de CO<sub>2</sub>e.
- Huella de carbono biogénico: -7.193 toneladas de CO<sub>2</sub>e capturadas gracias al uso de madera.
- Huella de carbono neto: -3.241 toneladas de CO<sub>2</sub>e neto (balance total de emisiones de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta la captura de carbono biogénico)

Finalmente se obtiene un valor de huella de carbono por superficie construida: -239 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> construido.

### 3.5 Comparación de resultados

A continuación, se presenta un cuadro comparativo con los resultados obtenidos entre los distintos escenarios descritos.

Tabla 10. Comparación de resultados entre escenarios.

| Escenario   | Construcción convencional | Simulación estimación nacional | Simulación estimación local | Simulación diseño calculista |
|---|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Huella de carbono total (t CO <sub>2</sub> e)                                     | 4.812                     | 3.483                          | 2.881                       | 3.952                        |
| Huella de carbono biogénico (t CO <sub>2</sub> e)                                 | -866                      | -3.596                         | -3.596                      | -7.193                       |
| Huella de carbono neta (t CO <sub>2</sub> e)                                      | 3.946                     | -113                           | -715                        | -3.241                       |
| Huella de carbono por superficie construida (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ) | 291                       | -8                             | -53                         | -239                         |

Resumen de escenarios:

a) Escenario de estimación nacional: se analizan tres casos de estudio publicados en el Informe 2023–2024 de Mass Madera. Estos tres proyectos de vivienda colectiva y urbana construidos con estructura de madera, establecen una comparativa de las emisiones de carbono centrándose en la estructura, responsable del 34% de las emisiones del edificio.

b) Escenario de estimación local: se realiza una estimación de la huella de carbono empleando los datos de 14 edificios construidos con madera entre los años 2015 y 2024, ubicados en la ciudad de Madrid y visados por el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Esta información proporciona una base de referencia más amplia y contextualizada.

c) Escenario de diseño por un calculista: se basa en un diseño detallado de una estructura de madera elaborado por un calculista especializado. Al utilizar un diseño estructural optimizado y específico para el mismo edificio con madera, este escenario permite una evaluación más precisa y realista de la huella de carbono.

## 4. Discusión

Es importante señalar que, al comparar un edificio construido con hormigón con uno fabricado con madera, pueden surgir errores debido a las diferencias inherentes en las características técnicas y funcionales de ambos materiales. Hormigón y madera presentan propiedades mecánicas, térmicas y de durabilidad distintas, lo que implica que el comportamiento estructural y el rendimiento de cada edificio podrían variar significativamente en función del material utilizado. Para efectos de este análisis, se ha asumido que ambos escenarios tienen capacidades funcionales equivalentes, lo cual simplifica la comparación, pero podría introducir ciertas imprecisiones, ya que no refleja plenamente las diferencias de rendimiento entre los materiales en situaciones reales de uso.

Al comparar el escenario de edificación convencional con un diseño con madera real elaborado por un calculista, es importante señalar que los resultados obtenidos en este análisis no necesariamente pueden generalizarse a otros contextos o comparaciones de soluciones similares. Los valores obtenidos responden a las características específicas de los escenarios analizados.

Por ejemplo, la reducción del 22% en la cimentación observada en el escenario de construcción con madera está estrechamente vinculada a las particularidades del caso de estudio, donde una parte significativa de los componentes de cimentación corresponde a la contención del terreno en la ubicación específica del edificio analizado. Por ello, es crucial tener en cuenta que estos resultados reflejan las condiciones y especificidades propias del proyecto en cuestión, de manera que las diferencias en la cimentación y en otros componentes estructurales podrían variar considerablemente en otros casos.

En la discusión de los resultados sobre los residuos generados, se observa que la construcción con madera presenta una tasa de residuos notablemente mayor (32%) en comparación con la construcción convencional en hormigón (3%). Sin embargo, aunque el análisis de ciclo de vida (ACV) de este estudio no incluye las etapas relacionadas con el fin de vida de los residuos del edificio (módulos C1-C4), se sabe que los residuos de madera ofrecen beneficios ambientales significativos debido a su alto potencial de aprovechamiento (módulo D) (Wadel, 2009). En el caso de la madera, el 100% de los residuos pueden ser reciclados, ya sea mediante trituración para la fabricación de tableros o mediante incineración para la generación de energía. Esto no solo contribuye a una gestión de residuos más sostenible, sino que también permite recuperar valor de los desechos y reducir el impacto ambiental asociado a su disposición final, ventajas que no se logran de igual forma con los residuos de hormigón.

En la comparación de costes entre construcción con madera y construcción convencional, es posible que los costes iniciales de compra de materiales en el caso de la madera resulten superiores debido a la naturaleza y procesamiento del material (FSC España, 2023). Sin embargo, una ventaja significativa de la construcción con madera es la reducción en los tiempos de ejecución, ya que muchos componentes de madera pueden prefabricarse y ensamblarse rápidamente en el sitio. Esta disminución en el tiempo de construcción puede reducir los costes asociados a mano de obra, alquiler de maquinaria y gestión de obra, lo cual, en conjunto, puede resultar en un coste total de construcción inferior al del escenario convencional en hormigón.

Por otro lado, el uso de madera en la construcción también contribuye a mejorar el aislamiento térmico del edificio gracias a sus propiedades naturales de baja conductividad térmica (Wadel, 2009) Esto se traduce en una mayor eficiencia energética, ya que la madera ayuda a mantener

temperaturas interiores más estables y reduce la necesidad de sistemas de climatización intensivos. Como resultado, se produce una disminución en la demanda energética del edificio durante su etapa de uso, lo que no solo implica un menor impacto ambiental, sino también una reducción de los costos operativos y energéticos para los ocupantes a lo largo del tiempo.

Finalmente, una de las principales dificultades encontradas en este estudio es la selección adecuada de las fuentes de información, particularmente en lo que respecta a los factores de emisión utilizados para los cálculos. Por un lado, el uso de factores de emisión provenientes de Declaraciones Ambientales de Producto proporciona valores específicos que reflejan un único caso de producción o fabricación, lo que puede no ser representativo de la diversidad de situaciones posibles. Por otro lado, emplear bases de datos internacionales como IDEMAT, que ofrecen valores promedio, presenta el riesgo de sesgo debido a la heterogeneidad de los datos y las metodologías empleadas para generarlos. En el contexto específico de la construcción con madera, esta problemática se agrava por la limitada cantidad de información disponible sobre los impactos reales del ciclo de vida de los materiales y procesos. Esto genera una incertidumbre significativa y subraya la necesidad de seguir desarrollando bases de datos robustas y adaptadas a las particularidades de este sector.

