



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Cálculo de la estructura de madera del nuevo edificio de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte en Valencia

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AUTOR:

FERNANDO LEOPOLDO DOMÍNGUEZ PUEYO

TUTOR:

CARLOS LLOPIS CAMPS

Valencia, Julio de 2020

Resumen

El Trabajo Final de Máster que se propone consiste en el cálculo de la estructura sobre rasante, ejecutada en su mayor parte mediante paneles de madera contralaminada (CLT) de un nuevo edificio que se va a realizar en la ciudad de Valencia para la Conselleria de Educación, Cultura y Deporte.

El panel de madera contralaminada es un producto de construcción de madera sólida que consiste en al menos tres paneles de madera unidos por una sola cara dispuesta en dirección perpendicular a las otras dos. Este producto, variando el número y espesor de las capas y la orientación de estas, permite su uso como elemento estructural en prácticamente todos los elementos de la estructura de un edificio convencional.

El edificio por calcular tiene una superficie sobre rasante que ronda los 10.000 m² divididos en tres alturas, con luces que en su mayoría rondan entre los 5 y los 8 metros.

Además, mediante este Trabajo Final de Máster, se pretende dar a conocer la madera contralaminada y concienciar de que existen soluciones mucho más respetuosas con el medioambiente que las utilizadas comúnmente.

A lo largo del trabajo, se realizará todo el proceso necesario para el cálculo y la verificación de la estructura, realizando desde un predimensionamiento, un proceso de cálculos manuales y su verificación, hasta un cálculo mediante un programa de elementos finitos de la estructura completa.

Índice General

| | |
|---|----|
| Memoria | 9 |
| Índice Memoria | 11 |
| 1. Objeto y antecedentes | 12 |
| 2. Estado del arte | 13 |
| 3. Descripción de la estructura..... | 15 |
| 3.1. Estructura bajo rasante | 15 |
| 3.2. Estructura sobre rasante | 15 |
| 4. Normativa y referencias | 17 |
| 4.1. Normativa..... | 17 |
| 4.2. Bibliografía | 17 |
| 4.3. Programas de cálculo | 17 |
| Estudio de soluciones..... | 19 |
| Índice Estudio de soluciones | 21 |
| 1. Definición de las diferentes soluciones..... | 23 |
| 1.1. Elementos horizontales..... | 24 |
| 1.2. Elementos longitudinales | 25 |
| 1.3. Pilares | 25 |
| 1.4. Muros perimetrales..... | 26 |
| 2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones | 27 |
| 2.1. Elementos horizontales..... | 29 |
| 2.1.1. Panel de CLT | 29 |
| 2.1.2. Forjado nervado | 31 |
| 2.1.3. Solución óptima..... | 32 |
| 2.2. Elementos longitudinales | 33 |
| 2.2.1. Viga de acero | 33 |
| 2.2.2. Viga de madera | 34 |
| 2.2.3. Solución óptima..... | 35 |
| 2.3. Pilares | 36 |
| 2.4. Muros perimetrales..... | 38 |
| Diseño estructural del edificio | 41 |
| Índice Diseño estructural del edificio..... | 43 |
| 1. Introducción al cálculo de CLT..... | 45 |
| 1.1. Método Gamma | 45 |
| 1.2. Forjado de CLT | 46 |

Índice General

| | |
|---|-----|
| 1.2.1. Flexión en la dirección principal del panel | 47 |
| 1.2.2. Flexión en la dirección transversal a la principal del panel..... | 47 |
| 1.2.3. Cortante en la dirección principal del panel | 48 |
| 1.2.4. Cortante en la dirección transversal a la principal del panel | 49 |
| 1.3. Muro de CLT | 49 |
| 1.3.1. Compresión en la dirección principal del panel | 50 |
| 1.3.2. Compresión en la dirección transversal a la principal del panel..... | 51 |
| 1.3.3. Flexión en la dirección principal del panel | 52 |
| 1.3.4. Flexión en la dirección transversal a la principal del panel..... | 52 |
| 1.3.5. Cortante producido por su comportamiento como placa | 52 |
| 1.3.5.1. Fallo de corte a lo largo de una junta..... | 52 |
| 1.3.5.2. Fallo de corte de las superficies pegadas en los puntos de intersección... | 53 |
| 1.3.5.3. Fallo de corte de toda la placa | 54 |
| 1.3.6. Pandeo bajo presión en la dirección principal del panel | 55 |
| 1.4. Vibraciones..... | 57 |
| 1.5. Deformaciones | 60 |
| 1.6. Fuego..... | 61 |
| 2. Cálculos manuales: resultados y comprobación | 63 |
| 3. Cálculo de la estructura de madera completa | 69 |
| 3.1. Consideraciones iniciales..... | 69 |
| 3.2. Cálculo de la estructura inicial | 71 |
| 3.2.1. Modelado y cálculo de la estructura completa..... | 71 |
| 3.2.2. Verificación de los paneles de piso | 74 |
| 3.3. Cálculo de la estructura optimizada..... | 80 |
| 3.3.1. Modelado y cálculo de la estructura completa..... | 80 |
| 3.3.2. Verificación de los paneles de piso | 83 |
| 3.3.3. Verificación de las columnas | 86 |
| 3.3.4. Verificación de los paneles de pared | 89 |
| 3.3.5. Verificación de las vigas de acero..... | 91 |
| 3.3.6. Verificación de las vigas de CLT | 92 |
| Mediciones y presupuesto | 95 |
| Índice Mediciones y presupuesto | 97 |
| 1. Mediciones..... | 99 |
| 1.1. Estructura inicial..... | 100 |
| 1.2. Estructura optimizada | 101 |

Índice General

| | |
|------------------------|-----|
| 1.3. Comparación | 102 |
| 2. Presupuesto..... | 103 |
| Planos | 105 |
| Planos | 107 |

Memoria

Índice Memoria

| |
|-----------------------|
| Índice Memoria |
|-----------------------|

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1. Objeto y antecedentes | 12 |
| 2. Estado del arte | 13 |
| 3. Descripción de la estructura..... | 15 |
| 3.1. Estructura bajo rasante | 15 |
| 3.2. Estructura sobre rasante | 15 |
| 4. Normativa y referencias | 17 |
| 4.1. Normativa..... | 17 |
| 4.2. Bibliografía | 17 |
| 4.3. Programas de cálculo | 17 |

1. Objeto y antecedentes

1. Objeto y antecedentes

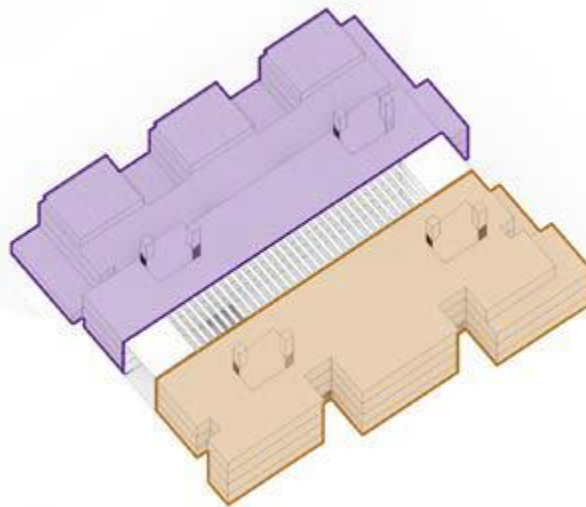
El objeto de la obra reside en dar solución a los problemas de funcionamiento manifestados en el edificio sede de los servicios centrales de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte.

El proyecto tendrá como objetivo solucionar los problemas de espacio y funcionalidad mediante distribuciones modulares y versátiles, siendo susceptibles de adaptarse a modificaciones en el reglamento orgánico de la Conselleria de acuerdo con las exigencias de la normativa urbanística y técnica vigentes, así como de los requisitos propios del uso administrativo para el cual va a ser destinado.

La superficie total sobre rasante rondará los 10.000 m², divididas en tres niveles (planta baja, primer piso y segundo piso). Se construirán, además, tres niveles bajo rasante dedicados a aparcamiento, con una superficie de alrededor de 15.000 m².

La condición de versatilidad es uno de los requerimientos principales del edificio, con lo que el diseño se ha realizado bajo la condición de estricta modularidad en múltiplos de 1,35 metros y la propuesta de cuatro núcleos en los que se agrupan todos los elementos fijos, como pueden ser zonas de evacuación, espacios de almacenaje...

El conjunto del edificio se distribuye de la siguiente forma: Un edificio para la Dirección, y otro para los espacios de la Conselleria de Educación, Investigación y Deporte, compartiendo la planta baja para uso público.



Conselleria d'educació, investigació, cultura i esport
Direcció territorial d'educació, investigació, cultura i esport

Figura 1. Conjunto del edificio.

2. Estado del arte

2. Estado del arte

Para afrontar el diseño del edificio, se ha realizado una mirada más allá del edificio. Actualmente, nos encontramos ante un estado de emergencia ambiental, con lo que la construcción de este nuevo edificio supone una oportunidad de tomar la iniciativa y se elija un sistema constructivo que reduzca el consumo de material y las emisiones.

Para ello, el estudio del uso de materiales renovables extraídos directamente de la naturaleza de una manera social y ambientalmente respetuosa lleva directamente a escoger la madera como un material válido, capaz de cumplir los requerimientos estructurales y, al mismo tiempo, convertirse en la punta de lanza en la ayuda a combatir el cambio climático.

Para llegar a comprender las ventajas de la madera, se enunciarán brevemente las ventajas medioambientales y desde el punto de vista estructural que supone el uso de esta frente a otros elementos.

En primer lugar, cabe destacar que la madera es un material de CO₂ neutro, es decir, en su ciclo de vida almacena el carbono que ha tomado de la atmósfera, hasta que finalmente lo devuelve a ella por medio de la degradación o combustión, con lo que el proceso no genera carbono adicional. Además, dicho efecto de almacenaje de CO₂ se ve complementado por la reducción de energía consumida para la elaboración de los elementos de construcción frente a otros materiales como pueden ser el acero o el hormigón.

El balance total de carbono es muy positivo, de manera que mediante el empleo de un metro cúbico de madera permite el almacenaje de una tonelada de carbono atmosférico y, además, evita la emisión de aproximadamente otras 0.8 toneladas debido a la no utilización de otros materiales que requieren más energía en su elaboración, lo que suma alrededor de 1.8 toneladas de carbono fuera de la atmósfera.

Además de sus ventajas ambientales, cabe destacar que, debido a su reducido peso, alrededor de 5 veces menor que el hormigón y 15 veces menor que el acero, permite minimizar el uso de medios auxiliares, proporcionando una ventaja frente a la necesidad de disponer de elementos modulares fácilmente manipulables y adaptables a las necesidades estructurales y arquitectónicas.

En lo que respecta a sus cualidades estructurales, cabe destacar dos aspectos principales como son la resistencia al fuego y las deformaciones que se producen.

La resistencia al fuego de los forjados de madera ya sea un forjado de paneles contralaminados CLT o un forjado nervado (las diferentes soluciones estructurales se estudian en el siguiente apartado), es mucho más elevada de lo que, a priori, pueda parecer. Esto viene dado porque en caso de incendio, la capa exterior de la madera se consume lentamente, se carboniza, y actúa como protección resistiendo las deformaciones y el colapso. Por ejemplo, un forjado CLT de 24 centímetros de espesor, con luces hasta 7 metros, podría cumplir los requerimientos de fuego R90 sin necesidad de aplicar ningún tipo de tratamiento extra.

El otro limitante principal previamente mencionado son las deformaciones. Este limitante es mucho menos restrictivo de lo que pueda parecer en principio, dado que la

2. Estado del arte

madera se trata de un material que en proporción con su peso tiene una elevada resistencia a flexión, obteniendo una relación resistencia/peso 1,3 veces superior a la del acero y 10 veces superior a la del hormigón. A modo de ejemplo, como en el caso anterior, cabe destacar que es posible salvar luces de 7 metros mediante un forjado realizado mediante paneles de CLT de únicamente 24 centímetros de espesor.

Por otro lado, a parte de las ventajas puramente estructurales, la utilización de la madera en techos y paredes constituye una ventaja frente al aislamiento térmico, tratándose de un material que con el mismo grosor que una pared de ladrillo produce un aislamiento térmico cuatro veces superior, funcionando también como acondicionador acústico, puesto que los espacios interiores con madera tienen menor tiempo de reverberación y mayor absorción de ruido, lo que resulta muy aconsejable en espacios como salones de actos y salas de reunión, entre otros.

Por último, existe una clara ventaja en lo referente a tiempos de ejecución respecto al uso de otros materiales estructurales, pudiendo ejecutar una estructura de madera hasta diez veces más rápido que una estructura de hormigón armado convencional.

3. Descripción de la estructura

3. Descripción de la estructura

Los criterios adoptados en la solución estructura se basan en tres ejes:

- **Uso eficiente de los materiales y los recursos:** Cumpliendo el objetivo funcional se adapta para cada uno de los elementos estructurales el material y la configuración, minimizando la cantidad de material necesario y, por tanto, su coste económico.
- **Minimización del tiempo de ejecución y del impacto ambiental de la estructura en cada una de las fases del proyecto:** fabricación, construcción, servicio y mantenimiento.
- **Adecuación estructural y estética al proyecto arquitectónico:** Se han adoptado las formas y los métodos resistentes a la configuración arquitectónica de tal forma que la estructura se integra y adapta a la imagen estética del conjunto.

A partir de estos principios, se han diferenciado dos áreas en función de su ubicación respecto a la rasante del terreno.

3.1. Estructura bajo rasante

Se corresponde con la estructura enterrada de las tres plantas de sótano y la planta baja.

Considerando el proceso constructivo, dicha estructura se realiza mediante una pantalla discontinua de pilotes con anclajes provisionales intermedios.

Los forjados correspondientes a las diferentes plantas de aparcamiento se resuelven mediante una losa continua y pilares, ambos de hormigón armado.

El cálculo la estructura bajo rasante, dado que se realiza de hormigón armado, no se ha considerado dentro del alcance de este proyecto.

3.2. Estructura sobre rasante

La estructura sobre rasante incluye las tres plantas superiores de cada uno de los bloques definidos en el apartado "1. Objetos y antecedentes".

En el interior de la estructura sobre rasante se localizan cuatro núcleos de hormigón armado cuyo cálculo no se ha considerado dentro del alcance de este proyecto.

En la figura siguiente se muestra la planta proporcionada por el diseño arquitectónico en la que se observa la forma de esta, dividida en dos bloques separados, y la ubicación de los pilares y los núcleos de hormigón.

3. Descripción de la estructura

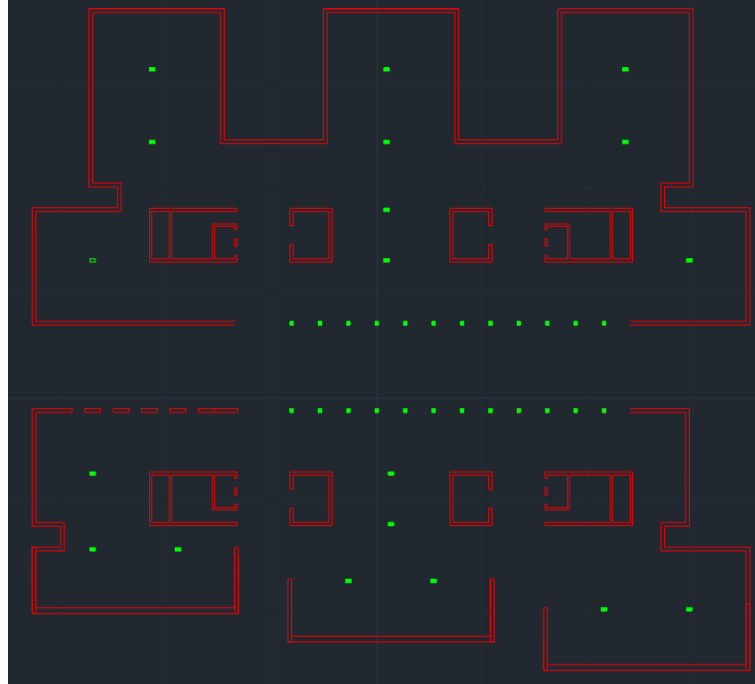


Figura 2. Planta de la estructura sobre rasante.

Cada planta de la estructura sobre rasante tiene aproximadamente 3.500 m², con luces entre 5,00 y 8,00 metros.

La base para el cálculo de dicha estructura es maximizar el uso de madera, intentando que sea en su totalidad.

4. Normativa y referencias

4.1. Normativa

El desarrollo del siguiente trabajo se ha basado en las siguientes normativas y reglamentos:

- UNE-EN 1995-1-1:2016 - Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Reglas generales y reglas para la edificación.
- CTE DB-SE – Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Acciones en la edificación, Madera.

4.2. Bibliografía

AENOR. (2016). *EUROCÓDIGO 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas.*

CYPE Ingenieros. (Julio de 2020). *Generador de precios.* Obtenido de <http://www.generadordeprecios.info/>

Ministerio de Vivienda. (2006). *CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, CTE. Documento básico. Seguridad estructural.*

proHolz Austria. (2014). *Cross-Laminated Timber Structural Design. Basic design and engineering principles according to Eurocode.*

STORA ENSO. (Julio de 2020). *Calculatis.* Obtenido de Calculatis by Stora Enso: <https://calculatis.storaenso.com/>

4.3. Programas de cálculo

Para realización de los cálculos y planos presentes en este trabajo se han empleado los siguientes programas:

- Software de diseño de CLT
Calculatis
Distribuidor: Stora Enso
- Software de diseño de CLT
CLT designer
Distribuidor: Holz.Bau
- Software de análisis estructural por elementos finitos 3D
RFEM
Distribuidor: Dlubal
- Software de BIM
Revit
Distribuidor: Autodesk

Estudio de soluciones

Índice Estudio de soluciones

| | |
|--|----|
| 1. Definición de las diferentes soluciones..... | 23 |
| 1.1. Elementos horizontales..... | 24 |
| 1.2. Elementos longitudinales..... | 25 |
| 1.3. Pilares..... | 25 |
| 1.4. Muros perimetrales..... | 26 |
| 2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones..... | 27 |
| 2.1. Elementos horizontales..... | 29 |
| 2.1.1. Panel de CLT..... | 29 |
| 2.1.2. Forjado nervado..... | 31 |
| 2.1.3. Solución óptima..... | 32 |
| 2.2. Elementos longitudinales..... | 33 |
| 2.2.1. Viga de acero..... | 33 |
| 2.2.2. Viga de madera..... | 34 |
| 2.2.3. Solución óptima..... | 35 |
| 2.3. Pilares..... | 36 |
| 2.4. Muros perimetrales..... | 38 |

1. Definición de las diferentes soluciones

1. Definición de las diferentes soluciones

En este apartado se procede, en primer lugar, a describir brevemente las posibles soluciones de los distintos elementos dentro del sistema estructural del edificio. A continuación, se predimensionarán los diferentes elementos, analizando las alternativas planteadas para, finalmente, escoger la solución óptima, que será calculada a lo largo del trabajo.

Como se ha comentado previamente, el objetivo del presente trabajo es calcular la estructura de madera del edificio, con lo que se va a describir y predimensionar la estructura sobre rasante.

Los elementos principales de la estructura que se procede a predimensionar se muestran en la siguiente imagen:

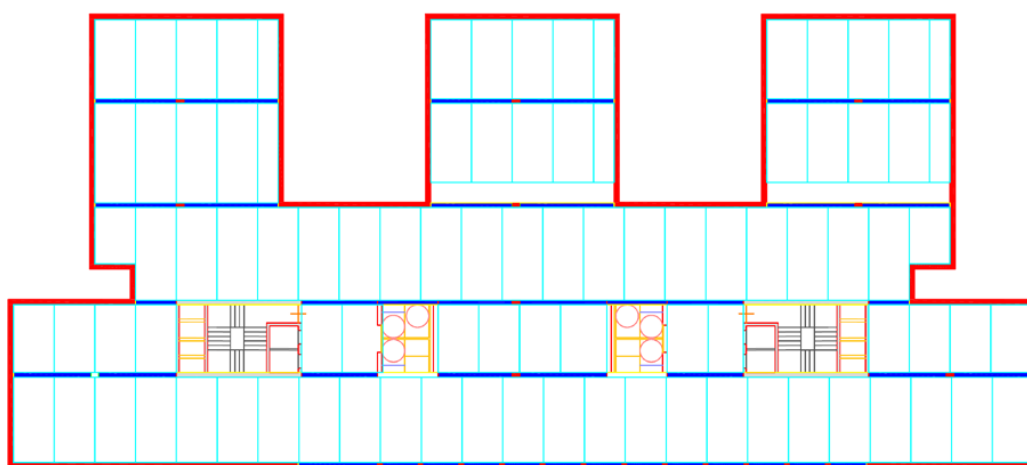


Figura 3. Planta de la estructura indicando los elementos principales de esta.

- En Rojo: Muros perimetrales.
- En Cian: Elementos horizontales.
- En Naranja: Pilares.
- En Azul: Elementos longitudinales para aportar continuidad al apoyo.

El orden en el que se procede a comentar las posibles soluciones para cada elemento estructural coincide con el orden que hay que seguir para su predimensionamiento.

1. Elementos horizontales
2. Elementos longitudinales, aquellos donde apoyan los elementos horizontales
3. Pilares, que sujetan los elementos longitudinales
4. Muros perimetrales.

1. Definición de las diferentes soluciones

1.1. Elementos horizontales

- Panel de CLT: Es un producto de construcción de madera sólida que consiste en al menos tres paneles unidos por una sola capa dispuestos en ángulos perpendiculares el uno del otro.



Figura 4. Ejemplo de panel de CLT.

- Forjado nervado: Es un producto de construcción basado en paneles de CLT con nervios de madera laminada distribuidos a lo largo de todo el ancho, de separación variable. Es útil en edificaciones en las que hay que cubrir grandes luces.



Figura 5. Ejemplo de forjado nervado.

A priori, para las luces que se consideran en el proyecto, situadas en torno a los siete metros, ambos sistemas son igualmente válidos.

1. Definición de las diferentes soluciones

1.2. Elementos longitudinales

- Viga de acero: Viga de acero mediante un perfil comercial.



Figura 6. Ejemplo de viga de acero.

- Viga de madera: Viga de sección variable, fabricada en madera maciza o madera laminada, sobre la que apoyar el elemento horizontal.



Figura 7. Ejemplo de viga de madera.

1.3. Pilares

- Pilares: Pilares de sección variable, fabricados en madera maciza.



Figura 8. Ejemplo de pilares de madera.

1. Definición de las diferentes soluciones

1.4. Muros perimetrales

- Muros perimetrales: Paneles de madera contralaminada CLT.



Figura 9. Ejemplo de muros perimetrales de CLT.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

En este apartado se procede a realizar un predimensionamiento de las diferentes soluciones mencionadas previamente para cada elemento estructural.

Para el predimensionamiento se utilizará el módulo de cálculo “Calculatis” de la empresa Stora Enso. Dicho módulo de cálculo permite diseñar todos los elementos descritos anteriormente y comprobar tanto los estados límite últimos, como los estados límite de servicio, la comprobación al fuego, e incluso las vibraciones.

A la hora de realizar el predimensionamiento, el punto de partida será una planta de la estructura proporcionada por el diseño arquitectónico del edificio, en donde se pueden observar la distribución de pilares y, por tanto, valorar los anchos tributarios y luces que será necesario soportar.

A continuación, se muestra una planta donde se observan en rojo los muros perimetrales y los núcleos interiores y, en verde, los pilares dispuestos.

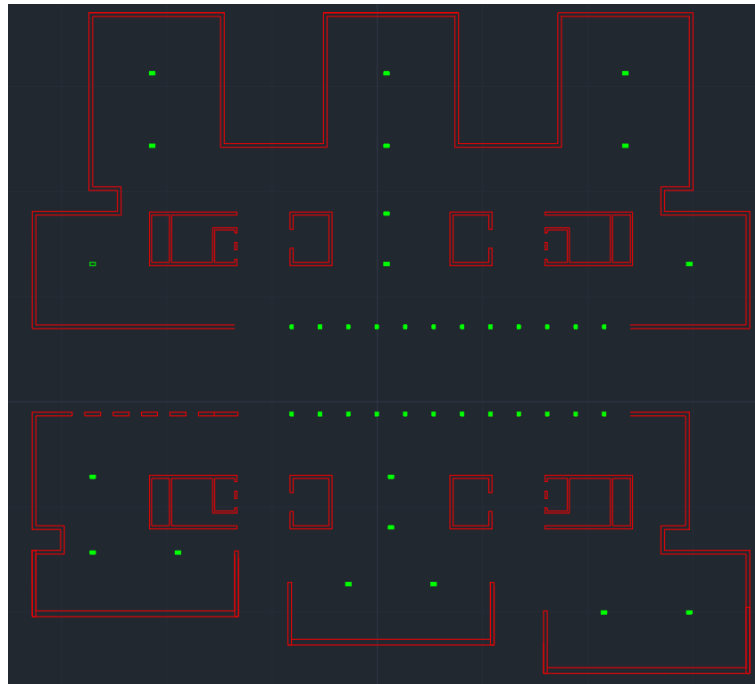


Figura 10. Planta mostrando la distribución de pilares y muros.

A partir de la planta previamente mostrada, en el apartado dedicado al predimensionamiento de cada elemento se valorará la zona más restrictiva para cada uno de ellos. De esta forma, se asegura que la solución escogida es válida en toda la estructura.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

Las cargas utilizadas en el predimensionamiento serán las siguientes:

- Peso propio de los elementos: Obtenido directamente a través del módulo de cálculo utilizado.
- Cargas muertas: A modo de quedar del lado de la seguridad en el diseño, se considera una carga superficial sobre los elementos horizontales de 3,00 kN/m².
- Sobrecarga de uso: La sobrecarga de uso se tendrá en cuenta conforme a la categoría de uso del edificio de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación DBSE-AE – Apartado 3.1.1.
 - Zona administrativa: 2,00 kN/m².
 - Cubierta accesible: 1,00 kN/m².
- Viento: El viento se tendrá en cuenta conforme lo que indica el Código Técnico de la Edificación DBSE-AE – Apartado 3.3.

Respecto a la categoría de uso del edificio, cabe destacar que, según la distribución planteada por arquitectura, la parte central de la planta baja es la única que se cataloga como “Zonas de acceso al público” categoría C, con lo que, dado que la estructura portante de dicha planta se construye de hormigón armado bajo rasante, no entra dentro del alcance de este trabajo.

La carga de nieve no se tiene en cuenta para el predimensionamiento puesto que, dada la ubicación de la estructura, y no siendo concomitante con la sobrecarga de uso, no se considera restrictiva.

Respecto al fuego, la normativa indica que para zonas administrativas sobre rasante con una altura inferior o igual a 15 metros la resistencia al fuego ha de ser mínimo R 60, pero, a modo de asegurar el predimensionamiento y dado que se trata de un material novedoso, se va a realizar el predimensionamiento para una resistencia al fuego R 90.

A continuación, de acuerdo con lo indicado anteriormente, se procede a predimensionar los diferentes elementos estructurales.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

2.1. Elementos horizontales

2.1.1. Panel de CLT

En primer lugar, es necesario observar la forma de introducir los datos en la herramienta a utilizar y, a partir de ahí, tomar las consideraciones necesarias.

El módulo de cálculo Calculatis de la empresa Stora Enso dimensiona los elementos horizontales como si fueran elementos horizontales longitudinales, despreciando su capacidad en la dirección transversal. Es previsible que dicho predimensionamiento, más adelante, se encuentre del lado de la seguridad.

A la hora de definir los vanos, Calculatis permite escoger entre el tipo de apoyo (deslizadera, rótula o empotramiento), el número de vanos, la longitud de estos, e incluso permite introducir voladizos. En el predimensionamiento, se procede a definir un único vano biapoyado, considerando que los elementos horizontales no tienen continuidad en los apoyos. Esta condición también deja del lado de la seguridad el resultado obtenido mediante el predimensionamiento.

Una vez definidos los vanos, permite introducir las cargas según el origen de estas (carga permanente, sobrecarga de uso categoría A, sobrecarga de uso categoría B, etc.), e introducir las cargas puntuales, cargas uniformemente distribuidas o cargas trapezoidales, asignándolas en todos los vanos o en los que sea necesario, considerando la alternancia de cargas.

Finalmente, una vez conocida la herramienta Calculatis, se procede a comprobar cuál es la situación más desfavorable que se observa en la planta. Para ello, dado que se considera biapoyado sin continuidad en los apoyos, se localiza la luz máxima que hay que salvar mediante los elementos horizontales. Cabe destacar que la distribución de pilares se realiza de tal forma que los elementos horizontales se dispongan en dirección vertical.