## 5. Conclusiones

Finalmente, se pueden identificar las siguientes conclusiones:

- I. El análisis del caso de estudio indica que el escenario de construcción con madera convierte al edificio en un sumidero de carbono, aportando un beneficio significativo en la reducción de emisiones.
- II. Los beneficios ambientales observados se atribuyen a tres efectos clave: la sustitución de materiales convencionales por madera (-17%), la reducción en la cimentación debido a la menor carga estructural de la madera (-22%) y la capacidad de absorción de carbono de la madera utilizada en la construcción (-6.327 t CO<sub>2</sub>e).
- III. La huella de carbono total de los materiales de construcción disminuye en un 18%. La huella de carbono por superficie construida se reduce de 291 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (construcción convencional) a -239 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (construcción con madera).
- IV. El estudio ha sido desarrollado sobre la base de un diseño estructural mixto, que combina madera (madera contralaminada CLT y madera laminada encolada MLE) y hormigón armado, cumpliendo con los requisitos del Código Técnico de la Edificación y del Eurocódigo 5.
- V. Los beneficios ambientales podrían incrementarse aún más mediante la reducción de residuos tanto en la fase de construcción como en el fin de vida del edificio, así como por la mejora en la demanda energética del edificio gracias a las propiedades de aislamiento térmico de la madera.

Para dar continuidad a este estudio y profundizar en el conocimiento sobre los beneficios de la construcción con madera, se proponen varias líneas de trabajo y próximos pasos orientados a mejorar la precisión y alcance de los resultados obtenidos:

- a) Ampliación de los Límites del Sistema: Incluir el ciclo de vida completo del edificio dentro del análisis proporcionará una visión más integral de su impacto ambiental, considerando las etapas de uso, mantenimiento y fin de vida, esenciales para una evaluación de sostenibilidad total. Actualmente hay dificultades para la aplicación de este punto debido a la falta de disponibilidad de DAPs publicadas con la nueva norma 15804:2012+A2:2020.
- b) Aplicación de Técnicas de Análisis Input-Output: Mejorar el cálculo de la huella de carbono mediante técnicas de Análisis Input-Output permitirá una mayor precisión en la cuantificación de impactos indirectos y en la identificación de áreas clave para la reducción de emisiones.
- c) Análisis de Incertidumbre y Sensibilidad: Incluir un análisis de incertidumbre y sensibilidad en el estudio aportará un mayor grado de confianza a los resultados, identificando las variables más influyentes y permitiendo ajustes según los rangos de variabilidad de los datos.
- d) Verificación del Trabajo Realizado: Para asegurar la validez de los resultados, se propone avanzar hacia la verificación externa del estudio, de acuerdo con las metodologías y estándares de sostenibilidad internacionalmente reconocidos.
- e) Publicación de un Artículo Científico: Finalmente, la publicación de un artículo científico basado en este estudio contribuirá al conocimiento en el campo de la construcción sostenible, sometiendo los hallazgos a la revisión de la comunidad científica y técnica lo

que permitiría avalar las metodologías e impulsar la aplicación de la madera como material clave en la descarbonización del sector de la construcción.

Estos pasos facilitarían la consolidación de la construcción con madera como una alternativa viable y ambientalmente favorable frente a los métodos convencionales, promoviendo la transición hacia prácticas constructivas de bajas emisiones.

## 6. Bibliografía

- Alvarez Gallego S., Rubio Sánchez A., Rodríguez Olalla A., Avilés Palacio C. Conceptos básicos de la huella de carbono. Serie Huella de carbono. Volumen 1. AENOR
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- UNE-EN 1995:2016. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera.
- UNE-EN 15804:2012+A2:2020. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de productos básicas para productos de construcción. Madrid; 2014.
- UNE-EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo.
- Ministerio de Fomento. (2019). *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la Edificación (CTE-DB-SE-AE)*. Madrid, España: Ministerio de Fomento.
- Declaración Ambiental de Producto Fachada Industrializada Lignum Tech DAPcons®.100.120, año 2022.
- Declaración ambiental de Producto CLT (Cross Laminated Timber), Xllonor SL, The International EPD® System, año 2023.
- Declaración ambiental de Producto Glued Laminated Timber Beams - GLULAM, Moretti SPA, The International EPD® System, año 2023.
- FSC España, 2023. En Madera, otra forma de construir. El material constructivo sostenible del siglo XXI. Madrid.
- MASS MADERA, Red Española para el impulso del uso de la madera maciza industrializada para la edificación, Built By Nature, informe 2023-2024. [https://massmadera.org/wp-content/uploads/2024/01/Informe\\_2023\\_2024\\_MassMadera\\_BuiltbyNature.pdf](https://massmadera.org/wp-content/uploads/2024/01/Informe_2023_2024_MassMadera_BuiltbyNature.pdf)
- United Nations Environment Programme, 2020, Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector (Nairobi: 2020).
- Wadel, G. (2009). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada, tesis doctoral, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