De este modo, la luz máxima se localiza en el extremo inferior derecho de la planta mostrada previamente, con una luz de 8,00 metros.

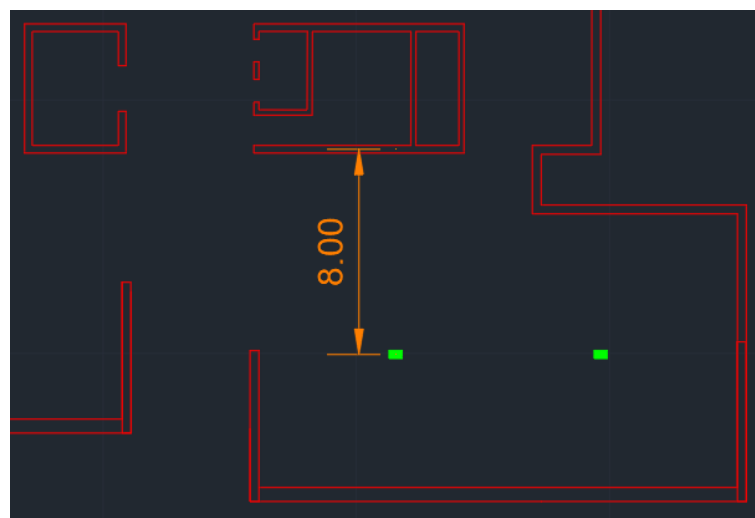


Figura 11. Luz máxima para predimensionar los elementos horizontales.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

Una vez considerados todos los valores necesarios para su predimensionamiento, se procede a introducirlos en la herramienta de cálculo y realizar el predimensionamiento.

En la siguiente figura se observa el esquema de cálculo utilizado para el predimensionamiento (el peso propio de la estructura es variable según el tipo de sección de CLT utilizada).

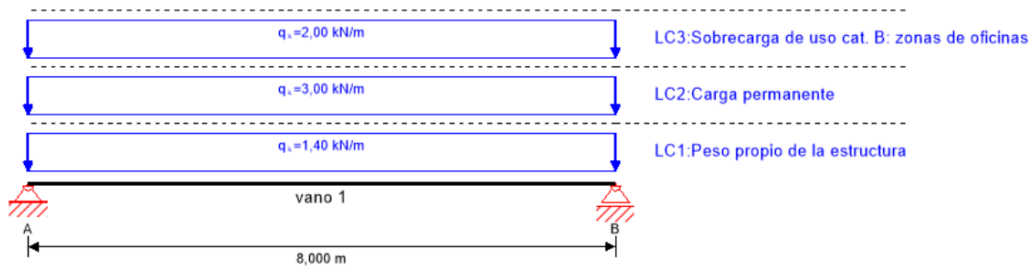


Figura 12. Esquema de cálculo de los elementos horizontales.

Como resultado del predimensionamiento se obtiene que la sección óptima de panel de CLT es la sección CLT 300 L8s – 2. Los valores anteriores indican:

- 300: Canto de la sección en milímetros
- L: Capa superior con la fibra en la dirección del lado largo.
- 8: Número de capas
- s-2: Indica que tiene dos capas longitudinales consecutivas en la parte superior.

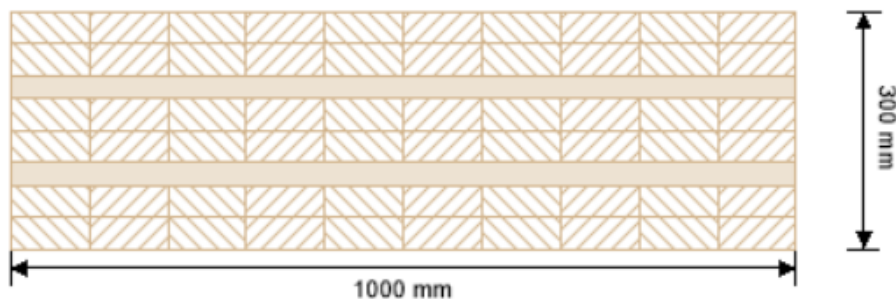


Figura 13. Sección de panel de CLT para los elementos horizontales.

Los cálculos realizados en el predimensionamiento se adjuntan en el Anejo 2.1.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

2.1.2. Forjado nervado

El Calculatis considera el forjado nervado igual que el panel de CLT, como un elemento horizontal longitudinal. Es por ello por lo que los valores necesarios para su predimensionamiento se introducen en la herramienta de la misma forma que en el predimensionamiento de los paneles de CLT.

Por tanto, el forjado nervado se predimensiona para el mismo vano y la misma distribución de cargas (como en el caso del panel de CLT, el valor de peso propio de la estructura es variable según la sección utilizada).

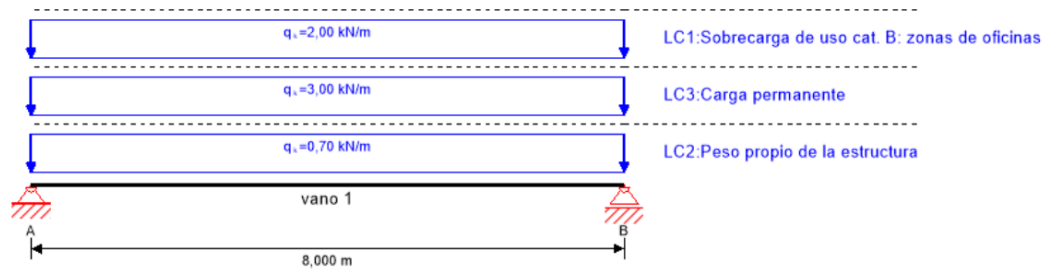


Figura 14. Esquema de cálculo del forjado nervado.

Una vez realizado el proceso de iteración para encontrar la solución óptima, la sección calculada se muestra en la siguiente figura.

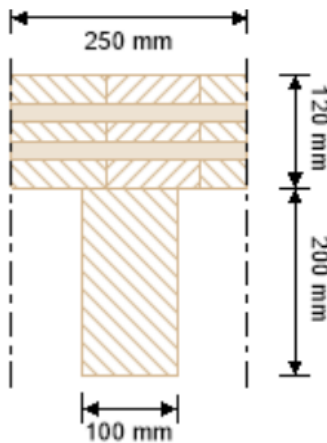


Figura 15. Sección de forjado nervado para los elementos horizontales.

La sección se trata de un panel de CLT de 12 centímetros de espesor, apoyado en nervios de madera maciza de 20 centímetros de canto y 10 centímetros de ancho colocados cada 25 centímetros.

Los cálculos realizados en el predimensionamiento se adjuntan en el Anejo 2.2.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

2.1.3. Solución óptima

Una vez analizados las dos soluciones para los elementos horizontales, es necesario adoptar la solución óptima para continuar con el predimensionamiento del resto de elementos.

Para ello, los factores que determinarán la solución óptima son los siguientes:

- Canto de la sección
- Volumen de madera utilizado

Respecto al canto de la sección, se observa que el panel de CLT tiene un canto total de 30 centímetros, mientras que el forjado nervado tiene un canto total de 32 centímetros, con lo que respecto al canto el panel de CLT es la solución óptima.

Respecto al volumen, se observa en la siguiente tabla la comparación realizada entre las dos soluciones por metro lineal de elemento.

Tabla 1. Comparación de las soluciones para los elementos horizontales.

| Sección | | Volumen (m ³ /m) | |
|-----------------|------|-----------------------------|------|
| Panel de CLT | | 0,30 | |
| Forjado Nervado | CLT | 0,12 | 0,20 |
| | Viga | 0,08 | |

Como se observa, el forjado nervado es óptimo respecto al volumen de madera utilizado.

Por otro lado, una diferencia que se observa en el cálculo de ambas soluciones es su aptitud frente al fuego.

El panel de CLT alcanza la resistencia requerida, R 90, sin necesidad de revestimiento, mientras que el forjado nervado necesita doble capa de revestimiento para que la viga de madera alcance dicha resistencia.

Por tanto, la solución óptima para los elementos horizontales resulta ser el panel de CLT.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

2.2. Elementos longitudinales

2.2.1. Viga de acero

Una vez definido el elemento horizontal se procede a predimensionar los elementos longitudinales sobre los que apoyan los elementos horizontales.

En primer lugar, como en el apartado anterior, se procede a encontrar la situación más desfavorable en planta. Dicha situación se encuentra, al igual que en el caso de los elementos horizontales, en la esquina inferior derecha de la planta mostrada previamente.

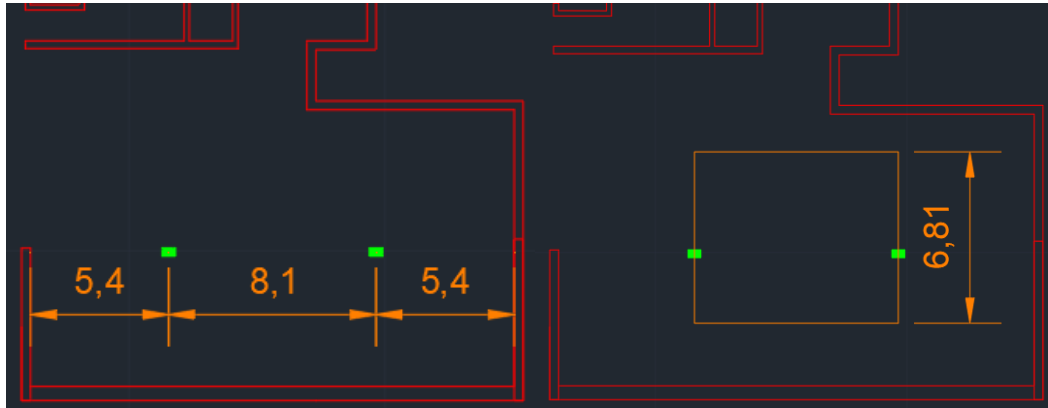


Figura 16. Situación más desfavorable para el predimensionamiento de los elementos longitudinales.

Como se observa en las figuras anteriores, la situación más desfavorable de la que se parte para realizar el predimensionamiento es una viga con tres vanos de luces 5,40, 8,10 y 5,40 metros.

El ancho tributario utilizado para el predimensionamiento será de 7,00 metros, a modo de asegurar su cumplimiento.

A partir de los datos obtenidos de la planta, se calculan las cargas a introducir en el Calculatis.

Tabla 2. Cálculo de las cargas para el predimensionamiento de los elementos longitudinales.

| | | |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Ancho Tributario (m) | 7,00 | |
| | Peso (kN/m²) | Carga (kN/m) |
| Panel de CLT | 1,50 | 10,50 |
| Cargas muertas | 3,00 | 21,00 |
| Sobrecarga de uso | 2,00 | 14,00 |

Una vez obtenida la geometría y las cargas se procede con el predimensionamiento de la viga de acero. La forma de introducir los datos en Calculatis es igual que en el caso de los elementos horizontales.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

En la siguiente figura se observa el modelo final para el predimensionamiento (el peso propio de la estructura es variable durante la iteración).

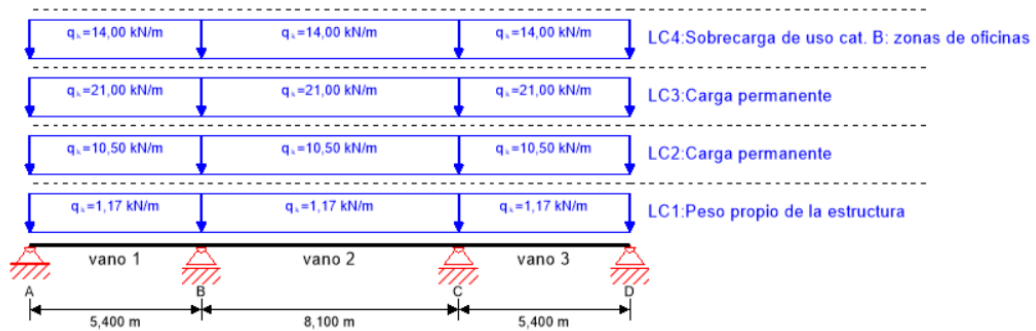


Figura 17. Esquema de cálculo para la viga de acero.

El material utilizado, a modo de quedar del lado de la seguridad, es un acero S235, siendo posible que finalmente se utilice un S275 o superior.

Finalmente, se concluye que la sección óptima es un HE-B 300.

Los cálculos realizados en el predimensionamiento se adjuntan en el Anejo 2.3.

2.2.2. Viga de madera

La geometría y las cargas de la viga de madera son las mismas que en el caso de la viga de acero.

En la siguiente ilustración se muestra el modelo de cálculo (el peso propio de la estructura es variable durante la iteración).

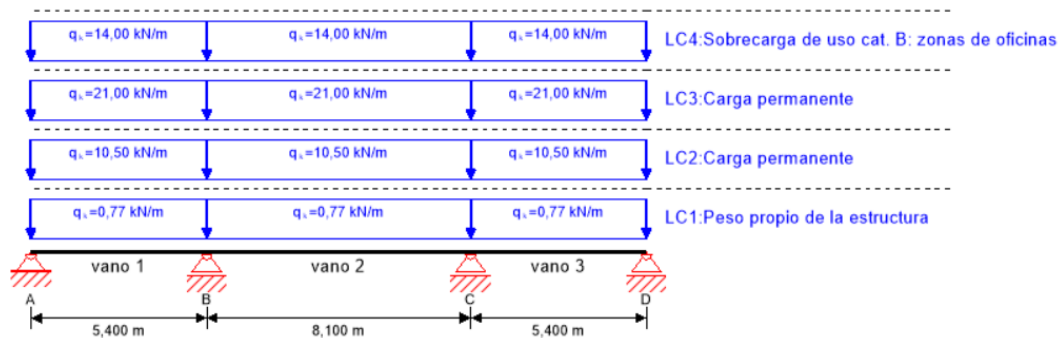
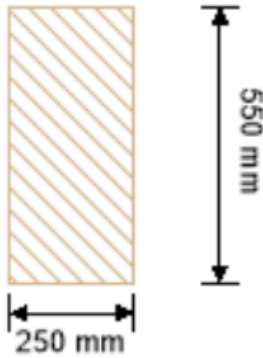


Figura 18. Esquema de cálculo para la viga de madera.

Durante la iteración se ha observado que, utilizando madera maciza con las cargas y las luces introducidas, la sección necesaria estaba fuera de orden. Por tanto, el material utilizado para el predimensionamiento es madera laminada.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones



La sección óptima es una sección rectangular con 25 centímetros de ancho y 55 centímetros de canto.

Los cálculos realizados en el predimensionamiento se adjuntan en el Anejo 2.4.

2.2.3. Solución óptima

Una vez analizadas las dos soluciones para los elementos longitudinales, es necesario adoptar la solución óptima para continuar con el predimensionamiento del resto de elementos.

Para ello, se utilizan principalmente los dos mismos factores que en el caso de los elementos horizontales:

- Canto de la sección
- Volumen de material utilizado

En este caso, se observa que la viga de acero es óptima frente a la viga de madera en ambos casos.

Además, en el caso de la viga de acero, al utilizar el panel de CLT para los elementos horizontales, se puede realizar el enlace mostrado en la siguiente figura para que el canto total del sistema estructural horizontal sea de 30 centímetros.

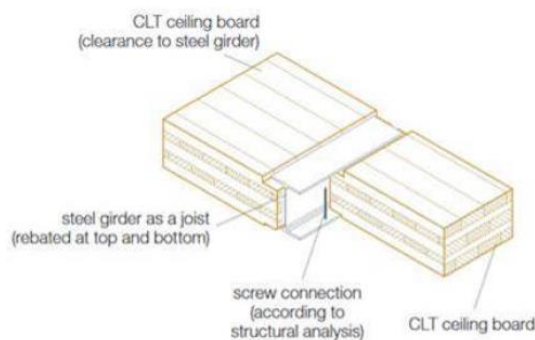


Figura 19. Ejemplo de enlace viga de acero - panel de CLT.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

2.3. Pilares

Una vez definidos los elementos horizontales y los elementos longitudinales, se procede a predimensionar los pilares que servirán de apoyo para los elementos longitudinales.

Al igual que en los anteriores apartados, se procede a localizar la situación más desfavorable en planta. Como en el caso de los elementos anteriores, la situación más desfavorable se encuentra en la parte inferior derecha de la planta, con un área tributaria de 44,4 m².

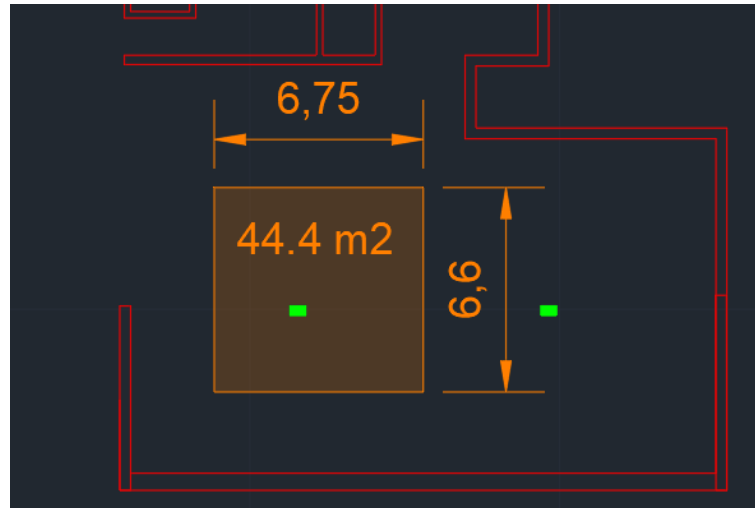


Figura 20. Situación más desfavorable para el predimensionamiento de los pilares.

A la hora de calcular las cargas que recibe el pilar, es necesario tener en cuenta que el edificio tiene tres forjados sobre rasante, con lo que la situación más desfavorable es en planta baja, soportando las cargas de los forjados superiores.

Para ello, se ha supuesto el mismo valor de carga muerta y de sobrecarga tanto para los forjados intermedios como para la cubierta.

Por tanto, las cargas utilizadas en el predimensionamiento se muestran a continuación.

Tabla 3. Cálculo de las cargas para el predimensionamiento de los pilares.

| | |
|-----------------------------|------|
| Ancho Tributario (m) | 6,75 |
| Largo Tributario (m) | 6,60 |
| Plantas | 3,00 |

| | Peso | Carga (kN) |
|-------------------|------------------------|-------------------|
| Viga de acero | 1,20 kN/m | 25,00 |
| Panel de CLT | 1,50 kN/m ² | 201,00 |
| Cargas muertas | 3,00 kN/m ² | 401,00 |
| Sobrecarga de uso | 2,00 kN/m ² | 268,00 |

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

Una vez obtenidas las cargas se procede a predimensionar el elemento mediante Calculatis. Para ello, se ha tenido en cuenta una altura libre entre forjados de 3,00 metros.

El esquema final para el predimensionamiento se muestra en la siguiente ilustración (el peso propio de la estructura es variable durante la iteración).

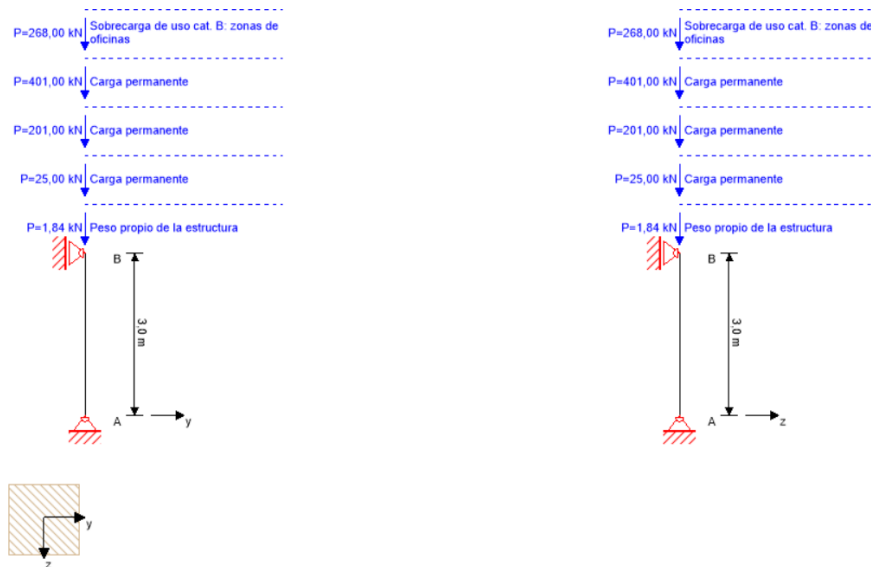


Figura 21. Esquema de cálculo de los pilares.

El material utilizado es madera maciza C24 de Abeto.

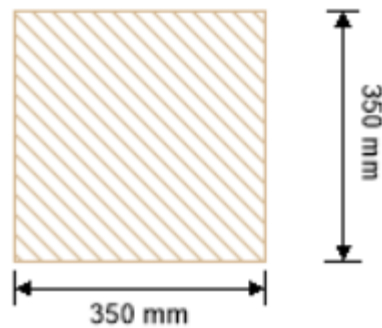


Figura 22. Sección resultante del predimensionamiento de los pilares

Finalmente, la sección óptima es una sección cuadrada de 35 centímetros de lado.

Los cálculos realizados en el predimensionamiento se adjuntan en el Anejo 2.5.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

2.4. Muros perimetrales

Para finalizar el predimensionamiento de los elementos principales de la estructura se procede a predimensionar los muros perimetrales.

Como se menciona en apartados anteriores, los muros perimetrales se realizan mediante paneles de CLT.

Siguiendo el procedimiento habitual, en primer lugar, se escoge la situación más desfavorable en planta. En este caso, se han encontrado dos posibles situaciones:

- Una situación donde se evalúa el apoyo lineal de los elementos horizontales sobre los muros perimetrales.
- Una situación donde se evalúa el apoyo puntual de la viga de acero.

En la siguiente ilustración se muestran las dos ubicaciones, la primera en la parte inferior y la segunda en la parte superior de la figura.

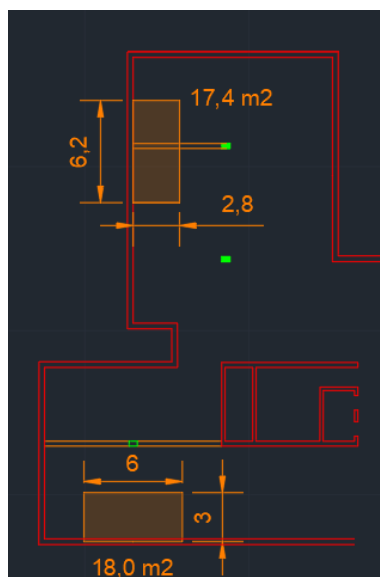


Figura 23. Situación más desfavorable para el predimensionamiento de los muros perimetrales.

A continuación, se evalúan las cargas recibidas en cada una de las situaciones.

En la primera situación, la carga recibida se reduce a una carga lineal producida por los forjados superiores.

Tabla 4. Cálculo de las cargas lineales para el predimensionamiento de los muros perimetrales.

| | |
|-----------------------------|------|
| Ancho Tributario (m) | 3,00 |
| Plantas | 3,00 |

| | Peso | Carga (kN/m) |
|-------------------|-------------|---------------------|
| Panel de CLT | 1,50 | 14,00 |
| Cargas muertas | 3,00 | 27,00 |
| Sobrecarga de uso | 2,00 | 18,00 |

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

En la segunda situación, se ha tenido en cuenta el apoyo de la viga de acero del forjado inmediatamente superior como carga puntual y la carga de los forjados superiores como carga lineal.

Tabla 5. Cálculo de las cargas puntuales para el predimensionamiento de los muros perimetrales.

| | |
|-----------------------------|-----|
| Ancho Tributario (m) | 2,8 |
| Largo Tributario (m) | 6,2 |
| Plantas | 1,0 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| Ancho Tributario (m) | 3,0 |
| Plantas | 2,0 |

| | Peso | Carga (kN) |
|-------------------|-----------------------|------------|
| Viga de acero | 1,2 kN/m | 4,0 |
| Panel de CLT | 1,5 kN/m ² | 27,0 |
| Cargas muertas | 3,0 kN/m ² | 53,0 |
| Sobrecarga de uso | 2,0 kN/m ² | 35,0 |

| | Peso | Carga (kN/m) |
|-------------------|------|--------------|
| Panel de CLT | 1,5 | 9,0 |
| Cargas muertas | 3,0 | 18,0 |
| Sobrecarga de uso | 2,0 | 12,0 |

En ambas situaciones, la altura entre forjados se ha considerado 3,00 metros y no se ha tenido en cuenta el peso de los muros perimetrales superiores.

Por tanto, en la primera situación, el esquema final para realizar el predimensionamiento una vez introducidos los valores en Calculatis es el siguiente (el peso propio de la estructura es variable durante la iteración).

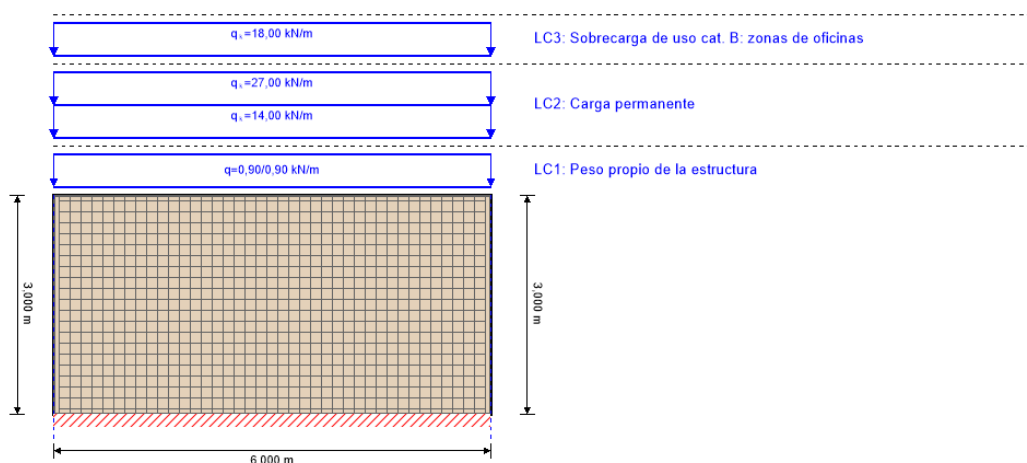


Figura 24. Esquema de cálculo con carga distribuida para los muros perimetrales.

2. Predimensionamiento de las diferentes soluciones

La sección obtenida considerando la distribución lineal de las cargas es un panel CLT 90 C3s.

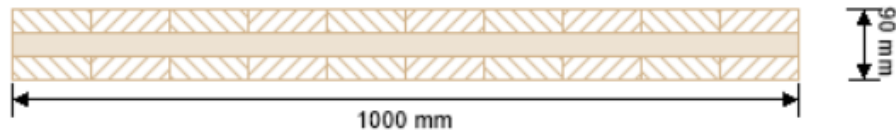


Figura 25. Sección resultante del predimensionamiento de los muros perimetrales con carga distribuida.

Los cálculos realizados en el predimensionamiento se adjuntan en el Anejo 2.6.

El esquema final para realizar el predimensionamiento en Calculatis para la segunda situación es el siguiente (el peso propio de la estructura es variable durante la iteración).

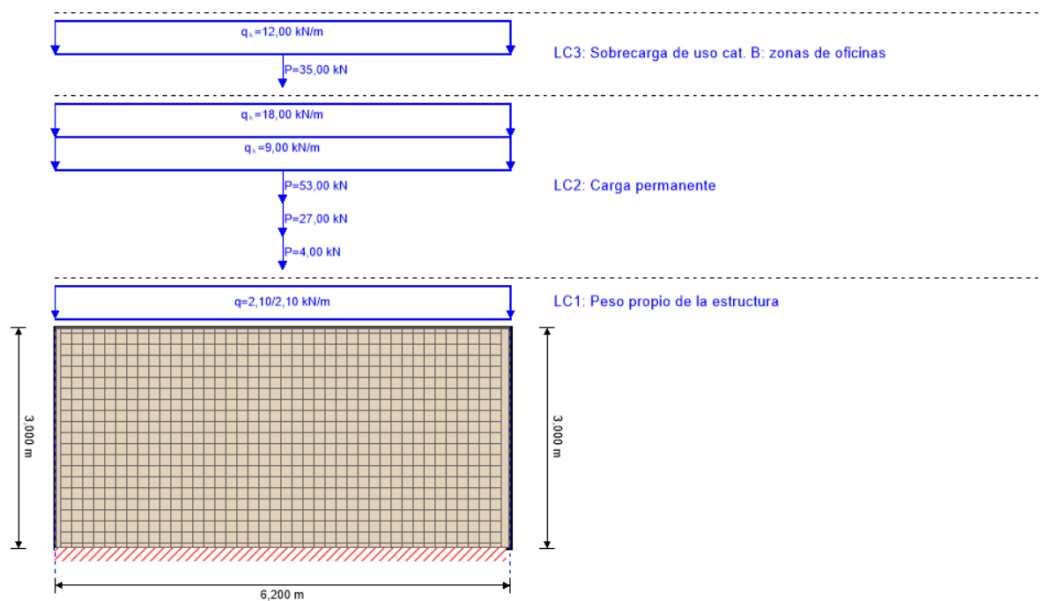


Figura 26. Esquema de cálculo para los muros perimetrales con cargas puntuales.