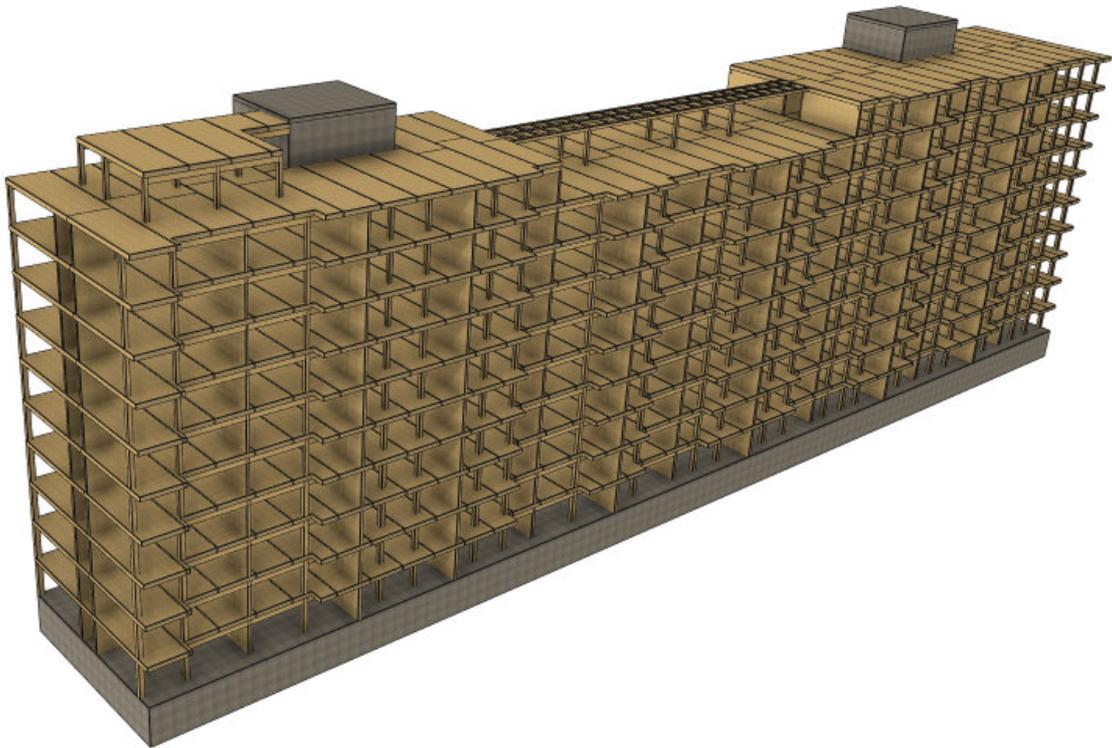
## 7. Anexos

### 7.1 Factores de emisión

| Material (unidades)                       | Factor (kg CO <sub>2</sub> e/ud) | Fuente   |
|---|----------------------------------|--|
| Acero (kg)                                | 2,35                             | Idemat 2023, Idemat2023. Steel hot rolled sheet                        |
| Hormigón (m <sup>3</sup> )                | 308,20                           | Idemat 2023, Idemat2023 Concrete                                       |
| Hormigón armado (m <sup>3</sup> )         | 379,16                           | Idemat 2023, Idemat2023 Concrete (reinforced, 40 kg steel per 1000 kg) |
| Fachada Lignum Tech (m <sup>2</sup> )     | 37,70                            | DAP Lignum Tech 2022   |
| Fachada L-T (m <sup>2</sup> ) (biogénico) | -99,80                           | DAP Lignum Tech 2022   |
| Madera (kg)                               | 0,27                             | Idemat 2023, promedio pino FSC   |
| Cemento (kg)                              | 0,26                             | Idemat 2023, Idemat2023 Cement (blastfurnace CEM III B 42.5 N)         |
| Plástico (kg)                             | 2,10                             | Idemat 2023, Idemat2023 PVC (Polyvinylchloride, trade mix)             |
| Lana de roca (kg)                         | 1,27                             | Idemat 2023, Idemat2023 stonewool                                      |
| Panel (m <sup>2</sup> )                   | 4,44                             | DAP AQUAPANEL OUTDOOR  |
| CLT (m <sup>3</sup> ) (fósil + luluc)     | 228,88                           | DAP CLT Finsa 2023   |
| CLT (m <sup>3</sup> ) (biogénico)         | -817,00                          | DAP CLT Finsa 2023   |
| MLE (m <sup>3</sup> ) (fósil + luluc)     | 286,11                           | DAP MLE Moretti 2024   |
| MLE (m <sup>3</sup> ) (biogénico)         | -503,00                          | DAP MLE Moretti 2024   |
| Hormigón (m <sup>3</sup> )                | 273,00                           | DAP ANEFHOP 2023   |

**7.2 Informe sobre el diseño y cálculo de la estructura de madera del edificio de Valdebebas.  
Calculista y Profesor José Ramón Aira**

# INFORME SOBRE EL DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE MADERA DEL EDIFICIO DE VALDEBEBAS



Autor: Jose Ramón Aira Zunzunegui

septiembre 2024

## ÍNDICE

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.   | Antecedentes.....                      | 3  |
| 2.   | Bases de cálculo.....                  | 5  |
| 2.1. | Marco normativo .....                  | 5  |
| 2.2. | Acciones .....                         | 6  |
| 2.3. | Clase de servicio .....                | 6  |
| 2.4. | Herramientas de cálculo .....          | 6  |
| 3.   | Secciones resultantes .....            | 7  |
| 3.1. | Elementos de madera.....               | 7  |
| 3.2. | Núcleos de hormigón.....               | 8  |
| 4.   | Calidad y cantidad de materiales ..... | 8  |
| 5.   | Referencias .....                      | 11 |

## 1. Antecedentes

El edificio en estudio tiene un uso residencial con 230 viviendas. Consta de planta baja más diez plantas sobre rasante y dispone de dos sótanos, siendo la huella de los sótanos en forma de U.

La estructura portante es de hormigón armado. Se planteó la posibilidad de ejecutarla con madera para comparar la huella de carbono de ambas alternativas. No obstante, de cara a diseñar la estructura de madera era necesario plantear una solución mixta dada la geometría del edificio y el número de alturas. Así, la planta de portales (planta baja) sería de hormigón, sirviendo como peana de la estructura de madera protegiéndola asimismo del posible ascenso de agua procedente del terreno. Adicionalmente, la estabilidad de un edificio de más de diez plantas recomienda la utilización de una estructura mixta (Waugh 2024) por lo que se diseñó la estructura con dos núcleos de hormigón, desde el suelo hasta la cubierta, aprovechando la caja de escaleras y ascensores.

Por tanto, la estructura consiste en dos núcleos de hormigón para dotar de rigidez al edificio, forjados de tablero contralaminado (CLT), muros de CLT colocados como elementos divisorios entre viviendas y entre viviendas y el pasillo central, y pilares y jácenas de madera laminada encolada (MLE) ubicados en la zona de la envolvente para apoyar los tableros del forjado, figuras 1-4.

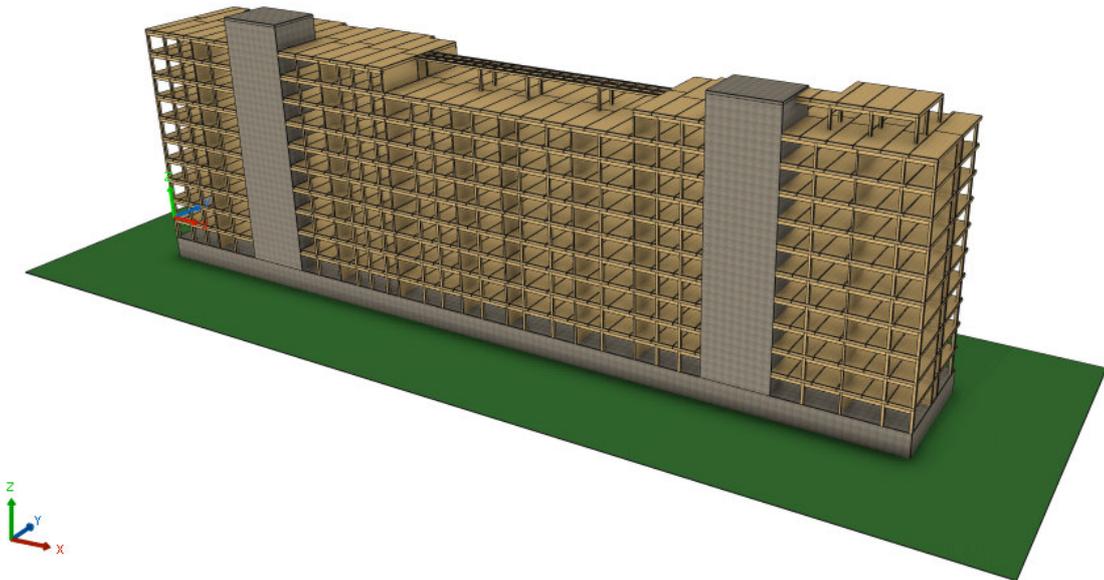


Figura 1. Modelo 3D del edificio (Cadwork v.30). Vista en dirección +Y.