La sección obtenida considerando el apoyo puntual de la viga de acero es un panel CLT 140 C5s.

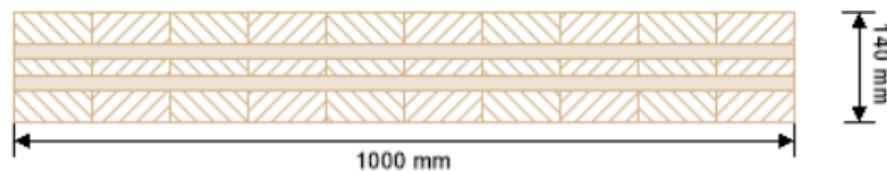


Figura 27. Sección resultante del predimensionamiento de los muros perimetrales con carga puntual.

Los cálculos realizados en el predimensionamiento se adjuntan en el Anejo 2.7.

Finalmente, la situación considerando el apoyo puntual de la viga de acero es más desfavorable que la situación considerando la carga distribuida, con lo que la sección final tras el predimensionamiento para los muros perimetrales es un panel CLT 140 C5s.

Diseño estructural del edificio

Índice Diseño estructural del edificio

| | |
|---|----|
| 1. Introducción al cálculo de CLT..... | 45 |
| 1.1. Método Gamma | 45 |
| 1.2. Forjado de CLT | 46 |
| 1.2.1. Flexión en la dirección principal del panel | 47 |
| 1.2.2. Flexión en la dirección transversal a la principal del panel | 47 |
| 1.2.3. Cortante en la dirección principal del panel | 48 |
| 1.2.4. Cortante en la dirección transversal a la principal del panel | 49 |
| 1.3. Muro de CLT | 49 |
| 1.3.1. Compresión en la dirección principal del panel | 50 |
| 1.3.2. Compresión en la dirección transversal a la principal del panel | 51 |
| 1.3.3. Flexión en la dirección principal del panel | 52 |
| 1.3.4. Flexión en la dirección transversal a la principal del panel | 52 |
| 1.3.5. Cortante producido por su comportamiento como placa | 52 |
| 1.3.5.1. Fallo de corte a lo largo de una junta..... | 52 |
| 1.3.5.2. Fallo de corte de las superficies pegadas en los puntos de intersección..... | 53 |
| 1.3.5.3. Fallo de corte de toda la placa | 54 |
| 1.3.6. Pandeo bajo presión en la dirección principal del panel | 55 |
| 1.4. Vibraciones..... | 57 |
| 1.5. Deformaciones | 60 |
| 1.6. Fuego..... | 61 |
| 2. Cálculos manuales: resultados y comprobación | 63 |
| 3. Cálculo de la estructura de madera completa | 69 |
| 3.1. Consideraciones iniciales..... | 69 |
| 3.2. Cálculo de la estructura inicial | 71 |
| 3.2.1. Modelado y cálculo de la estructura completa..... | 71 |
| 3.2.2. Verificación de los paneles de piso | 74 |
| 3.3. Cálculo de la estructura optimizada..... | 80 |
| 3.3.1. Modelado y cálculo de la estructura completa..... | 80 |
| 3.3.2. Verificación de los paneles de piso | 83 |
| 3.3.3. Verificación de las columnas | 86 |
| 3.3.4. Verificación de los paneles de pared | 89 |
| 3.3.5. Verificación de las vigas de acero..... | 91 |
| 3.3.6. Verificación de las vigas de CLT | 92 |

1.Introducción al cálculo de CLT

1.1. Método Gamma

En este apartado se van a introducir brevemente los conceptos necesarios para comprender el cálculo de un panel CLT, centrándose en el uso de estos como elementos horizontales y como muros perimetrales, a modo de comprender como resisten los esfuerzos que se producen y sus posibles fallos.

En primer lugar, es necesario explicar el método seguido para el cálculo. Como se ha indicado en apartados anteriores, el panel de CLT es un producto de construcción de madera sólida que consiste en al menos tres paneles unidos por una sola capa dispuestos en ángulos perpendiculares el uno del otro. Por tanto, su cálculo se asemeja al de una viga compuesta o mixta.

Las vigas compuestas disponen de enlaces capaces de asumir el esfuerzo rasante entre las distintas piezas que las forman. En el caso del panel de CLT, estos enlaces los constituyen las capas transversales intermedias entre las capas longitudinales. De esta forma, se asume que no existe una conexión total entre dichas piezas donde no existe deslizamiento, si no que existe una conexión flexible que se deforma significativamente debido al esfuerzo rasante, provocando deslizamiento y pérdida de eficacia.

El método utilizado para el cálculo de vigas compuestas con conexión flexible o elementos de CLT en flexión uniaxial considerando la deformación a cortante de las capas transversales es el método Gamma.

Las fórmulas para el método Gamma se editaron en el Eurocódigo 5 de modo que puedan aplicarse en casos con dos y tres capas longitudinales. Teóricamente, en ambos casos, se retiene la segunda capa longitudinal desde la parte superior. Las capas adyacentes están unidas de manera flexible y su respectiva aportación se reduce en un valor Gamma. Para secciones transversales con más de tres capas longitudinales se aplica el método Gamma modificado.

A continuación, se muestra una figura donde se muestra la obtención de Gamma en un panel de CLT de 3 capas y en uno de 5 capas, asimilándolos a una viga compuesta de dos y tres piezas respectivamente.

1. Introducción al cálculo de CLT

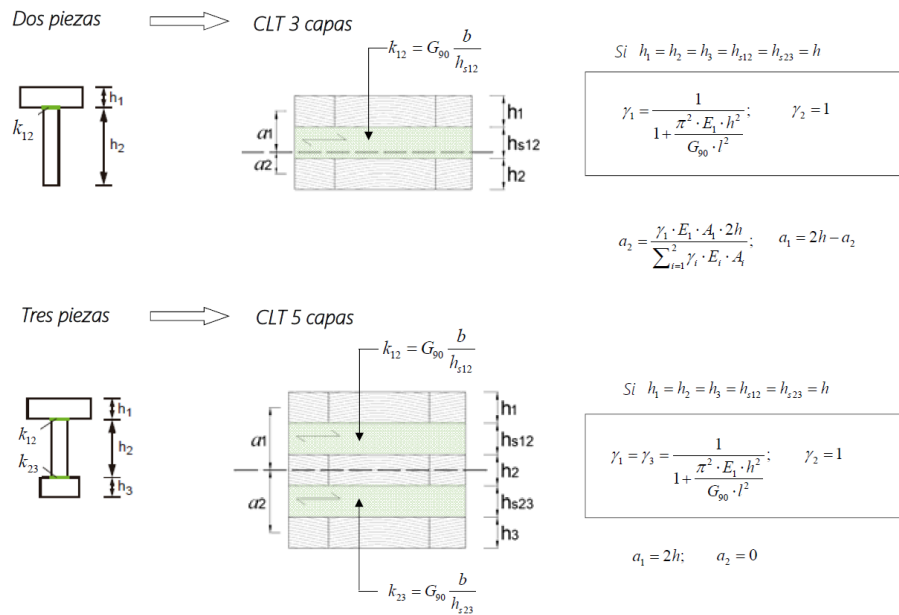


Figura 28. Ejemplo de obtención del valor de Gamma.

Una vez explicado brevemente el funcionamiento del panel CLT, se procede a identificar sus principales modos de fallo.

Si se precisa más información acerca del método utilizado para el cálculo, se puede recurrir a la bibliografía indicada.

1.2. Forjado de CLT

En este apartado se procede a indicar la formulación utilizada para el cálculo de los principales modos de fallo de un panel de CLT utilizado como elemento horizontal en una edificación.

Los principales modos de fallo son los siguientes:

- Flexión debida a las cargas superficiales en la dirección principal de la capacidad portante del panel.
- Flexión debida a las cargas superficiales en la dirección transversal a la capacidad portante del panel.
- Cortante debido a las cargas superficiales en la dirección principal de la capacidad portante del panel.
- Cortante debido a las cargas superficiales en la dirección transversal de la capacidad portante del panel.

1.Introducción al cálculo de CLT

1.2.1. Flexión en la dirección principal del panel

La flexión en la dirección principal del panel se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.

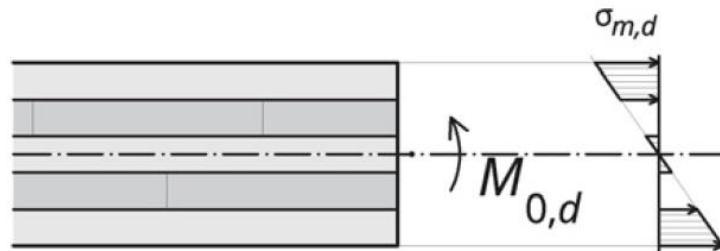


Figura 29. Flexión en la dirección principal del panel.

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$
$$\frac{M_{0,d}}{W_{0,net}} \leq k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_m}$$

Siendo,

$\sigma_{m,d}$ Tensión de diseño

$f_{m,d}$ Resistencia de diseño a flexión de la madera

$M_{0,d}$ Momento de diseño en la dirección de la capa superior

$W_{0,net}$ Momento resistente de la sección neta en dirección de la capa superior

k_{mod} Coeficiente que depende de la duración de la carga

k_{sys} Coeficiente que depende del sistema utilizado

$f_{m,k}$ Resistencia característica a flexión de la madera

γ_m Coeficiente parcial de seguridad de la madera

1.2.2. Flexión en la dirección transversal a la principal del panel

La flexión en la dirección transversal a la principal del panel se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.



Figura 30. Flexión en la dirección transversal a la principal del panel.

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$
$$\frac{M_{0,d}}{W_{0,net}} \leq k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_m}$$

1.Introducción al cálculo de CLT

Siendo,

$\sigma_{m,d}$ Tensión normal de diseño

$f_{m,d}$ Resistencia de diseño a flexión de la madera

$M_{90,d}$ Momento de diseño en la dirección transversal a la capa superior

$W_{90,net}$ Momento resistente de la sección neta en dirección transversal a la capa superior

k_{mod} Coeficiente que depende de la duración de la carga

k_{sys} Coeficiente que depende del sistema utilizado

$f_{m,k}$ Resistencia característica a flexión de la madera

γ_m Coeficiente parcial de seguridad de la madera

1.2.3. Cortante en la dirección principal del panel

El cortante en la dirección principal del panel se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.

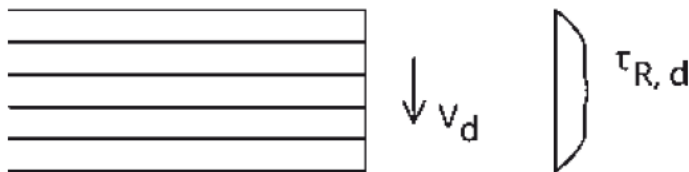


Figura 31. Cortante en la dirección principal del panel.

$$\tau_{V,R,d} \leq f_{V,R,d}$$
$$\frac{V_{0,d} \cdot S_{0,R,net}}{I_{0,net} \cdot b} \leq k_{mod} \cdot \frac{f_{V,R,k}}{\gamma_M}$$

Siendo,

$\tau_{V,R,d}$ Tensión tangencial de diseño

$f_{V,R,d}$ Resistencia a cortante de diseño

$V_{0,d}$ Fuerza de corte en la dirección principal del panel

$S_{0,R,net}$ Momento estático de la sección neta en la dirección principal del panel

$I_{0,net}$ Momento de inercia neto en la dirección principal del panel

b Anchura del panel

k_{mod} Coeficiente que depende de la duración de la carga

$f_{V,R,k}$ Resistencia característica a cortante

γ_M Coeficiente parcial de seguridad de la madera

1.Introducción al cálculo de CLT

1.2.4. Cortante en la dirección transversal a la principal del panel

El cortante en la dirección transversal a la principal del panel se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.

$$\tau_{V,R,d} \leq f_{V,R,d}$$
$$\frac{V_{90,d} \cdot S_{90,R,net}}{I_{90,net} \cdot b} \leq k_{mod} \cdot \frac{f_{V,R,k}}{\gamma_M}$$

Siendo,

$\tau_{V,R,d}$ Tensión tangencial de diseño

$f_{V,R,d}$ Resistencia a cortante de diseño

$V_{90,d}$ Fuerza de corte en la dirección transversal a la principal del panel

$S_{90,R,net}$ Momento estático de la sección neta en la dirección transversal a la principal del panel

$I_{90,net}$ Momento de inercia neto en la dirección transversal a la principal del panel

b Anchura del panel

k_{mod} Coeficiente que depende de la duración de la carga

$f_{V,R,k}$ Resistencia característica a cortante

γ_M Coeficiente parcial de seguridad de la madera

1.3. Muro de CLT

En este apartado se procede a indicar la formulación utilizada para el cálculo de los principales modos de fallo de un panel de CLT utilizado como muro perimetral en una edificación.

Los principales modos de fallo son los siguientes:

- Compresión en la dirección principal del panel
- Compresión en la dirección transversal a la principal del panel
- Flexión en la dirección principal del panel
- Flexión en la dirección transversal a la principal del panel
- Cortante producido por su comportamiento como placa
- Pandeo bajo presión en la dirección principal del panel

1.Introducción al cálculo de CLT

1.3.1. Compresión en la dirección principal del panel

La compresión en la dirección principal del panel se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.

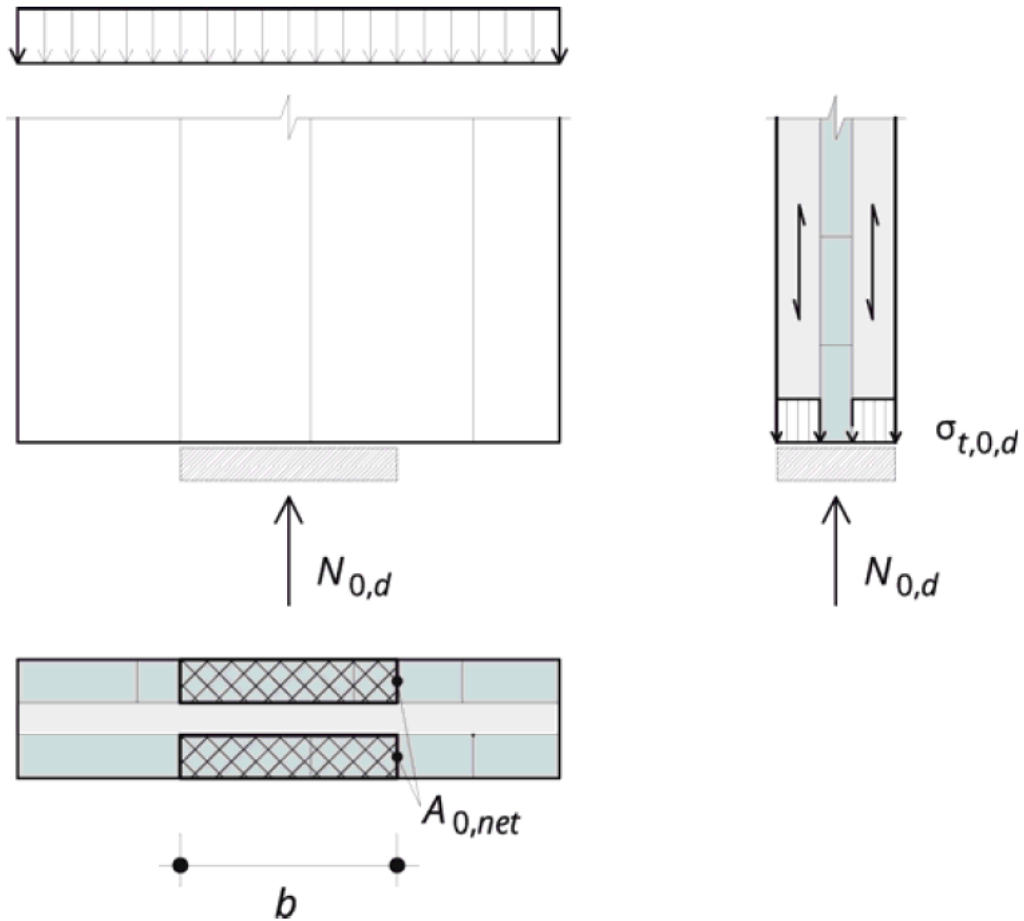


Figura 32. Compresión en la dirección principal del panel.

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

$$\frac{N_{0,d}}{A_{0,net}} \leq k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m}$$

Siendo,

$\sigma_{c,0,d}$ Tensión de compresión de diseño en la dirección principal del panel

$f_{c,0,d}$ Resistencia de diseño a compresión en la dirección principal del panel

$N_{0,d}$ Esfuerzo axial de diseño en la dirección principal del panel

$A_{0,net} = b \cdot d_{0,net}$ Área neta en a dirección principal del panel

k_{mod} Coeficiente que depende de la duración de la carga

$f_{c,0,k}$ Resistencia característica a compresión en la dirección principal del panel

γ_m Coeficiente parcial de seguridad de la madera

1.Introducción al cálculo de CLT

1.3.2. Compresión en la dirección transversal a la principal del panel

La compresión en la dirección transversal a la principal del panel se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.

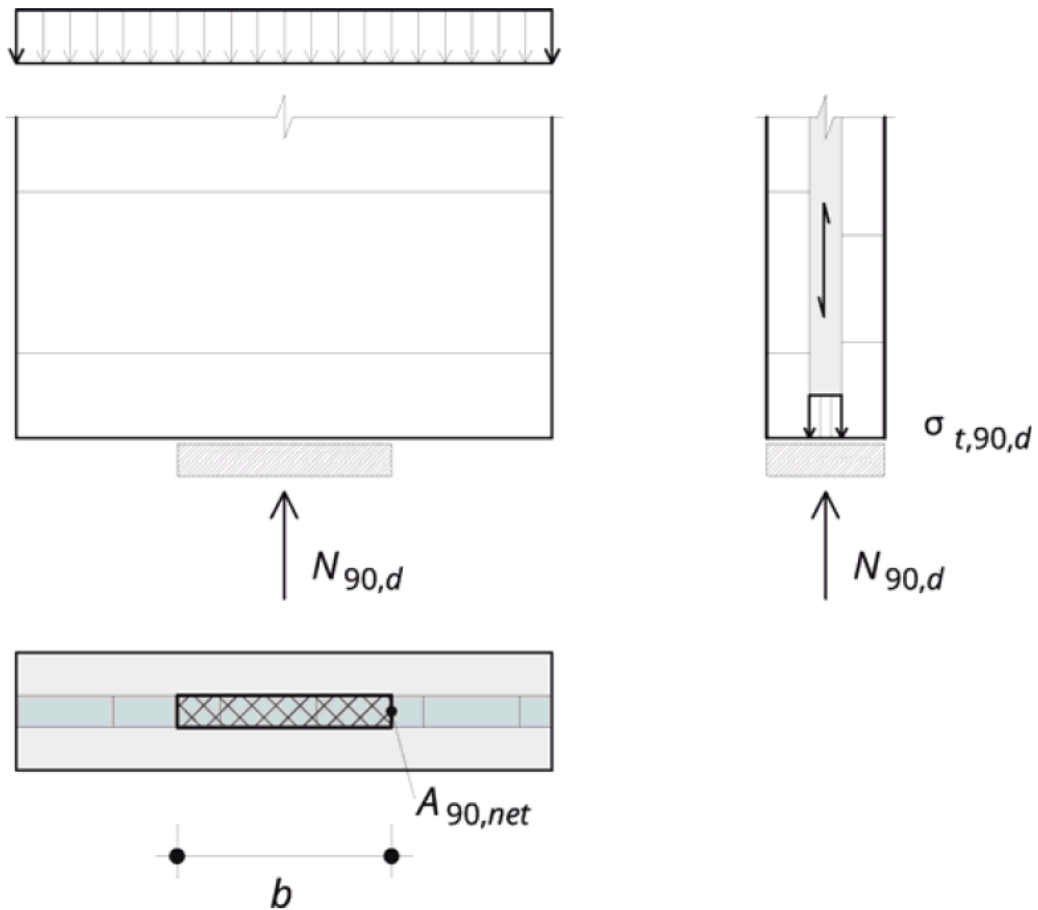


Figura 33. Compresión en la dirección transversal a la principal del panel.

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

$$\frac{N_{90,d}}{A_{90,net}} \leq k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_m}$$

Siendo,

$\sigma_{c,90,d}$ Tensión de compresión de diseño en la dirección transversal a la principal del panel

$f_{c,90,d}$ Resistencia de diseño a compresión en la dirección transversal a la principal del panel

$N_{90,d}$ Esfuerzo axial de diseño en la dirección transversal a la principal del panel

$A_{90,net} = b \cdot d_{90,net}$ Área neta en la dirección transversal a la principal del panel

k_{mod} Coeficiente que depende de la duración de la carga

1.Introducción al cálculo de CLT

$f_{c,90,k}$ Resistencia característica a compresión en la dirección transversal a la principal del panel

γ_m Coeficiente parcial de seguridad de la madera

1.3.3. Flexión en la dirección principal del panel

Es de aplicación lo indicado en el apartado 1.2.1.

1.3.4. Flexión en la dirección transversal a la principal del panel

Es de aplicación lo indicado en el apartado 1.2.2.

1.3.5. Cortante producido por su comportamiento como placa

El comportamiento como placa de un panel de CLT provoca tres tipos de fallos frente al cortante:

- Fallo de corte a lo largo de una junta
- Falla de corte de las superficies pegadas en los puntos de intersección
- Fallo de corte de toda la placa

1.3.5.1. Fallo de corte a lo largo de una junta

Se considera el fallo a cortante de la capa cruzada. El modo de fallo ocurre bajo la hipótesis de no existencia de cola en los cantos. De este modo, el cortante en la dirección de la fibra de las capas de cobertura necesitan ser transmitidas a través de las superficies entrecruzadas en contacto con la capa cruzada, donde el cortante es ahora perpendicular a la fibra de las láminas de la capa cruzada.

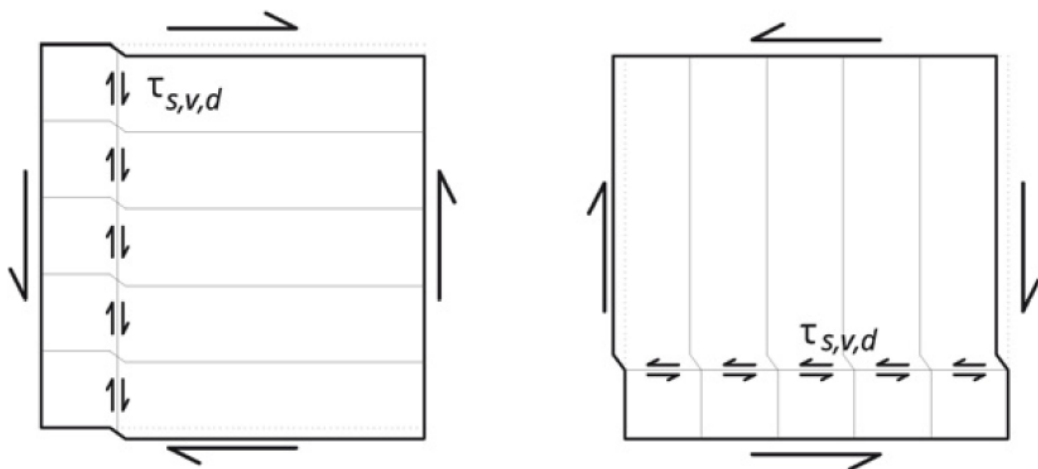


Figura 34. Fallo de corte a lo largo de una junta.

La formulación utilizada es la mostrada a continuación.

1.Introducción al cálculo de CLT

$$\tau_{V,S,d} \leq f_{V,S,d}$$

$$\tau_{V,S,d} = \frac{T}{A_{S,net}}$$

$$A_S = \min \begin{cases} A_{0,net} \\ A_{90,net} \end{cases}$$

Siendo,

$\tau_{V,S,d}$ Tensión tangencial de diseño

$f_{V,S,d}$ Resistencia a cortante de diseño

T Esfuerzo cortante en un nudo

1.3.5.2. Fallo de corte de las superficies pegadas en los puntos de intersección

Se considera que no hay transferencia de fuerzas a través de los cantos entre las láminas dentro de cada capa (dado que se considera el no encolado de los cantos debido a la no aprobación técnica para aplicaciones estructurales de la cola empleada). El análisis que se realiza es la consideración de solo una fuerza que se transmite entre las capas de láminas que es la que tendrá lugar en las superficies entrecruzadas de cada capa de láminas.

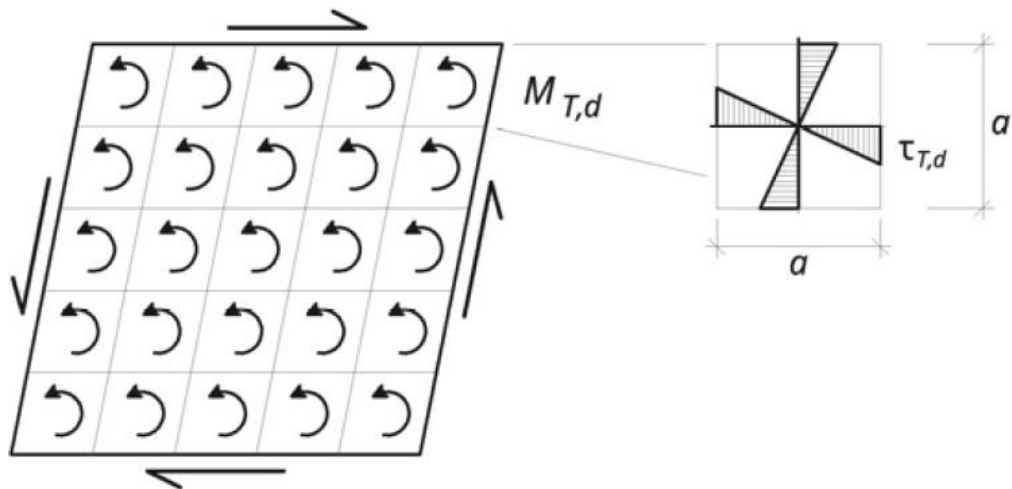


Figura 35. Fallo de corte de las superficies pegadas en los puntos de intersección.

La formulación utilizada es la mostrada a continuación.

$$\tau_{T,d} \leq f_{V,T,d}$$

$$\tau_{T,d} = \frac{M_T}{\sum I_p} \cdot \frac{a}{2} = \frac{M_T}{n_k \cdot \frac{a^4}{6}} \cdot \frac{a}{2} = \frac{3 \cdot M_T}{n_k \cdot a^3}$$

1.Introducción al cálculo de CLT

Siendo,

$\tau_{T,d}$ Tensión tangencial de diseño

$f_{V,T,d}$ Resistencia a cortante de diseño

M_T Momento producido por el esfuerzo cortante en un nudo T y la distancia desde el nudo considerado a dicho nudo h; $M_T = T \cdot h$

I_p Momento de inercia polar de la superficie cuadrada de intersección

a Ancho de la lámina (de acuerdo con el estándar de producto: $a = 40$ mm a 300 mm, recomendado: $a = 80$ mm)

n_k Número de superficies en contacto; $n_k = n_s \cdot n_f$

n_s Número de superficies en contacto entre capas colocadas de forma normal entre sí (por ejemplo, $n_s = 2$ en un elemento de tres capas)

n_f Número de celdas de intersección

1.3.5.3. Fallo de corte de toda la placa

Se considera que las fuerzas internas se transfieren entre placas de láminas individuales.