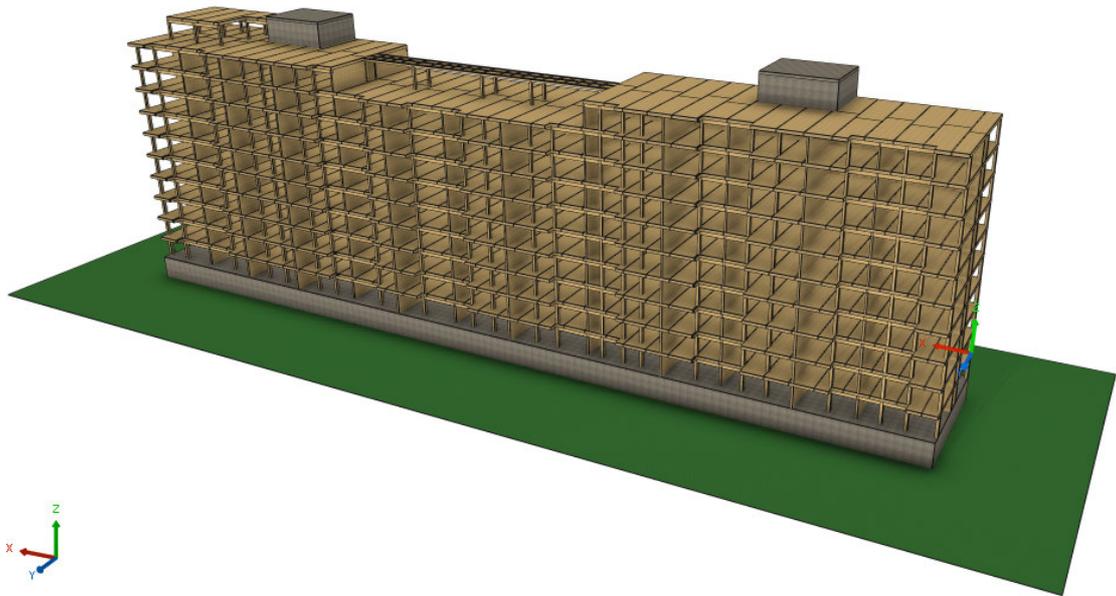


Figura 2. Modelo 3D del edificio (Cadwork v.30). Vista en dirección -Y.

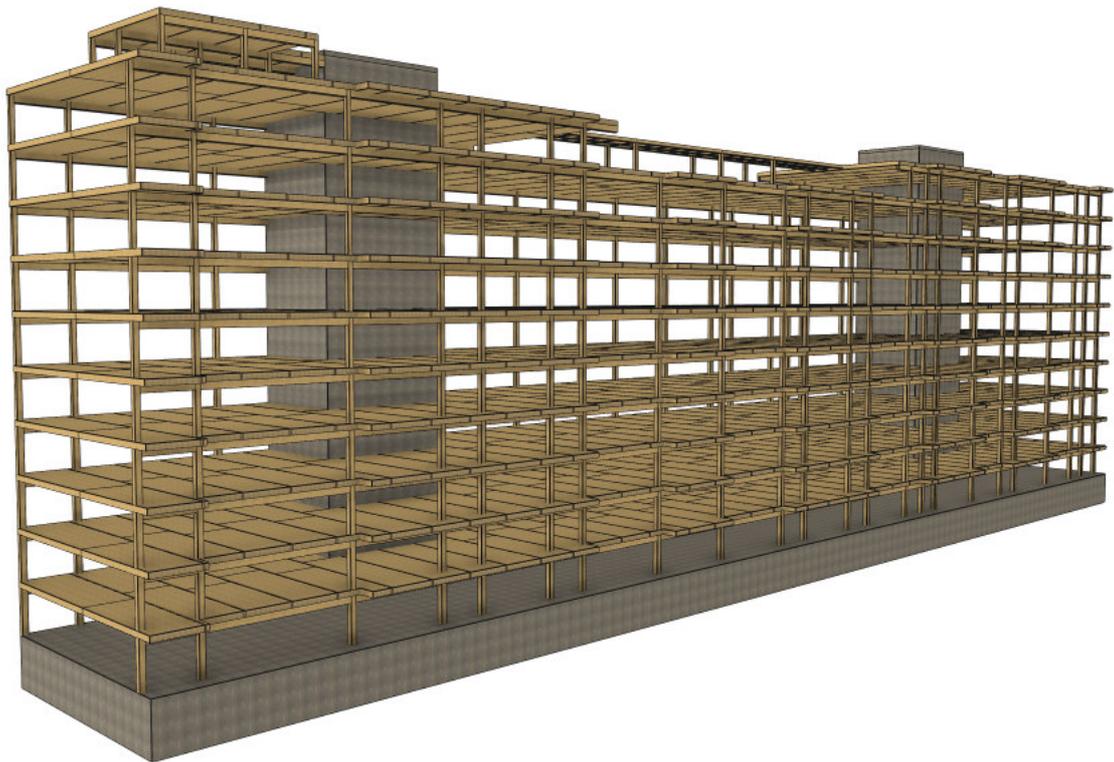


Figura 3. Modelo 3D del edificio (Cadwork v.30). Forjados, pilares y jácenas.

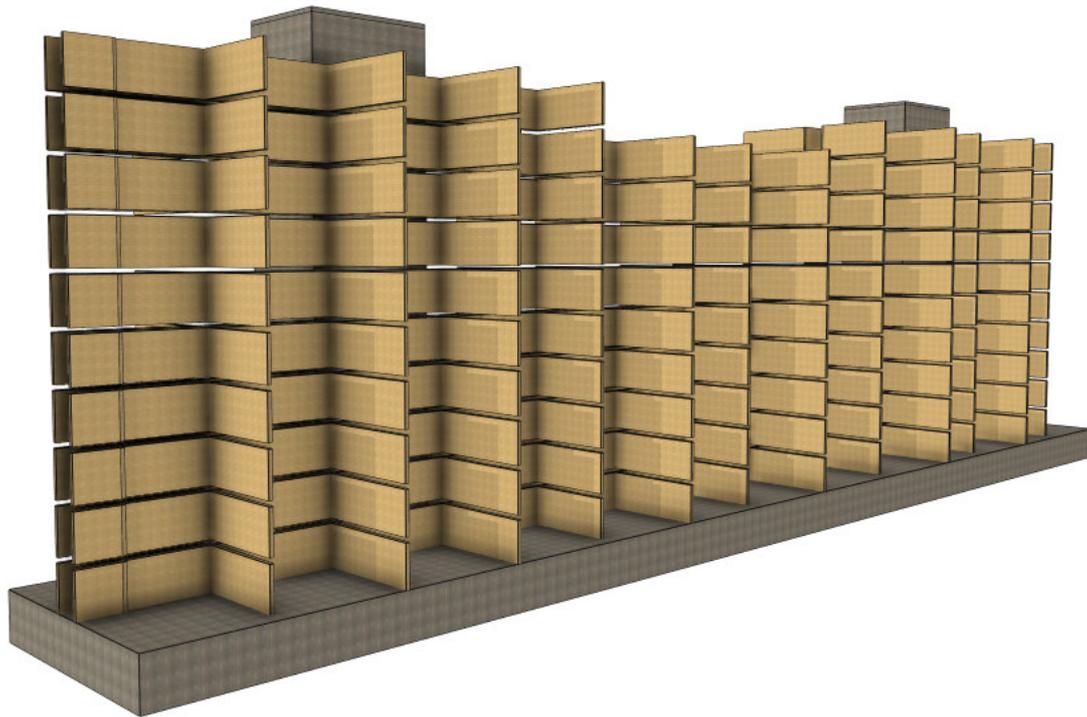


Figura 4. Modelo 3D del edificio (Cadwork v.30). Muros.

## 2. Bases de cálculo

### 2.1. Marco normativo

La comprobación de la estructura se realizó siguiendo las bases de cálculo recogidas en la versión española del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995:2016). Las acciones se tomaron del Código Técnico de la Edificación, concretamente del CTE-DB-SE-AE.

Se comprobó la Resistencia y Estabilidad del edificio utilizando el método de los **Estados Límite Últimos**, verificando que el agotamiento de los elementos no debía superar el 100%. Para el cálculo a fuego se consideró una resistencia de 60 minutos (R60) para todos los elementos de madera, tanto tableros CLT como piezas de MLE. En el cálculo se estimó que los pilares de MLE estaban expuestos al fuego por las cuatro caras, las vigas de MLE por tres caras (cara inferior y caras laterales) y forjados de CLT solamente por la cara inferior. Respecto a los tabiques de CLT, se estimó que están recubiertos por todas sus caras por otros materiales que deberán protegerlos del fuego durante el tiempo total considerado. El proyecto original contempla una resistencia al fuego de 120 minutos. Sin embargo, de cara al diseño de la estructura de madera se consideraron solamente 60 minutos para evitar la utilización de secciones excesivamente. Por ello, los 60 minutos restantes deberán ser resistidos por algún material de recubrimiento o por la aplicación de pinturas o barnices intumescentes o ignífugos.

La comprobación de la Aptitud de Servicio se llevó a cabo siguiendo teoría de los **Estados Límite de Servicio**. Se verificaron las deformaciones horizontales siguientes:  $L/500$  (flecha de integridad),  $L/350$  (flecha de confort) y  $L/300$  (flecha de apariencia); y las deformaciones verticales:  $L/500$  (desplome total) y  $L/250$  (desplome entreplantas).

## 2.2. Acciones

Para la comprobación de la estructura se consideraron acciones similares a la estructura de hormigón original. Éstas se muestran en la tabla 1.

| Nivel   | Permanente (G)<br>(kN/m <sup>2</sup> )                      | Uso<br>(Qu)<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | Nieve<br>(Qn)<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | Viento (Qv) |   |   |
|---|---|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------|---|---|
|   |   |                                     |                                       | Ce          | +X (kN/m)   | +Y (kN/m)   |
| +X: Cpp = 0,7 / Cps = -0,35 / Cpslat = -0,80<br>+Y: Cpp = 0,8 / Cps = -0,62 / Cpslat = -0,80<br>Cubierta: Cps = -0,70 |   |                                     |                                       |             |   |   |
| 2ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 1,55        | Qvp = 1,44<br>Qvs = -0,68<br>Qvslat = -1,64                   | Qvp = 1,44<br>Qvs = -0,68<br>Qvslat = -1,64                   |
| 3ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 1,77        | Qvp = 1,44<br>Qvs = -0,68<br>Qvslat = -1,64                   | Qvp = 1,44<br>Qvs = -0,68<br>Qvslat = -1,64                   |
| 4ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 1,94        | Qvp = 1,44<br>Qvs = -0,68<br>Qvslat = -1,64                   | Qvp = 2,05<br>Qvs = -1,59<br>Qvslat = -2,05                   |
| 5ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 2,10        | Qvp = 1,94<br>Qvs = -0,92<br>Qvslat = -2,22                   | Qvp = 2,22<br>Qvs = -1,72<br>Qvslat = -2,22                   |
| 6ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 2,21        | Qvp = 2,05<br>Qvs = -0,96<br>Qvslat = -2,34                   | Qvp = 2,34<br>Qvs = -1,81<br>Qvslat = -2,34                   |
| 7ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 2,33        | Qvp = 2,16<br>Qvs = -1,02<br>Qvslat = -2,47                   | Qvp = 2,47<br>Qvs = -1,91<br>Qvslat = -2,47                   |
| 8ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 2,43        | Qvp = 2,25<br>Qvs = -1,06<br>Qvslat = -2,57                   | Qvp = 2,57<br>Qvs = -1,99<br>Qvslat = -2,57                   |
| 9ª planta<br>(forjado<br>suelo)   | 2,5 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m) | 2                                   | ---                                   | 2,52        | Qvp = 2,33<br>Qvs = -1,10<br>Qvslat = -2,67                   | Qvp = 2,67<br>Qvs = -2,07<br>Qvslat = -2,67                   |
| Ático<br>cubierto<br>(forjado<br>suelo)   | 2 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m)   | 2                                   | ---                                   | 2,61        | Qvp = 2,42<br>Qvs = -1,14<br>Qvslat = -2,76                   | Qvp = 2,76<br>Qvs = -2,14<br>Qvslat = -2,76                   |
| Ático<br>descubierto<br>(forjado<br>suelo)  | 2 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m)   | 2                                   | 1,2                                   | 2,61        | Qvp = 2,42<br>Qvs = -1,14<br>Qvslat = -2,76<br>Qvscub = -0,79 | Qvp = 2,76<br>Qvs = -2,14<br>Qvslat = -2,76<br>Qvscub = -0,79 |
| Cubierta  | 3 + peso propio +<br>cerramiento exterior<br>(0,315 kN/m)   | 2                                   | 1,2                                   | 2,69        | Qvp = 1,25<br>Qvs = -0,59<br>Qvslat = -1,42<br>Qvscub = -0,79 | Qvp = 1,42<br>Qvs = -1,10<br>Qvslat = -1,42<br>Qvscub = -0,79 |

Tabla 1. Acciones consideradas en el cálculo del edificio con estructura de madera.