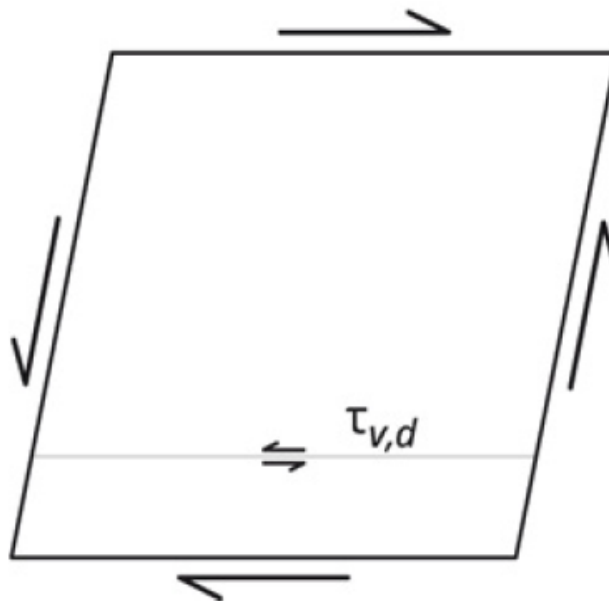


Figura 36. Fallo de corte de toda la placa.

La formulación utilizada es la mostrada a continuación.

$$\tau_{V,d} \leq f_{V,d}$$
$$\tau_{V,d} = \frac{T}{A_{gross}}$$

1.Introducción al cálculo de CLT

Siendo,

$\tau_{V,d}$ Tensión tangencial de diseño

$f_{V,d}$ Resistencia a cortante de diseño

T Esfuerzo cortante en un nudo

A_{gross} Área bruta de la sección

1.3.6. Pandeo bajo presión en la dirección principal del panel

El pandeo bajo presión en la dirección principal del panel se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$\frac{\frac{N_d}{A_{net}}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\frac{M_d}{W_{net}}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$i_{y,0,ef} = \sqrt{\frac{I_{y,0,ef}}{A_{0,net}}}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{k,i}}{i_{y,0,ef}}$$

Siendo,

N_d Esfuerzo axil de cálculo

M_d Esfuerzo flector de cálculo

A_{net} Área neta de la sección transversal

W_{net} Momento resistente de la sección neta

$\sigma_{c,0,d}$ Tensión de compresión de diseño en la dirección principal del panel

$\sigma_{m,d}$ Tensión de flexión de diseño en la dirección principal del panel

$f_{c,0,d}$ Resistencia de diseño a compresión en la dirección principal del panel

$f_{m,d}$ Resistencia de diseño a flexión de la madera

$k_{c,y}$ Coeficiente de pandeo, definido por la siguiente expresión

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - A_{rel,y}^2}}$$

k_y Coeficiente de pandeo, definido por la siguiente expresión

$$k_y = 0,5 \cdot [(1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3)) + \lambda_{rel,y}^2]$$

β_c Coeficiente de imperfección, $\beta_c = 0,1$ para madera contralaminada

1.Introducción al cálculo de CLT

$\lambda_{rel,y}$ Grado relativo de esbeltez para el pandeo lateral sobre el eje y, definido por la siguiente expresión

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

| λ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | 1,000 | | | | | | | | | |
| 20 | 0,999 | 0,998 | 0,996 | 0,994 | 0,992 | 0,991 | 0,989 | 0,987 | 0,985 | 0,983 |
| 30 | 0,981 | 0,978 | 0,976 | 0,974 | 0,971 | 0,969 | 0,966 | 0,963 | 0,960 | 0,957 |
| 40 | 0,954 | 0,951 | 0,947 | 0,944 | 0,940 | 0,936 | 0,931 | 0,926 | 0,922 | 0,916 |
| 50 | 0,911 | 0,905 | 0,898 | 0,892 | 0,885 | 0,877 | 0,869 | 0,860 | 0,851 | 0,842 |
| 60 | 0,832 | 0,822 | 0,811 | 0,799 | 0,788 | 0,776 | 0,763 | 0,751 | 0,738 | 0,725 |
| 70 | 0,712 | 0,699 | 0,686 | 0,673 | 0,660 | 0,647 | 0,634 | 0,622 | 0,609 | 0,597 |
| 80 | 0,585 | 0,574 | 0,562 | 0,551 | 0,540 | 0,529 | 0,519 | 0,508 | 0,498 | 0,489 |
| 90 | 0,479 | 0,470 | 0,461 | 0,452 | 0,443 | 0,435 | 0,427 | 0,419 | 0,411 | 0,403 |
| 100 | 0,396 | 0,389 | 0,382 | 0,375 | 0,368 | 0,362 | 0,355 | 0,349 | 0,343 | 0,337 |
| 110 | 0,332 | 0,326 | 0,320 | 0,315 | 0,310 | 0,305 | 0,300 | 0,295 | 0,290 | 0,286 |
| 120 | 0,281 | 0,277 | 0,272 | 0,268 | 0,264 | 0,260 | 0,256 | 0,252 | 0,248 | 0,245 |
| 130 | 0,241 | 0,238 | 0,234 | 0,231 | 0,227 | 0,224 | 0,221 | 0,218 | 0,215 | 0,212 |
| 140 | 0,209 | 0,206 | 0,203 | 0,201 | 0,198 | 0,195 | 0,193 | 0,190 | 0,188 | 0,185 |
| 150 | 0,183 | 0,180 | 0,178 | 0,176 | 0,174 | 0,172 | 0,169 | 0,167 | 0,165 | 0,163 |
| 160 | 0,161 | 0,159 | 0,157 | 0,156 | 0,154 | 0,152 | 0,150 | 0,148 | 0,147 | 0,145 |
| 170 | 0,143 | 0,142 | 0,140 | 0,138 | 0,137 | 0,135 | 0,134 | 0,132 | 0,131 | 0,130 |
| 180 | 0,128 | 0,127 | 0,125 | 0,124 | 0,123 | 0,121 | 0,120 | 0,119 | 0,118 | 0,116 |

Figura 37. Coeficiente de pandeo $k_{c,y}$ para madera contralaminada. Condiciones: $E_{0,05} = 9.160 \text{ N/mm}^2$, $B_c=0,1$.

1.Introducción al cálculo de CLT

1.4. Vibraciones

Una vez comprobados los requisitos estructurales en los forjados de panel de CLT es necesario tener en cuenta las vibraciones. Para ello, el esquema a seguir es el siguiente.

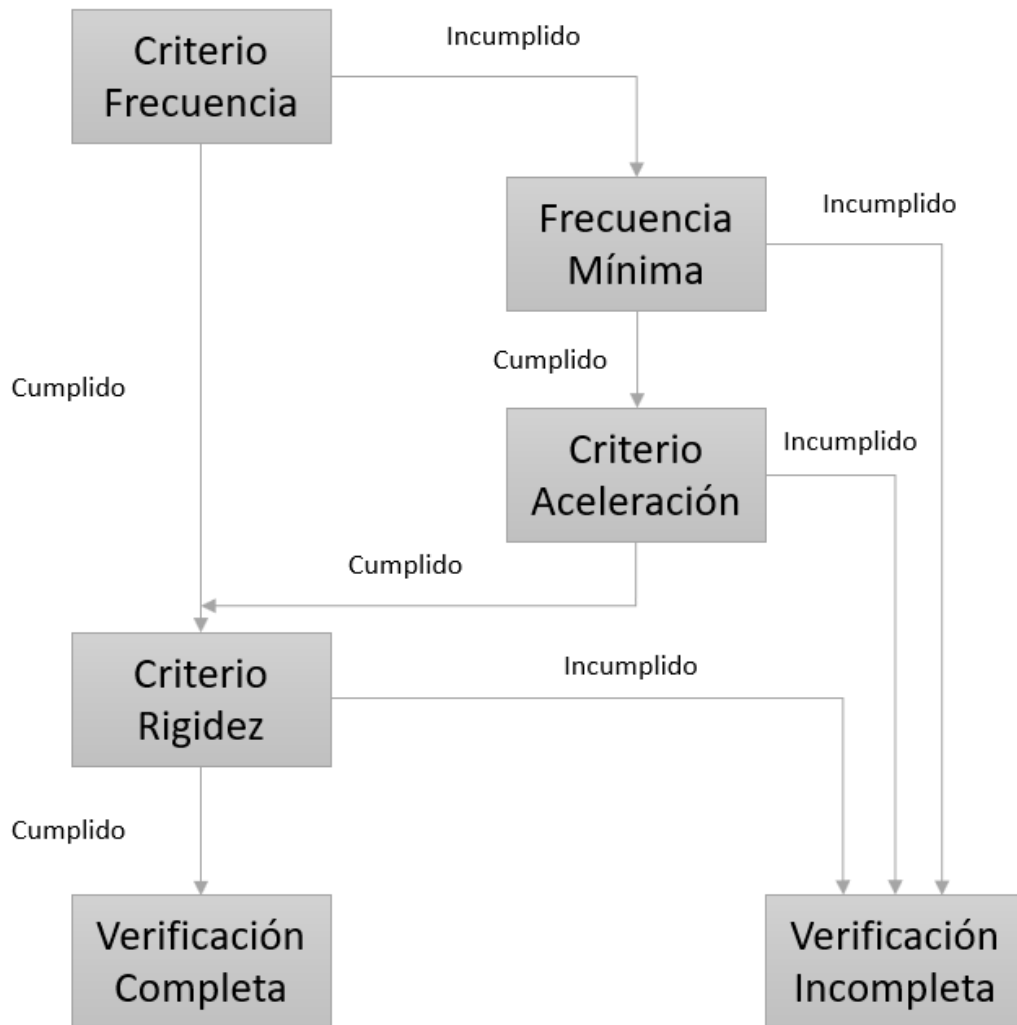


Figura 38. Diagrama de verificación de la vibración

Los criterios nombrados previamente son los siguientes:

1.Introducción al cálculo de CLT

Tabla 6. Criterios utilizados en el análisis de vibraciones.

| | Clase de vibración 1 | Clase de vibración 2 |
|-------------------------|---|---|
| Aplicaciones | Forjados entre espacios con diferentes usos, como forjados entre apartamentos, oficinas, etc. | Forjados con un único uso, como por ejemplo en casas unifamiliares. |
| Criterio de Frecuencia | $f_1 \geq 8 \text{ Hz}$ | $f_1 \geq 6 \text{ Hz}$ |
| Frecuencia mínima | $f_1 \geq 4,50 \text{ Hz}$ | $f_1 \geq 4,50 \text{ Hz}$ |
| Criterio de Aceleración | $a_{rms} \leq 0,05 \text{ m/s}^2$ | $a_{rms} \leq 0,10 \text{ m/s}^2$ |
| Criterio de Rigidez | $w_{1kN} \leq 0,25 \text{ mm}$ | $w_{1kN} \leq 0,50 \text{ mm}$ |

El criterio de frecuencia se basa en la frecuencia propia de vibración del panel de CLT. En el caso de un forjado de un solo vano con una masa uniformemente distribuida, como es el caso del panel de estudio, la frecuencia propia se obtiene mediante la siguiente formulación.

$$f_{1,beam} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_0}{m}}$$

Siendo,

l Longitud del vano estudiado

E Módulo de elasticidad en la dirección principal del panel

I_0 Momento de inercia neto en la dirección principal del panel

m Masa distribuida uniformemente en la superficie

La frecuencia propia de vibración del panel de CLT se puede ver modificada tanto por la distribución de los vanos, como por el sistema de apoyos y la relación entre la rigidez en la dirección principal del panel y la transversal a esta.

En este caso, dado que la estructura analizada se va a plantear mediante vanos biapoyados y sin continuidad entre estos, la formulación a utilizar es la mostrada previamente. Si se desea encontrar más información al respecto, se puede consultar la bibliografía incluida en el trabajo.

El criterio de aceleración se basa en la aceleración provocada por el paso de una persona sobre el panel. Esta aceleración se calcula mediante la formulación mostrada a continuación.

$$a_{rms} = \frac{0,40 \cdot \alpha \cdot F_0}{M \cdot 2 \cdot D}$$

1.Introducción al cálculo de CLT

Siendo,

α Coeficiente que considera la influencia de la frecuencia natural de la vibración en la aceleración; $\alpha = e^{-0,47 \cdot f_1}$

F_0 Peso de una persona andando; $F_0 = 700 \text{ N}$

M Masa modal, calculada mediante la siguiente formula

$$M = m \cdot \frac{l}{2 \cdot k_{transversal}^2} \cdot b$$

m Masa distribuida uniformemente en la superficie

$k_{transversal}$ Coeficiente que considera la aportación de la rigidez transversal. En este trabajo se considera que la rigidez transversal no colabora, con lo que este coeficiente tiene valor unidad

b Ancho del vano del forjado en la dirección transversal a la dirección principal del panel

D Coeficiente de amortiguación

El criterio de rigidez se corresponde con la flecha provocada a consecuencia de una carga puntual $F = 1 \text{ kN}$ situada en el punto más desfavorable. En este caso sí que es necesario tener en cuenta la aportación de la distribución transversal, dado que en el caso de no considerarla los resultados obtenidos serían desproporcionados respecto a la realidad.

Por ello, la formulación utilizada es la mostrada a continuación.

$$w_{1kN} = \frac{1kN \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_0} \cdot \frac{1}{b_F}$$

Siendo,

l Longitud del vano estudiado

$E \cdot I_0$ Rigidez a flexión en la dirección principal del panel

b_F Ancho tributario del vano, considerando la distribución transversal, y obtenido mediante la siguiente formulación

$$b_F = \min \left\{ \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{E \cdot I_{transversal}}{E \cdot I_0}}; b \right\} \geq 1$$

$E \cdot I_{transversal}$ Rigidez a flexión en la dirección transversal a la principal del panel

b Ancho del vano del forjado en la dirección transversal a la dirección principal del panel

1.Introducción al cálculo de CLT

1.5. Deformaciones

A la hora de comprobar el estado límite de servicio relativo a las flechas producidas en el forjado realizado mediante un panel de CLT, la diferencia básica respecto a un forjado realizado por ejemplo de hormigón es la obtención de las cargas diferidas.

En un forjado de madera, las deformaciones diferidas se obtienen mediante una combinación cuasi permanente y multiplicadas por el coeficiente de deformación k_{def} que depende de la clase de utilización y el material de construcción utilizado (su valor se puede observar en la tabla incluida más abajo).

Por tanto, las deformaciones diferidas se calculan mediante la siguiente formulación.

$$w_{inst,qs} = w_G + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot w_{Q,i}$$

$$w_{creep} = k_{def} \cdot w_{inst,qs}$$

Siendo,

w_G Flecha producida por las cargas permanentes

$w_{Q,i}$ Flecha producida por las cargas variables

$\psi_{2,i}$ Coeficiente de simultaneidad para la combinación cuasi permanente

$w_{inst,qs}$ Flecha instantánea para la combinación cuasi permanente

k_{def} Coeficiente que depende de la clase de utilización y del material de construcción utilizado

w_{creep} Flecha producida por las cargas diferidas

Tabla 7. Coeficiente k_{def} para madera maciza, madera laminada encolada y madera contralaminada.

| Material de construcción | k_{def} según clase de utilización | | |
|--------------------------|--------------------------------------|------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Madera maciza | 0,60 | 0,80 | 2,00 |
| Madera laminada encolada | | | |
| Madera contralaminada | 0,80 | 1,00 | No aprobada |

1.Introducción al cálculo de CLT

1.6. Fuego

En el caso del cálculo frente al fuego, las comprobaciones estructurales previamente indicadas se resuelven mediante la misma formulación, pero utilizando la sección reducida tras la acción del fuego y las resistencias sin reducir por el coeficiente de seguridad del material.

La obtención de la sección reducida se obtiene a partir de la velocidad de carbonización, β_1 , cuyo valor depende del material utilizado y del tipo de sección.

El aumento de temperatura da como resultado una reducción de las propiedades del material, que se considera a través de una capa sin resistencia de 7,00 milímetros de espesor.

Además, una capa longitudinal debe de tener, una vez considerada la acción del fuego, un mínimo de 3,00 milímetros de espesor para que se pueda considerar su aportación.

Como se comenta previamente, en caso de incendio, la verificación puede llevarse a cabo sin factores de seguridad y con mayores resistencias.

La verificación es la siguiente:

$$\begin{aligned}\sigma_{fi,d} &\leq f_{fi,d} \\ \sigma_{fi,d} &\leq k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \\ \sigma_{fi,d} &\leq k_{fi} \cdot k_{mod,fi} \cdot \frac{f_k}{\gamma_{M,fi}}\end{aligned}$$

$k_{mod,fi}$ Coeficiente de modificación en caso de fuego. Para el método comentado de la sección reducida $k_{mod,fi} = 1,00$

f_{20} Resistencia a temperatura normal con un percentil del 20%

k_{fi} Coeficiente para la conversión del percentil 5% al 20%. Para madera contralaminada, $k_{fi} = 1,15$ es un valor común

f_k Resistencia característica de la madera

$\gamma_{M,fi}$ Coeficiente parcial de seguridad para la madera en caso de fuego, $\gamma_{M,fi} = 1,00$

2. Cálculos manuales: resultados y comprobación

2. Cálculos manuales: resultados y comprobación

En este apartado se calcula un forjado de panel de CLT mediante la formulación mostrada previamente, comparando estos resultados con los obtenidos mediante programas de cálculo.

En primer lugar, es necesario tener en cuenta las limitaciones frente al estado límite de servicio que se han tenido en cuenta en lo referente a las deformaciones. Siguiendo el Documento Básico de Seguridad Estructural, se ha considerado las siguientes limitaciones en cuanto a la flecha relativa:

- Flecha activa (integridad de los elementos constructivos): 1/500
- Flecha instantánea (confort de los usuarios): 1/350
- Flecha total (apariencia de la obra): 1/300

Las flechas se obtienen mediante la combinación y el tipo de cargas que se indican en el apartado 4.3.3.1 del Documento Básico de Seguridad Estructural.

Los desplazamientos horizontales se verifican de acuerdo con el artículo 4.3.3.2 del Documento Básico de Seguridad Estructural, obteniendo las siguientes limitaciones:

- Ante cualquier combinación de acciones característica:
 - Desplome total: 1/500 de la altura total del edificio
 - Desplome local: 1/250 de la altura de la planta, en cualquier de ellas
- Ante cualquier combinación de acciones casi permanente:
 - Desplome local: 1/250 de la altura de la planta, en cualquiera de ellas

La verificación de los desplazamientos horizontales se realiza mediante el modelo completo en el programa de cálculo mediante elementos finitos.

La resistencia al fuego se ha considerado a partir del Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio. En el caso de la edificación considerada, la resistencia exigida es REI 60, dado que se trata de un edificio con un uso administrativo y una altura inferior a 15 metros.

A modo de considerar una futura ampliación en altura del edificio, la resistencia al fuego exigida en el diseño de los elementos es REI 90, la correspondiente a un edificio con un uso administrativo y una altura entre 15 y 28 metros.

En todo caso, para realizar los cálculos manuales y en la verificación de estos se ha considerado una resistencia REI 120.

Una vez analizadas las limitaciones y exigencias requeridas, se procede con los resultados obtenidos mediante cálculos manuales.

2. Cálculos manuales: resultados y comprobación

Cálculos manuales

El cálculo se ha realizado para el mismo caso analizado en los apartados correspondientes al predimensionamiento. Por ello, se analiza un panel de CLT de 8,00 metros de luz y 30 centímetros de espesor, perteneciente a la empresa Stora Enso.

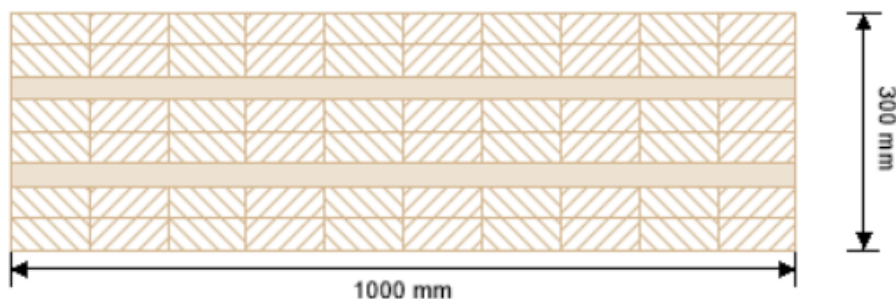


Figura 39. Sección CLT 300 L8s-2.

En lo referente a las cargas, se considera una carga muerta de 3,00 kN/m² y una sobrecarga de uso de 2 kN/m².

El material considerado es C24 Abeto, teniendo en cuenta la misma resistencia, módulo de elasticidad, y demás valores propios del material en los cálculos manuales que en los cálculos mediante los diferentes programas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante los cálculos manuales para los diferentes estados, así como el porcentaje de aprovechamiento del panel de CLT en cada uno de ellos.

Tabla 8. Resultados de los cálculos manuales.

| Estado Límite Último | |
|----------------------|-----|
| Flexión | 34% |
| Cortante | 6% |
| Cortante Rodadura | 21% |

| Estado Límite Servicio | |
|------------------------|-----|
| Flecha activa | 97% |
| Flecha instantánea | 22% |
| Flecha neta final | 88% |

| Estado Límite Último FUEGO | |
|----------------------------|-----|
| Flexión | 24% |
| Cortante | 4% |
| Cortante Rodadura | 13% |

| Vibraciones | |
|----------------------------------|----------|
| Criterio | ¿Cumple? |
| Criterio de frecuencia | 146% |
| Criterio de la frecuencia mínima | 82% |
| Criterio de aceleración | 68% |
| Criterio de rigidez | 58% |
| CORRECTO | |

2. Cálculos manuales: resultados y comprobación

Una vez obtenidos los resultados de los cálculos manuales, se procede a calcular, mediante un software de cálculo, el mismo panel de CLT sometido a las mismas cargas y con las mismas características, con el fin de comparar y poder verificar que la formulación manual utilizada es correcta. Para ello se han utilizado tres programas de cálculo a modo de verificación.

Cálculos mediante software

A continuación, se procede a enumerar cada uno de ellos para, finalmente, realizar la comparación de los resultados obtenidos.

En primer lugar, el programa utilizado es el **Calculatis**, de la empresa Stora Enso, mismo programa que se ha utilizado para realizar el predimensionamiento.

Se han utilizado tanto las características del panel como los valores propios del material que se utiliza Calculatis como base para realizar los cálculos manuales y los cálculos en todos los programas utilizados.

| Datos del sistema | | | |
|-------------------|----------------------|--|---|
| Nombre | Luz_8 R120_SC2 | Clase de servicio | Clase de servicio 1 |
| Inclinación | 0 [°] | Cantos encolados | Cantos encolados en las capas intermedias |
| Anchura del panel | 1,000 [m] | Capa superficial perpendicular a la dirección del elemento | <input type="checkbox"/> |
| Panel | CLT 300 L8s - 2 | Considerar peso propio | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Material | C24 Abeto ETA (2019) | Comprobación del apoyo | <input type="checkbox"/> |

| Datos de comprobación en caso de incendio | | | |
|--|----------|--|--|
| Clase de resistencia al fuego | R 120 | Revestimiento de protección al fuego | Sin protección al fuego |
| Factor de combinación de las cargas para el diseño a fuego | Ψ_2 | Estratigrafía para protección al fuego | Sin elementos adicionales de protección al fuego |

| Comprobación en estado límite de servicio (ELS) - Deformaciones | | | |
|---|---|------------------------------|---------|
| ELS - tipo de estructura | Elementos frágiles (forjados y cubiertas con tabiques frágiles o pavimentos rígidos sin juntas) | Límite en ELS w_{stat} | L / 360 |
| Considerar la flecha hacia arriba del voladizo | <input type="checkbox"/> | Límite en ELS $w_{stat,fin}$ | L / 300 |
| | | Límite en ELS w_{act} | L / 600 |

| Vibración | | | |
|--|-------------------------------------|---|--------------------------|
| Representación del análisis de vibraciones | <input checked="" type="checkbox"/> | Diseño sólo para clase II | <input type="checkbox"/> |
| Anchura total | 4,000 [m] | Coefficiente de amortiguamiento | 4,0 % |
| Rigidez en dirección transversal dada por | Panel de CLT | Espesor de la capa de compresión | 0,0 [cm] |
| Rigidez en dirección transversal | 0,000 [MN/m ² /m] | Módulo de elasticidad longitudinal de la capa de compresión | 0,0 [N/mm ²] |

Figura 40. Imagen del programa de cálculo Calculatis.

2. Cálculos manuales: resultados y comprobación

Los resultados detallados obtenidos mediante el Calculatis se pueden comprobar en el Anejo 3.2.1.

El segundo programa utilizado para verificar los cálculos manuales es el **CLT designer**, de la empresa Holz.Bau.

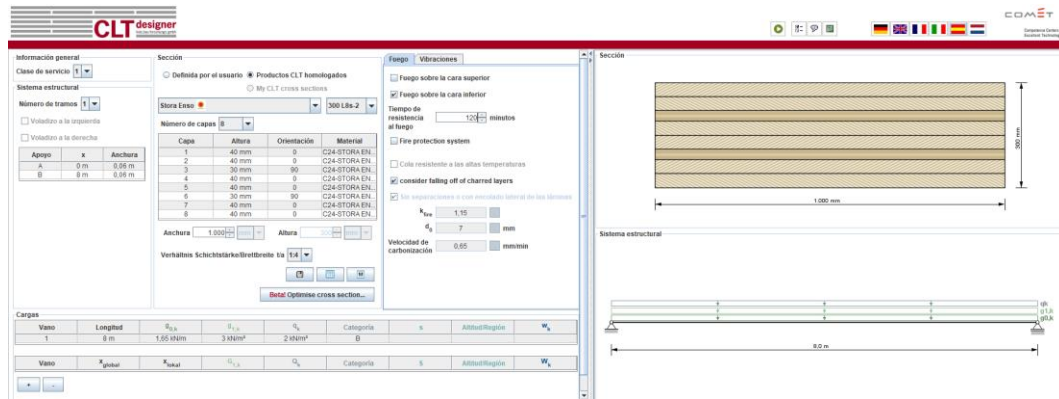


Figura 41. Imagen del programa de cálculo CLT designer.

Los resultados detallados obtenidos mediante el CLT Designer se pueden comprobar en el Anejo 3.2.2.

Por último, se ha realizado un modelo utilizando el **RFEM**, un programa de cálculo mediante elementos finitos de la empresa Dlubal. Este programa es el que se utiliza para calcular y verificar la estructura completa.

Se ha considerado el cálculo de la estructura mediante este programa dado que incorpora un módulo, *RF-Laminate*, que verifica los paneles de CLT tanto a Estado Límite Último como a Estado Límite de Servicio.

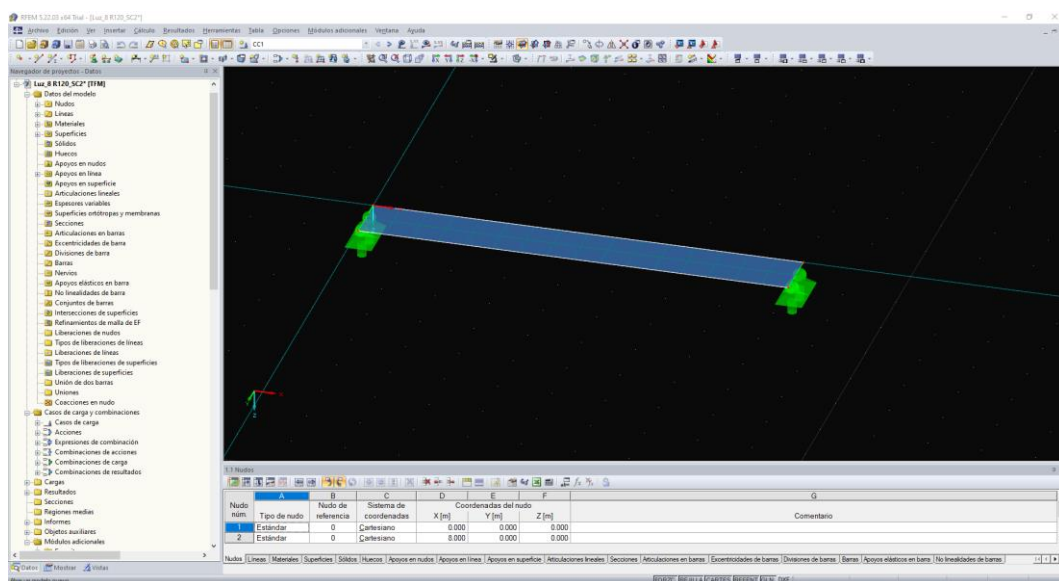


Figura 42. Imagen del programa de cálculo RFEM.

2. Cálculos manuales: resultados y comprobación

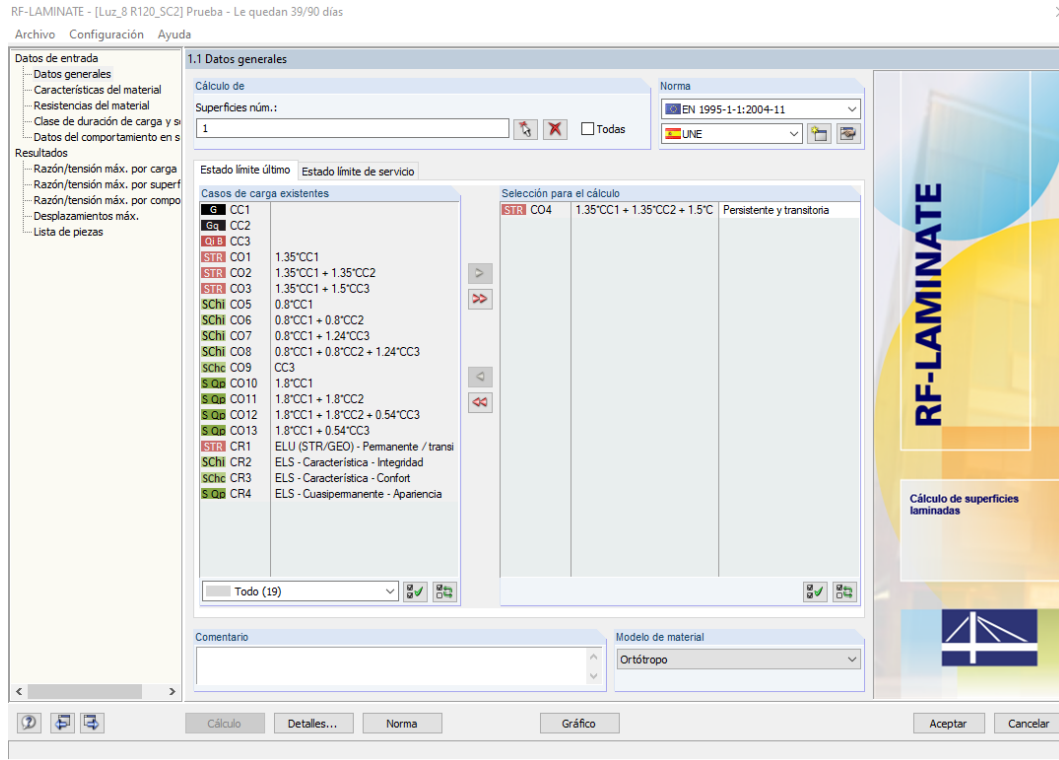


Figura 43. Imagen del módulo adicional RF-Laminate.

Los resultados detallados obtenidos mediante el RFEM se pueden comprobar en el Anejo 3.2.3.

Comparativa

Una vez obtenidos los resultados manualmente y mediante los programas de cálculo, se procede a compararlos para verificar los cálculos manuales.

A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos en cada uno de los cálculos.

2. Cálculos manuales: resultados y comprobación

Tabla 9. Comparación resultados obtenidos.

| Comprobación | | Cálculos manuales | Calculatis Stora Enso | CLT designer | DLUBAL RFEM |
|--------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------|-------------|
| ELU | Flexión | 34% | 31% | 33% | 34% |
| | Cortante | 6% | 7% | - | 7% |
| | Cortante Rodadura | 21% | 21% | 21% | 23% |
| ELS | Flecha Activa | 95% | 91% | 134% | 90% |
| | Flecha Instantánea | 22% | 21% | 51% | 21% |
| | Flecha neta | 85% | 83% | 95% | 81% |
| | Vibraciones | 82% | 98% | 80,3% (95,5) | - |
| ELU fuego | Flexión | 24% | 22% | 23% | - |
| | Cortante | 4% | 3% | - | - |
| | Cortante Rodadura | 13% | 12% | 12% | - |

**Donde no se indica resultado es porque el programa no realiza dicha comprobación.*

En primer lugar, por lo que respecta al **Estado Límite Último**, se puede observar que los cálculos manuales dan prácticamente el mismo resultado que los programas de cálculo, con lo que se puede concluir que los cálculos manuales son válidos.

En **Estado Límite de Servicio**, se observan diferencias en las flechas en el CLT designer respecto a los demás métodos de cálculo.

Esto se debe a que en el CLT designer, la carga muerta la tiene en consideración como una carga separada de la carga permanente, con lo que suma la flecha instantánea producida por dicha carga en la flecha activa e instantánea. Además, no tiene en cuenta el coeficiente de combinación de la sobrecarga de uso a la hora de calcular la flecha neta.

Por tanto, se puede considerar que, salvo estad desviación debida a las bases de cálculo, los cálculos manuales son correctos.

En lo referente a las vibraciones, vemos que existen resultados dispares. Esto es debido al método de cálculo utilizado.

Los cálculos manuales y el CLT designer utilizan para calcular las vibraciones el método Hamm/Richter modificado, mientras que el Calculatis utiliza el Hamm/Richter. Entre paréntesis se muestra el valor obtenido del CLT designer mediante el método Hamm/Richter, pudiendo así comprobar el resultado obtenido por cada método.

En cuanto al **Estado Límite Último en situación de Fuego**, se observa que los resultados son prácticamente iguales en los tres métodos de cálculo que realizan la comprobación, con lo que se considera que el método utilizado en los cálculos manuales es correcto.

Por tanto, quedan verificados los resultados obtenidos mediante los cálculos manuales y, por tanto, la formulación utilizada en el cálculo de los paneles de CLT es correcta.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

3.1. Consideraciones iniciales

En este apartado se calcula la estructura completa con el programa de cálculo mediante elementos finitos RFEM de la empresa DLUBAL y se analizan los resultados obtenidos.

Lo primero que es necesario tener en cuenta es el sistema estructural del edificio.

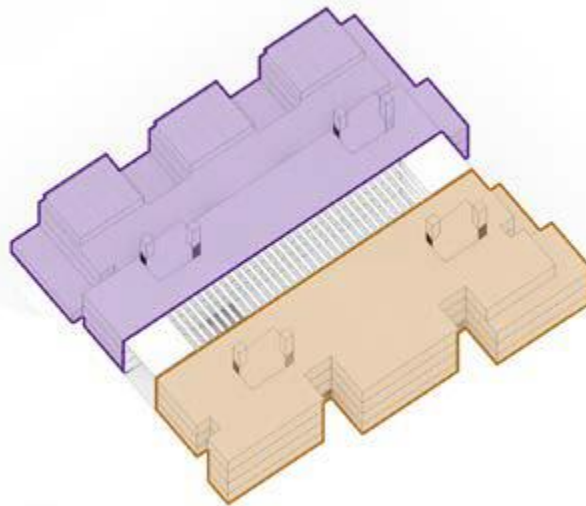


Figura 44. Conjunto del edificio.

Como se observa en la figura anterior, se trata de dos sistemas estructurales iguales pero independientes el uno del otro. Por tanto, dado que el objetivo es el cálculo de la estructura de madera, a modo de optimizar los recursos se procede a calcular únicamente uno de los dos módulos.

Dado que el módulo inferior, marrón en la figura anterior, contiene las situaciones más desfavorables consideradas en el predimensionamiento, se procede a calcular dicho módulo.

En segundo lugar, es necesario tener en cuenta la dirección en la que se disponen los paneles de CLT del forjado.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

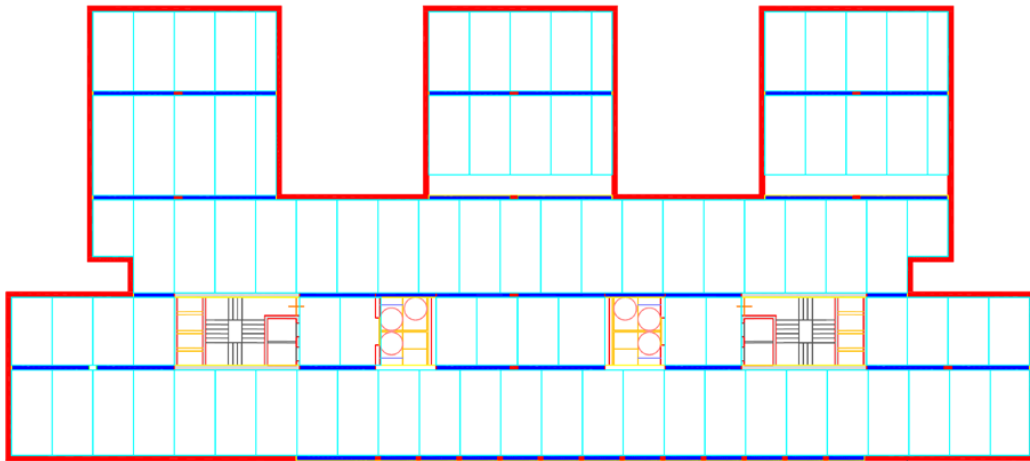


Figura 45. Planta mostrando la dirección de los paneles que forman el forjado.

Como se observa en la figura anterior, los paneles de CLT que forman el forjado del edificio se disponen en dirección transversal.

Esto no es solo importante para el dimensionamiento de los forjados, sino también de las paredes. Al tratarse de un sistema que se considera unidireccional es importante la dirección en la que se colocan los paneles para el dimensionamiento de los cerramientos.

Por tanto, en las paredes situadas en dirección longitudinal, se dispondrán paneles de CLT completos dado que reciben la carga directamente de los forjados, mientras que, en las paredes en dirección transversal, salvo en los puntos de apoyo de las vigas de acero, no será necesario disponer de paneles completos, con lo que se dispondrá un panel de CLT trabajando como una viga.

El punto más desfavorable de muros perimetrales se sitúa en la parte central del edificio (indicado en azul oscuro en la parte inferior de la figura anterior). Dicho punto es un acceso, donde los paneles no pueden ser completos dado que se han de disponer huecos para las entradas. Por ello, se dispondrá en esa parte el mismo sistema estructural que en dirección transversal, formado por paneles de CLT apoyados a modo de cerramiento vertical y paneles de CLT entre cerramientos trabajando como una viga.

Se realiza un predimensionamiento de dichas vigas en el acceso central, y se utiliza el mismo diseño para la dirección transversal, resultando un panel CLT 140 L5s con un ancho de 1,00 metro. El predimensionamiento se puede comprobar en el Anejo 3.3.1.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

3.2. Cálculo de la estructura inicial

3.2.1. Modelado y cálculo de la estructura completa

Una vez tenidos en cuenta los factores previamente mencionados, se procede al modelado de la estructura.

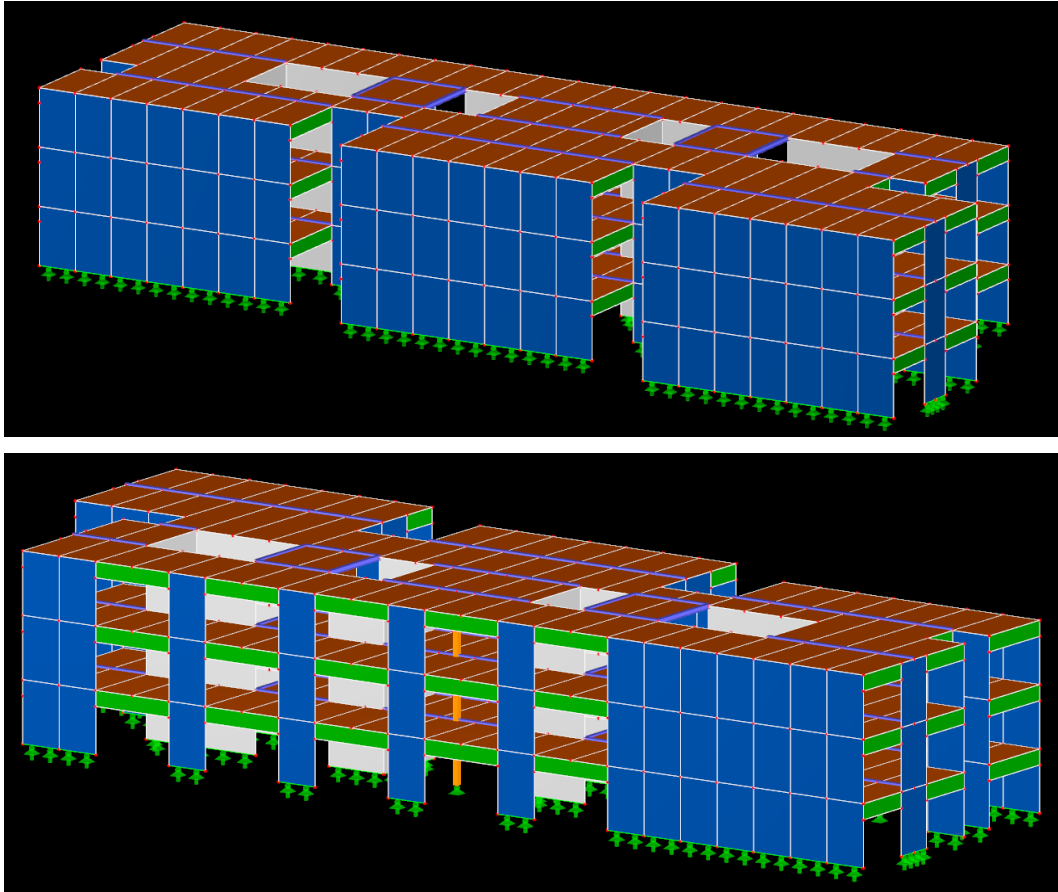


Figura 46. Imagen de la estructura inicial completa modelada en el programa de cálculo RFEM.

En las figuras anteriores, diferenciando entre colores, se encuentra:

- Azul: Paneles CLT 140 C5s con la fibra en dirección vertical.
- Verde: Paneles CLT 140 L5s con la fibra en dirección horizontal.
- Marrón: Paneles CLT 300 L8s-2 con la fibra en dirección transversal (lado corto).
- Naranja: Pilares de madera maciza C24 de sección 35x35 centímetros.
- Morado: Vigas HEB 300 de acero S235.
- Gris: Muros de hormigón C30/37 de espesor 20 centímetros.

Los apoyos de la estructura, tanto los muros como los pilares, se han definido como articulaciones, dado que se la cimentación no es objeto de estudio de este trabajo, con lo cual no se ha optado por coaccionar más grados de libertad ni por sustituir el apoyo en dirección vertical por un muelle elástico simulando la cimentación.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

La unión entre todos los elementos de CLT se ha considerado articulada. Esto es una consideración básica dentro del cálculo de estructuras formadas por estos elementos, dado que las uniones entre ellos se realizan de tal forma que no es posible realizar un empotramiento total.

Las uniones entre los diferentes elementos no se han considerado dentro del alcance de este trabajo.

Por motivos de fabricación, los paneles de CLT se han de dividir. El estándar del ancho de los paneles de CLT en fábrica ronda desde el metro hasta los cuatro metros de ancho aproximadamente, depende del fabricante. Por tanto, dado que la estructura está realizada en módulos de 1,35 metros, se ha considerado un ancho estándar de 2,70 metros.

Por tanto, entre los diferentes paneles de CLT, aunque formen el mismo elemento, es necesario introducir articulaciones tipo bisagra para simular la unión en obra de los diferentes paneles.

Las uniones entre las vigas de acero y sus diferentes apoyos, ya sea en las paredes de CLT, muros de hormigón o pilares de madera, se han considerado también articuladas.

Finalmente, es necesario indicar la consideración que se ha tenido en cuenta acerca de la continuidad de los forjados a través de las vigas de acero. Aunque es posible darle cierta continuidad al forjado a través de las vigas de acero con diferentes tipos de uniones, en este caso se ha considerado articulado, asumiendo que no hay continuación del forjado. Esto se ha considerado para analizar la estructura completa igual que en el predimensionamiento y para quedar del lado de la seguridad, dado que las flechas y los esfuerzos que encontraremos serán superiores que suponiendo continuidad en los forjados.

En la siguiente figura se muestra una planta de la estructura, mostrando las articulaciones lineales definidas.

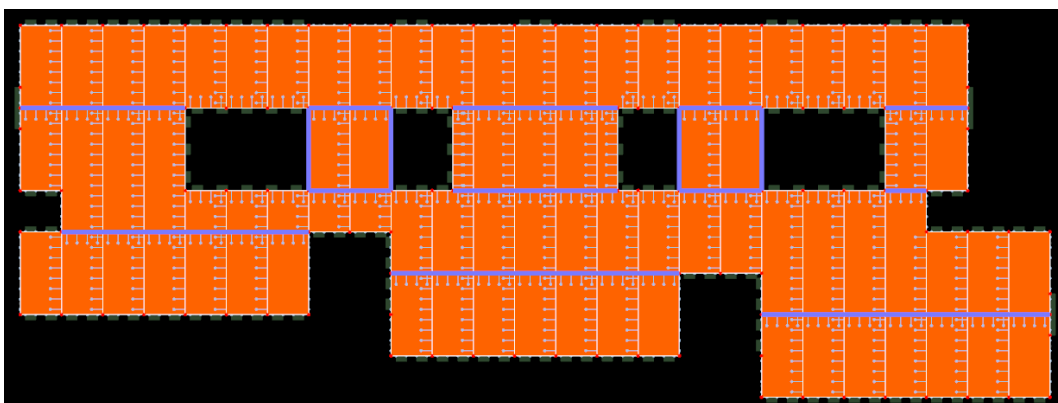


Figura 47. Planta de la estructura inicial mostrando las articulaciones lineales dispuestas.

Las cargas introducidas son:

- Carga muerta superficial de 3,00 kN/m²
- Sobrecarga de uso de 2,00 kN/m² en todas las plantas
- Cargas de viento en ambas direcciones.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Las combinaciones de carga se crean automáticamente en el programa conforme el Código Técnico de la Edificación.

Una vez consideradas las cargas, realizadas las combinaciones, y teniendo todas las consideraciones necesarias en el modelaje de la estructura, se procede con el cálculo de la estructura.

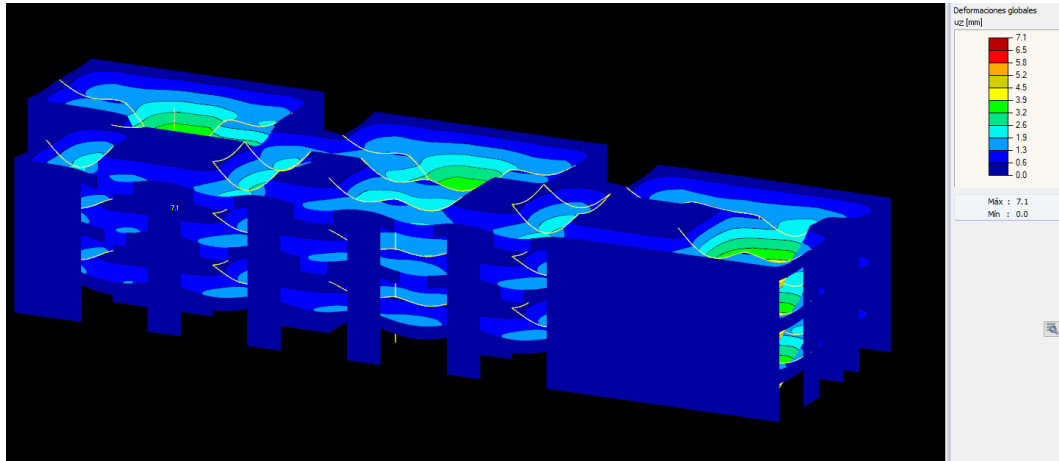


Figura 48. Deformada de la estructura inicial frente a peso propio.

Para comprobar los resultados obtenidos se analiza la planta de cubierta.

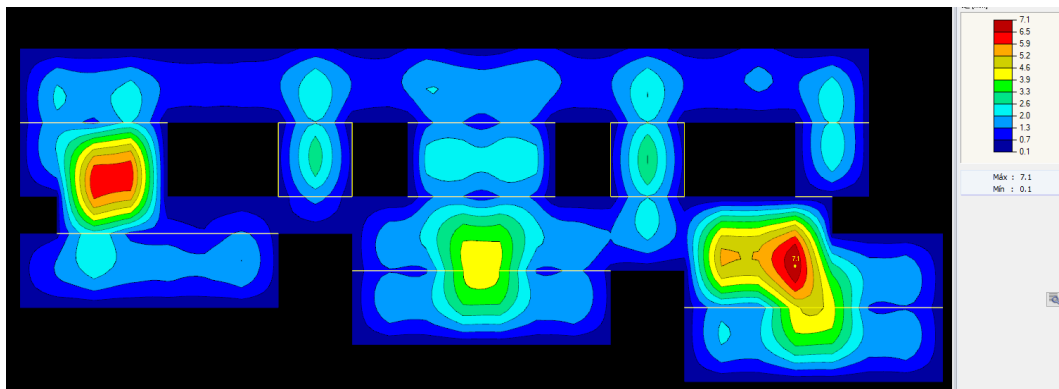


Figura 49. Planta mostrando las deformaciones frente a peso propio.

En primer lugar, se comprueba la no continuidad de los forjados a través de las vigas de acero.

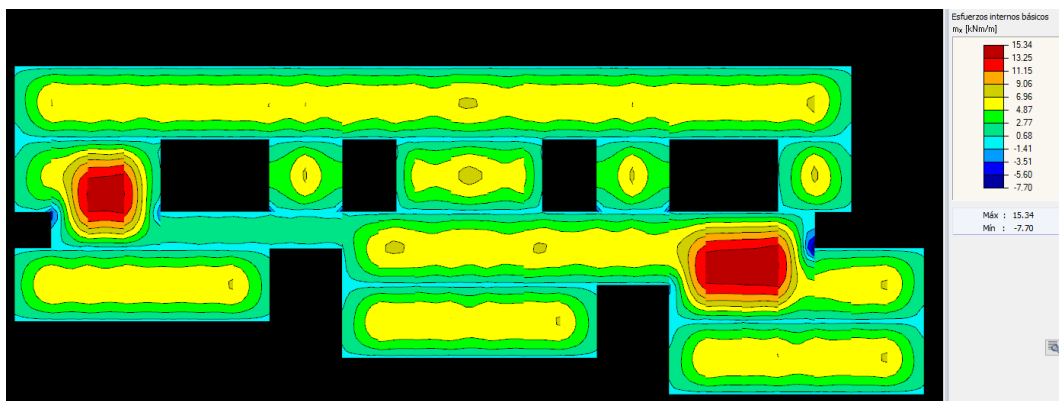


Figura 50. Planta mostrando los momentos en la dirección principal del panel frente a peso propio.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

En la imagen anterior se muestra el momento en la dirección de la fibra de los paneles pudiéndose observar que no tiene continuidad en las vigas, con lo que el modelaje es correcto.

Se pueden comprobar en el Anejo 3.3.2 los datos de entrada del programa, las cargas y sus combinaciones, y los resultados referidos a la estructura completa.

3.2.2. Verificación de los paneles de piso

Una vez comprobado el modelaje de la estructura, procedemos a verificar el panel de CLT del forjado.

Como se ha comentado en apartados anteriores, esto se realiza a través de un módulo adicional del que dispone el programa, RF-Laminate.

En las figuras de la planta mostradas previamente, se observan dos zonas donde la carga es más elevada. Estas zonas se corresponden con las zonas de 8 metros de luz. Por tanto, a la hora de verificar la estructura, se comienza por analizar el panel de 8 metros de luz situado a la izquierda de la planta.

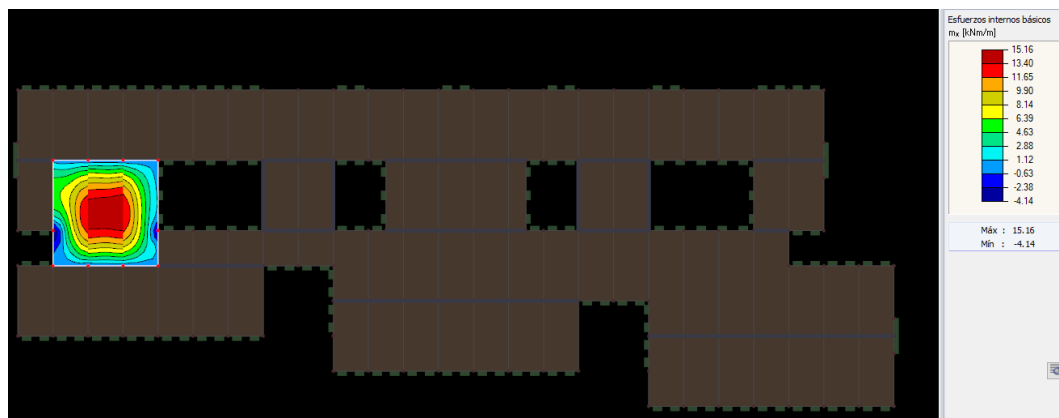


Figura 51. Panel de piso a verificar en la estructura inicial.

En primer lugar, se comprueba a **Estado Límite Último**, utilizando la combinación de cargas en ELU más desfavorable a cargas verticales.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

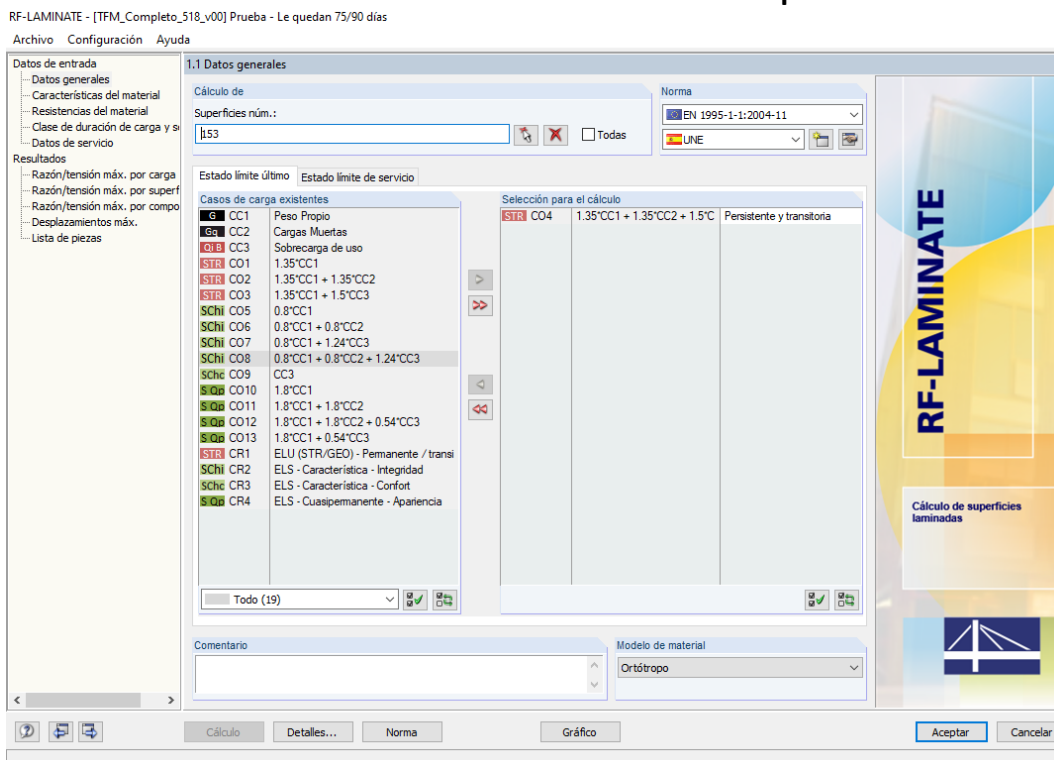


Figura 52. Módulo RF-Laminat, Datos Generales, en la verificación del panel de piso en la estructura inicial.