## 2.3. Clase de servicio

Todos los elementos de madera se encuentran en el interior del edificio que se corresponde con una **clase de servicio 1**.

## 2.4. Herramientas de cálculo

Los elementos de madera de la estructura se comprobaron según se ha indicado anteriormente en el apartado 2.1. Para ello se ha utilizado el software de elementos finitos

Dlubal RFEM (v.5.3531). En la figura 5 se puede apreciar el modelo de cálculo del edificio completo.

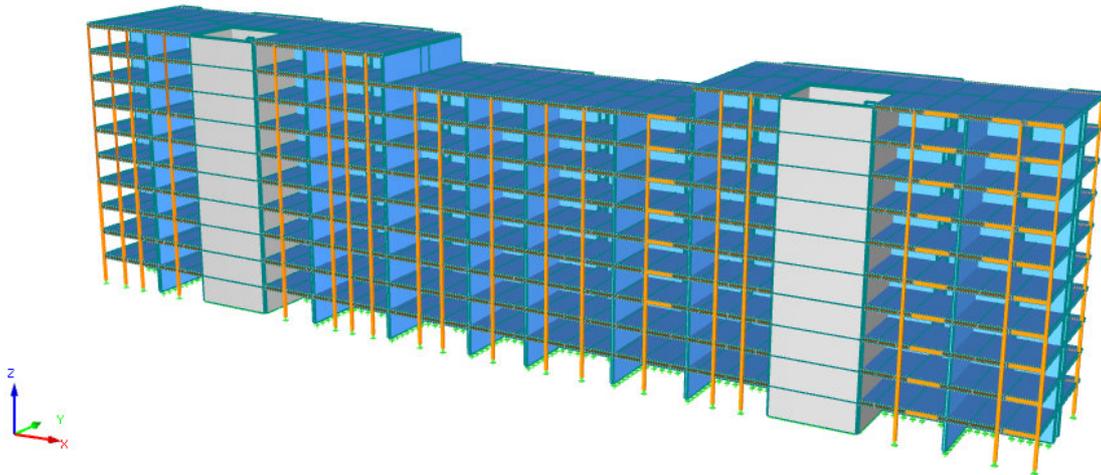


Figura 5. Modelo de cálculo del edificio (Dubal RFEM5 v.5.35.1).

El número y el tipo de elementos metálicos de fijación y herrajes se determinaron mediante un predimensionado general realizado en base a la experiencia y al nivel de esfuerzos presentes en la estructura. En ningún caso se llegó a particularizar el tipo de conexión metálica necesaria para cada tipo de unión, ya que esto requeriría un cálculo más detallado que excede los requerimientos de este trabajo. Del mismo modo, la sección y el armado de los núcleos de hormigón se determinaron mediante un predimensionado realizado en base a la geometría y a las acciones de viento en altura y peso propio de los elementos.

### 3. Secciones resultantes

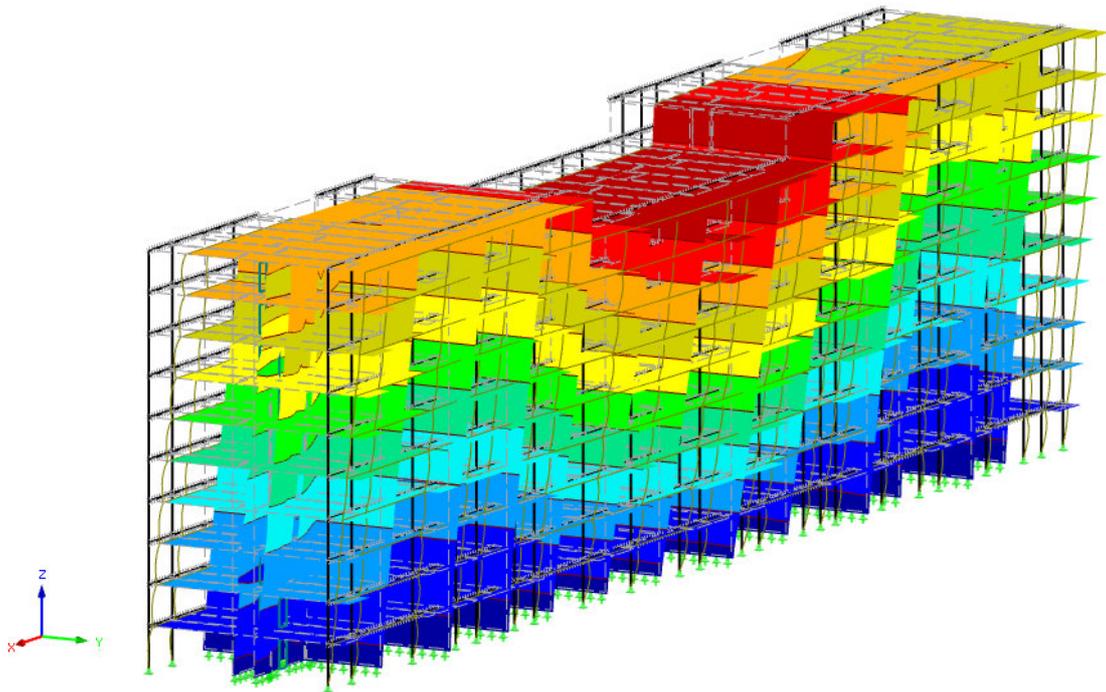
#### 3.1. Elementos de madera

Seguidamente se indican las secciones resultantes:

- Pilares plantas 1-2-3 y 4: MLE de sección **320x320 mm** y clase resistente GL24h.
- Pilares plantas 5-6 y 7: MLE de sección **280x280 mm** y clase resistente GL24h.
- Pilares plantas 8-9 y Ático: MLE de sección **240x240 mm** y clase resistente GL24h.
- Vigas: MLE de sección **240x400 mm** y clase resistente GL24h.
- Forjados: CLT de espesor **340 mm (80-60-60-60-80)** formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal siguiendo la máxima luz de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas coincide con la dirección longitudinal del tablero.
- Muros plantas 1-2-3 y 4: CLT de espesor **240 mm (60-40-40-40-60)** formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal paralela al suelo, de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas es perpendicular a la dirección longitudinal del tablero.
- Muros plantas 5-6 y 7: CLT de espesor **200 mm (40-40-40-40-40)** formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal

paralela al suelo, de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas es perpendicular a la dirección longitudinal del tablero.