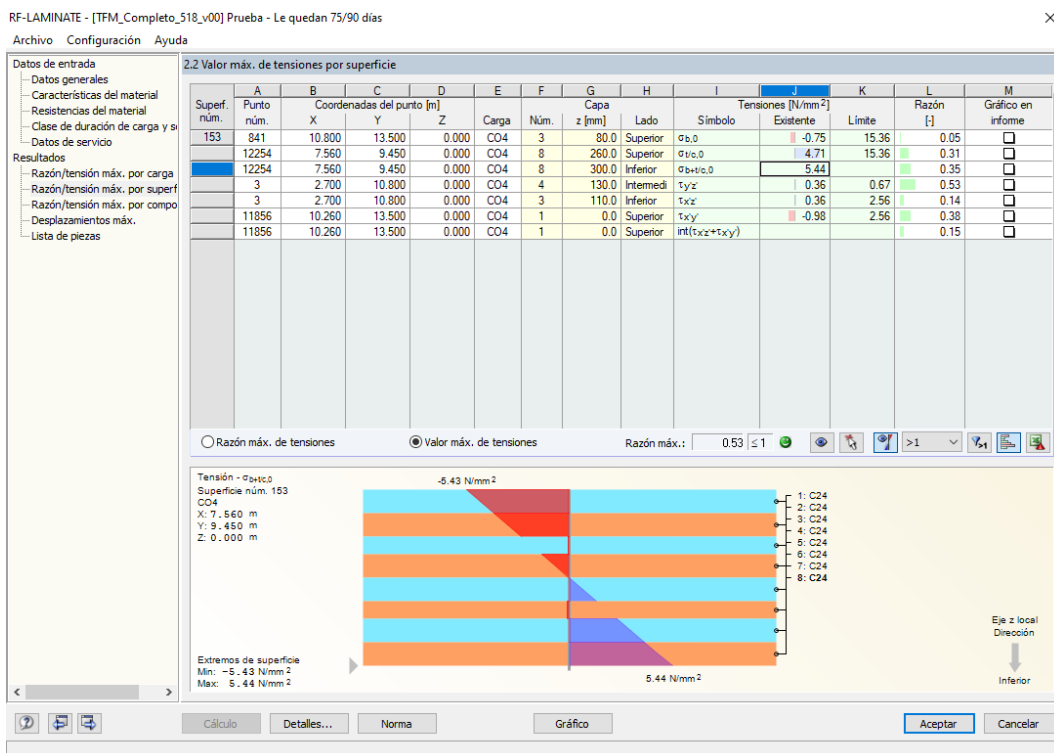


Figura 53. Resultados del Estado Límite Último en la verificación del panel de piso en la estructura inicial.

Analizando los resultados se observa que el **Estado Límite Último**, en este caso, no es restrictivo en el dimensionamiento del panel, dado que el aprovechamiento máximo es del 53%, y es producido por el cortante en el encuentro con los paneles perimetrales.

3. Cálculo de la estructura de madera completa



Figura 54. Punto de máximo cortante en la verificación del panel de piso en la estructura inicial.

El aprovechamiento a flexión del panel es del 35%, mientras que en los cálculos manuales es del 33% y en el modelo simplificado con el mismo programa es del 34%. Esto corrobora que la estructura está modelada correctamente, dado que los resultados son iguales que en los cálculos previos, como la importancia que tiene realizar un buen predimensionamiento previo al cálculo.

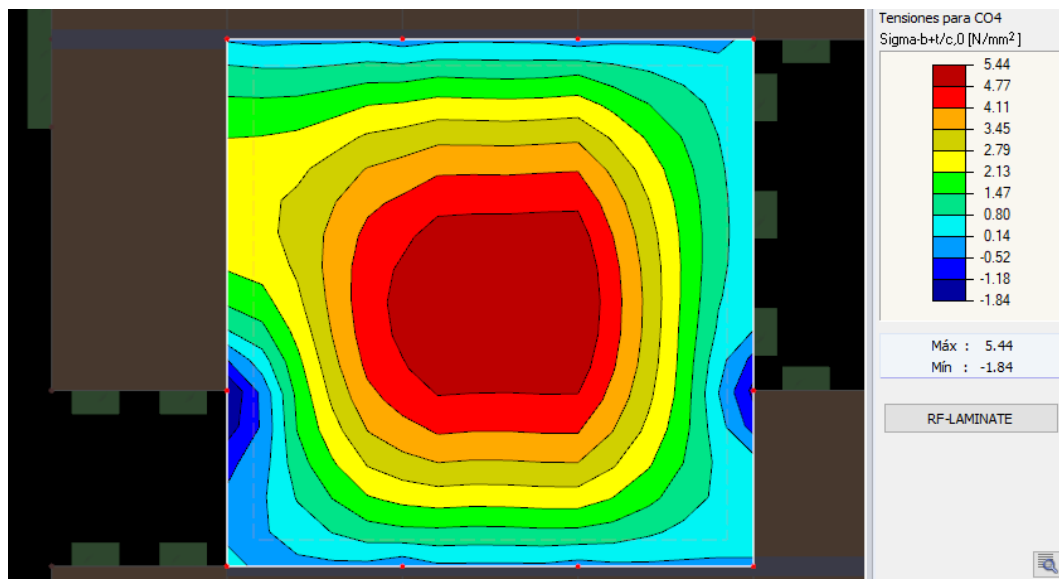


Figura 55. Distribución de tensiones en la verificación del panel de piso de la estructura inicial.

Una vez comprobado el Estado Límite Último, es necesario verificar el **Estado Límite de Servicio**.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Norma - EN 1995-1-1:2004-11/UNE

Factores de material | Límites de servicio

Límites de servicio (flechas)

Tipo de combinación:

| | L / | Voladizos | L _e / |
|---------------------------------|-----|-----------|------------------|
| - Característica 1 - Integridad | 500 | 150 | 150 |
| - Característica 2 - Confort | 350 | 175 | 175 |
| - Cuasipermanente - Apariencia | 300 | 150 | 150 |

Aceptar Cancelar

Figura 56. Límites de servicio en el módulo RF-Laminate en la verificación del panel de piso de la estructura inicial.

Para realizar la verificación, se utilizan las combinaciones de resultados que crea el programa de acuerdo con la normativa indicada. Estas combinaciones de resultados son una envolvente de las combinaciones de cargas en Estado Límite de Servicio.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

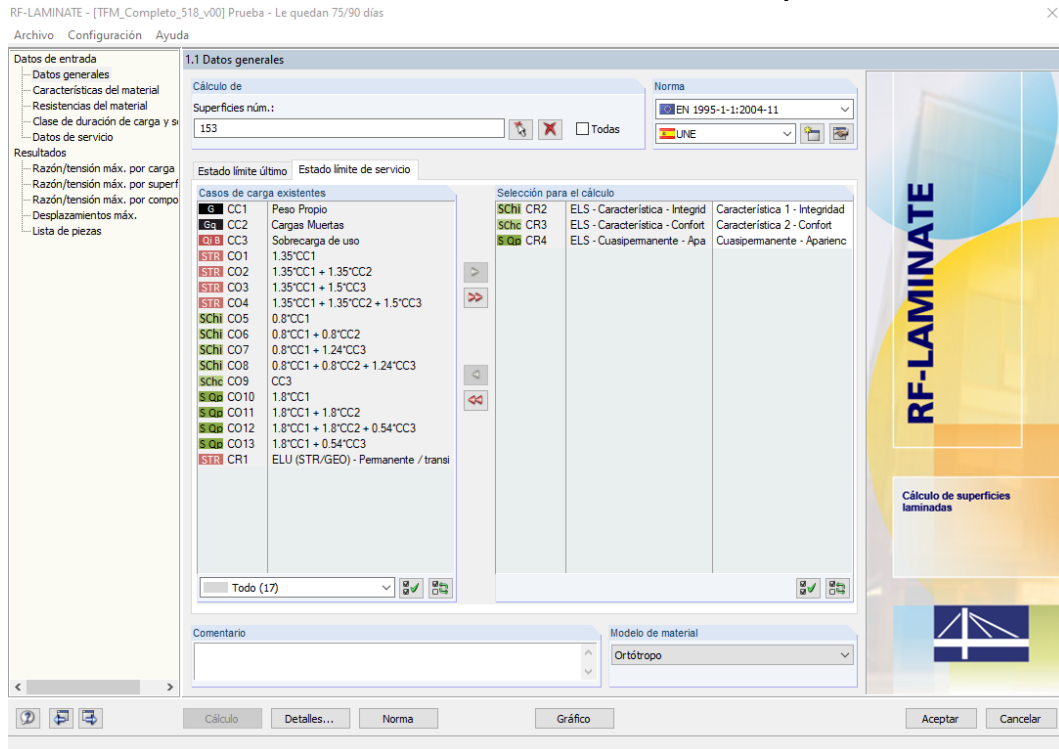


Figura 57. Estado Límite de Servicio en la verificación del panel de piso en la estructura inicial.

Es necesario tener en cuenta la luz y el plano de comparación respecto al cual se va a calcular la flecha relativa.

Para el panel seleccionado, se tiene en cuenta un plano de comparación que pase por el centro luz de las vigas que limitan el panel y un punto de apoyo fijo. La luz considerada es de 8,10 metros, el largo del panel.

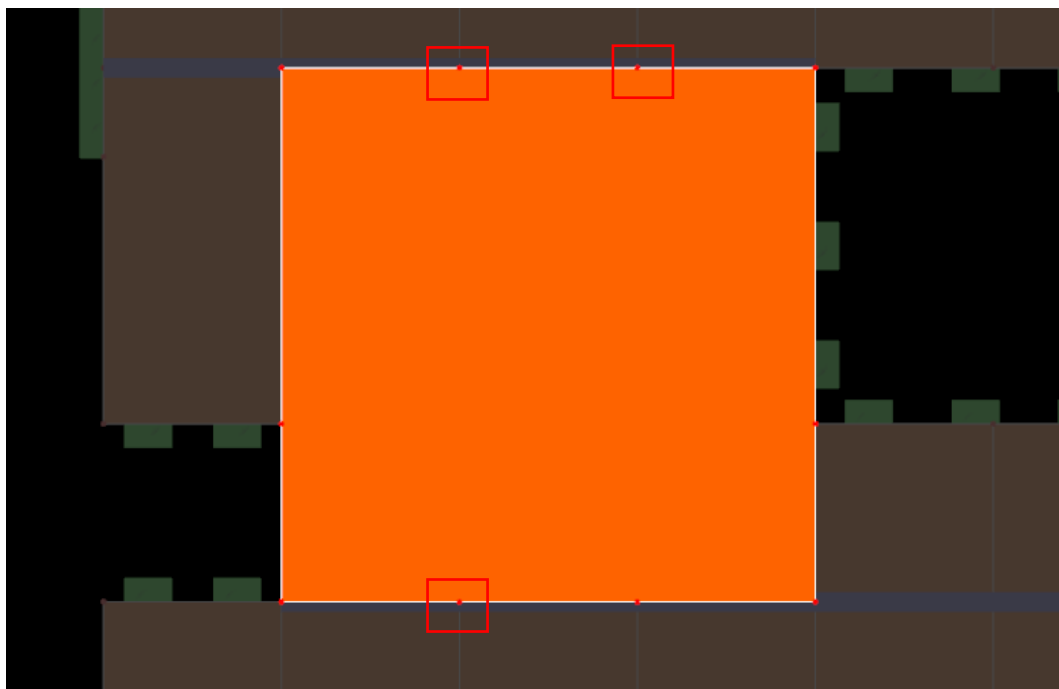


Figura 58. Puntos considerados en la verificación de la flecha en el panel de piso de la estructura inicial.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

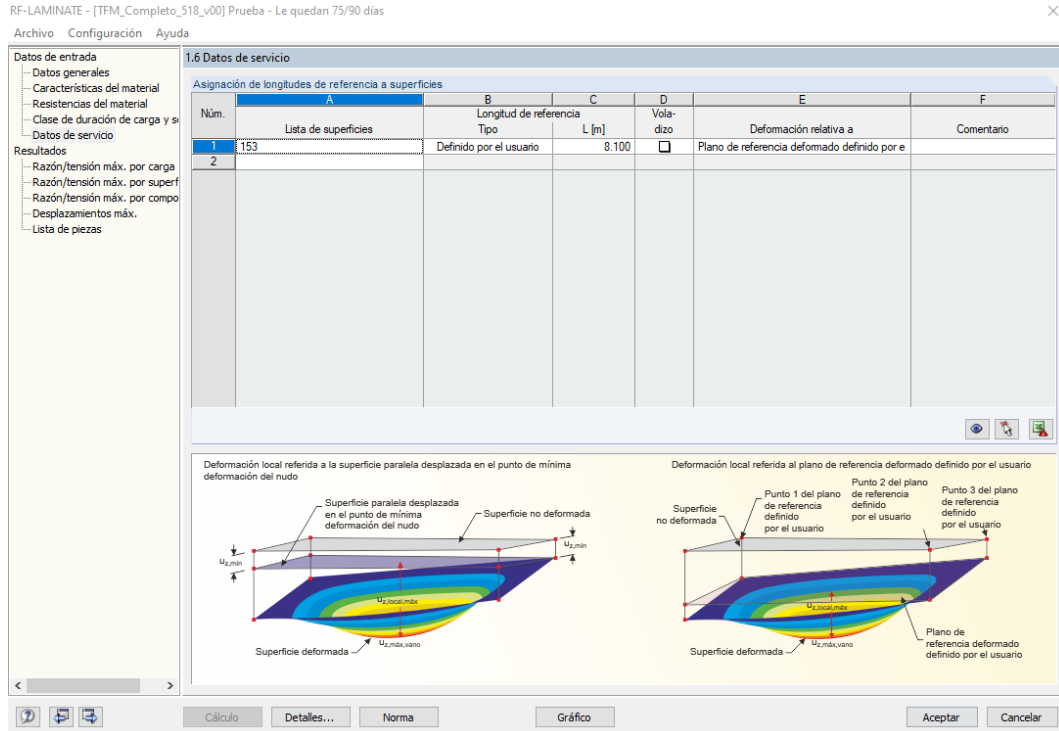


Figura 59. Datos de servicio en la verificación del panel de piso en la estructura inicial.

Una vez introducidos los datos necesarios, se procede con la verificación del Estado Límite de Servicio.

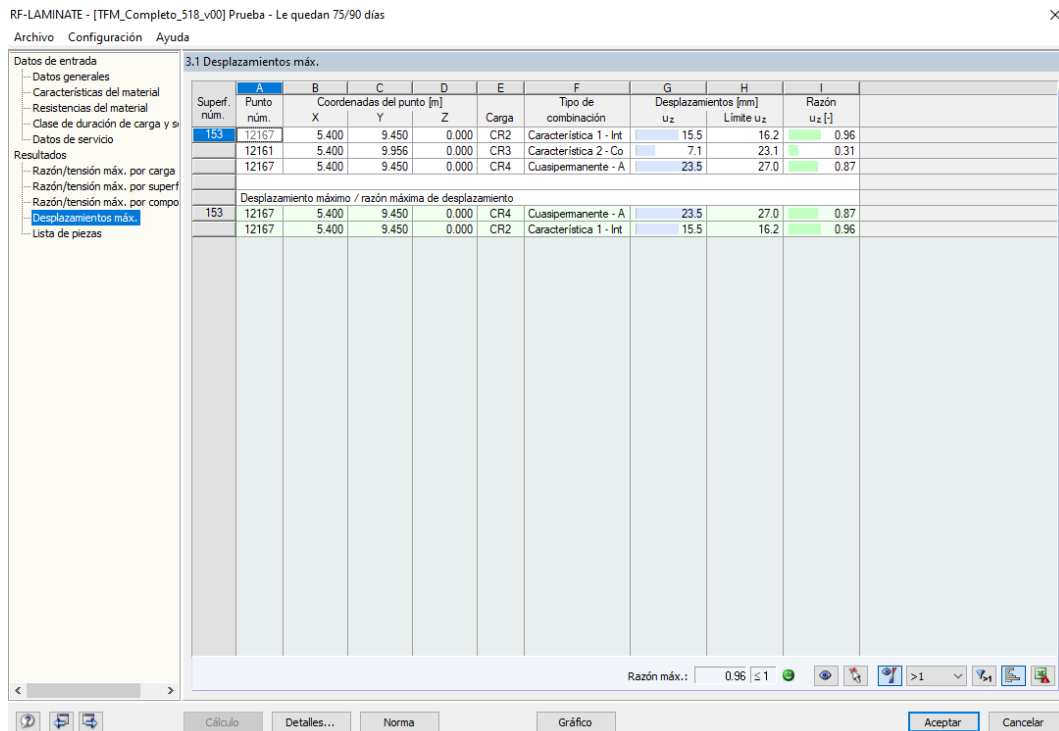


Figura 60. Resultados del Estado Límite de Servicio en el panel de piso de la estructura inicial.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Como se observa en la figura anterior, los aprovechamientos son los siguientes:

- Flecha activa: 96%
- Flecha instantánea: 31%
- Flecha neta: 87%

Comparando estos resultados con los cálculos manuales y el modelo simplificado realizado en el mismo programa se obtienen los siguientes valores:

Tabla 10. Comparación de las flechas obtenidas en la verificación del panel de piso de la estructura inicial.

| Aprovechamiento (%) | Cálculos manuales | RF-Laminate Modelo simplificado | RF-Laminate Modelo completo |
|----------------------------|--------------------------|--|------------------------------------|
| Flecha activa | 95 | 90 | 96 |
| Flecha instantánea | 22 | 21 | 31 |
| Flecha neta | 85 | 81 | 87 |

Con esto, se reafirma la validez de la verificación del panel CLT.

Todos los cálculos realizados se pueden encontrar en el Anejo 3.3.3.

3.3. Cálculo de la estructura optimizada

3.3.1. Modelado y cálculo de la estructura completa

Antes de comenzar con el cálculo de los demás elementos de la estructura, se plantea si existe alguna forma de optimizar la estructura, dado que se considera muy limitante la existencia de un vano de 8,00 metros de luz.

Se observa que, si se disponen los paneles en dirección longitudinal y no transversal, no serían necesarios tantos paneles completos a modo de cerramiento vertical, dado que los paneles de forjado apoyarían en el lado corto de la estructura.

Por tanto, se procede a disponer los paneles de manera longitudinal, menos en la zona central en la que se encuentran los accesos, cuya luz del vano de 5,40 metros y los paneles apoyan en los muros de hormigón.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

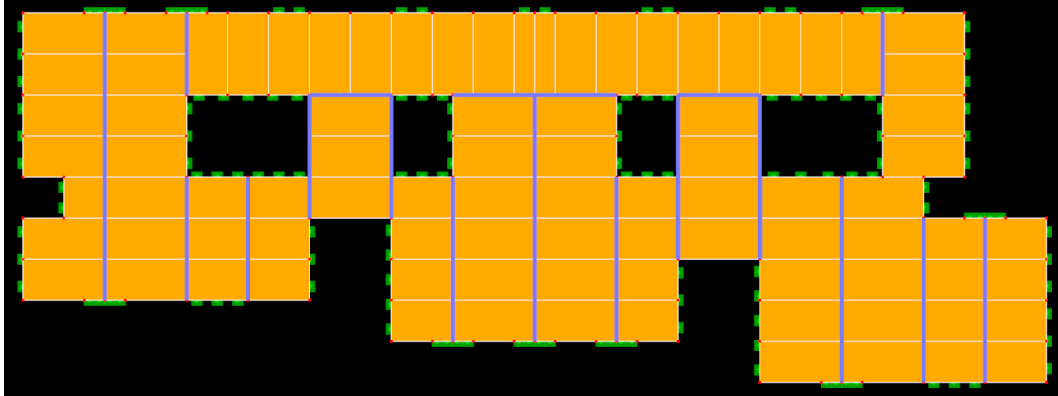


Figura 61. Planta de la estructura optimizada.

Con la distribución de la planta como se muestra en la figura anterior, se consigue que la luz máxima sea de 5,40 metros, lo que permite una optimización del panel de CLT utilizado como elemento horizontal.

Se realiza un predimensionamiento mediante Calculatis, del que se obtiene que la sección necesaria es CLT 220 L7s-2. Se puede comprobar el predimensionamiento en el Anejo 3.3.4.

La distribución de pilares también se modifica de forma que las vigas de acero tengan una luz máxima de 5,40 metros, lo que permite utilizar una sección HEB 260. Se puede comprobar el predimensionamiento en el Anejo 3.3.5. La sección de los pilares no ha sido modificada, dado que es necesaria la sección debida al fuego.

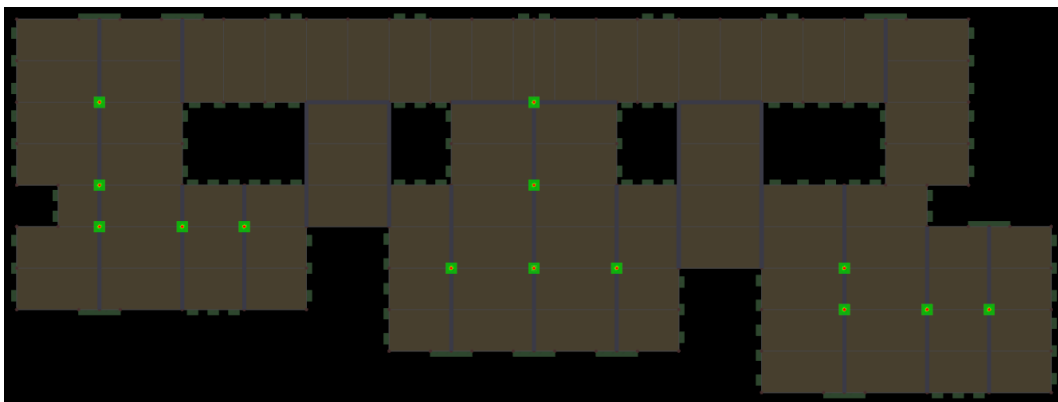


Figura 62. Distribución de pilares en la estructura optimizada.

Por tanto, la estructura completa queda como se puede observar en las siguientes figuras.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

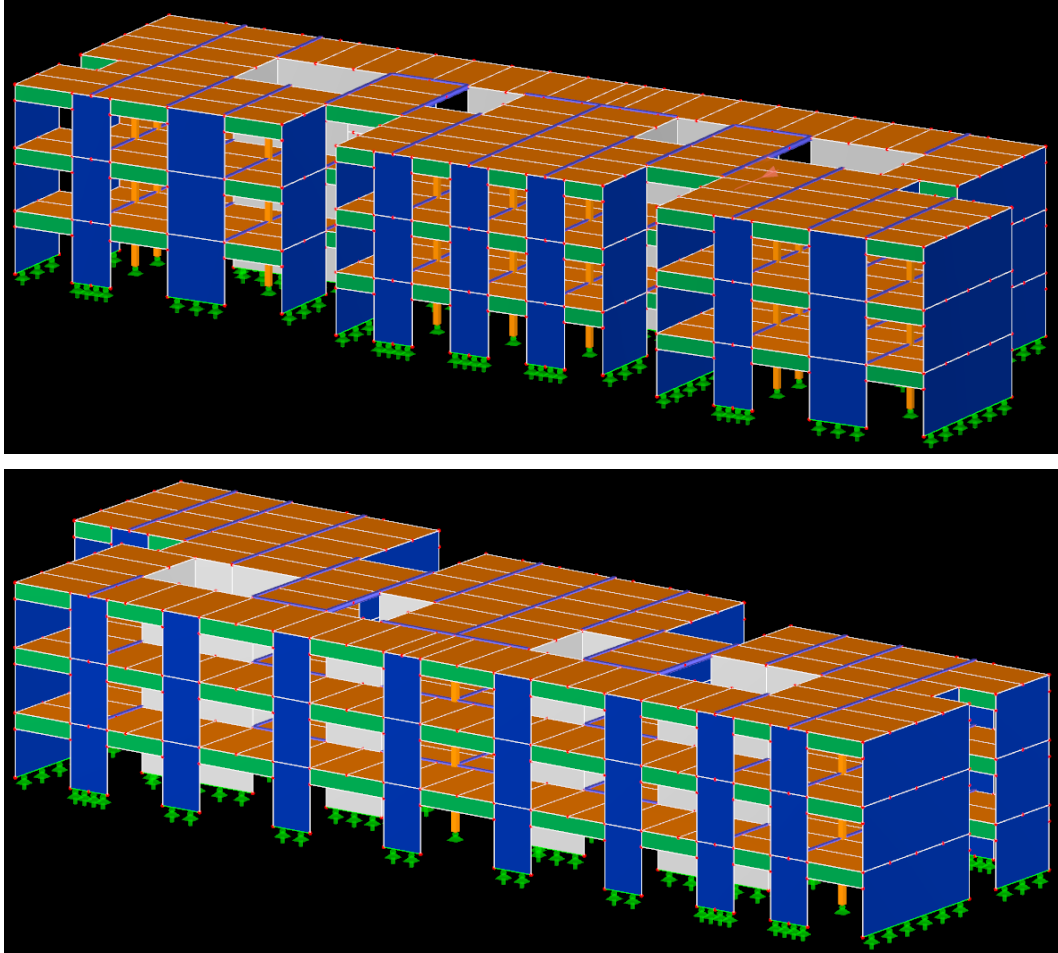


Figura 63. Imagen de la estructura modelada en el programa de cálculo RFEM.

El modelaje de la estructura modificada se realiza bajo las mismas condiciones, apoyos y articulaciones.

Una vez modelada completamente, se procede a calcular y realizar la misma verificación.

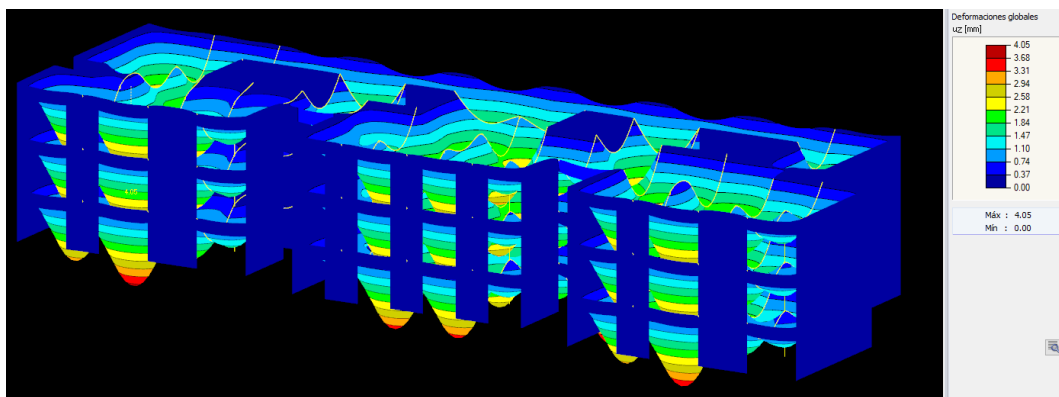


Figura 64. Deformaciones a peso propio en la estructura optimizada.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

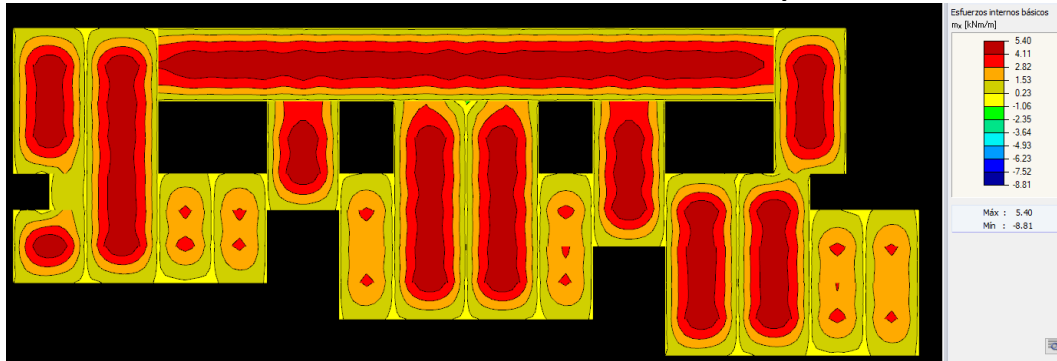


Figura 65. Planta mostrando los momentos en la dirección principal del panel frente a peso propio

En la figura anterior se observa la no continuidad de los forjados a través de las vigas de acero.

Una diferencia que se puede observar en la figura anterior respecto a la estructura inicial es que no hay zonas que destaquen sobre el resto en cuanto a esfuerzos, dado que en la gran parte de los casos se tratan de paneles de 5,40 metros de luz biapoyados.

Se pueden comprobar en el Anejo 3.3.6 los datos de entrada del programa, las cargas y sus combinaciones, así como los resultados referidos a la estructura completa.

3.3.2. Verificación de los paneles de piso

Para realizar la verificación de los paneles se han seleccionado tres paneles, que se muestran en amarillo y marcados en la siguiente figura.

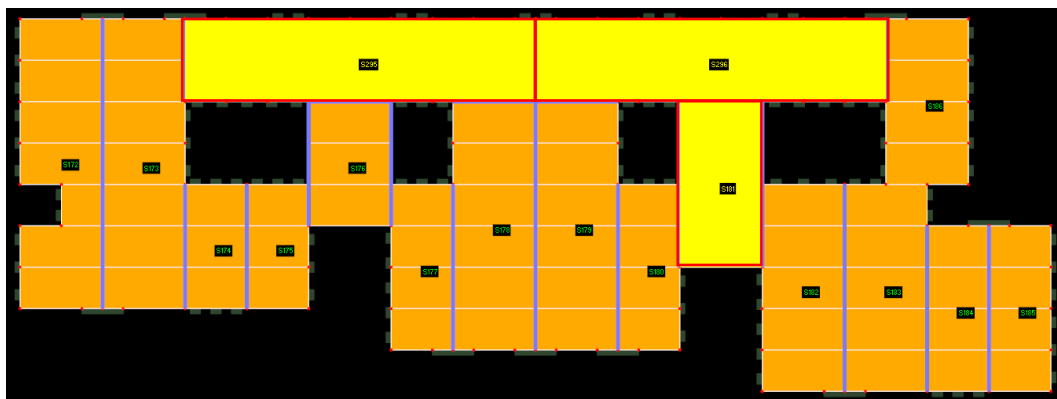


Figura 66. Paneles de piso a verificar en la estructura optimizada.

De esta forma, se pretende verificar que se comportan de la misma manera, pudiendo comprobar la flecha en diferentes sitios, dado que el panel superior se ha dividido en dos paneles simétricos, para poder analizar la flecha mediante dos planos diferentes.

El cálculo de los paneles se realiza de la misma manera que con la estructura anterior. Los resultados de dicho cálculo se muestran a continuación.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

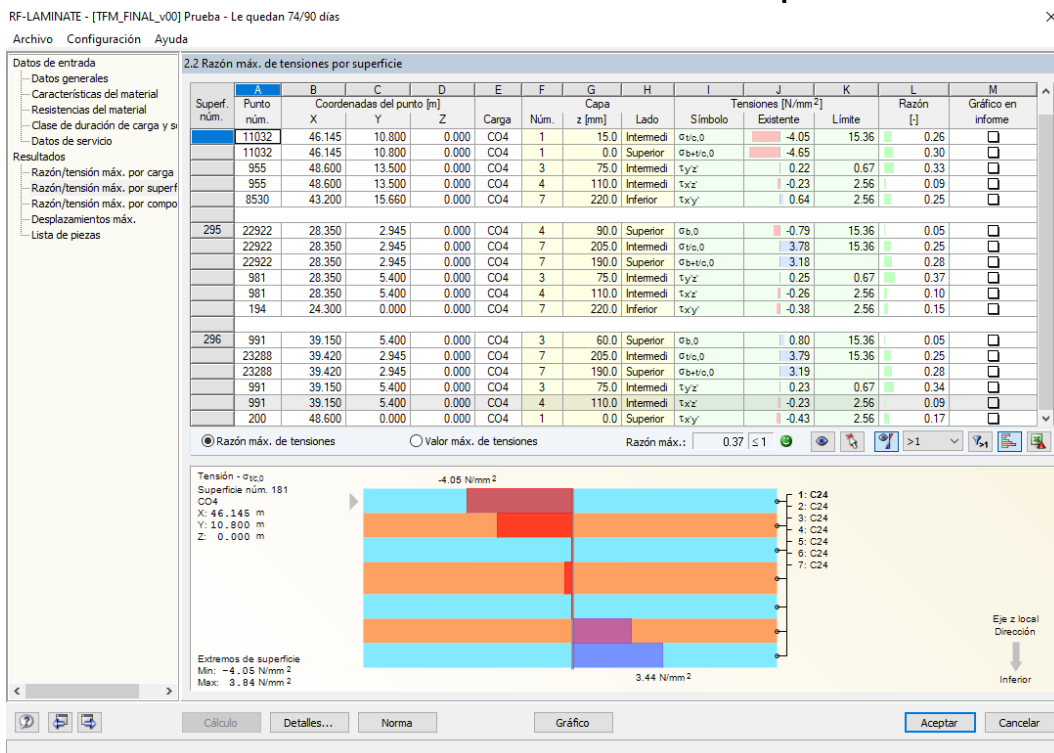


Figura 67. Resultados en Estado Límite Último en la verificación de los paneles de piso en la estructura optimizada.

El aprovechamiento a flexión de los paneles superiores es del 28% y en el panel inferior del 30%. Los resultados obtenidos en **Estado Límite Último** en el predimensionamiento indican un aprovechamiento del 25%, con lo que se puede considerar que el cálculo es correcto.

Como en el caso anterior, el aprovechamiento mayor se encuentra a cortante en los apoyos puntuales con los elementos verticales.

Una vez comprobados los paneles a Estado Límite Último se realiza la comprobación a **Estado Límite de Servicio**. Para ello, se analizan tres flechas diferentes.

En la figura siguiente se muestran los puntos considerados en cada panel y la luz correspondiente que se tiene en cuenta para realizar la comprobación de la flecha.



Figura 68. Puntos y luces consideradas en la verificación de los paneles de piso en la estructura optimizada.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

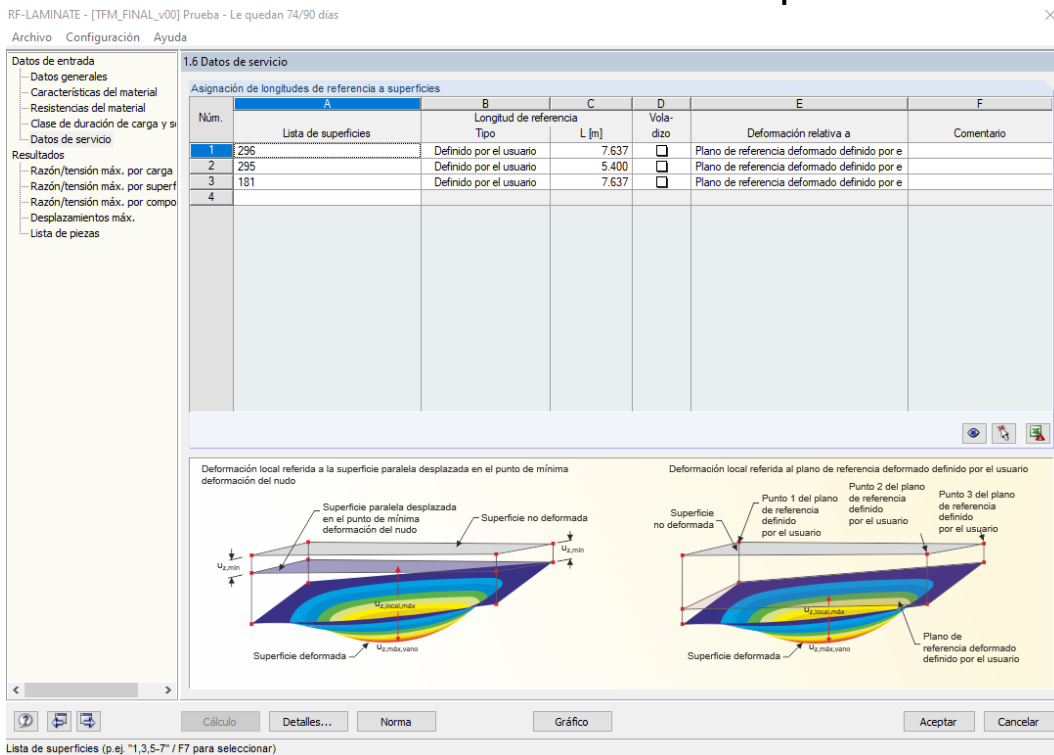


Figura 69. Datos de servicio en la verificación de los paneles de piso en la estructura optimizada.

Se procede a verificar el cumplimiento de la normativa indicada.

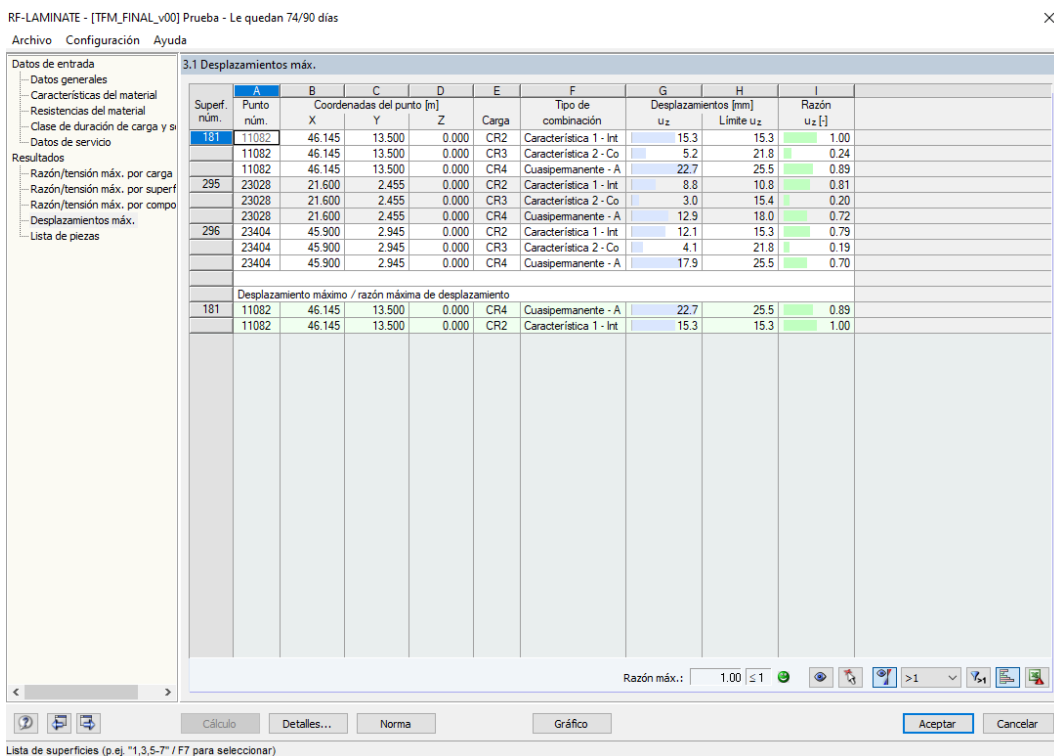


Figura 70. Resultado en Estado Límite de Servicio en la verificación de los paneles de piso en la estructura optimizada.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Como se puede observar en la imagen anterior, la flecha más limitante es la obtenida en el panel inferior, 181. Esto era lo esperado, puesto que se trata de un panel que se encuentra biapoyado sobre dos vigas que biapoyadas de un único vano, situación más desfavorable frente a flechas.

En lo referente a los paneles superiores, se observa que ambas comprobaciones dan resultados similares.

Si se comparan los resultados obtenidos en el panel superior izquierdo, 295, con los resultados obtenidos en el predimensionamiento se verifica que el resultado es el esperado y, por tanto, la verificación del Estado Límite de Servicio es correcta.

Tabla 11. Comparación de las flechas obtenidas en los paneles de piso de la estructura optimizada.

| Aprovechamiento (%) | Calculatis Predimensionamiento | RF-Laminate Modelo completo |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Flecha activa | 72 | 81 |
| Flecha instantánea | 17 | 20 |
| Flecha neta | 63 | 72 |

Los cálculos realizados para la verificación de los paneles de piso se pueden comprobar en el Anejo 3.3.7.

Los cálculos referidos a la totalidad de los paneles de piso se pueden comprobar en el Anejo 3.3.8.

3.3.3. Verificación de las columnas

El segundo elemento que se procede a verificar son las columnas de madera. Puesto que la estructura contiene núcleos de hormigón armado que soportan las cargas de viento y los desplomes, como se observa en el apartado 3.3.4, para verificar las columnas se realiza la comprobación en la columna con mayor esfuerzo axial.

Dado que se trata de columnas de igual sección y longitud, se analizará la columna cuya reacción vertical sea superior.

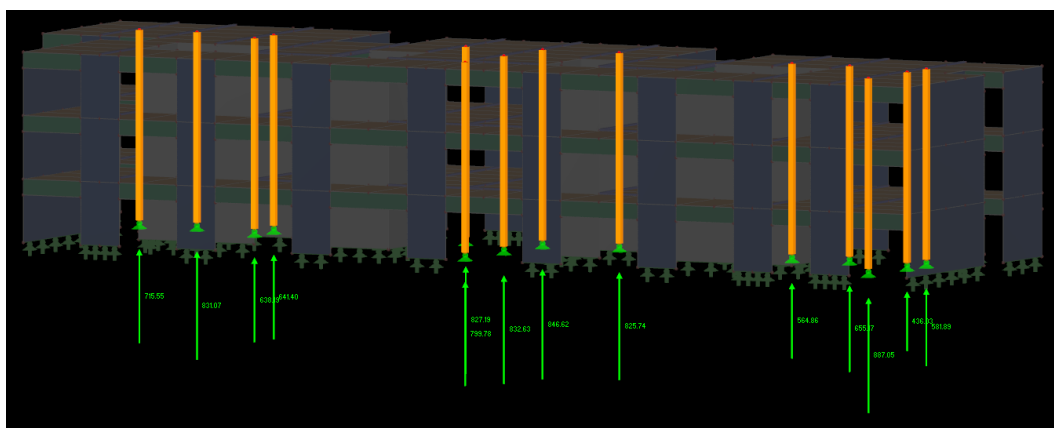


Figura 71. Reacciones verticales en las columnas.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

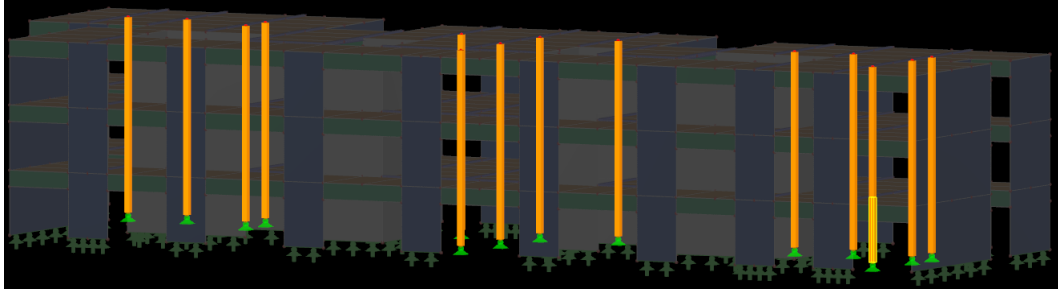


Figura 72. Selección de la columna a verificar (indicada en amarillo).

La verificación se realiza, como en el caso de los paneles de piso, utilizando un módulo adicional que incorpora el programa de cálculo para la comprobación de barras de madera, RF-Timber Pro.

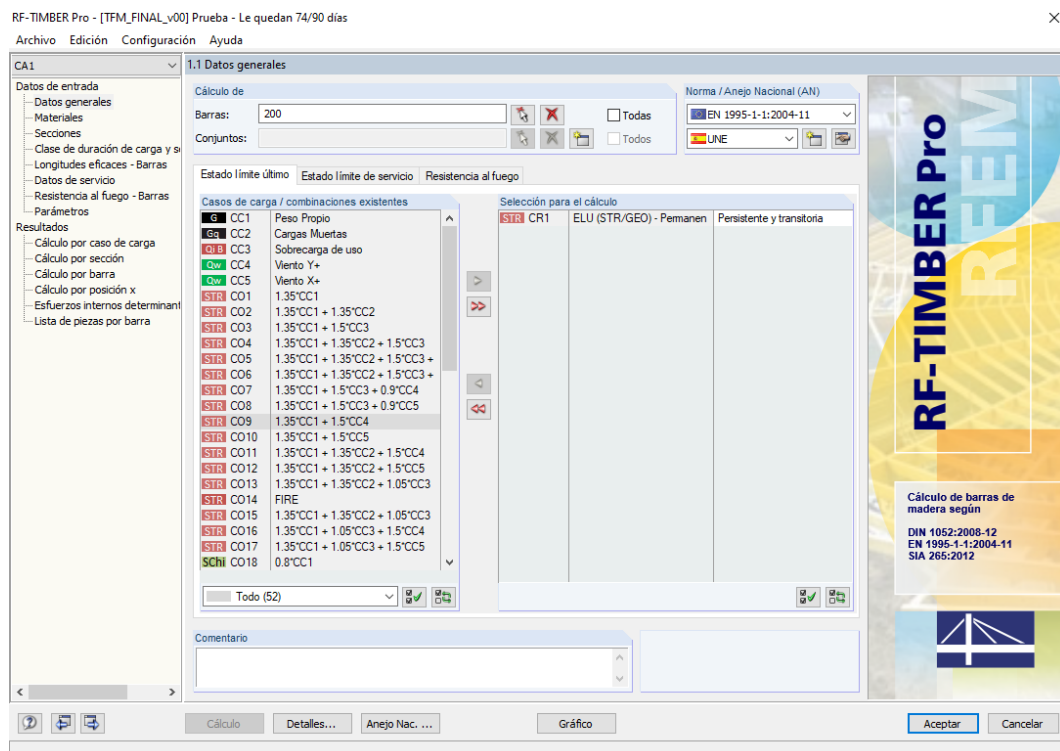


Figura 73. Datos generales, ELU, en el módulo RF-Timber Pro.

En la comprobación del **Estado Límite Último** y el **Estado Límite de Servicio**, las combinaciones de cargas utilizadas son las mismas que en el caso de la verificación de los paneles de piso. Mientras que para la situación de Fuego es necesario crear la combinación de cargas indicada en el Código Técnico de la Edificación, dado que el programa no la crea automáticamente.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

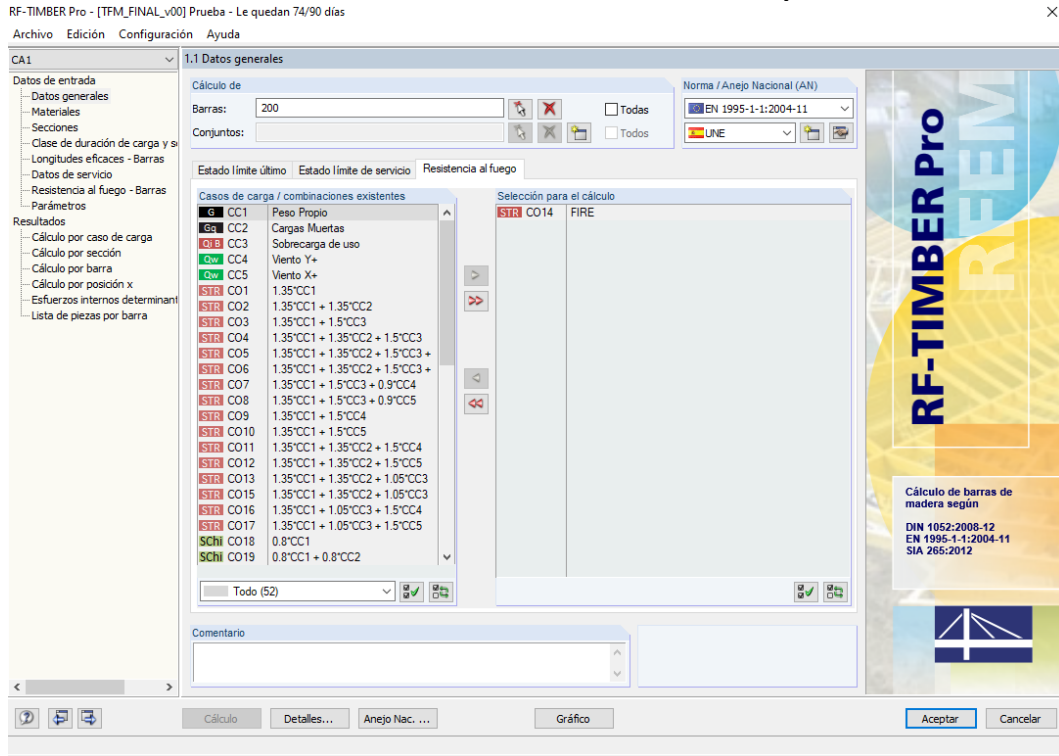


Figura 74. Datos generales, ELU fuego, en el módulo RF-Timber Pro.

Una vez tenidas en cuenta las consideraciones necesarias, se procede con el cálculo y la verificación de los resultados.

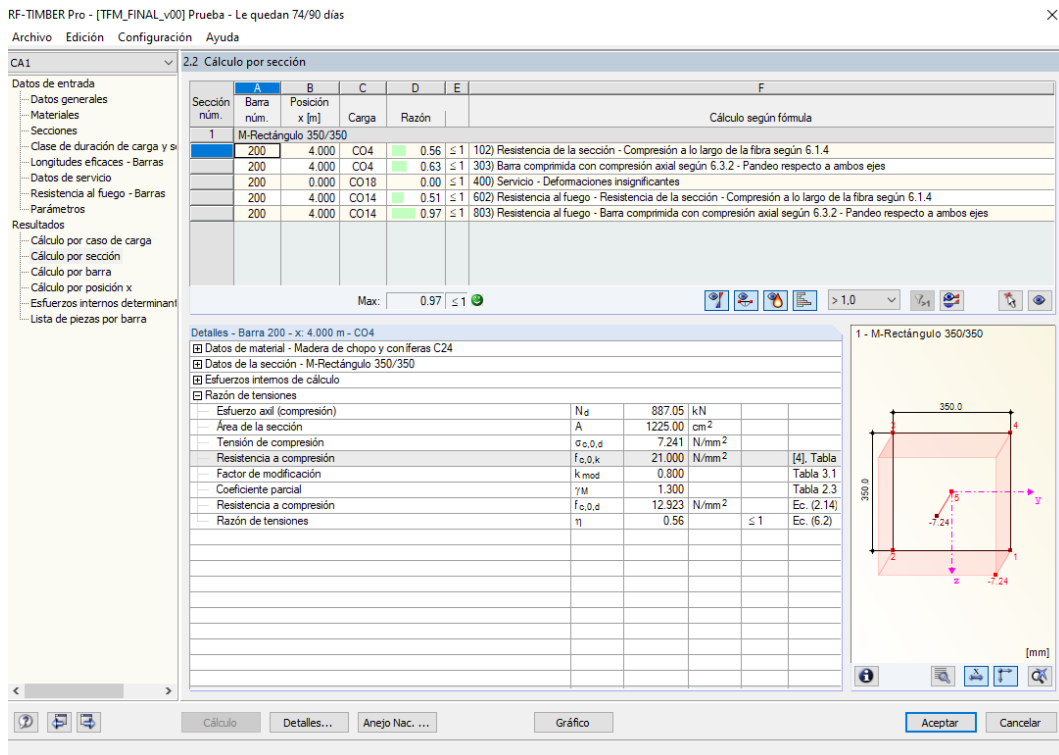


Figura 75. Resultados de la verificación de las columnas.

Como se observa en la imagen anterior, la verificación de las columnas es correcta, siendo la comprobación más restrictiva la realizada en situación de fuego.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Los cálculos realizados para la verificación de las columnas se pueden comprobar en el Anejo 3.3.9.

Los cálculos referidos a la totalidad de las columnas se pueden comprobar en el Anejo 3.3.10.

3.3.4. Verificación de los paneles de pared

En primer lugar, se verifica el cumplimiento de los desplomes horizontales. Para ello, se escoge el punto más desfavorable y se verifican las limitaciones indicadas en la normativa.

Tabla 12. Verificación del desplome horizontal.

| Dirección | Combinación | Desplome | U (mm) | Límite (mm) | ¿Cumple? |
|------------------|--------------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|
| X | Característica | Local | 0,15 | 16,00 | SI |
| | | Total | 0,34 | 24,00 | SI |
| | Casi permanente | Local | 0,13 | 16,00 | SI |
| Y | Característica | Local | 0,17 | 16,00 | SI |
| | | Total | 0,43 | 24,00 | SI |
| | Casi permanente | Local | 0,15 | 16,00 | SI |

Como se observa en la tabla anterior, el desplome horizontal cumple con amplio margen, lo que podría indicar que podrían no ser necesarios los núcleos de hormigón o, al menos, no todos ellos. Aun así, dado que el presente trabajo trata del cálculo de la estructura de madera, no se considera la optimización de los núcleos de hormigón.

Una vez verificados los desplomes horizontales, se verifican los paneles de pared a **Estado Límite Último**. Para ello, al contrario que en el caso de los paneles de piso, se verificarán todos los paneles de pared.

La verificación se realizará utilizando la envolvente creada por el programa de todas las combinaciones de cargas en ELU.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

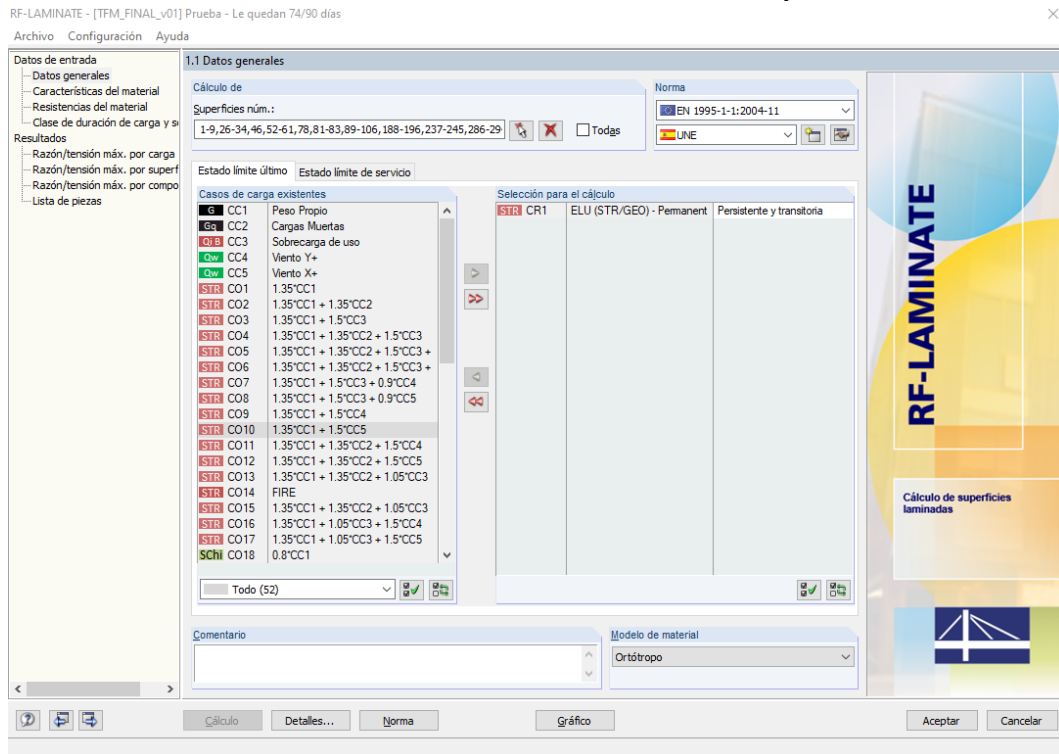


Figura 76. Datos generales, ELU, en la verificación de los paneles de pared.

Una vez introducidos los paneles y la combinación de resultados, se procede con el cálculo. En este caso, no se observa la verificación panel a panel, sino que se comprueba, para el caso de carga seleccionado, los mayores aprovechamientos obtenidos.