- Muros plantas 8-9 y Ático: CLT de espesor **160 mm (40-20-40-20-40)** formado por láminas de madera aserrada C24. El tablero se coloca con la dirección longitudinal paralela al suelo de forma que la dirección de la fibra de las láminas externas es perpendicular a la dirección longitudinal del tablero.
- El desplome máximo se produjo con el viento soplando en la dirección +Y en el centro del forjado de la planta Ático, alcanzando un desplazamiento máximo de 8,2 mm, figura 6, que equivale a  $L/3841 \ll L/500$ .



Máx.u-Y: 8,2, Mín. u-Y: -0,5 mm

Figura 6. Desplome máximo provocado por el viento en la dirección +Y.

### 3.2. Núcleos de hormigón

Los núcleos de hormigón estarán conformados por **muros de espesor 30 cm** con un armado longitudinal de redondos de diámetro 20 mm colocados cada 14 cm, y armadura transversal de redondos de diámetro 12 mm cada 14 cm. Con esta armadura la cuantía de acero estaría en torno a **80 kg de acero por metro cúbico** de hormigón.

## 4. Calidad y cantidad de materiales

Los materiales utilizados para la estructura son los siguientes:

- Tablero contralaminado (CLT) con todas las láminas de clase resistente C24 acorde a la norma UNE-EN 338:20216. Fabricante: Xilonor.
- Madera Laminada Encolada (MLE) de clase resistente GL24h acorde a la norma UNE-EN 14080:2013.

- Herrajes y tornillos de acero galvanizado. Fabricante: Rothoblaas.
- Hormigón armado HA25 (Código Estructural).
- Acero de armar B500SD (UNE 36065).

Una vez calculada la estructura se dibujó en el software de diseño 3D Cadwork (v.30) con el objeto de obtener con precisión las cantidades de materiales que era necesario para su ejecución. Parala obtención de la cantidad de material, además del cálculo de la estructura de madera se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para realizar la **optimización** de los elementos lineales (pilares y jácenas) se ha considerado que los elementos se fabrican con una longitud de 13,5 m. Para los tableros se ha considerado que se fabrican con una longitud de 12 m (según información aportada por Xilonor).
- Los **solapes laterales entre tableros** de forjado deberán ejecutarse a media madera con una profundidad y una anchura de 10 cm.
- El **arranque de muros CLT sobre forjados de CLT** se realiza mediante angulares TITAN N (ETA-22/0089) con tornillos LBS (ETA 11/0030), y hold-downs WKR (ETA-22/0089) con tornillos LBS (ETA 11/0030) y HBS PLATE (ETA 11/0030). Los angulares recogen los esfuerzos de corte mientras que los hold-downs, los de tracción. Se colocará un hold-down en el extremo de cada tablero y de los huecos. Se colocarán angulares a razón de una cada metro.
- El **arranque de muros CLT sobre forjados de hormigón** se realiza mediante angulares TITAN W (ETA-22/0089) con tornillos LBS y anclaje químico VIN-FIX (ETA-20/1285) con barras roscadas, y mediante hold-downs WHT (ETA-11/0086) con tornillos LBS (ETA 11/0030) y anclaje químico VIN-FIX (ETA-20/1285) con barras roscadas. Los angulares recogen los esfuerzos de corte mientras que los hold-downs, los de tracción. Se colocará un hold-down en el extremo de cada tablero y de los huecos. Se colocarán angulares a razón de una cada metro lineal.
- El **arranque de pilares sobre forjados de CLT** se realiza mediante angulares TITAN N (ETA-22/0089) con tornillos LBS (ETA 11/0030). Se colocará un angular en cada cara del pilar.
- El **arranque de pilares sobre forjados de hormigón** se realiza mediante angulares TITAN W (ETA-22/0089) con tornillos LBS y anclaje químico VIN-FIX (ETA-20/1285) con barras roscadas. Se colocará un angular en cada cara del pilar.
- La **unión entre forjados CLT** se realiza con tornillos HBS (ETA-11/0030). Se colocará un tonillo cada 20 cm.
- El **apoyo de los forjados de CLT sobre los muros de hormigón** (de la caja de escaleras y ascensores) se realiza con angulares TITAN W (ETA-22/0089) con tornillos LBS y anclaje químico VIN-FIX (ETA-20/1285) con barras roscadas. Se colocarán angulares a razón de una cada metro lineal.
- El **apoyo de los forjados de CLT sobre las jácenas** se realiza con tornillos HBS (ETA-11/0030). Se colocará un tonillo cada 20 cm.
- El **encuentro entre jácenas y pilares** se resuelve con estribos tipo ALUMIDI (ETA-09/0361) con tornillos LBS (ETA 11/0030) y pasadores lisos STA (acero S355 según EN 14592).
- El **encuentro entre jácenas y muros de hormigón** (de la caja de escaleras y ascensores) se resuelve con estribos tipo ALUMIDI (ETA-09/0361) con anclajes

químicos VIN-FIX (ETA 20/0363) con barras roscadas, y pasadores lisos STA (acero S355 según EN 14592).

En la tabla 2 se indica el volumen de madera que habría que utilizar.

| Madera         | Muros     |            |        | Forjados  |            |        | Pilares   |            |        | Jácnas    |                         |                 |
|----------------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|-------------------------|-----------------|
|                | neto (m3) | bruto (m3) | resto  | neto (m3) | bruto (m3) | resto  | neto (m3) | bruto (m3) | resto  | neto (m3) | bruto (m3)              | resto           |
| CLT 340 mm     |           |            |        | 5651,91   | 8430,65    | 32,96% |           |            |        |           |                         |                 |
| CLT 240 mm     | 923,6     | 1392,43    | 33,67% |           |            |        |           |            |        |           |                         |                 |
| CLT 200 mm     | 577,25    | 870,27     | 33,67% |           |            |        |           |            |        |           |                         |                 |
| CLT 160 mm     | 411,2     | 619,93     | 33,67% |           |            |        |           |            |        |           |                         |                 |
| MLE 320x320 mm |           |            |        |           |            |        | 48,34     | 58,63      | 17,55% |           |                         |                 |
| MLE 280x280 mm |           |            |        |           |            |        | 27,76     | 33,67      | 17,55% |           |                         |                 |
| MLE 240x240 mm |           |            |        |           |            |        | 30,01     | 34,88      | 13,96% |           |                         |                 |
| MLE 240x400 mm |           |            |        |           |            |        |           |            |        | 186,39    | 190,08                  | 1,94%           |
| Subtotal (m3)  | 1912,05   | 2882,63    |        | 5651,91   | 8430,65    |        | 106,11    | 127,18     |        | 186,39    | 190,08                  |                 |
|                |           |            |        |           |            |        |           |            |        |           | <b>Total neto (m3)</b>  | <b>7856,46</b>  |
|                |           |            |        |           |            |        |           |            |        |           | <b>Total bruto (m3)</b> | <b>11630,54</b> |
|                |           |            |        |           |            |        |           |            |        |           | <b>Resto</b>            | <b>32,45%</b>   |

Tabla 2. Volumen de madera (tableros CLT de Xilonor).