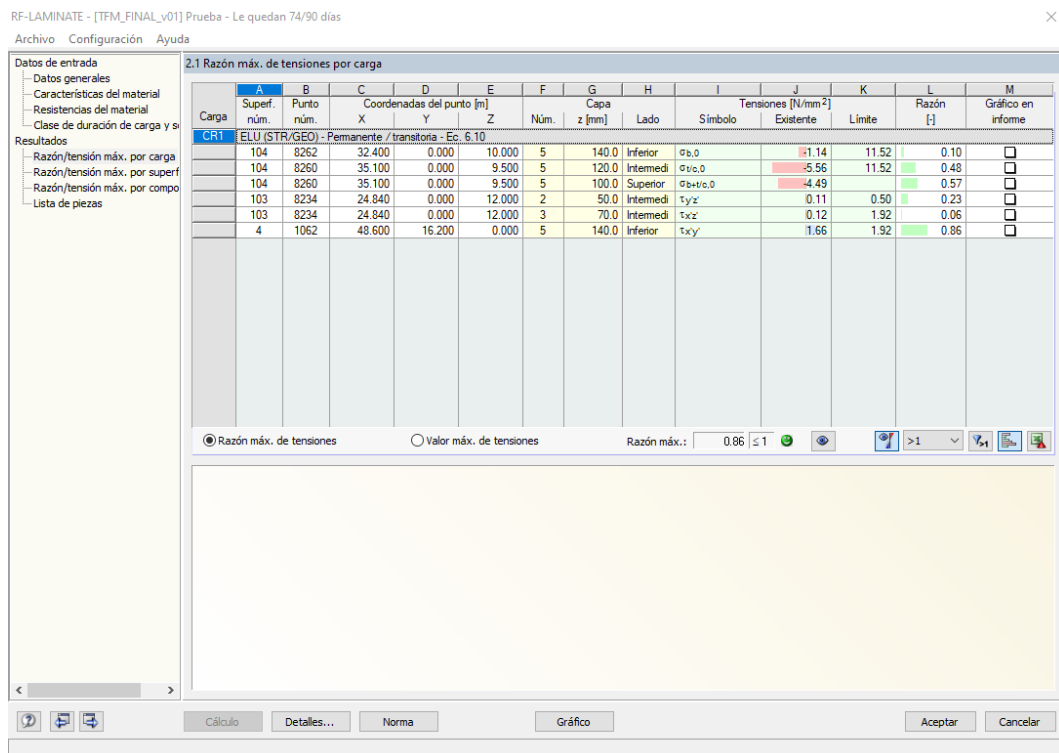


Figura 77. Resultados en Estado Límite Último de la verificación de los paneles de pared.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Como se observa en la imagen anterior, frente a la comprobación de **Estado Límite Último**, el aprovechamiento máximo que se obtiene es del 86%, con lo que se puede concluir que la verificación de los paneles de pared es correcta.

Los cálculos realizados se pueden comprobar en el Anejo 3.3.11.

3.3.5. Verificación de las vigas de acero

A la hora de verificar las vigas de acero, se utiliza el módulo adicional incluido en el programa, RF-Steel EC3, mediante el cual se verifican las vigas de acuerdo con el Eurocódigo 3, incluido el anejo nacional.

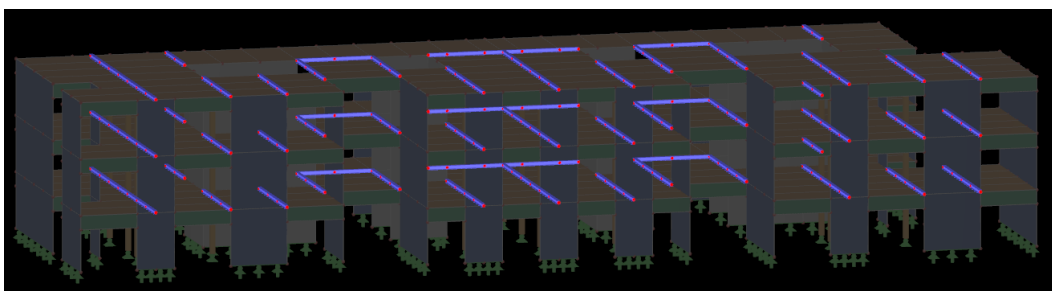


Figura 78. Vigas de acero que forman la estructura optimizada.

La verificación del **Estado Límite Último** se realiza mediante el programa de cálculo mientras que la del Estado Límite de Servicio se realiza manualmente.

Para realizar la comprobación a **Estado Límite de Servicio**, se analizan las vigas de la planta de cubierta y se observan las situaciones más desfavorables.

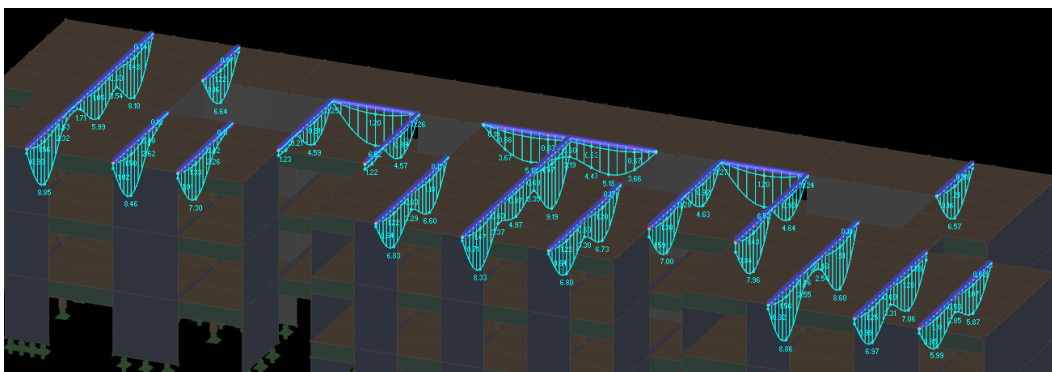


Figura 79. Deformaciones producidas por las cargas de corta duración en las vigas de acero.

Las vigas se comprueban mediante la flecha instantánea, producida por las cargas de corta duración, siendo esta menor que 1/350.

Tabla 13. Verificación del Estado Límite de Servicio en las vigas de acero.

| Flecha | Luz (m) | Flecha relativa (mm) | Límite (mm) | ¿Cumple? |
|-------------|---------|----------------------|-------------|----------|
| Instantánea | 5,40 | 2,47 | 15,43 | SI |
| Instantánea | 5,40 | 2,05 | 15,43 | SI |
| Instantánea | 5,40 | 2,43 | 15,43 | SI |

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Una vez verificado el Estado Límite de Servicio, se procede con la verificación del Estado Límite Último.

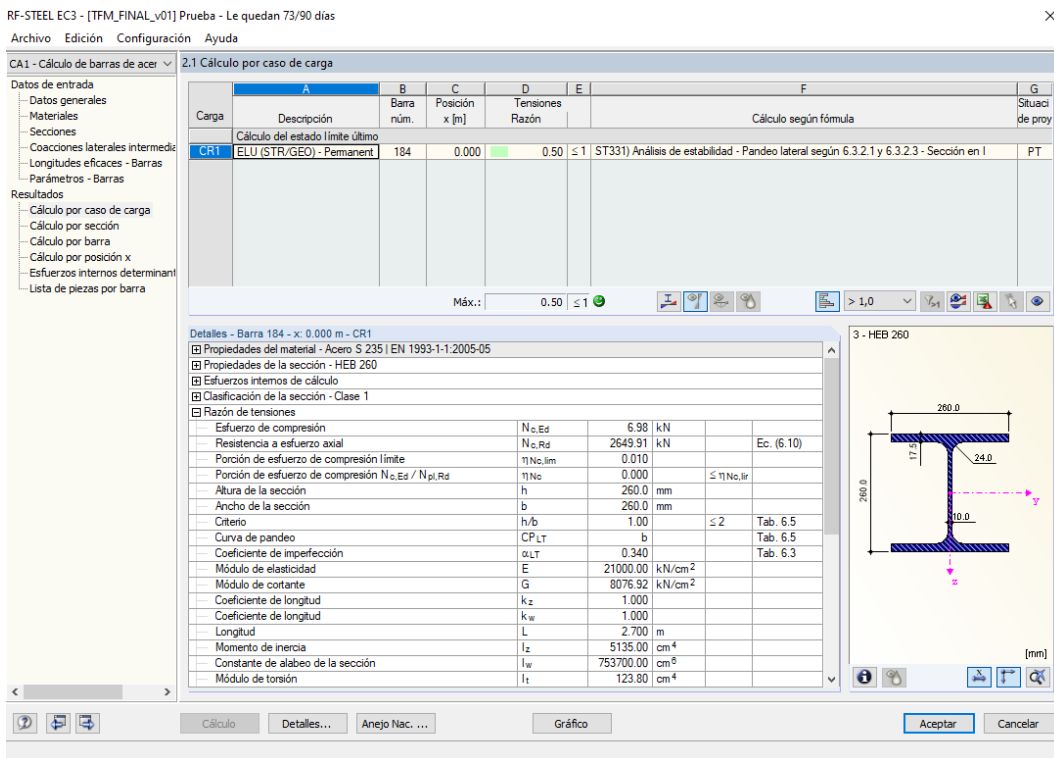


Figura 80. Resultados en Estado Límite Último de la verificación de las vigas de acero.

Como se observa en la imagen anterior, el aprovechamiento máximo obtenido mediante la combinación de resultados envolvente de Estado Límite Último es del 50%, de modo que se cumple la verificación de las vigas de acero.

Los cálculos realizados se pueden comprobar en el Anejo 3.3.12.

3.3.6. Verificación de las vigas de CLT

La verificación de las vigas de CLT se realizará mediante el mismo módulo que el resto de los elementos de CLT, el módulo RF-Laminate, a excepción del Estado Límite de Servicio que se calculará manualmente dado que este módulo no incorpora esta opción.

En primer lugar, como en las vigas de acero, se comprobará la flecha instantánea producida por las cargas de corta duración.

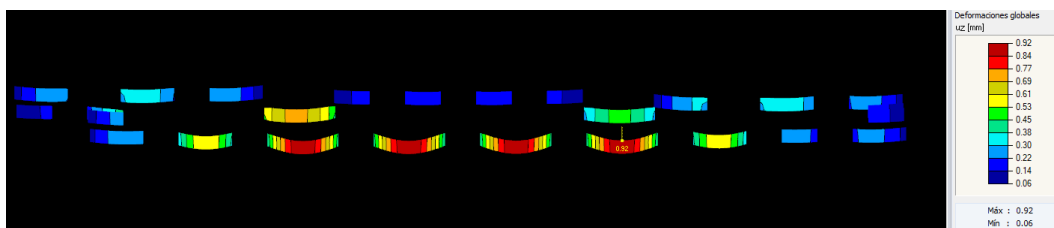


Figura 81. Deformaciones producidas por las cargas de corta duración en las vigas de CLT.

3. Cálculo de la estructura de madera completa

Observando la figura anterior, se puede comprobar como la flecha máxima obtenida en las vigas es de 0,92 mm con una luz de 5,40 metros, cuyo límite de flecha es de 15,43 milímetros, tratándose este del caso más desfavorable, con lo que el **Estado Límite de Servicio** queda.

En el caso del **Estado Límite Último**, se procede a analizar todas las vigas mediante la combinación de resultados de la envolvente de todas las combinaciones de cargas en Estado Límite Último.

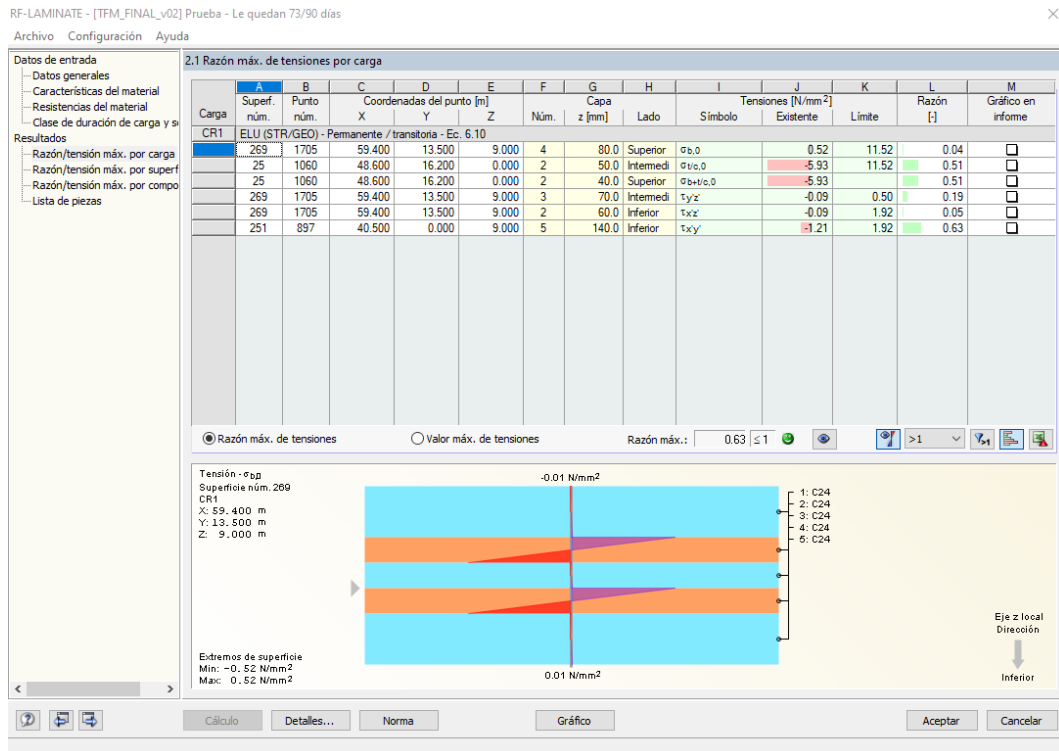


Figura 82. Resultados en Estado Límite Último de la verificación de las vigas de CLT.

Como se observa en la figura anterior, el aprovechamiento máximo es del 63%, con lo que la verificación de las vigas de CLT es correcta.

Los cálculos realizados para la verificación de las vigas de CLT se pueden comprobar en el Anejo 3.3.13.

Mediciones y presupuesto

Índice Mediciones y presupuesto

| |
|--|
| <h2>Índice Mediciones y presupuesto</h2> |
|--|

| | |
|----------------------------------|-----|
| 1. Mediciones | 99 |
| 1.1. Estructura inicial..... | 100 |
| 1.2. Estructura optimizada | 101 |
| 1.3. Comparación | 102 |
| 2. Presupuesto..... | 103 |

1.Mediciones

1.Mediciones

En este apartado se procede a medir la estructura calculada, diferenciando entre la estructura inicial que se planteaba y la estructura optimizada.

Los núcleos de hormigón no se consideran dentro del alcance de este trabajo, con lo que no se procede a su medición.

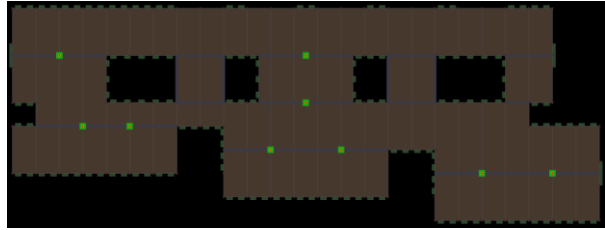
Finalmente, se comparan las mediciones obtenidas de ambas estructuras, con el fin de valorar la optimización realizada.

Las mediciones se realizan manualmente, separando entre los diferentes elementos estructurales, y realizando la comparación según el material: madera o acero.

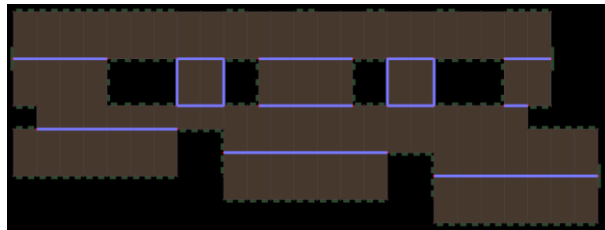
1. Mediciones

1.1. Estructura inicial

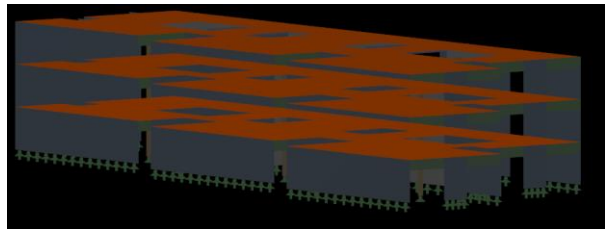
| Pilares | |
|---------------------------|----------|
| Nº | 9,00 |
| Longitud (m) | 12,00 |
| Ancho (m) | 0,35 |
| Largo (m) | 0,35 |
| Área (m ²) | 0,12 |
| Vol tot (m ³) | 13,23 |
| Peso tot (kg) | 6.615,00 |



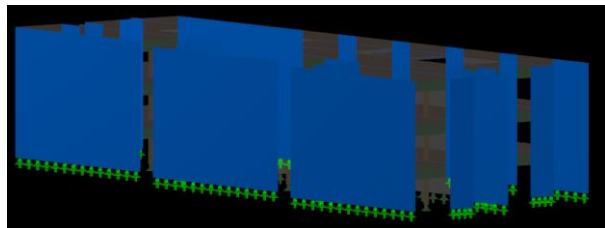
| Vigas de acero | |
|----------------|-----------|
| Long/piso (m) | 137,70 |
| Perfil | HEB 300 |
| Pisos | 3,00 |
| Long tot (m) | 413,10 |
| Peso/m (kg/m) | 117,00 |
| Peso tot (kg) | 48.332,70 |



| Forjado | |
|----------------------------|------------|
| Espesor (m) | 0,30 |
| Área tot (m ²) | 3.499,20 |
| Vol tot (m ³) | 1.049,76 |
| Peso tot (kg) | 524.880,00 |



| Pared | |
|----------------------------|------------|
| Espesor (m) | 0,14 |
| Área tot (m ²) | 1.652,40 |
| Vol tot (m ³) | 231,34 |
| Peso tot (kg) | 115.668,00 |



| Vigas CLT | |
|----------------------------|-----------|
| Espesor (m) | 0,14 |
| Área tot (m ²) | 234,90 |
| Vol tot (m ³) | 32,89 |
| Peso tot (kg) | 16.443,00 |

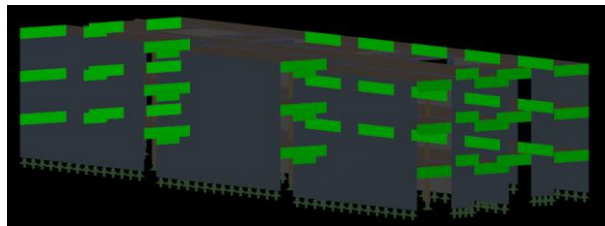
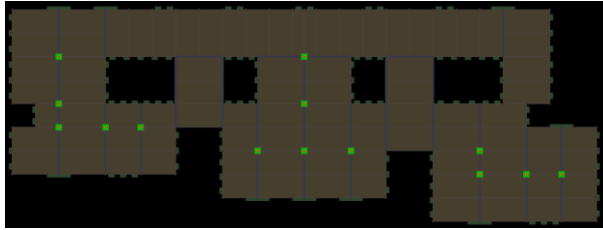


Figura 83. Mediciones de la estructura inicial.

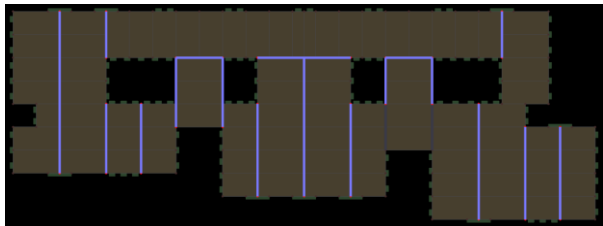
1. Mediciones

1.2. Estructura optimizada

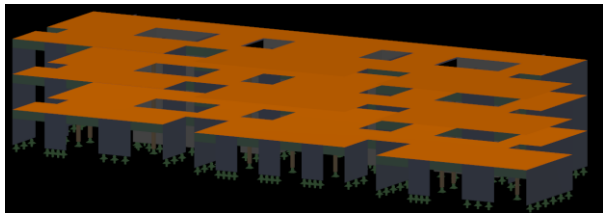
| Pilares | |
|---------------------------|-----------|
| Nº | 14,00 |
| Longitud (m) | 12,00 |
| Ancho (m) | 0,35 |
| Largo (m) | 0,35 |
| Área (m ²) | 0,12 |
| Vol tot (m ³) | 20,58 |
| Peso tot (kg) | 10.290,00 |



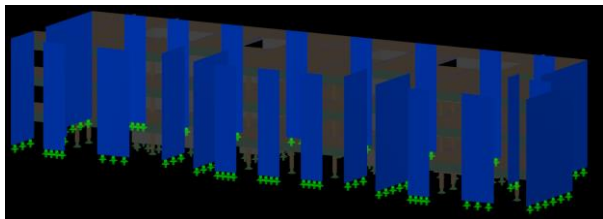
| Vigas de acero | |
|-----------------------|-----------|
| Long/piso (m) | 167,40 |
| Perfil | HEB 260 |
| Pisos | 3,00 |
| Long tot (m) | 502,20 |
| Peso/m (kg/m) | 93,00 |
| Peso tot (kg) | 46.704,60 |



| Forjado | |
|----------------------------|------------|
| Espesor (m) | 0,22 |
| Área tot (m ²) | 3.499,20 |
| Vol tot (m ³) | 769,82 |
| Peso tot (kg) | 384.912,00 |



| Pared | |
|----------------------------|-----------|
| Espesor (m) | 0,14 |
| Área tot (m ²) | 1.392,20 |
| Vol tot (m ³) | 195,05 |
| Peso tot (kg) | 97.524,00 |



| Vigas CLT | |
|----------------------------|-----------|
| Espesor (m) | 0,14 |
| Área tot (m ²) | 299,70 |
| Vol tot (m ³) | 41,96 |
| Peso tot (kg) | 20.979,00 |

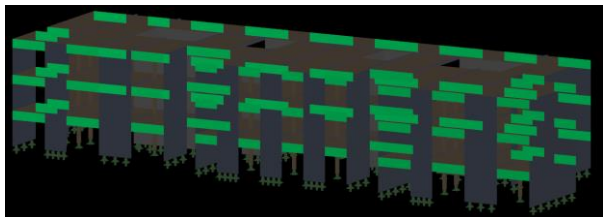


Figura 84. Mediciones de la estructura optimizada.

1. Mediciones

1.3. Comparación

Una vez realizadas las mediciones de ambas estructuras, se realiza una comparación para ver el grado de optimización que se ha realizado.

En la siguiente tabla se diferencian las mediciones pertenecientes a los elementos de madera y de acero, especificando entre si la medición corresponde a la estructura inicial o a la optimizada. La diferencia que se indica es de la medición de la estructura optimizada frente a la medición de la estructura inicial.

Tabla 14. Comparación de las mediciones de la estructura optimizada frente a la inicial.

| Elemento | Estructura | Volumen (m3) | Diferencia (%) |
|-----------|------------|--------------|----------------|
| Pilares | Inicial | 13,23 | 56% |
| | Optimizada | 20,58 | |
| Forjado | Inicial | 1.049,76 | -27% |
| | Optimizada | 769,82 | |
| Pared | Inicial | 231,34 | -16% |
| | Optimizada | 195,05 | |
| Vigas CLT | Inicial | 32,89 | 28% |
| | Optimizada | 41,96 | |
| TOTAL | Inicial | 1.327,21 | -23% |
| | Optimizada | 1.027,41 | |

| Elemento | Estructura | Peso (kg) | Diferencia (%) |
|-------------|------------|-----------|----------------|
| Vigas acero | Inicial | 48.332,70 | -3% |
| | Optimizada | 46.704,60 | |

Como se puede observar en la tabla, se ha reducido un 23% el uso de madera en la estructura optimizada. Esto demuestra la importancia de tener presente la dirección en la que se disponen los paneles, dado que esto ha supuesto una reducción del 27% en el uso de madera únicamente en los forjados.

En cuanto a las vigas de acero, en las mediciones se puede observar como en la estructura optimizada hay más metros lineales de viga que en la estructura inicial, pero, debido a la modificación del perfil a partir del cambio de disposición de los forjados y la reducción de las luces, el peso total de las vigas de acero se ha reducido un 3%.

2. Presupuesto

2. Presupuesto

En el presente apartado, al igual que en el apartado de las mediciones, se procede a realizar un presupuesto de la estructura inicial y de la estructura optimizada, y realizar una comparación entre ambas alternativas.

Para realizar el presupuesto, se ha utilizado el Generador de Precios de la empresa CYPE Ingenieros.

En el coste de los elementos de madera se incluye el coste de montaje y un porcentaje referente a los costes de los elementos que forman las uniones entre estos.

Para los elementos de madera contralaminada CLT, se ha considerado que se realiza con un acabado en calidad vista para viviendas en una cara y un acabado en calidad no vista en la otra.

A continuación, se muestran tres tablas con el presupuesto de la estructura inicial, el presupuesto de la estructura optimizada y la comparación entre ambos.

Tabla 15. Presupuesto de la estructura inicial.

| Estructura Inicial | | | | | | |
|---------------------------|-----------|----------------|-------------------|----------|------------------|-----------------------|
| Elemento | Medición | Ud | Material | Coste/Ud | | Coste total |
| Pilares | 13,23 | m ³ | Madera maciza C24 | 78,68 | €/m ³ | 1.040,94 € |
| Vigas de acero | 48.332,70 | kg | Acero S235 | 1,60 | €/kg | 77.332,32 € |
| Forjado | 3.499,20 | m ² | CLT 300 L8s-2 | 261,05 | €/m ² | 913.466,16 € |
| Pared | 1.652,40 | m ² | CLT 140 C5 | 167,87 | €/m ² | 277.388,39 € |
| Vigas CLT | 234,90 | m ² | CLT 140 L5 | 167,87 | €/m ² | 39.432,66 € |
| TOTAL | | | | | | 1.308.660,47 € |

Tabla 16. Presupuesto de la estructura optimizada.

| Estructura Optimizada | | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------------|-------------------|----------|------------------|-----------------------|
| Elemento | Medición | Ud | Material | Coste/Ud | | Coste total |
| Pilares | 20,58 | m ³ | Madera maciza C24 | 78,68 | €/m ³ | 1.619,23 € |
| Vigas de acero | 46.704,60 | kg | Acero S235 | 1,60 | €/kg | 74.727,36 € |
| Forjado | 3.499,20 | m ² | CLT 220 L7s-2 | 214,61 | €/m ² | 750.963,31 € |
| Pared | 1.392,20 | m ² | CLT 140 C5 | 167,87 | €/m ² | 233.708,61 € |
| Vigas CLT | 299,70 | m ² | CLT 140 L5 | 167,87 | €/m ² | 50.310,64 € |
| TOTAL | | | | | | 1.111.329,16 € |

2. Presupuesto

Tabla 17. Comparación entre el presupuesto de la estructura optimizada frente a la inicial.

| Elemento | Estructura | Coste (€) | Diferencia |
|----------------|------------|--------------|------------|
| Pilares | Inicial | 1.040,94 | 56% |
| | Optimizada | 1.619,23 | |
| Vigas de acero | Inicial | 77.332,32 | -3% |
| | Optimizada | 74.727,36 | |
| Forjado | Inicial | 913.466,16 | -18% |
| | Optimizada | 750.963,31 | |
| Pared | Inicial | 277.388,39 | -16% |
| | Optimizada | 233.708,61 | |
| Vigas CLT | Inicial | 39.432,66 | 28% |
| | Optimizada | 50.310,64 | |
| TOTAL | Inicial | 1.308.660,47 | -15% |
| | Optimizada | 1.111.329,16 | |

Como se observa en la tabla comparativa, mediante la optimización de la estructura se ha reducido el coste de esta un 15%.

Planos

Planos

Para la realización de los planos de la estructura se ha utilizado el programa Revit 2019, de la empresa Autodesk.

En dicho programa, se ha modelado la estructura calculada y se han obtenido planos de las diferentes plantas, así como secciones y detalles que muestran la forma en la que se disponen los elementos.

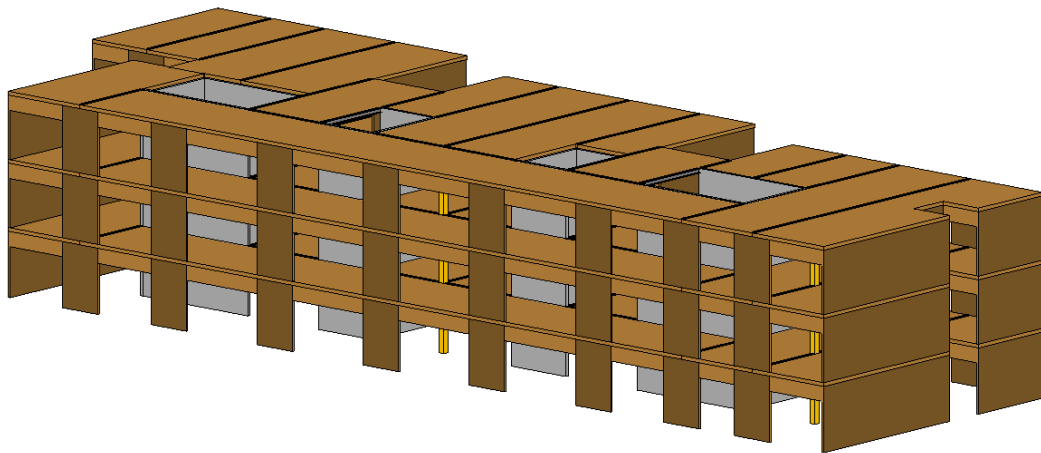


Figura 85. Estructura modelada en REVIT.

Los planos se incluyen en el Anejo 5.