Considerando una densidad del CLT de 515 kg/m<sup>3</sup> (EPD) y de MLE de 420 kg/m<sup>3</sup> (UNE-EN 14080) se obtendrían los pesos mostrados en la tabla 3.

| Madera         | Muros     |            |        | Forjados  |            |        | Pilares   |            |        | Jácnas    |                         |                |
|----------------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|-----------|-------------------------|----------------|
|                | neto (kg) | bruto (kg) | resto  | neto (kg) | bruto (kg) | resto  | neto (kg) | bruto (kg) | resto  | neto (kg) | bruto (kg)              | resto          |
| CLT 340 mm     |           |            |        | 2910734   | 4341785    | 32,96% |           |            |        |           |                         |                |
| CLT 240 mm     | 475654    | 717101     | 33,67% |           |            |        |           |            |        |           |                         |                |
| CLT 200 mm     | 297284    | 448189     | 33,67% |           |            |        |           |            |        |           |                         |                |
| CLT 160 mm     | 211768    | 319264     | 33,67% |           |            |        |           |            |        |           |                         |                |
| MLE 320x320 mm |           |            |        |           |            |        | 20303     | 24625      | 17,55% |           |                         |                |
| MLE 280x280 mm |           |            |        |           |            |        | 11659     | 14141      | 17,55% |           |                         |                |
| MLE 240x240 mm |           |            |        |           |            |        | 12604     | 14650      | 13,96% |           |                         |                |
| MLE 240x400 mm |           |            |        |           |            |        |           |            |        | 78284     | 79834                   | 1,94%          |
| Subtotal (kg)  | 984706    | 1484554    |        | 2910734   | 4341785    |        | 44566     | 53416      |        | 78284     | 79834                   |                |
|                |           |            |        |           |            |        |           |            |        |           | <b>Total neto (kg)</b>  | <b>4018289</b> |
|                |           |            |        |           |            |        |           |            |        |           | <b>Total bruto (kg)</b> | <b>5959588</b> |
|                |           |            |        |           |            |        |           |            |        |           | <b>Resto</b>            | <b>32,57%</b>  |

Tabla 2. Peso de madera (tableros CLT de Xilonor).

En la tabla 4 se indica un resumen de los herrajes y tornillos que habría que colocar para la ejecución de la estructura de madera. Se muestran las unidades de cada tipo.

| Herrajes y tornillos (unidades) | Muros  | Forjados | Pilares | Jácnas |
|---------------------------------|--------|----------|---------|--------|
| Hold-down WHT20                 | 136    |          |         |        |
| Hold-down WKR13535              | 1180   |          |         |        |
| Angular TITAN W TCNW240         | 454    | 463      | 168     |        |
| Angular TITAN TCN240            | 2982   |          | 1524    |        |
| Estribo ALUMIDI280              |        |          |         | 843    |
| Arandela WHTW6020               | 136    |          |         |        |
| Barra roscada 12x100            | 1952   | 1852     | 672     |        |
| Barra roscada 8x110             |        |          |         | 252    |
| Pasadores STA12x140             |        |          |         | 5901   |
| Tornillo HBSPL12140             | 1180   |          |         |        |
| Tornillo HBS8440                |        | 41935    |         |        |
| Tornillo HBS8340                | 2480   |          |         |        |
| Tornillo HBS8300                | 1860   |          |         |        |
| Tornillo HBS8240                | 1635   |          |         |        |
| Tornillo LBS550                 | 246748 | 16668    | 115776  |        |
| Tornillo LBS560                 |        |          |         | 43254  |

Tabla 4. Herrajes y tornillos (Rothoblaas).

Los núcleos de hormigón (de las cajas de ascensores y escaleras) tendrían un volumen de 672,61 m<sup>3</sup>. Considerando una densidad del hormigón de 2400 kg/m<sup>3</sup>, el peso de hormigón sería 672,61 m<sup>3</sup> x 2400 kg/m<sup>3</sup> = **1614264 kg de hormigón**.

Finalmente, según se ha comentado, la cuantía de acero es de 80 kg por m<sup>3</sup> de hormigón, por lo que se necesitarían 80 kg/m<sup>3</sup> x 672,61 m<sup>3</sup> = **53809 kg de acero**.

## 5. Referencias

- Código Estructural:2021. Real Decreto 470/2021 por el que se aprueba el Código Estructural.
- CTE DB-SE-AE. 2006. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad estructural. Acciones en Edificación.
- DIN 975:1993. Bolts, screws, studs.
- EN 14592:2022. Timber structures. Dowel-type fasteners. Requirements.
- EPD. 2023. Environmental Product Declaration CLT (Cross Laminated Timber). Xilonor.
- ETA-09/0361. Rotho Blaas joist bearing Alumini, Alumidi and Alumax. Three-dimensional nailing plate (Joist bearings).
- ETA-11/0030. Rotho Blaas Self-tapping screws and threaded rods. Screws and threaded rods for use in timber constructions.
- ETA-11/0086. Rotho Blaas WHT hold downs and angle Brackets. Three-dimensional nailing plate (Angle brackets and hold-downs for timber-to-timber or timber-to-concrete or steel connections).
- ETA 20/0363. Rotho Blaas Injection system Vinylester VIN-FIX (SMART, TROPIC & NORDIC). Bonded fasteners for use in concrete.
- ETA-20/1285. Rotho Blaas Injection system HYB - FIX for concrete. Bonded fastener for use in concrete.
- ETA-22/0089. Rotho Blaas NINO Angle Brackets and WKR Hold Downs. Three-dimensional nailing plate (Angle Bracket or Hold Down for timber-to-timber or timber-to-concrete or steel connections).
- UNE 36065:2011. Barras corrugadas de acero soldable con características especiales de ductilidad para armaduras de hormigón armado.
- UNE-EN 338:2016. Madera Estructural. Clases Resistentes.
- UNE-EN 1995:2016. Eurocódigo 5. Proyecto de Estructuras de Madera.
- UNE-EN 14080:2013. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos.
- Waugh Thistleton Architects. 2024. “Component Selector”. Built-In-Wood Project. Horizon 2020.